



Imię i nazwisko autora rozprawy: **Łukasz Jeliński**

Dyscyplina naukowa: **Inżynieria lądowa geodezja i transport**

ROZPRAWA DOKTORSKA

Tytuł rozprawy w języku polskim: **Modelowanie liczby i wielkości uszkodzeń drogowych barier ochronnych na odcinkach dróg**

Tytuł rozprawy w języku angielskim: **Modelling the frequency and extent of damage to road safety barriers on road sections**

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>
dr inż. Marcin Budzyński	nie dotyczy

The author of the doctoral dissertation: **Łukasz Jeliński**

Scientific discipline: **Civil engineering, geodesy and transport**

DOCTORAL DISSERTATION

Title of doctoral dissertation: **Modelling the frequency and extent of damage to road safety barriers on road sections**

Title of doctoral dissertation (in Polish): **Modelowanie liczby i wielkości uszkodzeń drogowych barier ochronnych na odcinkach dróg**

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

Gdańsk, year 2024



OŚWIADCZENIE

Autor rozprawy doktorskiej: **Łukasz Jeliński**

Ja, niżej podpisany, 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:

Modelowanie liczby i wielkości uszkodzeń drogowych barier ochronnych na odcinkach dróg
do prowadzenia badań naukowych lub w celach dydaktycznych.¹

Gdańsk, dnia

.....
podpis doktoranta

Świadomy odpowiedzialności karnej z tytułu naruszenia przepisów ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz. U. z 2006 r., nr 90, poz. 631) i konsekwencji dyscyplinarnych określonych w ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. z 2012 r., poz. 572 z późn. zm.),² 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, prof. nadzw. PG, promotorem pomocniczym dr inż. Marcinem Budzyńskim.

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 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, wyrażam ~~zgode~~~~nie wyrażam zgody~~* na umieszczenie ww. rozprawy doktorskiej w wersji elektronicznej w otwartym, cyfrowym repozytorium instytucjonalnym Politechniki Gdańskiej, Pomorskiej Bibliotece Cyfrowej oraz poddawania jej procesom weryfikacji i ochrony przed przywłaszczeniem jej autorstwa.

Gdańsk, dnia

.....
podpis doktoranta

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 zwiłokrotnieć w tym celu rozpowszechnione drobne utwory lub fragmenty większych utworów.

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



STATEMENT

The author of the doctoral dissertation: **Łukasz Jeliński**

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

Modelling the frequency and extent of damage to road safety barriers on road sections
for scientific or didactic purposes.³

Gdańsk, dnia

.....
signature of the PhD student

Aware of criminal liability for violations of the Act of 4th February 1994 on Copyright and Related Rights and disciplinary actions set out in the Law on Higher Education and Science (Journal of Laws 2021, item 478),⁴ as well as civil liability, i declare, that the submitted doctoral dissertation is my own work.

I declare, that the submitted doctoral dissertation is my own work performed under and in cooperation with the supervision of DSc. PhD Eng. Kazimierz Jamroz, associate professor, the auxiliary supervision of DSc. PhD Eng. Marcin Budzyński.

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

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

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

Gdańsk, dnia

.....
signature of the PhD student

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

Gdańsk, dnia

.....
signature of the PhD student

³ Art 27. 1. Educational institutions and entities referred to in art. 7 sec. 1 points 1, 2 and 4–8 of the Act of 20 July 2018 –Law on Higher Education and Science, may use the disseminated works in the original and in translation for the purposes of illustrating the content provided for didactic purposes or in order to conduct research activities, and to reproduce for this purpose disseminated minor works or fragments of larger works.

⁴ If the works are made available to the public in such a way that everyone can have access to them at the place and time selected by them, as referred to in para. 1, is allowed only for a limited group of people learning, teaching or conducting research, identified by the entities listed in paragraph 1.



STRESZCZENIE

W ramach rozprawy doktorskiej podjęto problem funkcjonowania barier ochronnych, ze szczególnym uwzględnieniem częstości występowania oraz wielkości uszkodzeń barier na odcinkach dróg krajowych w Polsce.

Rozpoznanie tematyki funkcjonowania barier ochronnych przy drogach, oraz identyfikacja nierozwiązanych problemów, pozwoliły na sformułowanie głównego celu pracy i celów szczegółowych. Cele te obejmują opracowanie i wdrożenie do praktyki drogowej modeli matematycznych szacowania częstości występowania oraz wielkości uszkodzeń barier ochronnych, stosowanych na dwujezdniowych drogach krajowych w Polsce.

Cele rozprawy osiągnięto poprzez realizację procesu badawczego, składającego się z następujących etapów: studiów literatury, opracowania programu badań, wyboru poligonów badawczych i budowy baz danych, przeprowadzenia serii badań terenowych, poligonowych i symulacyjnych, modelowania częstości zdarzeń i wielkości uszkodzeń barier ochronnych, w zależności od najistotniejszych czynników konstrukcyjnych, drogowych, ruchowych i utrzymaniowych, badania wpływu zidentyfikowanych czynników na funkcjonowanie barier oraz opracowania polskiej metody szacowania częstości i wielkości uszkodzeń barier ochronnych na odcinkach dróg.

W końcowej części pracy przedstawiono wnioski z przeprowadzonych badań i analiz, wskazano rekomendacje dotyczące wykorzystania i wdrożenia wyników badań oraz zaproponowano kierunki dalszych badań.

Słowa kluczowe: drogi dwujezdniowe, otoczenie drogi, bariery ochronne, wypadnięcie pojazdu z jezdni, uszkodzenia, prawdopodobieństwo, modele matematyczne, metody szacowania.

ABSTRACT

The dissertation addresses the problem of the functioning of road safety barriers, with a particular emphasis on the frequency and extent of their damage on sections of national roads in Poland.

The study of the functioning of guardrails along roads, based on research conducted over the past six decades, and the identification of unresolved issues, enabled the formulation of the main objective and specific goals of the dissertation. These objectives include the development and implementation of mathematical models for estimating the frequency and extent of safety barriers damage used on dual carriageway national roads in Poland.

The objectives of the dissertation were achieved through the implementation of the research process, consisting of the following stages: literature studies, development of a research program, selection of research sites and construction of databases, conducting a series of field, test sites and simulation studies, modeling the frequency and extent of damage to road safety barriers depending on the most relevant structural, road, traffic and maintenance factors, studying the impact of the identified factors on the functioning of barriers, and developing a Polish method for estimating the frequency and extent of damage to safety barrier on road sections.

The final part of the paper presents the conclusions of the research and analysis indicates recommendations for the use and implementation of the research results, and proposes directions for further research.

Keywords: dual carriageways, roadside, safety barriers, run-off-road crashes, damage, probability, mathematical models, estimation methods.



Praca powstała w ramach projektu RID 3B „Wpływ czasu i warunków eksploatacyjnych na trwałość i funkcjonalność elementów bezpieczeństwa ruchu drogowego” pod akronimem LifeRoSE (OT3-3B/PG-IBDiM-ITS-IMP-UG), nr umowy DZP/RID-I-64/12/NCBR/2016 z dnia 26 lutego 2016 r w ramach Wspólnego przedsięwzięcia Rozwój Innowacji Drogowych, Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad.

*„Zawsze wydaje się, że coś jest niemożliwe,
dopóki nie zostanie to zrobione.”*
Nelson Mandela

Pragnę złożyć serdeczne podziękowania:

*Promotorowi, dr hab. inż. Kazimierzowi Jamrozowi, prof. nadzw. PG,
za okazałą pomoc w przeprowadzeniu badań, zaangażowanie
w proces tworzenia pracy, cierpliwość i wyrozumiałość.*

*Promotorowi pomocniczemu, dr inż. Marcinowi Budzyńskiemu,
za poświęcony czas, porady oraz wsparcie merytoryczne.*

*Koleżankom i kolegom z Katedry Inżynierii Transportowej,
za wsparcie i życzliwość okazaną mi podczas tworzenia pracy.*

*Pracę dedykuję Rodzinie, w szczególności mojej żonie Monice,
córcie Marietcie i synowi Cezaremu, których niekończąca się miłość,
cierpliwość i wsparcie sprawiają, że niemożliwe staje się możliwe.*



Spis treści

1.	WPROWADZENIE	1
1.1.	Wprowadzenie	1
1.2.	Geneza pracy	2
1.3.	Cel ogólny i zakres pracy	3
2.	STUDIA LITERATURY W ZAKRESIE FUNKCJONOWANIA BARIER OCHRONNYCH.....	5
2.1.	Droga i jej otoczenie	5
2.1.1.	Droga	5
2.1.2.	Elementy drogi.....	5
2.1.3.	Otoczenie drogi i źródła zagrożeń	7
2.1.4.	Klasyfikacja funkcjonalna dróg	7
2.1.5.	Koncepcje i kryteria kształtowania bezpieczeństwa ruchu drogowego.....	9
2.1.6.	Strefa bez przeszkód	12
2.2.	Drogowe bariery ochronne	14
2.2.1.	Urządzenia bezpieczeństwa ruchu drogowego.....	14
2.2.2.	Drogowe bariery ochronne ich rola i funkcjonowanie.....	18
2.2.3.	Klasyfikacja drogowych barier ochronnych	19
2.3.	Podstawy teoretyczne funkcjonowania drogowych barier ochronnych	22
2.3.1.	Mechanizm działania drogowych barier ochronnych.....	22
2.3.2.	Pochłanianie energii i odkształcenia.....	24
2.3.3.	Warunki stosowania.....	28
2.3.4.	Realizacja wymagań funkcjonalnych.....	29
2.4.	Uszkodzenia drogowych barier ochronnych.....	31
2.4.1.	Funkcjonalność.....	31
2.4.2.	Źródła uszkodzeń	32
2.4.3.	Klasyfikacja uszkodzeń	33
2.4.4.	Ocena funkcjonalności	35
2.4.5.	Klasyfikacja badań funkcjonowania barier ochronnych.....	38
2.5.	Przegląd i analiza modeli prawdopodobieństwa, liczby i skutków zdarzeń drogowych związanych z wypadnięciem pojazdu z jezdni	40
2.6.	Wnioski ze studiów literatury	47
3.	CELE I METODYKA PRACY	50
3.1.	Cele pracy.....	50
3.2.	Założenia podstawowe	50
3.3.	Zakres i metodyka realizacji pracy	51
4.	METODYKA BADAŃ	53
4.1.	Metody badań.....	53
4.2.	Badania terenowe.....	54
4.2.1.	Poligon badawczy.....	54
4.2.2.	Metody pozyskiwania i gromadzenia danych	55



4.2.3.	Baza danych odcinków dróg.....	56
4.2.4.	Baza danych o uszkodzeniach drogowych barier ochronnych	58
4.2.5.	Baza danych wypadków i kolizji	60
4.2.6.	Baza danych o ruchu pojazdów.....	60
4.2.7.	Baza danych szczegółowych o odcinkach dróg	62
4.3.	Badania poligonowe	65
4.3.1.	Metody pozyskiwania i gromadzenia danych	65
4.3.2.	Poligon badawczy.....	67
4.3.3.	Baza danych testów poligonowych.....	68
4.4.	Badania symulacyjne drogowych barier ochronnych	68
4.4.1.	Metoda pozyskiwania i gromadzenia danych.....	68
4.4.2.	Program badań	69
4.4.3.	Baza danych symulacji numerycznych.....	69
5.	ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ TERENOWYCH	70
5.1.	Wprowadzenie	70
5.2.	Parametry ruchu pojazdów na badanych odcinkach dróg.....	70
5.2.1.	Natężenie i struktura ruchu potoku pojazdów	70
5.2.2.	Masa pojazdów.....	71
5.2.3.	Prędkość pojazdów.....	72
5.2.4.	Kąt uderzenia pojazdu w barierę ochronną	73
5.3.	Parametry geometryczne badanych odcinków dróg	75
5.3.1.	Gęstość łuków poziomych	75
5.3.2.	Krętość odcinków dróg	75
5.3.3.	Falistość odcinka drogi	75
5.4.	Charakterystyki barier ochronnych występujących na analizowanych odcinkach dróg	76
5.4.1.	Rodzaje i udział barier ochronnych	76
5.4.2.	Odległość bariery od krawędzi jezdni	78
5.4.3.	Model utrzymania drogi	78
5.5.	Identyfikacja zdarzeń z barierami ochronnymi na analizowanych odcinkach dróg	79
5.5.1.	Charakterystyka uderzeń w barierę i rodzajów uszkodzeń barier	79
5.5.2.	Klasyfikacja zdarzeń z barierami ochronnymi	82
5.5.3.	Analiza częstości i wielkości uszkodzeń barier ochronnych	86
6.	ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ POLIGONOWYCH I SYMULACYJNYCH	89
6.1.	Wprowadzenie	89
6.2.	Analiza wyników badań poligonowych	90
6.2.1.	Oszacowanie wielkości energii kinetycznej pojazdu	90
6.2.2.	Analiza parametrów funkcjonalnych barier	92
6.2.3.	Analiza długości uszkodzeń barier	93
6.3.	Analiza wyników badań symulacyjnych pojedynczych uderzeń pojazdów w barierę	95
6.3.1.	Analiza parametrów funkcjonalnych bariery	95



6.3.2.	Analiza długości uszkodzeń	96
7.	MODELOWANIE PRAWDOPODOBIENSTWA I KONSEKWENCJI UDERZENIA POJAZDU W BARIERĘ.....	97
7.1.	Wprowadzenie	97
7.2.	Model teoretyczny opisujący proces wypadnięcia pojazdu z jezdni wraz z ich skutkami	99
7.3.	Modele prawdopodobieństwa bazujące na procesie wypadnięcia pojazdu z jezdni.....	101
7.3.1.	Koncepcja ogólna	101
7.3.2.	Prawdopodobieństwo wypadnięcia pojazdu z jezdni	102
7.3.3.	Prawdopodobieństwo uderzenia pojazdu w barierę ochronną.....	110
7.3.4.	Prawdopodobieństwo uszkodzenia bariery ochronnej	115
7.3.5.	Podsumowanie	116
7.4.	Modele długości uszkodzeń bariery ochronnej	118
7.4.1.	Metodyka	118
7.4.2.	Modele istotnych parametrów barier	118
7.4.3.	Modele szacowania wielkości uszkodzeń pojedynczych zdarzeń	120
7.4.4.	Podsumowanie	123
8.	MODELOWANIE LICZBY I WIELKOŚCI USZKODZEŃ BARIER OCHRONNYCH SPOWODOWANYCH UDERZENIEM POJAZDÓW NA ODCINKACH DRÓG	124
8.1.	Wprowadzenie	124
8.2.	Założenia	126
8.3.	Baza danych.....	127
8.4.	Analiza i wybór zmiennych zależnych i niezależnych	128
8.4.1.	Dobór miar liczby i długości uszkodzeń barier ochronnych.....	128
8.4.2.	Identyfikacja i klasyfikacja zmiennych zależnych	129
8.4.3.	Rozkłady gęstości prawdopodobieństwa zmiennych zależnych	130
8.4.4.	Identyfikacja i wybór zmiennych niezależnych	132
8.4.5.	Wybór najbardziej istotnych zmiennych niezależnych	134
8.5.	Metodyka budowy modeli matematycznych	137
8.5.1.	Procedura budowy oceny i wyboru modeli	137
8.5.2.	Zasady budowy struktury ogólnej modeli	137
8.5.3.	Dobór typu i parametrów funkcji aproksymującej	139
8.5.4.	Metoda oceny opracowanych modeli	140
8.6.	Zestawienie proponowanych modeli	144
8.6.1.	Zestawienie ogólne modeli	144
8.6.2.	Modele liczby zdarzeń	145
8.6.3.	Modele gęstości zdarzeń	148
8.6.4.	Modele koncentracji zdarzeń	151
8.6.5.	Modele długości uszkodzeń barier	154
8.6.6.	Modele gęstości uszkodzeń	157
8.7.	Podsumowanie i wnioski	161

9.	BADANIA WPŁYWU WYBRANYCH CZYNNIKÓW NA FUNKCJONOWANIE BARIER	163
9.1.	Metodyka badania wpływu wybranych czynników	163
9.2.	Analiza wpływu wybranych czynników	164
9.2.1.	Liczba zdarzeń z barierami ochronnymi	164
9.2.2.	Gęstość zdarzeń z barierami ochronnymi	168
9.2.3.	Koncentracja zdarzeń z barierami ochronnymi	173
9.2.4.	Długość uszkodzeń barier ochronnych.....	176
9.2.5.	Gęstość uszkodzeń barier ochronnych	181
9.3.	Wnioski z badań	186
10.	PROPOZYCJA UZUPEŁNIENIA METODY SZACOWANIA LICZBY ZDARZEŃ I DŁUGOŚCI USZKODZEŃ BARIER OCHRONNYCH NA ODCINKACH DRÓG	188
10.1.	Koncepcja metody szacowania liczby zdarzeń i wielkości uszkodzeń.....	188
10.1.1.	Wprowadzenie	188
10.1.2.	Założenia	188
10.1.3.	Dane wyjściowe	189
10.2.	Metoda ogólna szacowania liczby i wielkości uszkodzeń barier na odcinkach dróg	189
10.2.1.	Założenia i dane	189
10.2.2.	Szacowanie liczby zdarzeń z barierami.....	189
10.2.3.	Szacowanie długości uszkodzeń barier.....	191
10.3.	Metoda szczegółowa szacowania liczby i wielkości uszkodzeń barier na odcinkach dróg	191
10.3.1.	Założenia i dane	191
10.3.2.	Szacowanie liczby zdarzeń	192
10.3.3.	Szacowanie długości uszkodzeń	193
10.4.	Metoda szacowania prawdopodobieństwa uderzenia pojazdu i wielkości uszkodzenia bariery dla pojedynczego zdarzenia.....	194
10.4.1.	Założenia i dane	194
10.4.2.	Szacowanie prawdopodobieństwa uderzenia pojazdu w barierę.....	195
10.4.3.	Szacowanie długości uszkodzenia bariery	195
11.	PODSUMOWANIE PRACY I REKOMENDACJE	197
11.1.	Wnioski	197
11.2.	Propozycje wykorzystania wyników badań	199
11.3.	Kierunki dalszych badań.....	200
	BIBLIOGRAFIA.....	201

1. WPROWADZENIE

1.1. Wprowadzenie

Dobrze zaprojektowana i zbudowana droga pozwala kierowcy na uniknięcie zderzenia pojazdu przypadkowo wypadającego z jezdni z przeszkodami w otoczeniu drogi i bezpieczny powrót na jezdnię. Możliwe to jest w przypadku, gdy w otoczeniu drogi występuje strefa wolna od przeszkód albo w przypadku jej braku, stosuje się drogową barierę ochronną. Pierwsze bariery ochronne na drogach szybkiego ruchu pojawiły się w 1955 roku w New Jersey jako niskie bariery betonowe. Od tego czasu nastąpiło wiele zmian dotyczących pełnionych funkcji, rodzaju, konstrukcji i użytego materiału do wykonania barier drogowych. Obecnie bariery ochronne stosuje się w miejscach, gdzie ryzyko wypadnięcia pojazdu z jezdni drogi i jego skutki są największe. Bariery ochronne umieszcza się na mostach, wiaduktach, pasach dzielących jezdnie, a także przy krawędzi jezdni, gdzie znajdują się przeszkody stałe. Prawidłowo zaprojektowana i zamontowana bariera ochronna powinna spełniać wiele właściwości funkcjonalnych takich jak: bezpieczeństwo, niezawodność, sprawność, efektywność, gotowość itp.

Inżynierowie drogowi stale przeprojektowują i przebudowują drogi w taki sposób, aby spełniały wyższe standardy, zapewniały bezpieczeństwo i zwiększały mobilność użytkownikom. Przez ostatnie czterdzieści lat obejmowało to projektowanie i budowę dróg, które „wybaczą błędy” w momencie, gdy kierowca nieumyślnie wypadnie z jezdni na pobocze. W rzeczywistości istnieje jednak wiele przeszkód, które uniemożliwiają osiągnięcie pożądanego celu w zakresie bezpieczeństwa i mobilności. Podstawowym problemem są ograniczone zasoby finansowania budowy, utrzymania i ulepszania rozległych sieci dróg. W związku z tym często dochodzi do wprowadzania stopniowych ulepszeń w miarę upływu czasu i dokonywania trudnych wyborów między kosztami, bezpieczeństwem a mobilnością. Coraz częściej do podejmowania tego typu decyzji i kompromisów wykorzystuje się narzędzia do modelowania, które umożliwiają inżynierom dróg i zarządcom szacowanie kosztów, skuteczności i korzyści wprowadzenia różnych ulepszeń w zakresie bezpieczniejszego otoczenia drogi.

Wypadki drogowe spowodowane wypadnięciem pojazdu z drogi skutkują dużą liczbą ofiar śmiertelnych i ciężko rannych każdego roku na drogach w Polsce. Bariery ochronne są urządzeniem mającym na celu łagodzenie skutków tego typu zdarzeń niebezpiecznych.

Badania naukowe dotyczące problematyki konstrukcji i funkcjonowania barier ochronnych rozpoczęto w latach 60-tych ubiegłego wieku. Od tego czasu badania barier prowadzono korzystając z metod projektowania konstrukcji barier, testów statystycznych, symulacji komputerowych, dynamicznych badań laboratoryjnych: wahadło grawitacyjne, model w mniejszej skali, uderzenia wózka oraz testy zderzeniowe pojazdów. Ze względu na skomplikowane działanie konstrukcji bariery jej wyrób podlega certyfikacji po wykonaniu pozytywnego testu zderzeniowego. Testy te są znormalizowane dla każdego rodzaju bariery i rodzaju pojazdu.

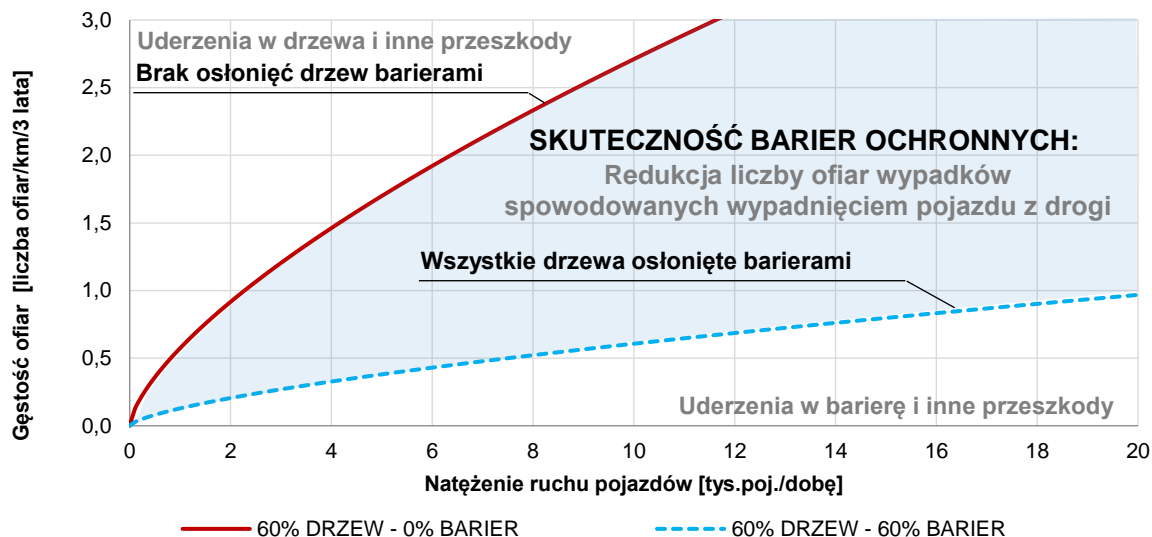
W celu optymalizacji konstrukcji bariery i parametrów jej funkcjonowania prowadzi się badania naukowe skupiające się na doborze materiału konstrukcyjnego, elementów konstrukcyjnych i rozpoznaniu zasad funkcjonowania barier różnych typów, kształtów i o różnych funkcjonalnościach. Niestety bardzo mało miejsca poświęcono miejsca badaniom uszkodzeń barier w wyniku uderzenia w nie pojazdu. Znajomość liczby i wielkości uszkodzeń istotna jest przy programowaniu i planowaniu

prac utrzymaniowych i naprawczych przez firmy utrzymaniowe i zarządy drogowe. Szacuje się, że w Polsce na drogach dwujezdniowych zainstalowano ponad 20 tys. km barier ochronnych, z tego większość na drogach ekspresowych i na autostradach. Każdego roku część z nich jest uszkodzona w wyniku uderzenia pojazdu wypadającego z jezdni. Rozpoznanie czynników wpływających na zagrożenie wypadnięcia pojazdu z drogi i opracowanie metod szacowania wielkości uszkodzeń barier są podstawowymi zagadnieniami podejmowanymi w tej pracy.

1.2. Geneza pracy

Geneza zainteresowania się tematyką drogowych barier ochronnych rozpoczęła się od udziału w konkursie, który było organizowany przez Koło Naukowe KODiK oraz Katedrę Inżynierii Drogowej i Transportowej w latach 2012 - 2013. Konkurs miał tytuł "Zidentyfikuj zagrożenie, zaproponuj rozwiązanie" [87],[88]. Wyniki konkursów umożliwiły odbycie praktyk studenckich w Polskiej i Norweskiej siedzibie firmy zajmującej się m.in. projektowaniem, budową oraz utrzymaniem urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego na sieciach dróg. Udział w badaniach, między innymi testach zderzeniowych barier drogowych, pozwolił na zdobycie wiedzy i zainspirował do napisania pracy magisterskiej [86], związanej z badaniem wpływu stosowania urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego (urządzeń brd) na bezpieczeństwo użytkowników dróg.

Wyniki badań pracy dyplomowej pozwoliły na sformułowanie daleko idących wniosków, których ilustracją może być między innymi powyższy wykres. Stosowanie drogowych barier ochronnych wpływa wyraźnie na zmniejszenie konsekwencji wypadnięcia pojazdów z jezdni (rysunek 1.1), należy jednak pamiętać, że drogowe bariery ochronne również mogą stanowić zagrożenie dla osób w pojeździe.



Rys. 1.1 Konsekwencje wypadnięcia pojazdów z jezdni na drogach jednojezdniowych

Źródło: opracowanie własne na podstawie [86]

Analizując wyniki badań prowadzonych w ramach prac dyplomowych oraz wcześniejsze konsultacje z producentami i firmami utrzymaniowymi, zidentyfikowano problemy, które zawarto w poniższych pytaniach:

- Co wpływa na liczbę zdarzeń z drogowymi barierami ochronnymi?
- Co wpływa na wielkość uszkodzeń drogowych barier ochronnych?
- Czy rodzaj stosowanej drogowej bariery ochronnej i warunki ich utrzymania mają wpływ na skutki i liczbę rejestrowanych uderzeń?

Podczas konsultacji z producentami oraz firmami zajmującymi się utrzymaniem odcinków dróg zwrócono uwagę, iż brakuje metod i narzędzi do zarządzania drogowymi barierami ochronnymi. Do takich narzędzi można zaliczyć modele matematyczne służące szacowaniu liczby i wielkości uszkodzeń drogowych barier ochronnych. Narzędzia te mogą być przydatne zarówno z punktu widzenia zarządcy, jak i firmy zajmującej się utrzymaniem. Posiadając dane dotyczące liczby czy długości uszkodzeń drogowych barier ochronnych na odcinku drogi, jednostki zajmujące się utrzymaniem są w stanie przewidzieć i wycenić potencjalne koszty wymiany, czy naprawy tych urządzeń, a tym samym przygotować atrakcyjniejszą i obciążoną mniejszym ryzykiem niedoszacowania kosztów ofertę przetargową. Z kolei z punktu widzenia zarządcy, wiedza na temat rodzaju urządzenia, wielkości uszkodzeń i ciężkości zdarzeń może pomóc w wyborze bezpieczniejszych i mniej kosztownych rozwiązań w cyklu życia obiektu.

W 2016 roku Zespół Naukowo – Badawczy Katedry Inżynierii Drogowej i Transportowej Politechniki Gdańskiej pod kierownictwem prof. Kazimierza Jamroza, rozpoczął prace badawcze w ramach projektów RID 3A (RoSE) pt. „Urządzenia bezpieczeństwa ruchu drogowego” oraz RID 3B (LifeRoSE) pt. „Wpływ czasu i warunków eksploatacyjnych na trwałość i funkcjonalność urządzeń brd”. Projekty zrealizowano w ramach wspólnego przedsięwzięcia pt. „Rozwój Innowacji Drogowych” zorganizowanych i finansowanych ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad. Głównym celem wymienionych projektów było przeprowadzenie kompleksowych badań i analiz funkcjonowania wybranych urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego w różnych warunkach drogowo-ruchowych. Istotną grupę badanych urządzeń stanowiły systemy powstrzymujące pojazd przed wypadnięciem z drogi, w tym urządzeń określonych normą PN-EN 1317 tj. osłon energochłonnych oraz drogowych barier ochronnych. Praktycznym celem tych projektów było opracowanie innowacyjnej i kompleksowej metodyki zarządzania drogowymi środkami brd, m.in. z wykorzystaniem wyników badań będących przedmiotem niniejszej rozprawy.

Udział w wymienionych projektach badawczych pozwolił rozpocząć prace badawcze będące przedmiotem niniejszej rozprawy.

1.3. Cel ogólny i zakres pracy

Zasadniczym celem realizowanej rozprawy doktorskiej jest opracowanie modeli matematycznych do wyznaczania częstości zdarzeń z barierami ochronnymi i wielkości uszkodzeń powstałych w wyniku tych zdarzeń w zależności od warunków drogowych (natężenie, struktura ruchu, standard utrzymania), geometrii drogi (krętość, liczba łuków poziomych), i rodzaju zastosowanych barier ochronnych (stalowe, linowe, betonowe) na odcinkach dróg w Polsce. Realizację przedstawionego celu pracy umożliwiły następujące badania i analizy:

- przegląd i analiza dostępnej literatury, a w jej wyniku budowa bazy wiedzy na temat funkcjonowania drogowych barier ochronnych oraz wykonanych dotychczas modeli matematycznych, odnoszących się do częstości występowania zdarzeń z nimi związanych oraz długości uszkodzeń tych barier,
- badania terenowe na odcinkach dróg krajowych w Polsce, badania poligonowe przeprowadzone w formie “crash testów” oraz badania symulacyjne z wykorzystaniem oprogramowania LS-DYNA, a na ich podstawie badanie częstości i wielkości uszkodzeń barier ochronnych na odcinkach dróg

oraz długości ich uszkodzeń w pojedynczych zdarzeniach z wykorzystaniem zaproponowanych przez autora pracy doktorskiej modeli matematycznych,

- identyfikacja najbardziej istotnych czynników wpływających na częstość występowania zdarzeń z barierami ochronnymi oraz wielkość ich uszkodzeń.

Wyniki przeprowadzonych badań wykorzystano następnie do budowy modeli opisujących częstość i wielkość uszkodzeń barier ochronnych i aplikacji ich wyników w ramach uzupełnienia metody szacowania liczby zdarzeń i długości uszkodzeń barier ochronnych na odcinkach dróg w Polsce.

Praca składa się z 11 rozdziałów:

- rozdział 1 obejmuje wprowadzenie do pracy doktorskiej oraz genezę zainteresowania podjętej tematyki badań,
- rozdział 2 zawiera przegląd i analizę dostępnej literatury, której celem było poszerzenie wiedzy na temat problematyki podjętej w ramach niniejszej dysertacji,
- rozdział 3 przedstawia cele, założenia oraz przyjętą metodykę realizacji pracy doktorskiej,
- rozdział 4 zawiera przyjęte metody badań, opis budowy i zakresu baz danych na podstawie przyjętych badań terenowych, poligonowych i symulacyjnych,
- rozdział 5 zawiera wyniki badań terenowych,
- rozdział 6 zawiera wyniki poligonowych i symulacyjnych,
- rozdział 7 przedstawia modele teoretyczne, analizę prawdopodobieństwa wystąpienia wypadnięcia pojazdu z jezdni oraz modele konsekwencji pojedynczych uderzeń pojazdu w barierę ochronną,
- rozdział 8 przedstawia procedurę oraz wyniki modelowania częstości i wielkości uszkodzeń barier ochronnych na odcinkach dróg dwujezdniowych,
- rozdział 9 zawiera wyniki badań wpływu wybranych czynników opracowanych modeli częstości i wielkości uszkodzeń na funkcjonowanie barier ochronnych,
- w rozdziale 10 przedstawiono propozycję aplikacji wyników badań uzyskanych w ramach zrealizowanej pracy do uzupełnienia metody szacowania liczby zdarzeń i długości uszkodzeń barier ochronnych na odcinkach dróg,
- w rozdziale 11 przedstawiono wnioski wynikające z przeprowadzonych badań i analiz oraz wskazano kierunki dalszych badań.

Przedmiotem badań były wybrane jednorodnie odcinki autostrad, dróg ekspresowych i głównych przyspieszonych o przekroju dwujezdniowym zlokalizowanych w obszarach zamiejskich z wyłączeniem węzłów i skrzyżowań.

Proces modelowania liczby i wielkości uszkodzeń barier ochronnych na odcinkach dróg przeprowadzono w odniesieniu do zdarzeń rejestrowanych przez służby utrzymaniowe zajmujące się procesem utrzymania drogowych barier ochronnych (montażem, naprawą, likwidacją). W szczegółowych analizach pominięto odcinki, na których występowały przebudowy lub remonty.

2. STUDIA LITERATURY W ZAKRESIE FUNKCJONOWANIA BARIER OCHRONNYCH

2.1. Droga i jej otoczenie

2.1.1. Droga

W naturze człowieka od zawsze istniała potrzeba przemieszczania się. Stale rosnące potrzeby przemieszczania się osób i towarów wpłynęły na rozwój oraz budowę pierwszych dróg [190]. Pierwsze drogi budowano już w III tysiącleciu p.n.e. w Egipcie jako ścieżki i szlaki łączące kompleksy piramid [189], następnie w Rzymie jako utwardzone drogi łączące ważniejsze miasta [193]. Od tamtej pory budowa nowych i bardziej wymagających dróg stała się olbrzymim wyzwaniem. Pierwsze drogi przeznaczone wyłącznie dla pojazdów mechanicznych, wybudowano dopiero na początku XX w. m.in. w Stanach Zjednoczonych, Niemczech oraz na terenie Włoch, które określono mianem autostrad (rysunek 2.1).

Współczesne drogi nie różnią się znacząco od tych pierwszych. Dzisiejszą drogę określa się jako budowlę wraz z drogowymi obiektami inżynierskimi, urządzeniami oraz instalacjami, stanowiącymi całość techniczno-użytkową, przeznaczoną do prowadzenia ruchu drogowego [140].



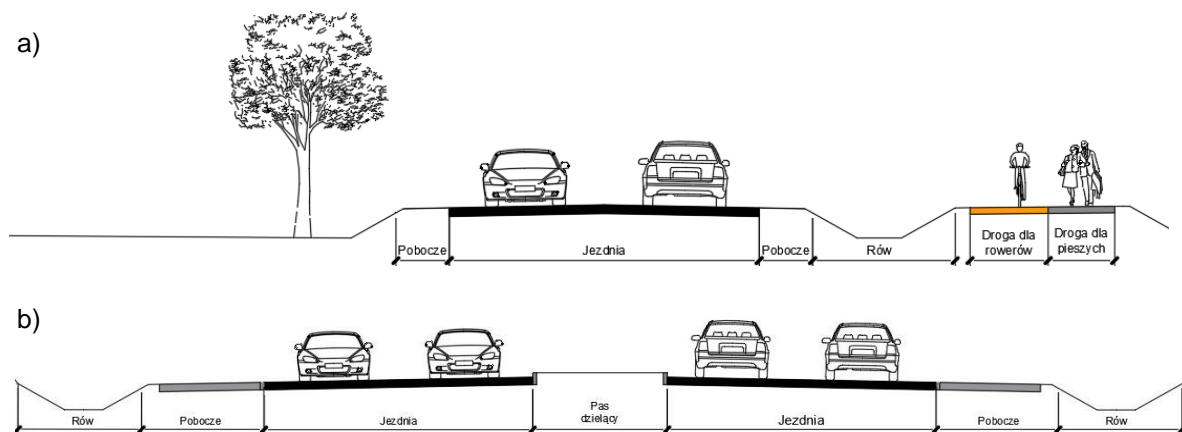
Rys. 2.1 Autostrada w Niemczech, lata 30-te XX wieku

Źródło: Library of Congress Online Catalog [171]

2.1.2. Elementy drogi

W skład drogi wchodzi trzy podstawowe elementy: jezdnie, pobocza i urządzenia odwodnienia drogi. Dodatkowo w miejscach poboczy mogą występować inne elementy, jak np. pasy zieleni, drogi dla pieszych, czy drogi dla rowerów [129]. Układ i rozmieszczenie wymienionych i pozostałych elementów drogi definiuje przekrój poprzeczny drogi.

Podstawowym elementem przekroju poprzecznego drogi jest jezdnie. Jezdnię określa się jako część drogi przeznaczonej do ruchu jednego lub wielu rzędów pojazdów [199]. W zależności od przeznaczenia drogi, jezdnie może się składać z jednego lub wielu pasów ruchu. Drogi można klasyfikować ze względu na typ przekroju poprzecznego. Wyróżnia się drogi jednojezdniowe (rysunek 2.2a) z jedną jezdnią oraz drogi dwujezdniowe (rysunek 2.2b) z dwiema jezdniami, między którymi może znajdować się pas dzielący. Podstawową funkcją pasa dzielącego na drogach dwujezdniowych jest rozdzielenie kierunków ruchu i wyeliminowanie zderzeń czołowych pojazdów. W większości krajów na świecie, w tym również w Polsce, pasy dzielące stanowią rezerwę terenu pod ewentualną budowę kolejnych pasów ruchu [105],[36],[3],[139].



Rys. 2.2 Przykłady wybranych przekrojów poprzecznych dróg: a) droga jednojezdniowa przekrój 1x2, b) droga dwujezdniowa przekrój 2x2

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [45]

Kolejnym ważnym elementem wchodzącym w skład drogi są pobocza. Pobocza zalicza się do najbliższego otoczenia drogi, które bezpośrednio przylega do jezdni. W zależności od nośności i rodzaju podłoża użytego do budowy pobocza, wyróżnia się pobocza utwardzone oraz nieutwardzone. Pobocza pełnią funkcję strefy ratunkowej powrotu pojazdu na pas ruchu (recovery zones) w przypadku błędu kierowcy [169], obszaru bezpiecznego zjazdu i zatrzymania awaryjnego pojazdu, a także w niektórych przypadkach mogą poruszać się po nich piesi (jeśli w pobliżu nie ma drogi dla pieszych).

Właściwie zaprojektowana i ukształtowana jezdnia, pobocza oraz pasy dzielące wymagają systemu odwodnienia. Pochylenie poprzeczne oraz wzdłużne wspomnianych elementów, odpowiada za prawidłową pracę części systemu odwodnienia drogi. Zadaniem systemu odwodnienia drogi jest jak najszybsze i możliwie całkowite odprowadzenie wód opadowych z nawierzchni jezdni. Skuteczne ujęcie i odprowadzenie wód opadowych zmniejsza ich wpływ na degradację nawierzchni oraz utratę kontaktu koła pojazdu z jezdnią (tzw. efektu aquaplaningu) [172],[61]. Odprowadzenie wód poza koronę drogi odbywa się przy pomocy urządzeń odwadniających i odprowadzających wodę. Najczęściej wykorzystywanym w tym celu urządzeniem do powierzchniowego odwodnienia pasa drogowego są rowy odpływowe. Rowy odpływowe stosuje się w wykopie i lokalizuje poza poboczem jezdni. Geometria rowu powinna zapewniać swobodny spływ wód po skarpie na dno rowu [41], oraz powinna być na tyle łagodnie uformowana, aby minimalizować skutki ewentualnych wypadnięć pojazdów z drogi (run-off-road accident – ROR accident), np. na łukach poziomych drogi [60].

Zdecydowana większość kierowców utrzymuje swój pojazd bezpiecznie na jezdni, jednakże badania wskazują [20],[157],[19], iż 10-18 % kierowców nieumyślnie opuszcza jezdnię. Kierowca może zasnąć, może być rozproszony lub znajdować się pod wpływem alkoholu lub narkotyków. Ponadto opony lub inna część mechaniczna pojazdu może ulec uszkodzeniu i spowodować niekontrolowany zjazd pojazdu z jezdni. Dane z analiz i raportów wypadków w różnych krajach [128],[158] wykazują, że zdarzenia związane z wypadnięciem pojazdu z drogi powodują około 30 % ofiar śmiertelnych wypadków drogowych.

W związku z powyższym projektowanie dróg nie może ograniczać się wyłącznie do geometrii jezdni, musi ono również obejmować staranny i szczegółowy projekt otoczenia drogi i jej wyposażenia.

2.1.3. Otoczenie drogi i źródła zagrożeń

Zagadnienie otoczenia dróg należy do najpoważniejszych kwestii w zakresie bezpieczeństwa ruchu drogowego i od lat 60' prowadzone są badania dotyczące identyfikacji zagrożeń w otoczeniu dróg oraz skuteczności stosowanych rozwiązań [37]. Do źródeł zagrożeń najczęściej występujących w otoczeniu dróg zalicza się m.in. [20]:

- brak lub zły stan techniczny poboczy odpowiedzialnych za zachowanie strefy umożliwiającej powrót pojazdu na jezdnię,
- drzewa przy krawędzi jezdni (w odległości do 3 metrów od krawędzi jezdni stwarzające największe zagrożenie, szczególnie w rejonie łuków w planie oraz skrzyżowań i zjazdów)
- strome skarpy rowów odwadniających,
- elementy infrastruktury drogowej, które nie są podatne na uderzenie (słupki znaków, stalowe, betonowe lub drewniane słupy, maszty, podpory itp.).

Obecność elementów mogących stanowić zagrożenie w otoczeniu drogi, wpływa zarówno na liczbę wypadków, jak i stopień obrażeń z nimi związanych [45]. Głównym efektem występowania zagrożeń bezpieczeństwa w otoczeniu dróg nie jest prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku, ale jego ciężkość [5]. Ciężkość wypadków związanych z otoczeniem dróg wynika przede wszystkim z nieprawidłowo zaprojektowanej lub eksploatowanej infrastruktury drogowej.

Liczne badania [5],[24],[186],[197],[102] dotyczące wpływu wybranych czynników drogowych na poziom bezpieczeństwa wskazują, że wpływ otoczenia drogi i różnych elementów, które na to otoczenie się składają (roślinność, pobocza, skarpy, rowy odwadniające, słupy, znaki, obiekty inżynierskie itp.) jest bardzo istotny.

W wyniku wypadnięcia pojazdu z drogi ze stromej skarpy, rośnie prawdopodobieństwo wywrócenia i obrotu pojazdu [31], oraz prawdopodobieństwo zaistnienia ciężkich obrażeń u osób znajdujących się w pojeździe [95]. Badania wskazują, iż skarpy o łagodniejszym pochyleniu zmniejszają liczbę, i koszty wypadków nawet o połowę [37],[166]. W dodatku pojawiające się stałe przeszkody w otoczeniu drogi, zmniejszają zakres strefy ratunkowej, odpowiedzialnej za powrót pojazdu na jezdnię. Odległość między krawędzią jezdni a przeszkodą wpływa na prawdopodobieństwo zderzenia się z przeszkodą [45]. Ponadto, jeśli przeszkoda znajduje się po zewnętrznej krawędzi łuku poziomego drogi, prawdopodobieństwo zdarzenia drogowego może wzrosnąć trzykrotnie [127],[32].

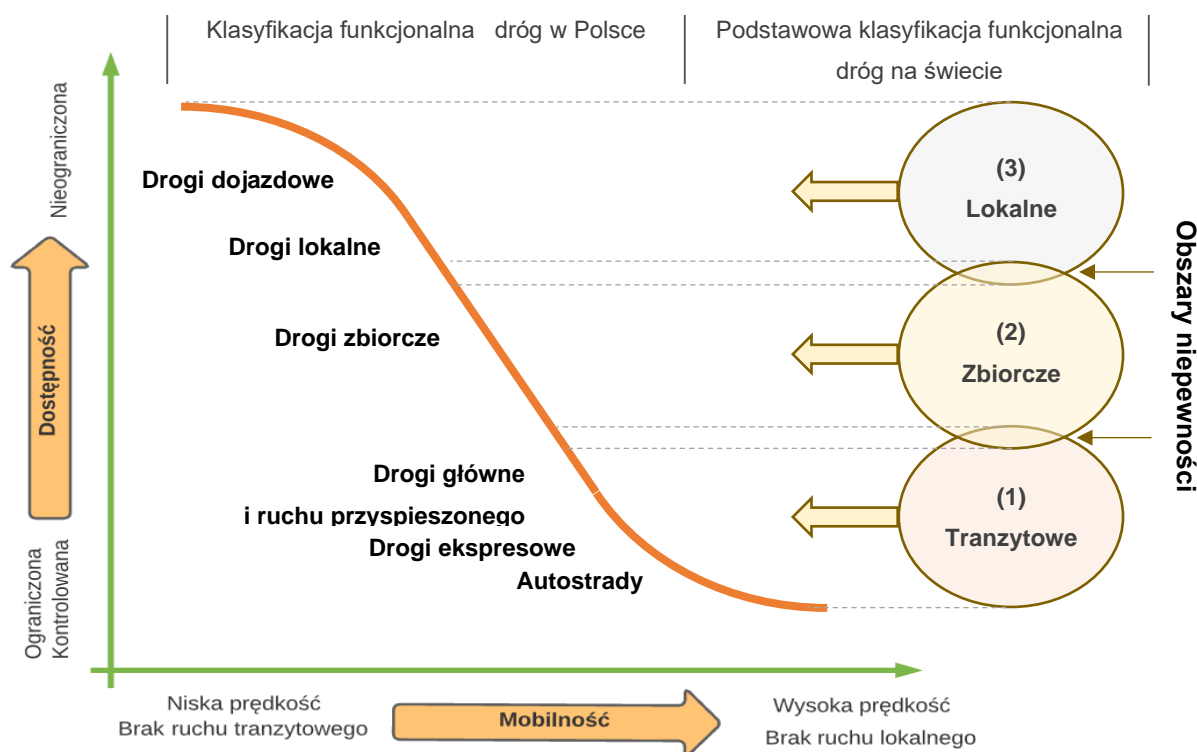
Elementem otoczenia drogi, które zabezpiecza przed uderzeniem w przeszkodę lub uniemożliwia wypadnięcie pojazdu z jezdni przy wysokich skarpach nasypu lub wykopu jest drogowa bariera ochronna. Urządzenie to pomimo swojej funkcji ochronnej, również stanowi przeszkodę, a w przypadku źle dobranej lokalizacji, parametrów funkcjonalnych i konstrukcyjnych może być poważnym zagrożeniem [20].

2.1.4. Klasyfikacja funkcjonalna dróg

Drogi klasyfikuje się przede wszystkim ze względu na funkcje jakie powinny spełniać. Sieć dróg powinna zapewnić przede wszystkim funkcję bezpiecznego przemieszczania się oraz dostępu do pożądaných miejsc. Zgodnie z założeniami, podstawowa klasyfikacja dróg bazuje na dwóch kryteriach: mobilności oraz

dostępności [107]. Znaczenie wymienionych cech różni się w zależności od typu drogi (rysunek 2.3). Zależność mobilność-dostępność zmienia się odwrotnie proporcjonalnie od typu drogi.

System klasyfikacji funkcjonalnej dróg na świecie wyróżnia trzy podstawowe typy dróg [188],[3]: (1) tranzytowe, o znaczeniu nadrzędnym (krajowym) i podrzędnym (regionalnym), których podstawową funkcją jest zapewnienie ruchu tranzytowego; (2) zbiorcze, z funkcją połączenia ruchu lokalnego z ruchem tranzytowym, oraz (3) lokalne, których podstawową funkcją jest zapewnienie dostępu do nieruchomości. Klasyfikacja dróg w Polsce wyróżnia siedem klas funkcjonalnych dróg [118] odpowiadających podstawowej klasyfikacji dróg na świecie (rysunek 2.3).



Rys. 2.3 Klasyfikacja podstawowa dróg w zależności od kryterium mobilności oraz dostępności dróg w Polsce i na świecie

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [49],[143]

Droga przypisana do jednej z klasy musi spełniać wymagania techniczne oraz użytkowe określone dla danej klasy drogi. Klasę drogi charakteryzują przyjęte dla niej parametry, do których zalicza się m.in. liczbę i szerokość jezdni, poboczy, pasów ruchu, geometrię drogi, prędkość dopuszczalną poruszających się pojazdów oraz natężenie i charakter odbywającego się ruchu [168].

Ponadto, aby sieć drogowa była „funkcjonalnie zhierarchizowana”, konieczne jest zapewnienie właściwej wydajności (przepustowości) na każdym poziomie drogi tak, aby różne rodzaje ruchu (np. przejazd, wjazd na pobocze i parkowanie), a także różni użytkownicy ruchu (np. kierujący pojazdami samochodowymi, piesi i rowerzyści) mogli swobodnie z niej korzystać [66]. Stąd też monitorowanie i ocena wydajności sieci dróg jest ważnym elementem, którego nie może zabraknąć na etapie planowania, projektowania i eksploatacji dróg.

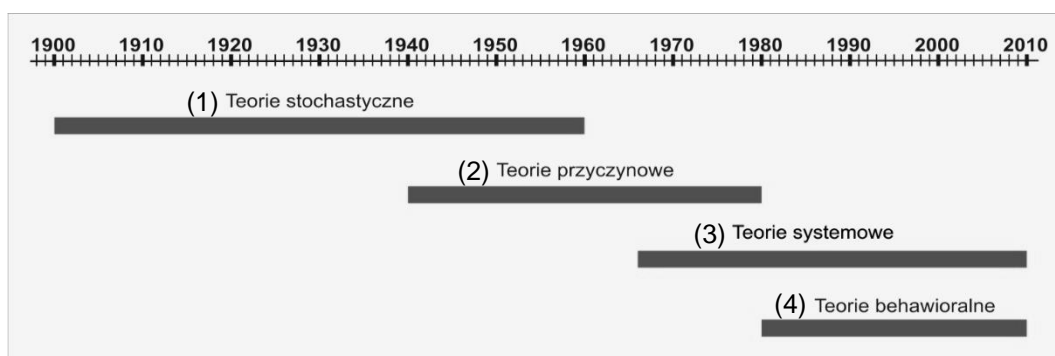
Prawidłowo zaprojektowany układ oraz otoczenie drogi danej kategorii i klasy, powinny wskazywać użytkownikom, w jaki sposób się po nich poruszać. Dlatego też rodzaj drogi – bez znaczenia czy jest to

autostrada lub droga lokalna, musi być rozpoznawalna dla kierowcy bez wyraźnych znaków czy sygnałów przy drodze. Szerokość drogi, liczba pasów ruchu, oznakowanie poziome, geometria drogi, itp. powinny dostarczać kierowcy wystarczających wskazówek, sygnalizujących odpowiednią prędkość, sposób poruszania się pojazdów oraz wskazywać, jakiego typu użytkowników można się na niej spodziewać [157]. Przykładem wprowadzenia wyraźnie rozpoznawalnych kategorii dróg jest Holandia. W ramach wprowadzonych w 1997 roku zasad tzw. „Zrównoważonego Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego” (Sustainably Safe Traffic) wprowadzono podział na trzy kategorie dróg, z których każda ma swoją własną funkcję (drogi tranzytowe, drogi rozprowadzające, drogi lokalne) [38].

Przedstawiony proces informowania kierowcy o odpowiednich warunkach jazdy jest konieczny, aby uzyskać tzw. efekt „Samoobjaśniającej Drogi” (Self Explaining Road) [176].

2.1.5. Konceptje i kryteria kształtowania bezpieczeństwa ruchu drogowego

Wraz z rozwojem motoryzacji i zwiększającej się liczby wypadków drogowych i ich ofiar zaczęły rozwijać się koncepcje kształtowania systemu bezpieczeństwa ruchu drogowego (brd). Wśród wielu z nich możemy wyróżnić trzy główne koncepcje: podejścia przyczynowego, działaniowego oraz czterech er. [82]. Koncepcje te traktowane są, jako różne podejścia do prowadzenia działań na rzecz poprawy bezpieczeństwa ruchu drogowego.



Rys. 2.4 Kolejność powstawania i okres rozwijania podstawowych grup teorii bezpieczeństwa ruchu drogowego

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [82]

Koncepcja podejścia przyczynowego polega na podejmowaniu działań prewencyjnych w zależności od tego, jak postrzegano wypadki drogowe i ich przyczyny. Na przestrzeni lat wypracowano wiele teorii wypadków drogowych (rysunek 2.4). Wyróżniono cztery podstawowe grupy teorii wypadków drogowych [80],[81]: (1) stochastyczne, opisujące wypadek jako zdarzenie losowe, w którym zachowanie człowieka nie wpływa na ich występowanie; (2) przyczynowe, zakładające, że przyczyna wypadku leży po stronie człowieka, a dokładne poznanie łańcucha zdarzenia pomoże w eliminacji kolejnych wypadków; (3) systemowe, zakładające że popełniane błędy kierowców, a ich efekcie wypadki drogowe są konsekwencją źle zaprojektowanego systemu; (4) behawioralne, w których wypadek drogowy zależy także od indywidualnej oraz społecznej oceny i akceptacji podejmowanego przez ludzi ryzyka.

W kontekście kreowania bezpiecznych dróg ważne jest prawidłowe podejście do zagadnienia bezpieczeństwa ruchu drogowego. Złożony charakter zjawiska powstawania wypadków drogowych

sprawił, że działania prewencyjne i kształtujące brd zaczęto rozwijać w kierunku systemowego podejścia do zagadnień bezpieczeństwa ruchu drogowego [80],[81]. Podejście systemowe skupia się głównie na rozwoju sposobów działań, środków oraz mechanizmów eliminujących lub zmniejszających przyczyny wypadków.

Wyróżnia się trzy teorie systemowego podejścia do zagadnień brd: (1) generalną, (2) epidemiologiczną i (3) energetyczną [82],[65],[69]. Uszczegółowieniem każdej z teorii podejścia systemowego są modele wypadków, które przedstawiają sekwencje zdarzeń lub wzajemnie powiązanych czynników wpływających na powstanie wypadku. W modelowaniu bezpieczeństwa ruchu drogowego korzysta się z wielu modeli zapożyczonych z innych dyscyplin lub stworzonych na potrzeby własne.

Większość rozwijanych dotychczas podejść w ramach teorii systemowych, mówi o wyeliminowaniu wypadków drogowych poprzez modyfikacje techniczne elementów tego systemu [82]. Prekursorem w rozwoju badań nad podejściem systemowym w zagadnieniach transportowych uważa się Haddona [71], który w roku 1972 sformułował model poszczególnych faz wypadku i głównych elementów systemu wzajemnego oddziaływania w ruchu drogowym. Według Haddona wypadki są rezultatem nieprzystosowania w interakcji elementów składowych systemu CPD (człowiek, pojazd, droga). Zaproponowane przez Haddona macierz czynników doczekała się wielu interpretacji i zastowań w brd,m.in. Jamroz w swojej pracy [82], zaproponował rozwinięcie systemu o element ruchu oraz otoczenia drogi do CPDRO (człowiek, pojazd, droga, ruch, otoczenie). Zgodnie z tą teorią i jej pochodnymi, nie można wskazywać jednego elementu systemu jako ważniejszego niż inne. Stąd też, pojawiło się stwierdzenie [84], że najwyższy poziom bezpieczeństwa można uzyskać, gdy „pięciogwiazdkowy kierowca” wsiądzie do „pięciogwiazdkowego pojazdu” i będzie poruszał się po „pięciogwiazdkowej drodze”.

Kierunki przeciwdziałań aktywizacji zagrożeń spowodowanych nieprawidłowym funkcjonowaniem poszczególnych elementów systemu transportu drogowego rozwijane są w epidemiologicznym podejściu do bezpieczeństwa ruchu drogowego [83]. Przykładem jest system barier i zabezpieczeń prezentowany w ramach zintegrowanego systemu bezpieczeństwa transportu drogowego ZEUS [97]. Zgodnie z wizją Hollnagel'a [75] bariery są definiowane jako przeszkody lub zapory, które chronią przed możliwością zaistnienia zdarzenia lub zmniejszenia jego niepożądanych skutków i dzielą się na:

- niematerialne, których ochronę stanowi znajomość i przestrzeganie reguł, zasad, procedur i przepisów prawa,
- materialne, umożliwiające fizyczną obronę przed zdarzeniami niebezpiecznymi lub ograniczające konsekwencje tych zdarzeń, do których zalicza się m.in. analizowane w niniejszej dysertacji drogowe bariery ochronne,
- symboliczne, informujące uczestnika ruchu drogowego (np. poprzez stosowanie znaków i sygnałów na drogach) o zbliżającym się lub przebywaniu w miejscu o dużym potencjale zagrożenia,
- funkcjonalne, umożliwiające wstrzymanie działań systemu poprzez stosowanie elementów uspokojenia ruchu, czy automatycznych urządzeń nadzoru nad zachowaniami uczestników ruchu w postaci fotorejestatorów prędkości.

Rozwój badań ukierunkowanych wg podejść systemowych dał namiastkę narodzin kolejnej z koncepcji kształtowania systemu bezpieczeństwa ruchu drogowego, koncepcję podejścia działaniowego. W ramach koncepcji, prócz rozwoju podejścia systemowego, mówi się również o rozwoju zrównoważonego podejścia do zarządzania brd. Jako ich przykład można zaprezentować doświadczenia wdrażania koncepcji szwedzkiego programu Wizja Zero [178],[164] i holenderskiego programu Zrównoważone Bezpieczeństwo Ruchu Drogowego [187],[12].

Podstawą filozofii Wizji Zero jest założenie, iż w perspektywie długofalowej nikt nie powinien ponosić ciężkich obrażeń ani ginąć w wypadkach drogowych [73]. Warunkiem przyjęcia tego podejścia jest jednak zupełna zmiana postrzegania problemu zagrożeń w ruchu drogowym i przyjęcie metodyki „Safe System” (Bezpieczny System) [132],[52],[109], którą zaliczyć można do koncepcji „trzech er”. Warunkiem koncepcji „trzech er” jest prowadzenie działań dotyczących zmniejszenia zagrożeń poprzez trzy grupy działań zwanymi erami: 1) działania infrastrukturalne i standardy bezpieczeństwa, 2) systemy zarządzania bezpieczeństwem i 3) rozwój kultury bezpieczeństwa.

W ostatnich latach podejście do systemu „Safe System”, opracowane początkowo w Szwecji i Holandii, zostało przyjęte przez wiele krajów, w tym również przez Polskę, jako część strategii bezpieczeństwa ruchu drogowego. Podejście to obejmuje wdrożenie szeregu środków w celu zarządzania pojazdami, infrastrukturą drogową i jej użytkownikami oraz prędkością pojazdów [174]. Środki te ukierunkowane są na zmniejszenie obrażeń ciała osób biorących udział w zdarzeniach drogowych.

Podejście opiera się na trzech kluczowych koncepcjach [165]:

- Human Behaviour (Zachowania człowieka) – Ludzie popełniają błędy, a system transportu drogowego musi to uwzględnić.
- Human Frailty (Ludzkie słabości) - Skończona zdolność ludzkiego ciała do wytrzymania siły uderzenia, jaką może przyjąć ludzkie ciało bez ryzyka śmierci bądź ciężkiego urazu.
- Forgiving Systems (Wybaczący system) - Drogi, pojazdy, prędkości, którymi się poruszamy oraz stosunek użytkowników dróg do siebie nawzajem, muszą być bardziej wyrozumiałe na błędy popełniane przez kierowców.

Pochodne omawianych koncepcji, spełniające założenia strategii „Safe System” to koncepcje ukierunkowane bezpośrednio na drogę i otoczenie w jakim się znajduje. Do koncepcji tych zaliczyć można dwie najważniejsze:

- „Samoobjaśniającej drogi” (Self explaining road) [176],
- „Wybaczącej drogi” (Forgiving roadsides) [47].

Drogi wybaczące i samoobjaśniające to dwie różne koncepcje projektowania dróg, które łączy jeden cel: zmniejszenie liczby wypadków na całej sieci drogowej.

W artykule opublikowanym w 1995 roku Theeuwes i Godthelp [176], pierwsi przedstawili koncepcję „Samoobjaśniającej Drogi”, jako wiodącą zasadę projektowania dróg. Podstawą koncepcji jest idea, aby projekt i układ drogi wywoływał u kierowcy zachowanie, które jest odpowiednie dla typu drogi na której się znajduje [175]. Za podstawę uzyskania efektu „Samoobjaśniającej Drogi” odpowiada ciągłość oraz płynne przejścia między elementami przekroju poprzecznego drogi. Oznacza to, że realizacja koncepcji możliwa jest wyłącznie w przypadku posiadania spójnych i jednolitych procedur podczas projektowania

dróg i poboczy, a układ otoczenia drogi dostarcza użytkownikom wystarczających wskazówek, które „wyjaśnia” panujące warunki i zasady poruszania się po odcinku drogi.

Drugą zasadą prowadzącą do bezpiecznego projektowania drogi jest koncepcja „drogi wybaczącej” (Forgiving Roadside). Koncepcja wybaczącej drogi została wykorzystana już w 1967 roku w jednym z wytycznych dotyczących zasad wymiarowania stref przydrożnych, znanych jako „Żółta książka” (ang. „Yellow book”). Zarządcy dróg w Ameryce stworzyli jako jedni z pierwszych metody wymiarowania stref bez przeszkód, które w przypadku opuszczenia przez pojazd jezdni, zapewniały najłagodniejszy z możliwych przebieg wypadku, zwiększając tym samym bezpieczeństwo podróżnych [141].

Podobnych wytycznych zaczęto używać przy projektowaniu dróg w Europie [180]. W ramach koncepcji „dróg wybaczących” zaczęto wprowadzać tzw. „strefy bez przeszkód” (clear zone), w których przeszkody w najbliższym otoczeniu drogi zostają usunięte, zmodyfikowane, bądź osłonięte przez dodatkowe urządzenia bezpieczeństwa, jakim są drogowe bariery ochronne.

Przykładem zastosowania omawianych teorii i podejść jest opracowana w roku 2008 wizja NR2C - Globalna koncepcja europejskiej infrastruktury do roku 2040 [54]. Wyróżnia ona pięć kluczowych pojęć reprezentujących oczekiwane cechy drogi przyszłości: niezawodna, ekologiczna, bezpieczna i inteligentna oraz przyjazna użytkownikom. Na podstawie szeroko zakrojonych badań przeprowadzonych wśród uczestników ruchu drogowego, NR2C określiło bezpieczne i przyjazne dla środowiska koncepcje budowy i utrzymania infrastruktury, które zostały zarekomendowane do dalszych badań. Wśród koncepcji pojawiła się m.in. wizja „zintegrowane bariery”, ukierunkowana na tworzenie wielofunkcyjnych hybrydowych urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego, do których zalicza się np.: drogowe bariery ochronne zintegrowane z ekranem akustycznym.

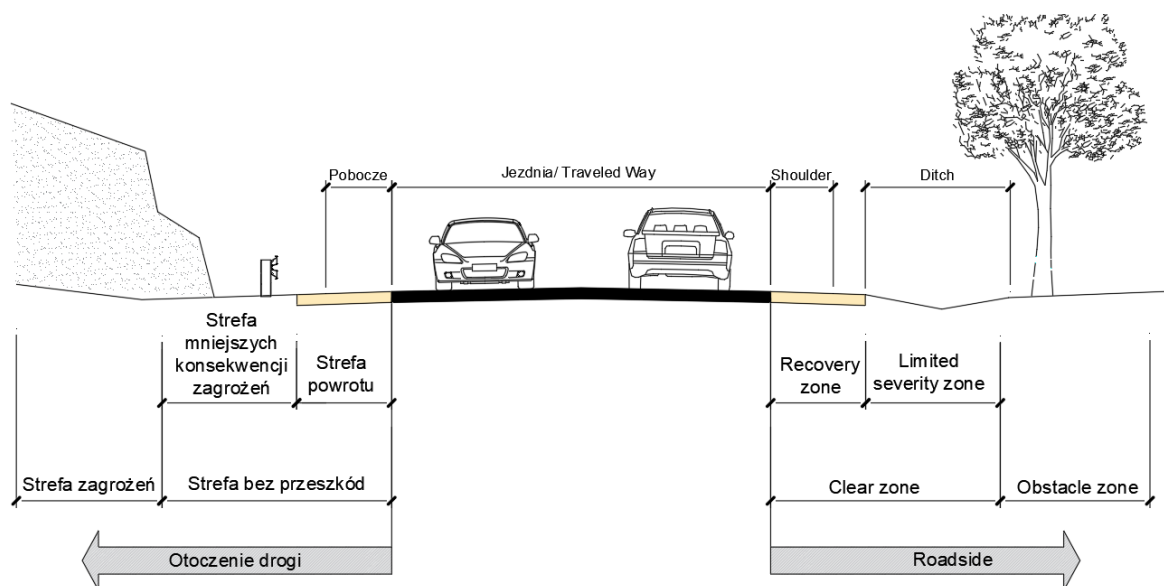
2.1.6. Strefa bez przeszkód

Podstawowym elementem drogi wybaczącej błędy są „strefy bez przeszkód” lub inaczej nazywane „strefy bezpieczeństwa” (clear zone). Strefą bez przeszkód, określa się pozbawiony przeszkód, stosunkowo płaski obszar poza krawędzią jezdni, który umożliwi kierowcy bezpieczne zatrzymanie się lub odzyskanie kontroli nad pojazdem opuszczającym jezdnię. Obszar ten może się składać z utwardzonego pobocza, łagodnych skarp i/lub powierzchni wolnej od przeszkód.

Strefę bez przeszkód ze względu na jej przeznaczenie można podzielić na (rysunek 2.5):

- 1) Strefę powrotu (Recovery zone) z płaskim i łagodnie nachylonym poboczem, który zapewni kierowcy miejsce i możliwość odzyskania kontroli nad pojazdem w przypadku jego wypadnięcia z jezdni.
- 2) Strefę mniejszych konsekwencji zagrożeń (Limited severity zone), która w przypadku braku odzyskania kontroli nad pojazdem w strefie powrotu, zapewni łagodny w skutkach przejazd pojazdu w przez pozostały obszar strefy lub zatrzymanie pojazdu.

Strefa bez przeszkód ze względu na swoje przeznaczenie powinna posiadać wymaganą szerokość. Przyjmuje się, że szerokość strefy bez przeszkód powinna zależeć od natężenia ruchu, prędkości i powinna być szersza na tych odcinkach (np. zewnętrzna część łuków poziomych), gdzie istnieje większe prawdopodobieństwo wypadnięcia pojazdu z jezdni [141]. Wymagana szerokość strefy wolnej od przeszkód stanowi podstawę do usuwania lub przenoszenia przeszkód z otoczenia drogi.



Rys. 2.5 Przykład zastosowania strefy wolnej od przeszkód

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [165] [179]

Strefy bezpieczeństwa to najbardziej oczywiste i najprostsze rozwiązanie, które znacząco poprawia bezpieczeństwo dróg, jednak wprowadzanie ich wymaga rozważenia wielu aspektów technicznych, a także ekonomicznych, behawiorystycznych, a nawet kulturowych. Słusznym stwierdzeniem ukierunkowanym na budowę „stref bez przeszkód” jest cytat [177] „droga powinna być tak zaprojektowana i wybudowana, aby kierowca który popełnił minimalny błąd nie był karany wyrokiem śmierci z natychmiastowym wykonaniem”. Stąd też priorytetem każdego projektanta powinno być tworzenie „dróg wybaczących” na tyle, na ile jest to rozsądnie wykonalne. Aby osiągnąć ten cel, wprowadza się następujące rozwiązania, przy czym pierwsze jest najbardziej pożądane, a ostatnie najmniej [183]:

- 1) usunięcie niebezpieczeństwa: jeżeli jest to możliwe, niebezpieczeństwo powinno być usunięte, aby całkowicie zniwelować ryzyko z nim związane;
- 2) przeprojektowanie elementu zagrożenia tak, aby było bezpieczne dla użytkowników dróg;
- 3) relokacja zagrożenia z dala od jezdni: jeżeli modyfikacja nie jest możliwa, niebezpieczeństwo powinno się odsunąć od drogi, w miejsce, gdzie prawdopodobieństwo zdarzenia drogowego jest mniejsze;
- 4) zmiana niebezpieczeństwa na pasywnie bezpieczne: jeżeli przeszkoda nie może być przemieszczona, powinna zostać zmieniona na pasywnie bezpieczną według normy EN12767, aby zredukować skutki ewentualnego uderzenia;
- 5) zainstalowanie urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego (np. w postaci drogowych barier ochronnych): urządzenia powinny być instalowane tylko wtedy, gdy wszystkie wcześniej wymienione opcje są niedostępne, lub ekonomicznie nieopłacalne;
- 6) oznakowanie przeszkody: jeżeli żadna inna opcja nie jest możliwa, należy oznakować przeszkodę, aby ostrzec użytkowników drogi, oraz wprowadzić odpowiedni limit prędkości.

Ponieważ rozwiązania 1-4 nie zawsze są ekonomicznie i funkcjonalnie osiągalne, wprowadza się urządzenia bezpieczeństwa ruchu drogowego (urządzenia brd) z cechami bezpieczeństwa pasywnego.

Do takich urządzeń zalicza się głównie systemy zabezpieczające pojazd przed wypadnięciem z drogi (drogowe bariery ochronne), elementy im towarzyszące tj. poduszki zderzeniowe, terminale zderzeniowe oraz konstrukcje wsporcze z cechami bezpieczeństwa pasywnego.

Podczas wyboru rozwiązania, projektant powinien zawsze pamiętać, iż mimo tego, że urządzenia brd są zaprojektowane do ograniczania skutków zdarzeń, to mogą nieść ze sobą także niekorzystne konsekwencje. Z tej też przyczyny opcja instalacji np. drogowych barier nie należy do rozwiązań pierwszoplanowych.

Analizując zasadność zastosowania urządzeń zabezpieczających pojazd przed wypadnięciem z jezdni, należy przestrzegać zasady, że w pierwszej kolejności, należy tak projektować otoczenie, aby te urządzenia nie były konieczne [22],[29],[51],[70]. Stąd też możliwa jest realizacja pojęcia "clear zone", czyli projektowania strefy bez przeszkód, której konsekwencją może być redukcja wypadków z ofiarami ciężko rannymi lub śmiertelnymi [79],[18],[93].

2.2. Drogowe bariery ochronne

2.2.1. Urządzenia bezpieczeństwa ruchu drogowego

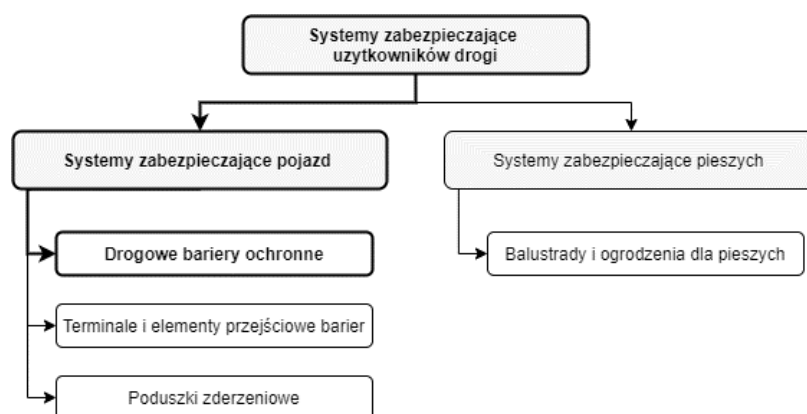
W przypadku braku możliwości zachowania strefy bezpieczeństwa, dopuszcza się stosowanie już wspomnianych dodatkowych elementów otoczenia drogi w postaci urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego. Urządzenia bezpieczeństwa ruchu drogowego (urządzenia brd), stosuje się w celu ochrony i zabezpieczenia ruchu pojazdów i pieszych. Ponadto stosowanie urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego ma za zadanie zapewnić płynność ruchu na drodze. Ochrona użytkowników dróg w przypadku tych urządzeń, polega na przeciwdziałaniu wypadkom i kolizjom drogowym, w wyniku których może dość do poważnych obrażeń ciała lub śmierci użytkownika.

Urządzenia brd stosowane są najczęściej w celu optycznego prowadzenia ruchu, wskazania pikietażu drogi, oznaczenia obiektów znajdujących się w skrajni drogi, zabezpieczenia ruchu pojazdów czy pieszych, informowania i ostrzegania kierujących, zamknięcia dróg dla ruchu, zabezpieczania robót prowadzonych w pasie drogowym, oraz prowadzenia nadzoru nad ruchem drogowym [39]. Ze względu na tak wiele różnych możliwości stosowania urządzeń, wyróżnia się kilka klasyfikacji [114],[86],[155]:

- 1) Ze względu na kategorie rozróżnia się urządzenia:
 - sygnalizacyjne – przekazanie kierowcom i innym użytkownikom drogi wszelkich zakazów, nakazów, ostrzeżeń i informacji dotyczących ruchu drogowego,
 - ochronne – zapobieganie wypadkom i ograniczenie jego skutków, do których zalicza się drogowe bariery ochronne,
 - przeciwdestrukcyjne – ograniczenie skutków wypadku lub w mniejszym stopniu ograniczenie możliwości jego powstania (np. progi zwalniające),
 - zapobiegawcze – przeciwdziałanie naruszeniom pewności, płynności i porządku ruchu.
- 2) Drugim stosowanym podziałem (patrz rysunek 2.6) jest rozróżnienie systemów zabezpieczających użytkowników drogi (Road Restraint Systems) w obszarach zagrożonych, w Polsce nazywane nieprecyzyjnie jako systemy ograniczające drogę:

- zabezpieczające pojazd VRS (Vehicle Restraint Systems), w skład których zalicza się drogowe bariery ochronne z odcinkami przejściowymi, końcowymi i początkowymi (w tym terminale zderzeniowe) oraz poduszki zderzeniowe,
 - zabezpieczające pieszych PRS (Pedestrian Restraint Systems) – w skład których zaliczyć należy balustrady i ogrodzenia dla pieszych.
- 3) Ostatnim, aczkolwiek najczęściej stosowanym podziałem jest klasyfikacja ze względu na oddziaływanie – czynne i bierne.
- bierne urządzenia bezpieczeństwa ruchu – wszystkie urządzenia, które nie wchodzi w bezpośredni kontakt z pojazdem podczas zdarzenia, wypadku lub kolizji. Służą do organizacji i sterowania ruchem drogowym oraz do informowania o ewentualnych zagrożeniach i miejscach niebezpiecznych (znaki drogowe, sygnalizatory świetlne, osłony przeciwośnieniowe).
 - czynne urządzenia bezpieczeństwa ruchu – urządzenia, które mają bezpośredni kontakt z pojazdem podczas wypadku lub kolizji, dlatego ich konstrukcja powinna być przystosowana do ewentualnej styczności z (najczęściej) samochodem (drogowe bariery ochronne, bariery mostowe, osłony energochłonne, tzw. konstrukcje bezpieczne).

Urządzenia brd ze względu na wrodzone cechy bezpieczeństwa pasywnego, pełnią najczęściej funkcję ochronną i/lub zabezpieczającą. Funkcja ochronna oznacza, że urządzenie stosuje się w celu ochrony życia i w ograniczonym zakresie również mienia uczestników ruchu, z kolei funkcja zabezpieczająca świadczy o możliwości zabezpieczenia przez urządzenie również obiektów czy terenów przyległych do drogi [115],[138]. Przykładem najczęściej występujących przy drogach urządzeń brd posiadających cechy zarówno ochronne, jak i zabezpieczające, mogą być m.in. drogowe bariery ochronne, poduszki energochłonne czy stosowane na zakończeniach drogowych barier ochronnych, terminale zderzeniowe.



Rys. 2.6 Klasyfikacja systemów zabezpieczających użytkowników drogi

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: [78]

Wraz z pojawieniem się pierwszych urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego, stopniowo zaczęła narastać potrzeba ich badań, która trwa do dziś. Badania realizowane są za pośrednictwem programów i projektów badawczych poświęconych rozwojowi urządzeń pod kątem m.in. ich poziomu bezpieczeństwa, trwałości, żywotności czy niezawodności.

Tematykę badań urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego podjęto już na początku ubiegłego wieku. Jedne z pierwszych badań urządzeń brd zaczęto realizować w USA w ramach programów NCHRP (National Cooperative Highway Research Program), zainicjowanych przez stowarzyszenie AASHTO (American Association of State Highway and Transportation). Realizowane programy, obejmowały badania m.in. drogowych barier ochronnych [4],[123], terminali i poduszek zderzeniowych [4],[121], konstrukcji wsporczych i środków organizacji ruchu [126],[120]. W ramach badań wypracowywano wytyczne, metody i narzędzia do oceny ich skuteczności [122],[121], wyboru, utrzymania, napraw i likwidacji [126],[4],[123].

Podobne projekty badawcze zaczęto realizować również w Europie. Jednym z pierwszych ważniejszych projektów, realizowanych na terenie Europy dotyczących urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego, był projekt RISER [158] (Roadside Infrastructure for Safer European Roads). Projekt realizowany był w latach 2002-2005 przez Uniwersytet Techniczny w Chalmers. W ramach projektu opracowano osiem raportów stanowiących Europejskie referencje, które można wykorzystać do poprawy poziomów bezpieczeństwa ruchu drogowego, poprzez zmiany w infrastrukturze drogowej. Dwa z nich [90],[99] stanowią wytyczne dobrych praktyk w zakresie infrastruktury drogowej skierowanych do administracji drogowych, jednostek zajmujących się badaniami bezpieczeństwa na drogach, operatorów dróg, firm utrzymaniowych oraz producentów urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego. W ramach projektu zdefiniowano i określono ryzyko zagrożeń zderzeń z różnym obiektem znajdującym się w otoczeniu drogi, określono zachowania kierowców (w dostosowywaniu prędkości) w stosunku do napotkanych warunków otoczenia oraz stworzono wytyczne utrzymania i projektowania infrastruktury, bazujące na filozofii „drogi samoobjaśniającej” oraz „drogi wybaczącej”.

Projekt ROBUST [153] poświęcony był poszerzenia wiedzy naukowej i technicznej w głównych kwestiach dotyczących norm europejskich EN1317 [46], [133]–[136], dotyczących badań systemów zabezpieczających użytkowników dróg instalowanych w pasie drogowym, do których zalicza się drogowe bariery ochronne, poduszki zderzeniowe i terminale zderzeniowe. Wyniki projektu stanowiły podstawy do zaktualizowania standardów normy EN1317 oraz wprowadzenia wymogów dla bardziej zaawansowanych i bezpieczniejszych systemów powstrzymujących pojazd przed wypadnięciem z drogi. Projekt przyczynił się również do powstania w kolejnych latach prenormy [142] poświęconej terminalom zderzeniowym. Ważną częścią tego projektu była również końcowa ocena wykorzystania symulacji numerycznych uzupełniających pełnoskalowe testy zderzeniowe [154].

Kolejne ważne Europejskie projekty badawcze, dotyczące urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego, powstawały w ramach programu ERANET ROAD kontynuowanego po 2011 roku przez organizację centralnych administracji drogowych w Europie CEDR (Conference of European Directors of Roads). Program badawczy CEDR Transnational Research Programme (TRP) działa do dnia dzisiejszego, organizując i realizując projekty badawcze o tematyce bezpieczeństwa ruchu drogowego. Przykłady projektów związanych z urządzeniami bezpieczeństwa przedstawiono i opisano poniżej.

Projekt IRDES (Improving Roadside Design to Forgive Human Errors) [78] zakończył się w 2011 roku. Celem projektu IRDES, było opracowanie praktycznych i jednolitych wytycznych pozwalających projektantom dróg na budowę „wybaczących” poboczy oraz budowa narzędzia do oceny skuteczności urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego, w tym m.in. terminali zderzeniowych, drogowych barier

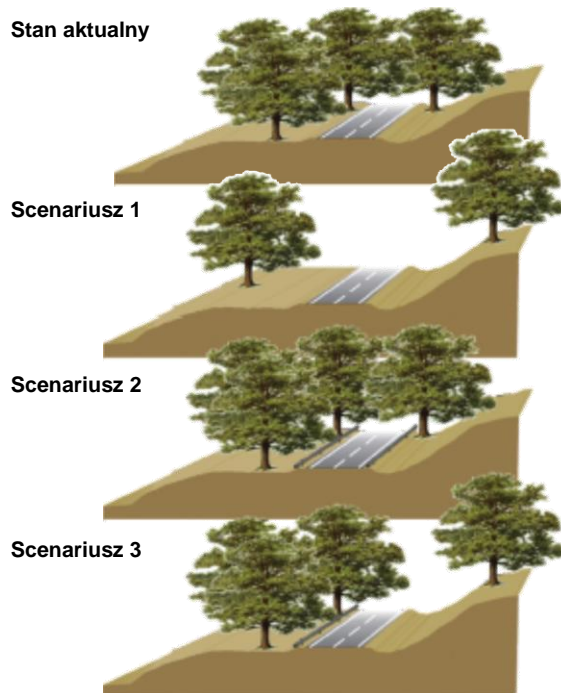
ochronnych, pasywnych konstrukcji wsporczych oraz zmian szerokości pobocza. W ramach projektu opracowano wskaźnik CMF (Crash Modification Factor), uwzględniający liczbę terminali zderzeniowych niezgodnych z normą EN1317 na drogach zamiejskich jednojezdniowych. Przeprowadzono również specjalne badania mające na celu ocenę skuteczności pasów wibracyjnych, frezowanych na poboczach dróg w Szwecji. Ponadto opracowano procedurę opartą na symulacjach PC Crash dla czarnych punktów, w celu oceny skuteczności zmiany szerokości pobocza i rodzaju pobocza (utwardzone/nieutwardzone) oraz oceny zmniejszenia wskaźnika AIS (Abbreviated Injury Scale) w przypadku zastosowania różnych rodzajów pobocza. Wyniki pokazały, że w kontekście obrażeń, bezpieczniejszym rozwiązaniem od umieszczenia drogowej bariery ochronnej na poboczu, jest zastosowanie utwardzonego pobocza, . Z kolei zastosowanie pobocza nieutwardzonego jest mniej skuteczne niż umieszczenie drogowych barier ochronnych.

Projekt SAVERs [183] (Selection of Appropriate Vehicle Restraint Systems) był projektem realizowanym w latach 2012-2016, mającym na celu opracowanie praktycznych i łatwo zrozumiałych wytycznych dotyczących systemów powstrzymujących pojazd VRS (Vehical Restraint Systems) oraz przyjaznego dla użytkownika narzędzia programowego, które pozwoliłoby użytkownikom (projektantom i administracjom drogowym) wybrać najbardziej odpowiednie rozwiązanie dla kilku konfiguracji dróg i warunków ruchu [182].

Projekt PRACT [196] jest kolejnym projektem dotyczącym urządzeń brd z serii badań prowadzonych w ramach programu CEDR. W ramach projektu wykonano bazę danych, zawierającą najważniejsze modele przewidywania wypadków APM (Accident Prediction Models) i współczynniki modyfikacji liczby wypadków CMF (Crash Prediction Models), które zostały opracowane w ramach projektu PRACT.

W Portugalii w ramach projektu SAFESIDE [160] opracowano zarys wytycznych do podejmowania opłacalnych ekonomicznie decyzji dotyczących wprowadzania urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego w otoczeniu drogi. W ramach projektu opracowano narzędzia analizy kosztów i korzyści stosowanych środków, służące ocenie bezpieczeństwa i symulacji scenariuszy drogowych (przykład wybranych scenariuszy przedstawiono na rysunku 2.7). Zbudowane w ramach projektu narzędzie miało na celu wspieranie decyzji dotyczących zarówno projektowania poboczy, jak i instalacji oraz wyboru systemów VRS zgodnych z normami Europejskiego Komitetu Normalizacyjnego (CEN-EN1317).

W Polsce w ramach projektów badawczych RID (Road Innovations Development) w 2016 roku rozpoczęto realizację dwóch projektów badawczych poświęconych badaniom funkcjonowania urządzeń



Rys. 2.7 Przykładowe scenariusze rozwiązań projektowych polegających ocenie brd

Źródło: Opracowana na podstawie [160]

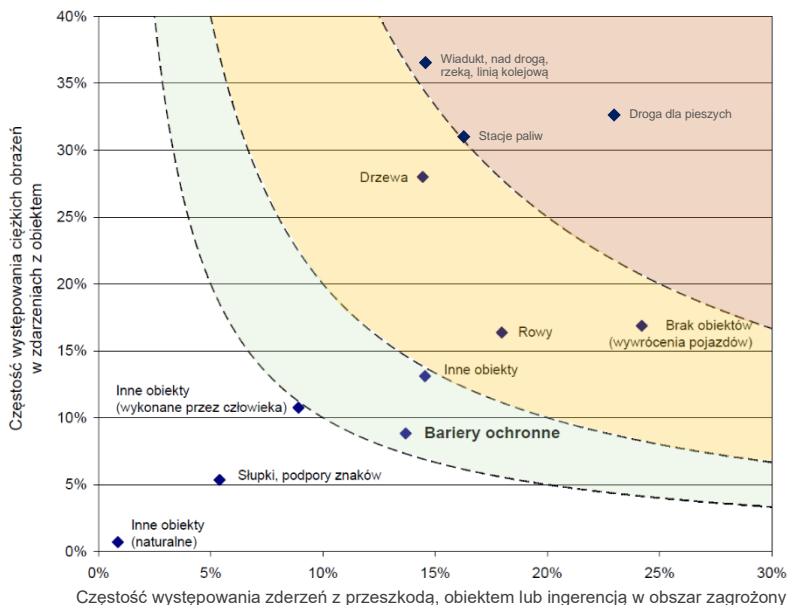
bezpieczeństwa ruchu drogowego: RID 3A [149] oraz RID 3B [146], w ramach którego zrealizowana została niniejsza dysertacja. Celem projektu RID 3A, "Urządzenia bezpieczeństwa ruchu drogowego" (RoSE), była kompleksowa analiza różnych urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego [25]. Projekt RID 3B "Wpływ czasu i warunków eksploatacyjnych na trwałość i funkcjonalność urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego" (LifeRoSE) miał na celu opracowanie innowacyjnej metodologii zarządzania środkami organizacji ruchu i urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego [146],[91],[85].

2.2.2. Drogowe bariery ochronne ich rola i funkcjonowanie

Drogowe bariery ochronne to jedne z ważniejszych czynnych urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego – tzn. takich, z którymi pojazd podczas wypadku lub kolizji wchodzi w bezpośredni kontakt. Drogowe bariery ochronne stosuje się w miejscach, gdzie skutki wypadku lub kolizji pojazdu byłyby większe niż uderzenie w barierę (np. najechanie czołowe na inny pojazd, drzewo, stromą skarwę itp.) [17],[1]. Prawidłowo zaprojektowana i należyście wykonana drogowa bariera ochronna powinna [114], [115]:

- uniemożliwić przejechanie pojazdu poza krawędź drogi lub przez pas dzielący na jezdnię przeznaczoną dla przeciwnego kierunku ruchu,
- zapewnić takie warunki kolizji, przy których opóźnienia działające na osoby w pojeździe nie przekroczą wartości bezpiecznych – granica opóźnień niebezpiecznych jest zależna od używania pasów bezpieczeństwa przez kierowcę i pasażerów pojazdu oraz od kierunku działania sił występujących podczas kolizji,
- wyprowadzić pojazd na tor ruchu równoległy lub bliski równoległemu do bariery – przy możliwie najmniejszym zagrożeniu dla innych pojazdów, jadących obok lub z tyłu oraz nadjeżdżających z przeciwnego kierunku. Nie może tu w szczególności nastąpić odbicie lub sprężyste odrzucenie pojazdu,
- powodować podczas kolizji możliwie niewielkie zniszczenia pojazdu, w miarę możliwości ograniczające się tylko do elementów nadwozia, bez utrudnień w sposób poważny, a tym bardziej umożliwiające panowanie nad kierunkiem i torem jego ruchu,
- w sposób możliwie wyraźny i czytelny określać zewnętrzną krawędź jezdni.

Od początku istnienia drogowych barier ochronnych przeprowadzono liczne badania potwierdzające skuteczność ich działania. Na rysunku 2.8 przedstawiono analizę danych projektu RISER, która przedstawia prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia z obiektem przy drodze porównaniu z konsekwencjami oddziaływań tych obiektów na osoby znajdujące się w pojeździe. Linie przerywane to krzywe stałego ryzyka, punkty znajdujące się w prawym górnym rogu oznaczają dużą częstotliwość i wysokie ryzyko śmierci w zdarzeniu. Zgodnie z oczekiwaniami, zdarzenia z barierami ochronnymi mają wysokie prawdopodobieństwo zajścia, ale niższe prawdopodobieństwo ciężkości obrażeń osób znajdujących się w pojeździe. Zderzenia z drzewami oraz wywrócenia się pojazdów stanowią największe zagrożenie dla użytkowników dróg.

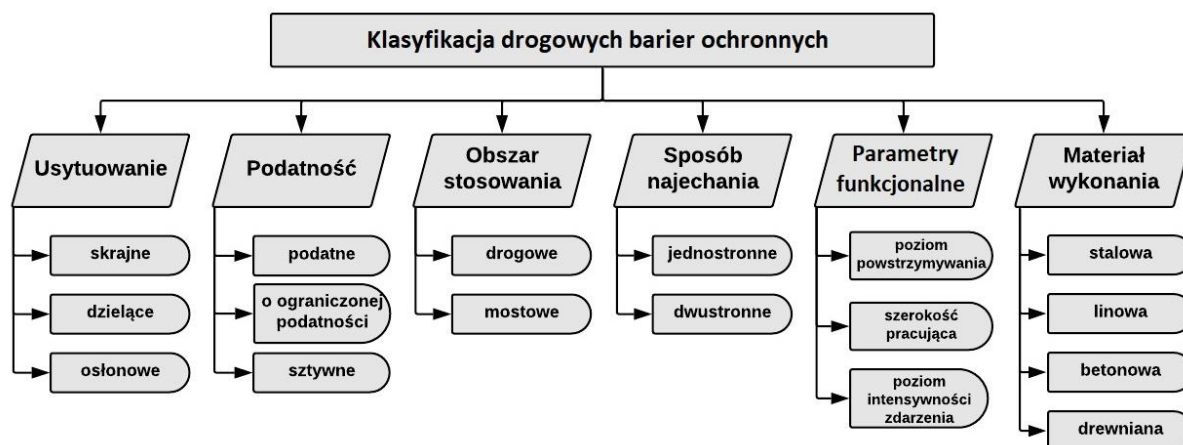


Rys. 2.8 Ryzyko śmiertelnych obrażeń ciała w zderzeniach pojazdów z wybranymi obiektami przy drogach

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: [157]

2.2.3. Klasyfikacja drogowych barier ochronnych

Barьеры ochronne stosowane są niemal od początku ubiegłego wieku [150],[117],[137]. Na przełomie tych wszystkich lat opracowano wiele systemów różniących się między sobą nie tylko cechami materiałowymi, ale także sposobem pracy czy wskaźnikami ochronnymi. Na rysunku 2.9 zestawiono podział barier ochronnych ze względu na najważniejsze kryteria podziału tych urządzeń [9].



Rys. 2.9 Klasyfikacja drogowych barier ochronnych

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [9].

Usytuowanie. W zależności od usytuowania bariery klasyfikowane są w 3 grupach. Bariery skrajne umieszczane są przy krawędzi jezdni lub obiektów i zapobiegają wyjechaniu pojazdu poza element chroniony. Bariery dzielące, jak nazwa wskazuje, umieszczane są na pasie dzielącym i przeciwdziałają przejeżdżaniu pojazdów na jezdnię przeznaczoną do ruchu w kierunku przeciwnym. Bariery osłonowe z kolei umieszczane są przy obiektach (lub przeszkodach bocznych) a ich zadaniem jest ochrona przed najechaniem pojazdu na te obiekty.

Podatność. Drugim stosowanym jest podział w zależności od sposobu działania bariery. W myśl tej klasyfikacji wyróżniane są następujące trzy grupy:

- bariera podatna „Typ I” – bariera, której odkształcenie w czasie kolizji wynosi powyżej 1,8 m
- bariera wzmocniona „Typ II” (o ograniczonej podatności) – bariera, której odkształcenie w czasie kolizji może dochodzić do 0,85 m.
- bariera sztywna „Typ III” – odkształcenie w czasie kolizji jest równe bądź bliskie zeru. Należy zauważyć, że w tym ujęciu sztywność jest odwrotnością podatności.

Obszar stosowania. Ze względu na obszar stosowania, drogowe bariery ochronne dzieli się na bariery ochronne drogowe i mostowe. Mostowe bariery ochronne stosuje się w miejscach, gdzie przejechanie pojazdu poza krawędź obiektu (mostu, wiaduktu, przepustu, muru oporowego) poważnie zagraża bezpieczeństwu kierowcy i pasażerów tego pojazdu lub innych użytkowników drogi, a także w przypadkach, gdy na obiekcie mostowym zachodzi potrzeba oddzielenia ruchu pieszego i/lub rowerowego od ruchu pojazdów. Podstawową funkcją barier mostowych jest przede wszystkim utrzymanie pojazdu na obiekcie i niedopuszczenie, by ten zsunął się lub spadł z obiektu. Zapewnienie możliwie korzystnego i bezpiecznego przebiegu kolizji jest tu oczywiście ważnym zadaniem, jednak w większości sytuacji (choć nie zawsze) musi ono być podporządkowane utrzymaniu pojazdu na obiekcie. Podkreślenia wymaga znaczenie tego ostatniego warunku. W wielu przypadkach przełamanie bariery na obiekcie mostowym przez pojazd – a zwykle jest to pojazd ciężki, autobus lub samochód ciężarowy – prowadzi do wypadku drogowego o bardzo poważnych skutkach [116].

Sposób najechania. Następnym w kolejności jest podział ze względu na możliwości najechania na barierę – bariery mogą być wykonane jako jednostronne (dostosowane do najechania tylko z jednej strony i stosowane zwykle jako bariery skrajne lub osłonowe) i dwustronne (analogicznie, dostosowane do najechania z dwóch stron i stosowane jako dzielące; w przypadkach szczególnych można również wykorzystywać je jako osłonowe).

Parametry funkcjonalne. Rozróżnienie drogowych barier ochronnych według ich parametrów funkcjonalnych jest najważniejszą klasyfikacją z punktu widzenia zarówno projektantów, jak i użytkowników dróg. Cechy określają rzeczywisty zakres stosowania barier na drogach i w znaczącym stopniu wpływają na poziom brd. W Polsce (i większości innych krajów Europejskich) obowiązuje norma PN-EN 1317 [123], zgodnie z którą klasyfikuje się bariery pod kątem:

- poziomu powstrzymania (wytrzymałości bariery),
- szerokości pracującej (odkształcenia bariery),
- poziomu intensywności zderzenia (oddziaływanie na osoby w pojeździe).

Badania całych systemów barier przeprowadzane są na poligonach badawczych. Poprzez pojęcie system barier należy rozumieć poprawnie zamontowane pojedyncze elementy (prowadnica, słupki, łączenia) wraz z ich przymocowaniem do podłoża. Podczas tzw. Crash Testów badane jest zachowanie konkretnych systemów barier, a następnie obliczane są parametry potrzebne do określenia poziomu powstrzymania, poziomu intensywności i szerokości pracującej bariery. Jeszcze do niedawna, przy określaniu rodzaju barier ochronnych używane było stare nazewnictwo. Nowe uzależnione jest od powyższych parametrów, które odpowiednio klasyfikują wszystkie systemy barier ochronnych (bez

względu na ich rodzaj, typ czy materiał – np. N2W4, gdzie N oznacza poziom powstrzymywania a W szerokość pracującą).

Materiał wykonania drogowych barier ochronnych. Uwzględniając w opisie klasyfikacji barier materiał, z którego wykonane są bariery ochronne, wyróżnia się bariery stalowe o prowadnicy z taśmy stalowej, linowe, betonowe (pełne, belkowe), drewniane i pozostałe np. aluminiowe, z tworzyw sztucznych.

Bariery stalowe (rys. 2.10) są najczęściej stosowanymi i przebadanymi urządzeniami bezpieczeństwa ruchu drogowego. Pierwsze bariery stalowe wprowadzono w USA w latach trzydziestych ubiegłego wieku. Podstawowym elementem konstrukcji stalowych barier ochronnych są profilowane taśmy stalowe połączone ze sobą śrubami do słupków. W pierwszych konstrukcjach barier stalowych stosowano słupki stalowe o przekroju dwuteowym, co stanowiło sztywną podstawę bariery. Z czasem zaczęto stosować słupki drewniane oraz stalowe o innych przekrojach (Σ , C) i szerokości, aby nieco



Rys. 2.10 Bariera z prowadnicą stalową

Źródło: Zdjęcia własne autora

ograniczyć sztywność systemu barier na uderzenie pojazdu. Bariery stalowe charakteryzują się ograniczoną podatnością, większą niż w przypadku barier betonowych, mniejszą niż w przypadku barier linowych. Głównym elementem regulacji sztywności i wytrzymałości barier stalowych jest rozstaw słupków. Standardowy rozstaw wynosi od 2 do 4 metrów, a gdy zachodzi potrzeba usztywnienia bariery, co 1 metr. Ze względu na podatność metali na korozję, drogowe bariery ochronne są zawsze zabezpieczone powłoką ochronną – powłoka cynkowa, powłoki lakiernicze, powłoki z żywicy akrylowych. Grubość powłoki cynkowej i sposób wykonania powinien zapewnić trwałość urządzeń przez cały okres jej użytkowania.

Bariery linowe (rys. 2.11) są systemem stosunkowo nowym na rynku polskim, mimo iż w USA stosowano je od 1910 roku [57]. Prosta konstrukcja pozwala na szybki montaż a następnie demontaż, szczególnie w awaryjnym pasie dzielącym drogi. Elementami prowadzącymi pojazd podczas uderzenia są trzy lub cztery liny wielosplotowe (dawniej stosowano systemy oparte na jednej, dwóch linach). System ten musi być zakotwiony w podłożu, aby zapracował poprawnie. Zamocowanie odbywa się za pomocą kotew betonowych lub stalowych, a rodzaj zakotwienia zależy od typu podłoża i od miejsca umieszczenia bariery na drodze.



Rys. 2.11 Bariera z prowadnicą linową

Źródło: Zdjęcia własne autora

Beton używany był jako belkowa bariera betonowa już w latach 1933-1937, jednak ze względu na cechy fizyczne: niepodatność, chropowatość i szorstkość, zakres jego stosowania znacznie się

zmniejszył. W przypadku kolizji z barierą betonową dochodziło do znacznych uszkodzeń pojazdu, a duża sztywność materiału powodowała zwiększenie opóźnień działających na pasażerów. Sytuacja ta zmieniła się, gdy zaczęły rosnąć koszty budowy i utrzymania barier metalowych (USA). Powrócono wówczas do barier betonowych (rys. 2.12), które okazały się mało kosztowne w montażu i utrzymaniu. Znalaziono dla nich zastosowanie w sytuacjach, gdy przeszkoda stoi blisko jezdni i ewentualne odkształcenia bariery nie powinny przekraczać dopuszczalnych. Rozróżniamy dwa typy barier betonowych: bariery belkowe i bariery pełne. Pierwszy typ jest już praktycznie nie stosowany, a współczesne bariery betonowe są niemal nieprzejezdne, lecz zdarzają się wyjątki – m.in. sytuacje, gdy pojazd o dużej masie najeżdżający na barierę przelamuje ją.



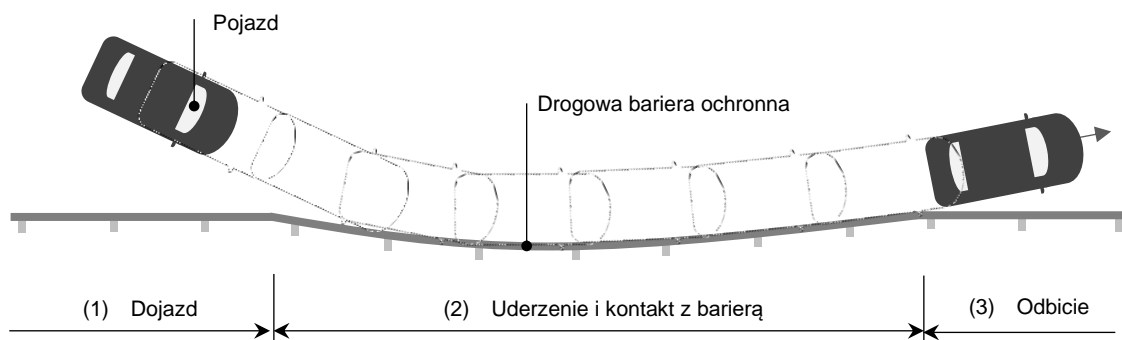
Rys. 2.12 Bariera z prowadnicą betonową

Źródło: Zdjęcia własne autora

2.3. Podstawy teoretyczne funkcjonowania drogowych barier ochronnych

2.3.1. Mechanizm działania drogowych barier ochronnych

Mechanizm działania drogowych barier ochronnych polega na złożonej kombinacji procesów zachodzących podczas uderzenia w nie pojazdu [14]. Zderzenia pojazdów z drogowymi barierami ochronnymi można podzielić na trzy fazy ich pracy: (1) przed zderzeniową - dojazd pojazdu do bariery ochronnej, (2) zderzeniową - uderzenie i kontakt pojazdu z barierą ochronną, (3) odbicia i odjazdu pojazdu, które zilustrowano na rysunku 2.13.

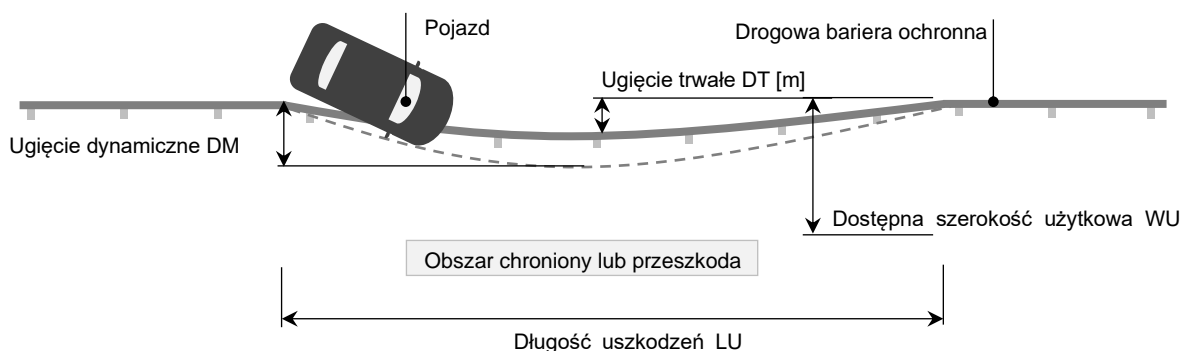


Rys. 2.13 Schemat toru jazdy i faz pojazdu uderzającego w barierę drogową

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [14].

Skutki uderzenia pojazdu w barierę ochronną mogą być poważne i zależą od kilku podstawowych czynników, takich jak prędkość pojazdu, kąt uderzenia, rodzaj i konstrukcja bariery oraz pojazdu. Podczas uderzenia i kontaktu pojazdu z barierą ochronną, zarówno bariera ochronna, jak i pojazd poddawane są jednoczesnemu działaniu sił poprzecznych i podłużnych. W przypadku pojazdów są to siły i opóźnienia, które mogą spowodować uszkodzenia karoserii pojazdów oraz poważne obrażenia pasażerów. W przypadku barier ochronnych będą to siły, które powodują ich odkształcenie, przesunięcie, a w skrajnych przypadkach nawet przerwanie. Największy wpływ na zmniejszenie opóźnień, jak i siły uderzenia ma możliwość przemieszczenia lub odkształcenia się bariery ochronnej.

Jak pokazano na rysunku 2.14 odkształcenie bariery charakteryzuje przede wszystkim ugięcie, dalej podzielone i nazywane ugięciem dynamicznym bariery ochronnej (DM), opisującym jej sztywność i ugięciem stałym (DT) mówiącym o trwałych deformacjach. Ugięcia barier ochronnych są produktem elastyczności systemu barier ochronnych. Odwołując się do wcześniej przedstawionej klasyfikacji barier ochronnych (tj. wg jej podatności - rysunek 2.9), ugięcia dynamiczne sięgające 1,8 – 2 m klasyfikują barierę ochronną jako podatną, natomiast jeżeli ugięcia są mniejsze, mamy do czynienia z barierą o ograniczonej podatności lub sztywną, gdy są bliskie zeru.



Rys. 2.14 Schemat i opis odkształceń powstałych w wyniku uderzenia pojazdu w barierę ochronną

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [14].

Duże ugięcia dynamiczne powstałe w wyniku najazdu pojazdu na barierę ochronną oznaczają jej dużą pasywność konstrukcji, większą stateczność najeżdżającego pojazdu i w rezultacie również większe bezpieczeństwo pasażerów [53]. Prawidłowość ta potwierdza się jednakże wyłącznie w sytuacjach, dla których w szerokości pracy bariery zapewniony jest obszar wolny od przeszkód mogących zaburzyć jej prawidłową pracę [192]. Obszar ten określa się jako dostępna szerokość użytkowa (WU) [185]. To właśnie dostępna szerokość użytkowa oraz ugięcie dynamiczne bariery ochronnej określają, w jakiej minimalnej odległości umieścić barierę od przeszkody lub obszaru, który bariera ma za zadanie zabezpieczyć. W przypadku potrzeby osłonięcia barierami ochronnymi przeszkód znajdujących się blisko krawędzi jezdni (np. podpory wiaduktu, bramownicy), lub zabezpieczenia obiektów mostowych (w przypadku, gdy minimalizuje się ryzyko przerwania bariery), konieczne jest zastosowanie barier o niskich wartościach przemieszczeń oraz wysokiej wytrzymałości na uderzenia z dużą energią. Stąd też stwierdza się, że sztywność bariery powinna być zawsze dobrana do warunków i sytuacji, w jakich bariera będzie pracowała.

W celu uzyskania bezpiecznego przebiegu procesu uderzenia i kontaktu z barierą ochronną, wymaga się również, aby konstrukcja barier stanowiła spójny i zwarty system o podobnych charakterystykach użytkowych. W przypadku połączeń systemów różniących się sztywnością, konieczne jest zastosowanie odcinków przejściowych. Skokowe zmiany sztywności barier mogłyby mieć negatywny wpływ na zachowanie pojazdu podczas zderzenia oraz na zdrowie osób znajdujących się w pojeździe. Badania wykazują, że przebieg zderzenia pojazdu z barierą przebiega najłagodniej w przypadku, gdy stosunek między odkształceniem podłużnym i poprzecznym jest większy lub równy 1:40 [114]. Kolejnym ważnym elementem dla prawidłowej pracy systemu drogowych barier ochronnych są właściwie zaprojektowane odcinki początkowe i końcowe. Od kilkunastu lat na świecie stosuje się na początkowych i końcowych odcinkach barier ochronnych urządzenia energochłonne typu poduszki

zderzeniowe, terminale energochłonne [145],[98] lub urządzenia hybrydowe [21], łączące zalety obu tych rodzajów urządzeń. Elvik w swoich badaniach wskazuje, że stosowanie urządzeń energochłonnych przyczynia się do zmniejszenia ciężkości wypadków związanych z najechaniem pojazdu na odcinki początkowe drogowych barier ochronnych [42]. Niemniej jednak, podkreśla się, że podobnie, jak w przypadku drogowych barier ochronnych, urządzenia te stanowią przeszkodę i powinny być stosowane wyłącznie w miejscach, gdzie ich brak mógłby spowodować poważniejsze w skutkach konsekwencje [68].

2.3.2. Pochłanianie energii i odkształcenia

Nieodłącznym skutkiem uderzenia pojazdu w drogową barierę ochronną jest odkształcenie, a w konsekwencji uszkodzenie lub całkowite zniszczenie pojazdu oraz bariery. Wielkość uszkodzenia bariery zależy przede wszystkim od energii kinetycznej uderzenia pojazdu (E_k), składników mogących rozproszyć tę energię oraz odporności na odkształcenia drogowej bariery ochronnej oraz pojazdu.

Energia kinetyczna pojazdu w momencie uderzenia w barierę, zależy od masy uderzającego pojazdu (M_p), prędkości uderzenia (V_p) i kąta uderzenia pojazdu w barierę drogową (α_u). Rozdzielenie prędkości pojazdu na składową prostopadłą do bariery (V_{pL}) pozwala na obliczenie prostopadłej składowej energii kinetycznej E_{KL} , która jest również określana jako siła uderzenia w barierę [167]. Energia kinetyczna całkowita pojazdu uderzającego w barierę drogową E_k i jej składowe E_{KL} i E_{KP} przedstawione na rysunku 2.15 można obliczyć za pomocą wzorów 2.1-2.3:

$$E_k = \frac{M_p \cdot (V_p)^2}{2} \quad (2.1)$$

$$E_{KL} = \frac{M_p \cdot (V_p \cdot \sin(\alpha_u))^2}{2} \quad (2.2)$$

$$E_{KP} = \frac{M_p \cdot (V_p \cdot \cos(\alpha_u))^2}{2} \quad (2.3)$$

gdzie:

E_k – energia kinetyczna pojazdu (J)

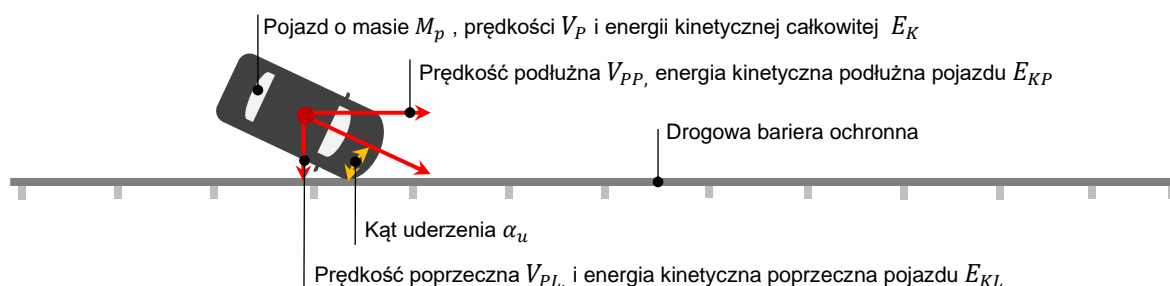
E_{KL} – energia kinetyczna poprzeczna (boczna) pojazdu (J)

E_{KP} – energia kinetyczna podłużna pojazdu (J)

M_p – masa pojazdu (kg)

V_p – prędkość pojazdu (m/s),

α_u – kąt uderzenia pojazdu w barierę ($^\circ$).



Rys. 2.15 Model rozkładu energii kinetycznej pojazdu podczas uderzenia w barierę drogową

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [14].

Podczas zderzenia pojazdu z barierą ochronną, wyróżnia się kilka składników rozpraszania energii uderzenia pojazdu [144],[114]. Energia kinetyczna pojazdu rozpraszana jest przede wszystkim przez:

- siły tarcia kół pojazdu o nawierzchnię jezdni i/lub pobocza - powstałych w wyniku hamowania, obrotu, unoszenia i zmiany kierunku jazdy pojazdu,
- strefę zgniotu pojazdu - deformacji nadwozia,
- energię powstrzymywania konstrukcji bariery drogowej.

W pracach [194],[101] zauważono związek pomiędzy wielkością odkształcenia pojazdu a pracą potrzebną do ich powstania. W przypadku gdy pojazd uderza czołowo w sztywną przeszkodę (np. sztywną barierę ochronną, drzewo, podporę wiaduktu), wielkość odkształceń jest równa energii kinetycznej utraconej przez samochód w chwili zderzenia. Wyznaczenie w tym przypadku siły potrzebnej do odkształcenia konkretnego pojazdu, wymaga pełnej informacji na temat struktury energetycznej pojazdu określającej ilość pracy niezbędnej do uzyskania odkształcenia poszczególnych segmentów pojazdu. Sytuacja komplikuje się w przypadku uderzeń pojazdu pod kątem w przeszkodę podatną na odkształcenia, do których zalicza się zdecydowaną większość barier ochronnych.

Przy znajomości rodzaju pojazdu, jego masy i konstrukcji, oraz prędkości uderzenia i odbicia pojazdu od bariery (w momencie oderwania się od bariery i powrotu na jezdnię) możliwa jest rekonstrukcja i wydzielenie z energii uderzenia części pochłanianej (absorbowanej) przez barierę [33]. Absorbowanie energii kinetycznej jest parametrem, który wpływa na wydłużenie czasu trwania zderzenia (kontaktu z barierą ochronną) oraz na zmniejszenie ciężkości obrażeń uczestników dróg w pojeździe [53].

Absorbcję przez barierę ochronną energii uderzającego w nią pojazdu oblicza się za pomocą wzoru 2.4:

$$EA = \frac{1}{2} M_P \cdot (VP^2 - VO^2) \quad (2.4)$$

przy czym składową poprzeczną absorpcji energii oblicza się za pomocą wzoru 2.5:

$$EAL = \frac{1}{2} M_P \cdot ((VP \cdot \sin(\alpha))^2 - (VO \cdot \sin(\beta))^2) \quad (2.5)$$

gdzie:

EA – absorbowana energia pojazdu przez barierę (kJ),

EAL – absorbowana energia poprzeczna pojazdu przez barierę (kJ),

VP – prędkość pojazdu uderzającego w barierę (m/s),

VO – prędkość odbicia pojazdu od bariery (m/s),

E_{KL} – energia kinetyczna, poprzeczna pojazdu uderzającego w barierę (kJ),

M_P – masa pojazdu (kg),

α – kąt uderzenia pojazdu w barierę ($^\circ$),

β – kąt odejścia pojazdu od bariery ($^\circ$).

Ustalona w ten sposób absorbowana energia kinetyczna uderzenia pojazdu (wzór 2.4, 2.5), może służyć do określenia i kształtowania charakterystyki odporności na odkształcenia bariery ochronnej oraz do porównania wyników badań różnych systemów barier i skutków uderzeń różnych typów pojazdów [53].

Odporność na odkształcenia barier drogowych spowodowana uderzeniem pojazdu może być mierzona za pomocą: sztywności i podatności, oporu i szerokości pracującej. Sztywność konstrukcji bariery K (wzór 2.7) można zmierzyć jako iloraz siły charakteryzującej uderzający pojazd i odległości na jaką została przesunięta bariera w wyniku uderzenia w nią pojazdu. Biorąc pod uwagę, że energia jest

iloczynem siły i odległości, więc sztywność bariery (jako siła oporu) jest ilorazem energii uderzającego pojazdu na jednostkę przemieszczenia. W przypadku bardzo sztywnych barier sztywność zmierza do nieskończoności, dlatego też wprowadzono pojęcie podatność (elastyczność) bariery S (wzór 2.12), która jest odwrotnością sztywności K [26].

Siłę poprzeczną przesuwającą barierę drogową określa wzór 2.6:

$$FL = \frac{EKL}{D} \quad (2.6)$$

natomiast sztywność i podatność konstrukcji wzór 2.7:

$$K = \frac{2 \cdot FL}{D} \quad (2.7)$$

Sztywność liniową bariery drogowej [119] oblicza się korzystając z uproszczonego założenia: Energia odkształceń bariery = Energii kinetycznej pojazdu uderzającego w barierę, w związku z tym można przyjąć, że (wzór 2.8):

$$\frac{1}{2} \cdot M \cdot V^2 = \frac{1}{2} \cdot K \cdot X^2 \quad (2.8)$$

stąd sztywność opisać można za pomocą wzoru 2.9:

$$K = \frac{2 \cdot EK}{X^2} = \frac{2 \cdot FL}{X} \quad (2.9)$$

lub

$$K = \frac{M \cdot V^2}{X^2} \quad (2.10)$$

W przypadku bariery ochronnej, jej sztywność określa się z zależności wg. wzoru 2.11:

$$K = \frac{2 \cdot EKL}{X^2} = \frac{MP \cdot (VP \cdot \sin KU)^2}{DM^2} \quad (2.11)$$

Podatność bariery drogowej zatem można określić według wzoru 2.12:

$$S = \frac{1}{K} = \frac{DM^2}{2 \cdot EKL} = \frac{X}{2 \cdot FL} \quad (2.12)$$

gdzie:

FL – siła poprzeczna uderzenia pojazdu w barierę (kN),

EKL – energii kinetyczna, poprzeczna pojazdu uderzającego w barierę (kJ),

D, X – ugięcie dynamiczne konstrukcji (m),

DM – ugięcie dynamiczne bariery po uderzeniu pojazdu (m),

K – sztywność konstrukcji bariery drogowej ($kN/m, kJ/m^2$),

S – podatność konstrukcji bariery drogowej ($m/kN, m^2/kJ$),

MP – masa pojazdu (kg),

VP – prędkość pojazdu (m/s),

VPL – prędkość poprzeczna bariery (m/s),

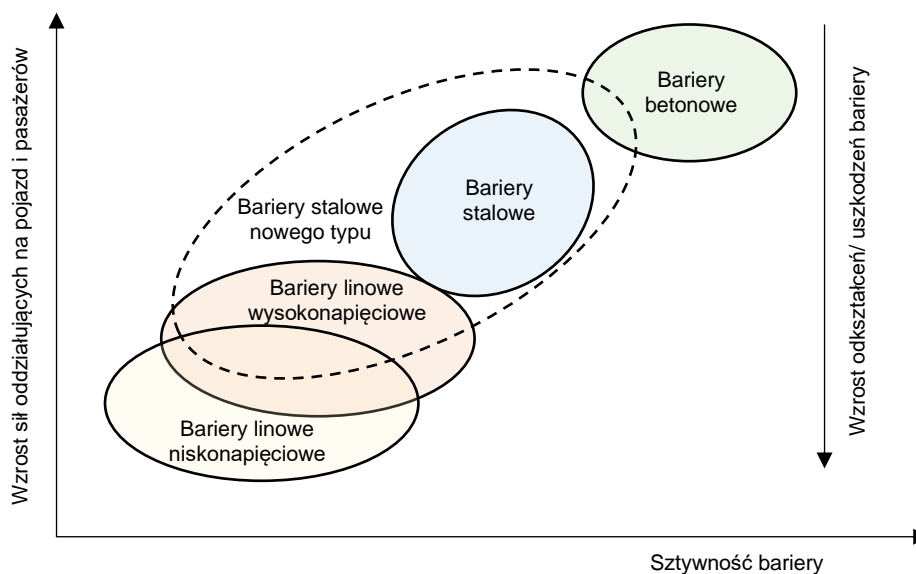
KU – kąt uderzenia pojazdu w barierę ($^\circ$).

Sztywność drogowej bariery ochronnej jest ściśle powiązana z jej charakterystyką energetyczną. Sztywniejsza bariera ochronna może mieć mniejszą zdolność do absorpcji energii, ale może być bardziej skuteczna w zatrzymywaniu pojazdu przed przeszkodą. Z drugiej strony, bardziej podatna

bariera ochronna może mieć większą zdolność do absorpcji energii, ale może nie być wystarczająco sztywna, aby nie zostać przerwana i skutecznie zatrzymać pojazd przed przeszkodą.

Według przykładowych badań [72],[14] można sformułować ogólne stwierdzenia dotyczące działania trzech najczęściej stosowanych typów barier ochronnych tj. stalowych, linowych i betonowych. Najmniejsze ugięcia podczas zaobserwowanych badań i testów zderzeniowych odnotowuje się w przypadku barier betonowych. Długość, masa i właściwości połączonych ze sobą segmentów betonowych barier ochronnych sprawiają, że należą one do konstrukcji bardzo sztywnych, które cechują niskie wartości przemieszczeń. Ugięcia systemów barier o profilu stalowym mogą być różne i zależą przede wszystkim od rozstawu słupków i ich przekroju, miejsca i sposobu posadowienia (w gruncie, nawierzchni, na obiekcie mostowym) a także od rodzaju profilu prowadnicy bariery. W przypadku barier linowych obserwowane ugięcia definiują je przeważnie, jako urządzenia podatne, chociaż ostatecznie na wielkość ugięcia istotny wpływ ma liczba zastosowanych lin, ich naciąg oraz jak w przypadku barier stalowych, rozstaw i posadowienie słupków.

Stwierdza się zatem, że bariera betonowa jest sztywniejsza niż bariera o prowadnicy stalowej, ta z kolei jest sztywniejsza niż bariera o prowadnicy linowej. Im sztywniejsza jest bariera ochronna, tym mniej energii rozpraszanej jest przez barierę, a więcej energii musi pochłonąć konstrukcja pojazdu. Zależności te najlepiej obrazuje rysunek 2.16, sztywniejsze bariery ochronne cechują mniejsze ugięcia i większe opóźnienia oraz prędkości oddziałujące na pojazd i pasażerów. Należy również zauważyć, że systemy lin stalowych za sprawą ich naciągu, mają większy potencjał zakresów sztywności ich pracy. Zarówno bariery stalowe prowadnicowe, jak i bariery betonowe były do niedawna bardziej spójne, występowało mniej różnic w projektach stosowanych rozwiązań. Obecnie oczekuje się, że nowe projekty zarówno barier stalowych prowadnicowych (nowego typu), jak i w pewnym stopniu barier betonowych wpłyną na ich działanie i zakres stosowania (rys. 2.16).



Rys. 2.16 Schemat ilustrujący względny zakres funkcjonowania różnych systemów barier ochronnych

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [72]

Podsumowując, wyznaczenie energii kinetycznej uderzenia pojazdu w drogową barierę ochronną pozwala na określenie siły uderzenia i stopnia potencjalnego uszkodzenia pojazdu oraz wielkości uszkodzenia bariery. Znajomość energii kinetycznej uderzenia, daje także możliwość oceny i porównania skuteczności (mierzonej wielkością absorbowanej energii) bariery ochronnej o zadanym kształcie, masie i rodzaju materiału, z którego jest wykonana. Ponadto z punktu widzenia bezpieczeństwa użytkowników drogi, pozwala na ocenę skutków zderzenia pod kątem ryzyka poważnych obrażeń lub śmierci. W przypadku wykrycia, że dana bariera ochronna jest niewystarczająca, można podjąć decyzję o wymianie na bardziej odporną, skuteczną i bezpieczniejszą. Pozwala to minimalizować ryzyko poważnych obrażeń lub śmierci użytkowników drogi w kontekście przyszłych zdarzeń drogowych z barierami ochronnymi.

2.3.3. Warunki stosowania

Podstawowym dokumentem odniesienia w procesie weryfikacji dopuszczenia do użytku, drogowych barier ochronnych, są obowiązujące standardy, wytyczne i normy. Na świecie istnieją pewne dominujące standardy i wytyczne. Jest to zależne od norm badań urządzeń brd, przyjętych w różnych częściach świata. W Europie standardem badań barier ochronnych jest norma EN1317, wprowadzona pod koniec lat 80-tych [133], [134], natomiast w USA obowiązują dokumenty NCHRP350 i MASH [124] [7].

Przytoczone normy stanowią podstawę stworzenia bezpiecznych systemów zabezpieczających pojazd przed wypadnięciem z jezdni. Dokumenty określają kryteria badań zderzeniowych i metody badań, którym podlegają drogowe bariery ochronne. Normy nie wskazują wymiarów, kształtu ani materiału, z którego ma być wykonana bariera ochronna. Opisują natomiast klasy działania barier ochronnych przez określenie ich cech funkcjonalnych, tj. w przypadku normy EN1317: poziomu powstrzymywania, odkształcenia wyrażonego szerokością pracującą i poziomem intensywności zderzenia. Aby ustalić parametry systemu ochronnego lub uzyskać odpowiedni certyfikat, prowadzi się testy zderzeniowe. Podczas testów oceniane są parametry zniszczeń i zachowania pojazdu i badanej bariery. Norma EN1317 wyróżnia jedenaście testów zderzeniowych różniących się typem testowanego pojazdu, jego masą, prędkością oraz kątem uderzenia, które przedstawiono w tabelicy 2.1.

Tab. 2.1 Parametry pojazdów testowych stanowiących kryteria testów zderzeniowych

Rodzaj testu	Prędkość zderzenia (km/h)	Kąt zderzenia (°)	Całkowita masa pojazdu (kg)	Typ pojazdu testowego
TB11	100	20	900	Samochód osobowy
TB21	80	8	1300	
TB22	80	15	1300	
TB31	80	20	1500	
TB32	110	20	1500	
TB41	70	8	10000	Samochód ciężarowy lekki
TB42	70	15	10000	
TB51	70	20	13000	Autobus
TB61	80	20	16000	Samochód ciężarowy ciężki
TB71	65	20	30000	
TB81	65	20	38000	Samochód ciężarowy ciężki z naczepą

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [134]

Klasy działania drogowych barier ochronnych określone są zależnie od prędkości, masy pojazdu i kąta najechania pojazdu na barierę, co musi być potwierdzone w badaniach zderzeniowych. Przy doborze klasy działania barier ochronnych, należy uwzględnić takie parametry jak: klasę lub rodzaj drogi, typ obszaru (zabudowany, niezabudowany), ukształtowanie terenu, parametry drogowo-ruchowe, obiekty inżynierskie oraz potencjalnie zagrożone obszary i przeszkody zlokalizowane w otoczeniu drogi [64],[134].

W ostatnim czasie nastąpił znaczny wzrost znaczenia wykorzystywania symulacji numerycznych do przeprowadzania wirtualnych testów zderzeniowych. Norma EN1317 dopuszcza możliwość certyfikacji modyfikowanych w pewnym zakresie barier ochronnych na podstawie obliczeń numerycznych.

2.3.4. Realizacja wymagań funkcjonalnych

Podstawowe parametry funkcjonalne drogowych barier ochronnych przedstawiono w rozdziale 2.2. Parametry te określają szczegółowo normy [134],[124],[7]. W skład podstawowego podziału parametrów funkcjonalnych barier ochronnych, wchodzi ostatecznie parametry:

- 1) Funkcjonalne (bariery): poziom powstrzymywania (PP).
- 2) Konstrukcyjne: szerokość pracująca (WM), ugięcie dynamiczne (DM), wtargnięcie pojazdu (VI).
- 3) Deformacje: długość uszkodzeń (LU).
- 4) Bezpieczeństwa użytkownika: intensywność zdarzenia (ASI, THIV).

Fundamentalnym parametrem określającym wytrzymałość bariery ochronnej na uderzenia różnych typów pojazdów jest poziom powstrzymywania (PP). Poziomy powstrzymywania jest parametrem funkcjonalnym bariery, określonym poprzez wartość energii kinetycznej pojazdu, która zapewnia utrzymanie pojazdu przy zachowaniu bezpieczeństwa osób w pojeździe i elementów czy obszaru za barierą w szerokości pracy bariery WM. W normie PN-EN 1317 poziomy powstrzymywania barier ochronnych, określone są zdolnością do powstrzymania uderzającego w nie pojazdu przy znormalizowanej masie, prędkości oraz kącie najazdu. Poziomy powstrzymywania dzielą się na: małe (T1, T2, T3), normalne (N1, N2), podwyższone (H1, H2, H3) oraz bardzo wysokie (H4a/ H4b). Na rysunku 2.17 przedstawiono wartości energii kinetycznej pojazdu, jej składowe oraz odpowiadające im poziomy powstrzymywania barier ochronnych dla zdefiniowanych wg normy PN-EN 1317-2 testów zderzeniowych. Jak można zaobserwować (rysunek 2.17), testy zderzeniowe przewidują uderzenia pojazdu w bariery pod różnymi kątami, co powoduje, że energia poprzeczna stanowi tylko około 6 -12% energii całkowitej pojazdu.

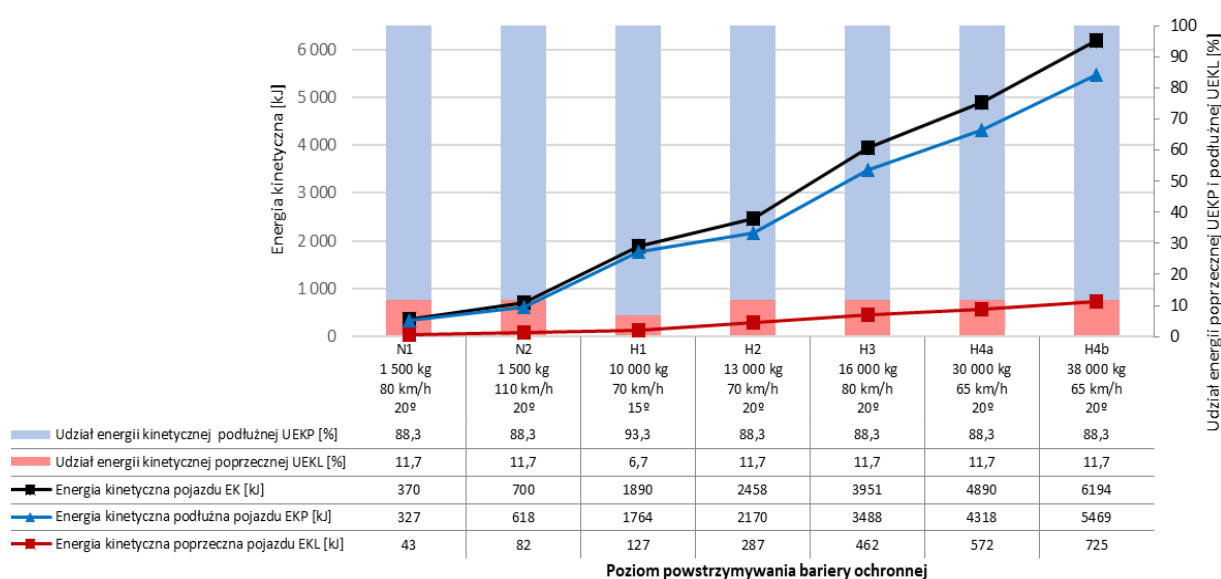
Kolejne parametry (konstrukcyjne i deformacje) odnoszą się do zachowania urządzenia podczas uderzenia w nie pojazdu. Jak przedstawiono na rysunku 2.18, deformacje systemów powstrzymujących pojazdy wyrażone są poprzez znormalizowane wartości, takie jak: szerokość pracująca (WM), ugięcie dynamiczne (DM) oraz wtargnięcie pojazdu (VI).

Szerokość pracująca (WM) systemu powstrzymującego pojazd określana jest odległością liczoną od bocznej krawędzi bariery od strony ruchu (przed zderzeniem), a maksymalnym bocznym położeniem bariery po uderzeniu. Szerokość pracująca nazywana jest miarą odkształcenia bariery.

Ugięciem dynamicznym (DM) nazywa się maksymalne boczne przemieszczenie czołowej powierzchni prowadnicy bariery, mierzonej od strony najazdu pojazdu w kierunku zabezpieczanego

obszaru bądź obiektu. W przypadku wąskich systemów powstrzymujących, dynamiczne ugięcie może być trudne do zmierzenia i jeżeli taki przypadek zaistnieje, to za szerokość pracującą może być przyjęte ugięcie dynamiczne. Znormalizowana szerokość pracująca określana jest natomiast, jako maksymalna odległość dynamiczna (osiągnięta w czasie zderzenia) pojazdu liczona od nieodkształconej wewnętrznej części prowadnicy (jej lokalizacji przed zderzeniem) do maksymalnego wychylenia systemu lub pojazdu.

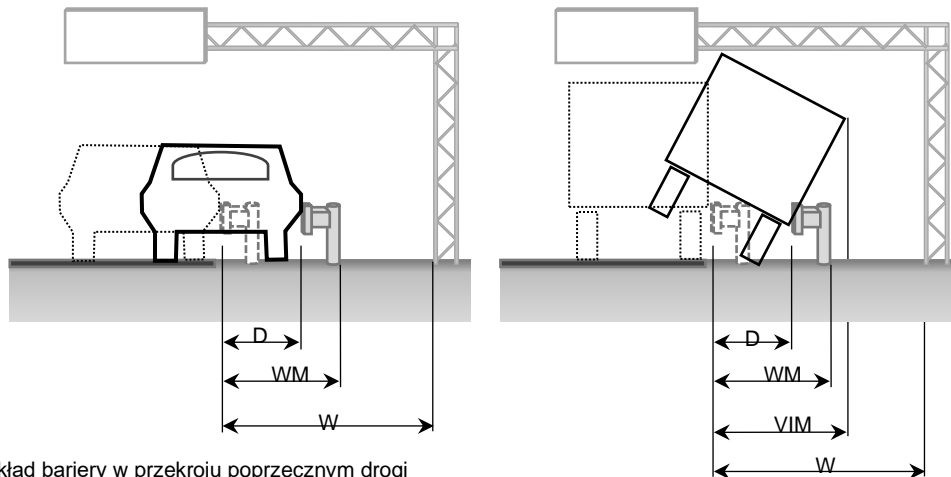
Wtargnięcie pojazdu (VI) jest parametrem obliczanym wyłącznie dla pojazdów ciężarowych oraz autobusów. Parametr ten mierzy się, jako maksymalne dynamiczne położenie pojazdu podczas zderzenia z barierą (rysunek 2.18). Parametr ten ma istotny wpływ dla barier ochronnych stosowanych przy słupach i podporach wiaduktów. Wychylenie się pojazdu poza tą szerokość może skutkować zderzeniem z osłanianym za barierą obiektem.



Rys. 2.17 Wartości graniczne energii kinetycznej dla różnych poziomów powstrzymywania barier ochronnych wymagane w testach zderzeniowych

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [123]

W celu określenia wpływu zderzenia pojazdu z barierą ochronną na osoby znajdujące się w pojeździe, wyróżnia się kolejną grupę parametrów mówiących o bezpieczeństwie użytkownika pojazdu uderzającego w barierę. Poziom intensywności zderzenia to parametr, który określa wpływ zderzenia na osoby znajdujące się w pojeździe w trzystopniowej skali A, B lub C, gdzie poziom intensywności zdarzenia „A” oznacza najmniejsze i najbezpieczniejsze oddziaływanie na osoby w pojeździe podczas zderzenia z barierą ochronną. Do jego określenia poziomu intensywności zdarzenia wykorzystywane są wskaźniki ASI (wskaźnik intensywności przyspieszenia głowy) oraz THIV (teoretyczna prędkość głowy podczas zderzenia). Praktyką jest, że aktualnie odchodzi się od stosowania barier z poziomem intensywności C, ze względu na zbyt poważne konsekwencje zderzeń z takimi barierami.



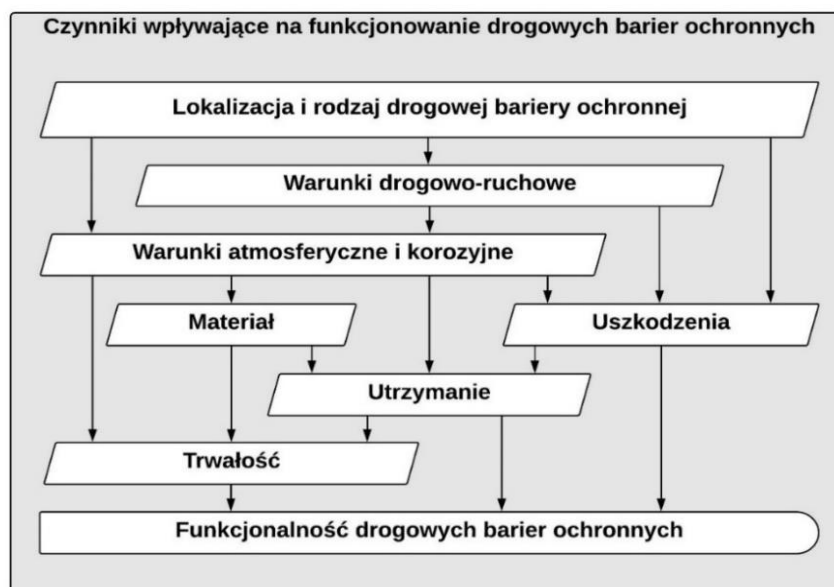
Rys. 2.18 Układ bariery w przekroju poprzecznym drogi

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [14].

2.4. Uszkodzenia drogowych barier ochronnych

2.4.1. Funkcjonalność

Podstawowym celem utrzymania infrastruktury drogowej jest zachowanie jej parametrów użytkowych na odpowiednim poziomie tak, aby zapewnić odpowiednią trwałość i funkcjonalności poszczególnych obiektów czy urządzeń. Drogowe bariery ochronne muszą spełniać wymagania ciągłego funkcjonowania i długiej żywotności oraz wymagania dotyczące wielu właściwości funkcjonalnych, jak np.: bezpieczeństwo, niezawodność, trwałość, efektywność, itp. [90]. Na funkcjonalność urządzeń ma wpływ przede wszystkim rodzaj i trwałość materiału użytego do jego produkcji, a także warunki eksploatacyjne w jakich urządzenia przebywają (warunki atmosferyczne, warunki drogowo-ruchowe, utrzymanie drogi, uszkodzenia barier). Najważniejsze czynniki wpływające na funkcjonowanie barier przedstawiono na rysunku 2.19.



Rys. 2.19 Czynniki wpływające na funkcjonowanie drogowych barier ochronnych

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [131]

Istotną cechą barier ochronnych jest ich trwałość, która odnosi się do zdolności urządzeń bezpieczeństwa do zachowania założonych przez inwestora właściwości przez określony czas w określonych warunkach eksploatacyjnych i środowiskowych. Miarą trwałości jest czas, przez który dany obiekt zachowuje swoje właściwości w stopniu pozwalającym na jego dalsze użytkowanie. W przypadku barier drogowych taką właściwością będzie zdolność do pracy przy zderzeniu, zgodnie z założeniami producenta [91].

Funkcjonalność (użyteczność) jest podstawowym pojęciem wykorzystywanym do oceny zdolności barier ochronnych do użytku [89]. Funkcjonalność barier ochronnych polega na utrzymaniu ciągłości działania tych systemów przez cały okres ich życia. Ciągłość działania systemów powstrzymujących pojazdy jest cechą, która polega na stałym zapewnieniu użytkownikom drogi odpowiednich parametrów jakości przekazywania i odbioru informacji, prowadzenia pojazdu, bezpieczeństwa itp. Aby zapewnić ciągłość działania systemów, niezbędna jest wiedza na temat wielkości cech mierzalnych i niemierzalnych obserwowanego obiektu technicznego, a co za tym idzie jego stanu technicznego. Stan techniczny systemów barier ochronnych stale ulega zmianom, co oznacza, że można w ich cyklu życia wyróżnić nieskończenie wiele stanów. Określenie wszystkich jest w praktyce niemożliwe i niepotrzebne, najprostszym podziałem, jaki można wykorzystać i zastosować jest podział zaproponowany przez S. Legutko [103], który wyróżnia trzy stany:

- stan zdadności – gdy obiekt działa poprawnie (stan dobry), spełnia wyznaczone funkcje i zachowuje parametry, określone w dokumentacji technicznej urządzenia,
- stan częściowej zdadności – gdy któraś z cech obiektu uległa zmianie, ale obiekt nadal może spełniać wyznaczone funkcje (stan dopuszczalny, tolerowany),
- stan niezdadności – gdy któraś z cech obiektu uległa zmianie na tyle, że obiekt nie może spełniać wyznaczonych mu funkcji i parametrów (stan niedopuszczalny).

W kontekście drogowych barier ochronnych, stan techniczny może ulegać zmianom w zależności od rozmaitych procesów destrukcyjnych (uszkodzeń). Do zmian tych dochodzi najczęściej na skutek oddziaływania otoczenia, jakim jest środowisko drogowe oraz poruszających się w nim pojazdów. W trakcie eksploatacji drogowych barier ochronnych ich stan techniczny ulega zmianie poprzez jej uszkodzenia.

W trakcie cyklu życia bariery ochronnej wyróżnia się kilka stanów mówiących, w jakim jest stanie . W ramach tego podziału wyróżnia się stan, w którym drogowa bariera jest użytkowana i musi być technicznie sprawna oraz stan, w którym bariera jest obsługiwana tj. etap, w którym przywraca się jej zdolność.

2.4.2. Źródła uszkodzeń

Uszkodzenie lub zniszczenie bariery ochronnej zdefiniować można jako zdarzenie niezamierzone, powodujące, że urządzenie czasowo lub na stałe traci stan zdadności i przechodzi do stanu częściowej zdadności lub do niezdadności [103]. Uszkodzenia drogowych barier ochronnych są jednym z istotnych zdarzeń występujących w procesie ich użytkowania, które determinują ich niezawodność, efektywność pracy, a także zakres potrzeb diagnostyki technicznej. Każde uszkodzenie powoduje w różnym stopniu

zmianę stanu zdadności urządzenia w trakcie eksploatacji. W trakcie eksploatacji drogowych barier ochronnych, ich stan techniczny ulega zmianie poprzez uszkodzenia, które klasyfikuje się jako [198]:

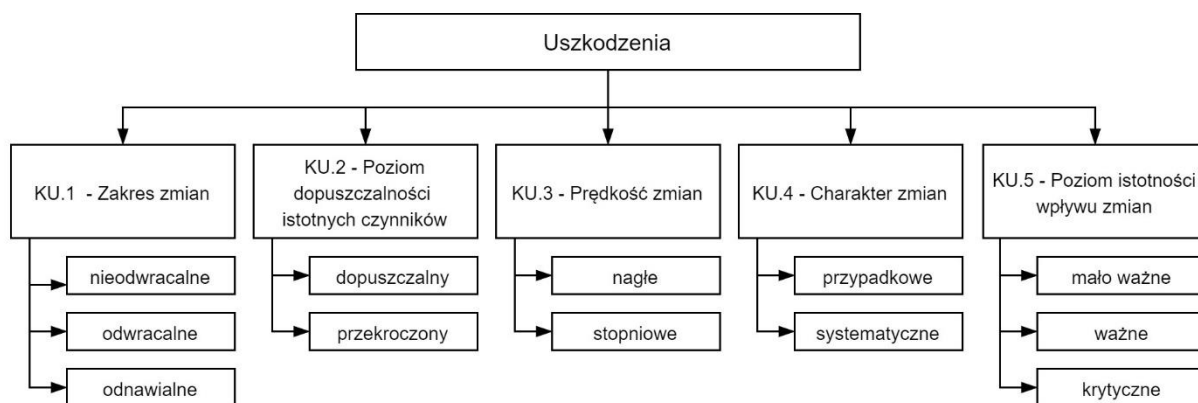
- 1) uszkodzenia wywołane stopniowym i nieodwracalnym procesem starzeniowym – np. poprzez korozję mechaniczną,
- 2) uszkodzenia konstrukcyjne powstałe w wyniku nieprawidłowego zainstalowania barier powstałych w wyniku błędów projektowych lub błędów montażowych, np. montaż bariery na krawędzi skarpy, naprężenie z niewłaściwą siłą ciągnięcia prowadnicy bariery linowej,
- 3) uszkodzenia eksploatacyjne wywołane ukrytymi wadami materiałowymi i błędami technologicznymi elementów barier, powstałych na etapie produkcji, np. na etapie procesu galwanizacji elementów bariery lub doboru niewłaściwej mieszanki betonu do produkcji barier betonowych,
- 4) uszkodzenia eksploatacyjne powstałe w uderzenia kamieni spod kół jadących pojazdów (w wyniku pracy maszyn utrzymaniowych drogi),
- 5) uszkodzenia eksploatacyjne powstałe w wyniku uderzenia pojazdu w barierę.

W ramach niniejszej pracy, skupiono się wyłącznie na ostatnim piątym rodzaju uszkodzeń, które są wynikiem wypadnięć pojazdów z jezdni drogi.

2.4.3. Klasyfikacja uszkodzeń

Uszkodzenia barier drogowych podobnie, jak w przypadku typowych uszkodzeń obiektów eksploatacji [198],[103], można sklasyfikować ze względu na następujące kryteria (rysunek 2.20):

- zakres zmian,
- poziom dopuszczalności istotnych czynników,
- prędkość zmian,
- charakter zmian,
- poziom istotności wpływu zmian.



Rys. 2.20 Przykład klasyfikacji uszkodzeń

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [198],[103]

KU.1 – Zakres zmian. Kryterium to określa zakres zmian, jakie zaszły w analizowanym urządzeniu w wyniku utraty zdadności i możliwość przywrócenia urządzenia do ponownego użytkowania. Przyjmuje się trzy poziomy zmian, jakie zaszły w urządzeniu: nieodwracalne, odwracalne, odnawialne. Zmiany nieodwracalne oznaczają takie, których przywrócenie urządzenia do sprawności jest niemożliwe lub

wymaga całkowitej wymiany jego konstrukcji (np. uszkodzenia wywołane uderzeniem pojazdu w barierę z dużą energią). Zmiany odwracalne, czyli niewielkie zmiany w urządzeniu, które można naprawić poprzez rutynowe przeglądy i zabiegi z nimi związane przywrócić (np. uszkodzenia wywołane zbyt niskim lub zbyt wysokim napięciem przewodnic barier linowych, brakiem lub niedokręcaniem pojedynczych śrub łączących przewodnice). Zmiany odnawialne, czyli te, które można przywrócić poprzez zabiegi utrzymaniowe i konserwacyjne (np. odnowienie powłoki malarskiej/cynkowej/betonu).

KU.2 – Poziom dopuszczalności istotnych czynników. Kryterium to określa poziom dopuszczalności wybranych, najbardziej istotnych czynników, których parametry dają się zmierzyć i porównać z wartością nominalną i graniczną. Dla przyjętych do pomiaru parametrów, ustala się granicę dopuszczalności i klasyfikuje uzyskane wyniki do jednej z klas - dopuszczalne lub przekroczone. Dopuszczalne, które są mniejsze lub zbliżone do wartości granicznych mierzonej cechy (np. grubość powłoki cynkowej, napięcie liny przewodnic). Przekroczone, które przekraczają wartości graniczne mierzonej cechy.

KU.3 Czas zmian. Kryterium związane z okresem zmian wywołujących uszkodzenia. Stopniowo wywołane np. korozją mechaniczną oraz nagle, związane np. z uderzeniem pojazdu w barierę ochronną.

KU.4 Charakter zmian. Kryterium to zależne jest od charakteru pojawienia się uszkodzenia. Przyjmuje się dwa przypadki zbieżności tych zdarzeń: przypadkowe, mające charakter losowy, niezamierzony (np. uderzenie pojazdu w barierę) oraz systematyczne (przewidywalne), powtarzające się w pewnych odstępach czasu (np. uderzenia mechaniczne kamieni spod kół pojazdu lub zmiana napięcia lin w wyniku zmiany temperatury otoczenia).

KU.5 Poziom istotności wpływu zmian. Kryterium to określa podział ze względu na poziom istotności wpływu zmian KU.1 – KU.4 na funkcjonowanie obiektu drogowego. W tym przypadku można zaimplementować podział zastosowany do opisu stanu technicznego maszyn i urządzeń [103], w którym wyróżniono trzy poziomy wpływu zmian na funkcjonowanie urządzeń:

- mało ważny (mało istotny wpływ), w którym zmiany nie wpływają lub w nieznaczny sposób wpływają na działanie urządzenia, a podjęcie działań związanych z jego naprawą nie wymaga natychmiastowej reakcji, w literaturze spotyka się również określenie uszkodzeń mało ważnych, jako usterek obiektu,
- ważny (istotny wpływ), związany ze zmianami zagrażającymi utratą parametrów technicznych i niewłaściwą pracą obiektu, wymagający działań naprawczych w niedługim czasie od momentu zajścia zdarzenia,
- krytyczny (bardzo istotny wpływ), zagrażający życiu i zdrowiu ludzi w bliskim otoczeniu obiektu, wymagający natychmiastowych działań naprawczych.

Identyfikacja każdego rodzaju uszkodzeń powstałych w trakcie eksploatacji barier ochronnych jest podstawowym działaniem związanym z przywróceniem im możliwości realizacji ich funkcji. Zakres napraw czy zabiegów wiąże się bezpośrednio z rodzajem uszkodzenia, jego wielkością a także zasięgiem. Od lokalizacji, rodzaju i wielkości uszkodzenia zależy również jego czas naprawy.

Najczęstszym czynnikiem generującym uszkodzenia barier są wypadnięcia pojazdów z jezdni. W związku z tym prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia bariery zależy od jej niezawodności.

Teoria niezawodności opiera się na teorii prawdopodobieństwa, która zajmuje się badaniem i prognozowaniem zdarzeń losowych. Celem badań i analiz niezawodnościowych [35] w tym przypadku jest znalezienie funkcji opisującej prawdopodobieństwo uszkodzenia bariery, zależnego od czasu, która może mieć ogólną postać opisaną wzorem 2.13:

$$P_f(t) = 1 - \Phi(\beta) \quad (2.13)$$

gdzie:

$P_f(t)$ – prawdopodobieństwo uszkodzenia w czasie t ,

β – indeks niezawodności,

Φ – dystrybuenta (funkcja wyznaczająca rozkład prawdopodobieństwa).

W przypadku barier drogowych podstawy teorii niezawodności można wykorzystać do opisu występowania częstości występowania zdarzeń niepożądanych, jakimi są uderzenia pojazdu w barierę. Funkcja niezawodności określi prawdopodobieństwo uszkodzenia poszczególnych elementów systemów powstrzymujących pojazd na drodze.

2.4.4. Ocena funkcjonalności

Wiele badań prowadzonych w USA i w Szwecji [6],[50],[58],[8],[56] wskazuje zasadność napraw uszkodzonych barier ochronnych, których zaniechanie może skutkować utratą ich parametrów funkcjonalnych. Wówczas potrzeba naprawy całkowicie zniszczonej bariery ochronnej jest oczywista. Znacznie częściej jednak dochodzi do drobnych uszkodzeń barier np. płytkie wgniecenia, które są efektem kolizji z barierami przy niskich prędkościach i małych kątach najazdu. Drobne uszkodzenia mogą również wynikać z rutynowych zabiegów konserwacyjnych, odśnieżania, koszenia czy wpływu zmiennych warunków atmosferycznych. Bez względu na przyczynę uszkodzeń barier ochronnych, wyzwaniem jest zidentyfikowanie przez służby utrzymaniowe tych uszkodzeń, których zaniedbanie może doprowadzić do fatalnych w skutkach zagrożeń na drogach. Konsekwencją może być również narażenie jednostek zajmujących się zarządzaniem drogi na roszczenia wynikające z odpowiedzialności deliktowej (z czynu niedozwolonego / zaniedbania). Czynniki te podkreślają potrzebę wprowadzania wytycznych oceny uszkodzeń barier ochronnych. Sygnalizują, jak wielkie znaczenie ma zdolność jednostek zajmujących się utrzymaniem dróg do identyfikacji pozornie drobnych uszkodzeń urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego.

Wprowadzone w 2008 roku wytyczne [50], dotyczące napraw stalowych barier ochronnych okazały się niezbędnym, wymaganym przez FHWA (Federal Highway Administration) dokumentem w USA. Dokument przeznaczony został dla personelu zajmującego się utrzymaniem dróg, który kompleksowo zajmuje się planowaniem i logistyką napraw drogowych barier ochronnych. Wytyczne określają, kiedy naprawa stalowych barier ochronnych jest konieczna, które z barier należy niezwłocznie wymienić oraz wyszczególniają klasyfikację stopnia uszkodzenia barier. Uszkodzone bariery dzieli się na trzy kategorie (tabela 2.2): (1) niefunkcjonalne, (2) uszkodzone, ale nadal funkcjonalne, (3) funkcjonalne z drobnymi uszkodzeniami. Zgodnie, z wytycznymi FHWA rodzaj uszkodzenia decyduje o tym, kiedy urządzenie podlega naprawie. Przykładowo raport zaleca naprawić uszkodzenia 1 kategorii w możliwie najkrótszym czasie w zależności od ryzyka, jakie stanowią uszkodzenia dla pozostałych użytkowników. Kategorie 2

i 3, ze względu na to, że stanowią mniejsze zagrożenie, ich naprawy mogą odbywać się w późniejszych terminach lub podczas rutynowych zabiegów odnowy barier.

Tab. 2.2 Przykład klasyfikacji funkcjonalności barier ochronnych wg uszkodzeń

Kategoria funkcjonalności	Uszkodzenia
(1) Niefunkcjonalne	<ul style="list-style-type: none"> Bariera została przerwana 3 lub więcej słupków uszkodzonych lub odłączonych od prowadnicy bariery Ugięcie prowadnicy bariery większe niż 45 cm
(2) Uszkodzone, ale nadal funkcjonalne	<ul style="list-style-type: none"> Bariera nie została przerwana (wygięta lub znacząco zniekształcona) 2 lub mniej słupków uszkodzonych lub odłączonych od prowadnicy bariery Ugięcie prowadnicy bariery mniejsze niż 30 cm
(3) Funkcjonalne z drobnymi uszkodzeniami	<ul style="list-style-type: none"> Bariera nie została przerwana (prowadnica może być wgnieciona lub spłaszczona) Brak uszkodzonych lub odłączonych od prowadnicy bariery słupków Ugięcie prowadnicy bariery mniejsze niż 15 cm

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [50]

Podobną próbę stworzenia wytycznych utrzymania stalowych urządzeń brd podjęto we wcześniejszych latach stowarzyszenie AASHTO. Wytyczne te opisują typy uszkodzeń stalowych barier ochronnych i rekomendacje ich napraw. Jednakże nie są to wytyczne ilościowe, które jasno określają granice zdatności urządzeń. Dla przykładu wymiana barier jest rekomendowana w momencie, gdy bariera jest przerwana (dziura lub pęknięcie), ma uszkodzony/rozłączony słupek, prowadnica jest spłaszczona lub brakuje śrub w miejscach połączeń. Wytyczne nie wskazują dokładnej specyfikacji uszkodzeń barier ochronnych i nie wskazują czasu, kiedy bariery powinny być obligatoryjnie wymienione.

Badania prowadzone w ostatnich latach [55],[8], skupiały się na dopracowaniu lub stworzeniu nowych, podobnych wytycznych wspomagających służby utrzymaniowe w identyfikacji i ocenie uszkodzeń barier ochronnych, podlegających naprawie i przywróceniu parametrów funkcjonalnych. Badania zakładały, że kryteria do oceny funkcjonalności oparte będą na obiektywnych i ilościowych wartościach progowych, dla których zalecane są czynności naprawcze. Zespoły badawcze zakładały ocenę typowych uszkodzeń z wykorzystaniem kontrolowanych eksperymentów oraz modeli obliczeniowych. Programy badań były zbliżone do siebie i składały się z trzech głównych etapów:

1. Wybór najczęściej występujących uszkodzeń barier ochronnych do badań.
2. Badania wybranych uszkodzeń barier ochronnych.
3. Opracowanie podstaw merytorycznych i rekomendacji do wytycznych oceny uszkodzeń przebadanych barier ochronnych.

Pierwszym etapem programów badawczych było wyznaczenie zestawu typowych uszkodzeń, które miały podlegać późniejszej ocenie i klasyfikacji. Wybór uszkodzeń został przeprowadzony w oparciu o badania literaturowe i ankietowe jednostek utrzymujących drogi. Kolejnym krokiem, jaki podejmowano, było zaproponowanie obiektywnych i wymiernych kryteriów dla każdego rodzaju napraw. Proponowane kryteria opierały się głównie na istniejących już i wykorzystywanych przez jednostki utrzymaniowe, uzupełnionych o ewentualne braki. W tabeli 2.3 przedstawiono listę typów uszkodzeń objętych badaniami.

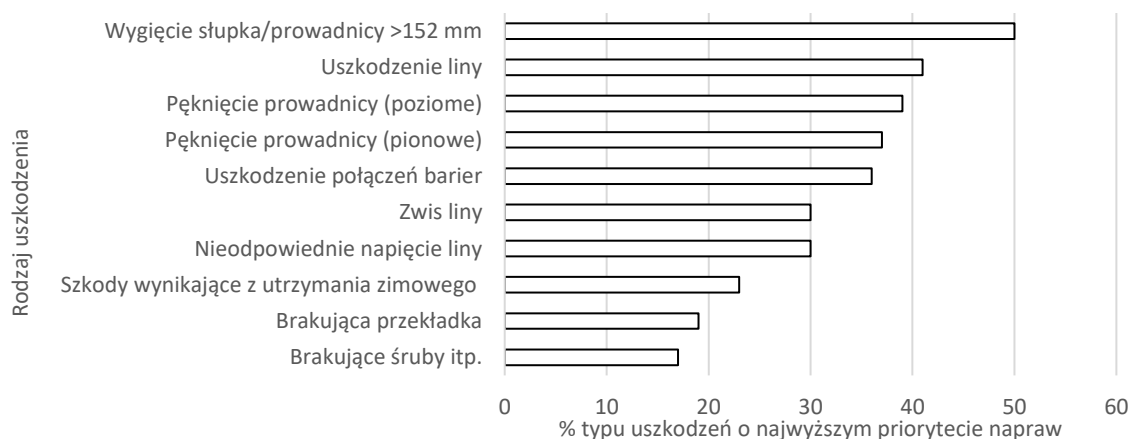
Z przeanalizowanych badań wynika, że do najczęściej występujących uszkodzeń o najwyższym prioryecie naprawy należą uszkodzenia związane z ugięciem słupka i prowadnicy na szerokość

większą niż 15 cm, następnie pęknięcia/nacięcia prowadnic oraz wszelkie uszkodzenia lin. Dziesięć najczęściej występujących uszkodzeń o najwyższym priorytecie naprawy wyznaczonych przez jednostki utrzymaniowe przedstawiono na rysunku 2.21.

Tab. 2.3 Kryteria napraw uszkodzonych elementów barier ochronnych.

Element	Typ uszkodzenia	Opis uszkodzenia	Kryterium ilościowe naprawy
Prowadnica	Ugięcie	Poziome ugięcie prowadnicy	Ugięcie dynamiczne
		Spłaszczenie prowadnicy (grubość)	Procent spłaszczenia
		Spłaszczenie prowadnicy (wysokość)	Procent spłaszczenia
	Dziury/ Rozdarcia	Dziura (niefabryczna)	Średnica otworu
		Dziura (niefabryczna)	Liczba dziur w segmencie
		Pionowe rozdarcie	Długość rozdarcia
		Poziome rozdarcie	Długość rozdarcia
Uszkodzenie materiału	Korozja prowadnicy	Liczba skorodowanych elementów	
Wysokość prowadnicy	Prowadnica na niewłaściwej wysokości (za nisko/ za wysoko)	Wysokość osi bariery	
Słupki	Ugięcie	Ugięcie prowadnicy/słupka	Ugięcie dynamiczne
		Skręcenie słupka	Liczba uszkodzonych słupków
	Złamania/ Przerwy	Brak połączenia słupka z barierą	Liczba brakujących/ rozłączonych słupków
	Uszkodzenie materiału	Korozja słupków	Liczba skorodowanych elementów
Przekładki	Ugięcie	Przekręcona/ wygięta przekładka	Liczba ugiętych przekładek
	Brak	Brak przekładek	Liczba brakujących przekładek
	Uszkodzenie materiału	Korozja przekładek	Liczba skorodowanych przekładek
Połączenia	Utrata integralności	Uszkodzenie połączenia	Powierzchnia skorodowanego materiału pod śrubą
		Brak, osłabienie lub uszkodzenie połączenia	Liczba uszkodzonych śrub
		Brak połączenia między słupkiem a barierą	Liczba rozłączonych słupków

Źródło: opracowanie własne na podstawie [8]



Rys. 2.21 Udział procentowy uszkodzeń ocenianych przez jednostki utrzymaniowe jako najwyższy priorytet - niezwłocznie naprawić

Źródło: opracowanie własne na podstawie [58]

W celu określenia kryteriów pozwalających na ocenę stopnia uszkodzenia przebadanych barier oraz nadania mu priorytetu napraw, przeprowadzono testy zderzeniowe oraz symulacje komputerowe

wcześniej uszkodzonych barier. Uszkodzenia barier miały odzwierciedlać różne uszkodzenia spotykane w warunkach rzeczywistych na drodze związane z ugięciem bariery po uderzeniach pojazdu, brakiem elementów systemu barier, uszkodzeniem materiału i utratą integralności połączenia bariery. Testy zderzeniowe przeprowadzono przy wykorzystaniu wahadła oraz samochodu, natomiast symulacje komputerowe bazowały na metodzie elementów skończonych, a wykonane zostały w programie LS-DYNA. Przy pomocy tych metod badano zachowanie bariery drogowej poddanej wybranym uszkodzeniom. Najwięcej przeprowadzonych badań odnotowano z wykorzystaniem wahadła. Przykład wykorzystywanego wahadła i zasady działania przedstawiono na rysunku 2.22. Testy zderzeniowe wykorzystujące wahadło do uderzenia w barierę wykorzystywano w dwóch celach: po pierwsze do badania integralności strukturalnej bariery, po drugie do walidacji modeli komputerowych. Ograniczeniem metody wykorzystującej wahadło jest to, że można przy jej pomocy zbadać jedynie działanie bariery, niczego nie mówi zaś o zachowaniu uderzającego w barierę pojazdu [8].



Rys. 2.22 Przykład wykorzystania wahadła do testów zderzeniowych z barierami ochronnymi.

Źródło: [8]

Dużą część obserwowanych badań uszkodzeń barier ochronnych przeprowadzono, modelując ich przebieg przy pomocy metody elementów skończonych i wykorzystując do tego program LS-DYNA. Decydowano się najczęściej na takie rozwiązania, ponieważ pozwalało to na zmniejszenie kosztów badań, a także przeprowadzenie tego samego testu zderzeniowego przy różnych warunkach czy parametrach (np. przy różnym stopniu uszkodzenia bariery). W celu walidacji uzyskanych wyników badań numerycznych, przeprowadzano pełnometrażowe testy zderzeniowe w analogicznych warunkach lub posługiwano się w tym celu danymi literaturowymi.

2.4.5. Klasyfikacja badań funkcjonowania barier ochronnych

Od początku istnienia barier ochronnych, celem badaczy i producentów barier była analiza czynników wpływających na ich zmiany ich trwałości i funkcjonalności w wyniku uderzeń w nie pojazdów. Określenie wpływu wszystkich czynników na funkcjonowanie barier jest nadal bardzo trudne. W niniejszym podrozdziale zebrano i przedstawiono metody wykorzystywane do badań i analiz czynników wpływających na funkcjonowanie drogowych barier ochronnych. Na podstawie analizowanej literatury wyodrębnić można cztery metody badawcze: analityczne, statystyczne, mechanistyczne poligonowe oraz mechanistyczne wspomagające, w postaci symulacji numerycznych [28].

Wraz z rozwojem konstrukcji drogowych barier ochronnych, pojawiła się potrzeba opracowania modeli teoretycznych kolizji pojazdu samochodowego z barierą ochronną. Jeden z pierwszych modeli

teoretycznych kolizji pojazdu z drogową barierą ochronną, przyjęto w badaniach z 1967 roku [67], na podstawie których opracowano model matematyczny przedstawiający trajektorię ruchu pojazdu podczas zderzenia z różnym rodzajem drogowej bariery ochronnej. Wraz z tym, zaczęto konstruować modele analityczne służące określeniu i przewidywaniu prawdopodobieństwa utraty zdolności funkcjonowania bariery. Najczęściej w tego typu modelach wykorzystywano zależności między siłą uderzenia pojazdu w barierę drogową w zależności od masy pojazdu, prędkości i kąta uderzenia pojazdu w barierę [167],[119],[170]. Opracowane w ten sposób modele dotyczyły najczęściej pojedynczych uderzeń pojazdu w wybrany rodzaj bariery drogowej. Natomiast do szacowania liczby zdarzeń związanych z uderzeniem pojazdu w barierę, sumowano częstości występowania różnych rodzajów pojedynczych zdarzeń.

Okazało się, że prowadzone w ten sposób analizy są niewystarczające, zaczęto zatem wykorzystywać równolegle metody statystyczne. Metody statystyczne polegają na tym, że na podstawie dostępnych, szczegółowych danych o zdarzeniach niebezpiecznych na drogach identyfikuje się rzeczywiste przypadki uderzenia pojazdu w barierę drogową, zbiera dane: o miejscu zdarzenia, o warunkach konstrukcyjnych barier, o ruchu drogowym i innych okolicznościach tych zdarzeń. Następnie korzystając z danych zebranych w bazach buduje się modele matematyczne określające zależność parametrów funkcjonalnych barier oraz częstości i wielkości uszkodzeń od najbardziej istotnych czynników. Modele te mogą dotyczyć pojedynczych zdarzeń, jak i grupy zdarzeń na odcinkach dróg. To podejście wykorzystywane jest, gdy mamy dostęp do historycznych danych o wypadkach z barierami drogowymi.

W dotychczasowych badaniach poszukiwano narzędzi analitycznych i numerycznych służących do budowy modeli opisowych i prognostycznych funkcjonowania barier drogowych. Pierwsze modele ze względu na ograniczenia zasobów obliczeniowych były zwykle uproszczone i niedokładne. Spowodowało to, że opracowania konstrukcyjne barier były tylko wstępem w procesie wdrożenia urządzenia do praktyki drogowej. Jedynym wiarygodnym narzędziem w tym przypadku były badania mechaniczne w postaci pełnometrażowych testów zderzeniowych. Niestety, przeprowadzanie testów zderzeniowych wiąże się z bardzo dużymi kosztami, tym bardziej że niewystarczającym jest jedno najechanie doświadczalne na nowy system, by uznać go za poprawnie zaprojektowanym. Dzięki rozwinięciu metod obliczeniowych (MES) oraz wraz ze wzrostem mocy obliczeniowych komputerów, rozwojem zasobów sprzętowych i programowych, zastosowano symulację numeryczną, jako narzędzie badawcze.

Zastosowanie symulacji numerycznych w znacznym stopniu zmniejsza koszty rozwoju systemów barier ochronnych oraz pozwala wyeliminować podstawowe błędy już na etapie projektowania – zanim urządzenie zostanie wyprodukowane i poddane testom zderzeniowym. Programy komputerowe pozwalają na bardzo dokładne oszacowanie oddziaływania na: pojazd na barierę oraz bariery na pojazd i osoby znajdujące się w pojeździe. Do najpowszechniej stosowanego oprogramowania wykorzystywanego do badania symulacyjnego barier drogowych należy pakiet komputerowych LS-DYNA. Dzięki niemu można dokonać wszelkich analiz zdarzeń dynamicznych o krótkim czasie trwania i zmiennych w czasie, do których bez wątpienia należy zaliczyć wszelkie niepożądane sytuacje, z jakimi można mieć do czynienia w ruchu drogowym – zderzenia czołowe, boczne, dachowania czy wpływ

wystrzału poduszki powietrznej na osoby będące w pojeździe [191]. Niewątpliwą zaletą przeprowadzania wirtualnych testów numerycznych jest możliwość wykonania szerokich analiz parametrycznych dla różnych konfiguracji pojazd - bariera. Można więc odwzorować sytuacje, które nie są przewidziane normowym badaniem, ale mogą wystąpić w rzeczywistości. Dzięki obliczeniom komputerowym można analizować wpływ także innych, niż normowe czynników wpływających na przebieg zderzenia. Do parametrów tych można zaliczyć np. liczbę osób w pojeździe oraz ich rozmieszczenie, stan nawierzchni drogi, pochylenia drogi, warunki pogodowe, wymiary i usytuowania krawężnika drogowego, odchylenia systemu bariery od pionu itd. Na przestrzeni lat poziom szczegółów liczbowych modeli barier i pojazdów drogowych wzrosły znacząco. Jest to ściśle związane ze wzrostem mocy obliczeniowej i dostępnych zasobów.

2.5. Przegląd i analiza modeli prawdopodobieństwa, liczby i skutków zdarzeń drogowych związanych z wypadnięciem pojazdu z jezdni

Wypadnięcie pojazdu z drogi definiuje się jako opuszczenie przez pojazd pasa ruchu i wjazd na pobocze (run-off-road accident – ROR accident) [161]. Wjazdy pojazdów na pobocze odnoszą się wyłącznie do niezamierzonych lub niekontrolowanych wtargnięć pojazdów. Celowe lub kontrolowane przekroczenie zewnętrznych krawędzi jezdni (np. wynikające z rutynowych przeglądów i zabiegów utrzymaniowych drogi, czy też zatrzymań pojazdów), spowodowane zamierzonym wjazdem na pobocze nie jest uważane za wypadnięcie pojazdu z jezdni drogi. W kontekście odcinka drogi, całkowita liczba wypadnięć pojazdów obejmuje przejazdy przez bliższe i dalsze krawędzie jezdni w obydwu kierunkach. Szacunkową częstość wypadnięć pojazdów na odcinkach dróg, reprezentuje najczęściej liczba pojazdów, które opuściły pas ruchu i wjechały na pobocze lub pas dzielący jezdnie na odcinku i w czasie t (np. liczba wypadnięć/km/rok), lub w odniesieniu do natężenia ruchu pojazdów (np. liczba wypadnięć/mln poj. km) [111].

Prawdopodobieństwo wypadnięcia pojazdu było przedmiotem wielu badań w ciągu ostatnich sześćdziesięciu lat, większość z nich poświęconych było częstości wypadnięć [106],[59]. Najważniejsze z nich przedstawiono w tablicy 2.4. Dane zebrane przez Coopera oraz Hutchinsona i Kennedy'ego zapoczątkowały tego typu badania. Wysiłki związane z przygotowaniem badań oraz gromadzeniem danych udokumentowano w wielu raportach m.in. [77],[76],[34]. W ramach badań zrekrutowano i przeszkolono dwanaście zespołów zbierających dane w okresie czterech miesięcy. W tym czasie raz w tygodniu monitorowano ślady opon (ich długość oraz odległość i kąt względem krawędzi jezdni) i obiekty znajdujące się na poboczu drogi (bez pasa dzielącego) uderzane przez pojazdy, które oznaczono i zmierzono, aby zliczyć i scharakteryzować wypadnięcia pojazdów. Dane zebrano na 59 odcinkach dróg o długości od 60 do 100 km. Badane odcinki nie były jednorodne pod względem kluczowych atrybutów, w tym ograniczeń prędkości, średniego dobowego ruchu (SDR) i utwardzonej szerokości pobocza. Ograniczenia prędkości [34] związane z uzupełnieniem każdego z przypadków wypadnięcia pojazdu o powiązaną geometrię drogi (liczbę jezdni, pasów ruchu, poboczy), oraz ruchu pojazdów, dostarczyły stosownego uzasadnienia do podziału długich odcinków dróg na krótsze. Umożliwiło to również opracowania pierwszych modeli koncentracji wypadnięć pojazdów z drogi.

Tab. 2.4 Przegląd najważniejszych zbiorów danych badań wykorzystanych do modelowania częstości wypadnięć pojazdów

Badania (bezpśrednie, własne)	Kraj	Lata badań	Źródło	Liczba odcinków	Długość odcinków (km)	Liczba wypadnięć	Zakres natężeń ruchu pojazdów
Hutchinson - dwujezdniowe	USA	1957-1963	[76]	13	207	332	1 900 - 31 253
Cooper - dwujezdniowe	USA	1978	[34]	181	992	528	5 954 - 44 930
Cooper - jednojezdniowe	USA	1978	[34]	575	5 917	1 353	1 000 - 3 000
Stefan - dwujezdniowe	Austria	2007 - 2011	[183]	567	1 434	1 008	3 300 - 46 150
Amato - dwujezdniowe	Irlandia	2007 - 2011	[183]	280	287	131	3 875 - 54 401
Erginbas - dwujezdniowe	Wielka Brytania	2007 - 2011	[183]	912	912	668	5 850 - 155 400
La Torre - dwujezdniowe	Włochy	2007 - 2011	[183]	99	327	671	3 989 - 31 186
Thomson - dwujezdniowe	Szwecja	2003 - 2009	[183]	6 799	2 806	1 527	4 600 - 21 250
Amato - jednojezdniowe	Irlandia	2007 - 2011	[183]	283	287	109	1 490 - 15 100
Thomson - jednojezdniowe	Szwecja	2003 - 2009	[183]	155	97	31	2 200 - 7 400
Badania (pośrednie, zapożyczone)	Kraj	Lata badań	Źródło	Liczba odcinków	Długość odcinków (km)	Liczba wypadnięć	Zakres natężeń ruchu pojazdów
Miaou - jednojezdniowe	USA	1985-1987	[112]	712	BD	993	159 - 17 766
Carrigan – dwujezdniowe zamiejskie	USA	2002-2010	[119]	25 414	BD	BD	710 - 67 390
Carrigan – dwujezdniowe miejskie	USA	2002-2010	[119]	24 025	BD	BD	780 - 155 340
Carrigan – jednojezdniowe zamiejskie	USA	2002-2010	[119]	38 974	BD	BD	40 - 27 540
Carrigan – jednojezdniowe miejskie	USA	2002-2010	[119]	10 727	BD	BD	357 - 42 836

Badania Coopera zostały wykorzystane ponownie w roku 2012 w ramach programu RSAP (Road Safety Analysis Program) [119]. Wyniki ponownej analizy obejmowały wyznaczenie częstości wypadnięć pojazdów dla dwupasowych niepodzielonych, cztero i wielopasowych podzielonych dróg szybkiego ruchu. W celu wyznaczenia bazowego wskaźnika częstości wypadnięć pojazdów z jezdni wyselekcjonowano jednorodne odcinki dróg, które charakteryzowały się:

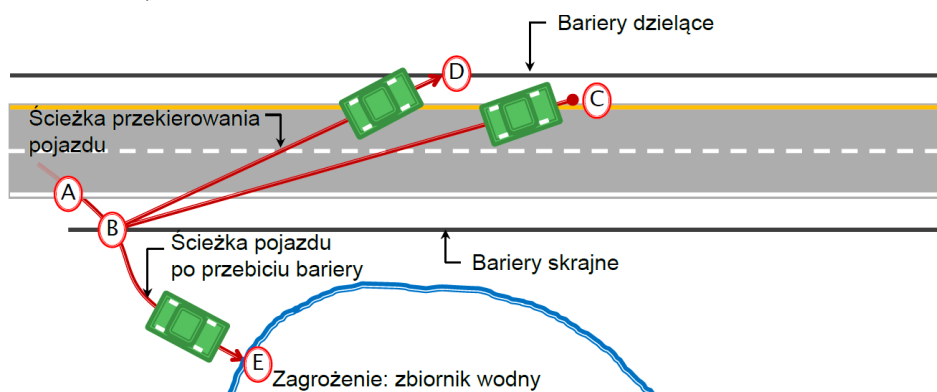
- ograniczeniem prędkości do 65 mil na godzinę,
- odcinkami płaskimi i prostymi (o stosunkowo niskiej krętości drogi),
- szerokością pasów ruchu większej lub równej dwunastu stopom (tj. 3.65 m),
- brakiem głównych punktów dostępu (skrzyżowań, zjazdów, węzłów).

Odejście od tych warunków bazowych, wymagało użycia współczynników korekty w celu kalibracji częstości wypadnięć do konkretnych warunków w terenie. Wyznaczenie nowych zależności częstości wypadnięć zostało wykorzystane w celu obliczenia całkowitych kosztów związanych z wypadnięciem pojazdu z drogi oraz jego konsekwencjami.

Zgodnie z przedstawionym na rys. 2.23 scenariuszem, po wypadnięciu pojazdu z jezdni (punkt A) może dojść do bezpośredniego zderzenia pojazdu z barierą ochronną (punkt B) pod warunkiem, że pojazd wcześniej nie utracił stateczności i nie wywrócił się (ścieżka A-B). Ze względu na energię, z jaką pojazd uderzy w barierę ochronną, wyróżnia się trzy ścieżki możliwego przebiegu zdarzenia niebezpiecznego:

- w przypadku małej energii uderzenia pojazdu - uderzenie i przekierowanie pojazdu na jezdnię, po której się poruszał (ścieżka B-C) kończące się zatrzymaniem lub wywróceniem pojazdu,

- w przypadku średniej i dużej energii uderzenia pojazdu – uderzenie i przekierowanie pojazdu na przeciwną barierę ochronną (ścieżka B-D) kończąca się wywróceniem lub uderzeniem pojazdu w przeciwną barierę ochronną,
- w przypadku dużych i bardzo dużych energii uderzenia – uderzenie i przebicie bariery ochronnej (punkt B, ścieżka B-E).



Rys. 2.23 Przykład ilustrujący proces przewidywanych efektów wypadnięcia pojazdu dla pojedynczego zdarzenia niebezpiecznego

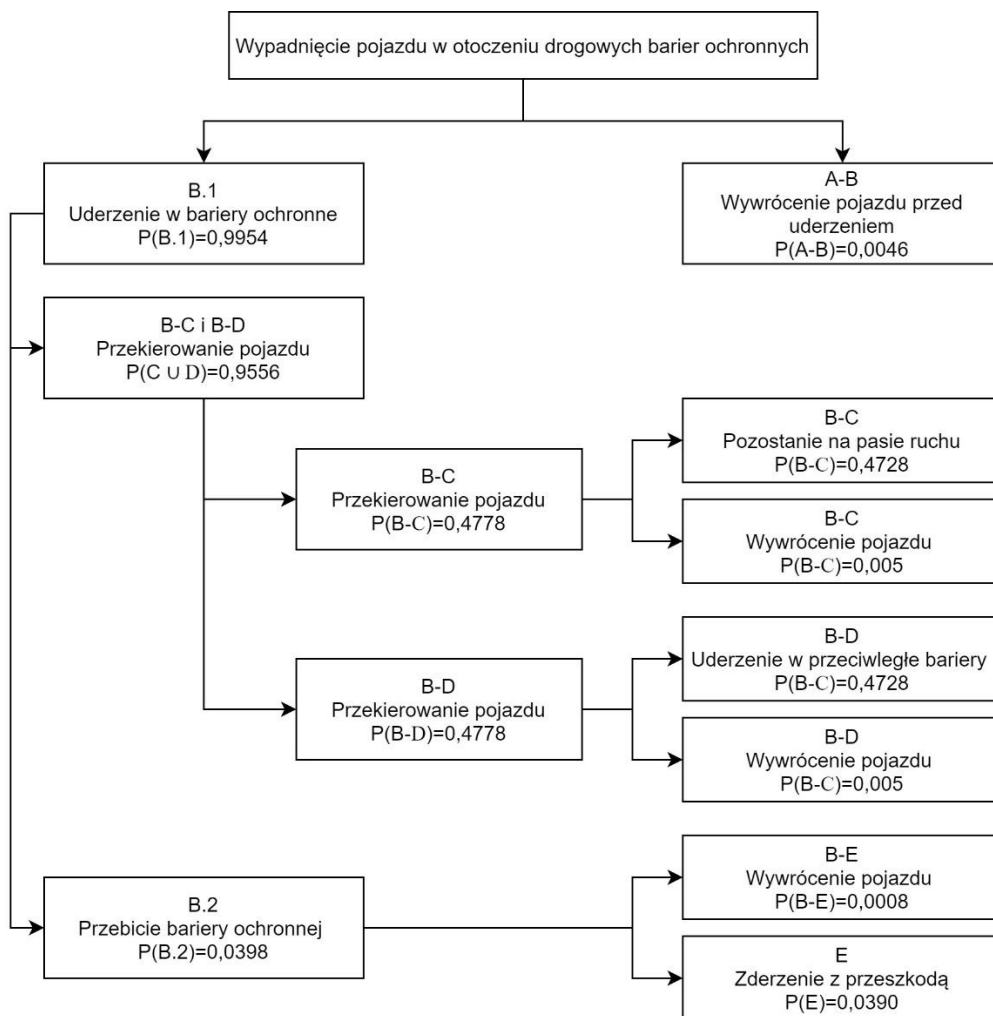
Źródło: Opracowanie własne na podstawie [119]

W przypadku występowania zdarzeń bardzo rzadkich, którymi są przebicie barier ochronnych, może dojść do niekontrolowanych zachowań pojazdu w wyniku, którego dochodzi do poślizgu, wywrócenia i zatrzymania pojazdu, lub wjazdu w obszar zagrożeń i zderzenia (po przebicium bariery) z potencjalną przeszkodą usytuowaną poza barierą ochronną. Opisane scenariusze zdarzeń niebezpiecznych wraz z możliwym prawdopodobieństwem ich występowania określonym na podstawie [119], przedstawiono schematycznie na rysunku 2.24.

W przeprowadzonych dotychczas badaniach związanych z przewidywaniem wystąpienia przebicia (penetracji) drogowych barier ochronnych, stosowano różne podejścia. Pierwsze modele służące przewidywaniu penetracji drogowych barier ochronnych wykorzystywały podejście mechanistyczne. W przeanalizowanych badaniach zastosowano równania do przewidywania przebić barier ochronnych, które porównywano z ustaloną wcześniej wartością krytyczną. Istnieją dwie główne trudności związane z tego typu podejściami:

- 1) dynamika pojazdu jest skomplikowana i niełatwo ją sprowadzić do jednego prostego równania,
- 2) graniczna wytrzymałość drogowej bariery ochronnej w większości przypadkach jest nieznana lub trudna do ustalenia.

Dzieje się tak ponieważ w praktyce nie wykonuje się testów zderzeniowych, których wyniki mają prowadzić do niepowodzenia. Z tych właśnie powodów początkowo metody mechanistyczne nie sprawdzały się szczególnie dobrze. Stąd też pojawiło się alternatywne podejście do przewidywania przebić drogowych barier ochronnych, bazujące na analizie statystycznej uderzeń w bariery ochronne [119]. Zaletą tego podejścia jest brak konieczności znajomości fizyki problemu przebić barier ochronnych, ponieważ analizowane dane reprezentują rzeczywiste zdarzenia. Jedyną trudnością wykorzystania tego podejścia i budowy reprezentatywnych modeli jest wymóg dostępu do dużej ilości danych o tego typu zdarzeniach niebezpiecznych.



Rys. 2.24 Schemat możliwości przebiegu i prawdopodobieństwa zdarzeń niebezpiecznych z barierami ochronnymi

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [119]

Jedno z pierwszych podejść mechanicznych do szacowania prawdopodobieństwa przebić barier ochronnych, przedstawiono w programach badawczych NCHRP [130],[119]. Celem badań była budowa narzędzi wspomagających wybór mostowych barier ochronnych. W ramach badań symulowano siłę, z jaką mogą uderzać w barierę mostową wypadające z jezdni pojazdy, wykorzystując przy tym losowo wygenerowaną prędkość, kąt i masę uderzającego w barierę pojazdu. Oszacowane wielkości siły działającej na barierę zostały następnie porównane z zakładaną granicą wytrzymałości (zdolności) bariery mostowej. Zakładano, że jeśli wytrzymałość bariery jest mniejsza niż siła uderzenia, to następuje przebiecie bariery, po którym pojazd wypadł poza barierę. Jeżeli natomiast siła uderzenia była mniejsza niż wytrzymałość, zakładano prawidłową pracę bariery i przekierowanie pojazdu na jezdnię. Model przebicia bariery ochronnej, polegający na oszacowaniu średniej jednostkowej poprzecznej siły uderzenia, której należy się spodziewać podczas uderzenia wybranego pojazdu w barierę ochronną, opisano wzorem 2.14.

$$F_{lat} = \frac{M \cdot V^2 \cdot \sin^2 \theta}{2g(A \cdot \sin \alpha - \frac{B}{2}(1 - \cos \alpha) + D)} \quad (2.14)$$

gdzie:

F_{lat} – średnia poprzeczna siła uderzenia

M – masa pojazdu

V – prędkość pojazdu

α – kąt uderzenia

A – odległość środka ciężkości pojazdu od czoła pojazdu

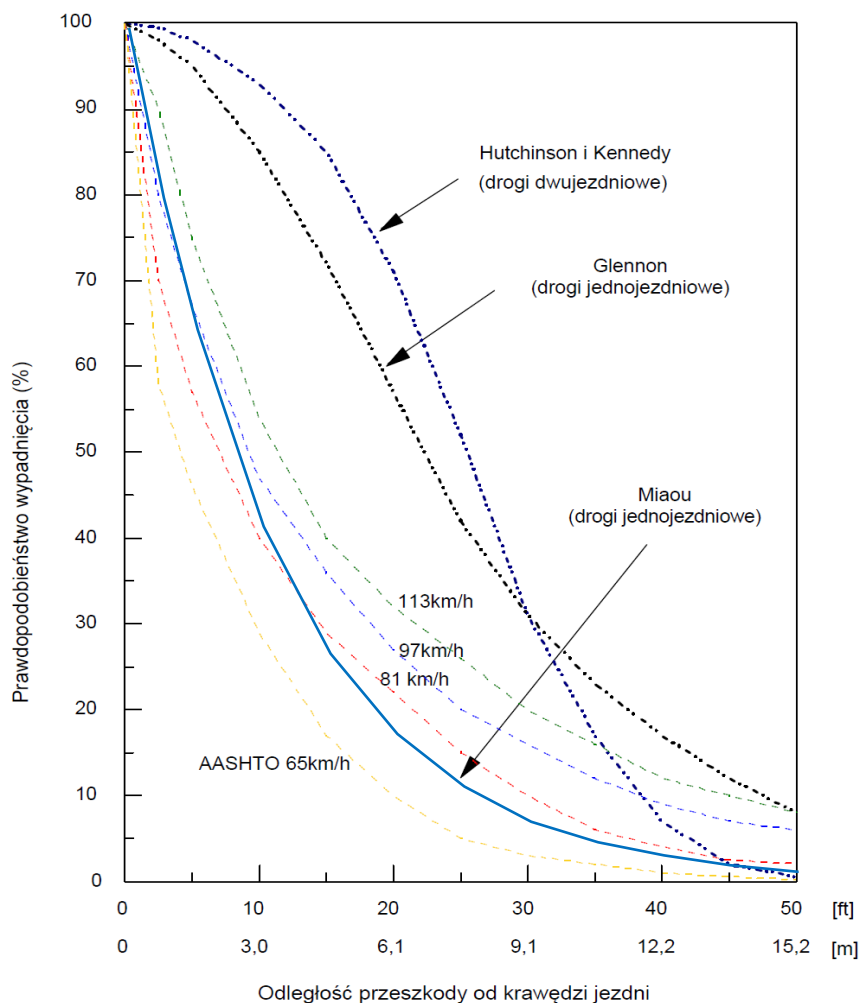
B – szerokość pojazdu

D – ugięcie boczne bariery ochronnej.

Model zaproponowany przez Olsena [130] jest dobrym i prostym estymatorem, lecz ma swoje ograniczenia. Po pierwsze, opiera się wyłącznie na oszacowaniu siły uderzenia, podczas gdy przerwanie bariery jest bardziej powiązane z graniczną energią odkształcenia. Podczas gdy energia uderzenia jest stosunkowo łatwa do obliczenia (np. za pomocą wzoru 2.1), to wielkość energii odkształcenia po przekroczeniu, której bariera zostaje przebita, jest dość trudna do wyznaczenia. Kolejne ograniczenie zakłada, że ugięcie bariery będzie zawsze równe zero. Jest uzasadnione w przypadku sztywnych barier betonowych, ale skutkuje niedoszacowaniem nośności stalowych barier mostowych. Inną wadą tego modelu jest to, że po osiągnięciu założonej granicy wytrzymałości bariery zakłada się, że bariera jest całkowicie uszkodzona, podczas gdy w rzeczywistości osiągnięcie tej granicy niekoniecznie oznacza, że pojazd przebiję barierę.

Kolejne obserwowane podejścia [111],[59],[77],[76],[34] pozwalające oszacować prawdopodobieństwo uszkodzeń określonych skutkach uszkodzeń barier ochronnych (przebić barier ochronnych) bazowały przede wszystkim na obserwacjach i danych statystycznych. Na podstawie dostępnych, szczegółowych danych o zdarzeniach niebezpiecznych na drogach, zidentyfikowano rzeczywiste przypadki uderzenia pojazdu w barierę drogową, z których zbierano dane i informacje o miejscu zdarzenia, okolicznościach, warunkach konstrukcyjnych barier, zachowaniu bariery podczas uderzenia (utrzymała pojazd czy została przebita) o ruchu drogowym i innych okolicznościach tych zdarzeń. Następnie na podstawie stosunku liczby przebić barier ochronnych do rzeczywistej liczby zdarzeń z barierami, wyznaczano częstość tego typu zdarzeń, która była miarą prawdopodobieństwa przebicia bariery w danych warunkach (np. ruchowych) i dla określonej bariery. Modele te dotyczą pojedynczych zdarzeń, jak i grupy zdarzeń na odcinkach dróg. To podejście wykorzystywane jest, gdy mamy dostęp do historycznych danych o wypadkach z barierami drogowymi.

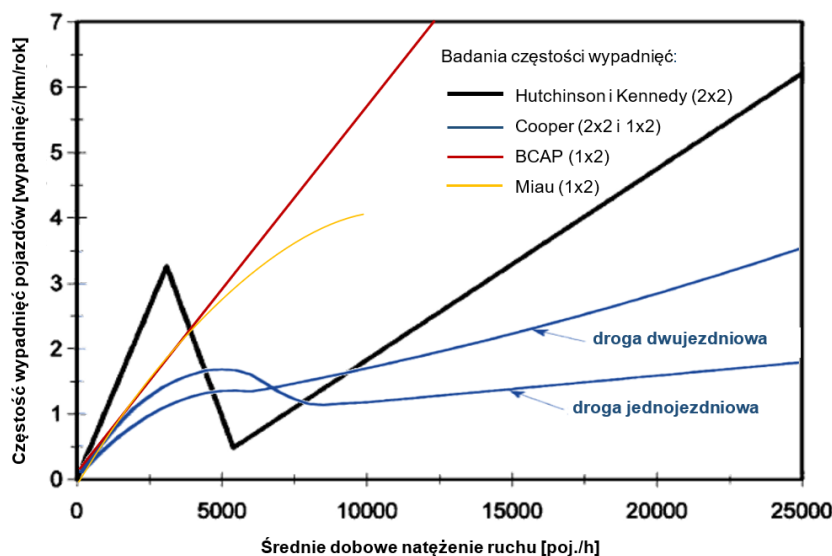
Przeanalizowane wyniki badań wskazują, że prawdopodobieństwo wypadnięcia pojazdu w kontekście drogowych barier ochronnych może być zależne w dużej mierze od odległości bariery od krawędzi jezdni oraz prędkości wypadającego z jezdni pojazdu. Na rysunku 2.25 przedstawiono zależność prawdopodobieństwa najechań pojazdu na obiekt znajdujący się przy drodze w zależności od jego odległości do krawędzi jezdni i prędkości.



Rys. 2.25 Zależność prawdopodobieństwa najechań pojazdu na obiekt w zależności od jego odległości do krawędzi jezdni

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [119] [111]

Wyniki analizowanych badań wskazują, że częstotliwość wypadnięć pojazdów z jezdni może także wzrastać proporcjonalnie do wielkości natężenia ruchu (rys, 2.26). Jednak na drogach jednojezdniowych w pewnym zakresie natężeń ruchu w ciągu doby, tj. od 3 do 6 tys. zaobserwowano, że częstotliwość wypadnięć pojazdów zmniejsza się wraz ze wzrostem natężenia ruchu. Ten nietypowy kształt krzywej tłumaczy się zachowaniem kierowców. Przy małych natężeniach ruchu (do 3 tys. poj./dobę) i małej gęstości ruchu kierowcy, mają niewielki kontakt z innymi pojazdami, nie są wystarczająco skupieni na jeździe (monotonia jazdy wywołująca np. senność) i zwykle wypadają z jezdni częściej. Ta kombinacja czynników może powodować zwiększenie liczby i częstości błędów popełnianych przez kierowców. Wraz ze wzrostem natężenia ruchu (3 - 6 tys. poj./dobę) dochodzi do większej liczby interakcji kierowców z innymi pojazdami, co zazwyczaj lepiej definiuje jezdnię i zmniejsza monotonię, w wyniku której kierowca zwraca większą uwagę na zadanie związane z prowadzeniem pojazdu i popełnia przy tym mniej błędów. Przy większych natężeniach ruchu (powyżej 6 tys. poj./dobę), wskaźnik wpadnięć pojazdów zaczyna ponownie rosnać, co tłumaczy się przez zwiększenie gęstości pojazdów a tym samym interakcji między nimi.



Rys. 2.26 Częstotliwość wypadnięć pojazdów w zależności od natężenia ruchu pojazdów

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [119]

Wyniki analizowanych badań m.in. [110],[111],[100],[48],[13],[157],[94],[113] wskazują również, że częstotliwość zdarzeń związanych m.in. z wypadnięciem pojazdu z jezdni i uderzeniem pojazdów w obiekt znajdujący się przy drodze (np. bariery ochronne), zależy przede wszystkim od zmiennych opisujących (reprezentujących):

- 1) parametry ruchu pojazdów: średnie dobowe natężenie ruchu pojazdów (poj./dobę), praca przewozowa (mln poj.km), udział pojazdów ciężarowych (udział, %),
- 2) parametry geometryczne drogi: podział na odcinki (proste/ łuki), promień/długość łuków poziomych (m), krętość odcinka drogi ($^{\circ}$), falistość (spadek podłużny odcinka drogi), typ terenu (płaski, falisty), maksymalne pochylenia poprzeczne jezdni na łuku (-), pochylenie pobocza (%), gęstość obiektów mostowych (szt./km), gęstość skrzyżowań (szt./km),
- 3) przekrój drogi: liczba pasów ruchu (szt.), szerokość jezdni (m), szerokość pasa dzielącego (m), szerokość pobocza (m), typ pobocza (utwardzone, nieutwardzone),
- 4) warunki i utrzymanie drogi: ograniczenie prędkości (km/h), prędkość projektowa (km/h), warunki widoczności (oświetlenie drogi), stan nawierzchni (sucha/mokra, wskaźnik przyczepności), oznakowanie poziome (występowanie, typ oznakowania, stan oznakowania),
- 5) otoczenie drogi: występowanie obiektów w otoczeniu drogi (drzewa, słupy, bariery ochronne), odległość przeszkód od krawędzi jezdni (m),
- 6) środki uspokojenia ruchu: częstotliwość prewencyjnych kontroli prędkości (liczba, rodzaj).

W ostatnich latach model regresji dwumianowej ujemnej (NB) lub regresji Poisson i Poisson Gamma jest zdecydowanie najpopularniejszą klasą modeli statystycznych wykorzystywanych do badania zależności liczby wypadnięć pojazdów z jezdni drogi [151]. Ta klasa modeli była również wybraną metodą opracowywania modeli do oceny bezpieczeństwa w podręczniku HSM [30] oraz wytycznych wyboru systemów drogowych barier ochronnych [183].

2.6. Wnioski ze studiów literatury

Zdarzenia związane z wypadnięciem pojazdu z jezdni, uderzeniem i uszkodzeniem bariery ochronnej, są złożonymi procesami obejmującymi interakcję wielu czynników, w tym m.in. człowieka, pojazdu, drogi, natężenia ruchu na drodze oraz środowiska (np. oświetlenia, pogody). Ze względu na to, że niektóre z oddziałujących na siebie czynników mają charakter jakościowy i stochastyczny (np. zachowanie kierowców i warunki pogodowe), rzeczywisty związek między uderzeniem w bariery ochronne wywołanym wypadnięciem pojazdu z jezdni, a tymi czynnikami jest empiryczny i statystyczny. Sytuacja ta sprawia, że przeprowadzenie w pełni obserwowalnych badań jest niezwykle trudna do przeprowadzenia.

W praktyce w literaturze wyróżnia się cztery typy badań odnoszących się lub mogących odnieść się do modelowania liczby i wielkości uszkodzeń barier ochronnych: badania terenowe, badania poligonowe, badania laboratoryjne, badania symulacyjne.

Do badań określających prawdopodobieństwo i liczbę zdarzeń związanych z wypadnięciem pojazdu z jezdni i uderzeniem w przydrożny obiekt (np. bariery ochronne), najczęściej wykorzystywanym typem badań były badania terenowe na odcinkach dróg oraz badania symulacyjne wykorzystujące techniki analityczne typu MonteCarlo [125].

Badania dotyczące określenia długości uszkodzeń barier drogowych prowadzone były przede wszystkim z wykorzystaniem wyników badań poligonowych, na których prowadzono kontrolowane testy zderzeniowe. Stosowano także badania laboratoryjne z wykorzystaniem różnego rodzaju wahadła i aparatury do badań niszczących, a także badań symulacyjnych z wykorzystaniem metod numerycznych. Należy zwrócić uwagę, że zidentyfikowane badania uszkodzeń barier ochronnych odnosiły się wyłącznie do pojedynczych zdarzeń, nie odnaleziono badań polskich i zagranicznych mających na celu ustalenie zależności między długością uszkodzeń, a warunkami ruchu i parametrami geometrycznymi analizowanego odcinka drogi.

Empiryczny związek pomiędzy liczbą wypadnięć pojazdów z jezdni, a istotnymi elementami geometrii i typu drogi (m.in. krzywizna pozioma, szerokość pasa ruchu, szerokość pobocza) został przebadany i omówiony w wielu badaniach na przełomie ostatnich sześciu dekad. Niestety bardzo mało badań wyszczególniało wypadnięcia związane z uszkodzeniem barier ochronnych, spośród których żadne nie odnosiło się do wielkości uszkodzeń tych urządzeń na odcinku drogi. Większość badań długości uszkodzeń dotyczyła pojedynczego uderzenia w drogową barierę ochronną.

Problemy, jakie napotkano w literaturze [183],[30],[48],[110] podczas badań terenowych mających na celu ustalenie empirycznych zależności między wypadnięciem pojazdu z drogi a warunkami i geometrią drogi, składają się na kilka istotnych aspektów, które można podsumować w punktach (P.1-P.4):

P.1 Wypadnięcia pojazdów z drogi związane z uderzeniem pojazdu w barierę ochronną są zdarzeniami losowymi o charakterze probabilistycznym. Biorąc pod uwagę odcinek drogi, liczba pojazdów biorących udział w określonych zdarzeniach (np. z barierami ochronnymi) i określonym czasie jest zmienną losową przyjmującą wartości całkowite nieujemne, z których każda ma pewne prawdopodobieństwo zaobserwowania. Prawdopodobieństwo to zależne jest od sumarycznego narażenia pojazdów oraz współczynnika udziału zdarzeń na danym odcinku

w danym czasie. W większości badań tego typu, pojawia się problem związany z dużą liczbą odcinków, na których w obserwowanym okresie analizy nie zaobserwowano zdarzeń.

P.2 Odcinki dróg różnią się od siebie nie tylko cechami geometrycznymi i warunkami ruchu, ale również narażeniem pojazdu na zaistnienie zdarzenia. Narażenie wyrażone np. wielkością pracy przewozowej różni się w zależności od długości odcinka i liczby poruszających się po nim pojazdów. Oznacza to, że prawdopodobieństwo zaobserwowania tej samej liczby zdarzeń różni się na odcinkach dróg nawet, jeśli odcinki są jednorodne i nie różnią się względem siebie geometrycznie. Porównując dwa odcinki dróg o identycznych cechach geometrycznych i warunkach ruchu, lecz o różnym stopniu narażenia pojazdu, to prawdopodobieństwo zaistnienia zdarzenia jest wyższe na odcinku o wysokim narażeniu niż na odcinku o niskim narażeniu.

P.3 Zdarzenia niebezpieczne związane z wypadnięciem pojazdu są złożonymi procesami obejmującymi wiele czynników, do których zalicza się: drogę, warunki ruchu, kierowcę, pojazd środowisko. Podczas prowadzonych dotąd badań empirycznych wiele z wymienionych zmiennych lub ich pochodnych, nie była dostępna dla analizowanych odcinków dróg. Stąd też opracowując modele matematyczne, należy uwzględnić fakt, że zawsze znajdują się zmienne, które zostaną pominięte, zwłaszcza dane jakościowe. Do najczęściej pomijanych czynników bezpośrednio lub pośrednio związanych z wypadnięciem pojazdu z jezdni należą czynniki związane z kierowcą. Informacje te są najczęściej nieznane (nieznany sprawca) lub sporadycznie znane, o niskiej dokładności (dane wyłącznie dla zdarzeń rejestrowanych przez policję). Oznacza to, że podczas modelowania zdarzeń na odcinkach dróg napotyka się problem związany z pominięciem pewnych zmiennych. Zagadnienie to w literaturze najczęściej łagodzone poprzez opracowywanie oddzielnych modeli odnoszących się do klasy, przekroju drogi czy pojazdów, które zakładały, że pominięte zmienne będą dla danej grupy modeli niemalże stałe. Jednakże w badaniach wypadnięć, związanych np. z uderzeniem pojazdu w barierę ochronną, brak informacji lub ich ograniczona ilość na temat pojazdu sprawcy, może ograniczyć lub uniemożliwić wykonanie analizy, wg zarówno klasy drogi i typów pojazdów. W świetle problemu związanego z pominięciem pewnych zmiennych podczas modelowania, interpretacja szacowanych wyników badań powinna być ostrożna i świadoma wszelkich potencjalnych błędów z tego wynikających.

P.4 Dane dotyczące liczby zarejestrowanych zdarzeń oraz narażenia (ruchu pojazdów) są obciążone błędami. W praktyce każdy zbiór danych z obserwacji zawiera informacje obciążone błędami. Zatem wykorzystanie danych pomiarowych oraz modeli matematycznych w ramach estymacji liczby wypadnięć pojazdów oraz zmiennych je charakteryzujących, wpływa na ich niepewność. Niepewność wynika przede wszystkim z błędów pomiarowych obserwowanych wielkości, błędów zastosowanych metod numerycznych i symulacji, a także błędów struktury modelu matematycznego i wykorzystywanych w nim niepewnych parametrów [173],[162]. W związku z tym prawidłowy model matematyczny to taki, który definiuje różne typy błędów i potencjalnych źródeł na nie wpływających. Do dwóch podstawowych typów błędów związanych z liczbą zarejestrowanych zdarzeń oraz narażeniem na jego zaistnienie, odnotowuje się tzw.

błędy związane z próbkowaniem oraz błędy niezwiązane z próbkowaniem danych. W rzeczywistości istnieje wiele baz danych dotyczących zdarzeń na drogach, jednakże wszystkie one wykazują pewien stopień braków danych i wątpliwą ich jakość. Jednym z braków jest zaniżona liczba określonych typów zdarzeń, do których można zaliczyć wypadnięcia pojazdu z drogi. W rzeczywistości nie wszystkie zdarzenia są zgłaszane i rejestrowane w ogólnodostępnych bazach danych. Do tych baz danych zalicza się najczęściej policyjne bazy danych o wypadkach i kolizjach. Również miejsce zdarzenia jest bardzo często szacowane i przypisywane do najbliższego słupka pikietażowego na odcinku, w związku z tym przypisywanie zdarzeń do bardzo krótkich odcinków drogi może być obarczone większym błędem niż przypisywanie ich do dłuższych odcinków dróg. Błędem podlega również najczęściej wykorzystywana do modelowania zdarzeń drogowych zmienna dotycząca średniego dobowego natężenia ruchu na odcinku drogi, która nie uwzględnia dobowych czy sezonowych wahań ruchu (określane jako błędy związane z próbkowaniem danych) oraz błędy struktury rodzajowej ruchu wynikających np. z niewłaściwej klasyfikacji pojazdów (określane jako błędy niezwiązane z próbkowaniem danych).

Ze względu na brak informacji w dostępnej literaturze na temat modeli pozwalających ustalić empiryczne zależności pomiędzy długością uszkodzeń barier ochronnych na odcinku drogi od rodzaju stosowanych barier i ich lokalizacji, przed przystąpieniem do badań szacowania długości uszkodzeń na odcinkach dróg, należy w pierwszej kolejności rozpoznać szczegółowo mechanizm pracy pojedynczego uderzenia pojazdu w bariery (stosowane na badanych odcinkach) w różnych warunkach uderzenia.

Biorąc pod uwagę sformułowane powyżej problemy i wnioski, potencjalnym modelem do ustalenia empirycznych zależności pomiędzy liczbą zdarzeń i długością uszkodzeń w zdarzeniach z barierami ochronnymi, a geometrią drogi na odcinku drogi, powinien być model probabilistyczny który:

- pozwoli odpowiedzieć na pytania i problemy związane z wypadnięciem pojazdów, zarówno pod względem prawdopodobieństwa zaistnienia zderzenia o określonej wielkości uszkodzeń barier, jak i liczby i długości uszkodzeń na odcinku drogi,
- pozwoli oszacować nieujemne wskaźniki liczby zdarzeń i długości uszkodzeń barier,
- uwzględni różnice w narażeniu pojazdów na poszczególnych odcinkach dróg,
- dostarczy wyniki, które pozwolą ocenić niepewność danych dotyczących narażenia pojazdów i możliwych pominiętych zmiennych.

W przypadku wystarczającej liczby i odpowiedniej jakości danych, należy opracować oddzielne modele dla odcinków dróg z podziałem na liczbę jezdni, klasę lub standard utrzymania, aby móc załagodzić problem pominiętych zmiennych.

Powyższe wnioski pozwoliły na scharakteryzowanie problemu oraz sformułowanie celów i założeń realizacji niniejszej pracy doktorskiej, które przedstawiono w kolejnym rozdziale.

3. CELE I METODYKA PRACY

3.1. Cele pracy

Wykorzystując wnioski z przeglądu literatury oraz wyniki wstępnych prac własnych dotyczących funkcjonowania i uszkodzeń drogowych barier ochronnych, sformułowano cel główny, cele naukowe i praktyczne niniejszej pracy.

Celem głównym rozprawy doktorskiej jest opracowanie i wdrożenie do praktyki drogowej modeli matematycznych częstości występowania i wielkości uszkodzeń barier ochronnych stosowanych na dwujezdniowych drogach krajowych w Polsce, w zależności od wybranych czynników konstrukcyjnych, drogowych, ruchowych i utrzymaniowych.

Cele naukowe:

1. CN-1: Rozpoznanie czynników wpływających na częstość i wielkość uszkodzeń barier ochronnych na podstawie dostępnych badań poligonowych.
2. CN-2: Opracowanie modeli prawdopodobieństwa i wielkości uszkodzeń powstałych w wyniku uderzenia pojazdu w barierę ochronną na drodze.
3. CN-3: Opracowanie modeli częstości zdarzeń i wielkości uszkodzeń powstałych w wyniku uderzeń pojazdów w bariery ochronne na odcinkach dróg.
4. CN-4: Określenie wielkości wpływu wybranych czynników konstrukcyjnych, drogowych, ruchowych i utrzymaniowych na wielkość uszkodzeń barier ochronnych stosowanych na dwujezdniowych drogach krajowych w Polsce.

Cele praktyczne:

1. CP-1: Wykonanie badań terenowych, poligonowych i symulacyjnych funkcjonowania barier ochronnych niezbędnych do opisanie zasad funkcjonowania i oceny uszkodzeń barier stosowanych na sieci dróg krajowych w Polsce.
2. CP-2: Opracowanie metody szacowania wielkości i długości uszkodzeń na odcinków dróg dla potrzeb strategicznych i operacyjnych.

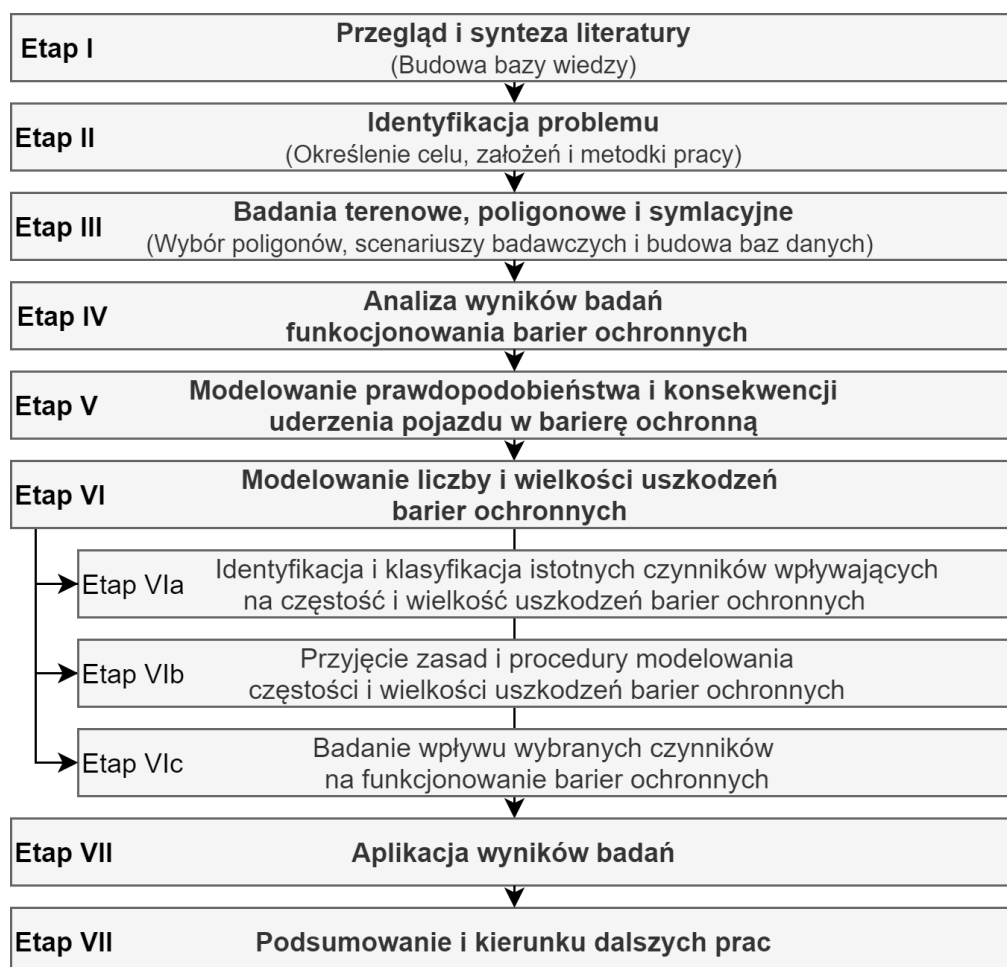
3.2. Założenia podstawowe

1. Praca obejmuje problematykę barier ochronnych stosowanych na dwujezdniowych drogach krajowych klasy A, S, GP, w zakresie częstości i wielkości uszkodzeń spowodowanych wypadnięciem pojazdu z drogi.
2. Poligon badawczy stanowiły:
 - zbiory danych o wypadkach drogowych uzyskanych o zdarzeniach drogowych spowodowanych wypadnięciem pojazdu z drogi i uderzeniem w barierę ochronną (w ciągu 1 roku) na wybranych odcinkach dróg krajowych wraz z danymi dotyczącymi geometrii drogi, konstrukcji barier oraz parametrów ruchu drogowego,
 - dostępne raporty z dynamicznych testów zderzeniowych pojazdów z barierą wykonanych w warunkach nominalnych, uzyskane w wyniku własnych prac badawczych oraz w ramach kontaktów z firmami produkującymi bariery ochronne,
 - wyniki badań symulacyjnych w postaci wirtualnych testów zderzeniowych wykonanych na wielu modelach barier ochronnych przeprowadzonych w ramach realizacji grantów badawczych RoSE [149], LifeRoSE [146] i ARGENTUM [16].



3.3. Zakres i metodyka realizacji pracy

Dla potrzeb realizacji założonych celów pracy przyjęto sześćoetapowy proces jej realizacji przedstawiony schematycznie na rysunku 3.1.



Rys. 3.1 Program realizacji prac badawczych

Źródło: opracowanie własne

Etap I: Przegląd i synteza literatury. W ramach tego etapu wykonano przegląd literatury polskiej i zagranicznej odpowiadający podjętej problematyce badawczej dotyczącej barier ochronnych. Wyniki wykonanego przeglądu literatury zawarto w rozdziale 2.

Etap II: Określenie celu, założeń i metodyki pracy. Przegląd literatury pozwolił w ramach etapu drugiego na scharakteryzowanie problemu oraz sformułowanie celów, założeń i programu realizacji prac badawczych, które przedstawiono w rozdziale 3.

Etap III: Badania terenowe, poligonowe i symulacyjne. Etap ten obejmował swym zakresem wybór poligonów i przeprowadzenie badań terenowych, których autor pracy był głównym wykonawcą, a także przygotowanie programu poligonowych testów zderzeniowych oraz scenariuszy do badań numerycznych prowadzonych równolegle w zespole projektów RID-3A i RID-3B. Zebrane dane i informacje stanowiły podstawę do budowy, w ramach omawianego etapu, baz danych na temat czynników wpływających na funkcjonowanie barier ochronnych. Opis poszczególnych badań i uzyskanych zbiorów danych przedstawiono w rozdziale 4.

Etap IV: Analiza wyników badań funkcjonowania barier ochronnych. Wykorzystując wyniki badań terenowych, poligonowych oraz symulacyjnych, w ramach etapu czwartego wykonano szczegółową ich analizę. Wyniki i wnioski z przeprowadzonych badań posłużyły do określenia założeń i opracowania metodyki dalszych badań. Rozdziale 5 i 0 opisano omawiane elementy realizacji etapu czwartego.

Etap V: Modelowanie prawdopodobieństwa i konsekwencji uderzenia pojazdu w barierę ochronną. Etap szósty obejmował swym zakresem opracowanie modeli teoretycznych i prawdopodobieństwo procesu wypadnięcia pojazdu z jezdni oraz modeli konsekwencji pojedynczych uderzeń pojazdów w bariery ochronne, opisanych w rozdziale 7.

Etap VI: Modelowanie liczby i wielkości uszkodzeń barier ochronnych. W ramach etapu szóstego przeprowadzono badania analityczne będące podstawą niniejszej pracy. Prace obejmowały swym zakresem:

- **Etap VIa: Identyfikacja i klasyfikacja istotnych czynników wpływających na częstość i wielkość uszkodzeń barier ochronnych.** W ramach etapu wykonano identyfikację i klasyfikację zmiennych zależnych i niezależnych stanowiących podstawę do budowy modeli. Wyniki prowadzonych analiz przedstawiono w rozdziale 8.4.
- **Etap VIb: Przyjęcie zasad i procedury modelowania częstości i wielkości uszkodzeń barier ochronnych.** W etapie tym przedstawiono procedurę, metodykę oraz wyniki modelowania miar częstości i wielkości uszkodzeń drogowych barier ochronnych w odniesieniu do wybranych odcinków dróg dwujezdniowych. Realizację tego etapu prac opisano w rozdziale 8.5 i 8.6
- **Etap VIc: Badanie wpływu wybranych czynników na funkcjonowanie barier ochronnych.** Wykorzystując wybrane w rozdziale 8 modele, w etapie tym, przeprowadzono analizę wpływu najbardziej istotnych czynników na analizowane miary częstości i wielkości uszkodzeń barier ochronnych. Wyniki analiz przedstawiono w rozdziale 9.

Etap VIII: Aplikacja wyników badań. W ramach etapu ósmego przedstawiono propozycję uzupełnienia metody LifeRoSE służącej do szacowania liczby zdarzeń i długości uszkodzeń barier ochronnych na odcinkach dróg. Koncepcję metody opisano w rozdziale 10.

Etap VII: Podsumowanie, rekomendacje i kierunki dalszych prac. Realizacja prac badawczych pozwoliła na sformułowanie wniosków i rekomendacji oraz wskazanie kierunków dalszych badań, które opisano w rozdziale 11.

4. METODYKA BADAŃ

4.1. Metody badań

Bariera ochronna, jako urządzenie bezpieczeństwa ruchu drogowego przyczynia się do ograniczenia możliwości i zmniejszenia skutków wypadnięcia pojazdu z drogi, ale jednocześnie może być zdeformowana w wyniku uderzenia pojazdu w barierę. Dla potrzeb realizacji przyjętych celów pracy opracowano metodykę badań zawierającą:

- 1) określenie wymaganego rodzaju badań realizującego postawione cele i pytania badawcze,
- 2) wybór i określenie wielkości poligonów i narzędzi badawczych,
- 3) charakterystykę przyjętych rodzajów badań i określenie sposobu pozyskiwania danych,
- 4) zasady budowy i ustalenie zakresu baz danych,
- 5) przyjęcie narzędzi do modelowania.

Realizacja przyjętych celów pracy i ustalenie odpowiedzi na postawione pytania badawcze wymagało przeprowadzenia serii różnego rodzaju badań, które umożliwiły zebranie danych o funkcjonowaniu poszczególnych rodzajów barier, w różnych warunkach drogowo – ruchowych.

Ocena stanu istniejącego i identyfikacja podstawowych czynników wpływających na funkcjonowanie barier drogowych możliwa była na podstawie eksploracji istniejących lub dedykowanych baz danych o niebezpiecznych zdarzeniach drogowych oraz wykorzystania wyników wcześniejszych prac własnych.

Rozpoznanie szczegółowych zasad funkcjonowania drogowych barier ochronnych w momencie uderzenia pojazdu w barierę oraz zachowań bariery i pojazdu po uderzeniu, ale tylko w warunkach normowych, możliwe było na podstawie analizy wyników badań poligonowych własnych lub pozyskanych od producentów barier.

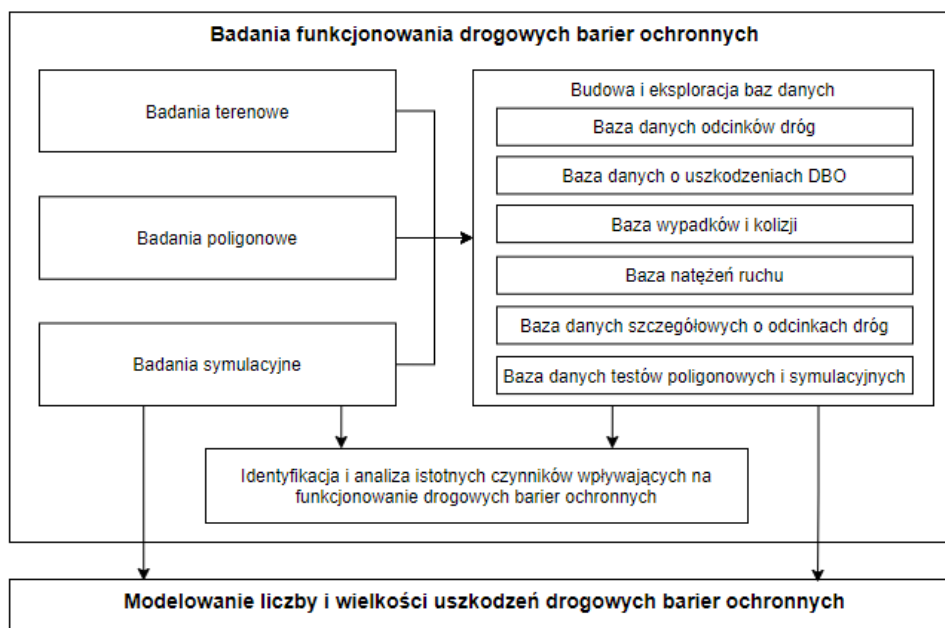
Określenie wielkości wpływu uderzenia różnych rodzajów pojazdów w bariery różnych rodzajów i typów, możliwie było poprzez zastosowanie symulacji numerycznej, za pomocą wirtualnych modeli barier ochronnych opracowanych dla potrzeb prowadzonych grantów badawczych [149],[146].

Realizacja przyjętych celów pracy wymagała zatem przeprowadzenia serii badań: terenowych, poligonowych i symulacyjnych, których wyniki zebrane w dedykowanych bazach danych (rys. 4.1) posłużyły do opracowania modeli zależności liczby i wielkości uszkodzeń barier ochronnych od wybranych czynników.

1. Badania terenowe przeprowadzono na sieci wybranych odcinków dróg o długości ok. 2,8 tys. km.
2. Badania poligonowe przeprowadzono na poligonie badawczym w Inowrocławiu (eksploatowanym przez IBDiM), gdzie wykonuje się testy zderzeniowe pojazdów z barierami ochronnymi, lub uzyskano wyniki takich badań, przeprowadzonych na innych poligonach badawczych, od producentów barier.
3. Badania symulacyjne przeprowadzono na modelach numerycznych, zbudowanych dla potrzeb projektów badawczych LifeRoSE [146], RoSE [149] oraz ARGENTUM [16] z wykorzystaniem narzędzia komputerowego LS-DYNA.

W tych badaniach prowadzonych na różnych poligonach badawczych stosowano następujące metody pozyskiwania danych:

- metody statystyczne, stosowane głównie w badaniach terenowych,
- metody mechanistyczne, stosowane głównie w badaniach poligonowych i symulacyjnych.



Rys. 4.1 Schemat struktury prowadzonych badań funkcjonowania drogowych barier ochronnych

Źródło: Opracowanie własne

Realizacja założonego programu badań wymagała zebrania danych o funkcjonowaniu barier ochronnych na wielu odcinkach dróg krajowych w Polsce. Podstawowym źródłem danych i informacji na temat projektowania, warunków funkcjonowania, napraw czy konserwacji drogowych barier ochronnych są m.in. zarządcy dróg, producenci i firmy utrzymaniowe. W wyniku badań prowadzonych w ramach projektu badawczego RID-3B [146] i w trakcie zadań realizowanych na potrzeby niniejszej pracy, pozyskano i wykorzystano dane z ww. źródeł, w tym dane dotyczące: wybranych odcinków dróg krajowych i ich otoczenia, ruchu drogowego, zdarzeń rejestrowanych przez policję i służby utrzymaniowe oraz wykonanych poligonowych i symulacyjnych testów zderzeniowych.

4.2. Badania terenowe

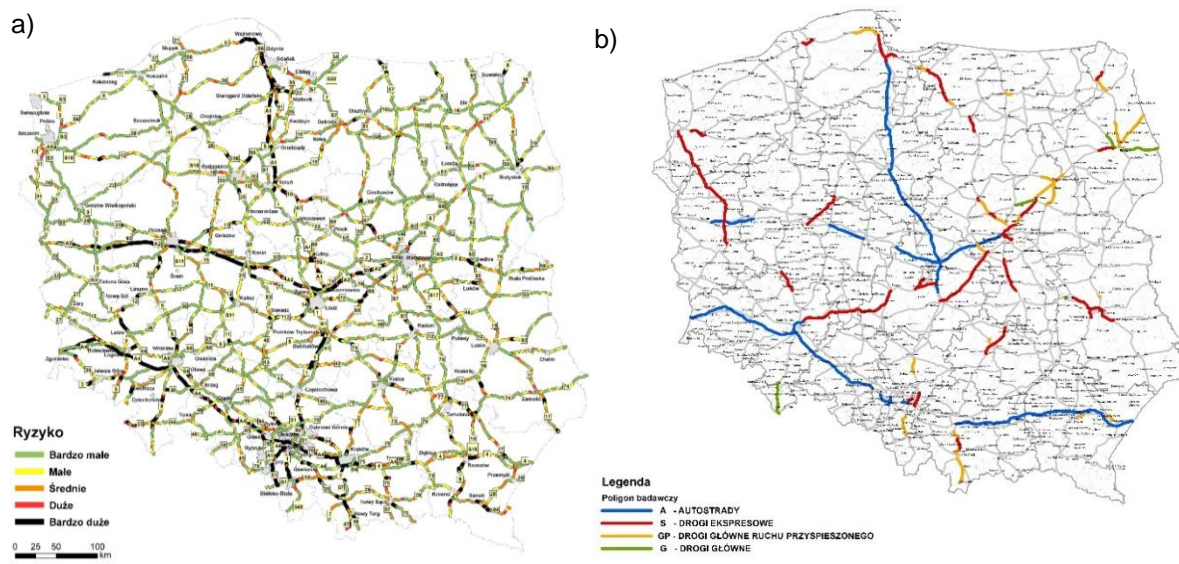
4.2.1. Poligon badawczy

Realizację prac badawczych pozwalających na budowę matematycznych zależności liczby i wielkości uszkodzeń drogowych barier ochronnych, rozpoczęto od wykorzystania dostępnych danych o odcinkach dróg w Polsce oraz wybraniu tych, które posłużą jako poligon do badań terenowych. Większość prac badawczych przeprowadzona została na odcinkach dróg krajowych zarządzanych przez Generalną Dyрекcyję Dróg Krajowych i Autostrad (GDDKiA). Prace badawcze prowadzono z podziałem na drogi:

- jednojezdniowe – główne i główne ruchu przyspieszonego,
- dwujezdniowe – główne ruchu przyspieszonego,
- dwujezdniowe – ekspresowe,
- dwujezdniowe – autostrady.

W ramach prowadzonych badań terenowych wybrano odcinki dróg różnorodnych pod względem stosowanych urządzeń brd (bariery starego typu, nowego typu, stalowe, linowe, betonowe) oraz

parametrów drogowo-ruchowych. Do wyselekcjonowania ostatecznych odcinków wykorzystano następujące źródła wiedzy: bank danych drogowych GDDKiA, bazę danych o wypadkach wykorzystujących dane z Systemu Ewidencji Wypadków i Kolizji (SEWIK), czy dane o natężeniu ruchu. Ponadto ważnym kryterium przy wyborze odcinków była ocena ryzyka indywidualnego najechania na barierę ochronną lub słup. Dodatkowo na jej podstawie wybrane zostały odcinki do dalszych badań (rys 4.2a).



Rys. 4.2 a) ocena ryzyka indywidualnego najechania na barierę ochronną i słup b) poligon badawczy

Źródło: Opracowanie własne

Odcinki objęte analizą (rys. 4.2b) stanowią znaczną część długości autostrad (~1,2 tys. km), długości dróg ekspresowych (~1 tys. km) i niewielką długość dróg niższej klasy (~0,6 tys. km) zarządzanych przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad (GDDKiA), a także trzy spółki koncesyjne Gdańsk Transport Company (GTC), Autostradę Wielkopolską i I i II (AWSA i i II). Łącznie wyselekcjonowano ponad 2,8 tys. km odcinków dróg krajowych, zarządzanych przez prawie 50 Rejonów Dróg Krajowych i firm utrzymaniowych, które dostarczały dane zasilające bazy danych.

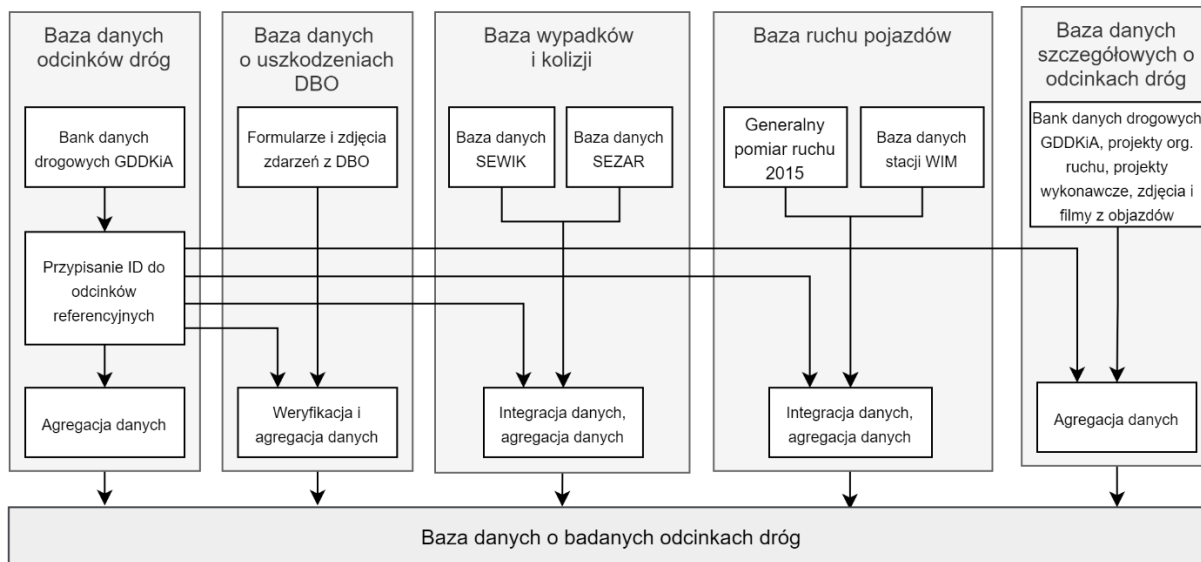
4.2.2. Metody pozyskiwania i gromadzenia danych

Budowę baz danych rozpoczęto od zebrania podstawowych danych i informacji o sieci dróg krajowych. Dla 900 odcinków referencyjnych dróg krajowych zarządzanych przez GDDKiA, o długości ponad 2,8 tys. km uzyskano dane od: zarządców dróg (bank danych drogowych - BDD, pomiary i modele ruchu drogowego, baza SEZAR), służb i jednostek utrzymaniowych (dane o uszkodzeniach drogowych barier ochronnych), Policji (baza o wypadkach i kolizjach SEWIK). W celu uporządkowania danych stworzono pięć baz danych:

1. Baza o odcinkach dróg – informacje o odcinkach i lokalizacji,
2. Baza danych o uszkodzeniach drogowych barier ochronnych – zawierająca dane o uszkodzeniach i wymianach drogowych barier ochronnych,
3. Baza wypadków i kolizji – zawierająca dane o kolizjach, wypadkach, ofiarach, okolicznościach, rodzajach i przyczynach zdarzeń,
4. Baza natężeń ruchu – zawierająca dane o natężeniach ruchu i strukturze rodzajowej pojazdów,

5. Baza danych szczegółowych o odcinkach dróg – krętości odcinków, wyposażenia w urządzenia bezpieczeństwa ruchu drogowego,

Przygotowane bazy danych zintegrowano i połączono między sobą przy pomocy łącznika, którym jest ID odcinka referencyjnego (rysunek 4.3). Zabieg ten pozwolił połączyć wszystkie bazy w jedną: Bazę danych o badanych odcinkach dróg. Połączenie baz danych i ich eksploracja pozwoliły przystąpić do wstępnej analizy zebranych danych.



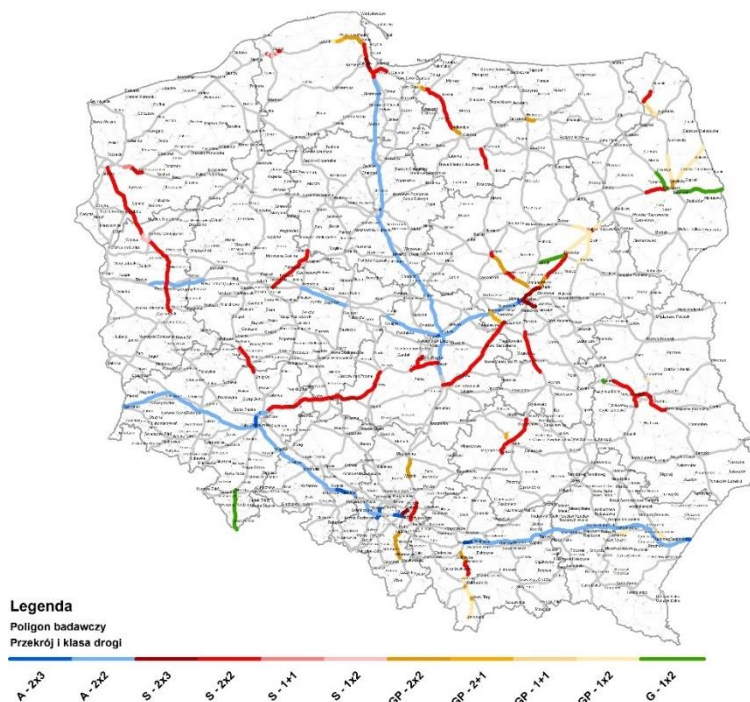
Rys. 4.3 Baza danych o badanych odcinkach dróg krajowych

Źródło: Opracowanie własne

4.2.3. Baza danych odcinków dróg

Baza danych o odcinkach dróg, powstała z wykorzystaniem Banku Danych Drogowych. Danymi pierwotnymi, zaimportowanymi do bazy w pierwszej kolejności, były informacje dotyczące odcinków referencyjnych (rysunek 4.4) – w skład których wchodziły między innymi: klasa drogi, numer drogi, przekrój drogi, długość odcinka referencyjnego, punkt początkowy odcinka referencyjnego, punkt końcowy odcinka referencyjnego.

Każdy z odcinków posiada własny unikatowy kod początku i końca odcinka oraz informacje na temat: numeru drogi, długości odcinka, klasie drogi i przekroju. Dla potrzeb analiz odcinki referencyjne połączono w odcinki jednorodne. Warunkiem połączenia odcinków referencyjnych, były cechy wspólne, takie jak: klasa natężenia ruchu, klasa i przekrój poprzeczny drogi, ciągłość odcinka drogi, standard utrzymania, firma utrzymaniowa i zarządca drogi. Po przyjęciu założonych kryteriów, otrzymano 329 odcinków dróg. Najwięcej odcinków dróg stanowią drogi dwujezdniowe, 282 odcinków, do których zalicza się przede wszystkim autostrady i drogi ekspresowe, pozostałe odcinki dróg to drogi jednojezdniowe.



Rys. 4.4 Poligon badawczy – klasy dróg i przekroje

Źródło: Opracowanie własne

Tab. 4.1 Odcinki dróg przyjęte do analiz.

Klasa drogi	Liczba odcinków (sztuk)	Suma długości (km)	Średnia długość (km)
Autostrady	97	1 184,2	12,2
Drogi ekspresowe	155	1 051,5	6,8
Główne ruchu przyspieszonego (dwujezdniowe)	30	173,4	7,0
Główne i Główne ruchu przyspieszonego (jednojezdniowe)	47	413,0	8,8
	329	2 822,2	8,6

Źródło: Opracowanie własne

Stworzona baza danych o badanych odcinkach dróg pozwoliła na wyselekcjonowanie grupy danych i zmiennych niezbędnych do dalszych badań i analiz intensywności i wielkości uszkodzeń barier ochronnych. W tabelicy 4.2 zestawiono przykładowe dane i informacje zawarte w bazie danych o badanych odcinkach dróg.

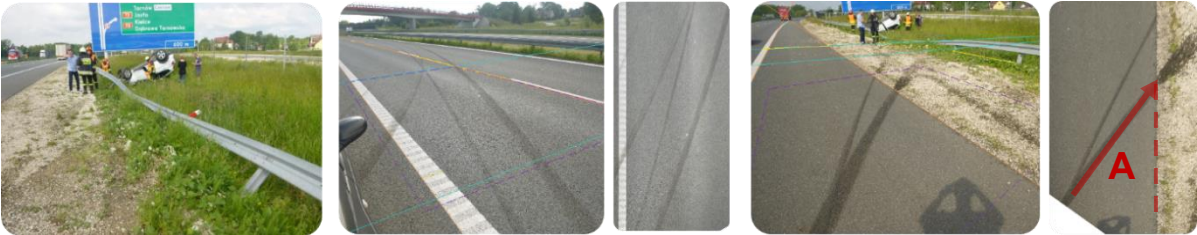
Tab. 4.2 Dane wchodzące w skład bazy zdarzeń o badanych odcinkach dróg

Lp.	Skrót	Opis	Jednostka	Przykład
1.	NRD	Numer drogi	-	A1
2.	KLD	Klasa drogi	-	A
3.	TPD	Typ przekroju drogi	-	2x2
4.	LPRJ	Liczba pasów ruchu na jezdni	-	2
5.	PIKP	Pikietaż początku odcinka	km	167,2
6.	PIKK	Pikietaż końca odcinka	km	168,3
7.	DL	Długość odcinka	km	1,1
8.	MUD	Model utrzymania drogi	-	1
9.	REK	Kod rek	-	9907144
10.	IDO	ID odcinka	-	A01-39
11.	IDR	ID rejonu	-	CW-01

Źródło: Opracowanie własne

4.2.4. Baza danych o uszkodzeniach drogowych barier ochronnych

Po wyborze poligonu badawczego rozpoczęto pracę nad budową najważniejszej bazy danych tj. Bazy danych o uszkodzeniach drogowych barier ochronnych. Baza danych została utworzona z informacji uzyskanych od zarządców dróg na temat uszkodzeń i wymian drogowych barier ochronnych. Aby uzyskać dane niezbędne do badań, wystosowano pisma i odwiedziono jednostki utrzymaniowe z prośbą o wsparcie i dostęp do danych niezbędnych do realizacji niniejszych badań. Pisma skierowane były do Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad, wszystkich szesnastu oddziałów GDDKiA, GTC, AWSA I, AWSA II oraz wybranych firm zajmujących się utrzymaniem poszczególnych odcinków dróg. Ustalono, iż dane o warunkach ruchu na odcinkach bazowych oraz szczegółowe dane o wszystkich zarejestrowanych przez służby drogowe zdarzeniach drogowych, związanych z uderzeniem pojazdów w barierę ochronną, zbierane będą w sposób ciągły przez okres jednego roku. W ramach badań między styczniem a kwietniem 2017 roku, rozpoczęto zbieranie szczegółowych informacji, takich jak: zestawienia zgłoszeń szkód wywołanych uderzeniem pojazdów w barierę ochronną, materiały dodatkowe dotyczące opisu i miejsca każdego zdarzenia, w tym zdjęcia, kosztorysy powykonawcze, wypisy z dzienników objazdów, a także projekty organizacji ruchu, niezbędne do szczegółowej inwentaryzacji wybranych odcinków dróg. W celu uporządkowania zbioru danych i informacji o zdarzeniach z udziałem urządzeń brd przez jednostki utrzymaniowe, przygotowano formularz wymiany barier ochronnych wraz z instrukcją jego wypełniania. W ramach wymiany ww. informacje zostały zebrane w formie elektronicznej lub papierowej i przetworzone, tworząc tym samym bazę danych o uszkodzeniach drogowych barier ochronnych.

Droga	Bariera	Pojazd	Waga	Kąt uderzenia	Prędkość dopuszczalna	Długość uszkodzeń	Konsekwencje
A4	Stalowa H1 W4	Suw	1,8 t	~39°	140 km/h	16 m	Ranni: brak Koszty napraw: 4,6 tys. zł
							

Rys. 4.5 Przykład analizy kąta uderzenia pojazdu w barierę ochronną z wykorzystaniem programu Perspective Rectifire

Źródło: Opracowanie własne

W ramach wymiany ww. informacji i danych, cyklicznie zbierano wypełnione formularze i materiały dodatkowe od jednostek zajmujących się utrzymaniem wyselekcjonowanych odcinków dróg. Udział zebranych danych w ramach przewidzianych rocznych badań terenowych wyniósł ponad 96%. Część danych była niekompletna lub nie udało się ich uzyskać z całego okresu analizy. Łącznie w ramach badań zebrano informacje na temat 4 730 zdarzeń z barierami ochronnymi oraz ok. 21 tys. zdjęć na ich temat. Zdjęcia posłużyły autorowi przede wszystkim do weryfikacji poprawności zbieranych danych (m.in. lokalizacji, długości uszkodzeń, liczby uszkodzonych segmentów, typu i rodzaju bariery, pojazdu) oraz do określenia kątów uderzeń pojazdu w barierę ochronną. Do odczytania kąta uderzenia pojazdu w barierę ochronną wykorzystano oprogramowanie (tj. Perspective Rectifire i Photoreject)

przeznaczone do przekształceń zwykłych zdjęć na zdjęcia w rzucie ortogonalnym. Przykład analizy przedstawiono na rysunku 4.5.

Analiza szczegółowa zdjęć wykonana w opisany sposób, umożliwiła odczytanie kątów uderzeń dla 215 zdarzeń z barierami ochronnymi, z których w 79% procent przypadków ustalono rodzaj pojazdu. Najwięcej danych dotyczących kątów uderzenia zidentyfikowano dla samochodów osobowych o różnej masie (63% danych), następnie dla samochodów ciężarowych ciężkich (24% danych) w skład, których wchodziły samochody ciężarowe bez przyczepy oraz samochody ciężarowe z przyczepą. Natomiast najmniejszy udział grup pojazdów stanowiły samochody dostawcze (12%). Dla 21 % danych nie udało się ustalić rodzaju uderzającego w barierę pojazdu. W tabelicy 4.3 przedstawiono dokładne statystyki uzyskanych danych z podziałem na klasę, przekrój drogi i rodzaj uderzającego pojazdu.

Tab. 4.3 Zestawienie liczby uzyskanych danych o kątach uderzeń pojazdów w bariery ochronne według rodzajów pojazdu

Pojazdy	Osobowe				Dostawcze	Ciężarowe ciężkie		Nieznany sprawca	Suma:
	Lekkie	Średnie	Ciężkie	Suwy	Furgony	Bez przyczepy	Z przyczepą		
	OL ≤ 0,9 t	OS ~1,3 t	OC ~1,5 t	S ~1,8 t	F ~2,0 t	C 10-30 t	CP 30-38 t		
A	12	34	67	6	12	2	15	13	161
S	3	0	8	0	0	2	2	1	16
GP	1	0	4	0	0	0	3	29	37
G	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Suma:	16	34	79	6	12	4	20	44	215
		135				24			

Źródło: Opracowanie własne

Stworzona baza danych o uszkodzeniach drogowych barier ochronnych pozwoliła na wyselekcjonowanie grupy danych i zmiennych niezbędnych do dalszych badań i analiz intensywności oraz wielkości uszkodzeń barier ochronnych. W tabelicy 4.4 zestawiono przykładowe dane i informacje zawarte w bazie danych o odcinkach dróg.

Tab. 4.4 Przykładowe zmienne wchodzące w skład bazy danych o uszkodzeniach DBO

Lp.	Skrót	Opis	Jednostka	Przykład
1.	IDZDB	ID zdarzenia z barierami	-	A1_KM_9,8_2_5_2017
2.	DZD	Data zdarzenia z barierą	-	02.05.2017
3.	RZD	Rodzaj zdarzenia	-	K
4.	PIKZD	Pikietaż zdarzenia	km	9,8
5.	KIER	Kierunek jazdy pojazdu	-	P
6.	LOK	Lokalizacja obiektu/zdarzenia	-	P
7.	LU	Długość uszkodzeń pojedynczego zdarzenia	m	16
8.	KUB	Koszt uszkodzenia bariery	zł	849
9.	RSB	Rozstaw słupków bariery ochronnej	m	1
10.	BAM	Materiał, z którego została wykonana bariera	-	stalowa
11.	BAR	Rodzaj bariery ochronnej	-	drogowa
12.	BAN	Nazwa bariery ochronnej	-	SP-01
13.	PP	Poziom powstrzymywania bariery ochronnej	-	H1
14.	WA	Szerokość pracująca bariery ochronnej	-	W4
15.	BARS	Rozstaw słupków barier ochronnych	m	2
16.	KU	Kąt uderzenia pojazdu w barierę ochronną	°	10°
17.	RP	Rodzaj pojazdu	-	C
18.	PR	Pas ruchu, z którego pojazd zjechał	-	P
19.	VU	Prędkość uderzenia pojazdu w barierę ochronną	km/h	100 km/h

Źródło: Opracowanie własne

4.2.5. Baza danych wypadków i kolizji

Dane wyjściowe do opracowania bazy wypadków na badanym poligonie stanowiły informacje uzyskane z policyjnego Systemu Ewidencji Wypadków i Kolizji. Do bazy wypadków i kolizji zaimplementowano tylko te zdarzenia, których lokalizacja pokrywała się z siecią wybranych wcześniej odcinków dróg – wysortowanie zdarzeń możliwe było na podstawie takich informacji, jak: nr drogi, kilometraż (lub współrzędne GPS). Otrzymano w ten sposób ponad 11 tys. rekordów danych o wszystkich zarejestrowanych zdarzeniach na badanym poligonie, przy czym ponad 2,1 tys. (2052 kolizje i 100 wypadków) z nich zostało zaklasyfikowane, jako najechanie pojazdu na barierę.

W celu wykorzystania bazy wypadków do analizy ciężkości wypadków z konkretnymi rodzajami urządzeń, konieczna była jej integracja z bazą zdarzeń o uszkodzeniach DBO. Ze względu na brak spójności lokalizacji i daty zdarzeń do dalszej weryfikacji i wizualizacji danych wykorzystano oprogramowanie ArcGis Pro.

Nałożenie na poligon badawczy dwóch warstw danych umożliwiło ich dokładne przeanalizowanie oraz zweryfikowanie lokalizacji. W wyniku czego liczba rzeczywistych wypadków związanych z uszkodzeniem barier ochronnych zwiększyła się dwukrotnie (207 wypadków) – w bazie wypadków SEWiK zdarzenia te nie były sklasyfikowane jako „najechanie pojazdu na barierę”. Kolejnym krokiem była implementacja bazy wypadków do bazy badanych odcinków dróg.

Na podstawie stworzonej bazy danych o wypadkach z urządzeniami brd, wyszczególniono grupę danych i zmiennych niezbędnych do dalszych badań i analiz intensywności oraz wielkości uszkodzeń barier ochronnych. W tablicy 4.5 zestawiono przykładowe dane i informacje zawarte w bazie wypadków.

Tab. 4.5 Zmienne wchodzące w skład bazy wypadków (baza SEWiK)

Lp.	Skrót	Opis	Jednostka	Przykład
1.	LKS	Liczba kolizji	szt.	231
2.	LZDS	Liczba zdarzeń	szt.	272
3.	LWS	Liczba wypadków	szt.	41
4.	LOFS	Liczba ofiar rannych	szt.	38
5.	LLRS	Liczba ofiar lekko rannych	szt.	31
6.	LCRS	Liczba ofiar ciężko rannych	szt.	7
7.	LZS	Liczba ofiar śmiertelnych	szt.	5
8.	KZDS	Koszty zdarzeń	zł	29 650 000 zł
9.	LKBS	Liczba kolizji z barierami	szt.	18
10.	LZDBS	Liczba zdarzeń z barierami	szt.	21
11.	LWBS	Liczba wypadków z barierami	szt.	3
12.	LOFBS	Liczba ofiar rannych z barierami	szt.	5
13.	LLRBS	Liczba ofiar lekko rannych z barierami	szt.	2
14.	LCRBS	Liczba ofiar ciężko rannych z barierami	szt.	2
15.	LCRZBS	Liczba ofiar ciężko rannych i zabitych z barierami	szt.	3
16.	LZBS	Liczba ofiar śmiertelnych z barierami	szt.	2

Źródło: Opracowanie własne

4.2.6. Baza danych o ruchu pojazdów

W skład bazy ruchu pojazdów wchodzi trzy grupy danych: (1) dane o natężeniu i strukturze rodzajowej pojazdów na badanych odcinkach dróg, (2) dane o masie pojazdów oraz (3) prędkości pojazdów poruszających się po drogach krajowych w Polsce.

Dane natężenia i struktury ruchu zawierają informacje o średniorocznym natężeniu ruchu i strukturze rodzajowej pojazdów na badanych odcinkach dróg krajowych. Dane pochodzą z pomiarów generalnych (GPR) z 2015 roku. Każdemu z odcinków bazowych przypisano natężenie ruchu z podziałem na strukturę rodzajową pojazdów z GPR. Przyjęto, jako miarę liczbę pojazdów przejeżdżających przez przekrój drogi w ciągu doby. W ramach prowadzonych analiz, wyróżniono osiem typów pojazdów: samochody osobowe (O), mikrobusy (D), samochody ciężarowe (C) bez przyczepy (CBP), samochody ciężarowe z przyczepą (CP), autobusy (A), motocykle (M), oraz pozostałe pojazdy (P) w tym np.: ciągniki rolnicze. Wprowadzono również pojęcie pojazdy ciężkie, które rozumiane są jako pojazdy o masie przekraczającej 3,5 tony, w tym C, CP i A.

Bazę danych dotyczących masy pojazdów oraz ich prędkości zbudowano z danych zebranych dla potrzeb projektu LifeRoSE [146] oraz rozprawy doktorskiej D. Rysia [163]. Zebrane informacje na temat masy i prędkości pojazdów stanowią przetworzone dane z ważenia pojazdów w ruchu na stacjach WIM (od ang. Weigh in Motion). Dane obejmowały łącznie 29 stacji w 15 różnych lokalizacjach w Polsce. Cztery stacje zlokalizowane były na drogach ekspresowych, pozostałe na drogach głównych i głównych przyspieszonych. Lokalizacja części stacji pomiarowych pokrywa się z lokalizacją poligonów badawczych wyznaczonych i przedstawionych w podrozdziale 4.2.1. Do późniejszych analiz wykorzystano masy i prędkości dla ponad 49,4 mln pojazdów zarejestrowanych na stacjach pomiarowych.

W ramach stworzonej bazy danych o ruchu pojazdów wyszczególniono grupę danych i zmiennych niezbędnych do dalszych badań. W tablicy 4.6 zestawiono przykładowe dane i informacje zawarte w bazie wypadków.

Tab. 4.6 Zestawienie zmiennych z bazy danych o natężeniu ruchu pojazdów

Lp.	Skrót	Opis	Jednostka	Przykład
1.	SDRR	Średni dobowy roczny ruch pojazdów	poj./24h/rok	31 137
2.	SDRO	Średni dobowy roczny ruch pojazdów osobowych	poj./24h	15 591
3.	SDRD	Średni dobowy roczny ruch pojazdów dostawczych	poj./24h	5 324
4.	SDRC	Średni dobowy roczny ruch pojazdów ciężarowych	poj./24h	2 870
5.	SDRCBP	Średni dobowy roczny ruch pojazdów ciężarowych bez przyczepy	poj./24h	5 256
6.	SDRCP	Średni dobowy roczny ruch pojazdów ciężarowych z przyczepą	poj./24h	1 569
7.	SDRA	Średni dobowy roczny ruch autobusów	poj./24h	459
8.	SDRM	Średni dobowy roczny ruch motocykli	poj./24h	53
9.	SDRP	Średni dobowy roczny ruch pozostałych pojazdów	poj./24h	15
10.	UO	Udział samochodów osobowych w potoku	%	50
11.	UD	Udział samochodów dostawczych w potoku	%	17
12.	UC	Udział samochodów ciężarowych w potoku	%	9
13.	UCP	Udział samochodów ciężarowych z przyczepą w potoku	%	17
14.	UM	Udział motocykli w potoku	%	5
15.	UP	Udział pozostałych pojazdów w potoku	%	2
16.	UMOS	Udziały grup mas całkowitych samochodów osobowych	%	(0,9-1,0t) 9
17.	UMD	Udziały grup mas całkowitych samochodów dostawczych	%	(1,0-1,1t) 2
18.	UMC	Udziały grup mas całkowitych samochodów ciężarowych	%	(9,0-9,5t) 3
19.	UMCP	Udziały grup mas całkowitych sam. ciężarowych z przyczepą	%	(35-35,5t) 2
20.	UMA	Udziały grup mas całkowitych autobusów	%	(9,0-9,5t) 2
21.	UVOS	Udziały grup prędkości całkowitych samochodów osobowych	%	(115-120) 10
22.	UVD	Udziały grup prędkości całkowitych samochodów dostawczych	%	(105-110) 5
23.	UVC	Udziały grup prędkości całkowitych samochodów ciężarowych	%	(85-90) 41
24.	UVCP	Udziały grup prędkości całkowitych sam. ciężarowych z przyczepą	%	(90-95) 47
25.	UVA	Udziały grup prędkości całkowitych autobusów	%	(95-100)33

Źródło: Opracowanie własne

4.2.7. Baza danych szczegółowych o odcinkach dróg

Ostatnim etapem budowy bazy danych o odcinkach, było stworzenie bazy wybranych odcinków dróg krajowych wraz z ich szczegółowymi charakterystykami. Informacje o odcinkach gromadzono oddzielnie dla lewej oraz prawej krawędzi jezdni, a także dla pasa dzielącego. W ramach inwentaryzacji zebrano dane dotyczące:

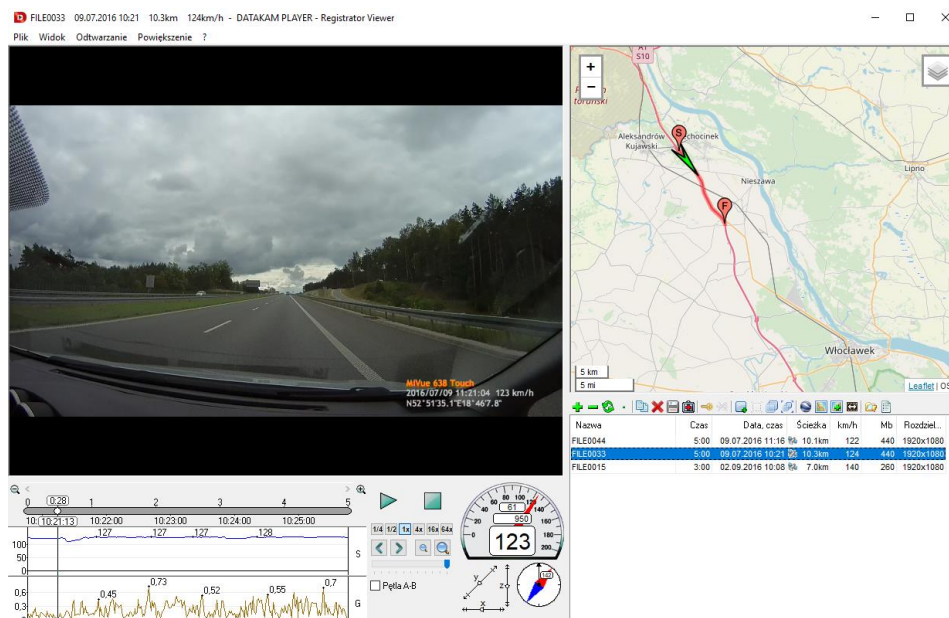
- 1) urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego:
 - rodzaj urządzenia brd:
 - bariery ochronne drogowe,
 - bariery ochronne mostowe,
 - poduszki energochłonne,
 - materiał, z którego wykonano urządzenie brd:
 - betonowe,
 - stalowe,
 - linowe,
 - odległość urządzeń brd od krawędzi jezdni,
 - parametry powstrzymywania barier ochronnych,
 - informacje na temat zagrożeń/obiektów które były zabezpieczone przez urządzenia (m.in. skarpy, przeszkody ustawione w sposób ciągły oraz przeszkody ustawione w sposób punktowy),
- 2) wybranych parametrów drogi:
 - liczba łuków poziomych,
 - krętość odcinków dróg,
 - falistość odcinka drogi,
 - prędkość dopuszczalna,

Urządzenia bezpieczeństwa ruchu. W ramach prowadzonych badań zinwentaryzowano wszystkie bariery ochronne, zakończenia oraz urządzenia energochłonne występujące na wybranych badanych odcinkach dróg krajowych. W związku z faktem, że na fizyczne przejechanie i inwentaryzowanie każdego odcinka w terenie należałoby poświęcić znaczne nakłady czasowe, posłużono się udostępnionymi przez zarządców dróg projektami organizacji ruchu, filmami z przejazdów oraz dokumentacją fotograficzną, udostępnianą przez firmę Google – a konkretniej oprogramowanie Google Earth.

Filmy z przejazdów, a także zdjęcia udostępniane przez firmę Google są na tyle dokładne, iż po odpowiednim przybliżeniu możliwe jest odczytanie kilometrażu ze słupków hektometrowych. Działanie takie mogło generować jednak poważny problem, gdyż za każdym razem należałoby odszukiwać najbliższy słupek na filmie/zdjęciu, co poza znacznym wydłużeniem czasu zbierania danych, przyniosło duże niedokładności spowodowane złudzeniami optycznymi.

Chcąc uzyskać jak najdokładniejszy zbiór danych, w przypadku zdjęć opracowano odpowiedni podkład mapowy wykorzystujący GPS, który stanowił zbiór punktów o określonych współrzędnych, z indywidualnie przypisanymi danymi, między innymi numerze drogi i jej kilometrażu – podkład stanowił

niejako komputerowe odwzorowanie terenowych lokalizacji słupków hektometrych. W celu zwiększenia dokładności pomiarów, punkty zostały zagęszczone w sposób cyfrowy. W przypadku filmów z informacją GPS, wykorzystano oprogramowanie do odtwarzania nagrań i przebiegu trasy GPS (rysunek 4.6).



Rys. 4.6 Kilometraż dróg krajowych – oprogramowanie do odtwarzania nagrań i przebiegu trasy GPS

Źródło: Opracowanie własne

Przedstawiony sposób cyfryzacji danych pozwalał na dokładne odczytanie długości danego odcinka drogi. Dodatkowo, komputerowe przetworzenie lokalizacji kilometrażu pozwalało na powrót do konkretnego punktu (lokalizacji) w dowolnym momencie zbierania danych – co nie byłoby możliwe w przypadku odczytywania odległości ze słupków kilometrowych. Opracowanie metody zbierania danych o urządzeniach brd pozwoliło na uzyskanie znacznej liczby punktów pomiarowych i stanowiło doskonałą podstawę do wykonania bazy danych inwentaryzacji urządzeń brd.

Inwentaryzację zrealizowano dla około 1/3 analizowanych odcinków dróg krajowych. Powodem tego był ograniczony dostęp lub brak projektów organizacji ruchu, filmów czy zdjęć z przejazdów. W skład zinwentaryzowanych odcinków wchodzi 501 km autostrad, 340 km dróg ekspresowych oraz 127 km dróg głównych ruchu przyspieszonego i 67 km dróg głównych.

W wyniku przeprowadzonej inwentaryzacji uzyskano ok. 14 tysięcy rekordów opisujących urządzenia znajdujące się w otoczeniu dróg. Fragment raportu ze stworzonej bazy danych inwentaryzacji, gdzie dane były przechowywane i grupowane przedstawiono w tabeli 4.7.

Tab. 4.7 Fragment bazy danych inwentaryzacji odcinków

LP	NRD	PIKP	PIKK	DL	KIER	LOK	BAM	BAR	BAN	BARS	OBJ	0	[m]	RP	OCH	PCH	PP	W
960	A1	149,375	149,477	0,102	P	L	linowa	drogowa rozbieżna: BL-4R		1,5	4,4			1	1		H1	W4
962	A1	149,477	149,493	0,016	P	L	linowa	drogowa	BL-4	1,5	5,2			2	1	104	H2	W5
963	A1	149,493	149,572	0,079	P	L	stalowa	drogowa	SP09	1,33	5,7			2	1	104	N2	W3
964	A1	149,572	149,584	0,012	P	L	stalowa	drogowa	SP09	1	5,7			1	3	108	N2	W2
965	A1	149,584	149,609	0,025	P	L	stalowa	mostowa	BSL/1,5/M	1,33	3,2			1	3	108	H2	W3
965	A1	149,609	149,624	0,015	P	L	stalowa	mostowa	BSL/1,5/M	1,33	3,2			1	3	108	H2	W3
966	A1	149,624	149,636	0,012	P	L	stalowa	drogowa	SP09	1	5,7			1	3	108	N2	W2

Źródło: Opracowanie własne

Inwentaryzację wszystkich barier ochronnych przeprowadzono dla skrajni jezdni oraz dla pasa dzielącego, gdzie uwzględniono takie parametry urządzeń, jak:

- typ bariery ochronnej (drogowa, mostowa, tymczasowa),
- rodzaj bariery ochronnej (stalowa, linowa, betonowa),
- parametry powstrzymywania barier ochronnych (małe, normalne, podwyższone, bardzo wysokie),
- odległość bariery od krawędzi jezdni,
- rodzaj pobocza (asfaltowe, gruntowe, mieszane),
- zagrożenia chronione przez bariery ochronne.

W ramach badań wykonano również inwentaryzację zakończeń barier ochronnych na wybranych odcinkach dróg dwujezdniowych z podziałem na ich rodzaj (tabela 4.8). W ramach inwentaryzacji wyróżniono sztywne zakończenia (zejście do ziemi) oraz zakończenia energochłonne (terminale i poduszki zderzeniowe).

Tab. 4.8 Inwentaryzacja osłon energochłonnych na odcinkach poligonowych

Lokalizacja osłon energochłonnych	Długość odcinka	Liczba zakończeń	Liczba urządzeń energochłonnych	Gęstość zakończeń	Gęstość urządzeń energochłonnych
	(km)	(-)	(-)	(zak./km)	(urz./100km)
Autostrady A2x2, A2x3	389	934	10	2,4	0,03
Drogi ekspresowe S2x2, 2x3	258	514	70	2,0	0,27
Główne ruchu przyspieszonego 2x2, 1+1	55	98	3	1,8	0,05
Główne 1+1	71	159	12	2,2	0,17
Razem:	773	1705	95	2,2	0,12

Źródło: Opracowanie własne

Wybrane parametry drogi. W celu rozbudowy bazy danych o czynniki mogące mieć wpływ na intensywność i wielkość uszkodzeń urządzeń brd w przypadku wypadnięcia pojazdu z jezdni, dodatkowo przeanalizowano szczegółowo wybrane parametry drogi: liczba łuków poziomych, krętość odcinków, prędkości dopuszczalne. W dalszej części raportu scharakteryzowano poszczególne czynniki.

Liczba łuków poziomych i krętość drogi. Informacje na temat odcinków prostych, łuków poziomych, wraz z krzywymi przejściowymi oraz promieniami łuków, pozyskano z projektów organizacji ruchu. Parametr krętości odcinka drogi wyznaczono dla niwelety, której przebieg pokrywa się z osią jezdni (na drodze jednojezdniowej), pasa dzielącego (w przypadku drogi dwujezdniowej) wyznaczono wg wzoru 4.1 i jest to suma kątów zwrotu trasy na danym odcinku bazowym do łącznej długości odcinka bazowego.

$$WKO_i = \frac{\sum \alpha_{n,i}}{DL_i} \quad (4.1)$$

gdzie:

WKO_i – wskaźnik krętości odcinka drogi $\left(\frac{^\circ}{km}\right)$,

α_n – kąt zwrotu trasy ($^\circ$),

DL – długość odcinka bazowego (m).

Prędkości dopuszczalne na odcinku. Inwentaryzację odcinków pod kątem dopuszczalnej prędkości, wykonano przy pomocy projektów organizacji ruchu, a także jak w przypadku inwentaryzacji urządzeń brd, przy pomocy filmów z objazdów. Zinwentaryzowano dokładną lokalizację znaków (kierunek jazdy P/L) oraz limit prędkości obowiązujący na odcinku. Zgodnie z obowiązującymi przepisami ruchu drogowego przyjęto prędkość dopuszczalną ustalaną znakiem informacyjnym D-7 „Droga ekspresowa” na drogach dwujezdniowych, jako 120 km/h. Ponadto przy braku odwołania ograniczenia prędkości za punkt jego odwołania przyjęto miejsce styku łącznicy na węźle z jezdnią główną, zgodnie z obowiązującymi przepisami.

Stworzona baza danych szczegółowych o odcinkach dróg, pozwoliła na wyselekcjonowanie grupy danych i zmiennych niezbędnych do dalszych badań i analiz intensywności i wielkości uszkodzeń barier ochronnych. W tabelicy 4.9 zestawiono przykładowe dane i informacje zawarte w bazie danych o badanych odcinkach dróg.

Tab. 4.9 Zestawienie zmiennych z bazy inwentaryzacji odcinków bazowych

Lp.	Skrót	Opis	Jednostka	Przykład
1.	BAM	Materiał, z którego została wykonana bariera	-	stalowa
2.	BAR	Rodzaj bariery ochronnej	-	drogowa
3.	BAN	Nazwa bariery ochronnej	-	SP-01
4.	PP	Poziom powstrzymywania bariery ochronnej	-	H1
5.	WA	Szerokość pracująca bariery ochronnej	-	W4
6.	BARS	Rozstaw słupków barier ochronnych	m	2
7.	SB	Odległość bariery od krawędzi jezdni	m	3
8.	BAF	Rodzaj bariery ochronnej/jej funkcja	-	jednostronna
9.	RP	Rodzaj pobocza	liczba	utwardzone
10.	WKO	Wskaźnik krętości odcinka drogi	°	14 °
11.	VDOP	Prędkość dopuszczalna na odcinku drogi	km/h	140 km/h
12.	UBS	Udział barier stalowych na odcinku	%	86
13.	UBB	Udział barier betonowych na odcinku	%	2
15.	UBL	Udział barier linowych na odcinku	%	12
16.	UBP	Udział barier plastikowych na odcinku	%	0
17.	UBD	Udział barier drogowych	%	95
18.	UBR	Udział barier rozbieralnych	%	2
19.	UBM	Udział barier mostowych	%	5
20.	UBT	Udział barier tymczasowych	%	0
21.	LBOi	Długość barier ochronnych na odcinku (i - rodzaj bariery)	km	4,3 km
22.	UBOi	Udział barier ochronnych na odcinku (i - rodzaj bariery)	%	43

Źródło: Opracowanie własne

4.3. Badania poligonowe

4.3.1. Metody pozyskiwania i gromadzenia danych

W ramach wykonania badań poligonowych przygotowano program realizacji (tablica 4.10) dwunastu testów zderzeniowych na pełnowymiarowym poligonie badawczym. Testy zderzeniowe zrealizowano w ramach projektu RoSE [149] (9 testów) oraz projektu LifeRoSE [146] (3 testy). Przykłady poligonowych testów zderzeniowych barier ochronnych przeprowadzonych w ramach projektów RID przedstawiono na rysunku 4.7.

Podstawowym założeniem realizacji testów zderzeniowych było uzyskanie warunków, jak najbardziej zbliżonych do warunków rzeczywistych panujących na drodze. Powyższe założenie zrealizowano poprzez wymóg stosowania odpowiednich barier ochronnych oraz pojazdów. Bariery ochronne testowane na poligonie były dopuszczone do powszechnego użytku i spełniały wymagania normowe (PN-EN1317). Pojazdy wykorzystane podczas testów, były sprawne technicznie i spełniały

wymagania normowe (normy zharmonizowanej z grupy PN-EN 1317). Dodatkowym kryterium, decydującym o wyborze bariery ochronnej oraz pojazdu, był wymóg występowania ich na terenie Polski.



Rys. 4.7 Dokumentacja fotograficzna poligonowych testów zderzeniowych prowadzonych w ramach projektów RoSE i LifeRoSE

Źródło: Dokumentacja fotograficzna projektów RID 3A i RID 3B [23]

Tab. 4.10 Program badań zderzeniowych wybranych, metalowych i betonowych urządzeń brd

Nr	Zakres badań	Rodzaj bariery	Typ bariery	Kąt najazdu	Masa pojazdu	Prędkość najazdu
				(°)	(kg)	(km/h)
1.	Uderzenie pod małym kątem	drogowa	stalowa	~8	1 500	110
2.	Uderzenie pod małym kątem	drogowa	linowa	~8	1 500	110
3.	Uderzenie pod małym kątem	drogowa	betonowa	~8	10 000	70
4.	Uderzenie w barierę na łuku poziomym	drogowa	linowa	20	1500	110
5.	Powtórne uderzenie w barierę na łuku poziomym	drogowa	linowa	20	1500	110
6.	Uderzenie w barierę na łuku poziomym	drogowa	stalowa	20	1500	110
7.	Powtórne uderzenie w barierę na łuku poziomym	drogowa	stalowa	20	1500	110
8.	Uderzenie w barierę mostową z krawężnikiem	mostowa	stalowa	20	900	100
9.	Powtórne uderzenie w barierę mostową z krawężnikiem	mostowa	stalowa	20	900	100
10.	Uderzenie w barierę mostową z krawężnikiem	mostowa	stalowa	20	13 000	70
11.	Uderzenie w połączenie bariery linowej i stalowej	drogowa	stalowa	20	1500	110
12.	Uderzenie w barierę z kolumną oświetleniową w szerokości pracującej bariery	drogowa	stalowa	20	13 000	70

Źródło: Opracowanie własne

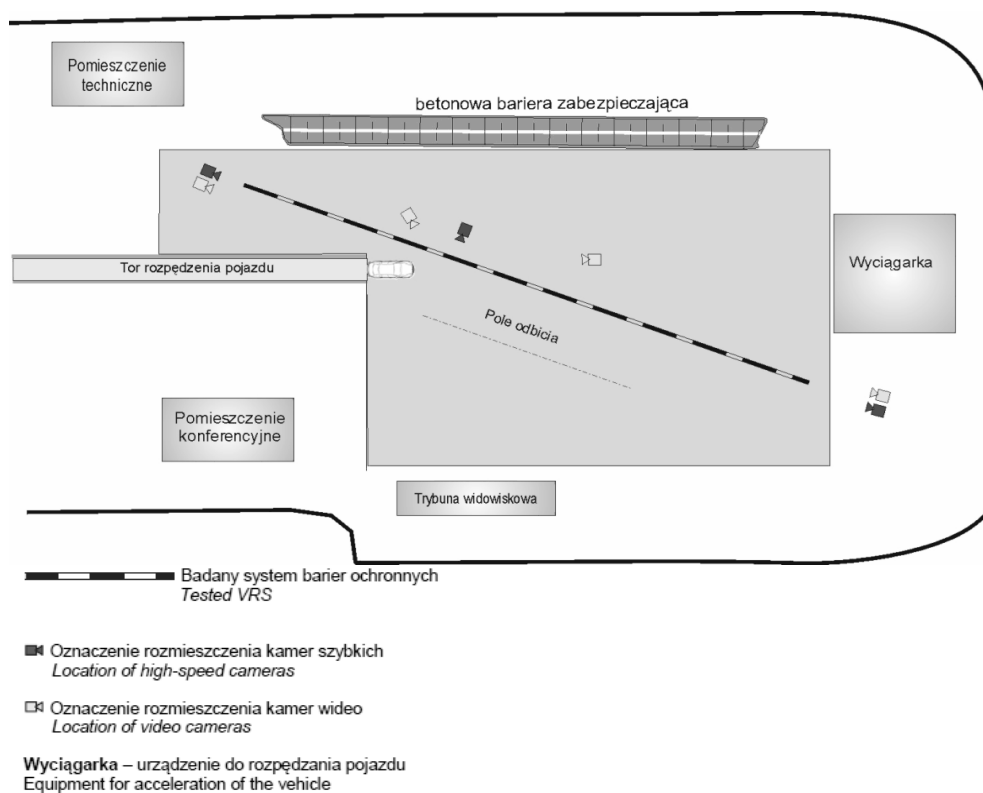
Przed przystąpieniem do realizacji testów zderzeniowych, wraz z zespołem realizującym projekty (RoSE, LifeRoSE) przystąpiono do wykonania obszernych studiów literatury oraz konsultacji z ekspertami i przedstawicielami GDDKiA. Szczegółowo rozpoznano dotychczas przeprowadzone normowe i nienormowe badania poligonowe barier ochronnych, aby stworzyć odpowiednią bazę danych z już przeprowadzonych testów zderzeniowych. Po analizie ogólnodostępnych raportów i raportów pozyskanych przez zespół od producentów barier ochronnych, zidentyfikowano zestaw problemów,

które nie były lub były w niewielkim stopniu rozpoznane. Odpowiedni dobór testów poligonowych był kluczowy dla realizacji projektów, w związku z tym, powyższe czynności wykonano z najwyższą starannością.

Badania poligonowe obejmowały swym zakresem 12 uderzeń w bariery ochronne zainstalowane w nietypowych warunkach (6 testów), pod nienormalnymi (małymi) kątami (3 testy) oraz dodatkowe testy zderzeniowe polegające na powtórnych uderzeniach w systemy drogowych barier ochronnych (3 testy). Wyniki tych badań, posłużyły m.in. ocenie zachowania barier ochronnych w trakcie oraz po uderzeniu w nie pojazdu w różnych warunkach. Dodatkowo dzięki pomocy zespołu Katedry Wytrzymałości Materiałów (KWM), posłużyły kalibracji i weryfikacji opracowywanych modeli symulujących pracę urządzeń opisanych w rozdziale 4.4.

4.3.2. Poligon badawczy

Założone próby zderzeniowe zrealizowano w ramach projektu RID-3A, RID-3B na poligonie badawczym IBOS (Instytut Badań Ochronnych Systemów) zlokalizowanym w Inowrocławiu na terenie Instytutu Badawczego Dróg i Mostów. Poligon wykorzystywany do badań (rysunek 4.8) wyposażony był w tor najazdowy o długości 350 m, układ do zdalnego rozpędzania pojazdów doświadczalnych, infrastrukturę pomiarowo-badawczą wraz ze stanowiskiem do rejestracji szybkozmiennych zjawisk fizycznych występujących podczas zderzenia pojazdu z badanymi obiektami, aparaturę pomiarową do rejestracji przyspieszeń/opóźnień działających na kierowcę w pojeździe oraz stanowisko do określania parametrów technicznych pojazdu badawczego.



Rys. 4.8 Infrastruktura badawcza wykorzystana do prowadzenia badań eksperymentalnych zderzeń pojazd/bariera w skali rzeczywistej – Instytut Badawczy Dróg i Mostów

Źródło: Materiały Instytutu Badawczego Dróg i Mostów

Systemy rejestracji przyspieszeń zamontowane w testowanych pojazdach pozwoliły na wyznaczenie następujących parametrów, charakteryzujących skutki zderzenia (określonych w normie EN 1317):

- ASI - wskaźnik intensywności przyspieszenia,
- THIV - teoretyczna prędkość głowy w czasie zderzenia,
- PHD - opóźnienie głowy po zderzeniu.

Wielostanowiskowy zintegrowany system kamer szybkich, rejestrujących moment zderzenia z różnych perspektyw (z góry, z boku, z przodu, z tyłu itp.), pozwolił na szczegółową analizę zachowania się bariery ochronnej przed, w trakcie i po zderzeniu (ugięcia, przesunięcia, uszkodzenia), a także zachowania się pojazdu (prędkość, deformacje, położenie).

4.3.3. Baza danych testów poligonowych

Zebrane dane i informacje z przeprowadzonych poligonowych testów zderzeniowych stanowiły podstawę do budowy bazy danych o poligonowych testach zderzeniowych. Uzupełnieniem bazy danych stanowiły uzyskane od producentów barier 16 raportów z pełnowymiarowych testów poligonowych wybranych rodzajów barier. Szczegółową analizę wyników badań zebranych testów poligonowych przedstawiono w rozdziale 6.2.

4.4. Badania symulacyjne drogowych barier ochronnych

4.4.1. Metoda pozyskiwania i gromadzenia danych

Dzięki otrzymanym wynikom badań poligonowych testów zderzeniowych oraz pomocy zespołu Katedry Wytrzymałości Materiałów Politechniki Gdańskiej, który opracował i skalibrował modele symulacyjne drogowych barier ochronnych, przystąpiono do realizacji badań numerycznych. Podstawowym narzędziem, wykorzystanym do opracowania i kalibracji symulacji numerycznych, był program LS-DYNA. Do badań wykorzystano wyniki 25 normatywnych badań poligonowych uzyskanych od producentów urządzeń i wyniki przeprowadzonych w ramach projektów badawczych RoSE [149], LifeRoSE [146] testów zderzeniowych obejmujących uderzenia pojazdu w trzy rodzaje barier (stalowa, linowa, betonowa) oraz w ramach projektu ARGENTUM [16].

Z każdego testu zderzeniowego jak i symulacji numerycznej zlecono wykonanie raportu. Raporty zawierały następujące dane i informacje:

- dane o badaniu: numer badania (testu), rodzaj testu (zderzeniowy, symulacyjny), rodzaj badania, charakterystyka szczegółowa badania,
- dane o barierze: typ, rodzaj, szerokość bariery, rozstaw słupków,
- dane o pojeździe; rodzaj i masa pojazdu, prędkość uderzenia i kąt uderzenia pojazdu w barierę,
- dane o parametrach bariery po uderzeniu pojazdu: znormalizowana szerokość pracująca, ugięcie dynamiczne, maksymalna trwała deformacja, długość styku pojazdu z barierą, długość uszkodzeń bariery, liczba segmentów bariery do wymiany, liczba uszkodzonych słupków,
- wskaźniki ciężkości zderzenia: ASI, THIV;
- uwagi i komentarze: informacja o lokalizacji pojazdu po uderzeniu (przebił barierę itp.);
- ilustracje z przebiegu zdarzenia.

Wymienione dane i informacje wykorzystano do budowy bazy danych symulacji testów zderzeniowych oraz późniejszych analiz. Szczegółowe informacje na temat metodyki realizacji symulacji zawiera dokumentacja projektu RoSE [149] i LifeRoSE [146].

4.4.2. Program badań

W ramach badań wielkości uszkodzeń drogowych barier ochronnych przygotowano program badań symulacyjnych. Program badań symulacyjnych objął swym zakresem badania wpływu rodzaju urządzenia i warunków drogowo – ruchowych na wielkość uszkodzeń tych urządzeń (barier stalowych, linowych i betonowych) oraz badania wpływu poszczególnych uszkodzeń urządzenia na parametry funkcjonalne bariery.

Liczba i zakres badań numerycznych były wielokrotnie dostosowywane w czasie trwania badań ze względu na stopniowe rozpoznawanie możliwości technicznych i czasowych realizacji symulacji. Ostatecznie w ramach wykonywanych badań wykorzystano 332 symulacje numeryczne przeprowadzone w ramach projektu RoSE i LifeRoSE. Jako podstawowe zmienne parametry w każdej symulacji przyjęto rodzaj i masę pojazdu, prędkość najazdu pojazdu na barierę oraz kąt uderzenia pojazdu.

4.4.3. Baza danych symulacji numerycznych

W efekcie końcowym badań symulacyjnych, uzyskano wyniki dla zaplanowanych 332 symulacji wg. opracowanego przez autora programu badań w zakresie:

- zmiany kąta, prędkości, masy pojazdu i rodzaju bariery ochronnej,
- powtórnych uderzeń w uszkodzone bariery ochronne,
- uderzeń w uszkodzone mechanicznie bariery ochronne.

Wyniki badań stanowiły wsad do bazy danych symulacji numerycznych. Szczegółową analizę wyników badań zebranych symulacji numerycznych przedstawiono w rozdziale 6.3.

5. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ TERENOWYCH

5.1. Wprowadzenie

Analizując wypadki z 3 lat w Polsce (SEWiK 2017-2020) pod względem rodzaju, zidentyfikowano w ramach badań, że wypadnięcia pojazdów i najechania na barierę ochronną stanowią 1,1% udziału wszystkich wypadków oraz 1,1% ofiar rannych i zabitych. W ciągu jednego roku (2017), na drogach w Polsce odnotowano 9.059 zdarzeń z najechaniem pojazdu na barierę ochronną. Liczbę tych zdarzeń w 96% stanowiły kolizje (8.707 zdarzeń), a w jedynie 4% wypadki (352 zdarzenia). Stwierdzono, że główną przyczyną najechań pojazdów na bariery ochronne było niedostosowanie prędkości pojazdu do panujących warunków ruchowych, co stanowiło 67,9% wypadków (239 wypadków), 69,5% ofiar lekko rannych (216 ofiar), 57,5% ofiar ciężko rannych (65 ofiar) oraz 71,8% ofiar śmiertelnych (28 ofiar). Na wystąpienie wypadków wpływ miało również m.in. zmęczenie, zaśnięcie kierowcy, nieprawidłowe zmienianie pasa ruchu, niezachowanie bezpiecznej odległości między pojazdami, czy też wykonywanie w sposób nieprawidłowy takich manewrów, jak: omijanie, wymijanie, wyprzedzanie, skręcanie i zawracanie.

Bariera drogowa jest urządzeniem, które przyczynia się do zmniejszenia skutków wypadnięcia pojazdu z drogi, jednakże takie zdarzenia przyczyniają się do uszkodzenia barier i pojazdów. Celem niniejszej części badań jest analiza intensywności niebezpiecznych zdarzeń związanych z uderzeniem pojazdu z drogową barierą ochroną, konsekwencji tych zdarzeń, czynników wpływających na liczbę i wielkość uszkodzeń.

5.2. Parametry ruchu pojazdów na badanych odcinkach dróg

5.2.1. Natężenie i struktura ruchu potoku pojazdów

Dane o średnim rocznym dobowym natężeniu ruchu (SDR) na odcinkach dróg pozyskano z ogólnokrajowego programu pomiaru natężenia ruchu na drogach krajowych Generalny Pomiar Ruchu (dane z 2015 roku). Dane pochodzą m.in. ze stacji ciągłych pomiarów ruchu (SCPR) usytuowanych przy drogach krajowych. Z pomiarów uzyskano informacje o liczbie i strukturze rodzajowej pojazdów.

Uzyskane dane ciągłych pomiarów ruchu z wybranych stacji pomiarowych pozwoliły opisać charakterystyki wahań ruchu, jego wzrostów i regularności na odcinkach dróg różnej klasy oraz przekroju drogi. Szczegółowe charakterystyki zmian ruchu wykorzystano w celu ustalenia średniego dobowego ruchu (SDR) dla badanych odcinków dróg krajowych, który stanowi podstawę do budowy modeli matematycznych opisujących intensywność zdarzeń z urządzeniami brd. Średniodobowe natężenie ruchu pojazdów można wyznaczyć wg wzoru 5.1.

$$SDR_t = \frac{\sum_{j=1}^{365} N_{j,d}}{365} \quad (5.1)$$

gdzie:

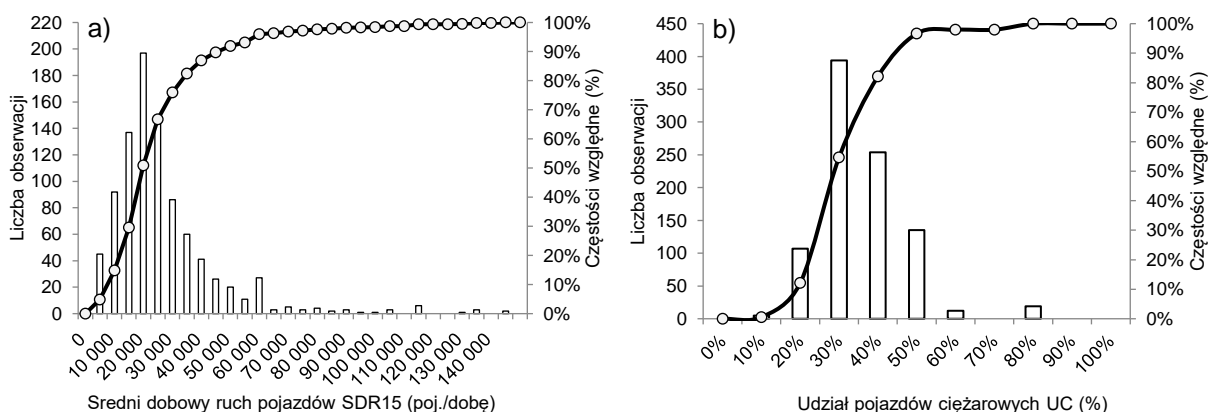
SDR_t - średnie dobowe natężenie ruchu pojazdów w roku t (poj/dobę),

$N_{j,d}$ - natężenie dobowe z j -tego dnia w roku (poj/dobę).

Zasady prognozowania wskaźników wzrostu ruchu pojazdów dla roku analizy przyjęto zgodnie z wymaganiami do analiz i prognoz ruchu Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad [62].

Na odcinkach referencyjnych dróg krajowych występowało zróżnicowane pod względem wielkości średniego dobowego natężenia ruchu SDR, które wynosiło od 1.800 poj./dobę do 142.000 poj./dobę (rysunek 5.1a). Natężenie ruchu na 95% badanych odcinków dróg nie przekraczało 56 tys. pojazdów w ciągu doby. Średnie natężenie na drogach jednojezdniowych wynosiło w analizowanym okresie 9.170 poj./dobę, a na drogach dwujezdniowych 26.920 poj./dobę. W przypadku dróg jednojezdniowych największy udział odcinków odnotowuje się w przedziale do 10 tys. poj./dobę, co stanowi dwie trzecie odcinków. Na drogach dwujezdniowych najczęściej występuje natężenie ruchu w przedziale 15 – 30 tys. poj./dobę, co stanowi połowę ogółu odcinków bazowych. Odcinki o bardzo dużym natężeniu stanowią tylko 2,4% wszystkich odcinków. Udział pojazdów ciężkich (samochodów ciężarowych, samochodów ciężarowych z przyczepą i autobusów) UC wynosił od około 5% do 78% przy czym na 95% odcinków udział ten nie przekraczał 41% udziału pojazdów ciężarowych (rysunek 5.1b).

Duże zróżnicowanie wartości natężenia ruchu oraz udziałów pojazdów ciężarowych wskazuje na konieczność prowadzenia prac badawczych z podziałem na drogi jednojezdniowe oraz drogi dwujezdniowe.



Rys. 5.1 Parametry ruchu pojazdów a) średni dobowy ruch pojazdów SDR, b) udział pojazdów ciężarowych UC, na badanych odcinkach referencyjnych dróg

Źródło: Opracowanie własne

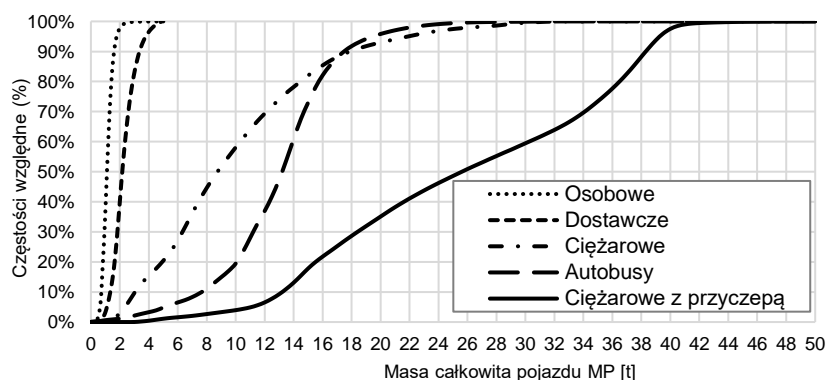
5.2.2. Masa pojazdów

Dla danych o masach pojazdów z każdej stacji preselekcyjnego ważenia WIM przyjęto rozkłady masy całkowitej pojazdów z podziałem na poszczególne kategorie [163]. Z analizowanych danych wynika, iż masa całkowita pojazdów istotnie zależy od kategorii pojazdów (osobowe, ciężarowe itd.). Na poszczególnych stacjach pomiarowych występowały różnice w rozkładach obciążeń, szczególnie w przypadku samochodów ciężarowych pojedynczych i ciężarowych z przyczepami. Istnieje wiele czynników mających wpływ na rozkład obciążenia pojazdów ciężkich, do których zaliczyć można rangę drogi (autostrada, krajowa, wojewódzka itp.), charakter ruchu (dominujący ruch lokalny, tranzytowy krajowy, tranzytowy międzynarodowy), dopuszczalne obciążenie osi (w Polsce 115 kN/oś, 100 kN/oś lub 80 kN/oś). Po przeanalizowaniu rozkładów obciążenia na poszczególnych stacjach pomiarowych, przy współpracy z autorem tych danych [163], przyjęto uśrednione rozkłady masy całkowitej w każdej z poszczególnych kategorii pojazdów. Uśrednione rozkłady masy wyznaczono sumując liczbę pojazdów w danych, poszczególnych przedziałach masy całkowitej z wszystkich stacji pomiarowych.

W przypadku samochodów osobowych zmienność masy całkowitej na poszczególnych stacjach jest niewielka i można przyjąć jeden rozkład uśredniony dla tej grupy pojazdów. Masa całkowita 95% samochodów osobowych mieści się w przedziale średnio między 700 kg a 2100 kg, przy czym rozkłady masy są niesymetryczne, lewostronne. Mediana wynosi ok. 1100 kg, zaś średnia masa samochodów osobowych ok. 1200 kg.

W przypadku samochodów ciężarowych zmienność rozkładu masy na poszczególnych stacjach pomiarowych jest duża. Rozkłady masy samochodów ciężarowych są rozkładami wielomodalnymi, co wynika z faktu, że w szerokiej kategorii pojazdów ciężarowych znajdują się różne rodzaje pojazdów o różnej budowie i dopuszczalnej masie całkowitej, przeznaczone do przewozu towarów lekkich oraz ciężkich. Masa całkowita 95% samochodów ciężarowych mieści się w przedziale między 3 800 kg a 50 000 kg, zaś średnia masa samochodów ciężarowych wynosi ok. 27 500 kg.

Na rysunku 5.2 przedstawiono dystrybuanty empiryczne rozkładów masy pięciu rodzajów pojazdów występujących na drogach krajowych w Polsce w ciągu jednego roku pomiarowego. Analizując, otrzymane wyniki stwierdzono, że wartości średnie z rozkładu masy samochodów ciężarowych i autobusów są większe niż masy tych pojazdów przyjmowanych w testach zderzeniowych prowadzonych wg normy EN-1317. To świadczy, że testowane bariery drogowe mogą ochraniać tylko ok. 50% pojazdów ciężkich poruszających się po sieci dróg ekspresowych i autostrad w Polsce.



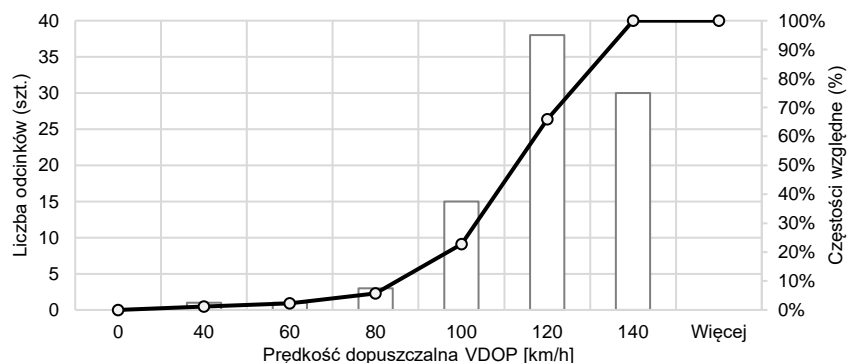
Rys. 5.2 Dystrybuanty rozkładów masy pojazdów MP (wszystkie drogi)

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [163]

5.2.3. Prędkość pojazdów

W ramach badań terenowych wykonano inwentaryzację prędkości dopuszczalnej na analizowanych odcinkach dróg. Na rysunku 5.3 przedstawiono częstości i dystrybuantę empiryczną prędkości dopuszczalnych na badanych odcinkach dróg, na podstawie obowiązujących w trakcie trwania badań przepisów ruchu drogowego oraz inwentaryzacji oznakowania pionowego, zidentyfikowanego na projektach organizacji ruchu. Informacje o lokalizacji znaków z ograniczeniami prędkości, pozwoliły wyznaczyć lokalne ograniczenia prędkości na odcinkach dróg. Średnie prędkości na odcinkach bazowych wyznaczono na podstawie średniej ważonej długości odcinków z danym ograniczeniem prędkości. Dla większości odcinków, średnia prędkość dopuszczalna była równa ograniczeniu, które wyznacza klasa drogi i przekrój (np. znak informacyjny D-7 „Droga ekspresowa” na drodze

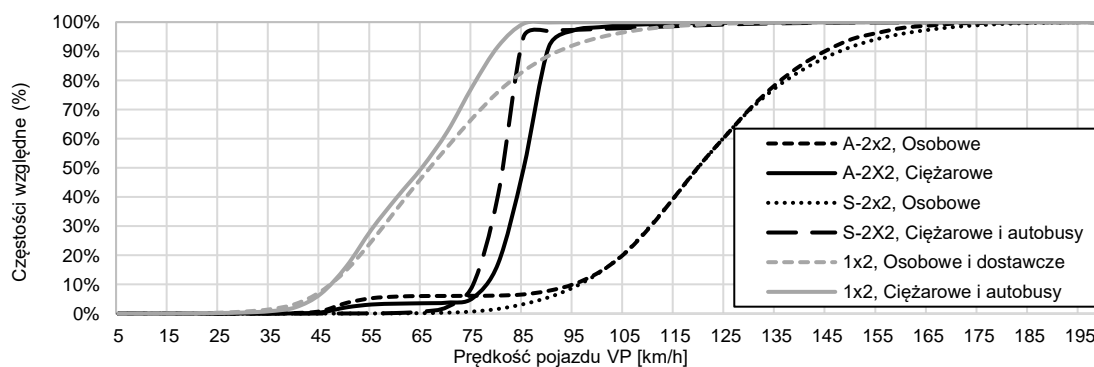
dwujezdniowej, przyjmuje się 120 km/h). Jedyne zmiany średnich prędkości na odcinkach, wynikały ze zmiany geometrii drogi (ograniczenia na łukach pionowych i poziomych).



Rys. 5.3 Histogram średnich prędkości dopuszczalnych VDOP na odcinkach bazowych

Źródło: Opracowanie własne

Prędkość rzeczywista pojazdów w ruchu swobodnym zależy od wielu czynników, w tym szczególnie od klasy i przekroju drogi oraz od kategorii pojazdu. Prędkość rzeczywistą określono na podstawie analizy rozkładów prędkości uzyskanych dla poszczególnych stacji pomiarowych. Przyjęto uśrednione rozkłady prędkości osobno dla poszczególnych kategorii pojazdów oraz w zależności od klasy drogi (ekspresowe - dwujezdniowe, pozostałe - jednojezdniowe). Dystrybuanty uśrednionych prędkości przedstawiono na rysunku 5.4. Uśrednione rozkłady prędkości obliczono analogicznie, jak rozkłady masy całkowitej pojazdów, sumując liczbę zaobserwowanych pojazdów poruszających się z prędkością w danym przedziale.



Rys. 5.4 Dystrybuanty empiryczne rozkładów prędkości pojazdów VP

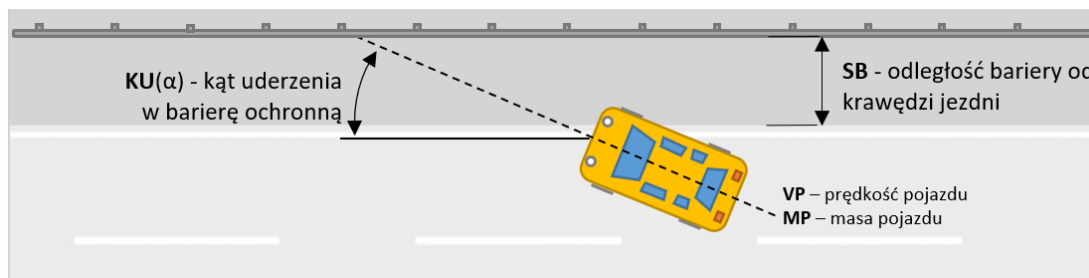
Źródło: Opracowanie własne

W przypadku rozkładów prędkości na drogach dwujezdniowych, są one przesunięte w prawą stronę, co potwierdza, że na tych drogach prędkości ruchu są wyższe, zarówno w przypadku pojazdów lekkich, jak i ciężkich. Przesunięcie rozkładu prędkości w prawą stronę oznacza wzrost średniej prędkości ruchu pojazdów.

5.2.4. Kąt uderzenia pojazdu w barierę ochronną

Badania i analizy kątów uderzenia pojazdów wykonano na podstawie zdjęć ze zdarzeń drogowych uzyskanych od rejonów dróg GDDKiA oraz firm zajmujących się utrzymaniem dróg. Spośród 21 tys.

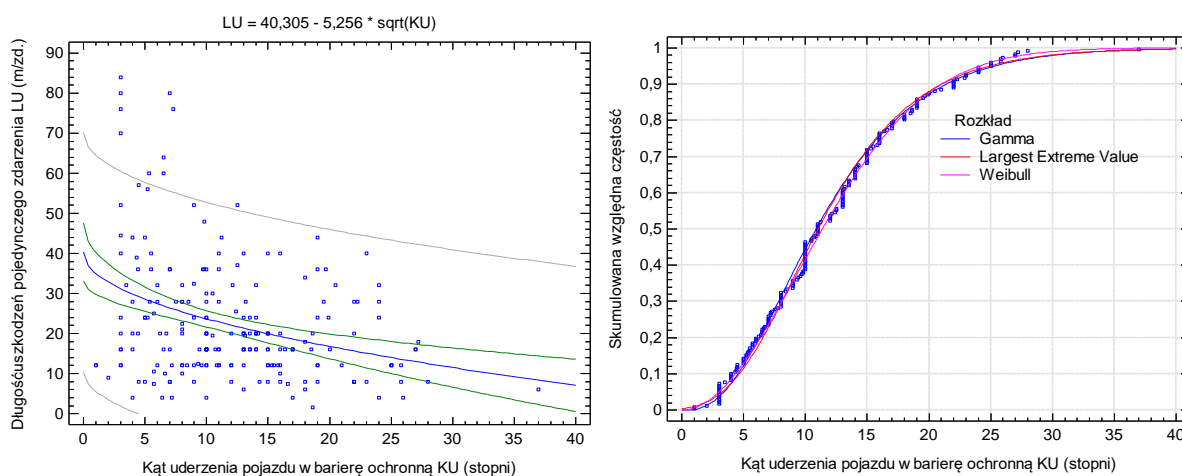
otrzymanych zdjęć z miejsc zdarzeń wyselekcjonowano te, z których możliwe było odtworzenie kąta uderzenia pojazdu w barierę. Kąt uderzenia pojazdu w barierę ochronną zależy od kilku czynników, w tym między innymi od prędkości pojazdu oraz odległości pojazdu i bariery od krawędzi jezdni (rysunek 5.5). Znając kąt uderzenia pojazdu w barierę KU (α), można określić składowe prędkości pojazdu, co przy znajomości masy pojazdu umożliwia określenie składowej energii kinetycznej, z jaką pojazd uderza w barierę.



Rys. 5.5 Schemat poglądowy – kąt uderzenia w barierę ochronną KU

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie analizy 215 zrekonstruowanych kątów uderzeń pojazdów w barierę ochronną (rysunek 5.6a) na odcinkach dróg dwujezdniowych stwierdzono, że wraz ze wzrostem kąta uderzenia pojazdu w barierę ochronną (KU), maleje długość uszkodzeń bariery (LU). Odnotowano także, że najczęściej pojazdy uderzały w barierę ochronną w zakresie 8 – 16°, a średni kąt uderzenia pojazdu w barierę ochronną wynosił 12°. Stosunkowo małe kąty uderzenia pojazdu w barierę ochronną, były charakterystycznym zjawiskiem dla dróg o dużych prędkościach (autostrady, drogi ekspresowe). W ramach próby opisanego rozkładem statystycznym odnotowanych kątów uderzeń (rysunek 5.6b), wybrano trzy rozkłady o największym logarytmie wskaźnika wiarygodności, spełniających założenia dla testów (Kolmogorov-Smirnov, Chi-kwadrat) mieszczących się w 95% przedziale ufności. Najlepiej ocenionym rozkładem opisującym kąty uderzeń pojazdów w barierę ochronną jest rozkład Weibulla. Z analizowanej próby wynika, że w 95% zderzeń z barierą, kąt uderzenia nie przekracza 25 stopni.



Rys. 5.6 Analiza a) wpływu kątów uderzeń na długość uszkodzeń, b) rozkładu kątów uderzeń pojazdu w barierę ochronną

Źródło: opracowanie własne

5.3. Parametry geometryczne badanych odcinków dróg

5.3.1. Gęstość łuków poziomych

Gęstość łuków poziomych jest wskaźnikiem, który informuje o liczbie łuków poziomych na jednostkę długości badanego odcinka drogi. Jest to jeden z kluczowych parametrów opisujących geometrię drogi, który wpływa na komfort jazdy oraz bezpieczeństwo ruchu drogowego. Badania gęstości łuków poziomych wyznaczono dla wszystkich analizowanych odcinków dróg, korzystając ze wzoru 5.2.

$$GLPO_i = \frac{\sum LLPO_i}{DL_i} \quad (5.2)$$

gdzie:

$GLPO$ – wskaźnik krętości odcinka drogi ($\frac{^\circ}{km}$)

$LLPO_i$ – kąt zwrotu trasy [$^\circ$]

L_n – długość odcinka

Gęstość łuków poziomych (GLPO) na analizowanych odcinkach dróg dwujezdniowych mieściła się w zakresie od 0 - 2,79 łuków/km. Średnie wartości gęstości łuków poziomych jakie odnotowano wyniosły odpowiednio: na odcinkach dróg głównych ruchu przyspieszonego 0,89 łuków/km (maksymalnie 2,79), odcinkach dróg ekspresowych 0,43 łuków/km (maksymalnie 1,81), autostradach 0,36 (maksymalnie 1,12).

5.3.2. Krętość odcinków dróg

Parametr krętości odcinka drogi wyznaczono dla niwelety, której przebieg pokrywa się z osią jezdni (na drodze jednojezdniowej), pasa dzielącego (w przypadku drogi dwujezdniowej). Informacje na temat odcinków prostych, łuków poziomych, wraz z krzywymi przejściowymi oraz promieniami łuków, pozyskano z projektów organizacji ruchu. Parametr krętości wyznaczono wg wzoru 4.1.

Najmniejsze wahania i średnią wartość wskaźnika krętości odnotowano na autostradach. Średnia krętość na autostradach wyniosła 11°/km. Największą średnią krętość odnotowano na odcinkach dróg klasy G i GP i wyniosła średnio 14° / km. Średnia krętość na odcinkach bazowych wynosi 12° /km (tablica 5.1).

Tab. 5.1 Wskaźniki krętości odcinków bazowych wg klasy drogi

Klasa drogi	Minimalna krętość odcinka drogi WKO_{\min} ($^\circ/km$)	Maksymalna krętość odcinka drogi WKO_{\max} ($^\circ/km$)	Średnia krętość na kilometrowym odcinku drogi WKO_{sr} ($^\circ/km$)
A	0	51	11
S	0	94	12
GP	0	70	14
G	0	47	14
Razem:	0	94	12

Źródło: Opracowanie własne

5.3.3. Falistość odcinka drogi

Kolejnym analizowanym elementem odcinka drogi była falistość profilu podłużnego drogi. Falistość jest parametrem odnoszącym się do zmian w wysokości powierzchni jezdni wzdłuż jej osi. Analizę falistości

wykonano poprzez badanie profilu podłużnego wybranych odcinków, który przedstawia wzniesienia i spadki na całej długości odcinka drogi. W tym celu skorzystano z zebranych w ramach badań terenowych dokumentacji projektowych oraz z ogólnodostępnych danych numerycznego modelu terenu polskiej platformy Geoportal. W przeprowadzonej analizie parametr falistości został opisany w sposób zero-jedynkowy według następującego kryterium: odcinkom, na których występowały spadki podłużne (SP) przekraczające bądź bliskie 5%, przypisywano wartość 1, natomiast pozostałym odcinkom przypisywano wartość 0 (wzór 5.3).

$$FA_i = \begin{cases} 1 & \text{dla } SP_{n,i} \approx 5\% \text{ lub } \geq 5\% \\ 0 & \text{dla } SP_{n,i} \ll 5\% \end{cases} \quad (5.3)$$

gdzie:

FA_i – odcinki faliste na których występują spadki podłużne bliskie 5% lub większe,

$SP_{n,i}$ – spadki podłużne profilu n tego nachylenia na i -tym odcinku drogi,

Takie podejście pozwoliło na wyselekcjonowanie odcinków dróg, gdzie różnice w ukształtowaniu terenu są najbardziej zauważalne i mogą mieć największy wpływ na liczbę wypadnięć pojazdów z jezdni.

5.4. Charakterystyki barier ochronnych występujących na analizowanych odcinkach dróg

5.4.1. Rodzaje i udział barier ochronnych

Badanie struktury rodzajowej barier ochronnych przeprowadzono oddzielnie dla barier skrajnych prawej jezdni, barier skrajnych lewej jezdni oraz dla barier w pasie dzielącym. Uwzględniano również brak występowania barier ochronnych np. w sytuacji wlotu łącznicy w obrębie węzła drogowego. W przypadku pasa dzielącego niemal na wszystkich odcinkach dróg ekspresowych i autostradach występują bariery ochronne, wyjątkiem są odcinki początkowe dróg ekspresowych i miejsca poboru opłat.

Na analizowanych odcinkach występowały bariery starego typu oraz bariery nowego typu. Do barier starego typu zaliczamy urządzenia, które nie zostały przebadane wg normy PN-EN 1317 i nie zapewniają użytkownikom odpowiedniego bezpieczeństwa (bariery typu SP). Bariery tego typu znajdują się na odcinkach dróg, które zostały oddane do użytku przed rokiem 2010. Po roku 2010 wprowadzono wytyczne stosowania barier ochronnych, co wymusiło stosowanie barier nowego typu.

Z przeprowadzonych analiz wynika (tabela 5.2), że najczęściej stosowaną barierą na analizowanych odcinkach jest bariera o poziomach powstrzymywania H1 i H2. Bariery o wyższych poziomach powstrzymywania tj. H2 i H3 najczęściej są zlokalizowane w pasie rozdziału. Średnio na kilometrowym odcinku autostrady, na jezdnię w pasie dzielącym przypada 983 mb bariery ochronnej. Brak 100% obłożenia pasa dzielącego w bariery ochronne wynika z występowania na odcinkach bramek wjazdowych. Na tych odcinkach zastosowano plastikowe bariery tymczasowe, których nie ujęto w analizie. Łącznie na kilometrowy odcinek jezdni przypada na autostradach 1,6 km barier ochronnych, na drogach ekspresowych 1,8 km barier ochronnych.

Tab. 5.2 Gęstość barier ochronnych według poziomów powstrzymywania.

Lokalizacja i klasa drogi		Długość analizowanych odcinków	Udział barier wg poziomu powstrzymywania					Suma końcowa [%]
			N1 [%]	N2 [%]	H1 [%]	H2 [%]	H3 [%]	
A	Pas dzielący	152,4	1,1%	3,4%	32,1%	22,1%	0,8%	100%
	Pobocze jezdni		0,6%	8,8%	23,8%	7,2%	0,0%	100%
Suma:			1,7%	12,2%	55,9%	29,4%	0,8%	100%
S	Pas dzielący	90,9	0,1%	1,9%	23,8%	26,0%	0,0%	100%
	Pobocze jezdni		0,4%	12,8%	32,1%	2,9%	0,0%	100%
Suma:			0,5%	14,7%	55,9%	28,9%	0,0%	100%

Źródło: Opracowanie własne

Udział barier ochronnych na odcinku drogi dwujezdniowej wyznaczono według wzoru 5.4. Na rysunku 5.7 przedstawiono schemat pomocniczy do opisu oznaczeń.

$$UB_i = \frac{LB_{P1} + LB_{L1} + LB_{P2} + LB_{L2}}{2 \cdot n_i \cdot DL_i} \quad (5.4)$$

gdzie:

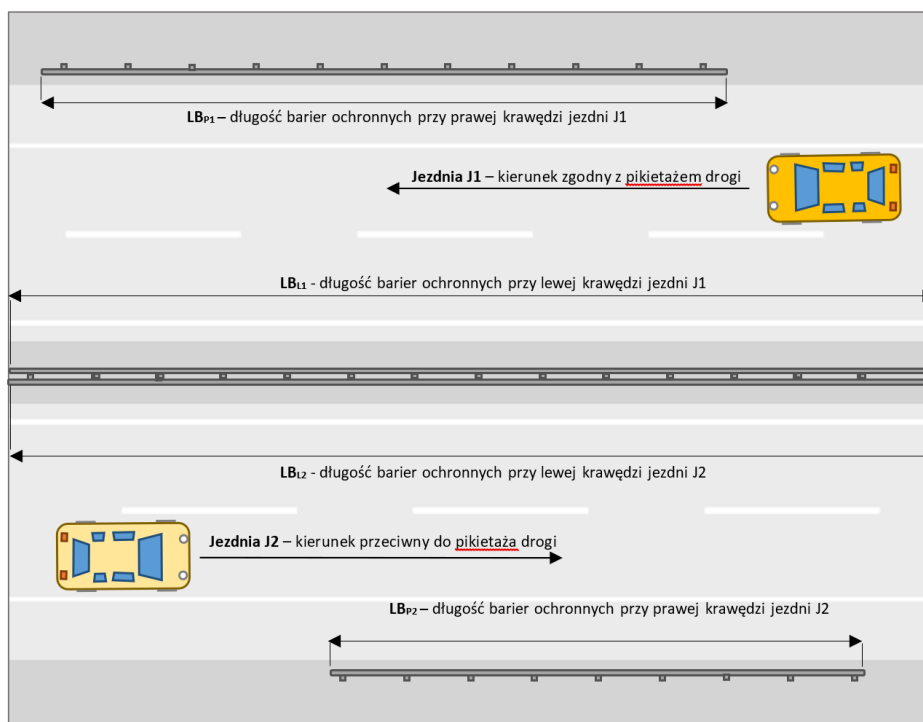
UB_{n_i} - udział krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami n tego rodzaju na i-tym odcinku drogi (-),

$LB_{P1,2}$ - długość prawej krawędzi jezdni zabezpieczonej barierą ochronną (km),

$LB_{L1,2}$ - długość lewej krawędzi jezdni zabezpieczonej barierą ochronną (km),

DL_i - długość i-tego odcinka drogi (km),

n_i - liczba jezdni (szt.).



Rys. 5.7 Długość barier ochronnych mierzone na odcinku drogi LB

Źródło: Opracowanie własne

5.4.2. Odległość bariery od krawędzi jezdni

Odległości barier ochronnych od krawędzi jezdni pozyskano z projektów organizacji ruchu dla poszczególnych odcinków dróg. Dla odcinków referencyjnych dane sprowadzono do jednej wartości, stosując średnią ważoną na każdym odcinku. Średnią odległość drogowych barier ochronnych od krawędzi wykonano oddzielnie dla barier skrajnych na jezdni prawej i lewej oraz dla pasa dzielącego. Uzyskane średnie wartości tego parametru ze względu na typ analizowanego odcinka drogi dwujezdniowej, zestawiono w tabelicy 5.3. Z analizy wynika, że średnia odległość bariery od krawędzi jezdni w przekroju drogi mieści się w zakresie między 0,6 a 1,8 metra, w zależności od typu i przekroju analizowanego odcinka drogi dwujezdniowej.

Tab. 5.3 Średnia odległość barier od krawędzi jezdni na drogach dwujezdniowych

Typ drogi	Średnia odległość bariery od krawędzi jezdni SB (m)	Średnia odległość bariery dzielącej od krawędzi jezdni SB _d (m)	Średnia odległość bariery skrajnej od krawędzi jezdni SB _s (m)
A	1,8	2,5	1,4
A 2x3	1,9	2,7	1,5
A 2x2	1,0	1,4	0,8
S	2,0	2,1	2,1
S 2x3	2,1	2,2	2,2
S 2x2	1,2	1,2	1,5
GP	0,6	0,8	0,6
GP 2x2	0,6	0,8	0,6
Razem:	1,8	2,2	1,7

Źródło: Opracowanie własne

5.4.3. Model utrzymania drogi

Z przeprowadzonych szczegółowych analiz wynika, że model utrzymania drogi wpływa istotnie na stopień wykrywalności zdarzeń drogowych. Stopień wykrywalności wyrażono za pomocą współczynników wykrywalności zdarzeń WZA i WZB.

Ze względu na zaobserwowane podczas badań terenowych różnice w wykrywalności liczby zdarzeń z barierami ochronnymi rejestrowanymi przez służby utrzymaniowe, zweryfikowano je pod kątem modelu utrzymania drogi. Według przeprowadzonych testów statystycznych (test Kruskala-Wallisa) potwierdzono występowanie istotnych statystycznie różnic między częstością zarejestrowanych zdarzeń na odcinkach dróg o różnym standardzie utrzymania drogi. W wyniku analizy oszacowano wartości wskaźników wykrywalności zdarzeń (WZA) z barierami, dla których wartość 1,0 oznacza najwyższą wykrywalność zdarzeń a 0,5 najniższą (tabela 5.4).

Tab. 5.4 Wartość wskaźnika wykrywalności zdarzeń z barierami ochronnymi względem stosowanego na odcinku drogi modelu utrzymania

Model utrzymania drogi	Wartość szacowanego wskaźnika wykrywalności zdarzeń z barierami WZA (-)
Model utrzymaj standard A (US-A)	1,0
Model utrzymaj standard B (US-B)	0,8
Model klasyczny (MK)	0,5

Źródło: Opracowanie własne

W celu weryfikacji danych i identyfikacji przyczyn występujących różnic pomiędzy rejonami jednostek utrzymaniowych przeprowadzono dodatkową analizę. Analiza dotyczyła weryfikacji liczby zdarzeń uzyskanych od służb utrzymaniowych z uwzględnieniem danych zarejestrowanych przez policję w bazie SEWiK. Z przeprowadzonych analiz wynika duża dysproporcja między danymi o zdarzeniach drogowych z barierami drogowymi zarejestrowanymi w bazie policyjnej (LZDB_P), a danymi o zdarzeniach drogowych z barierami zarejestrowanymi w poszczególnych rejonach drogowych (LZDB_Z).

Ustalono, że występujące różnice między LZDB_P a LZDB_Z zależą przede wszystkim od warunków lokalnych takich jak: standard utrzymania drogi i firma utrzymaniowa. Standard utrzymania drogi wpływa przede wszystkim na częstość wykonywania objazdów i przeglądów tych urządzeń. Wyższy standard oznacza częstsze rutynowe kontrole i inspekcje, w związku z tym rośnie też prawdopodobieństwo wykrycia uszkodzeń a nawet sprawcy zdarzenia. Z przeprowadzonych rozmów w trakcie gromadzenia danych o uszkodzeniach barier zaobserwowano, że wśród firm utrzymaniowych brakuje jednolitych procedur i definicji określających stopień uszkodzenia i priorytet naprawy uderzonej przez pojazd bariery. Powoduje to sytuacje, w których np. identyczne uszkodzenie bariery na drodze o tym samym standardzie utrzymania i klasie drogi (np. zarysowanie prowadnicy bariery), zostaje zakwalifikowane do wymiany przez służby utrzymaniowe „x”, a przez służby utrzymaniowe „y” nie. Uznano zatem, że w przypadku, gdy na danym odcinku drogi zarządzanym przez firmę „y”, gdzie LZDB_P > LZDB_Z, część zdarzeń jest nierejestrowana przez służby utrzymaniowe. W związku z tym zakłada się, że fragment współczynnika kalibrującego określonego we wzorze 8.17 jako C_i , może zostać opisany w modelu i jest specyficzny dla danego odcinka drogi.

W związku z powyższym przyjęto próbę kalibracji niektórych modeli w postaci zmiennej określającej współczynnik wykrywalności zdarzeń (WZB). Współczynnik został wykorzystany podczas budowy modeli częstości zdarzeń z barierami. Zmienna została wyliczona przy pomocy wzoru 5.5:

$$WZB = \begin{cases} 0 & \text{dla } LZDB_P - LZDB_Z \leq 0 \\ -\frac{LZDB_P - LZDB_Z}{LZDB_Z} & \text{dla } LZDB_P - LZDB_Z > 0 \end{cases} \quad (5.5)$$

5.5. Identyfikacja zdarzeń z barierami ochronnymi na analizowanych odcinkach dróg

5.5.1. Charakterystyka uderzeń w barierę i rodzajów uszkodzeń barier

Podczas rocznych obserwacji funkcjonowania urządzeń brd na wszystkich odcinkach dróg stanowiących poligon badawczy zarejestrowano 4 730 zdarzeń drogowych, w których odnotowano 5 083 uderzeń w urządzenia bezpieczeństwa ruchu drogowego. Zdarzenia i uderzenia w urządzenia brd podzielono według lokalizacji miejsca zdarzenia. W tabeli 5.5 przedstawiono rozkład liczby zdarzeń i uderzeń w urządzenia brd według lokalizacji na różnych elementach drogi. Najwięcej uszkodzeń - 4 406 zdarzenia, zaobserwowano na jezdni głównej, pozostałe uszkodzenia miały miejsce na łącznicach 592 uszkodzeń oraz innych miejscach np. na skrzyżowaniach, miejscach obsługi podróźnych, drogach dojazdowych, serwisowych czy punktach poboru opłat - 85 uszkodzeń bariery.

Tab. 5.5 Lokalizacja uderzeń w urządzenia brd

Lokalizacja uderzenia w urządzenie brd	Uszkodzenia		Zdarzenia	
	Liczba (szt.)	Udział (%)	Liczba (szt.)	Udział (%)
Jezdnia główna	4 406	86,7	4 088	86,4
Łącznica	592	11,6	558	11,8
Inne	85	1,7	84	1,8
Suma:	5 083	100,0	4 730	100,0

Źródło: Opracowanie własne

Analizując szczegółowo zdarzenia według lokalizacji urządzenia (tabela 5.6), zaobserwowano równomierny rozkład liczby zdarzeń pomiędzy pasem dzielącym a poboczem jezdni. Do analizy wykorzystano zbiór 4 088 zdarzeń bazy odcinków dróg. Uzyskane dane dotyczyły zdarzeń z barierami drogowymi i mostowymi na jezdni głównej (z analiz wyłączono grupę zdarzeń, które miały miejsce na łącznicach i dojazdach do węzłów).

Tab. 5.6 Lokalizacja uderzeń w urządzenia brd na jezdni głównej

Lokalizacja uderzenia w barierę	Uszkodzenia		Zdarzenia	
	Liczba (szt.)	Udział (%)	Liczba (szt.)	Udział (%)
nie określono	23	0,5	20	0,5
Pas rozdzielający (po lewej stronie jezdni)	2 183	49,5	2 018	49,4
Pobocze jezdni (po prawej stronie jezdni)	2 200	49,9	2 050	50,1
Suma:	4 406	100,0	4 088	100,0

Źródło: Opracowanie własne

Zdarzenia z urządzeniami miały miejsce z różnego rodzaju pojazdami, w ponad 55% zdarzeń brały udział: samochody osobowe o masie: 0,9 t (121 zdarzeń), 1,3 t (212 zdarzeń), 1,5 t (1359 zdarzeń), 1,8 t (88 zdarzeń), samochody dostawcze do 3,5 t (130 zdarzeń), autobusy o masie ok. 13 t (6 zdarzeń), samochody ciężarowe bez przyczepy o masie ok. 16 t (64 zdarzeń) oraz samochody ciężarowe z przyczepą o masie dopuszczalnej 38 t (296 zdarzeń) – tabela 5.7.

Tab. 5.7 Zdarzenia z urządzeniami brd zarejestrowane na jezdni głównej

Rodzaj pojazdu	Przybliżona masa pojazdu (t)	Uszkodzenia		Zdarzenia	
		Liczba (szt.)	Udział (%)	Liczba (szt.)	Udział (%)
Nieznany sprawca	-	1 878	42,6%	1 812	44,3%
OL – osobowy lekki	0,9	127	2,9%	121	3,0%
OS – osobowy średni	1,3	238	5,4%	212	5,2%
OC – osobowy ciężki	1,5	1 511	34,3%	1 359	33,2%
S – suw	1,8	96	2,2%	88	2,2%
F - furgon	2,0	146	3,3%	130	3,2%
A - autobus	13,0	8	0,2%	6	0,1%
C – ciężarowy bez przyczepy	16,0	78	1,8%	64	1,6%
CP – ciężarowy z przyczepą	38,0	324	7,4%	296	7,2%
Suma:		4 406	100%	4 088	100%

Źródło: Opracowanie własne

Najwięcej zdarzeń i uderzeń odnotowano w bariery ochronne – 4 781 uderzeń pojazdów, kolejnym najczęściej uszkodzonym urządzeniem były osłony energochłonne U-15a (poduszki zderzeniowe), na których zarejestrowano 87 uderzeń. Ponad 95% rejestrowanych przez zarządy dróg zdarzeń stanowiły uderzenia pojazdu w barierę ochronną (tabela 5.8), pozostałe zdarzenia związane były z uszkodzeniem innych urządzeń brd oraz środków organizacji ruchu, takich jak: osłon energochłonnych U-15a, osłon U-15b i terminali zderzeniowych (ok. 1% zdarzeń), znaków, ekranów akustycznych, separatorów itp. (ok. 4% zdarzeń).

Tab. 5.8 Rodzaje uszkodzonych urządzeń

Rodzaj urządzenia	Uszkodzenia		Zdarzenia	
	Liczba (szt.)	Udział (%)	Liczba (szt.)	Udział (%)
Bariera ochronna	4 781	94,1%	3 914	95,8%
Osłona energochłonna U-15a	87	1,7%	59	1,4%
Osłona U15b	12	0,2%	9	0,2%
Terminal zderzeniowy	6	0,1%	5	0,1%
TTMA	2	0,0%	2	0,1%
Inne	195	3,8%	98	2,4%
Suma:	5 083	100%	4088	100%

Źródło: Opracowanie własne

Zdecydowana większość zarejestrowanych zdarzeń z barierami ochronnymi (97%) miała miejsce na drogach dwujezdniowych (3 795 zdarzeń). Wyniki liczby zarejestrowanych zdarzeń z barierami ochronnymi zestawiono według klasy drogi i przedstawiono w tabeli 5.9.

Tab. 5.9 Liczba zarejestrowanych zdarzeń z barierami wg klasy drogi

Klasa drogi	Przekrój drogi	Zdarzenia	
		Liczba (szt.)	Udział (%)
Autostrady (A)	Dwujezdniowy	2 030	51,9%
Ekspresowe (S)		1 296	33,1%
Główne przyspieszone (GP)		469	12,0%
Główne przyspieszone (GP)	Jednojezdniowy	105	2,7%
Główne (G)		14	0,4%
Suma:		3 914	3 914

Źródło: Opracowanie własne

W ponad 43% zarejestrowanych zdarzeń z barierami ochronnymi (1 654 zdarzeń), nie zidentyfikowano pojazdu sprawcy (tabela 5.10). W przypadku tego typu zdarzeń, odnotowano najmniejszą wartość średniej długości uszkodzeń tj. 14,8 m/zd. W pozostałych 56% zdarzeń, zidentyfikowano pojazd sprawcy. Pojazdy ciężarowe (A, C, CP), osiągnęły najwyższe wartości średniej długości uszkodzeń w przeliczeniu na jedno zdarzenie. Pojazdy ciężarowe z przyczepą, osiągały ponad dwukrotnie większe uszkodzenia niż pojazdy osobowe. Łącznie na drogach dwujezdniowych, zarejestrowano 3 795 zdarzeń, powodujących uszkodzenia o łącznej długości 73 330 m i średniej długości uszkodzeń w zdarzeniu wynoszącej 18,8 m.

Tab. 5.10 Liczba zdarzeń i długość zarejestrowanych uszkodzeń barier ochronnych na według sprawcy zdarzenia na drogach dwujezdniowych

Rodzaj pojazdu	Zdarzenia z barierami		Uszkodzenia barier	
	Liczba LZDB (szt.)	Udział UZDB (%)	Sumaryczna długość SLU (m)	Średnia długość LUP (m/zd.)
Nieznany sprawca	1 654	43,6	25 819	14,8
OL – osobowy lekki	116	3,1	1 933	16,2
OS – osobowy średni	192	5,1	4 005	20,9
OC – osobowy ciężki	1 304	34,4	23 817	17,9
S – suw	80	2,1	1 930	23,9
F - furgon	120	3,2	2 621	21,5
A - autobus	5	0,1	148	29,6
C – ciężarowy bez przyczepy	58	1,5	1 681	29,0
CP – ciężarowy z przyczepą	266	7,0	11 378	42,0
Suma:	3 795	100,0	73 330	18,8

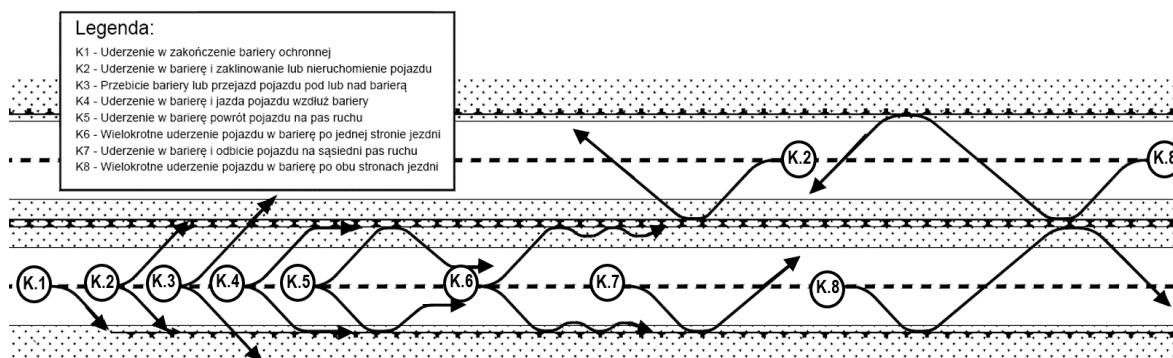
Źródło: Opracowanie własne

5.5.2. Klasyfikacja zdarzeń z barierami ochronnymi

Najczęściej stosowanym urządzeniem bezpieczeństwa ruchu drogowego przy drogach krajowych w Polsce są drogowe bariery ochronne. Właśnie w tego typu urządzenia są najczęściej uderzane przez pojazdy, które niekontrolowanie zjeżdżają z jezdni.

Uderzenie w drogową barierę ochronną powoduje uszkodzenia pojazdu i bariery. Dla potrzeb niniejszej pracy wyróżniono dziewięć grup zdarzeń, które mogą powstać w wyniku uderzenia pojazdu w barierę ochronną (rysunki 5.8-5.11):

- **K.1** Uderzenie w zakończenie bariery ochronnej,
- **K.2** Uderzenie w barierę i zaklinowanie lub nieruchomienie pojazdu,
- **K.3** Przebicie bariery lub przejazd pojazdu pod lub nad barierą,
- **K.4** Uderzenie w barierę i jazda pojazdu wzdłuż bariery,
- **K.5** Uderzenie w barierę powrót pojazdu na pas ruchu,
- **K.6** Wielokrotne uderzenie pojazdu w barierę po jednej stronie jezdni,
- **K.7** Uderzenie w barierę i odbicie pojazdu na sąsiedni pas ruchu,
- **K.8** Wielokrotne uderzenie pojazdu w bariery po obu stronach jezdni,
- **K.9** Inne uderzenia w barierę,
- **K.10** Uderzenia w pozostałe urządzenia brd.



Rys. 5.8 Najczęściej występujące grupy zdarzeń wywołane najechaniem pojazdu na barierę ochronną

Źródło: opracowanie własne

Zdarzenie K.1 – Uderzenie w zakończenie bariery ochronnej; występuje wówczas, gdy pojazd nagle zjeżdża z jezdni i uderza w początkowy fragment bariery, jej początek, poduszkę zderzeniową lub terminal zderzeniowy. W zależności od typu zakończenia bariery, wyróżniamy trzy typy zachowań pojazdu: uderzenie i zatrzymanie pojazdu, uderzenie i odbicie pojazdu, a w przypadkach poduszek i terminali zderzeniowych; najazd na zakończenie bariery i „wybicie” pojazdu w górę.

Zdarzenie K.2 – Uderzenie w barierę i zaklinowanie lub nieruchomięcie pojazdu; występuje wówczas, gdy pojazd nagle zjeżdża z jezdni i uderza w segment bariery pod dużym kątem lub z bardzo dużą energią kinetyczną. W zależności od rodzaju bariery i energii kinetycznej pojazdu, uderzenie to może spowodować: zatrzymanie pojazdu przy barierze lub zaklinowanie się pojazdu pod barierą lub na barierze.

Zdarzenie K.3 – Przebiecie bariery lub przejazd pojazdu pod lub nad barierą; występuje wówczas, gdy pojazd zjeżdża z jezdni i uderza w segment bariery pod dużym kątem lub z bardzo dużą energią kinetyczną. W zależności od rodzaju bariery oraz energii kinetycznej pojazdu, uderzenie to może spowodować: przebiecie bariery lub przejazd pojazdu przez barierę i wjazd w obszar chroniony (jezdnie sąsiednią, obiekt chroniony, obiekt niebezpieczny).



Rys. 5.9 Grupy zdarzeń K.1-K.3 wywołane najechaniem pojazdu na barierę ochronną

Źródło: GDDKiA

Zdarzenie K.4 – Uderzenie pojazdu w barierę i jazda pojazdu wzdłuż bariery; występuje wówczas, gdy pojazd zjeżdża z jezdni i uderza w segment bariery pod małym kątem. W zależności od rodzaju bariery, energii kinetycznej, rodzaju pobocza (gruntowe miękkie), pojazdu, uderzenie to może spowodować: jazdę pojazdu wzdłuż bariery (z powodu barku możliwości powrotu pojazdu na jezdnię) lub przejazd jednym kołem przez barierę i toczenie się pojazdu z barierą między kołami. Pojazdy o środku ciężkości znajdującym się powyżej prowadnicy bariery ochronnej – przy uderzeniu ze znaczną prędkością pod niewielkim kątem – zwykle dość silnie wychylały się w kierunku bariery. Po przejechaniu kilkudziesięciu metrów pojazd zazwyczaj pozostał przy barierze lub odłączał się od niej pozostawiając znaczne uszkodzenia.

Zdarzenie K.5 – Uderzenie pojazdu w barierę i powrót pojazdu na pas ruchu, którym się poruszał; występuje wówczas, gdy pojazd zjeżdża z jezdni i uderza w segment bariery pod niedużym kątem ze średnią lub dużą energią kinetyczną. W zależności od rodzaju bariery, energii kinetycznej pojazdu oraz twardości pobocza, uderzenie może spowodować kontakt z barierą (i tym samym jej uszkodzenie), odbicie się od bariery, a następnie korektę kierunku jazdy i powrót pojazdu na pas ruchu, po którym się poruszał.

Zdarzenie K.6 – Wielokrotne uderzenie pojazdu w barierę po jednej stronie jezdni; występuje wówczas, gdy pojazd zjeżdża z jezdni i uderza w segment bariery przy kącie uderzenia rzędu 20-30° z dużą energią kinetyczną. W zależności od rodzaju bariery, energii kinetycznej pojazdu oraz rodzaju podłoża, uderzenia wywołują często uszkodzenia zawieszenia przedniego koła, a ponadto uszkodzenia obręczy koła

i ogumienia. Do zdarzeń tych dochodzi w szczególności z wybranymi typami barier (m.in. barierami niepodatnymi, a także czasem barierami bez przekładkowymi). W następstwie uszkodzeń, przednie koło pojazdu może ulec zablokowaniu, po czym pojazd po odłączeniu się od bariery i przejechaniu krótkiego odcinka, zbacza ponownie w kierunku bariery, uderzając w nią powtórnie (najczęściej pod dużym kątem bliskim 90°).



Rys. 5.10 Grupy zdarzeń K.4-K.6 wywołane najechaniem pojazdu na barierę ochronną

Źródło: GDDKiA

Zdarzenie K.7 – Uderzenie w barierę i odbicie pojazdu na sąsiedni pas ruchu; występuje wówczas, gdy pojazd zjeżdża z jezdni i uderza w segment bariery pod dużym kątem ze średnią i dużą energią kinetyczną. W zależności od rodzaju bariery i energii kinetycznej pojazdu, uderzenie może spowodować dość duże odbicie pojazdu od bariery, w efekcie uszkodzeń utratę kontroli nad pojazdem i unieruchomienie pojazdu na sąsiednim pasie ruchu.

Zdarzenie K.8 – Wielokrotne uderzenie pojazdu w barierę po obu stronach jezdni; występuje wówczas, gdy pojazd zjeżdża z jezdni i uderza w segment bariery pod niedużym kątem rzędu $15-20^\circ$ z dużą energią kinetyczną. W zależności od rodzaju bariery oraz energii pojazdu uderzenie może spowodować odbicie pojazdu pod dużym kątem i przekierować pojazd na przeciwległe bariery ochronne i wywołać powtórne uderzenia pojazdu. Do tego typu zdarzeń dochodzi najczęściej przy dużych prędkościach pojazdów. Podkreślenia wymaga fakt, iż przy prędkościach powyżej 100 km/h przebieg kolizji jest znacznie trudniejszy do przewidzenia niż przy mniejszych prędkościach.

Zdarzenie K.9 – Inne uderzenia w barierę; występują najczęściej, gdy uderzenie w barierę ochronną jest zdarzeniem wtórnym. Do uderzeń wtórnych w bariery dochodzi najczęściej po zderzeniach bocznych lub tylnych dwóch lub więcej pojazdów.



Rys. 5.11 Grupy zdarzeń K.7-K.9 wywołane najechaniem pojazdu na barierę ochronną

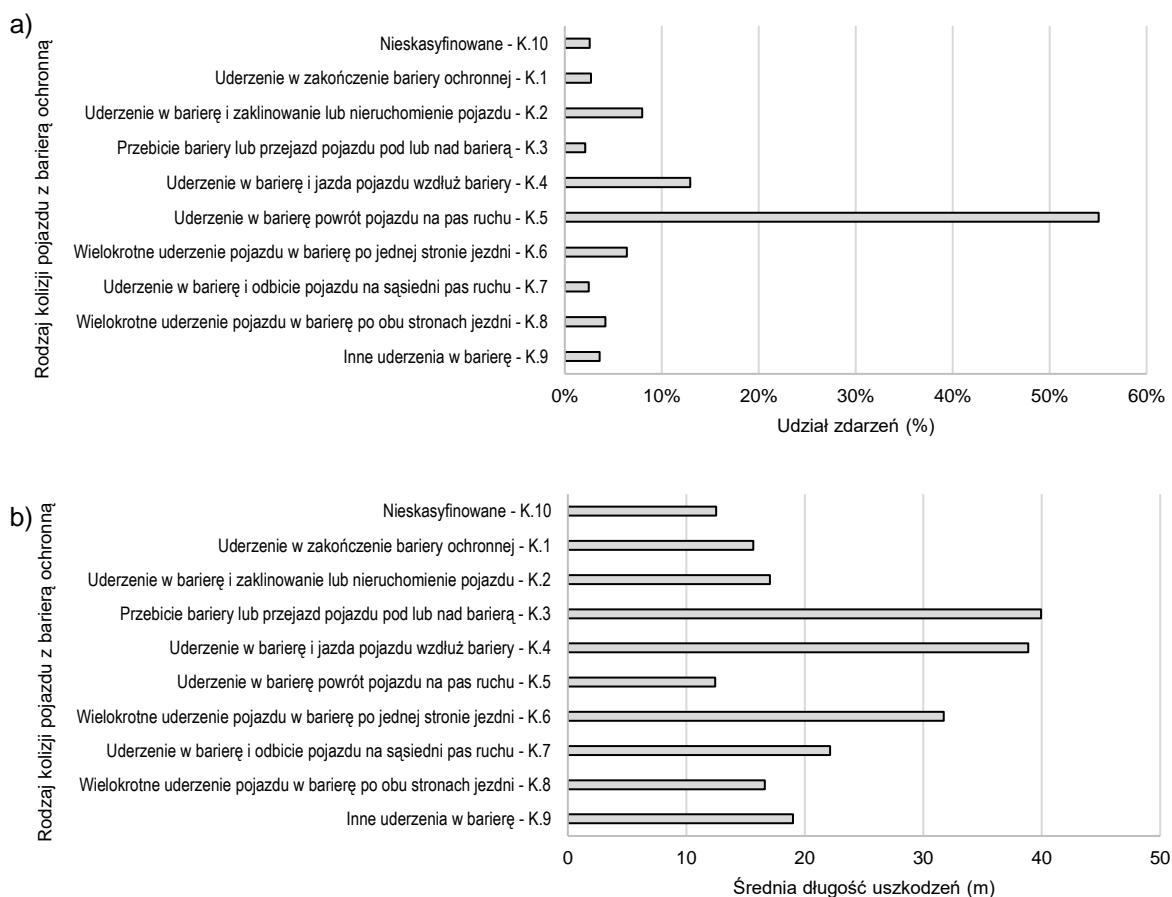
Źródło: GDDKiA

Na podstawie dokonanej klasyfikacji rodzaju kolizji pojazdu z barierą ochronną w tablicy 5.11 i na rysunku 5.12, przedstawiono zestawienie klasyfikacji dla uzyskanych w ramach prowadzonych badań zdarzeń z urządzeniami brd.

Tab. 5.11 Zestawienie klasyfikacji kolizji pojazdu z barierą ochronną dla badanych odcinków dróg

Bariera	Rodzaj kolizji pojazdu z barierą ochronną:		Liczba zdarzeń	Udział zdarzeń	Średnia długość uszkodzeń
			LZDB	UZDB	SLUB
			(szt./rok)	(%)	(m)
Skrajna, Dzielnica	K.1	Uderzenie w zakończenie bariery ochronnej	106	2,7%	15,7
	K.2	Uderzenie w barierę i zaklinowanie lub nieruchomienie pojazdu	313	8,0%	17,1
	K.3	Przebiecie bariery lub przejazd pojazdu pod lub nad barierą	82	2,1%	39,9
	K.4	Uderzenie w barierę i jazda pojazdu wzdłuż bariery	506	12,9%	38,9
	K.5	Uderzenie w barierę powrót pojazdu na pas ruchu	2 155	55,1%	12,4
	K.6	Wielokrotne uderzenie pojazdu w barierę po jednej stronie jezdni	251	6,4%	31,7
	K.7	Uderzenie w barierę i odbicie pojazdu na sąsiedni pas ruchu	97	2,5%	22,1
	K.8	Wielokrotne uderzenie pojazdu w barierę po obu stronach jezdni	164	4,2%	16,6
	K.9	Inne uderzenia w barierę	140	3,6%	19,0
	K.10	Uderzenia w pozostałe urządzenia brd	100	2,6%	12,5
Razem:			3 914	100,0%	3 914

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 5.12 Klasyfikacja kolizji pojazdu z barierą ochronną a) wg udziału poszczególnych grup zdarzeń b) wg średniej długości uszkodzeń poszczególnych grup zdarzeń

Źródło: Opracowanie własne

Z przeprowadzonej analizy uderzeń pojazdu w barierę ochronną wynika, że w ponad w ponad 53% przypadków dochodzi do tradycyjnego zderzenia pojazdu z barierą ochronną, odbicia i powrotu pojazdu na pas ruchu. Zdarzenia te generują najmniejsze straty związane z uszkodzonymi segmentami barier ochronnych. Dla omawianych zdarzeń K5 średnia długość uszkodzeń wynosi nieco ponad 12 metrów, czyli 3 prowadnice bariery stalowej. Najdłuższe uszkodzenia barier obserwuje się podczas uderzeń K3, K4 oraz K6. Podczas dość rzadko występujących (2,1% zdarzeń) przebić barier ochronnych odnotowano najdłuższą średnią długość uszkodzeń, tj. ok 39 metrów. Z prowadzonych obserwacji wynika, że zdarzenia te obejmowały najczęściej grupy kolizji pojazdów o dużej masie, lub prędkości i kącie uderzenia w barierę o normalnym lub podwyższonym poziomie powstrzymywania. Podobne długości uszkodzeń (tj. nieco ponad 38 metrów) występowały w przypadku, gdy pojazd nie odbił się od bariery w początkowej fazie zderzenia i pozostawał dłuższy czas z nią w kontakcie. Nieco krótsze długości uszkodzeń, tj. 33 metry, zaobserwowano w przypadku wielokrotnego uderzenia pojazdu w barierę zlokalizowanej po jednej stronie jezdni.

5.5.3. Analiza częstości i wielkości uszkodzeń barier ochronnych

Dla potrzeb uzyskania bardziej szczegółowych informacji o liczbie i wielkości uszkodzeń barier ochronnych występujących na drogach krajowych w Polsce, przeprowadzono szczegółową analizę zdarzeń drogowych z udziałem barier ochronnych. Analiza miała na celu wskazać możliwości wykorzystania zebranych danych z poszczególnych poligonów badawczych do określenia częstości i wielkości uszkodzeń drogowych barier ochronnych oraz pozwolić na sformułowanie wstępnych wniosków z analiz. W ramach zadania przeanalizowano:

- wskaźniki intensywności i wielkości uszkodzeń barier ochronnych,
- rozkłady częstości zdarzeń z barierami ochronnymi na odcinkach dróg,
- rozkłady wielkości uszkodzeń barier ochronnych zdarzeń na odcinkach dróg,
- rozkłady wielkości uszkodzeń barier ochronnych pojedynczych zdarzeń,
- czynniki wpływające na liczbę i wielkość uszkodzeń barier ochronnych.

W pierwszej kolejności przeprowadzono identyfikację uszkodzeń barier ochronnych na odcinkach bazowych położonych na poligonie badawczym. Analizy przeprowadzono dla wybranych pojedynczych zdarzeń (3 914 zdarzeń) zarejestrowanych na jezdni głównej oraz wybranych zdarzeń na odcinkach (3643 zdarzeń na 251 odcinkach), dla których zebrano kompletne informacje dot. uszkodzeń z okresu jednego roku. Do analiz zdarzeń na odcinkach dróg przyjęto ok. 2 200 km dróg krajowych, w skład których wchodzi autostrady (1038 km), drogi ekspresowe (790 km) oraz drogi główne i główne przyspieszone (394 km). Analizę wyników identyfikacji wykonano z wykorzystaniem oprogramowania statystycznego Statistica oraz Statgraphics. Na podstawie uzyskanych wyników z przeprowadzonej analizy, wskazano rekomendacje do dalszych badań.

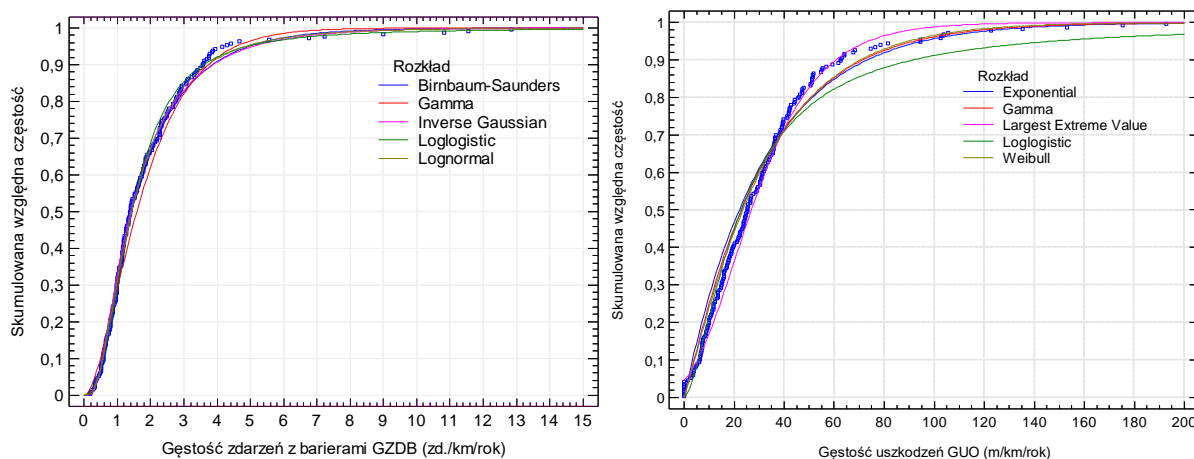
Analizując częstość zdarzeń z barierami (tablica 5.12), największą gęstość zdarzeń z barierami ochronnymi (GZDB), jak i gęstość uszkodzeń (GUO) odnotowano na drogach głównych przyspieszonych o przekroju 2x2 oraz autostradach o przekroju 2x3.

Tab. 5.12 Wskaźniki intensywności i wielkości uszkodzeń barier ochronnych na wybranych odcinkach bazowych

Typ drogi	Gęstość zdarzeń			Gęstość uszkodzeń		
	pas dzielący	skrajnia jezdni	przekrój drogi	pas dzielący	skrajnia jezdni	przekrój drogi
	GZDBd (zd./km)	GZDBs (zd./km)	GZDB (zd./km)	GUOd (m/km)	GUOs (m/km)	GUO (m/km)
A	0,95	0,94	1,89	21,2	21,8	42,4
A 2x3	1,62	1,10	2,62	33,4	18,9	49,3
A 2x2	0,91	0,93	1,84	20,5	22,0	41,9
S	0,78	0,77	1,52	14,7	14,0	27,2
S 2x3	1,49	0,82	2,31	17,1	9,1	25,8
S 2x2	0,76	0,77	1,49	14,6	14,2	27,3
GP	0,97	0,85	1,87	12,9	11,4	25,1
GP 2x2	2,58	1,90	4,68	33,6	23,2	58,5
GP 1+1	1,28	0,26	1,95	21,2	17,4	42,9
GP 1x2	0,00	0,33	0,33	0,0	4,7	4,6
G	0,00	0,09	0,09	0,0	1,9	1,9
G 1x2	0,00	0,09	0,09	0,0	1,9	1,9
Razem:	0,84	0,82	1,66	16,7	16,6	33,2

Źródło: Opracowanie własne

Badania wstępne rozpoczęto od analizy niezawodnościowej uszkodzeń barier ochronnych. W pierwszej kolejności podjęto próbę opisanego rozkładami statystycznymi częstości i wielkości szkód wyrządzonych najechaniem pojazdu na bariery ochronne. Dla każdej z miar, wybrano po pięć rozkładów o największym logarytmie wskaźnika wiarygodności oraz spełniających założenia dla testów (Kolmogorov-Smirnov, Chi-kwadrat) mieszczących się w 95% przedziale ufności. Na rysunkach 5.13, 5.14 przedstawiono przykłady dystrybuanty dla przyjętych rozkładów gęstości zdarzeń oraz gęstości uszkodzeń barier ochronnych na odcinku drogi. Najlepiej ocenionym rozkładem opisującym gęstość zdarzeń z barierami na odcinku drogi jest rozkład Log-normalny, w przypadku gęstości uszkodzeń, rozkład Weibull'a.

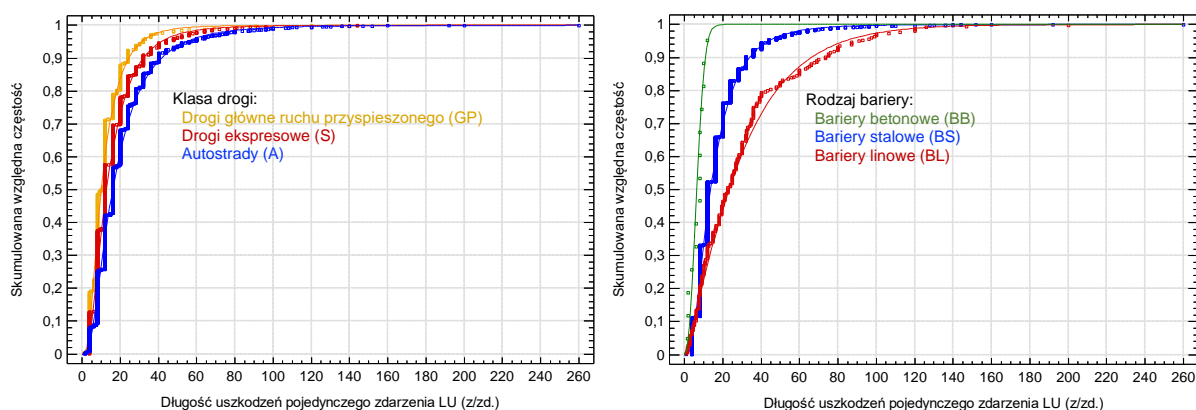


Rys. 5.13 Skumulowany rozkład a) gęstości zdarzeń z barierami GZDB (zd./km/rok), b) gęstości uszkodzeń barier ochronnych GUO (m/km/rok), na badanych odcinkach dróg dwujezdniowych

Źródło: Opracowanie własne

Z analizowanej próby wynika (rysunek 5.13a), że na 95 procentach odcinków dróg (95 percentyl), nie odnotowuje się więcej niż z 5 zdarzeń/km/rok, średnia gęstość zdarzeń z barierami wyniosła, około 2 zdarzeń na odcinku jednego kilometra. Natomiast długość uszkodzeń barier ochronnych na tych

odcinkach (rysunek 5.13b), nie przekroczyła w 95 procentach przypadków 100 metrów/km/rok (95 percentyl). Średnio w ciągu roku na kilometrowym odcinku wymieniano około 35 metrów barier. Dla porównania, w pojedynczych zdarzeniach wymieniano średnio nie więcej niż 19 metrów barier.



Rys. 5.14 Skumulowany rozkład długości uszkodzeń w pojedynczym zdarzeniu z barierą w zależności od a) klasy drogi (KLD), b) rodzaju bariery ochronnej (stalowej, linowej, betonowej) (m), na badanych odcinkach dróg dwujezdniowych

Źródło: Opracowanie własne

Zarejestrowane długości uszkodzeń (LU), na analizowanych odcinkach dwujezdniowych, różnią się przede wszystkim ze względu na klasę drogi oraz rodzaj bariery, w którą pojazd uderzył. Na rysunku 5.14a, widoczny jest wpływ klasy drogi na zmianę średniej długości uszkodzeń (LU). Najdłuższe uszkodzenia odnotowuje się na autostradach, następnie drogach ekspresowych i drogach głównych ruchu przyspieszonego. W przypadku pojedynczych zdarzeń, z poszczególnymi rodzajami barier ochronnych (rysunek 5.14b), średnie uszkodzenia wynoszą odpowiednio: 7 mb w przypadku barier betonowych, 18 mb w przypadku barier stalowych, 33 mb w przypadku barier linowych.

Długości uszkodzeń barier ochronnych w pojedynczym zdarzeniu, dla prezentowanych na rysunku 5.14a zależności od klasy drogi, opisano rozkładem Log-normalnym. W przypadku rodzajów barier wybrano opisy rozkładem Gamma (bariery linowe), Log-normalny (bariery stalowe), Weibull (bariery betonowe).

Analiza problemu najechania pojazdów na urządzenia brd wykazała, że wielkość i rodzaj uszkodzeń zależy od czterech podstawowych czynników: rodzaju bariery (containment level), rodzaju i masy pojazdu biorącego udział w zderzeniu, prędkości pojazdu w momencie uderzenia oraz kąta uderzenia pojazdu w urządzenie zabezpieczające. Częstość uderzeń i wymian barier zależy natomiast od kilku podstawowych czynników: odległości bariery od krawędzi jezdni, liczby pasów ruchu (szerokości jezdni) oraz materiału, z którego bariera została wykonana. Prawdopodobieństwo uderzenia w barierę dzielącą zwiększa się wraz z zmniejszeniem odległości urządzenia od krawędzi jezdni. Postawione hipotezy potwierdza również przegląd literatury zagranicznej [157],[125],[72].

Przedstawione w niniejszym rozdziale wyniki przeprowadzonych badań i analiz, stanowiły realizację części pierwszego celu praktycznego CP-1.

6. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ POLIGONOWYCH I SYMULACYJNYCH

6.1. Wprowadzenie

Dla potrzeb uzyskania szczegółowych informacji na temat czynników wpływających na wielkość uszkodzeń barier ochronnych powstałych w wyniku uderzenia pojazdu w barierę ochronną, przeprowadzono szczegółowe analizy danych z badań poligonowych oraz numerycznych (symulacyjnych). Analiza miała na celu określenie wpływu energii kinetycznej uderzenia pojazdu w barierę, rodzaju bariery oraz parametrów funkcjonalnych bariery na wielkość ich uszkodzeń. Badania obejmowały zbiór analiz umożliwiających określenie wpływu uderzeń pojazdów w barierę ochronną na:

- parametry bariery istotne do budowy modeli służących do szacowania wielkości uszkodzeń: rodzaj zdarzenia, ugięcie dynamiczne bariery, długość kontaktu pojazdu z barierą,
- wielkość uszkodzeń: długość odcinka uszkodzonej bariery, liczba uszkodzonych segmentów.

Badania mechanistyczne przeprowadzono na zbiorach danych uzyskanych z testów zderzeniowych oraz badań numerycznych przeprowadzonych dla potrzeb projektów RID.

Zbiór badań (testów) zderzeniowych. Do analiz wykorzystano zbiór 25 badań poligonowych (testów zderzeniowych) przeprowadzonych w ramach: projektów RID 3A, RID 3B, Argentum oraz udostępnionych przez producentów barier. Uzyskane testy dotyczyły:

- barier drogowych i mostowych
- pojazdów o masie: 0,9 t, 1,5 t i 13 t,
- prędkości uderzenia pojazdów w barierę: 70 km/h, 100 km/h, 110 km/h,
- kątów uderzenia pojazdów w barierę: 7 stopni, 20 stopni,
- poziomów powstrzymywania barier: N2, H1, H2.

Zbiór badań (symulacji) numerycznych. Do analiz wykorzystano zbiór 332 badań poligonowych i symulacyjnych, w tym 25 testów poligonowych (testów zderzeniowych) i 307 testów numerycznych (wykonanych za pomocą narzędzia LS Dyna), przeprowadzonych w ramach: projektów RID 3B, RID 3A, ARGENTUM. Przeprowadzone badania obejmowały testy zderzeniowe różniące się:

- rodzajem bariery ochronnej: stalowych, linowych, betonowych,
- rodzajem i masą pojazdów użytych do badań: osobowe (0,9-1,5t), autobus (13t), ciężarowe (10t), ciężarowe z przyczepą (38t),
- prędkością pojazdów uderzających w barierę (60-140 km/h),
- kątem uderzenia w zakresie od 7 do 90 stopni.

Dane z pozyskanych testów zderzeniowych pozwoliły na przeprowadzenie różnego rodzaju analiz wpływu wybranych czynników: energii pojazdu uderzającego w barierę i sztywności barier, prędkości, masy i kąta uderzenia pojazdu w barierę; na wielkość uszkodzeń barier drogowych. Natomiast zbiór wyników badań symulacyjnych pozwolił na poszerzenie zakresu analizowanych czynników oraz zidentyfikowanie czynników najlepiej reprezentujących analizowane składowe, które będzie można użyć do metod szacowania wielkości uszkodzeń barier.

6.2. Analiza wyników badań poligonowych

6.2.1. Oszacowanie wielkości energii kinetycznej pojazdu

Energia kinetyczna pojazdu (E_k) jest głównym czynnikiem wpływającym na funkcjonowanie drogowych barier ochronnych i skutki uderzenia pojazdu w barierę. W trakcie prowadzenia badań poligonowych nie wykonywano bezpośredniego pomiaru energii kinetycznej pojazdów, natomiast szacowano jej wielkość na podstawie pomierzonych w wyniku badań parametrów ruchu pojazdów w tym masy pojazdu (M_P) jego prędkości (V_P). Ze względu na to, że wypadające z jezdni pojazdy uderzają w barierę pod różnymi kątami, istotne znaczenie mają składowe: energia kinetyczna poprzeczna (E_{KL}) i energia kinetyczna podłużna (E_{KP}). Korzystając z wyników badań poligonowych i symulacyjnych, szacowano wielkość energii kinetycznej pojazdu uderzającego w barierę ochronną za pomocą wzorów 6.1-6.3.

$$E_k = \frac{M_P \cdot (V_P)^2}{2000} \quad (6.1)$$

$$E_{KL} = \frac{M_P \cdot (V_P \cdot \sin(K_U))^2}{2000} \quad (6.2)$$

$$E_{KP} = \frac{M_P \cdot (V_P \cdot \cos(K_U))^2}{2000} \quad (6.3)$$

gdzie:

E_k – energia kinetyczna pojazdu (kJ)

E_{KL} – energia kinetyczna poprzeczna (boczna) pojazdu (kJ)

E_{KP} – energia kinetyczna podłużna pojazdu (kJ)

M_P – masa pojazdu (kg)

V_P – prędkość pojazdu (m/s),

K_U – kąt uderzenia pojazdu w barierę (°).

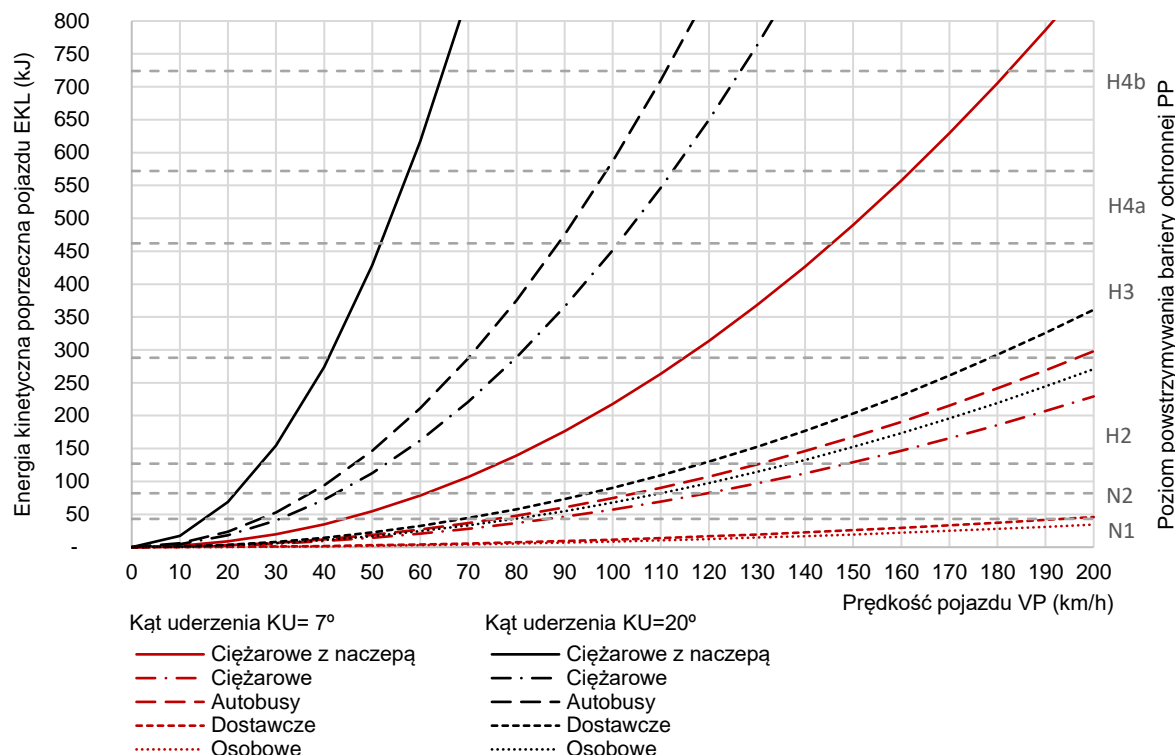
Z przeprowadzonych analiz wynika, że energia kinetyczna pojazdu zależy od jego masy i rośnie wraz z kwadratem prędkości i wynosi (przy prędkości 90 km/h) w przypadku samochodów osobowych 750 kJ, do 14000 KJ w przypadku samochodów ciężarowych z przyczepą. Ponadto podział energii kinetycznej całkowitej (E_K) na energię poprzeczną (E_{KL}) i podłużną (E_{KP}) zależy od kąta uderzenia pojazdu w barierę (K_U) i w przypadku normowego kąta uderzenia w barierę $K_U = 20^\circ$, stanowi odpowiednio (rysunek 2.18):

- energia kinetyczna poprzeczna (E_{KL}) - 12 % całkowitej energii kinetycznej pojazdu,
- energia kinetyczna podłużna (E_{KP}) - 88 % całkowitej energii kinetycznej pojazdu.

Na rysunku 6.1 przedstawiono teoretyczny wykres zależności energii kinetycznej poprzecznej E_{KL} pojazdu uderzającego w barierę drogową w zależności od masy pojazdu M_P , jego prędkości V_P i kąta uderzenia K_U . Na rysunku zaznaczono również poziomy energii kinetycznej normowej, która odpowiada poziomom powstrzymywania (PP) barier ochronnych.

Wyniki analiz wskazują, że energia kinetyczna poprzeczna (E_{KL}) pojazdu zmienia się w zależności od kąta uderzenia K_U , masy pojazdu (M_P) oraz prędkości uderzającego w barierę pojazdu (V_P) i może wynosić: w przypadku samochodów osobowych $E_{KL} = 82$ kJ (przy masie pojazdu $M_P = 1\,500$ kg, kącie

uderzenia $KU=20^\circ$ i prędkości $VP=110$ km/h), natomiast w przypadku samochodów ciężarowych $EKL=725$ kJ (przy masie pojazdu $MP=38\ 000$ kg, kącie uderzenia $KU=20^\circ$ i prędkości $VP=65$ km/h).



Rys. 6.1 Wykres zależności energii kinetycznej poprzecznej wybranego rodzaju pojazdu od prędkości oraz kąta uderzenia w barierę ochronną: kąt uderzenia 7° (kolor czerwony) oraz 20° (kolor czarny)

Źródło: Opracowanie własne

Przekształcając wzór 6.2, wyznaczono graniczne prędkości pojazdów VP_{gr} (wzór 6.4) dla energii kinetycznej poprzecznej pojazdu uderzającego w barierę w warunkach normowych. Prędkość graniczna pojazdu (VP_{gr}) określa maksymalną prędkość, z jaką określony pojazd przy zadanym kącie najazdu (KU), może osiągnąć, aby nie przekroczył energii kinetycznej poprzecznej normatywnej EKL_n (tj. energii określonej przez warunki stawiane w testach zderzeniowych dla barier ochronnych o określonych poziomach powstrzymywania PP). W tabelicy 6.1 zestawiono prędkości graniczne, powyżej których dla wybranych grup pojazdów i kątów uderzeń, energia kinetyczna poprzeczna pojazdu (EKL) jest większa od normatywnej (EKL_n), dla bariery o założonym poziomie powstrzymywania (PP).

$$VP_{gr} = 3,6 \cdot \sqrt{\frac{2000 \cdot E_{KL}}{M_p \cdot \sin(K_U)}} \quad (6.4)$$

Z przedstawionych analiz wynika, że na polskich drogach występuje duża grupa pojazdów, których energia poprzeczna (EKL), w przypadku uderzenia pojazdu w barierę drogową, może być większa niż energia poprzeczna normatywna (EKL_n) uderzanej bariery ochronnej, stanowiąca podstawę do projektowania barier drogowych.

Tab. 6.1 Zestawienie prędkości granicznej VP_{gr} pojazdów dla energii normatywnej EKL_n

Rodzaj pojazdu	Masa pojazdu normowa MP (kg)	Energia kinetyczna poprzeczna normatywna EKL_n (kJ)	Poziom powstrzy-mywania PP	Prędkość graniczna pojazdu VP_{gr} (km/h)					
				Kąt uderzenia pojazdu w barierę $KU(^{\circ})$					
				5	10	15	20	25	30
Osobowy lekki	900	41	N1	394	198	133	100	81	69
Osobowy ciężki	1 500	82	N2	432	217	145	110	89	75
Ciężarowy	10 000	127	H1	208	104	70	53	43	36
Autobus	13 000	287	H2	275	138	93	70	57	48
Ciężarowy	16 000	462	H3	314	158	106	80	65	55
Ciężarowy	30 000	572	H4a	255	128	86	65	53	44
Ciężarowy z naczepą	38 000	725	H4b	255	128	86	65	53	44

70 Prędkości graniczne pojazdu dla normatywnej energii kinetycznej normowego pojazdu uderzającego w barierę ochronną

H1 Najczęściej stosowane poziomy powstrzymania barier ochronnych w Polsce [183]

Źródło: Opracowanie własne

6.2.2. Analiza parametrów funkcjonalnych barier

Podstawowe parametry funkcjonalne barier ochronnych: szerokość pracującą bariery (WM) oraz ugięcie dynamiczne bariery (DM), uzyskano podczas bezpośrednich testów w trakcie prowadzenia badań terenowych. Szerokość pracująca bariery jest parametrem technicznym, charakteryzującym sztywność i podatność bariery drogowej, wykorzystywanym do projektowania bariery. Natomiast ugięcie dynamiczne bariery charakteryzuje dynamiczną pracę bariery. Parametry charakteryzujące konstrukcję barier, jak sztywność i podatność oszacowano, wykorzystując wyniki badań terenowych. Sztywność bariery K szacowano za pomocą wzoru (6.5), a podatność S według wzoru (6.6).

$$K = \frac{FL}{DM} = \frac{2 \cdot EKL}{DM^2} \quad (6.5)$$

$$S = \frac{1}{K} = \frac{DM}{F} = \frac{DM^2}{2 \cdot EKL} \quad (6.6)$$

gdzie:

EKL – energia kinetyczna poprzeczna (boczna) pojazdu (kJ)

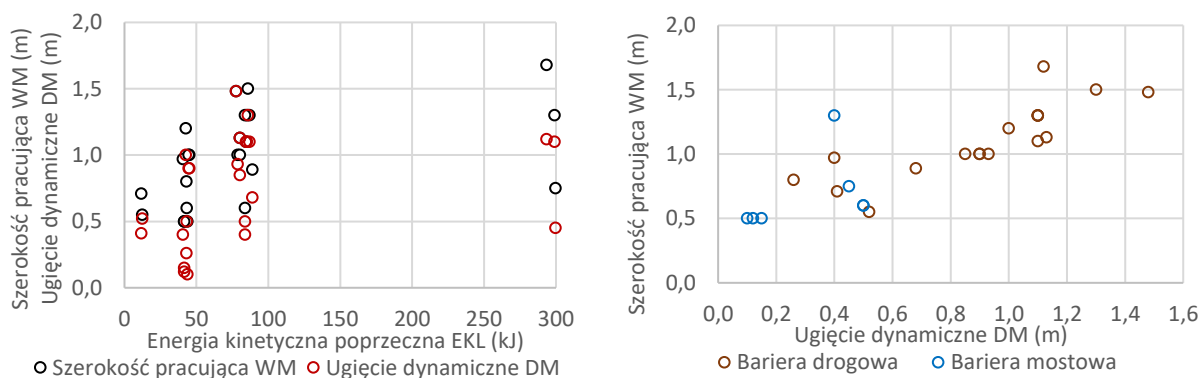
K – sztywność bariery (N/m),

S – podatność bariery (m/N),

FL – siła poprzeczna działająca na barierę, przyczyniająca się do jej przesunięcia (N),

DM – ugięcie dynamiczne bariery ochronnej (m).

Na rysunku 6.2a przedstawiono wyniki badań poligonowych prezentujących zależności szerokości pracującej WM i ugięcia dynamicznego DM badanej bariery ochronnej od energii kinetycznej pojazdu (EKL), natomiast na rysunku 6.2b przedstawiono zależność między tymi parametrami. Ponadto na rysunku 6.3 przedstawiono zależność między parametrami opisującymi sztywność (K) i podatność (S) bariery stalowej, uzyskaną na podstawie dostępnych danych z testów zderzeniowych.

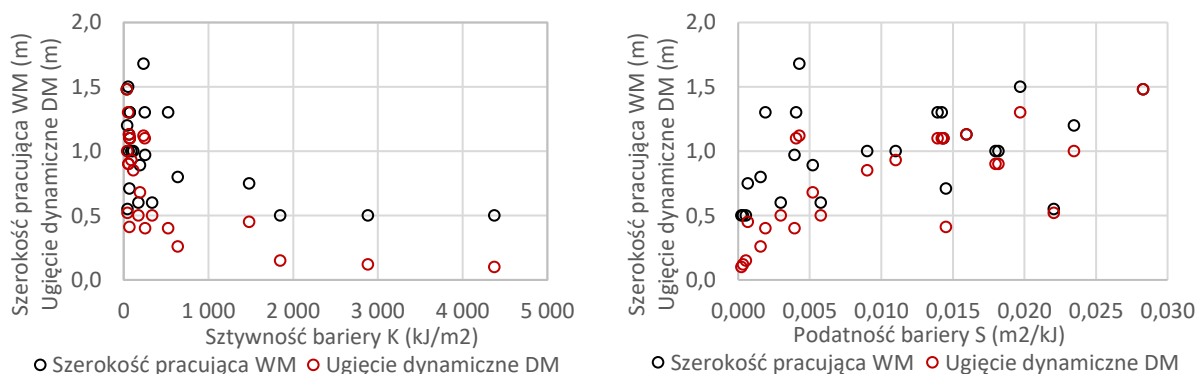


Rys. 6.2 Rozkłady wyników badań zależności: a) szerokości pracującej i ugięcia dynamicznego bariery od energii kinetycznej poprzecznej pojazdu, b) szerokości pracującej bariery od ugięcia dynamicznego.

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie analizy uzyskanych wyników (rysunek 6.2, 6.3) można stwierdzić, że:

- szerokość pracująca (WM) i ugięcie dynamiczne (DM) bariery drogowej oraz mostowej wzrasta wraz ze wzrostem energii kinetycznej poprzecznej (EKL),
- istnieje ścisła zależność między szerokością pracującą bariery (WM) i ugięciem dynamicznym (DM),
- szerokość pracująca bariery (WM) i ugięcie dynamiczne (DM) zmniejszają się wraz ze wzrostem sztywności bariery (K), a wzrastają wraz ze wzrostem podatności bariery (S).



Rys. 6.3 Rozkłady wyników badań zależności: a) szerokości pracującej i ugięcia dynamicznego bariery od sztywności K bariery, b) szerokości pracującej i ugięcia dynamicznego bariery od podatności S bariery.

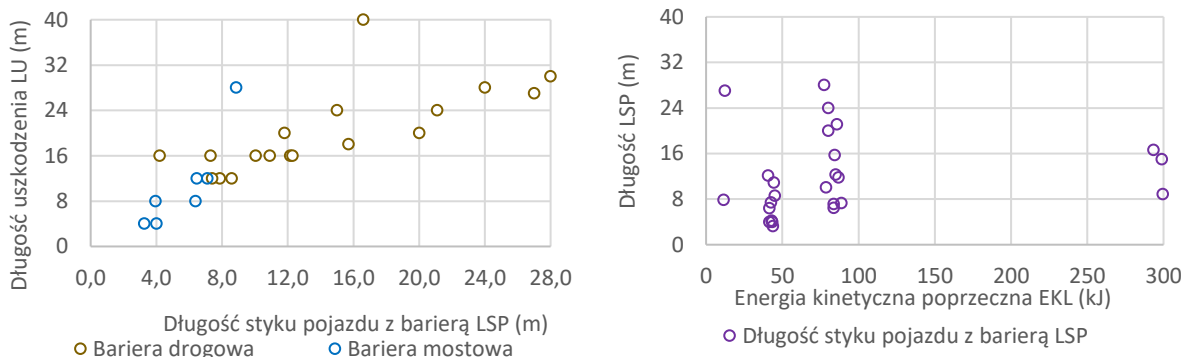
Źródło: Opracowanie własne

W przypadku zależności między ugięciem dynamicznym DM i szerokością pracującą bariery WM, przy małej sztywności bariery K, różnica między obu parametrami jest niewielka, natomiast wraz ze wzrostem sztywności bariery K, zmniejszają się wartości liczbowe obu analizowanych parametrów i zwiększa się różnica między nimi (rysunek 6.3a).

6.2.3. Analiza długości uszkodzeń barier

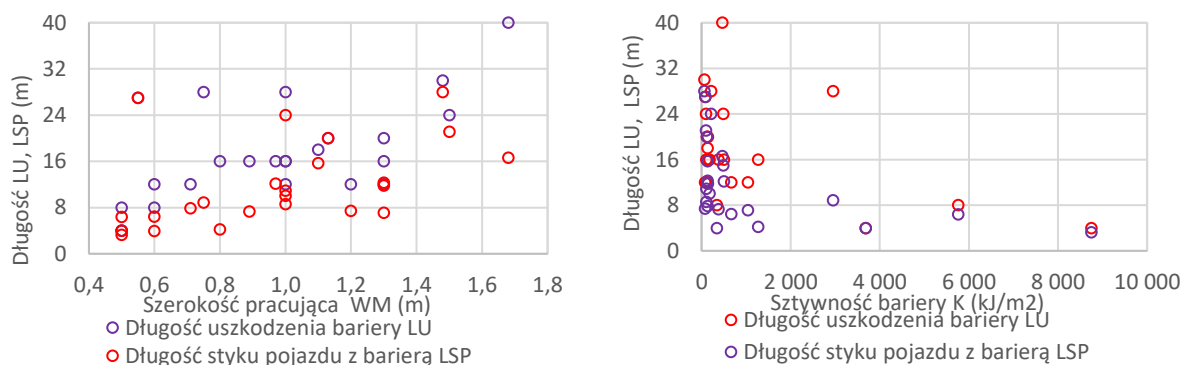
Długość uszkodzonej bariery (LU) i liczba uszkodzonych słupków (LUS) to podstawowe parametry przyjęte od oceny uszkodzeń bariery. Natomiast długość styku pojazdu z barierą (LSP) jest parametrem pomocniczym służącym do szacowania wielkości uszkodzeń bariery na podstawie badań poligonowych i symulacyjnych.

Na podstawie dostępnych danych z testów zderzeniowych (projekty RID3a i 3B), na rysunku 6.4a przedstawiono zależność między parametrami uszkodzeń bariery tj. długością styku pojazdu z barierą (LSP) i długością uszkodzenia bariery (LU), natomiast na rysunku 6.4b, zależność energii kinetycznej poprzecznej pojazdu (EKL) na parametry uszkodzeń bariery (LU, LSP).



Rys. 6.4 Rozkłady wyników badań zależności: a) długości styku pojazdu z barierą LSP i długości uszkodzenia bariery LU od energii kinetycznej poprzecznej pojazdu EKL, b) długości styku pojazdu z barierą LSP od energii kinetycznej poprzecznej EKL

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 6.5 Rozkłady wyników badań zależności: a) długości styku pojazdu z barierą LSP i długości uszkodzenia bariery LU od szerokości pracującej DM b) długości uszkodzenia bariery LU od długości styku pojazdu z barierą LSP od sztywności bariery K

Źródło: Opracowanie własne

Otrzymane wyniki wskazują, że istnieje silna zależność między długością styku pojazdu z barierą (LSP) i długością uszkodzeń bariery (LU) (rysunek 6.4a). Wielkość uszkodzeń (LU, LSP) zmienia się wraz ze zmianą energii kinetycznej poprzecznej uderzającego pojazdu (EKL) (rysunek 6.4b), rośnie wraz ze wzrostem podatności (S) i szerokości pracującej bariery (WM), zmniejsza się natomiast wraz ze wzrostem sztywności bariery (K) (rysunek 6.4). Podobnie dzieje się z liczbą uszkodzonych słupków barier stalowych i linowych (LUS) oraz długością deformacji segmentów barier betonowych (LD), która rośnie wraz ze wzrostem energii kinetycznej poprzecznej (EKL) i podatnością bariery, a zmniejsza się wraz ze wzrostem sztywności bariery.

Na rysunku 6.5a przedstawiono zależność między szerokością pracującą bariery (WM), a długością styku pojazdu z barierą (LSP) i długością uszkodzenia bariery (LU), natomiast na rysunku 6.5b przedstawiono rozkłady wyników badań zależności liczby długości uszkodzenia bariery (LU) i długości styku pojazdu z barierą (LSP) od sztywności bariery (K).

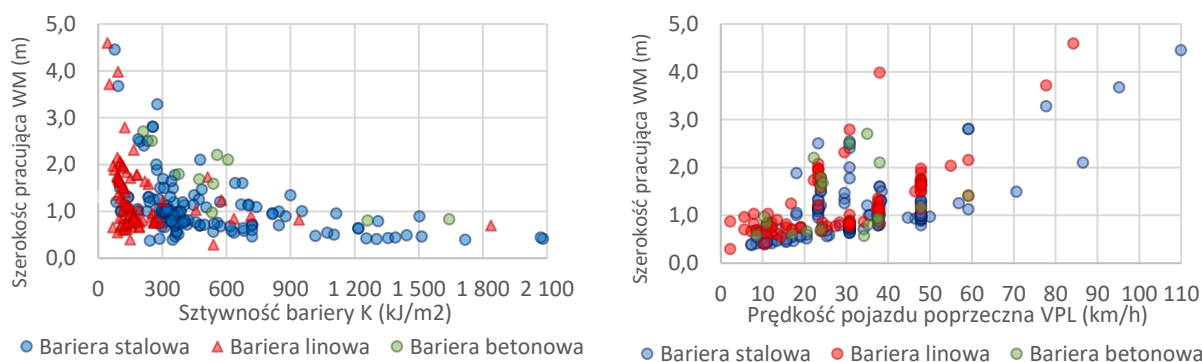
Dane z pozyskanych testów zderzeniowych pozwoliły na wstępną analizę czynników wpływających na wielkość uszkodzeń barier w wyniku uderzenia w nie pojazdu, tj.: energii pojazdu uderzającego w barierę i sztywności barier, prędkości, masy i kąta uderzenia pojazdu w barierę; na stopień powstrzymywania i odporność bariery na uderzenia pojazdu (stanowiło to realizację 1 celu naukowego (CN-1). Z analizy wyników badań poligonowych wynika, że wielkość uszkodzeń drogowych barier ochronnych zależy głównie od dwóch składowych:

- 1) energii kinetycznej pojazdu uderzającego w drogową barierę ochronną, mierzoną za pomocą: energii kinetycznej (poprzeczna EKL i podłużna EKP) lub prędkości pojazdu uderzającego w barierę (VP),
- 2) cech konstrukcyjnych drogowej bariery ochronnej umożliwiających stawianie oporu energii kinetycznej wytworzonej przez pojazd uderzający w barierę mierzoną za pomocą: sztywności K, podatności (S), szerokości pracującej (WM) i ugięcia dynamicznego bariery (DM), które są silnie powiązane z sobą.

6.3. Analiza wyników badań symulacyjnych pojedynczych uderzeń pojazdów w barierę

6.3.1. Analiza parametrów funkcjonalnych bariery

Przeprowadzone badania poligonowe pozwoliły na wstępne analizy czynników wpływających na wielkość uszkodzeń barier w wyniku uderzenia pojazdu oraz na wielkość zagrożeń dla uczestników ruchu w pojazdach. W celu zidentyfikowania czynników najlepiej reprezentujących analizowane składowe, zbiór testów zderzeniowych poszerzono o zbiór testów symulacyjnych. Wyniki tych testów pozwoliły na poszerzenie zakresu czynników wpływających na zmianę dwóch istotnych parametrów technicznych barier: szerokości pracującej bariery (WM) i ugięcia dynamicznego bariery (DM), charakteryzujących dynamiczną pracę bariery.



Rys. 6.6 Rozkłady wyników badań symulacyjnych zależności szerokości pracującej WM od: a) sztywności bariery K, b) prędkości poprzecznej pojazdu uderzającego w barierę drogową VPL.

Źródło: Opracowanie własne

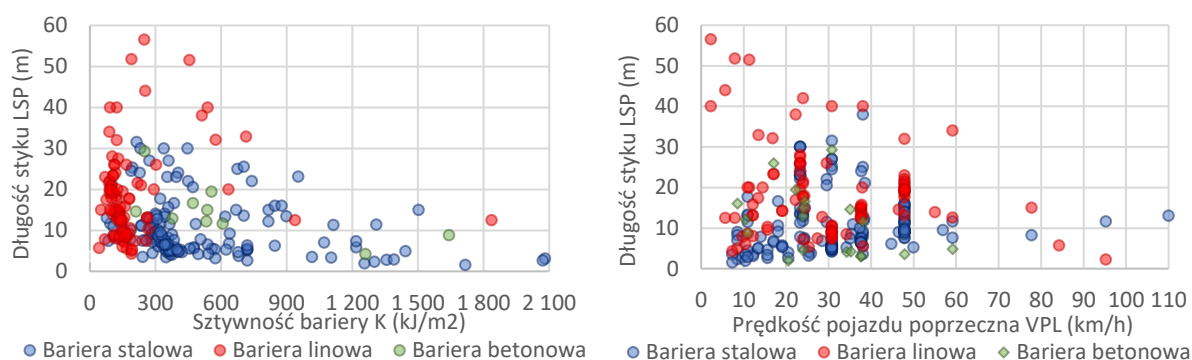
Na rysunku 6.6a przedstawiono wyniki badań symulacyjnych wpływu sztywności bariery (K) na szerokość pracującą bariery drogowej. Natomiast na rysunku 6.6b przedstawiono wyniki badań symulacyjnych wpływu prędkości poprzecznej (VPL) pojazdu uderzającego w barierę na szerokość pracującą bariery (WM).

Otrzymane wyniki potwierdzają wcześniejsze wnioski, że istnieje silna zależność między szerokością pracującą (WM) bariery, a sztywnością bariery (K) i energią uderzenia mierzoną prędkością poprzeczną uderzającego pojazdu (VPL). Z przedstawionych na rysunku 6.6 wykresów wynika, że szerokość

pracująca bariery (WM) zwiększa się wraz ze wzrostem energii kinetycznej poprzecznej pojazdu (EKL) i jej najbardziej istotnej składowej, prędkości poprzecznej pojazdu (VPL), a zmniejsza się wraz ze wzrostem sztywności bariery (K) lub wzrostem podatności barier ($S=1/K$).

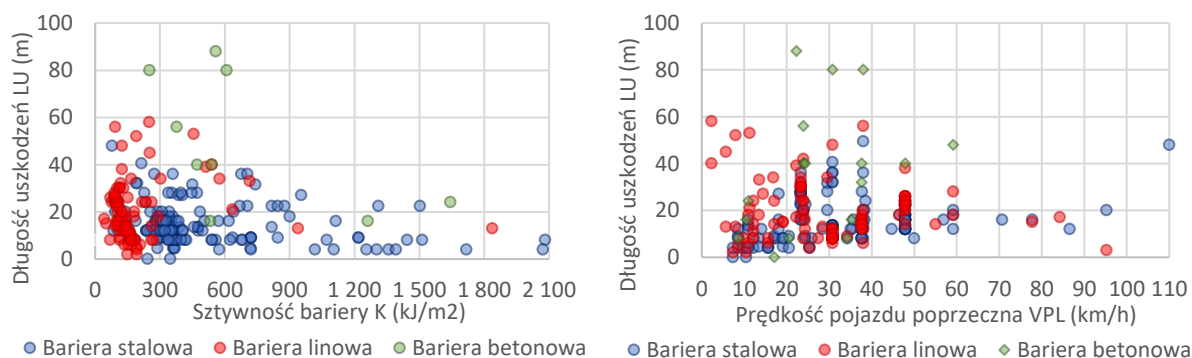
6.3.2. Analiza długości uszkodzeń

Wyniki testów symulacyjnych pozwoliły na poszerzenie zakresu czynników wpływających na zmianę dwóch istotnych parametrów uszkodzeń drogowych barier ochronnych: długości uszkodzeń LU oraz liczby uszkodzonych słupków LUS (w przypadku barier stalowych i linowych). Na rysunku 6.7 i 6.8 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych wpływu sztywności bariery (K) i prędkości poprzecznej (VPL) pojazdu uderzającego w barierę na: długość styku pojazdu z barierą (LSP), długość uszkodzeń (LU) oraz liczbę uszkodzonych słupków (LUS).



Rys. 6.7 Rozkłady wyników badań symulacyjnych zależności długości styku pojazdu z barierą LSP od: a) sztywności bariery K, b) prędkości poprzecznej pojazdu uderzającego w barierę drogową VPL.

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 6.8 Rozkłady wyników badań symulacyjnych zależności długości uszkodzeń bariery LU od: a) sztywności bariery K, b) prędkości poprzecznej pojazdu uderzającego w barierę drogową VPL.

Źródło: Opracowanie własne

Otrzymane wyniki potwierdzają wcześniejsze wnioski na podstawie badań poligonowych, że istnieje silna zależność między długością styku pojazdu z barierą (LSP) – rysunek 6.7a, długością uszkodzeń bariery (LU) – rysunek 6.8a oraz liczbą uszkodzonych słupków (LUS) od sztywności bariery (K) i prędkości pojazdu uderzającego w barierę (VPL).

Przedstawione w niniejszym rozdziale wyniki przeprowadzonych badań i analiz, stanowiły realizację części pierwszego celu praktycznego CP-1.

7. MODELOWANIE PRAWDOPODOBIENSTWA I KONSEKWENCJI UDERZENIA POJAZDU W BARIERĘ

7.1. Wprowadzenie

Nowe technologie konstruowania drogowych barier ochronnych powodują, że bariery te są coraz lżejsze i bardziej podatne, co wpływa na zwiększenie szerokości pracującej i zwiększenie wielkości ich uszkodzeń. Projektowanie nowych konstrukcji ochronnych barier drogowych i uzyskanie certyfikatu dopuszczającego wyrób do bezpiecznego użytkowania, wymaga przeprowadzenia wielu kosztownych testów zderzeniowych. W celu ich ograniczenia, wymagane jest rozpoznanie czynników wpływających na cechy konstrukcyjne bariery oraz opracowanie modeli matematycznych umożliwiających szacowanie wpływu wybranych czynników na parametry konstrukcyjne i funkcjonalne drogowych barier ochronnych. Zaprezentowane w syntezie literatury (pkt 2.5) modele zachowań pojazdów wypadających z drogi i funkcjonowania barier ochronnych, umożliwiają najczęściej szacowanie częstości wypadnięć pojazdów z drogi lub częstości zderzeń z pojazdami z wybranymi elementami infrastruktury drogowej [111],[59],[77],[76],[34]. Natomiast brak jest lub występuje ograniczona liczba modeli odnoszących się do częstości i skutków pojedynczych zdarzeń z barierą ochronną. To skłoniło do poszukiwania i budowy modeli służących określeniu prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia drogowego polegającego na wypadnięciu pojazdu z jezdni i uderzenia w barierę ochronną oraz określenia konsekwencji takiego zdarzenia. W niniejszym rozdziale podjęto próbę opisu podstawowych zależności (prawdopodobieństwa) powstania zdarzeń oraz wielkości uszkodzeń.

Przedstawione w rozdziale 5 wyniki badań terenowych potwierdzają, że wypadnięcie pojazdu z drogi jest najczęściej występującym zdarzeniem niebezpiecznym występującym na drogach dwujezdniowych. Z przeprowadzonych analiz wynika również, że na drogach ekspresowych i autostradach w Polsce większość wypadnięć pojazdów z drogi kończy się uderzeniem w urządzenia bezpieczeństwa ruchu drogowego - w tym przede wszystkim w drogowe bariery ochronne, będących przedmiotem prowadzonych badań.

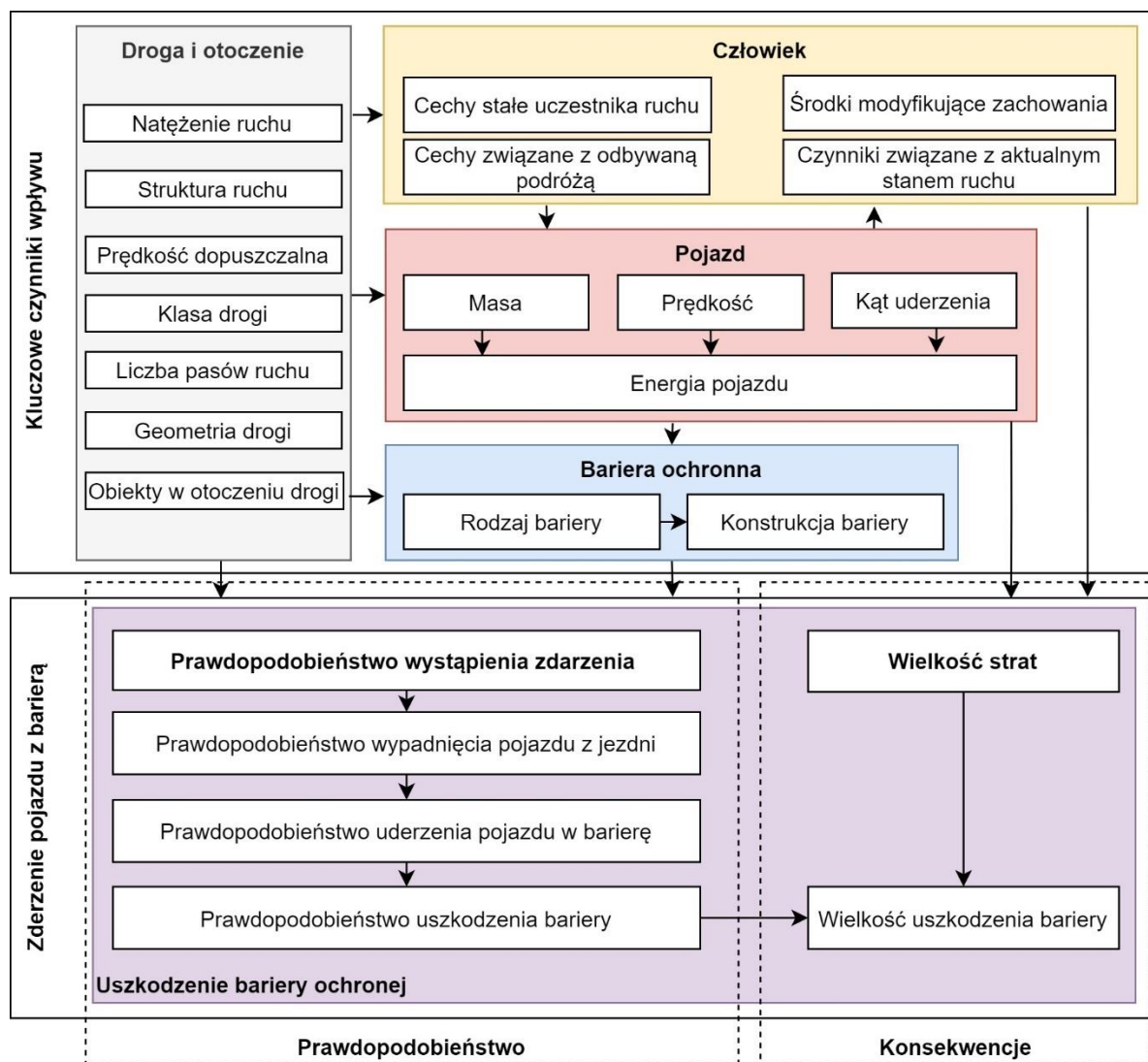
Głównym celem przeprowadzonych i opisanych w niniejszym rozdziale badań było opracowanie modeli (opisowych) prawdopodobieństwa i konsekwencji zdarzeń powstałych w wyniku pojedynczego uderzenia pojazdu w barierę drogową. Biorąc pod uwagę przeanalizowane zdarzenia niebezpieczne na wybranych dwujezdniowych odcinkach dróg krajowych, postawiono szczegółowe pytania badawcze:

PB-7.1 Jakie jest prawdopodobieństwo wypadnięcia pojazdu z jezdni?

PB-7.2 Jakie jest prawdopodobieństwo uderzenia pojazdu w barierę ochronną?

PB-7.3 Jakie jest prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia bariery ochronnej w wyniku uderzenia w nią pojazdu?

W przeglądzie literatury nie udało się znaleźć jednoznacznych odpowiedzi na zadane pytania. Podjęto więc w pracy próbę odpowiedzi na postawione pytania badawcze, wykorzystując przy tym uzyskane dane empiryczne z odcinków dróg dwujezdniowych w Polsce. Przystępując do próby uzyskania odpowiedzi na postawione pytania badawcze wypracowano w pierwszej kolejności schemat analizy czynników wpływających na poszczególne prawdopodobieństwa i konsekwencje uderzenia pojazdu w barierę ochronną (rysunek 7.1).



Rys. 7.1 Schemat czynników wpływających na prawdopodobieństwo i konsekwencje pojedynczego zdarzenia drogowego spowodowanego uderzeniem pojazdu barierą ochronną

Źródło: Opracowanie własne

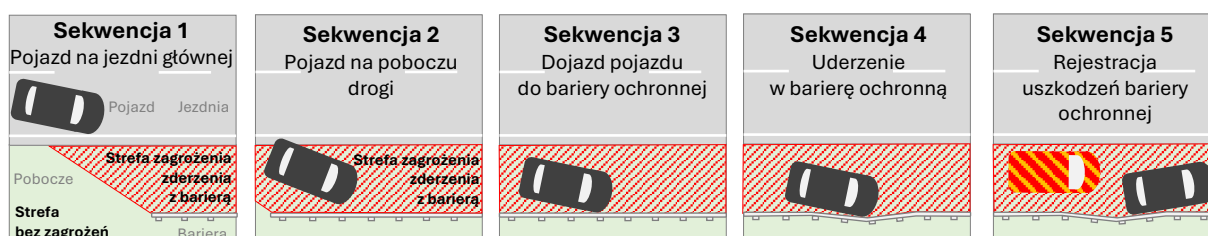
Jak pokazano na rysunku 7.1 prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia z barierą ochronną wywołującego określoną wielkość strat (w postaci uszkodzeń bariery, do których zawężono analizy), zależy od czterech podstawowych czynników:

- 1) człowieka tj. jego stanu psychofizycznego, doświadczenia oraz reakcji na sytuacje drogowe,
- 2) pojazdu uderzającego w barierę ochronną, tj. jego energii kinetycznej uderzenia, która jest wypadkową masy prędkości i kąta najazdu pojazdu na barierę,
- 3) drogowej bariery ochronnej, tj. jej rodzaju (stalowa, linowa, betonowa) oraz jej konstrukcji (sztywna, podatna),
- 4) drogi, po której poruszał się pojazd, tj. jej klasy, przekroju, geometrii oraz warunków ruchu na niej panujących.

7.2. Model teoretyczny opisujący proces wypadnięcia pojazdu z jezdni wraz z ich skutkami

Warunki, przy których dochodzi do zdarzeń z barierami ochronnymi mogą być różne pod względem typu i masy pojazdu, prędkości, kąta uderzenia w barierę, a także prawdopodobieństwa wystąpienia. W celu oceny warunków uderzenia pojazdu w barierę należy zdefiniować okoliczności analizowanych zdarzeń [183] tj. lokalizację i typ drogi, obiekty w jego obszarze oraz charakterystykę poruszających się po odcinku pojazdów (typy, masy) oraz prędkość jazdy.

W przypadku określonego rodzaju obiektu przydrożnego, jakim są drogowe bariery ochronne, następstwa, przez które przechodzi pojazd zanim dotrze do bariery, uderzy w nią i zostanie zarejestrowany przez służby utrzymaniowe i/lub policję, mogą być modelowane poprzez kilka sekwencyjnych procesów stochastycznych. Na rysunku 7.3 przedstawiono przyjęty schemat procesu niezamierzonego wypadnięcia pojazdu z jezdni z podziałem na sekwencje oraz kluczowe czynniki, które wpływają na wynik każdej sekwencji procesu. Przyjęto pięć charakterystycznych sekwencji przebywania pojazdu w trajektorii procesu wypadania z jezdni (rysunek 7.2).



Rys. 7.2 Przyjęte sekwencje procesu wypadnięcia pojazdu z jezdni i zderzenia z barierą ochronną

Źródło: Opracowanie własne

Podobnie, jak w badaniach [110] przyjęto, że prawdopodobieństwo przebywania pojazdu w każdej z sekwencji może zostać opisane (zamodelowane) za pomocą prawdopodobieństwa warunkowego.

Sekwencja 1 określa prawdopodobieństwo, że dany pojazd wypadnie z jezdni. Jeśli pojazd opuści jezdnię, to zdarzenie jest charakteryzowane poprzez jego prędkość oraz kąt wyjazdu poza krawędź jezdni, które są wykorzystywane jako dane wejściowe do kolejnej sekwencji.

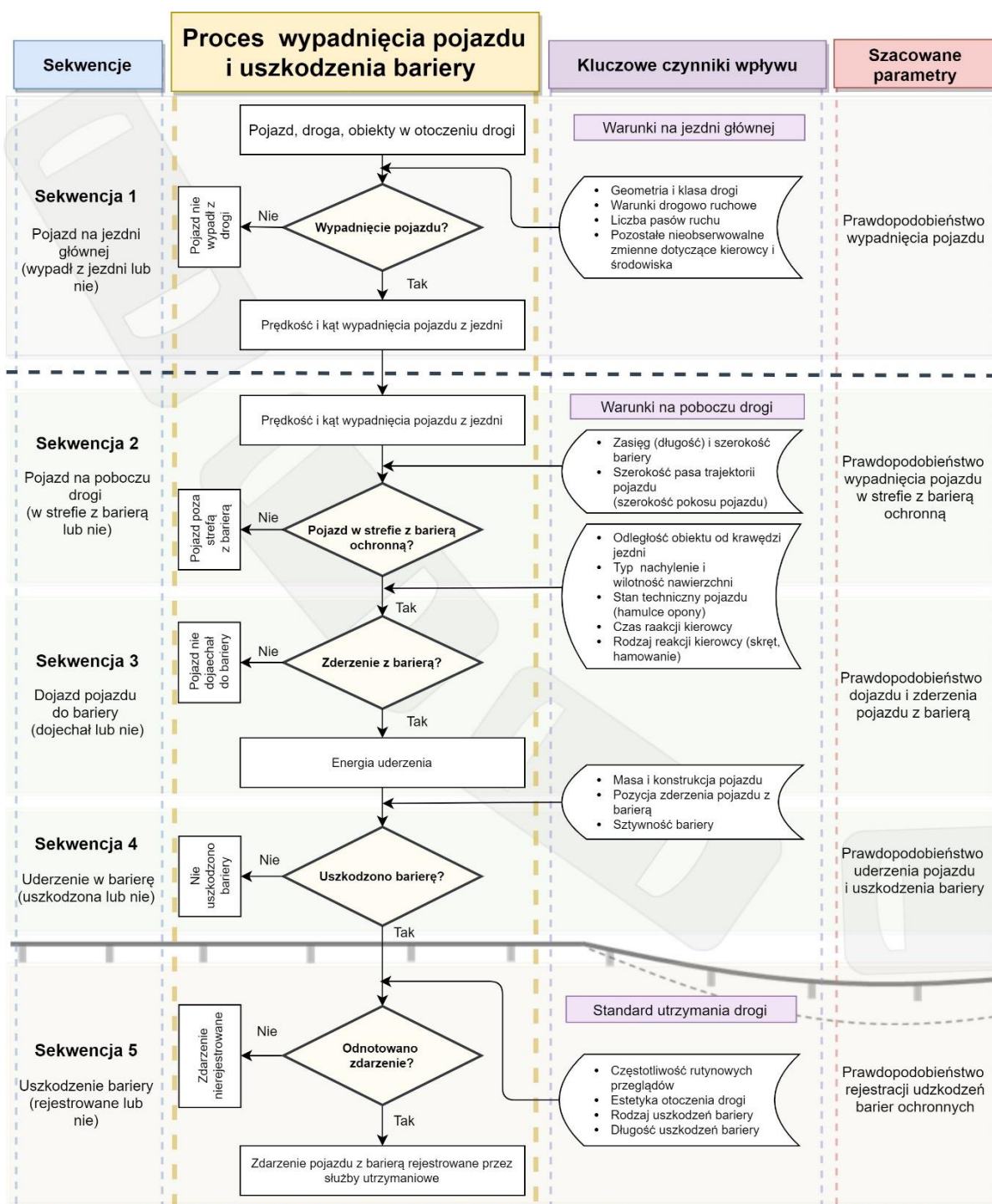
Sekwencja 2 określa prawdopodobieństwo, że w strefie, w którą pojazd wjechał opuszczając jezdnię, znajduje się obiekt (bariera ochronna), z którą pojazd może się zderzyć. Wypadający z jezdni pojazd może się znaleźć w strefie zagrożenia zderzenia z barierą w zależności od prędkości oraz kąta wypadnięcia pojazdu z jezdni.

Sekwencja 3 określa prawdopodobieństwo, że pojazd wtargnie wystarczająco daleko, aby uderzyć w barierę ochronną. W przypadku, gdy dojdzie do uderzenia w barierę, prędkość wypadnięcia oraz kąt stanowią dane wejściowe do kolejnej sekwencji.

Sekwencja 4 określa prawdopodobieństwo powstania uszkodzenia bariery ochronnej w wyniku uderzenia w nią pojazdu, czy uderzenie spowoduje uszkodzenia bariery.

Sekwencja 5 określa prawdopodobieństwo rejestracji przez służby utrzymaniowe uszkodzenia bariery ochronnej.

Schemat sekwencji przebywania pojazdu wypadającego z jezdni przedstawiony na rysunku 7.3, stanowi ścieżkę zgromadzonych, w ramach badań terenowych, danych dotyczących uderzeń pojazdów w barierę ochronne.



Rys. 7.3 Schemat koncepcji procesu obrazującego sekwencje wypadnięcia pojazdu z jezdni i uderzenia w barierę ochronną

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [110]

W celu uporządkowania i ułatwienia zapisu odpowiednich sekwencji, zastosowano następujące oznaczenia:

W – wystąpienie wypadnięcia pojazdu z jezdni na odcinku drogi,

NW – niewystąpienie wypadnięcia pojazdu z jezdni na odcinku drogi,

O_q – reprezentuje obwiednię q -tej bariery ochronnej na odcinku drogi stanowiącej strefę potencjalnego zagrożenia,

D_q – oznacza dojazd pojazdu i uderzenie w q -tą barierę ochronną na odcinku drogi,

ND_q – oznacza niedojechanie pojazdu do q -tej bariery ochronnej na odcinku drogi,

U_q – oznacza uszkodzenie q -tej

R_q – oznacza odnotowane przez służby utrzymaniowe lub policję uszkodzenie pojazdu w q -tą barierę ochronną na odcinku drogi,

X_n – oznaczają kluczowe czynniki wpływu, związane odpowiednio z sekwencjami od $n = 1$ do 5,

Z_1 – oznaczają nieobserwowalne czynniki odnoszące się do kierowcy i pojazdu związane z sekwencją 1.

Jak wynika z przeglądu literatury dotyczącej wypadków drogowych z obiektami przydrożnymi [110],[152], zmienne Z_1 określają przede wszystkim nieobserwowalne czynniki odnoszące się do kierowcy i pojazdu, które przeważnie są niedostępne lub niemożliwe do zdobycia dla poszczególnych przypadków zdarzeń.

7.3. Modele prawdopodobieństwa bazujące na procesie wypadnięcia pojazdu z jezdni

7.3.1. Koncepcja ogólna

Stosując się do przedstawionych w punkcie 7.2 zapisów odpowiednich sekwencji, podjęto próbę sformułowania prawdopodobieństw warunkowych związanych z pięcioma omawianymi sekwencjami, dotyczącymi wypadnięć i rejestrowanych uderzeń pojazdu w bariery ochronne na odcinku drogi (wzory 7.1-7.5). W myśl stosowanego podejścia prawdopodobieństwo łączne, analizowanych pięciu sekwencji, pozwoli na oszacowanie prawdopodobieństwa zarejestrowania zdarzenia z barierą powstałego w wyniku wypadnięcia pojazdu z jezdni w określonych warunkach (wzór 7.6).

Sekwencja	Opis prawdopodobieństwa	Postać miary prawdopodobieństwa	Wzór
1	Prawdopodobieństwo wypadnięcia pojazdu z drogi	$P_1 = P(W X_1, Z_1)$	(7.1)
2	Prawdopodobieństwo wypadnięć pojazdów w obszarze strefy zagrożenia zderzenia z barierą ochronną	$P_2 = P(w O_q W, X_2)$	(7.2)
3	Prawdopodobieństwo dojazdu i uderzenia pojazdu w barierę ochronną	$P_3 = P(D_q w O_q, X_3)$	(7.3)
4	Prawdopodobieństwo uszkodzenie bariery ochronnej	$P_4 = P(U_q D_q, X_4)$	(7.4)
5	Prawdopodobieństwo rejestracji uszkodzeń barier ochronnych	$P_5 = P(R_q U_q, X_5)$	(7.5)
Prawdopodobieństwo łączne: (prawdopodobieństwo zarejestrowania uszkodzeń bariery:		$P_{ZDB} = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5$	(7.6)

Źródło: Opracowanie własne

Należy podkreślić, że „ $w O_q$ ” oznacza, iż pojazd wypadł z jezdni i znalazł się w obszarze strefy, w której znajduje się q -ta bariera ochronna (sekwencja 2), że uderzenie w barierę D_q jest uwarunkowane wystąpieniem wypadnięcia pojazdu w strefie zagrożenia O_q , w której znajduje się bariera ochronna (sekwencja 3), że uszkodzenie bariery ochronnej U_q wystąpi pod warunkiem uderzenia w barierę pojazdu D_q (sekwencja 4) oraz, że zarejestrowanie uszkodzenia R_q uwarunkowane jest wystąpieniem uderzenia U_q (sekwencja 5).

W związku powyższym przyjęte podejście bazujące na procesie wypadnięć pojazdów dzieli prawdopodobieństwo pojazdów biorących udział w uderzeniach rejestrowanych R_k , przy zadanych determinantach X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 i Z_1 na serię prawdopodobieństw warunkowych w następujący sposób (wzór 7.7):

$$\begin{aligned} P(R_q | X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, Z_1) &= P_1(W | X_1, Z_1) P_{2-5}(R_q | W, X_2, X_3, X_4, X_5) \\ &= P_1(W | X_1, Z_1) P_2(w | O_q, W, X_2) P_3(D_q | w, O_q, X_3) P_4(U_q | D_q, X_4) P_5(R_q | U_q, X_5) \end{aligned} \quad (7.7)$$

Na poziomie mikroskopowym procesu wypadnięcia pojazdu z jezdni, mechanika ruchu pojazdu oraz zachowanie kierowcy w trakcie jego zaistnienia, które decydują o końcowym wyniku każdej z pierwszych czterech sekwencji, mogą być bardzo złożone. Aby przyjęta koncepcja była użyteczna i możliwa do wykonania, przyjęto uproszczenia każdego z tych procesów na bazie zdobytej na podstawie przeglądu literatury, wiedzy technicznej, ograniczeń, a także dostępnych i możliwych do przeanalizowania danych na temat uszkodzeń barier ochronnych i pozostałych elementów otoczenia drogi.

Sposób, w jaki każdą z sekwencji wykorzystano, opisano szczegółowo w dalszej części pracy w ramach próby oszacowania:

1. Prawdopodobieństwa wypadnięcia pojazdu z jezdni (sekwencja 1).
2. Prawdopodobieństwa uderzenia pojazdu w barierę ochronną (sekwencja 2-3).
3. Prawdopodobieństwa uszkodzenia bariery ochronnej (sekwencja 4-5).

7.3.2. Prawdopodobieństwo wypadnięcia pojazdu z jezdni

W celu uzyskania danych o wypadnięciu pojazdu z jezdni, w prowadzonych dotychczas na świecie badaniach [76],[34],[112],[119],[183], wykorzystywano wiele metod i narzędzi do zbierania danych, w tym m.in. rejestrację śladów hamowania opon, rejestrację napraw i konserwacji przydrożnej infrastruktury oraz wykorzystanie przydrożnego sprzętu monitorującego, takiego jak kamery video zamontowane na stałe przy drodze. Jak dotąd większość działań związanych z gromadzeniem tych danych miała charakter eksperymentalny, odbywała się na małą skalę i nie w pełni została uznana za udaną. Nie zważając na wykorzystywane podczas badań narzędzia do zbieranych oraz ich dokładność, w badaniach dotyczących wypadnięć pojazdów, pojawiał się wspólny problem dotyczący odróżnienia kontrolowanych i niekontrolowanych zjazdów z jezdni. Formalnie różnice między wyszczególnionymi dwoma rodzajami wypadnięć można by jednoznacznie zdefiniować, jednakże wysiłek potrzebny do sklasyfikowania każdego wypadnięcia mógłby okazać się bardzo kosztowny, a w skrajnych przypadkach niemożliwy. W dotychczasowych badaniach wypadnięć pojazdów brakowało lub istniała bardzo cienka granica oddzielająca kontrolowane od niekontrolowanych wypadnięć pojazdów, polegająca na subiektywnej ocenie obserwatora zdarzenia.

W ramach badań własnych, podjęto próbę wyznaczenia prawdopodobieństwa wypadnięcia pojazdu z drogi. W tym celu wykorzystano podejście statystyczne, bazujące na analizie dostępnych danych historycznych i odpowiednich modeli probabilistycznych. Zgodnie z przyjętą postacią miary prawdopodobieństwa (wzór 7.7), prawdopodobieństwo warunkowe wypadnięcia pojazdu z jezdni wyznaczono pod warunkiem:

- X_1 - pojazd porusza się po odcinku drogi o przekroju 2x2 o szerokości pasów ruchu 3,75m z pasem awaryjnym, o prędkości dopuszczalnej 140 km/h, dobowym natężeniu ruchu 15-35 tys. poj./dobę,
- Z^1 - nieuwzględnienia zachowania i wieku kierowców, warunków atmosferycznych, stanu i rodzaju pojazdu, nawierzchni drogi oraz pory zajścia zdarzenia.

Procedurę wyznaczania prawdopodobieństwa wypadnięcia pojazdu z jezdni zrealizowano w czterech krokach:

Krok 1. Zebranie danych i sformułowanie założeń.

Krok 2. Wybór modeli statystycznych do opisu prawdopodobieństwa.

Krok 3. Dopasowanie i weryfikacja modeli do danych.

Krok 4. Wybór modelu i wyznaczenie prawdopodobieństwa.

W celu oszacowania prawdopodobieństwa wypadnięcia pojazdu z jezdni, przeprowadzono powtórnie analizę uzyskanych z badań terenowych danych. Analiza miała na celu zidentyfikowanie odcinków, z których zebrano pełen zakres danych i informacji na temat zarejestrowanych przez służby utrzymaniowe uszkodzeń elementów infrastruktury drogowej, które można było powiązać bezpośrednio z wypadnięciem pojazdu z jezdni. W celu uzyskania najlepszej dokładności wyników, poszukiwano odcinków drogi o najwyższym zaobserwowanym standardzie i jakości utrzymania, który bezpośrednio wpływał na ilość i jakość zebranych danych. Gromadzone przez autora pracy dane pierwotnie miały służyć wyłącznie szczegółowym analizom wypadnięć pojazdów z jezdni, w konsekwencji których uszkodzona została bariera ochronna. Dlatego zbiór odcinków przyjętych do analizy zawężił się do 12 odcinków drogi o łącznej długości 152 km (tj. odcinek autostrady A1 od węzeł Rusocin do Toruń Południe). Dane zebrane z wspomnianych odcinków zawierały oprócz informacji o naprawach urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego, informacje na temat napraw pozostałych obiektów zlokalizowanych poza jezdnią (np. słupy, znaki), oraz napraw uszkodzonych terenów zielonych będących następstwem wypadnięć pojazdów. Należy w tym miejscu zaznaczyć, że wybrany odcinek utrzymywany jest w standardzie, w ramach którego służby utrzymaniowe wykonywały inspekcje powstałych uszkodzeń z częstotliwością przejazdów ok. 2h (najwyższą stosowaną dotychczas w Polsce).

Prawdopodobieństwo niezamierzonego wypadnięcia pojazdu z jezdni na wybranym odcinku drogi oszacowano przy założeniu, że niezamierzone wypadnięcie pojazdu występuje wyłącznie w przypadku, gdy pojazd opuści jezdnię i znajdzie się na nieutwardzonym poboczu i/lub zderzy się przydrożnym obiektem. Założenie to wynika przede wszystkim z dostępnych danych, aczkolwiek znacznie upraszcza procedurę analityczną. Pozwala ono skupić się wyłącznie na zdarzeniach niebezpiecznych, które są bezpośrednio związane z ingerencją pojazdu w strefę najbliższego otoczenia jezdni i zagrożeń w nim występujących (w tym barier ochronnych). Należy podkreślić, że założenie to pomija zdarzenia, w których pojazd w sposób niekontrolowany opuścił pas ruchu, zjechał na pobocze utwardzone (pas awaryjny), po czym powrócił na pierwotny tor jazdy.

Zgodnie z przyjętym założeniem, na wyznaczonym do analizy odcinku drogi autostrady A1 (tabela 7.1), w ciągu jednego roku doszło do 496 niekontrolowanych wypadnięć pojazdu. Spośród nich 433 zdarzeń (87,3%) skończyło się uderzeniem w barierę ochronną lub jej zakończenie, a 63 zdarzenia (12,7%) związanych było wyłącznie z uszkodzeniem terenów zielonych i/lub uderzeń w oznakowanie pionowe.

Tab. 7.1 Liczba (LEN) i udział zarejestrowanych elementów wymagających napraw (UEN) - na podstawie odcinka autostrady A1 (odcinek węzeł Rusocin - węzeł Toruń Południe)

Zarejestrowany element wymagający naprawy	Lewe krawędzie jezdni – Pas dzielący (jezdnie 1 i 2)		Prawe krawędzie jezdni – Pobocza drogi (jezdnie 1 i 2)		Razem	
	LEN _{L1,2} (szt.)	UEN _{L1,2} (%)	LEN _{P1,2} (szt.)	UEN _{P1,2} (%)	LEN (szt.)	UEN (%)
Bariera ochronna	226	95,0	207	80,5	433	87,5
Znak, tereny zielone	12	5,0	50	19,5	62	12,5
Suma:	238	100,0	257	100,0	495	100,0

Źródło: Opracowanie własne

W celu zamodelowania i opisanego ogólnego prawdopodobieństwa wypadnięcia pojazdu z jezdni, jako miarę poziomu prawdopodobieństwa wypadnięcia pojazdów z jezdni, wykorzystano wskaźnik liczby wypadnięć, jakim jest koncentracja zdarzeń na wybranych odcinkach, którą wyznacza się ze wzoru 7.8:

$$K_{Wi} = \frac{\sum_t LZD_{w,t} \cdot 10^6}{365 \cdot \sum_t (SDR_{t,i} \cdot DL_i)} \quad (7.8)$$

gdzie:

$K_{ZD_{Wi}}$ – liczba niezamierzonych wypadnięć pojazdów z jezdni w przeliczeniu na milion pojazdokilometrów na odcinku drogi o długości jednego kilometra w roku t (*wyp./mln poj.km/rok*),

$SDR_{t,i}$ – średni roczny dobowy ruch pojazdów w roku t na i -tym odcinku drogi (*poj./dobę*),

DL_i – długość odcinka (*km*).

Na podstawie wyznaczonej miary koncentracji wypadnięć pojazdów, prawdopodobieństwo wypadnięcia z jezdni i wjechanie na pas rozdziału lub pobocze z prawej strony wynosi odpowiednio 0,19 i 0,21 wypadnięć/mln poj. km w ciągu roku.

W przeglądzie literatury dotyczącym liczby wypadnięć pojazdów z jezdni wskazywano [2], że dokładniejsza postać wskaźnika liczby wypadnięć, powinna mieć charakter multiplikatywny i uwzględniać zróżnicowany wpływ zmiennych geometrycznych oraz ruchowych odcinka drogi na częstość wypadnięć. Przyjęto zatem, że wskaźnik liczby wypadnięć można również wyrazić w postaci równania 7.9, które przedstawia zależność między oczekiwanym wskaźnikiem liczby wypadnięć (K_w) na i -tym odcinku drogi z k -tą liczbą parametrów.

$$K_{Wi} = \exp(\beta_0 \cdot x_{i0} + \beta_1 \cdot x_{i1} + \dots + \beta_{0j} \cdot x_{ij} + \varepsilon_i) \quad (7.9)$$

Zebrane dane empiryczne poddano również próbie opisanego ich za pomocą wybranych dyskretnych rozkładów prawdopodobieństwa, tj. rozkładem dwumianowym ujemnym oraz rozkładem Poissona. Rozkłady należą do dyskretnych rozkładów prawdopodobieństwa, które można użyć do obliczenia prawdopodobieństwa wystąpienia pewnej liczby sukcesów w określonym czasie. (np. liczby wypadnięć pojazdów czy uderzeń w bariery ochronne w ciągu roku t). Aby wykorzystać rozkłady dla zaprezentowanego zbioru danych, wymagane były dwa warunki wstępne, które zostały spełnione tj.:

- zdarzenia powinny być niezależne.
- zdarzenia powinny mieć znaną i stałą częstość występowania.

W przypadku analizowanych zdarzeń niebezpiecznych, odnotowane wypadnięcia pojazdów nie były zależne od siebie. Ponadto wskaźniki liczby zdarzeń (częstość występowania) można obliczyć za pomocą miar zaprezentowanych i możliwych do wyznaczenia, np. wg wzoru 7.8. Na tej podstawie

przyjęto, że rozkład Poissona, Bernoulliego czy Pascala można zaimplementować, jako odpowiedni model do wyrażenia prawdopodobieństwa wystąpienia wypadnięć pojazdów z jezdni.

W rozkładzie Poissona prawdopodobieństwo wystąpienia k -tej liczby zdarzeń wyznaczono z równania 7.10. Rozkład Poissona jest szczególnym przypadkiem rozkładu Bernoulliego, w którym prawdopodobieństwo sukcesu p (wypadnięcia pojazdu K_{ZDWi}) jest bardzo małe, a liczba doświadczeń n (pojazdów przejeżdżających przez odcinek drogi w ciągu roku - PP) jest na tyle duża, że ich iloczyn jest stały i określany jako μ ($n \cdot p = const = \mu$), który wyznacza się za pomocą wzoru 7.11.

$$P(k_i) = \frac{e^{-\mu_i} \cdot \mu_i^{k_i}}{k_i!} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n; k_i = 0, 1, 2, 3 \dots) \quad (7.10)$$

dla

$$\mu_i = E(Y_i) = PP_i \cdot \exp\left(\sum_{j=1} x_{ij} \cdot \beta_j + \varepsilon_i\right) \quad (7.11)$$

gdzie:

μ_i – średnia liczba wypadnięć pojazdów na odcinku drogi,

$E(Y_i)$ – oczekiwana liczba wypadnięć pojazdów,

PP_i – praca przewozowa wykonana przez wszystkie pojazdy na analizowanym odcinku drogi w ciągu jednego roku wyrażona w milionach pojazdokilometrów zdefiniowana jako:

$$PP_i = \sum_t (SDR_{t,i} \cdot 365 \cdot DL_i) \quad (7.12)$$

W rozkładzie Bernoulliego prawdopodobieństwo wystąpienia k -tej liczby zdarzeń na i -tym odcinku drogi w n próbach z prawdopodobieństwem sukcesu p opisano przy pomocy równania 7.13.

$$P(k_i) = \binom{n}{k_i} p^{k_i} (1-p)^{n-k} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n; k_i = 0, 1, 2, 3 \dots) \quad (7.13)$$

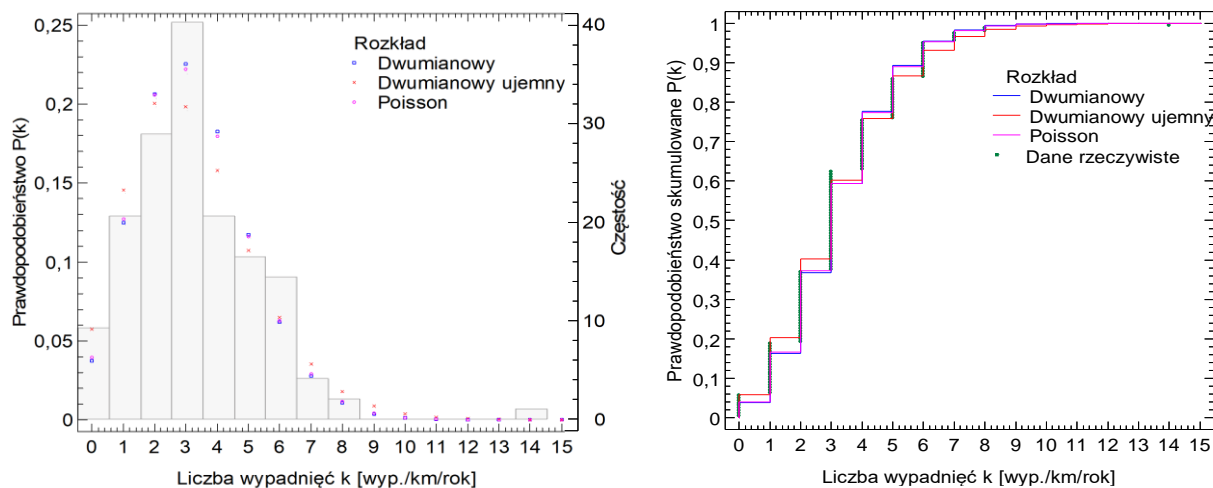
Zmienna przyjmuje rozkład dwumianowy ujemny (Pascala) z parametrami r oraz p , w momencie, kiedy można ją opisać wzorem 7.14.

$$P(k_i) = \binom{r+k_i-1}{r-1} p^{k_i} (1-p)^r \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n; k_i = 0, 1, 2, 3 \dots) \quad (7.14)$$

Zmienną losową o rozkładzie Pascala interpretowano jako liczbę sukcesów k_i (wypadnięć pojazdów) w próbach Bernoulliego z prawdopodobieństwem sukcesu p , prowadzonych do momentu uzyskania r -tej porażki. Zakładając, że średnia liczba wypadnięć pojazdów z jezdni na i -tym odcinku drogi μ_i jest zależna od różnych zmiennych niezależnych X_i objaśniających zmienną Y_i (reprezentującą liczbę wypadnięć pojazdów z jezdni na i -tym odcinku drogi w okresie t). Średnią liczbę wypadnięć na odcinku drogi można wyrazić za pomocą wzoru 7.15.

$$\mu_i = \exp\left(\sum_{j=1} x_{ij} \cdot \beta_j + \varepsilon_i\right) \quad (7.15)$$

Na rysunku 7.4 przedstawiono uzyskane dopasowania rozkładów prawdopodobieństwa i dystrybuanty rozkładu wypadnięć pojazdów z jezdni na analizowanym odcinku autostrady wg trzech testowanych rozkładów. Należy zaznaczyć, że analizowany 152 kilometrowy odcinek autostrady A1 podzielono na równe pod względem długości segmenty o długości 1 km (łącznie 152 odcinki), do których przypisano liczbę wypadnięć k .



Rys. 7.4 Rozkłady prawdopodobieństwa wypadnięć pojazdów z drogi na odcinku autostrady A1 (odcinek węzeł Rusocin - węzeł Toruń Południe)

Źródło: Opracowanie własne

W tabl. 7.2 przedstawiono wyniki opisywanych danych empirycznych za pomocą trzech różnych rozkładów (dwumianowego, dwumianowego ujemnego i Poissona), z wykorzystaniem do oceny ich dopasowania testu statystycznego chi-kwadrat. W każdym przypadku analizowano estymowane parametry, liczby stopni swobody oraz wartości p (p -value). Wyniki testu wskazują, że nie ma istotnych różnic między danymi empirycznymi, a teoretycznymi dla wskazanych rozkładów. Wartości p są większe od ustalonego poziomu istotności ($\alpha=0,01$), co sugeruje, że obserwowane dane są zgodne z przewidywaniami danego rozkładu. W związku z powyższym, przy każdym z prezentowanych rozkładów nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej, o braku istotnej różnicy między danymi empirycznymi, a teoretycznym rozkładem. Chcąc wybrać najlepszy rozkład dopasowania do danych empirycznych, porównano statystyki chi-kwadrat i wartość p . Analizując te wyniki, możemy zauważyć, że wartości p dla każdego z rozkładów są podobne i znacząco przekraczają poziom istotności α (0,01). Wyróżnić jednak można dwa rozkłady, które uzyskały podobne wartości p -wartości w teście dopasowania, są to rozkłady dwumianowy ujemny (Pascala) oraz rozkład Poissona.

Wyniki testu chi-kwadrat dla obu tych rozkładów wykazały podobne wartości statystyki chi-kwadrat oraz wartości p (tabela 7.2). W związku z tym, wybór rozkładu podjęto na podstawie ustaleń badań literaturowych [92],[112],[48],[5],[152],[151],[183]. Przegląd literatury potwierdził, że najczęściej testowanym i stosowanym rozkładem do opisu zdarzeń związanych z wypadnięciem pojazdu z jezdni, jest rozkład dwumianowy ujemny i rozkład Poissona. Według jednych z pierwszych badań [92],[112], uznano że modele regresji Poissona mogą być lepszym wyborem do modelowania rzadkich i sporadycznych zdarzeń, takich jak wypadnięcia pojazdów z jedni. Późniejsze badania [5],[152],[151],[183] sugerowały wybór modeli regresji dwumianowych ujemnych, które w gruncie rzeczy należą do klasy rozkładów prawdopodobieństwa Poissona. Ostatecznie na podstawie dokonanej analizy i porównania z wynikami badań literaturowych, jako najlepiej oddający rozkład liczby wypadnięć pojazdów z jezdni w przekroju drogi, wybrano model dwumianowy ujemny.

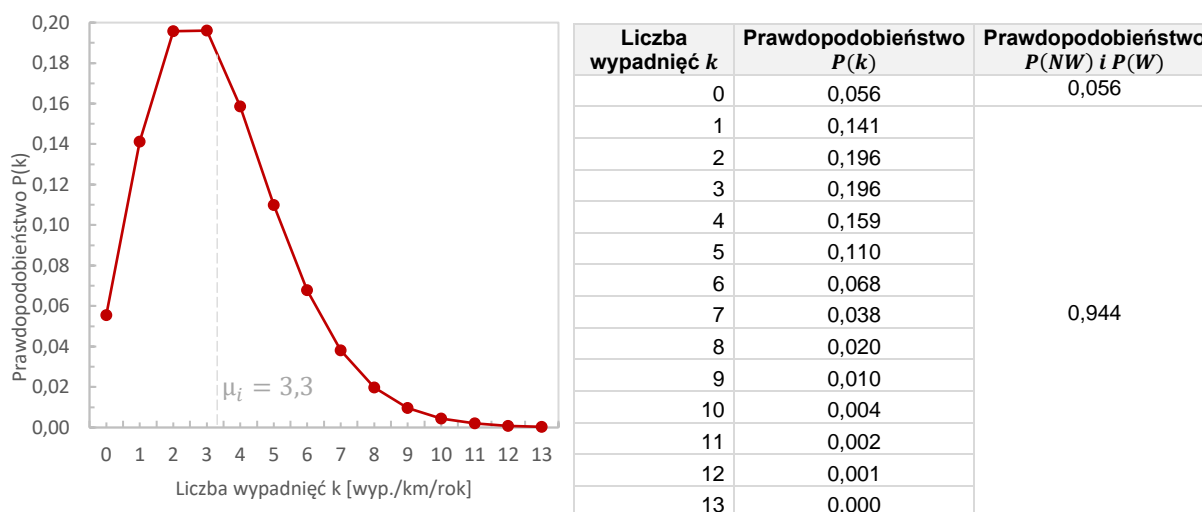
Tab. 7.2 Dobroć dopasowania rozkładów dyskretnych względem liczby wypadnięć pojazdów z jezdni - test chi-kwadrat

	Rozkład dwumianowy (Bernoulliego)	Rozkład dwumianowy ujemny (Pascala)	Rozkład Poisson
Chi-kwadrat	7,684	6,632	6,936
Estymowane parametry	2 (n, p)	2 (r, p)	1 (μ)
Liczba stopni swobody df	7	7	7
Poziom istotności α	0,01	0,01	0,01
P-Value*	0,361	0,468	0,436

*Wartości p mniejsze niż 0,01 wskazywałyby, że Liczba wypadnięć nie pochodzi z wybranego rozkładu z 99% pewnością.

Źródło: Opracowanie własne

Ostatecznie prawdopodobieństwo wypadnięcia pojazdu z jezdni, dla analizowanego 152 kilometrowego odcinka autostrady A1, na którym doszło do 495 wypadnięć przy narażeniu na wypadnięcie pojazdu równym 1 239 mln przejechanych pojazdokilometrów w ciągu roku, według przyjętej miary K_{Wi} , 0,40 wypadnięć na milion przejechanych pojazdokilometrów w ciągu roku. Średnia liczba wypadnięć pojazdów na analizowanym odcinku drogi $\mu_i = 3,3$ wypadnięć na kilometr w ciągu roku. Dokładną wartość k-tej liczby wypadnięć można odczytać z tabeli na rysunku 7.5. Prawdopodobieństwo, że w ciągu roku dojdzie do przynajmniej jednego wypadnięcia pojazdu z jezdni, na odcinku drogi o długości 1 km, wynosi $P(W | X_1, Z_1) = 0,944$ i adekwatnie prawdopodobieństwo $P(NW | X_1, Z_1) = 0,056$ (rysunek 7.5).



Rys. 7.5 Prawdopodobieństwo wypadnięcia pojazdu z drogi na odcinku autostrady A1 (odcinek węzeł Rusocin - węzeł Toruń Południe) w rozkładzie dwumianowym ujemnym (Pascala)

Źródło: Opracowanie własne

Wyjściowym elementem sekwencji 1, jest wystąpienie lub niewystąpienie wypadnięcia pojazdu reprezentowane przez prawdopodobieństwo warunkowe $P_1(W | X_1, Z_1)$. Jeśli dojdzie do wypadnięcia pojazdu w kolejnym etapie charakteryzowane jest ono poprzez jego kąt oraz prędkość wypadnięcia. Są to dwa kluczowe parametry, które mogą pomóc określić w kolejnych sekwencjach, czy dane wypadnięcie może spowodować uszkodzenie bariery ochronnej czy też nie.

Ustalono, że prędkość i kąt wypadnięcia pojazdu, stanowią dane wejściowe do sekwencji 2-4. Parametry te potraktowano jako zmienne zależne od siebie, które generowane są na podstawie funkcji gęstości prawdopodobieństwa (wzór 7.16):

$$f(v, \alpha) = f(\alpha|\alpha_{max})f(v) \quad (7.16)$$

gdzie:

v – prędkość pojazdu (km/h),

α – kąt wypadnięcia pojazdu ($^\circ$),

α_{max} – maksymalny możliwy do uzyskania kąt wypadnięcia pojazdu ($^\circ$).

Ze względu na brak danych dotyczących prędkości i kąta wypadnięcia pojazdu względem krawędzi jezdni, funkcję i jej parametry dobrano na podstawie przeglądu literatury i zbadanych kątów uderzeń w barierę ochronną (rysunek 5.6). Funkcja ta została zweryfikowana na podstawie badań [27],[183], gdzie wykazano jej wiarygodność i dostateczną do wnioskowania złożoność.

W celu zbadania i zrozumienia zależności dla maksymalnego kąta wypadnięcia pojazdu z jezdni, przyjęto próbę sformułowania modelu matematycznego maksymalnego kąta wypadnięcia/uderzenia pojazdu, jaki można osiągnąć dla dowolnej prędkości pojazdu, jego odległości od krawędzi jezdni/bariery i współczynnika przyczepności (opona-nawierzchnia) na odcinku prostym i łuku poziomym. Model ten ma na celu wyznaczenie i zweryfikowanie ograniczeń rozkładów występujących kątów wypadnięć/ uderzeń w barierę. Przy danej prędkości pojazdu i współczynniku przyczepności, ruch pojazdu opisany łukiem kołowym jest ograniczony do minimalnego (granicznego) promienia trajektorii. Zakłada się, że jeśli promień łuku jest mniejszy niż promień graniczny, pojazd wpada w poślizg. W związku z tym, znając minimalny promień krzywizny i punkt startowy pojazdu (w odległości S_n od krawędzi pasa lub bariery), maksymalny kąt wypadnięcia/ uderzenia pojazdu w barierę na odcinku prostym wyrażono za pomocą wzoru 7.17.

$$\alpha_{max} = \arccos\left(\frac{1 - S_n \cdot g \cdot \mu}{v^2}\right) \quad (7.17)$$

gdzie:

S_n – odległość pojazdu od krawędzi jezdni lub bariery ochronnej (m),

g – przyspieszenie ziemskie ($\frac{m}{s^2}$),

μ – graniczny współczynnik przyczepności opony do nawierzchni (-),

v – prędkość pojazdu ($\frac{m}{s}$),

Model zakłada, że maksymalne możliwe kąty wypadnięcia pojazdu z jezdni α_{max} zależą od prędkości pojazdu, jego odległości od krawędzi jezdni lub bariery i maksymalnego współczynnika przyczepności opony do podłoża. O ile realizacja założenia o maksymalnej odległości pojazdów od krawędzi w rzeczywistych warunkach było dość proste, to założenie granicznych współczynników przyczepności μ wymagałoby szczegółowych badań. Skorzystać można w tym celu z badań już przeprowadzonych w Polsce [94]. Na podstawie analizy badań [27],[94],[157],[183] przyjęto, że odpowiednim (uogólnionym) podejściem będzie przyjęcie różnych wartości współczynników przyczepności dla różnych typów pojazdów. Wykonane testy (test Manna-Whitneya) grup niezależnych kąta uderzenia w barierę od rodzaju uderzającego w nią pojazdu, wskazały istotne różnice między grupą pojazdów

osobowych i ciężarowych. Przyjęto zatem podział modelu na pojazdy osobowe i pojazdy ciężarowe, dla których graniczne współczynniki przyczepności przyjęto odpowiednio 0,7 i 0,55 [27]. Przyjęto dość niskie współczynniki przyczepności dla pojazdów ciężarowych, ponieważ uznano, że są to pojazdy o dość wysoko położonym środku ciężkości, dla których większym ograniczeniem mogą być wywrócenia pojazdu niż poślizg. Założenie to umożliwiło przyjęcie niższych wartości współczynnika μ , a to w efekcie miało zapewnić bardziej wiarygodne wyniki modelu. Zależności przedstawionego modelu bazują więc na założeniu, że pojazd nie przewraca się w momencie wypadnięcia z jezdni. Oznacza to, że zdolność utrzymania pojazdu na jezdni, jaką może zapewnić siła tarcia o podłoże, nie zostaje przekroczona w początkowym etapie wypadnięcia pojazdu.

Zależność maksymalnych kątów wypadnięć pojazdu na zakrzywionym odcinku drogi, wyznaczono w podobny sposób jak na odcinku prostym. Obliczenia rozpoczęto od założenia, że kąt wypadnięcia wynikający z zakrzywienia odcinka drogi należy wyznaczyć, jako funkcję odległości między torem ruchu pojazdu a linią trasującą krawędź jezdni lub bariery.

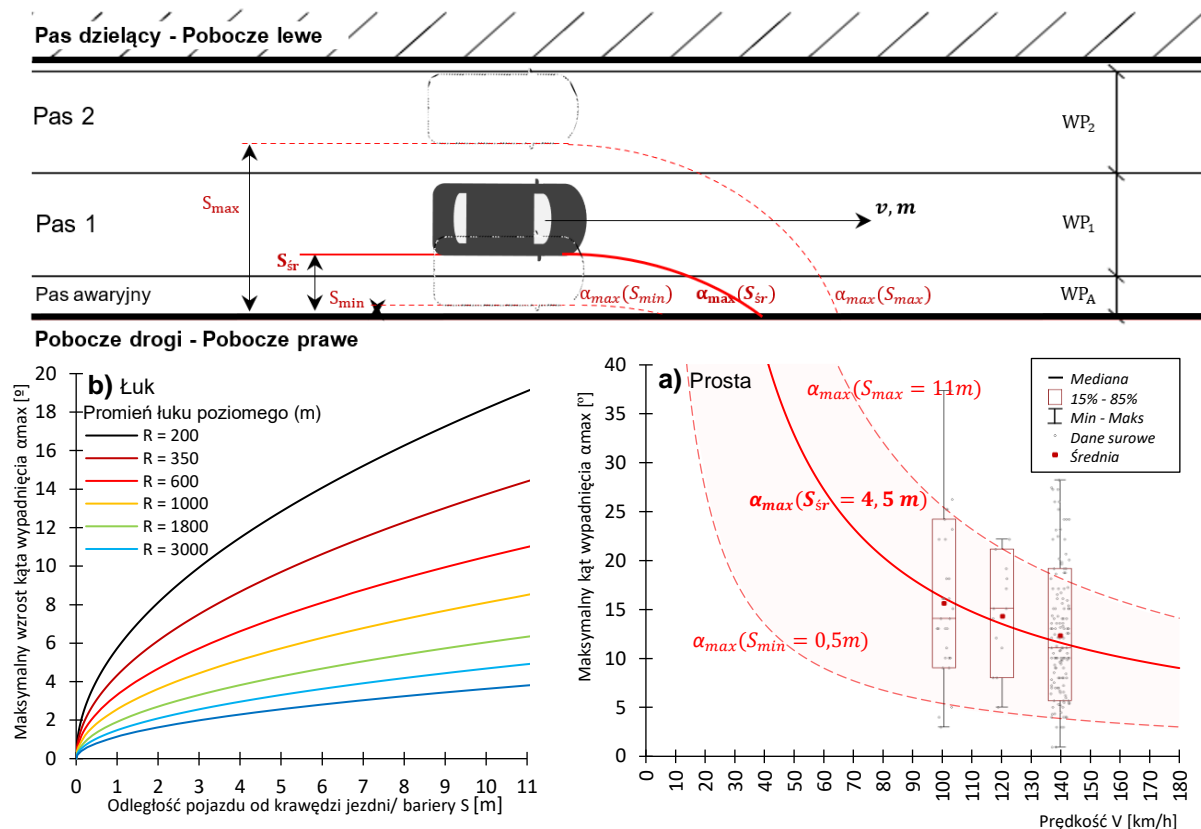
W związku z powyższym założono dwa warianty modelu szacowania maksymalnego kąta wypadnięcia pojazdu w łuku poziomym drogi:

- 1) zakładający, że pojazd nie zmienia kierunku jazdy i wypada poruszając się w linii prostej lub
- 2) pojazd wypada poruszając się w łuku śladem minimalnego granicznego promienia trajektorii ruchu pojazdu (przy założeniach, jak w przypadku przedstawionym dla odcinka prostego).

Dla wariantu pierwszego tj., gdy pojazd porusza się w linii prostej, kąt wypadnięcia nie zależy od prędkości pojazdu, jego masy ani wartości współczynnika μ , lecz od promienia łuku, po którym pojazd się porusza oraz jego odległości od krawędzi jezdni lub bariery. Zatem maksymalny kąt wypadnięcia pojazdu można przyjąć i odczytać z rysunku 7.6b. W przypadku zaistnienia wariantu drugiego, należy przyjąć maksymalny kąt wypadnięcia pojazdu z jezdni, jak dla odcinka prostego i powiększyć go (wypadnięcie do środka łuku) lub zmniejszyć (wypadnięcie na zewnątrz łuku) o wartość kąta wynikającego z promienia łuku, w jakim pojazd się znajdował. Należy zauważyć, że wartości promienia łuków mogą być przeszacowane, ponieważ w warunkach rzeczywistych promień łuku nie jest stały, a maleje wraz z przejazdem pojazdu po nim i zastosowanych w nim krzywych przejściowych.

W praktyce na podstawie przyjętych założeń stwierdzono, że wraz ze wzrostem prędkości możliwy kąt wypadnięcia pojazdu z jezdni maleje. Natomiast kąt wypadnięcia rośnie wraz z odległością pojazdu od krawędzi jezdni lub bariery i współczynnikiem przyczepności μ . Omówione zależności zaobserwować można na rysunku 7.6, gdzie przedstawiono zakładany model teoretyczny na tle zebranych w ramach badań terenowych kątów uderzeń pojazdów osobowych w bariery.

Na rysunku 7.6 w sytuacji: a) Prosta - przedstawiono wykres teoretycznych zależności przyjętego modelu matematycznego maksymalnego kąta wypadnięcia pojazdu osobowego na odcinku prostym, w zależności od odległości pojazdu od krawędzi jezdni (S) i prędkości pojazdu (V). Na rysunku 7.6 w sytuacji b) Łuk - przedstawiono maksymalny wzrost kąta wypadnięcia pojazdu osobowego ze względu na promień łuku poziomego drogi R (m), na którym znalazł się wypadający z drogi pojazd.



Rys. 7.6 Wykres teoretycznych zależności modelu matematycznego: a) maksymalnego kąta wypadnięcia pojazdu osobowego na odcinku prostym w zależności od odległości pojazdu od krawędzi jezdni (S) i prędkości pojazdu (V), b) maksymalnego wzrostu kąta wypadnięcia ze względu na promień łuku poziomego drogi R (m)

Źródło: Opracowanie własne

W celu zobrazowania i uproszczenia procesu wypadnięcia pojazdu i uderzenia w barierę ochronną sekwencję 1 wyraźnie oddzielono od pozostałych. Podział ten wynika z założenia, że warunki na poboczu drogi względem warunków na jezdni głównej utwardzonej (patrz czarna linia przerywana na rysunku 7.3) mają znikomą wpływ na prawdopodobieństwo wypadnięcia pojazdu i wjazdu na pobocze drogi. Założono zatem, że prawdopodobieństwo niekontrolowanego wypadnięcia pojazdu można określić wyłącznie na podstawie warunków panujących na jezdni. Słuszność tego założenia może być dyskusyjna, jednakże założenie to znacznie upraszcza analizy w kolejnych trzech sekwencjach, gdzie pomija się zmiany prawdopodobieństwa wypadnięć, które mogłyby wynikać z geometrii i rodzaju poboczny.

7.3.3. Prawdopodobieństwo uderzenia pojazdu w barierę ochronną

Sekwencja druga wyznacza prawdopodobieństwo $P_2(w O_q | W, X_2)$, że pojazd wypadający z drogi, znalazł się w obszarze zagrożenia uderzenia w barierę ochronną. Obszar ten określa się w dalszej części również jako strefę z barierą ochronną (SZB) bądź strefą bez barier (SBB) w przypadku, gdy pojazd znalazł się w obszarze, gdzie bariery nie było. Bezpośredni wpływ na wypadnięcie i wjazd wypadającego pojazdu do strefy z barierą ochronną ma wyposażenie krawędzi jezdni w bariery ochronne. W celu zrozumienia zależności prawdopodobieństwa znalezienia się wypadającego pojazdu w strefie z q-tą barierą ochronną, przeprowadzono dla analizowanych odcinków autostrady A1

inwentaryzację wyposażenia w bariery ochronne. Jak wynika z przeprowadzonej inwentaryzacji (tablica 7.3), największe szanse znalezienia się wypadającego pojazdu w strefie z barierą ochronną występują w przypadku, gdy pojazd zjedzie na pas dzielący. W przypadku pasów dzielących wyposażenie w bariery ochronne wynosi 100% natomiast na poboczach prawych w obydwu kierunkach w bariery ochronne wyposażonych jest 66,5% długości poboczy. Łączny udział długości krawędzi jezdni wyposażonych w bariery ochronne wynosi 83,4%.

Tab. 7.3 Zestawienie danych o wyposażeniu krawędzi jezdni w bariery ochronne na odcinku autostrady A1 (odcinek węzeł Rusocin - węzeł Toruń Południe)

Wyposażenie krawędzi jezdni	Długość prawej krawędzi z barierą (jezdnia 1)		Długość lewej krawędzi z barierą (jezdnia 1 i 2)		Długość prawej krawędzi z barierą (jezdnia 2)		Długość krawędzi jezdni z barierą	
	LB _{P1} (km)	UB _{P1} (%)	LB _{L1,2} (km)	UB _{L1,2} (%)	LB _{P2} (km)	UB _{P2} (%)	LB (km)	UB (%)
Bariery ochronne	100,8	66,2	304,7	100,0	102,7	67,4	508,2	83,4
Brak barier ochronnych	51,5	33,8	0,0	0,0	49,7	32,6	101,2	16,6
Suma:	152,4	100,00	304,7	100,00	152,4	100,00	609,4	100,00

Źródło: Opracowanie własne

W celu wyznaczenia teoretycznej wartości prawdopodobieństwa znalezienia się pojazdu w strefie odcinków barier ochronnych zlokalizowanych na prawym poboczu, wyznaczono formułę obliczania rozmiaru obwiedni strefy zagrożenia, przy znanym kącie wypadnięcia pojazdu α , szerokości pojazdu W_p lub jego pokosu (w przypadku poślizgu), szerokości bariery W_B i długości bariery L_B .

Długość strefy zagrożenia uderzenia w barierę ochronną można zatem wyrazić jako (wzór 7.18):

$$L_s = L_B + W_p \cdot \frac{1}{\sin(\alpha)} + W_B \cdot \operatorname{ctg}(\alpha) \quad (7.18)$$

gdzie:

- L_s – długość strefy zagrożenia uderzenia w barierę ochronną [m],
- L_B – długość krawędzi jezdni zabezpieczonej barierą ochronną [m],
- W_p – szerokość pojazdu lub jego pokosu w przypadku poślizgu [m],
- W_B – szerokość bariery ochronnej [m],
- α – kąt wypadnięcia pojazdu z jezdni (°).

Formuła ta była prezentowana, omawiana i rozwijana w ramach wielu ważniejszych badań np. [125], [110],[152]. Przedstawiony wzór bazuje na założeniu, że bariery są zlokalizowane na prostym odcinku drogi, a ruch pojazdu wypadającego z drogi odbywa się w linii prostej (bez poślizgu i zmiany kąta wypadania pojazdu z jezdni). W celu wyjaśnienia i zrozumienia podstawowej zależności prawdopodobieństwa znalezienia się pojazdu w strefie z barierą ochroną ($P(w 0_q)$) od długości bariery (L_B), złożoność wzoru uznano za wystarczającą. Na podstawie analizy wzoru 7.18 i wniosków zawartych jej wcześniejszych badaniach stwierdza się, że dominującym czynnikiem, wpływającym na długość strefy L_s , jest długość krawędzi wyposażonych w bariery (L_B), a w przypadku odcinków barier o długości $L_B > 150$ m zignorować można w równaniu szerokość pojazdu i szerokość obiektu. W przypadku analizy prawego pobocza odcinka autostrady A1, odcinki o długości $L_B > 150$ m stanowią ponad 52% wszystkich zinwentaryzowanych odcinków barier znajdujących się na prawym poboczu jezdni autostrady A1).

W związku z powyższym teoretyczne prawdopodobieństwo znalezienia się pojazdu w strefie z barierą ochronną przyjęto na podstawie wyznaczonego udziału długości barier ochronnych przy krawędzi jezdni (UB). W obliczeniach długości strefy L_s dla prawych krawędzi jezdni, przyjęto średni kąt uderzenia pojazdu w barierę $\alpha_{sr} = 11^\circ$, szerokość pojazdu dopuszczalną $W_p = 2,55 \text{ m}$ i rzeczywistą szerokość bariery skrajnej $W_B = 0,52 \text{ m}$. Według przyjętych założeń, na analizowanym odcinku autostrady A1, teoretyczne prawdopodobieństwo znalezienia się wypadającego z jezdni pojazdu w strefie z barierą $P(w O_q)$, w przypadku pasa dzielącego 1,0 (100% lewych krawędzi jezdni wyposażonych w bariery ochronne oraz 0,666 w przypadku pobocza drogi (66,6% i 67,9% prawych krawędzi jezdni z barierami). Łączne prawdopodobieństwo teoretyczne znalezienia się pojazdu w strefie z barierą określono na $P_{2,T}(w O_q) = 0,836$.

Rzeczywista wartość prawdopodobieństwa znalezienia się pojazdu w strefie z barierą ochronną w rzeczywistości różni się od teoretycznej. Ograniczeniem podejścia teoretycznego jest to, że nie uwzględnia ona lokalizacji i liczby wypadnięć pojazdów. W praktyce bariery ochronne montowane są w miejscach, w których najczęściej dochodzi do wypadnięć pojazdów (tj. łuki poziome drogi). W celu sprawdzenia dokładności prawdopodobieństwa teoretycznego, porównano go z prawdopodobieństwem rzeczywistym, oszacowanym na podstawie udziału rzeczywistej liczby wypadnięć pojazdów w strefie z barierą (UZD_{w,SZB}) na przykładzie analizowanego odcinka autostrady A1. Z przeprowadzonego porównania wynika, w strefie z barierą ochronną (SZB), która stanowi 83,6 % krawędzi jezdni, dochodzi do 90,7% wszystkich wypadnięć pojazdów z jezdni (tabela 7.4).

Tab. 7.4 Liczba wypadnięć (LZDW) i udział wypadnięć pojazdów (UZDW) w strefę z barierą ochronną (SZB) i strefę bez bariery (SBB) – na podstawie odcinka autostrady A1 (odcinek węzeł Rusocin - węzeł Toruń Południe)

Odcinki z barierami ochronnymi	Liczba wypadnięć LZDW (szt.)	Udział wypadnięć UZDW (%)
Pojazd w strefie z barierą (SZB)	449	90,7
Pojazd w strefie bez bariery (ZBB)	46	9,3
Razem	495	100,0

Źródło: Opracowanie własne

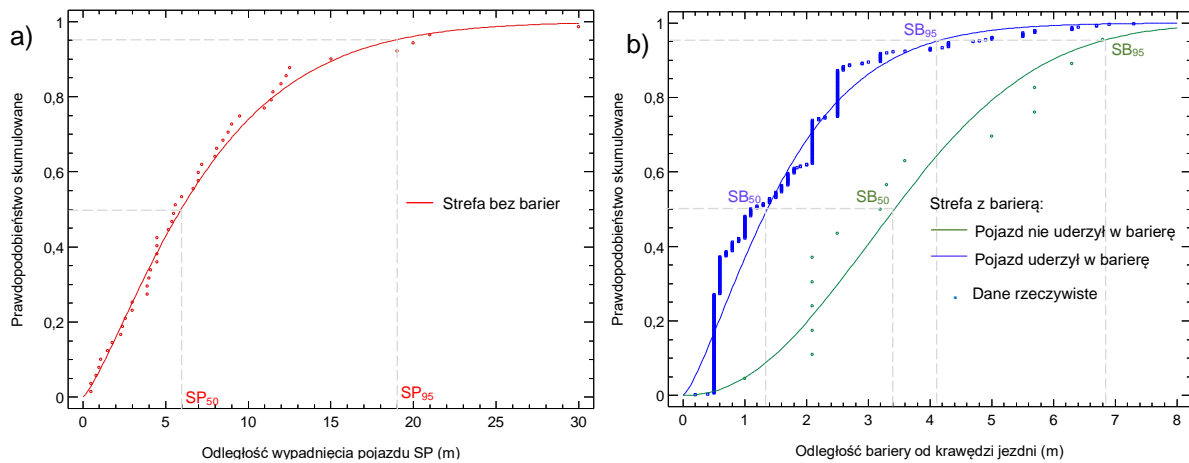
Sekwencja trzecia określa prawdopodobieństwo $P_3(D_q | w O_q, X_3)$ dojechania wypadającego pojazdu do bariery ochronnej i zderzenia się z nią. Jak można zauważyć na rysunku 7.3, sekwencję tą determinuje wiele czynników, w tym m.in. odległość bariery od krawędzi jezdni (SB), warunki i stan nawierzchni, stan pojazdu oraz zachowanie i reakcja kierowcy w momencie wypadnięcia z jezdni.

Z analiz przeprowadzonych dla odcinka autostrady A1 wynika (tablica 7.5), że 3,6% pojazdów wypadających z jezdni w strefie, w której znajduje się bariera ochronna nie dociera do niej i nie uderza w nią. Na odcinkach tych, bariery ochronne znajdowały się średnio w odległości od krawędzi jezdni równej 3,6 metra w zakresie między 0,2 - 7,3 metra (rysunek 7.7b).

Tab. 7.5 Liczba wypadnięć (LZDW) i udział wypadnięć pojazdów (UZDW) w wyniku których pojazd uderzył lub nie w barierę ochronną, z podziałem na strefę, w której się znajdował – na podstawie odc. autostrady A1 (odc. w.Rusocin – w. Toruń Południe)

Wypadnięcie pojazdu	Strefa bez barier (SBB)		Strefa z barierą (SZB)		Razem	
	LZDW _{w,SBB} [szt.]	UZDW _{w,SBB} [%]	LZDW _{w,SZB} [szt.]	UZDW _{w,SZB} [%]	LZDW [szt.]	UZDW [%]
Pojazd uderzył w barierę	-	0,0	433	96,4	433	87,5
Pojazd nie uderzył w barierę	46	100,0	16	3,6	62	12,5
Suma:	46	100,0	449	100	495	100,0

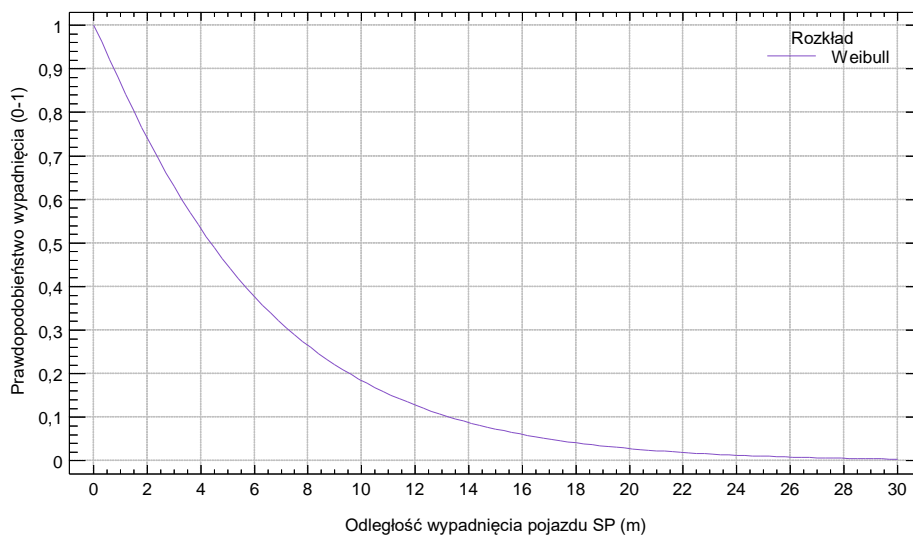
Źródło: Opracowanie własne



Rys. 7.7 Prawdopodobieństwo skumulowane: a) odległości wypadnięcia pojazdu w strefie bez barier ochronnych, (b) uderzenia w barierę w zależności od jej odległości od krawędzi jezdni – na podstawie odcinka autostrady A1 (odcinek węzeł Rusocin - węzeł Toruń Południe)

Źródło: Opracowanie własne

Badania wskazują również (rysunek 7.8), że prawdopodobieństwo uderzenia w barierę ochronną maleje wraz ze wzrostem bocznego przesunięcia bariery względem krawędzi jezdni. Szczegółowe analizy wykazały, że spadek prawdopodobieństwa zderzenia z barierą nie jest stały, początkowo drastycznie maleje, po czym zbiega się do stałej wartości. Sugeruje to, że dla barier ochronnych o określonym rozmiarze właściwą funkcją reprezentującą prawdopodobieństwo zderzenia w zależności od odległości jest funkcja wykładnicza. Podobne zależności zaobserwowano w pracach zajmujących się badaniem wpływu przydrożnych obiektów na konsekwencje zdarzeń [155],[111],[108].



Rys. 7.8 Prawdopodobieństwo odległości wypadnięcia pojazdu w rozkładzie Weibull'a - na podstawie odcinka autostrady A1 (odcinek węzeł Rusocin - węzeł Toruń Południe)

Źródło: Opracowanie własne

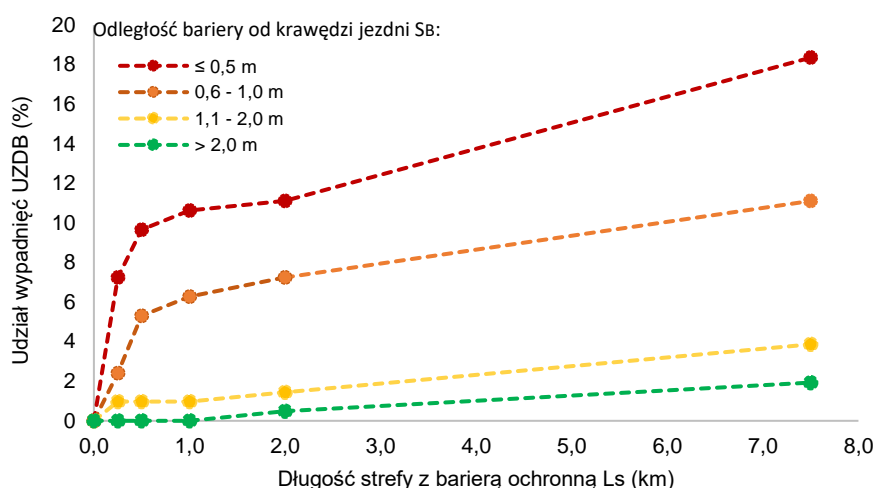
Połączenie sekwencji 2 i 3 pozwoliło zrozumieć właściwości analityczne tych dwóch sekwencji oraz określić prawdopodobieństwo zderzenia z barierą ochronną w określonym miejscu. W tabeli 7.6 i na rysunku 7.9 zestawiono dane liczby (LZDB) i udziału (UZDB) zderzeń z barierą na poboczu drogi

w najczęściej występujących grupach długości stref z barierą ochronną i odległościach bariery od krawędzi jezdni. Na podstawie udziału liczby zdarzeń w poszczególnych grupach, możliwe było oszacowanie prawdopodobieństwa, że pojazd uderzy w barierę o długości L_S oddalonej o S_B od krawędzi jezdni.

Tab. 7.6 Zestawienie danych o wypadnięciach pojazdów i zderzeniu z barierą w zależności od długości odcinków drogi z barierami L_S oraz odległości bariery od krawędzi jezdni S_B na odcinku autostrady A1 (odc.węzeł Rusocin - węzeł Toruń Południe)

Długość strefy z barierą L_S [km]	Odległość bariery od krawędzi jezdni S_B (m)							
	$S_B \leq 0,5$ m		$0,5 < S_B \leq 1,0$		$1,0 < S_B \leq 2,0$		$S_B > 2,0$	
	Liczba wypadnięć LZDB	Udział wypadnięć UZDB	Liczba wypadnięć LZDB	Udział wypadnięć UZDB	Liczba wypadnięć LZDB	Udział wypadnięć UZDB	Liczba wypadnięć LZDB	Udział wypadnięć UZDB
	(zd.)	(%)	(zd.)	(%)	(zd.)	(%)	(liczba)	(%)
$L_S \leq 0,25$	15	7,2	5	2,4	2	1,0	0	0,0
$0,25 < L_S \leq 0,50$	20	9,7	11	5,3	2	1,0	0	0,0
$0,50 < L_S \leq 1,00$	22	10,6	13	6,3	2	1,0	0	0,0
$1,00 < L_S \leq 2,00$	23	11,1	15	7,2	3	1,4	1	0,5
$2,00 < L_S \leq 8,00$	38	18,4	23	11,1	8	3,9	4	1,9
Suma:	118	57,0	67	32,4	17	8,2	5	2,4

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 7.9 Wykres udziału liczby wypadnięć pojazdów z jezdni na odcinkach z barierami o różnych długościach i odległości od krawędzi jezdni - na podstawie odcinka autostrady A1 (odcinek węzeł Rusocin - węzeł Toruń Południe)

Źródło: Opracowanie własne

W ramach badań zależności między długością strefy zagrożenia L_S i odległości bariery od krawędzi jezdni S_B , podjęto próbę budowy modelu regresji nieliniowej. Estymację parametrów modeli regresyjnych przeprowadzono przy użyciu oprogramowania Statgraphic oraz Statistica 10, z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów. Otrzymany model opisano wzorem 7.19:

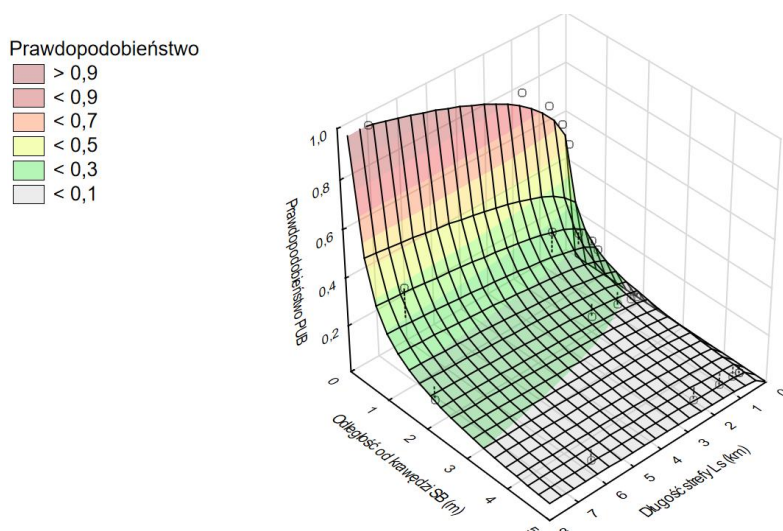
$$PUB = 0,197 \cdot L_S^{0,209} \cdot S_B^{-0,904} \quad (7.19)$$

gdzie:

PUB – prawdopodobieństwo uderzenia pojazdu w barierę ochronną (0-1),

L_S – długość strefy zagrożenia uderzania pojazdu z bariera ochronną (km),

S_B – odległość bariery od krawędzi jezdni (m).



Rys. 7.10 Model prawdopodobieństwa uderzenia pojazdu w barierę ochronną w przypadku wypadnięcia z jezdni - na podstawie odcinka autostrady A1 (odcinek węzeł Rusocin - węzeł Toruń Południe)

Źródło: Opracowanie własne

Jednym z kluczowych parametrów sekwencji 3 jest prędkość uderzenia. Jeśli prędkość pojazdu w momencie dojazdu do bariery jest większa od zera, to dochodzi do kontaktu z barierą, które może przyczynić się do powstania uszkodzeń bariery, a te z kolei stanowią dane wejściowe do sekwencji 4.

7.3.4. Prawdopodobieństwo uszkodzenia bariery ochronnej

Sekwencja nr 4 oraz 5 określa prawdopodobieństwo, że pojazd, który wypadł z drogi zderzył się z barierą ochronną i ją uszkodził w stopniu kwalifikującym się do naprawy lub nie. Wyznaczenie prawdopodobieństwa uszkodzenia bariery ochronnej w ramach sekwencji nr 4, jest niezwykle trudne do określenia. Wymaga ono bowiem znajomości i zdefiniowania minimalnej siły poprzecznej, jaka jest potrzebna do trwałej deformacji elementów bariery ochronnej. W ramach niniejszej pracy nie podjęto próby jej wyznaczenia, założono jedynie, że każdy pojazd, który dotarł do bariery, uszkodził barierę, lecz w różnym stopniu i zakresie (zarysowania lub trwałe deformacje o różnej długości i ugięciach). Ocena i kwalifikacja bariery ochronnej jako uszkodzonej, zależy od przyjętych przez zarządcę drogi wytycznych oceny uszkodzeń barier ochronnych [55],[8]. Wytyczne te powinny określać, kiedy naprawa barier ochronnych jest konieczna, które z barier należy niezwłocznie wymienić oraz wyszczególnić klasyfikację stopnia uszkodzenia barier [50]. W Polsce nadal brakuje jednolitych zasad dotyczących oceny uszkodzeń poszczególnych rodzajów barier ochronnych. Przyjęto zatem, że aktualna ocena klasyfikacji uszkodzeń zależy od utrzymywanych standardów bezpieczeństwa oraz wymagań estetyki drogi. Wysokie wymagania estetyki drogi zakładają wymianę wszystkich, nawet najdrobniejszych uszkodzeń barier ochronnych (zarysowania bez większych trwałych deformacji systemu).

Do odcinków o wysokich wymaganiach estetyki drogi oraz standardów bezpieczeństwa, zakwalifikowano te, na których występuje model utrzymania drogi: „Utrzymaj Standard A” (US-A). Zgodnie z założeniami, prawdopodobieństwo oceny bariery jako uszkodzonej wyniesie (wzór 7.20):

$$P_{4,A}(U_q | D_k, X_4) = 1,0 \quad (7.20)$$

Do odcinków dróg o niższych wymaganiach estetyki drogi i standardach bezpieczeństwa, przyjęto wszystkie pozostałe odcinki, na których występuje model „Utrzymaj Standard B” (US-B) lub „Model Klasyczny” (MK). Prawdopodobieństwo oceny bariery jako uszkodzonej przyjęto (wzór 7.21):

$$P_{4,B}(U_q|D_k, X_4) = 0,8 \quad (7.21)$$

Przyjęte wartości prawdopodobieństwa oceny bariery jako uszkodzonej, wymagają bardziej szczegółowych badań i analiz, dlatego ich wartości należy ostrożnie dobierać i interpretować.

W celu wyznaczenia szacunkowego zakresu prawdopodobieństwa wielkości uszkodzenia bariery ochronnej, posłużono się miarą energii kinetycznej poprzecznej pojazdu (EKL), którą osiągnie i utrzyma pojazd do momentu kontaktu z barierą. Różnice między poszczególnymi uszkodzeniami widoczne są w zakresie uszkodzeń do jakich może dojść w przypadku uderzenia pojazdu z różną energią kinetyczną poprzeczną *EKL* (rysunek 6.4b).

Odnosząc się do sekwencji nr 5 stwierdzono, że określenie prawdopodobieństwa zarejestrowania bądź niezarejestrowania przez służby utrzymaniowe powstałych uszkodzeń, wymagałoby podobnie, jak w przypadku sekwencji nr 4, przeprowadzenia dedykowanych w tym celu badań empirycznych.

Zebrane w ramach badań terenowych dane na temat uszkodzeń barier ochronnych na odcinkach dróg, nie dają możliwości wykonania dokładnych analiz tego typu. Dane te dotyczą wyłącznie uderzeń w barierę ochronną, które zostały odnotowane przez służby utrzymaniowe. Nie ma zatem podstaw na przeprowadzenie oceny liczby rejestrowanych zdarzeń w stosunku do tych, które nie są rejestrowane. Wiadome jest jedynie, że obecna ocena uszkodzeń barier ochronnych, nie polega na klasyfikacji (brak wytycznych do ich oceny), podlega ona jedynie subiektywnej ocenie pracownika służby utrzymaniu, uwarunkowanej wyłącznie standardem utrzymania drogi i wewnętrznymi zaleceniami zarządcy drogi. W związku z powyższym, za miarę ogólnego prawdopodobieństwa zarejestrowania zdarzeń z barierami ochronnymi można przyjąć współczynnik wykrywalności zdarzeń (WZA), przedstawionego w rozdziale 5.4.3. Prawdopodobieństwo zarejestrowania uszkodzeń barier ochronnych będzie zatem wynosiło:

- 1) w przypadku modelu utrzymania drogi „Utrzymaj Standard A” (US-A):

$$P_{5,US-A}(R_q|U_k, X_5) = 1,0 \quad (7.22)$$

- 2) w przypadku modelu utrzymania drogi „Utrzymaj Standard B” (US-B):

$$P_{5,US-B}(R_q|U_k, X_5) = 0,8 \quad (7.23)$$

- 3) w przypadku „Modelu Klasycznego” utrzymania drogi (MK):

$$P_{5,MK}(R_q|U_k, X_5) = 0,5 \quad (7.24)$$

7.3.5. Podsumowanie

Z przeprowadzonych analiz wynika, że prawdopodobieństwo wypadnięcia pojazdu z jezdni i uderzenia pojazdu w barierę ochronną można wyznaczyć na podstawie analizy dostępnych danych historycznych na temat uszkodzeń infrastruktury drogowej. Na przykładzie odcinka autostrady A1, wyznaczone wartości prawdopodobieństwa warunkowego dla poszczególnych sekwencji, zestawiono w tabeli 7.7 (co stanowi spełnienie części celu naukowego CN-2).

Tab. 7.7 Prawdopodobieństwo zarejestrowania uszkodzenia bariery ochronnej - na przykładzie odcinka autostrady A1 (odcinek węzeł Rusocin - węzeł Toruń Południe)

Sekwencja	Opis prawdopodobieństwa	Postać miary prawdopodobieństwa	Prawdopodobieństwo
1	Pojazd wypadł z jezdni	$P_1(W X_1, Z_1)$	0,400 (wypadnięć/mln poj.km/rok)
2	Pojazd znalazł się w strefie z barierą	$P_2(w O_q W, X_2)$	0,907
	Pojazd znalazł się w strefie bez barier	$P_2(poza O_q W, X_2)$	0,125
3	Pojazd dojechał do bariery i w nią uderzył	$P_3(D_q w O_k, X_3)$	0,964
	Pojazd nie dojechał do bariery	$P_2(ND_q w O_k, X_3)$	0,036
4	Pojazd uderzył i uszkodził barierę	$P_4(U_q D_q, X_4)$	$P_{4,A} = 1,0^1$ $P_{4,B} = 0,8^2$
5	Zarejestrowano uszkodzenie bariery	$P_5(R_q U_q, X_5)$	$P_{5,US-A} = 1,0$ $P_{5,US-B} = 0,8$ $P_{5,MK} = 0,5$
Prawdopodobieństwo łączne: (prawdopodobieństwo zarejestrowania uszkodzeń bariery:			$P_{ZDB} = 0,350$ (wypadnięć/mln poj.km/rok)

¹Przy założeniu, że każde zarysowanie lub trwała deformacja kwalifikowana jest jako uszkodzenie bariery.

²Przy założeniu, że wyłącznie trwałe i znaczące deformacje kwalifikowane są jako uszkodzenie bariery.

Źródło: Opracowanie własne

Spodziewany poziom prawdopodobieństwa liczby zdarzeń z barierami ochronnymi wyznaczony w sekwencji 1, można z góry określić na podstawie warunków panujących na drodze wykorzystując do tego wzór 7.8. Wskaźnik ten, wyrażony poprzez koncentrację wypadnięć pojazdów z jezdni (K_{ZDWi}), podawany jako liczba wypadnięć na milion przejechanych pojazdokilometrów. Biorąc pod uwagę K_{ZDWi} i wszystkie determinanty (X_2, X_3, X_4, X_5), oczekiwaną liczbę zarejestrowanych zdarzeń z barierami na i-tym odcinku drogi w przeciągu roku t można zapisać w postaci równania (wzór 7.25):

$$\begin{aligned}
 E_i(R_q | X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, Z^1) &= PP_i \cdot K_{ZDWi} \cdot P_{2-5}(R_q | W, X^2, X^3, X^4) \\
 &= (365 \cdot SDR_{t,i} \cdot DL_i / 10^6) \cdot K_{ZDWi} \cdot P_2(w O_q | W, X_2) \cdot P_3(D_q | w O_q, X_3) \\
 &\quad \cdot P_4(U_q | D_q, X_4) \cdot P_5(R_q | U_q, X_5)
 \end{aligned} \tag{7.25}$$

W przypadku, gdy nieznana jest wartość wskaźnika koncentracji wypadnięć a znana jest wartość wskaźnika koncentracji zdarzeń z barierą ochronną (K_{ZDB}), oczekiwaną liczbę zarejestrowanych zdarzeń z barierami na odcinku drogi można zapisać w postaci równania (wzór 7.26):

$$E_i(R_q) = PP_i \cdot K_{ZDBi} \tag{7.26}$$

Znając warunki panujące na i-tym odcinku drogi, wskaźnik liczby wypadnięć (K_{ZDW}) i wskaźnik liczby zdarzeń z barierami ochronnymi (K_{ZDB}), wykorzystywany we wzorze 7.25 i 7.26, można oszacować na podstawie warunków panujących na drodze i jej otoczeniu w postaci ogólnego modelu opisanego równaniem 7.27.

$$K_{ZDBi} = \left[e^{(\beta_0 + \sum_{j=1}^J \beta_j \cdot x_{ij} + C_i)} \right] \tag{7.27}$$

7.4. Modele długości uszkodzeń bariery ochronnej

7.4.1. Metodyka

Określenie wpływu wszystkich czynników wpływających na funkcjonowanie barier ochronnych jest bardzo trudne. W praktyce stosowane są dwie metody badawcze: metody statystyczne i metody mechanistyczne [26].

Metody statystyczne polegają na tym, że na podstawie dostępnych, szczegółowych danych o zdarzeniach niebezpiecznych na drogach identyfikuje się rzeczywiste przypadki uderzenia pojazdu w barierę drogową, zbiera dane: o miejscu zdarzenia, o warunkach konstrukcyjnych barier, o ruchu drogowym i innych okolicznościach tych zdarzeń. Następnie korzystając z danych zebranych w bazach buduje się modele matematyczne określające zależność parametrów funkcjonalnych barier oraz częstości i wielkości uszkodzeń od najbardziej istotnych czynników. Modele te mogą dotyczyć pojedynczych zdarzeń, jak i grupy zdarzeń na odcinkach dróg. To podejście wykorzystywane jest, gdy mamy dostęp do szczegółowych danych historycznych na temat zdarzeń z barierami ochronnymi i ich okoliczności wystąpienia.

Metody mechanistyczne polegają na tym, że do obliczenia wielkości uszkodzeń i innych parametrów funkcjonalnych barier w wyniku uderzenia pojazdu w barierę wykorzystuje się zależności fizyczne, które pozwalają na zrozumienie fizycznej zależności (interakcji) między pojazdami a barierą drogową. Istnieją metody przewidywania prawdopodobieństwa przekroczenia zdolności barierowej. Najczęściej wykorzystuje się zależności między siłą uderzenia pojazdu w barierę drogową w zależności od masy pojazdu, prędkości i kąta uderzenia pojazdu w barierę [167],[170]. Opracowane w ten sposób modele dotyczą najczęściej pojedynczych uderzeń pojazdu w określoną barierę, rzadziej wykorzystuje się je do opisu efektu występowania grupy zdarzeń na odcinkach dróg (wówczas stosuje się sumowanie występowania częstości występowania różnych rodzajów zdarzeń). To podejście wykorzystywane jest, gdy nie mamy dostępu do historycznych danych o wypadkach z barierami drogowymi.[167],[170].

W ramach prowadzonych badań wykorzystano oba podejścia. Podejście statystyczne przedstawiono w rozdziałach 5 i 8, które opisują wyniki badań terenowych i zbudowanych na ich podstawie modeli matematycznych szacowania częstości i wielkości uszkodzeń barier na odcinkach dróg. Podejście mechanistyczne wykorzystano w ramach badań skutków pojedynczego zdarzenia pojazdu z barierą ochronną przeprowadzonych w niniejszym rozdziale.

7.4.2. Modele istotnych parametrów barier

Korzystając ze zbioru uzyskanych danych i analiz przeprowadzonych w rozdziale 6.2 i 6.3, za pomocą analizy regresji, opracowano grupę modeli opisujących szerokość pracującą (WM) i ugięcie dynamiczne bariery (DM). Przedstawione w tabeli 7.8 i 7.9 modele prezentują, w sposób ilościowy, wpływ najbardziej istotnych czynników na poszczególne parametry barier drogowych. Na rysunkach 7.11 i 7.12 przedstawiono ilustracje graficzne wybranych modeli zmienności analizowanych parametrów barier ochronnych.

Tab. 7.8 Zestawienie modeli opisujących ugięcie dynamiczne bariery (DM) oszacowane na bazie wyników badań poligonowych i symulacyjnych

Rodzaj bariery	Model – Ugięcie dynamiczne bariery DM (m)	R_{sk}^2	Wzór
Stalowe	$DM_{S1} = 0,263 \cdot (DM_n/100)^{0,619} \cdot EKL^{0,459} \cdot VPLS^{0,735} \cdot \exp(-1,007 \cdot BR + 0,035 \cdot MP/1000)$	0,885	(7.28)
	$DM_{S2} = 0,010 \cdot K_n^{-0,336} \cdot EKL^{0,875} \cdot \exp(DM_n \cdot 1,818)$	0,859	(7.29)
Linowe	$DM_{L1} = 0,045 \cdot K_n^{-0,324} \cdot EKL^{0,604} \cdot VPL^{0,372} \cdot MP^{0,099}$	0,927	(7.30)
	$DM_{L1} = 0,045 \cdot K_n^{-0,325} \cdot EKL^{0,702} \cdot VPL^{0,163} \cdot KU^{0,015}$	0,927	(7.31)
Betonowe	$DM_{B1} = 0,027 \cdot KU^{1,627} \cdot EKL^{0,220} \cdot VP^{-1,689}$	0,894	(7.32)

Źródło: Opracowanie własne

Tab. 7.9 Zestawienie modeli opisujących szerokość pracującą bariery (WM) oszacowane na bazie wyników badań poligonowych i symulacyjnych

Rodzaj bariery	Model – Szerokość pracująca bariery WM (m)	R_{sk}^2	Wzór
Stalowe	$WM_{S1} = 0,782 \cdot K^{-0,320} \cdot EKL^{0,384} \cdot VPL^{0,106}$	0,870	(7.33)
	$WM_{S2} = 0,215 \cdot K^{-0,298} \cdot VPL^{0,888} \cdot \exp(-0,110 \cdot BR + 0,078 \cdot MP/1000)$	0,872	(7.34)
Linowe	$WM_{L1} = 2,212 \cdot K^{-0,511} \cdot EKL^{0,461} \cdot VPL^{-0,044}$	0,960	(7.35)
	$WM_{L2} = 0,686 \cdot K^{-0,548} \cdot VPL^{0,836} \cdot (MP/1000)^{0,459}$	0,961	(7.36)
Betonowe	$WM_{B1} = 2,118 \cdot K^{-0,252} \cdot EKL^{0,250} \cdot \exp(-0,135 \cdot VPL/100)$	0,927	(7.37)
	$WM_{B2} = 1,516 \cdot K^{-0,258} \cdot VPL^{0,484} \cdot \exp(0,014 \cdot MP/1000)$	0,890	(7.38)

Źródło: Opracowanie własne

Oznaczenia wzorów z tabeli 7.8 i 7.9:

$DM_{S,L,B,W}$ – znormalizowane ugięcie dynamiczne bariery, ustalone w wyniku testu symulacyjnego bariery stalowej (S), linowej (L), betonowej (B), ogólne dla wszystkich rodzajów barier (W) (m),

DM_n – znormalizowane ugięcie dynamiczne bariery, ustalone w wyniku testu zderzeniowego podczas certyfikacji bariery (m),

WM – znormalizowana szerokość pracująca bariery, ustalona w wyniku testu symulacyjnego bariery (m),

K – sztywność bariery, obliczona na podstawie parametrów bariery uzyskanych w czasie testu symulacyjnego (kJ/m²),

K_n – sztywność normatywna bariery, obliczona na podstawie parametrów bariery uzyskanych w czasie normowego testu zderzeniowego podczas certyfikacji bariery (kJ/m²),

BT – typ bariery: bariera drogowa ($BT = 1$); bariera mostowa ($BT = 2$),

WB – szerokość bariery (m),

EKL – energia kinetyczna poprzeczna pojazdu uderzającego w barierę w czasie testu symulacyjnego (kJ),

EKP – energia kinetyczna podłużna pojazdu uderzającego w barierę w czasie testu symulacyjnego (kJ),

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

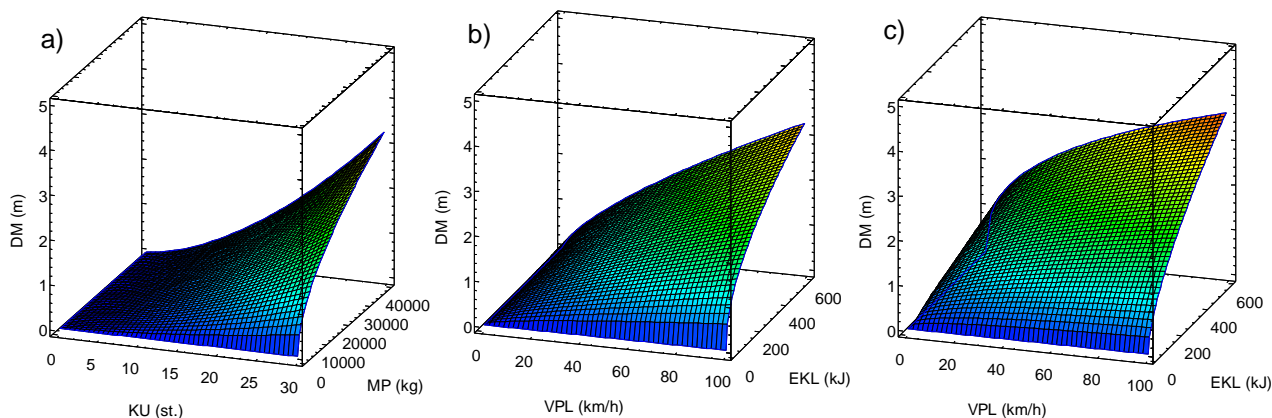
VP – prędkość pojazdu (km/h),

KU – kąt uderzenia pojazdu (stopnie).

MP – masa pojazdu (kg),

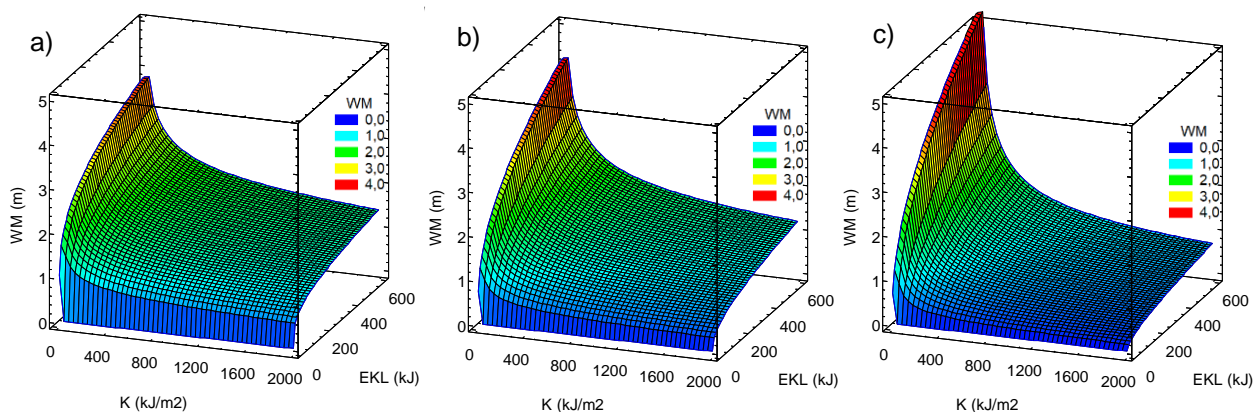
Z przedstawionych na rysunkach 7.11 i 7.12 wykresów wynika, że ugięcie dynamiczne bariery DM oraz szerokość pracująca bariery (WM) zwiększają się wraz ze wzrostem energii kinetycznej poprzecznej pojazdu (EKL) i jej najbardziej istotnej składowej, prędkości poprzecznej pojazdu (VPL), a zmniejsza się wraz ze wzrostem sztywności bariery (K) lub wzrostem podatności barier ($S=1/K$).

Jednakże ograniczona liczba testów symulacyjnych, wymaga ostrożnej interpretacji przedstawionych modeli w szczególności w brzegowych zakresach zmiennych niezależnych.



Rys. 7.11 Wykresy zależności ugięcia dynamicznego DM (m) wybranej bariery: a) betonowej (modelu DM_{B1}), stalowej (modelu DM_{S1}), c) linowej (modelu DM_{L1}) od: masy MP (kg) i kąta uderzenia pojazdu KU (st.), energii poprzecznej EKL (kJ) oraz prędkości poprzecznej pojazdu uderzającego w barierę VPL (m/s)

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 7.12 Wykresy zależności szerokości pracującej WM (m) bariery: a) betonowej (modelu WM_{B1}) b) stalowej (modelu WM_{S1}) i c) linowej (modelu WM_{L1}) od: sztywności bariery K (kJ/m²) oraz energii kinetycznej poprzecznej pojazdu EKL (kJ)

Źródło: Opracowanie własne

7.4.3. Modele szacowania wielkości uszkodzeń pojedynczych zdarzeń

Wykorzystując ponownie dane uzyskane z badań poligonowych i symulacyjnych, opracowano modele służące do szacowania wielkości uszkodzeń barier ochronnych. Wyszczególniono dwie grupy modeli opisowych i prognostycznych dotyczących dwóch analizowanych parametrów uszkodzeń barier ochronnych: długości styku pojazdu z barierą (LSP) i długości uszkodzeń barier ochronnych (LU). Przedstawione w tabeli 7.10 i 7.11 modele prezentują w sposób ilościowy wpływ najbardziej istotnych czynników na wielkość uszkodzeń barier ochronnych.

Tab. 7.10 Zestawienie modeli opisujących długość styku pojazdu z barierą (LSP) oszacowanych na bazie wyników badań poligonowych i symulacyjnych

Rodzaj bariery	Model – Długość styku pojazdu z barierą LSP (m)	R_{sk}^2	Wzór
Stalowe	$LSP_{S2} = 0,196 \cdot DM^{0,643} \cdot VPL^{0,491} \cdot MP^{0,472} \cdot KU^{-0,387} \cdot \exp(-0,128 \cdot EKL/100)$	0,798	(7.39)
Linowe	$LSP_{S4} = 29,30 \cdot DM^{0,727} \cdot EKL^{-0,058} \cdot EKP^{0,340} \cdot MP^{-0,074} \cdot KU^{-0,783}$	0,837	(7.40)
Betonowe	$LSP_{S5} = 0,594 \cdot DM^{0,868} \cdot (VPL/1000)^{-0,839}$	0,786	(7.41)

Źródło: Opracowanie własne

Tab. 7.11 Zestawienie modeli opisujących długość uszkodzeń bariery ochronnej (LU) oszacowanych na bazie wyników badań poligonowych i symulacyjnych

Rodzaj bariery	Model – Długość uszkodzeń LU (m)	R_{sk}^2	Wzór
Stalowe	$LU_{S1} = 0,129 \cdot DM^{0,377} \cdot VPL^{0,823} \cdot MP^{0,436} \cdot KU^{-0,451} \cdot \exp(-0,086 \cdot EKL/100)$	0,729	(7.42)
Linowe	$LU_{L1} = 4,744 \cdot DM^{0,856} \cdot EKL^{-0,296} \cdot EKP^{0,529} \cdot MP^{-0,034} \cdot KU^{-0,296}$	0,807	(7.43)
Betonowe	$LU_{B1} = 14,4 \cdot DM^{0,604} \cdot Kn^{-0,071} \cdot EKL^{0,080} \cdot KU^{0,401}$	0,842	(7.44)

Źródło: Opracowanie własne

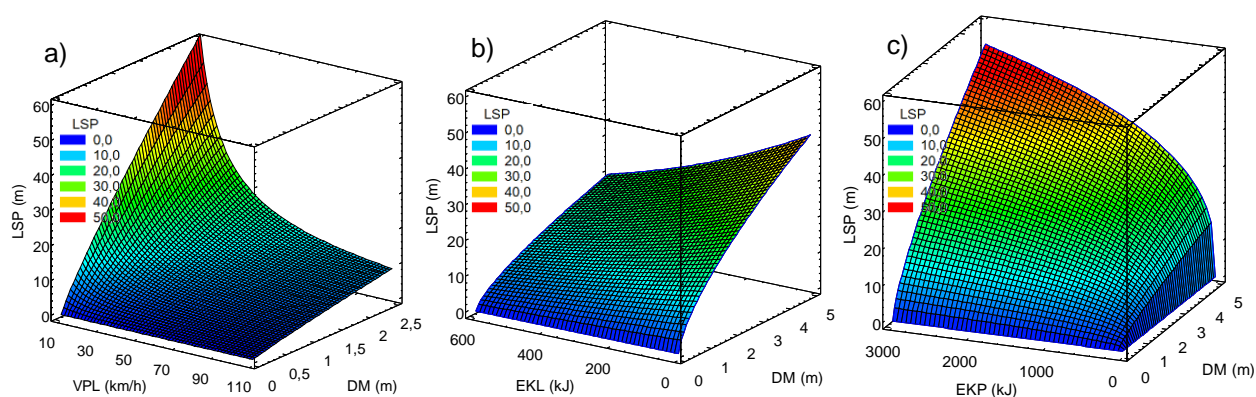
Oznaczenia wzorów z tabeli 7.10 i 7.11:

 LSP – długość styku pojazdu z barierą (m), LU – długość uszkodzenia bariery (m), LD – długość deformacji (przesunięcia) bariery (m), DM – znormalizowane ugięcie dynamiczne bariery, ustalone w wyniku testu symulacyjnego bariery (m), WM – szerokość pracująca bariery, ustalone w wyniku testu symulacyjnego bariery (m), Kn – sztywność normatywna bariery, obliczona na podstawie parametrów bariery uzyskanych w czasie normowego testu zderzeniowego podczas certyfikacji bariery (kJ/m²), VPL – prędkość poprzeczna pojazdu uderzającego w barierę w czasie testu symulacyjnego (km/h), EKL – energia kinetyczna poprzeczna pojazdu uderzającego w barierę w czasie testu symulacyjnego (kJ), EKP – energia kinetyczna podłużna pojazdu uderzającego w barierę w czasie testu symulacyjnego (kJ), KU – kąt uderzenia pojazdu (stopnie). MP – masa pojazdu (kg),

Na rysunkach 7.13 i 7.14 przedstawiono ilustracje graficzne wybranych modeli zmienności analizowanych parametrów uszkodzeń barier ochronnych. Na podstawie analizy uzyskanych wyników stwierdzono, że:

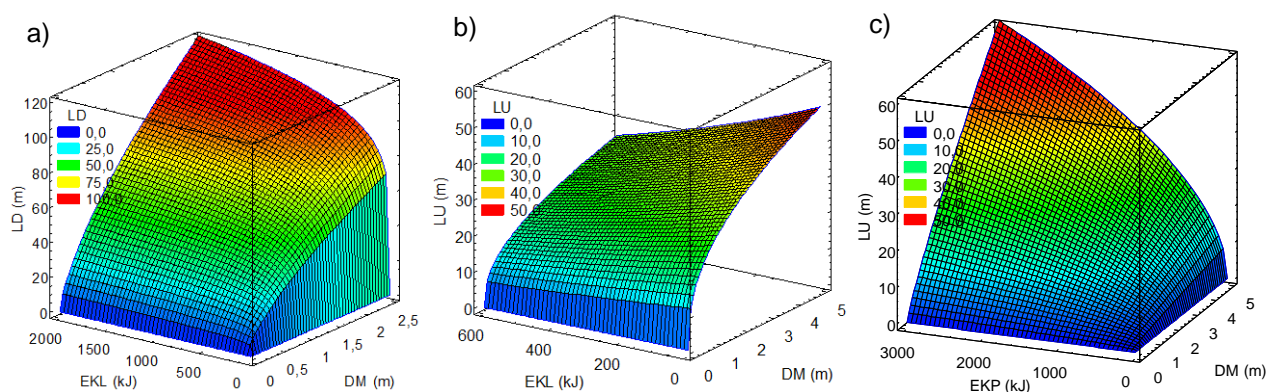
- istotny wpływ na wielkość uszkodzeń barier ma rodzaj bariery ochronnej: w przypadku barier stalowych i betonowych bardzo istotne znaczenie ma sztywność (K) bariery mierzona ugięciem dynamicznym (DM),
- wraz ze wzrostem sztywności barier (K) zmniejsza się długość uszkodzeń barier (LU), natomiast wraz ze wzrostem podatności bariery (1/K) wzrasta także długość uszkodzeń (LU),
- wraz ze wzrostem energii kinetycznej poprzecznej (EKL), zmniejsza się wielkość uszkodzeń barier stalowych i linowych, wynika to prawdopodobnie z faktu, im większa energia poprzeczna uderzenia pojazdu w barierę, tym lepiej bariera pracuje jako sprężyna i wcześniej wyprowadza pojazd uderzający w barierę z powrotem na jezdnię, ponadto przedstawione wyniki badań symulacyjnych

- wskazują, że w przypadku barier linowych występuje duży udział uszkodzeń barier o dużej długości (LU) przy małej prędkości poprzecznej wynikającej z małego kąta uderzenia pojazdu w barierę, w tym przypadku pojazd „ślizga się po barierze” i uszkadza słupki na dość długim odcinku,
- w przypadku barier betonowych im większa energia kinetyczna uderzenia pojazdu w barierę (EKL) tym większe uszkodzenia bariery mierzonej długością odcinka, na którym uległa deformacji (przesunięciu) względem pierwotnego położenia (LD).
 - długość styku pojazdu z barierą ochronną (LSP) wpływa proporcjonalnie na zwiększenie długości uszkodzeń barier ochronnych (LU). W przypadku barier stalowych i linowych wartości tych parametrów są zbliżone i nie wykazują istotnych różnic. W przypadku barier betonowych długość styku pojazdu z barierą (LSP) wpływa znacząco na wzrost deformacji bariery (LD).
- Ograniczona liczba testów symulacyjnych, wymaga ostrożnej interpretacji przedstawionych modeli w szczególności w brzegowych zakresach zmiennych niezależnych.



Rys. 7.13 Rozkłady wyników badań symulacyjnych zależności długości styku pojazdu z barierą LSP (m) dla wybranych barier: a) betonowych, b) stalowych, c) linowych (modelu WM_{L1}), od: ugięcia dynamicznego DM (m), prędkości poprzecznej pojazdu uderzającego w barierę VPL (m/s), energii kinetycznej pojazdu EKL i EKP (kJ)

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 7.14 Rozkłady wyników badań symulacyjnych zależności uszkodzeń bariery LU (m) i długości deformacji LD (m) dla bariery: a) betonowej, b) stalowej, c) linowej od: ugięcia dynamicznego DM (m) oraz energii kinetycznej poprzecznej EKL i EKP (kJ)

Źródło: Opracowanie własne

7.4.4. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza badań terenowych i symulacyjnych pozwoliła na szersze zrozumienie i opisanie czynników wpływających na wielkość uszkodzeń barier w wyniku pojedynczego uderzenia pojazdu (co stanowi spełnienie części celu naukowego CN-2).

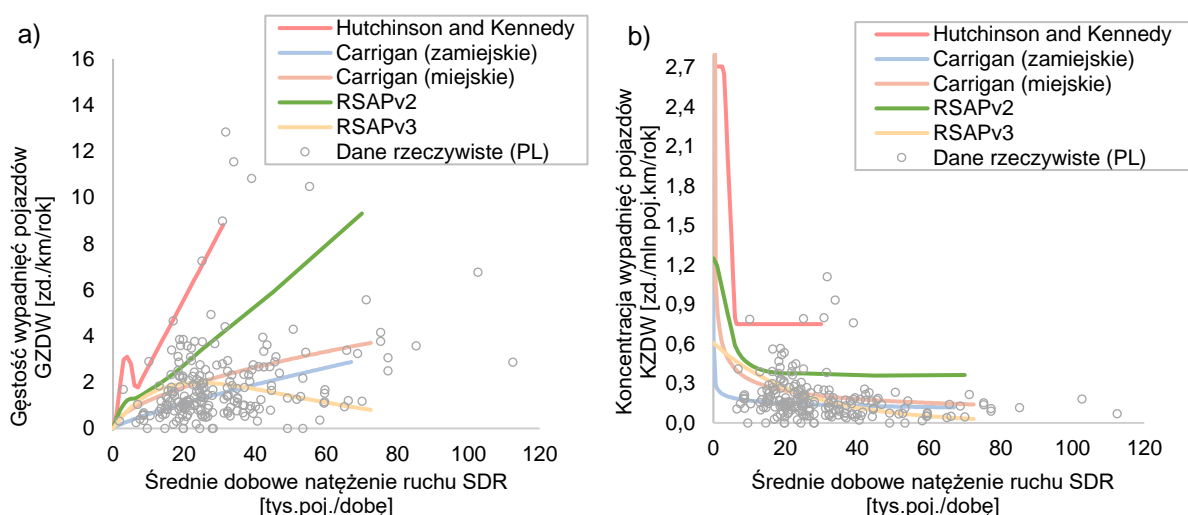
Na podstawie analizy wyników badań można stwierdzić, że:

- na wielkość uszkodzeń barier ochronnych istotny wpływ ma rodzaj bariery oraz jej parametry konstrukcyjne, takie jak: sztywność (K) lub podatność bariery mierzona ugięciem dynamicznym (DM), wraz ze wzrostem sztywności barier zmniejsza się długość uszkodzeń barier (LU),
- niejednoznaczny wpływ na wielkość uszkodzeń ma energia kinetyczna uderzającego pojazdu, gdyż wraz ze wzrostem energii kinetycznej poprzecznej (EKL),
 - zmniejsza się wielkość uszkodzeń barier stalowych i linowych, wynika to prawdopodobnie z faktu, im większa energia poprzeczna uderzenia pojazdu w barierę, tym lepiej bariera pracuje jako sprężyna i wcześniej wyprowadza pojazd uderzający w barierę z powrotem na jezdnię, a powyżej prędkości poprzecznej $V_{PL} > 30$ km/h następują przebicia bariery lub zaklinowania pojazdu pod barierą, wówczas uszkodzenia są mniejszych rozmiarów;
 - zwiększa się wielkość deformacji barier betonowych LD,
- w przypadku barier o normalnej sztywności, występuje duże prawdopodobieństwo przebicia bariery lub zaklinowania się pojazdu pod barierą w przypadku, gdy energia kinetyczna jest zbliżona lub większa niż 200 kJ lub kąt uderzenia pojazdu w barierę (KU) jest większy niż 20 stopni.

8. MODELOWANIE LICZBY I WIELKOŚCI USZKODZEŃ BARIER OCHRONNYCH SPOWODOWANYCH UDERZENIEM POJAZDÓW NA ODCINKACH DRÓG

8.1. Wprowadzenie

Empiryczny związek pomiędzy liczbą wypadnięć pojazdów z jezdni, a geometrią i wyposażeniem drogi, jak np. łuki poziome, pionowe, szerokość pasów ruchu czy pobocza, zostały omówione w wielu wcześniejszych badaniach [48],[119],[32],[30]. Niestety w większości z tych badań nie wyróżniano wypadnięć pojazdów z jezdni, czego konsekwencją było uszkodzenie bariery ochronnej. Zależności między liczbą wypadnięć pojazdów, a geometrią drogi były zazwyczaj ustalane z wykorzystaniem konwencjonalnych modeli regresyjnych. W badaniach częstości wypadnięć posługiwano się jednostką liczby wypadnięć/mi/rok, liczby wypadnięć/km/rok lub ich pochodną w odniesieniu do natężenia ruchu, tj. wskaźnika liczby wypadnięć wyrażonego w jednostkach wypadnięć na milion przejechanych pojazdów na odległość jednej mili (mln poj.mi) i wypadnięć na milion pojazdokilometrów (mln poj.km). Wskaźnik określał koncentrację liczby zdarzeń w zależności od natężenia ruchu pojazdów. Podstawowe wykresy częstości wypadnięć dla dróg dwujezdniowych w oparciu o badania Hutchinsona i Kennedygo [76], Carrigana [152], oraz programu RSAP [119] pokazano na rysunku 8.1. Wykresy przedstawiono na tle zebranych danych rzeczywistych z badań terenowych, prowadzonych w ramach niniejszej dysertacji.



Rys. 8.1 Dostępne modele częstości wypadnięć pojazdów na drogach dwujezdniowych: (a) gęstości wypadnięć pojazdów, (b) koncentracji wypadnięć pojazdów, na tle danych rzeczywistych z badań terenowych własnych

Źródło: opracowanie własne na podstawie [151]

Analizując zakres empirycznych zależności dotyczących częstości wypadnięć pojazdów z jezdni, stwierdzono, że pokrywa się on niemal w całości z zebranymi danymi dotyczącymi częstości i koncentracji zdarzeń z barierami ochronnymi na odcinkach dróg dwujezdniowych w Polsce. Z badań prawdopodobieństwa uszkodzeń barier ochronnych na drogach dwujezdniowych (rozdział 7) wynika, że zdarzenia z barierami mogą stanowić do 94% wszystkich wypadnięć. Założono zatem, że ramowy model częstości zdarzeń z barierami ochronnymi dla polskich warunków można zbudować w oparciu o znane lub z góry założone warunki brzegowe, które definiują kształt krzywej. Proponowane w literaturze ramy wykorzystują przede wszystkim modele regresji Poissona. Modele regresji Poissona są szeroko

stosowane w celu ustalenia zależności między natężeniem i strukturą ruchu pojazdów, geometrią drogi i innymi potencjalnymi zmiennymi objaśniającymi.

Pomimo jasnych i klarownych wzorców modelowania częstości zdarzeń drogowych w wyniku wypadnięcia pojazdu z jezdni, odwzorowanie zależności w odniesieniu do barier ochronnych w warunkach polskich nie jest prostym zadaniem. Biorąc pod uwagę wstępne analizy postawiono następujące pytania badawcze:

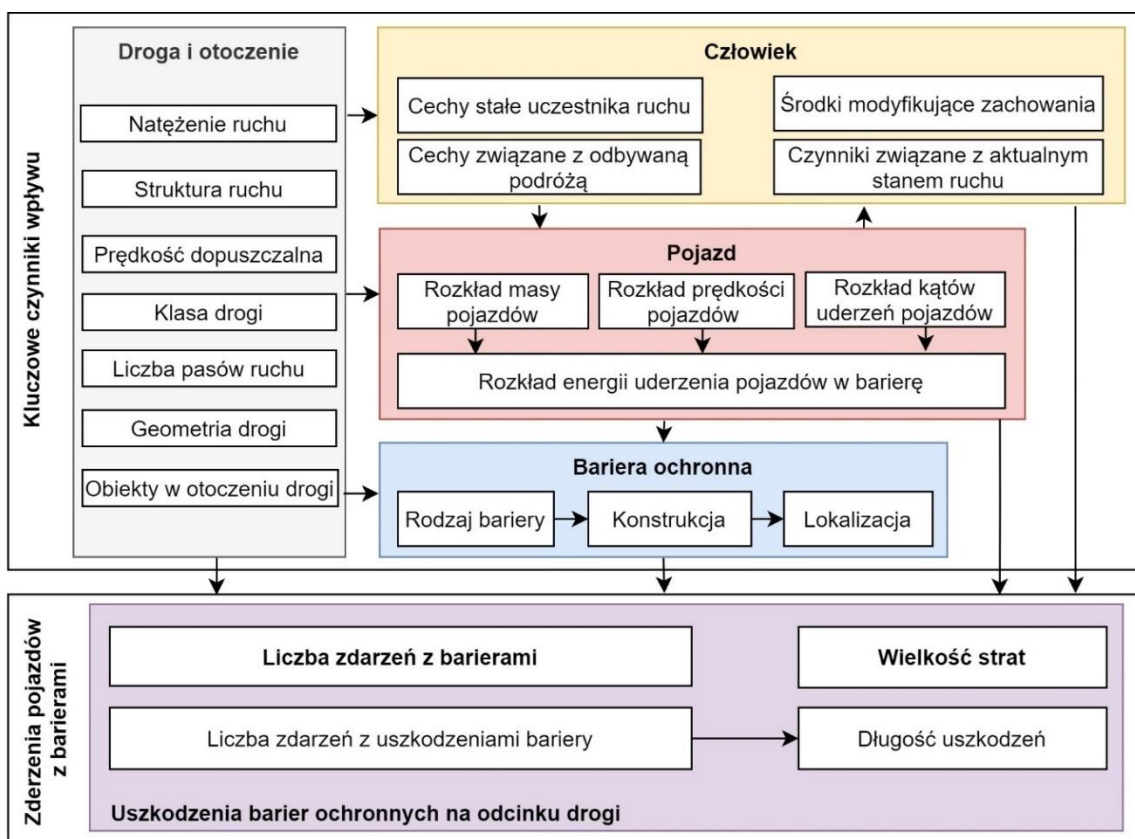
PB 8.1. Jakie istotnie czynniki wpływają na częstość i wielkość uszkodzeń barier ochronnych na odcinkach dróg?

PB 8.1. Jakie przyjęte zasady i procedury modelowania wpływu wybranych czynników na częstość i wielkość uszkodzeń barier ochronnych na odcinkach dróg?

PB 8.1. Jak dobrać najbardziej istotne zmienne i ocenić ich wpływ na częstość i wielkość uszkodzeń.

Przegląd literatury nie udzielił jednoznacznych odpowiedzi na te pytania. W pracy podjęto próbę odpowiedzi na postawione pytania, w odniesieniu do danych empirycznych z polskich odcinków dróg dwujezdniowych A+S+GP, a wymienione problemy potraktowano jako problemy badawcze.

W odpowiedzi na postawione pytania badawcze, wypracowano w pierwszej kolejności schemat czynników wpływających na poszczególne poziomy prawdopodobieństwa i konsekwencje zdarzeń z udziałem drogowych barier ochronnych na odcinku drogi.



Rys. 8.2 Schemat czynników wpływających na poziom prawdopodobieństwa i konsekwencje zdarzeń niebezpiecznych z udziałem drogowej bariery ochronnej na odcinku drogi

Źródło: Opracowanie własne

Jak pokazano na rysunku 8.2, poziom prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzeń pojazdów z drogową barierą ochronną na odcinku drogi wywołującego określoną wielkość strat (w postaci uszkodzeń barier, uszkodzeń pojazdów, obrażeń uczestników zdarzeń), zależy od trzech podstawowych czynników: 1) rodzaju i charakterystyki pojazdów poruszających się po odcinku drogi, tj. masy, prędkości i możliwych do uzyskania przez nie kątów wypadnięć z jezdni, 2) udziału i rodzaju drogowych barier ochronnych zainstalowanych na odcinku drogi tj. (stalowa, linowa, betonowa) oraz 3) drogi i otoczenia po której poruszał się pojazd. Droga swą klasą, przekrojem, geometrią oraz warunkami ruchu na niej panującymi oddziałuje na: zachowanie użytkowników drogi, pojazdu, a także występowanie i lokalizację w jej otoczeniu drogowych barier ochronnych, co sumarycznie przekłada się bezpośrednio na poziom prawdopodobieństwa wystąpienia i zarejestrowania zdarzeń z barierą i określonych wielkościach strat.

W celu odpowiedzi na postawione pytania badawcze przyjęto 6-stopniową procedurę postępowania w modelowaniu liczby i wielkości uszkodzeń drogowych barier ochronnych:

Etap 1. Sformułowanie założeń (rozdział 8.2). Na podstawie wniosków z literatury oraz wniosków z przeprowadzonych analiz prawdopodobieństwa zdarzeń i uszkodzeń drogowych barier ochronnych, sformułowano podstawowe założenia do budowy i analizy modeli częstości i wielkości uszkodzeń barier ochronnych.

Etap 2. Selekcja odcinków i podział na zbiory danych (rozdział 8.3). Wybrano odcinki, na których zebrano dane z pełnego rocznego okresu badań i podzielono je na zbiory z ogólnym i szczegółowym zakresem informacji na temat ruchu geometrii i otoczenia drogi.

Etap 3. Analiza i wybór zmiennych (rozdział 8.4). Na podstawie wyselekcjonowanych zbiorów baz danych dobrano miary liczby i długości uszkodzeń drogowych barier ochronnych, a także zidentyfikowano i wybrano najbardziej istotne zmienne niezależne.

Etap 4. Opracowanie metodyki (rozdział 8.5). Bazując na sformułowanych założeniach, opracowano metodykę budowy i oceny modeli regresyjnych.

Etap 5. Budowa, ocena, weryfikacja i wybór modeli. (rozdział 8.5-8.6). Zbudowano i poddano szczegółowej analizie modele częstości zdarzeń z barierami ochronnymi oraz modele długości uszkodzeń barier ochronnych dla polskich odcinków dróg dwujezdniowych.

8.2. Założenia

Na podstawie wniosków z literatury (rozdział 2) oraz wniosków z badań terenowych, poligonowych i symulacyjnych (rozdział 5 i 6), przyjęto następujące założenia do budowy modeli liczby i długości uszkodzeń barier ochronnych:

1. Przedmiot badań stanowiły jednorodne odcinki międzywęzłowe autostrad, dróg ekspresowych i głównych przyspieszonych o przekroju dwujezdniowym w Polsce.
2. Budowę modeli prowadzono w odniesieniu do odcinków dróg na których przeprowadzono 12 miesięczne badania terenowe uszkodzeń drogowych barier ochronnych, na których nie występowały roboty drogowe długo trwające, określone poprzez [63]. Z analiz wyłączono również odcinki dróg, dla których dane były niekompletne oraz niewiarygodne w odniesieniu do danych historycznych.
3. Budowę matematycznych modeli liczby i wielkości uszkodzeń przeprowadzono z podziałem na dwie grupy danych uzyskanych w ramach badań terenowych, tj. dane ogólne (podstawowe,

ogólnodostępne) oraz dane szczegółowe o odcinkach dróg. Takie podejście pozwoliło zweryfikować, czy i jak szczegółowe dane i informacje o odcinkach dróg są niezbędne do budowy modeli liczby i długości uszkodzeń barier ochronnych (różne poziomy szczegółowości).

4. Modelowanie liczby i wielkości uszkodzeń barier ochronnych przeprowadzono w odniesieniu do wybranych zmiennych odnoszących się do geometrii drogi, wyposażenia w bariery ochronne, standardu utrzymania oraz warunków panujących na drodze. Pominęto czynniki bezpośrednio lub pośrednio są związane z wypadnięciem pojazdu z jezdni, odnoszące się do wpływu i zachowania kierowcy, warunków atmosferycznych czy pory występowania zdarzenia. Pozwoliło to przeanalizować i odnieść się wyłącznie do rzeczywistych warunków drogowo-ruchowych.
5. Modelowanie liczby i wielkości uszkodzeń barier ochronnych przeprowadzono z wykorzystaniem analitycznych i deterministycznych modeli opisowych, dla danych empirycznych z wybranych poligonów badawczych.
6. W modelach liczby i długości uszkodzeń klasa i standard drogi reprezentowane są przez model utrzymania drogi.
7. Analizy przeprowadzono dla całego przekroju drogi dwujezdniowej na odcinkach międzywęzłowych, w odniesieniu do średniego dobowego ruchu pojazdów na odcinku w ciągu roku.
8. Opracowane modele odnoszą się wyłącznie do zdarzeń i uszkodzeń rejestrowanych przez służby utrzymaniowe.

8.3. Baza danych

Podstawą do przeprowadzenia analiz i budowy modeli częstości zdarzeń i długości uszkodzeń drogowych barier ochronnych były wyłącznie te odcinki dróg, na których przeprowadzono 12 miesięczne badania terenowe uszkodzeń drogowych barier ochronnych.

Badania częstości zdarzeń z barierami ochronnymi rozpoczęto od stworzenia zbiorów danych, które miały posłużyć dalszym szczegółowym analizom matematycznym. Wykorzystano w tym celu wcześniej utworzoną, opisaną w rozdziale 4 bazę danych o badanych odcinkach dróg. Baza danych zawierała wszystkie dane i informacje o zdarzeniach niebezpiecznych z barierami ochronnymi, ruchu pojazdów oraz infrastrukturze drogowej, które udało się zebrać podczas przeprowadzonych badań terenowych. Objęcie badaniami wszystkich odcinków dróg, na których zbierano dane było niemożliwe ze względu na brak, niekompletność lub niewielką ilość danych z pełnego (12 miesięcznego) okresu badań oraz braku dokumentacji niezbędnej do inwentaryzacji barier. Czynniki te zdecydowały, że do dalszych analiz wyselekcjonowano dwa zbiory danych wyłącznie dla dróg dwujezdniowych, które różniły się szczegółowością zawartych w nich danych:

- 1) zbiory danych ogólnych o odcinkach dróg dwujezdniowych (DO-2J),
- 2) zbiory danych szczegółowych o odcinkach dróg dwujezdniowych (DS-2J).

Spośród zebranych w zbiorach DO-2J i DS-2J danych o odcinkach dróg, do dalszych badań wybrano wyłącznie odcinki dróg zamiejskich z dróg serwisowych, łącznic i skrzyżowań. Wybrano te odcinki, które zawierały komplet danych o uszkodzeniach barier ochronnych oraz ruchu pojazdów. Jednorodność odcinków dróg dotyczyła przede wszystkim klasy drogi, przekroju poprzecznego, prędkości dopuszczalnej i przeznaczenia (jezdni główna). Odcinki obejmowały drogi krajowe zróżnicowane pod

względem klasy, natężenia, struktury ruchu pojazdów oraz występujących na nich urządzeń brd. Po wstępnej analizie, do dalszych prac przyjęto tylko zbiory danych dla dróg dwujezdniowych.

Pierwszy zbiór danych ogólnych stanowiły odcinki dwujezdniowe zawarte w bazie DO-2J obejmującej ok. 2 200 km dróg krajowych, w których w skład weszły autostrady (1 038 km), drogi ekspresowe (770 km) oraz drogi główne przyspieszone (259 km). Na wybranych 254 odcinkach dróg zarejestrowano ponad trzy tysiące pięćset zdarzeń niepożądanych, związanych z uderzeniem pojazdu w barierę ochronną o łącznej długości uszkodzeń ponad 70 km. Duża liczba i różnorodność wybranych odcinków dróg sprawiły, że zbiór danych ogólnych można było potraktować jako reprezentację danych dla całej sieci dróg dwujezdniowych zarządzanych przez GDDKiA.

Drugi zbiór danych szczegółowych dla dróg dwujezdniowych zawartych w bazie DS-2J utworzono ze względu na dodatkowy warunek, jakim była szczegółowa informacja o urządzeniach zainstalowanych na odcinku drogi. Szczegóły dotyczyły informacji na temat rodzaju i lokalizacji zainstalowanych barier ochronnych oraz geometrii i warunków na drodze (krętości odcinków, prędkości dopuszczalnych). Przy pomocy opisanego powyżej kryterium, wyselekcjonowano 71 odcinków o łącznej długości 711 km, na których doszło do 1290 zdarzeń, w wyniku których wymieniono ponad 29 km barier.

Zaproponowane podejście wytypowania dwóch zbiorów danych o różnej szczegółowości informacji o zdarzeniach na odcinkach dróg, pozwoliło na wykonanie dwóch analiz matematycznych o różnym stopniu szczegółowości: ogólnych (bazowych) przedstawiających wyjściowe charakterystyki częstości i wielkości uszkodzeń oraz szczegółowych umożliwiającących wykonanie dokładniejszej oceny zmiennych wpływających na liczbę zdarzeń z barierami ochronnymi.

8.4. Analiza i wybór zmiennych zależnych i niezależnych

8.4.1. Dobór miar liczby i długości uszkodzeń barier ochronnych

W badaniach związanych z szacowaniem częstości i skutków zdarzeń drogowych, najczęściej wykorzystywano bezwzględne i względne miary bezpieczeństwa ruchu drogowego. Takie podejście wykorzystano w przypadku badań częstości i ciężkości zdarzeń związanych z wypadnięciem pojazdu (tj. badań Hutchinsona i Kennedygo [76], Coopera [34], Carrigana i Raya [152], Miaou [110], oraz programu RSAP [119]). Założono zatem analogicznie, że w przypadku analizy częstości i konsekwencji zdarzeń z barierami ochronnymi, wykorzystane zostaną względne i bezwzględne miary bezpieczeństwa ruchu drogowego. Założono również, że miary te odnosić się będą umożliwiały analizę ryzyka społecznego na odcinku drogi [82] rozumianego jako możliwość wystąpienia określonej kategorii strat (liczba i wielkość uszkodzeń barier) na analizowanym odcinku drogi w ciągu roku.

W ramach przygotowanych baz danych na temat liczby i długości uszkodzeń barier ochronnych, każdy z odcinków dróg opisany został grupą zmiennych zawierających dane i informacje charakteryzujące źródła zagrożeń, narażenie na ryzyko, oraz poziom prawdopodobieństwa uszkodzeń w zderzeniach z barierą. Zebrane w ten sposób dane i informacje na temat liczby i długości uszkodzeń barier ochronnych przyczyniły się do wyboru miar, mających służyć do szacowaniu liczby i wielkości uszkodzeń barier ochronnych. Ostatecznie na podstawie studiów literatury i analizy wyników badań terenowych, do oszacowania liczby i wielkości uszkodzeń barier ochronnych wybrano pięć miar reprezentujących:

1) częstość (poziom prawdopodobieństwa) zdarzeń:

- a) liczba zdarzeń z barierami ochronnymi na odcinku drogi LZDB,
- b) gęstość zdarzeń z barierami ochronnymi na odcinku drogi GZDB,
- c) koncentracja zdarzeń z barierami ochronnymi na odcinku drogi KZDB,

2) wielkość strat (konsekwencje zdarzeń):

- a) długość uszkodzeń barier ochronnych na odcinku drogi LUO,
- b) gęstość uszkodzeń barier ochronnych na odcinku drogi GUO.

Liczba zdarzeń z barierami ochronnymi *LZDB* (zd./odcinek/rok) – jest to miara bezwzględna opisująca liczbę uderzeń pojazdów w barierę ochronną generujących ich uszkodzenia w przyjętym przedziale czasowym (1 rok), na wybranym odcinku drogi o długości *L* (km).

Gęstość zdarzeń z barierami ochronnymi *GZDB* (zd./km/rok) – jest to miara względna opisująca unormowaną liczbę uderzeń pojazdów w barierę ochronną generujących ich uszkodzenia w przyjętym przedziale czasowym (1 rok), na wybranym odcinku drogi o długości 1 km.

Koncentracja zdarzeń z barierami ochronnymi *KZDB* (zd./mln poj.km/rok) – jest to miara względna opisująca unormowaną liczbę uderzeń pojazdów w barierę ochronną generujących ich uszkodzenia w przyjętym przedziale czasowym (1 rok), w odniesieniu do przebytej przez pojazdy drogi (pracy przewozowej) wynoszącej 1 mln pojazdokilometrów.

Długość uszkodzeń barier ochronnych *LUO* (m/odcinek/rok) – jest to miara bezwzględna opisująca łączną długość uszkodzeń barier ochronnych wygenerowanych przez pojazdy uderzające w bariery drogowe i powodujące ich uszkodzenia w przyjętym przedziale czasowym (1 rok), na wybranym odcinku drogi o długości *L* (km).

Gęstość uszkodzeń barier ochronnych *GUO* (m/km/rok) – jest to miara względna opisująca unormowaną długość uszkodzeń barier ochronnych wygenerowanych przez pojazdy uderzające w bariery drogowe i powodujące ich uszkodzenia w przyjętym przedziale czasowym (1 rok), na odcinku drogi o długości 1km.

8.4.2. Identyfikacja i klasyfikacja zmiennych zależnych

Zgromadzone w bazach danych zmienne zależne tj. liczba zdarzeń z barierami ochronnymi (LZDB), gęstość zdarzeń z barierami ochronnymi (GZDB), wskaźnik koncentracji zdarzeń z barierami ochronnymi (KZDB), długość uszkodzeń barier ochronnych (LUO) i gęstość uszkodzeń barier ochronnych (GUO) odnoszących się do wyselekcjonowanych odcinków dróg, poddano ocenie jakościowej. W ramach oceny wykonano analizę wartości odstających, liczebności zbiorów, wariancji zmiennych oraz odcinków bez zdarzeń.

Ze względu na odmienny charakter i warunki ruchu oraz dostęp do danych szczegółowych, zmienne przedstawiono w zależności od przekroju drogi oraz szczegółowości zmiennych niezależnych. W tablicy 8.1 zestawiono zmienne, które poddano analizom szczegółowym. Zmienne przedstawiono wraz z ich wartościami średnimi, minimalnymi, maksymalnymi, odchyleniem standardowym oraz wskaźnikiem zmienności.

Tab. 8.1 Zestawienie wartości dla podstawowych charakterystyk zmiennych zależnych dla dróg dwujezdniowych

LP	Symbol	Jedn.	Średnia μ	Mediana Me	Minimum min	Maksimum max	Odch. Std. σ	Wsp. zm. v (%)
Zbiór danych ogólnych – drogi dwujezdniowe (N=220)								
1	LZDB	[liczba zdarzeń/rok]	16,2	10,0	0	112	18,48	114,0
2	GZDB	[liczba zdarzeń/km/rok]	2,01	1,36	0	31,27	2,70	134,6
3	KZDB	[liczba zdarzeń/mln poj. km/rok]	0,22	0,15	0	5,31	0,40	178,7
4	LUO	[metrów uszkodzeń/rok]	322	166	0	2678	401	124,6
5	GUO	[metrów uszkodzeń/km/rok]	35,33	25,55	0	327,2	37,74	106,8
Zbiór danych szczegółowych – drogi dwujezdniowe (N=88)								
1	LZDB	[liczba zdarzeń/rok]	22,1	15,5	0	107	22	100,0
2	GZDB	[liczba zdarzeń/km/rok]	2,63	1,88	0	12,84	2,52	95,8
3	KZDB	[liczba zdarzeń/mln poj. km/rok]	0,25	0,18	0	1,11	0,21	85,1
4	LUO	[metrów uszkodzeń/rok]	466	254	0	2678	530	113,7
5	GUO	[metrów uszkodzeń/km/rok]	48,03	35,11	0	192,75	42,25	88,0

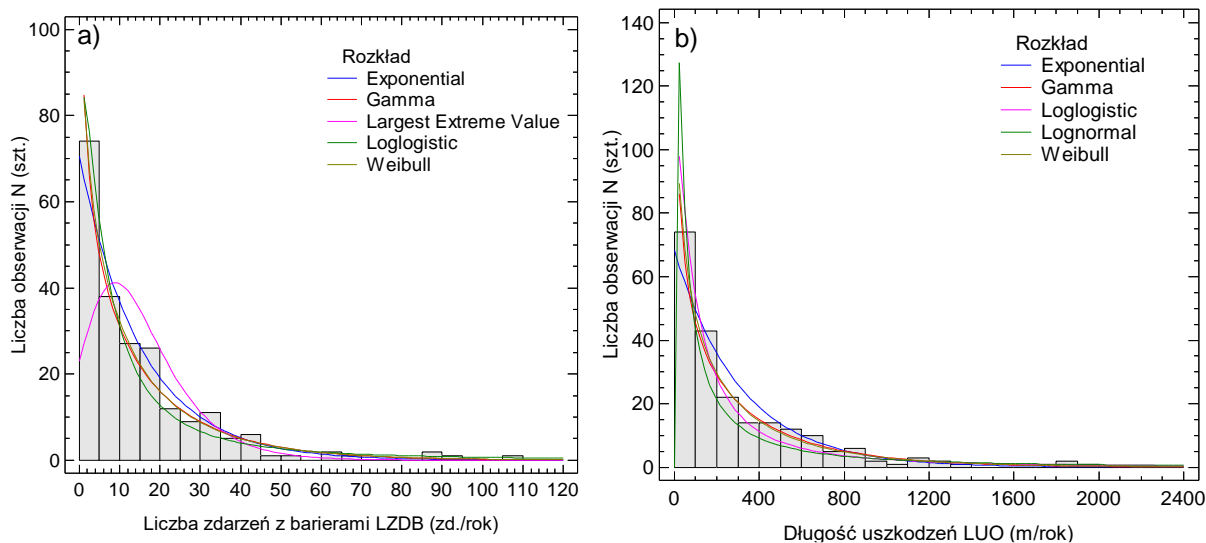
Źródło: Opracowanie własne

8.4.3. Rozkłady gęstości prawdopodobieństwa zmiennych zależnych

Analizując rozkłady gęstości prawdopodobieństwa zmiennych zależnych podjęto próbę opisanie ich rozkładem statystycznym. W tym celu wykorzystano pakiet oprogramowania Statgraphic i Statistica. Dopasowanie rozkładu do dodanych empirycznych sprawdzono testem Kolmogorov-Smirnov i testem Chi-kwadrat. Wartości graniczna $p \leq 0,05$ uzyskana dla każdego z testów oznaczała, że rozkład nie opisuje zmiennej z 95% pewnością.

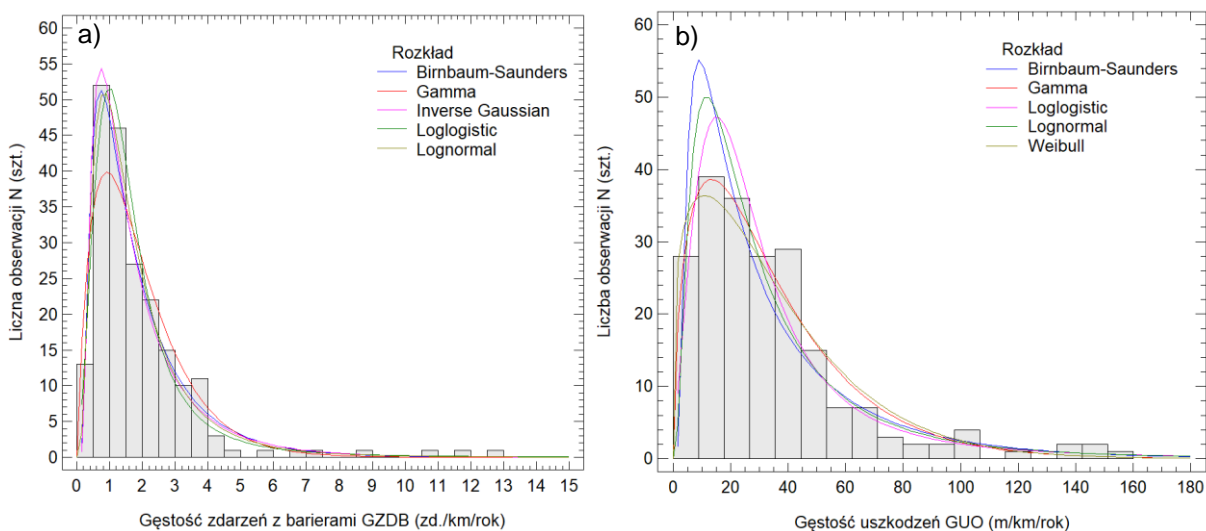
W przypadku odcinków o zerowej liczbie zdarzeń i uszkodzeń dla dróg dwujezdniowych (9 odcinków), aby nie ograniczać analizy wyłącznie do rozkładów dyskretnych, wartości zerowe dla zmiennych zależnych zastąpiono bardzo niskimi wartościami. Dane te w rzeczywistości reprezentują odcinki z zerową wartością liczby zdarzeń z barierami i długością uszkodzeń, lecz użyto niewielkich wartości, ponieważ $\ln(0)$ jest niezdefiniowany co ogranicza możliwości dopasowania rozkładu. Technika ta jest częstą praktyką stosowaną w celu uniknięcia problemów matematycznych i numerycznych oraz poprawy jakości i wiarygodności uzyskiwanych modeli statystycznych. Założono, że zaobserwowane wartości zerowe należy raczej uznać za „nieobserwowalne”, ponieważ mogły wystąpić uszkodzenia barier, ale były one tak niewielkie, że nie zostały zarejestrowane przez służby utrzymaniowe.

Na podstawie przyjętych założeń dobrano rozkłady najlepiej opisujące daną zmienną zależną. Na rysunku 8.3 i 8.4 przedstawiono przykłady dopasowania wybranych rozkładów statystycznych dla wybranych zmiennych zależnych. Przedstawiono po pięć rozkładów o największym logarytmie wskaźnika wiarygodności najlepiej opisujących zmienną spełniając założenia dla testów (Kolmogorov-Smirnov, Chi-kwadrat) mieszczący się w 95% przedziale ufności.



Rys. 8.3 Dopasowanie rozkładu gęstości prawdopodobieństwa dla zmiennej zależnej a) LZDB b) LUO na podstawie danych empirycznych (ogólnych) dla dróg dwujezdniowych

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 8.4 Dopasowanie rozkładu gęstości prawdopodobieństwa dla zmiennej zależnej a) GZDB b) GUO na podstawie danych empirycznych (ogólnych) dla dróg dwujezdniowych

Źródło: Opracowanie własne

W przypadku dróg dwujezdniowych, najlepiej opisuje dane empiryczne dotyczące częstości zdarzeń z barierami ochronnymi, rozkład Gamma, który jest odpowiednikiem rozkładu dwumianowego ujemnego, Log-normalny oraz rozkład Weibull'a. Rozkłady te również są wskazywane w pracach innych autorów, jako najlepiej opisujące częstość wypadnięć pojazdów z jezdni [119],[152].

Próbie dopasowania rozkładu podjęto także dla zmiennych opisujących wielkość uszkodzeń barier ochronnych na analizowanych odcinkach dróg. W przypadku analizy uszkodzeń barier ochronnych na kilometrowym odcinku drogi dróg dwujezdniowych, najlepszą dobrocią dopasowania wykazały się ponownie rozkłady Log-normalny, Gamma oraz rozkład Weibull'a.

8.4.4. Identyfikacja i wybór zmiennych niezależnych

Na podstawie analizy dostępnych danych przeprowadzono wybór zmiennych niezależnych, mających istotny wpływ na częstość i wielkość uszkodzeń barier ochronnych. Zmienne podzielono na ilościowe i jakościowe. Część zmiennych jakościowych poddano procesowi dyskretyzacji, dzięki czemu uzyskano zmienne ilościowe. Liczba otrzymanych zmiennych niezależnych różniła się w zależności od szczegółowości zbioru danych. W przypadku ogólnego zbioru danych, do analizy przyjęto 15 zmiennych niezależnych, natomiast w przypadku zbioru danych szczegółowych do analizy przyjęto 2 zmiennych niezależnych, reprezentujących parametry drogi, parametry ruchu drogowego, sposób utrzymania drogi, warunki lokalizacji barier drogowych.

W tablicach 8.2-8.3 zestawiono zmienne wykorzystane do modelowania liczby zdarzeń z barierami ochronnymi. Zmienne przedstawiono wraz z ich wartościami średnimi, minimalnymi, maksymalnymi, odchyleniem standardowym oraz wskaźnikiem zmienności.

Tab. 8.2 Zestawienie wartości dla podstawowych charakterystyk zmiennych niezależnych w zbiorze danych ogólnych

Drogi dwujezdniowe – dane ogólne							
Nazwa zmiennej	Symbol	Jednostka	Średnia μ	Mediana Me	Minimum min	Maksimum max	Wsp. zmn. v (%)
Praca przewozowa	PP	[mln poj.km/rok]	86,21	66,18	5,350	546,1	82,8
Długość odcinka drogi	DL	[km]	8,83	6,63	1,006	28,4	77,5
Średnioroczne dobowe natężenie ruchu pojazdów	SDR	[poj./dobę]	29720	24797	1842	112421	56,8
Udział pojazdów osobowych	UO	[udział 0-1]	0,69	0,70	0,220	0,9	15,2
Udział pojazdów ciężarowych	UC	[udział 0-1]	0,09	0,09	0,030	0,1	23,7
Udział pojazdów ciężarowych z przyczepą	UCP	[udział 0-1]	0,19	0,17	0,020	0,7	53,8
Współczynnik klasy drogi	WKD	-	0,42	0,37	0,350	1,0	44,5
Współczynnik wykrywalności zdarzeń grupa A	WZA	1,0 – utrzymaj std A 0,8 – utrzymaj std B 0,5 – model klasyczny	0,77	0,80	0,500	1,0	16,8
Współczynnik wykrywalności zdarzeń grupa B	WZB	-	0,07	0,00	0,000	3,7	551,5
Gęstość łuków poziomych	GLPO	[łuków/km]	0,44	0,39	0,000	1,8	68,6
Występowanie odcinków falistych	FA	0 – Nie 1 – Tak	0,05	0,00	0,000	1,0	454,9
Współczynnik udziału krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami linowymi	WBL	0 – brak 0,5 – do 50% poboczny 1 – pow. 50%	0,07	0,00	0,000	1,0	356,0
Gęstość miejsc obsługi podróżnych na odcinku drogi	GMOP	[szt./km]	0,02	0,00	0,000	0,2	188,9
Gęstość wjazdów i zjazdów na odcinku drogi	GWiZ	[szt./km]	0,07	0,00	0,000	3,2	351,7
Liczba pasów ruchu w przekroju drogi	LPR	[szt.]	4,14	4,00	2,000	6,0	15,8

Źródło: Opracowanie własne

Tab. 8.3 Zestawienie wartości dla podstawowych charakterystyk zmiennych niezależnych w zbiorze danych szczegółowych

Drogi dwujezdniowe – dane szczegółowe							
Nazwa zmiennej	Symbol	Jednostka	Średnia μ	Mediana Me	Minimum min	Maksimum max	Wsp. zmn. v (%)
Praca przewozowa	PP	[mln poj.km/rok]	86,56	84,53	8,92	279,9	72,8
Długość odcinka drogi	DL	[km]	10,18	7,30	1,13	28,4	77,1
Średni dobowy ruch pojazdów	SDR	[poj./dobę]	31655	25064	1842	112421	65,8
Udział pojazdów osobowych	UO	[udział 0-1]	0,69	0,72	0,22	0,87	16,5
Udział pojazdów ciężarowych	UC	[udział 0-1]	0,08	0,08	0,03	0,13	26,2
Udział pojazdów ciężarowych z przyczepą	UCP	[udział 0-1]	0,19	0,18	0,04	0,71	56,3
Współczynnik klasy drogi	WKD	-	0,41	0,37	0,35	1,00	43,1
Współczynnik wykrywalności zdarzeń grupa A	WZA	1,0 – utrzymaj std A 0,8 – utrzymaj std B 0,5 – model klasyczny	0,81	0,80	0,50	1,00	14,6
Współczynnik wykrywalności zdarzeń grupa B	WZB	-	0,02	0,00	0,00	1,00	637,8
Gęstość łuków poziomych	GLPO	[szt.km]	0,51	0,39	0,00	1,81	68,7
Odcinek falisty	FA	0 – Nie 1 – Tak	0,11	0,00	0,00	1,00	280,9
Współczynnik udziału krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami linowymi	WBL	0 – brak 0,5 – do 50% krawędzi 1 – pow. 50%	0,09	0,00	0,00	1,00	295,4
Gęstość miejsc obsługi podróżnych na odcinku drogi	GMOP	[szt.km]	0,02	0,00	0,00	0,19	178,5
Gęstość wjazdów i zjazdów na odcinku drogi	GWiZ	[szt./km]	0,05	0,00	0,00	0,85	216,0
Liczba pasów ruchu w przekroju drogi	LPR	[szt.]	4,25	4,00	4,00	6,00	15,7
Wskaźnik krętości odcina drogi	WKO	[°/km]	17,26	11,58	0,68	93,99	99,7
Średnia prędkość dopuszczalna na odcinku drogi	VDOP	[km/h]	124,7	120,0	83,0	140,0	12,1
Udział krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami	UB	[udział 0-1]	0,85	0,87	0,24	1,00	15,7
Udział krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami stalowymi	UBS	[udział 0-1]	0,77	0,83	0,00	1,00	30,0
Udział krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami betonowymi	UBB	[udział 0-1]	0,01	0,00	0,00	0,16	178,2
Udział krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami linowymi	UBL	[udział 0-1]	0,07	0,00	0,00	0,91	286,1
Średnia odległość barier od krawędzi jezdni	SB	[m]	1,79	1,70	0,25	4,23	44,3
Średnia odległość barier dzielących od krawędzi jezdni	SB _d	[m]	2,17	1,92	0,25	5,80	59,5
Średnia odległość barier skrajnych od krawędzi jezdni	SB _s	[m]	1,68	1,61	0,20	3,08	49,2
Prawdopodobieństwo uderzenia w barierę wypadającego z jezdni pojazdu	PUB	-	0,29	0,23	0,12	1,00	71,3

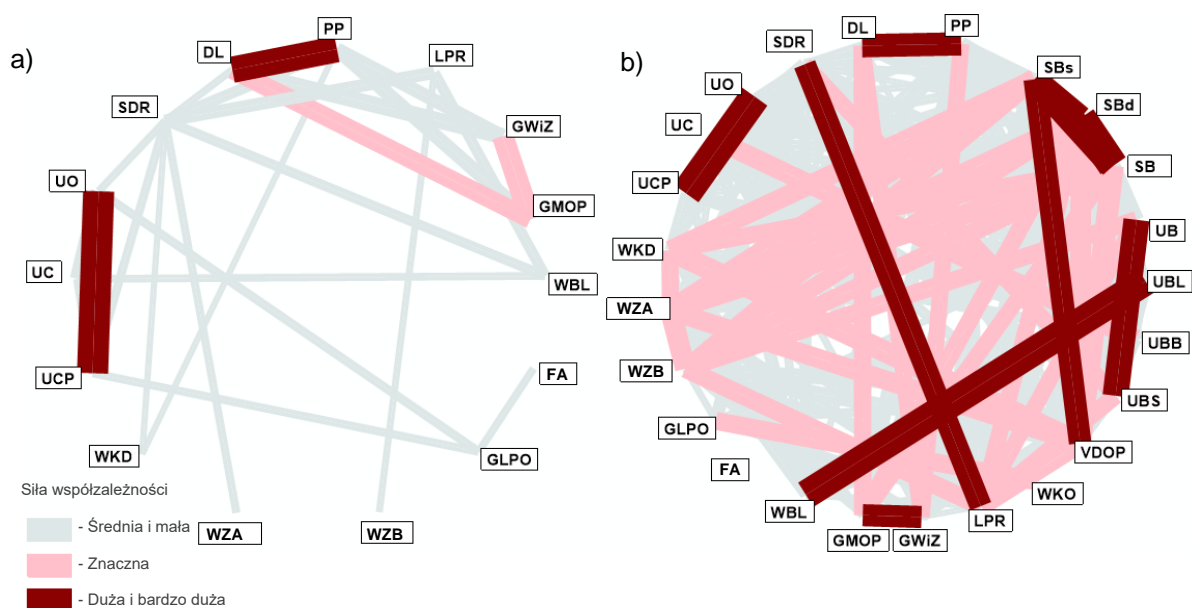
Źródło: Opracowanie własne

8.4.5. Wybór najbardziej istotnych zmiennych niezależnych

Najbardziej istotne zmienne niezależne wchodzące w skład opracowywanych modeli wybrano na podstawie czterostopniowej procedury wyboru.

Krok 1: Wybór i podział na grupy zmiennych niezależnych. Zmienne dla danych ogólnych i szczegółowych podzielono na dwie grupy. Grupę zmiennych reprezentujących narażenie na ryzyko zdarzenia z barierą ochronną oraz zmiennych definiujących poziom prawdopodobieństwa oraz skutki uderzenia i uszkodzenia bariery. Wybór i klasyfikację zmiennych do poszczególnych grup wykonano na podstawie studiów literatury. W pierwszej kolejności wybrano zmienne mogące reprezentować narażenie na ryzyko (tj. PP, SDR, DL) a następnie zmienne związane z poziomem prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia niebezpiecznego i poziomem konsekwencji (np. UB, UCP, GLPO itd.). Wykonany podział czynników stanowi podstawę do budowy modeli dla wybranych miar brd, na odcinkach dróg w Polsce [82]. Przed przystąpieniem do kolejnego kroku, spośród pogrupowanych danych wyeliminowano zmienne, które nie cechowało zróżnicowanie. W tym celu wyznaczono dla każdej zmiennej wskaźnik zmienności v . Graniczną wartością decydującą o pozostawieniu zmiennej była wartość $v=10\%$. Zmiennych o niższych wartościach v nie brano pod uwagę w kolejnych krokach.

Krok 2: Analiza sił związku pomiędzy zmiennymi niezależnymi. W celu wyeliminowania efektu nadmiarowości w procesie budowy modeli, wykonano analizę korelacji między poszczególnymi zmiennymi. W celu sprawdzenia korelacji liniowych i nieliniowych występujących między zmiennymi, posłużono się współczynnikiem korelacji Spearmana R_s . Do analiz przyjęto cztery klasy siły współzależności: bardzo silna i silna ($R_s \geq 0,7$), znaczna ($0,5 \leq R_s < 0,7$), średnia i mała ($0,3 \leq R_s < 0,5$) oraz brak i bardzo słaba ($R_s < 0,3$). Nadmierne korelacje zmiennych, których wartość bezwzględna przekraczała graniczną wartość R lub $R_s \geq 0,7$ decydowały o odrzuceniu jednej ze zmiennych w modelu. Siły współzależności między zmiennymi przedstawiono w sposób graficzny na rysunku 8.5.



Rys. 8.5 Ilustracja siły współzależności pomiędzy zmiennymi niezależnymi dla (a) zbioru danych ogólnych (b) zbioru danych szczegółowych

Źródło: Opracowanie własne

Z przeprowadzonej analizy wynika, że w zbiorze danych ogólnych (rysunek 8.5a) największą zależność ($R_s \geq 0,7$) zaobserwowano między zmiennymi, które są ze sobą bezpośrednio powiązane tj. udziałem pojazdów osobowych (UO), a udziałem pojazdów ciężarowych z przyczepą (UCP) oraz pracą przewozową (PP), a długością odcinka (DL). Duża zależność ($0,5 \geq R_s \geq 0,7$) występuje pomiędzy natężeniem ruchu (SDR), a liczbą pasów ruchu (LPR) oraz gęstością miejsc obsługi podróżnych (GMOP), a gęstością węzłów i zjazdów (GWiZ).

W zbiorze danych szczegółowych (rysunek 8.5b), największe zależności ($R_s \geq 0,7$) odnotowano, jak w przypadku zbioru danych ogólnych między zmiennymi, które są ze sobą bezpośrednio powiązane. Zaliczono do nich zależności między: udziałem pojazdów osobowych (UO), a udziałem pojazdów ciężarowych z przyczepą (UCP); pracą przewozową (PP), a długością odcinka (DL); między średnimi odległościami barier od krawędzi jezdni (SB_d, SB_s, SB_p); między udziałem barier stalowych (UBS), a udziałem barier ogółem (UB); średnią odległością barier skrajnych od krawędzi jezdni (SB_s), a średnią prędkością dopuszczalną na odcinku drogi (VDOP); natężeniem ruchu (SDR), a liczbą pasów ruchu (LPR) oraz gęstością miejsc obsługi podróżnych (GMOP), a gęstością węzłów i zjazdów (GWiZ); udziałem barier linowych (UBL), a zakresem udziału występowania barier linowych na odcinku (WBL).

Krok 3: Analiza sił zależności pomiędzy zmiennymi niezależnymi i zależnymi. W celu określenia siły zależności między zmiennymi, ponownie wykorzystano współczynnik korelacji Spearmana R_s (rysunek 8.6) wg przyjętych wcześniej czterech klas sił współzależności oraz statystykę F do oceny mocy wyjaśniającej grupy zmiennych niezależnych na zmienność zmiennej zależnej.

Analizując otrzymane wyniki stwierdzono, że dla zbioru danych ogólnych występuje bardzo mało dużych i bardzo dużych zależności między zmiennymi, większość z nich osiągała wartość współczynnika korelacji R_s w granicach 0,2-0,5.

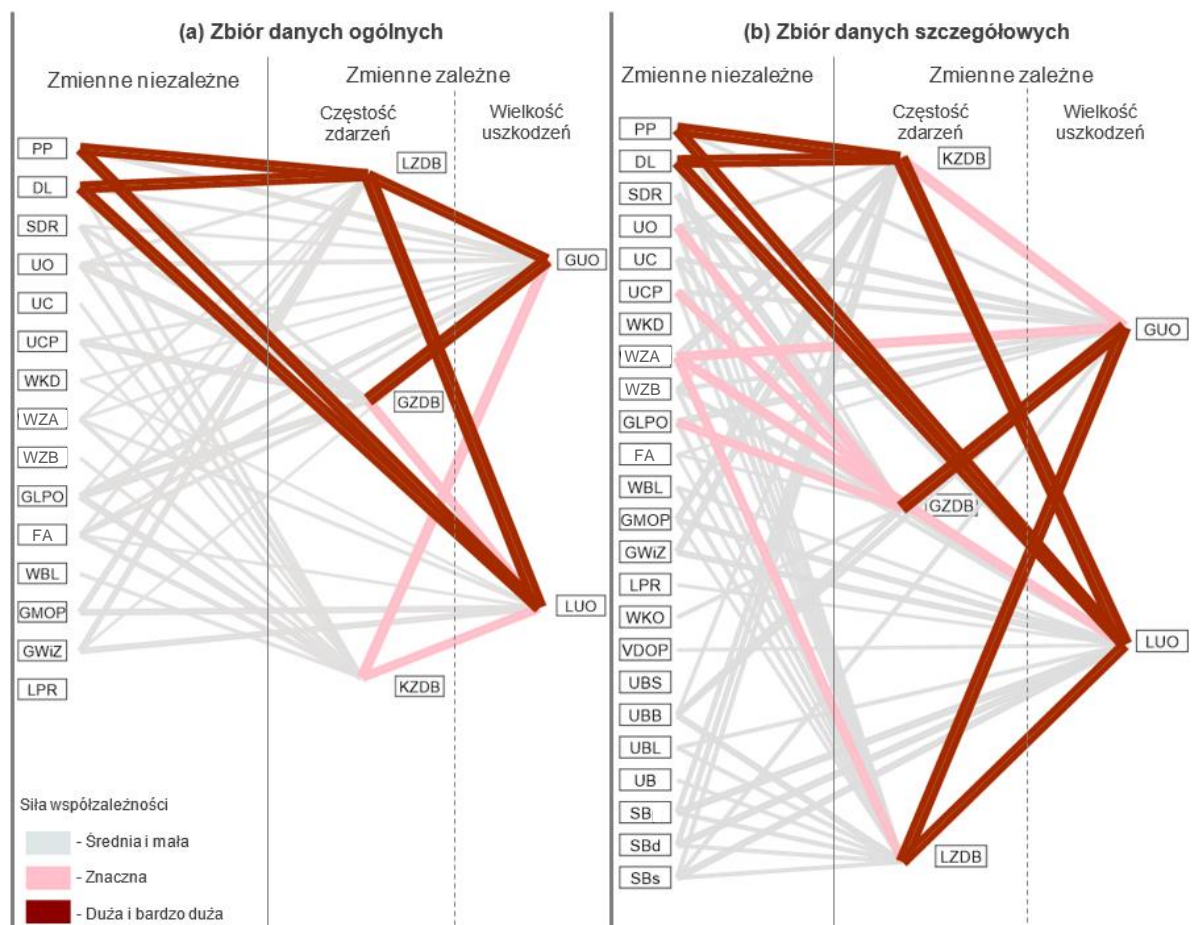
Bardzo dużą zależność uzyskano między zmiennymi: gęstość zdarzeń z barierami (GZDB), a gęstością uszkodzeń barier (GUO); liczbą zdarzeń z barierami (LZDB), a długością uszkodzeń (LUO); pracą przewozową (PP), a liczbą zdarzeń z barierami ochronnymi (LZDB) i długością uszkodzeń (LUO); długością odcinka (DL), a liczbą zdarzeń z barierami ochronnymi (LZDB) i długością uszkodzeń (LUO).

Dużą zależność uzyskano między zmiennymi: koncentracja zdarzeń z barierami (KZDB) i gęstość uszkodzeń barier ochronnych (GUO); koncentracja zdarzeń z barierami (KZDB) i długość uszkodzeń (LUO); gęstością zdarzeń z barierami (GZDB) i długością uszkodzeń (LUO).

Wyróżnić warto również zależności, których wartość R_s oscylowała w granicach wartości 0,5, ale nie została wyróżniona na rysunku 8.6(a). Zalicza się do nich zależności między: gęstością łuków poziomych (GLPO), a koncentracją (KZDB) i gęstością zdarzeń z barierami (GZDB); gęstością łuków poziomych (GLPO), a gęstością zdarzeń z barierami; udziałem pojazdów ciężarowych (UCP) i osobowych (UO), a gęstością zdarzeń z barierami (GZDB); udziałem pojazdów osobowych (UO), a gęstością zdarzeń z barierami (GZDB).

Na podstawie wyników dla zbioru danych szczegółowych stwierdzono, że bardzo duża zależność występuje między: pracą przewozową (PP), a gęstością zdarzeń z barierami (GZDB), długością uszkodzeń (LUO) i liczbą zdarzeń (LZDB); natężeniem ruchu (SDR), a gęstością zdarzeń (GZDB); koncentracją zdarzeń (KZDB), a gęstością uszkodzeń (GUO) i długością uszkodzeń (LUO); gęstością

zdarzeń z barierami (GZDB), a gęstością uszkodzeń (GUO); liczbą zdarzeń z barierami (LZDB), a długością uszkodzeń (LUO).



Rys. 8.6 Ilustracja siły zależności pomiędzy zmiennymi niezależnymi i zależnymi dla (a) zbioru danych ogólnych, (b) zbioru danych szczegółowych odcinków dróg dwujezdniowych

Źródło: Opracowanie własne

Krok 4 – Wybór najbardziej istotnych zmiennych niezależnych. Ostatni krok polegał na wyborze najbardziej istotnych zmiennych, które zostały wykorzystane do opracowania modeli szacowania wybranych miar częstości i długości uszkodzeń barier ochronnych na odcinkach dróg krajowych.

W szczególności są to zmienne opisujące (reprezentujące):

- 1) parametry drogi: długość odcinka drogi (DL), gęstość łuków poziomych (GLPO), falistość odcinka (FA), wskaźnik krętości odcinka drogi (WKO), gęstość miejsc obsługi podróżnych (GMOP), gęstość wjazdów i zjazdów na odcinku drogi (GWiZ),
- 2) parametry ruchu: średni dobowy ruch pojazdów (SDR), praca przewozowa (PP), udział pojazdów osobowych (UO), udział pojazdów ciężarowych (UC) udział pojazdów ciężarowych z przyczepą (UCP), średnia prędkość dopuszczalna pojazdów (VDOP),
- 3) sposób utrzymania drogi: współczynnik wykrywalności zdarzeń grupa A (WZA), współczynnik wykrywalności zdarzeń grupa B (WZB), współczynnik klasy drogi (WKD),
- 4) opisujące rodzaj barier: udział oraz współczynnik krawędzi jezdni wyposażonych w bariery linowe (UBL, WBL), stalowe (UBS), betonowe (UBB),

5) warunki lokalizacji barier: średnia odległość barier od krawędzi jezdni (SB), średnia odległość barier dzielących od krawędzi jezdni (SB), średnia odległość barier skrajnych od krawędzi jezdni (SB), prawdopodobieństwo uderzenia w barierę (PUB).

8.5. Metodyka budowy modeli matematycznych

8.5.1. Procedura budowy oceny i wyboru modeli

Budowa każdego z modeli bazującego na określonym zbiorze danych (ogólnych DO-2J oraz szczegółowych DS-2J), odbywała się w siedmiu fazach.

Faza I. Pierwsza faza polegała na określeniu podstaw do budowy modeli, selekcji oraz pogrupowaniu modeli ogólnych, wykorzystując podejście bazujące na ryzyku (opisano w rozdziale 8.5.2).

Faza II. W drugiej fazie na podstawie wyników studiów literatury i wstępnych prac autora, wykonano selekcję funkcji wiążących, opisujących zależność pomiędzy wybranymi miarami i zmiennymi niezależnymi (rozdział 8.5.3).

Faza III. Faza trzecia obejmowała swym zakresem budowę modeli dla wybranych funkcji wiążących ze zmiennymi, które wykazywały najwyższy współczynnik korelacji liniowej Pearsona R , nieliniowej Spearmana R_s oraz statystyki F (na podstawie wyników obliczeń z rozdziału 8.4.5).

Faza IV. W kolejnej fazie, do modeli włączano wyraz wolny β_0 . W momencie, gdy po jego dodaniu uzyskał pozytywną ocenę istotności ($p \leq 0,05$), przyjmowano do budowy modelu użycie wyrazu wolnego, w przeciwnym wypadku nie stosowano tego składnika.

Faza V. W fazie piątej podjęto próby włączania do modelu poszczególnych zmiennych niezależnych. W tym celu skorzystano z selekcji krokowej, która obejmowała dodawanie i usuwanie zmiennych na różnych etapach budowy modelu, aby osiągnąć optymalny model.

Faza VI. W ramach fazy szóstej modele, poddano szczegółowej weryfikacji porównaniu i ocenie. Szczegółową metodę weryfikacji i oceny modeli szacowania liczby i długości uszkodzeń barier ochronnych opisano w rozdziale 8.5.4.

Faza VII. Wybór modeli najlepszych pod względem jakości dopasowania do danych obserwowanych.

8.5.2. Zasady budowy struktury ogólnej modeli

Na podstawie przeprowadzonych studiów literatury, analiz zdarzeń z barierami ochronnymi oraz analiz i wyborze zmiennych zależnych i niezależnych, przystąpiono do budowy modeli z wykorzystaniem uogólnionych modeli regresji liniowej przeznaczonych do szacowania liczby i długości uszkodzeń barier ochronnych. Predykcja liczby zdarzeń drogowych najczęściej bazuje na modelach jednoskładnikowych sumarycznych strat wybranej kategorii w jednostce czasu lub dwuskładnikowych, bazujących na tzw. wystawieniu na ryzyko [44]. W przypadku modeli wystawienia na ryzyko, liczba zdarzeń drogowych jest iloczynem ryzyka zdarzenia pojedynczego (prawdopodobieństwa zajścia) i liczby sytuacji, w której badany obiekt tj. pojazd, jest wystawiony na ryzyko zajścia tego zdarzenia (narażenia na ryzyko). W obserwowanych badaniach związku pomiędzy ryzykiem, a narażeniem na ryzyko w kontekście liczby zdarzeń drogowych, obserwuje się hiperboliczną zależność [43]. Oznacza to, że liczba zdarzeń

drogowych jest niezależna od narażenia, większe narażenie może być kompensowane przez niższy względny wskaźnik liczby zdarzeń na odcinku drogi.

Przyjmując klasyfikację modeli ryzyka społecznego zawartą w pracach [82],[99], do dalszych analiz przyjęto sześć grup modeli cząstkowych $M = \{A, B, C, D, E, F\}$, odnoszących się do liczby zdarzeń z barierami ochronnymi ($LZDB$) i długości uszkodzeń barier ochronnych na odcinku drogi (LUO). Modele należące do grupy A, B, C i D odnoszą się do liczby zdarzeń z barierami ochronnymi, natomiast modele z grupy E, F odnoszą się do długości uszkodzeń barier ochronnych na odcinku drogi.

Modele grupy $LZDB^A$ szacowania liczby zdarzeń z barierami ochronnymi reprezentują jednoskładnikowe modele wieloczynnikowe. Szacowane miary modeli określają bezpośrednio zależność liczby zdarzeń z barierami ochronnymi $LZDB_i^A$ od zbioru czynników X_i charakteryzujących analizowany i-ty odcinek drogi w jednostce czasu. Wykorzystując zależności z równania 8.1, model opisany jest wzorem:

$$LZDB_i^A = f(DL_i, SDR_i, X_i) \quad (8.1)$$

Modele grupy $LZDB^B$ szacowania liczby zdarzeń z barierami ochronnymi reprezentują dwuskładnikowe modele wieloczynnikowe. Szacowane miary modeli są iloczynem narażenia na ryzyko liczby zdarzeń z barierami ochronnymi $LZDB_i^A$ od zbioru czynników X_i charakteryzujących analizowany i-ty odcinek drogi w jednostce czasu. Wykorzystując zależności z równania 8.2, model opisany jest wzorem:

$$LZDB_i^B = E_{PP,i} \cdot P_{LZDB,T,i} \quad (8.2)$$

przy czym:

$$E_{PP,i} = PP_i = L_i \cdot SDR_i \cdot 365 \quad (8.3)$$

$$P_{LZDB} = f(SDR_i, X_i) \quad (8.4)$$

Modele grupy $LZDB^C$ szacowania liczby zdarzeń z barierami ochronnymi reprezentują dwuskładnikowe modele wieloczynnikowe z wykorzystaniem miar ryzyka unormowanego. Szacowane miary modeli są wynikiem iloczynu narażenia na ryzyko zdefiniowanego długością odcinka ($E_{DL,i}$) i gęstością zdarzeń z barierami ochronnymi ($GZDB_i$). Wykorzystując zależności z równania 8.5, model opisany jest wzorem:

$$LZDB_i^C = E_{DL,i} \cdot P_{LZDB,T,i} \quad (8.5)$$

przy czym:

$$P_{LZDB,T,i} = GZDB_i \quad (8.6)$$

$$GZDB_i = f(SDR_i, X_i) \quad (8.7)$$

lub

$$GZDB_i = E_{SDR,i} \cdot P_{GZDB,T,i} \quad (8.8)$$

$$P_{GZDB,T,i} = f(X_i) \quad (8.9)$$

Modele grupy $LZDB^D$ szacowania liczby zdarzeń z barierami ochronnymi reprezentują dwuskładnikowe modele wieloczynnikowe z wykorzystaniem modeli dla ryzyka indywidualnego. Szacowane miary modeli są wynikiem iloczynu narażenia na ryzyko zdefiniowanego pracą przewozową ($E_{PP,i}$) i poziomu prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia z barierą ($KZDB_i$). Wykorzystując zależności z równania 8.10, model opisany jest wzorem:

$$LZDB_i^D = E_{PP,i} \cdot RI_i \quad (8.10)$$

przy czym:

$$E_{PP,i} = PP_i = L_i \cdot SDR_i \cdot 365 \quad (8.11)$$

$$RI_i = KZDB_i \quad (8.12)$$

$$KZDB_i = f(SDR_i, X_i) \quad (8.13)$$

Modele grupy LUO^E szacowania długości uszkodzeń barier ochronnych na odcinku drogi reprezentują jednoskładnikowe modele wieloczynnikowe. Szacowane miary modeli określają bezpośrednio zależność długości uszkodzeń LUO_i^D od liczby zdarzeń z barierami (rzeczywistych lub oszacowanych na podstawie jednego z zaproponowanych modeli $LZDB_i^M$ i zbioru czynników X_i charakteryzujących analizowany i-ty odcinek drogi w jednostce czasu. Wykorzystując zależności z równania 8.14, model opisany jest wzorem:

$$LUO_i^E = f(LZDB_i^M, X_i) \quad (8.14)$$

Modele grupy LUO^F szacowania długości uszkodzeń barier ochronnych na odcinku drogi reprezentują dwuskładnikowe modele wieloczynnikowe z wykorzystaniem miar ryzyka unormowanego. Szacowane miary modeli są wynikiem iloczynu narażenia na ryzyko w postaci długości odcinka ($E_{DL,i}$) i gęstości uszkodzeń barier ochronnych na odcinku drogi (GUO_i). Wykorzystując zależności z równania 8.15, model opisany jest wzorem:

$$LUO_i^F = DL_i \cdot GUO_i \quad (8.15)$$

przy czym:

$$GUO_i^F = f(GZDB_i, X_i) \quad (8.16)$$

8.5.3. Dobór typu i parametrów funkcji aproksymującej

Modele przewidywania liczby zdarzeń są niezawodnymi narzędziami do przeprowadzania ilościowej oceny bezpieczeństwa ruchu drogowego, bazują one na równaniach matematycznych, które pozwalają inżynierom drogowym i zarządom dróg skorelować liczbę spodziewanych zdarzeń niebezpiecznych w określonym miejscu, z jego charakterystyką geometryczną i środowiskową [195],[181],[11]. Modele zaproponowane przez Highway Safety Manual (HSM) są szeroko stosowanym podejściem do szacowania częstości zdarzeń niebezpiecznych na określonej sieci lub odcinku drogi. Zgodnie z tą procedurą częstość zdarzeń na danym odcinku można oszacować, stosując uogólnione modele regresji liniowej, zbudowane na podstawie danych o zdarzeniach obserwowanych w wielu lokalizacjach. Liczba zdarzeń i długość uszkodzeń są w praktyce funkcją zmiennych towarzyszących (wzór 8.17) takich, jak dane dotyczące ruchu, klasy drogi, otoczenia i geometrii drogi oraz tzw. współczynnika kalibrującego określonego jako C_i . Każda kolejna j-ta zmienna towarzysząca na i tym odcinku drogi określana jest, jako x_{ij} . Współczynnik regresji β_0 jest nieznanym wyrazem korygującym funkcję, a β_j są nieznanymi parametrami regresji określającymi wagi j-tych współzmiennych x_{ij} .

$$f(\mu_i) = \beta_0 + \sum_{j=1}^J \beta_j \cdot x_{ij} + C_i \quad (8.17)$$

Funkcja f określana jest, jako funkcja wiążąca i może przyjmować różne postacie w zależności od założonego rozkładu zmiennej y . W zależności od przyjętego rozkładu zmiennej zależnej (Gamma, Weibull, dwumianowy ujemny, lognormalny, logarytmiczny itd.) wykonano selekcję funkcji wiążących oraz ich odwrotności. Selekcja umożliwiła wyodrębnić zbiór funkcji wiążących oraz ich odwrotność dla każdej z wybranych miar szacowania liczby i długości uszkodzeń barier ochronnych. Do dalszych prac wybrano kilkanaście odwrotności funkcji wiążących, z których przykłady przedstawiono wzorami (8.18-8.22).

1. Potęgowo-wykładniczą, na przykład:

$$LZDB_i = WZA_i^{\beta_j} \cdot PP_i^{\beta_j} \cdot \exp(\beta_0 + \sum_{j=1}^J \beta_j \cdot X_{ij}) \quad (8.18)$$

$$GZDB_i = SDR_i \cdot WZA_i^{\beta_j} \cdot \exp(\beta_0 + \sum_{j=1}^J \beta_j \cdot X_{ij}) \quad (8.19)$$

$$GUO_i = GZDB_i \cdot SDR_i^{\beta_j} \cdot \exp(\beta_0 + \sum_{j=1}^J \beta_j \cdot X_{ij}) \quad (8.20)$$

$$KZDB_i = SDR_i^{\beta_j} \cdot \exp(\beta_0 + \sum_{j=1}^J \beta_j \cdot X_{ij}) \quad (8.21)$$

2. Wykładniczą, na przykład:

$$KZDB_i = \exp(\beta_0 + \sum_{j=1}^J \beta_j \cdot X_{ij}) \quad (8.22)$$

gdzie:

β_0 – wyraz wolny równania,

β_j – współczynniki równania,

X_{ij} – wartość obserwowana j -tej zmiennej na i -tym odcinku drogi

8.5.4. Metoda oceny opracowanych modeli

Metoda oceny opracowanych modeli szacowania liczby i długości uszkodzeń drogowych barier ochronnych obejmuje cztery następujące kroki:

Etap I. Dobór kryteriów do oceny dokładności i poprawności modeli.

Etap II. Ustalenie zasad porównywania i oceny modeli.

Etap III. Ustalenie granic akceptowalności modeli.

Etap IV. Ocena i wybór modeli najlepiej aproksymujących dane rzeczywiste.

Etap I obejmuje dobór kryteriów do oceny dokładności i poprawności modeli. W celu monitorowania przyjętej metody badań, w trakcie budowy każdego z modeli sprawdzono niepewność wyników i oceniono, czy są możliwe do zaakceptowania. W tym celu przyjęto trzy podstawowe kryteria, które powinien spełnić model:

K1. Kryterium poprawności danych i parametrów w modelu.

K2. Kryterium dopasowania modelu do danych obserwowanych.

K3. Kryterium spełnienia warunków brzegowych.

Etap II obejmuje ustalenie zasad oceny dokładności i poprawności modeli. Dla wskazanych w etapie I kryteriów oceny, ustalono zasady oraz miary służące do oceny realizacji wskazanego kryterium.

Według kryterium K.1 oceniano poprawność danych i parametrów w modelu. W celu identyfikacji problemów, wykrycia nieprawidłowości oraz weryfikacji otrzymanych parametrów modelu, wykorzystano cztery kroki w procesie analizy, stosując różne testy.

W pierwszym kroku (K.1.1) prowadzono analizę reszt pojedynczych obserwacji oszacowanych z modelu (obserwacje odstające). W celu identyfikacji obserwacji, które mogły mieć znaczący wpływ przy budowie modelu, obliczono reszty studentyzowane (r_i). Uznano, że obserwacje można zaliczyć do odstających, gdy ich wartość bezwzględna z r_i jest duża ($r_i > 2$) lub bardzo duża ($r_i > 4$). Reszty uznawano za małe, gdy wartość r_i nie przekraczała 2. Studentyzowaną wartość resztową obliczono poprzez wyznaczenie ilorazu reszty pojedynczej obserwacji e_i (różnicy między rzeczywistą wartością zmiennej zależnej, a wartością przewidywaną przez analizowany model regresyjny dla danej obserwacji) do błędu standardowego i-tego rezyduum (wzór 8.23).

$$r_i = \frac{e_i}{SE_{e_i}} \quad (8.23)$$

W drugim kroku (K.1.2) prowadzono analizę stopnia wpływu pojedynczych obserwacji (obserwacje wpływowe) na dobroć modelu, wykorzystując analizę miary odległości Cooka D_i . Analiza ta jest powszechnie stosowana w celu identyfikacji obserwacji, które mają znaczący wpływ na dopasowanie modelu. Wysoka wartość odległości Cooka ($D_i > 0,5$) sugerowała, że dana obserwacja jest wpływowa, ale nie był to czynnik decydujący o odrzuceniu obserwacji. Dopiero w przypadku istotnego wpływu obserwacji na model oraz dużych lub bardzo dużych reszt obserwację (tzn. odcinek drogi) analizowano i rozważano jej odrzucanie. Obserwację odrzucano wyłącznie w uzasadnionych sytuacjach. W przypadku odrzucenia obserwacji, estymację współczynników i ocenę modelu wykonywano powtórnie.

W trzecim kroku (K.1.3) prowadzono analizę korelacji zmiennych niezależnych. Podczas wyboru zmiennych niezależnych weryfikowano ich wzajemną korelację (na podstawie wyników analiz przeprowadzonych wcześniej (rozdział 8.4.5), co wymuszało odrzucenie w modelu zmiennych mocno skorelowanych z pozostałymi. W przypadku, gdy R_s pomiędzy zmiennymi niezależnymi i oraz j była większa od 0,5, ze wzoru usuwano jedną ze zmiennych.

W czwartym kroku (K.1.4) przeprowadzono test poziomu istotności parametrów modelu (β_i), wykorzystując test Walda, weryfikujący hipotezę zerową, która stwierdzała przypadkowość wpływu wybranej zmiennej objaśniającej wchodzącej w skład modelu. Przyjęto, że prawdopodobieństwo testowe na poziomie $p \leq 0,05$ jest akceptowalne i można stwierdzić, że obserwowany efekt nie jest dziełem przypadku, a w konsekwencji odrzucić hipotezę zerową. W przypadku przekroczenia założonej wartości granicznej $p=0,05$ dla zmiennej niezależnej, zostawała ona usuwana z modelu, a proces szacowania współczynników był powtarzany. W pojedynczych przypadkach dopuszczono stosowanie łagodniejszego kryterium istotności ($p \geq 0,05$). Akceptowano stosowanie zmiennych będących na granicy istotności statystycznej $p=0,05$. Uznano, iż poziom istotności jest wystarczająco niski i wielce prawdopodobnie jest, że podczas zwiększenia próby danych, istotność statystyczna zostałaaby spełniona. Uznano również, że modele te mimo, iż nie będą w pełni reprezentatywne, to mogą wnieść dużo nowej wiedzy służącej rozpoznaniu czynników mających wpływ na zmienną zależną.

Według kryterium K.2 oceniano dopasowanie modelu do danych obserwowanych. Do oceny dokładności i poprawności modelu wykorzystano:

W pierwszym kroku (K.2.1) oceniano wartość skorygowanego współczynnika determinacji R_{sk}^2 , który wykorzystywany jest najczęściej w typowych modelach regresji liniowej. Współczynnik ten ma za zadanie informować, jaka część badanej zmiennej została objaśniona danym równaniem. Współczynnik ten przyjmuje wartości w przedziale zamkniętym np.: 0;1 lub 0-100%. Z założenia tego współczynnika, wartość bliższa jedności oznaczała lepsze dopasowanie modelu do danych empirycznych.

W drugim kroku (K.2.2) oceniano pierwiastek błędu średniokwadratowego *RMSE (Root Mean Squared Error)*, który określa, o ile średnio różnią się wartości estymowane od obserwowanych. Za założenie tej miary przyjęto: im niższa wartość tym lepsza jakość dopasowania modelu do danych rzeczywistych. Ponieważ RMSE uwzględnia kwadraty różnic, większy nacisk kładzie się na większe błędy, co oznacza, że nawet pojedyncze duże odchylenia mogą znacząco wpłynąć na wartość RMSE.

W trzecim kroku (K.2.3) analizowano wykresy reszt skumulowanych *CURE Plot (Cumulative Residuals Plot)* w przypadku opracowanych modeli liczby i wielkości uszkodzeń barier ochronnych pod kątem ich zastosowania do całego zakresu natężenia ruchu drogowego. Zastosowano metodę oceny dopasowania modeli do danych empirycznych, zaproponowaną przez Hauera [74]. Ocenę taką wykonano się na podstawie wykresów reszt skumulowanych. Zatem weryfikację opracowanych modeli i ocenę wykonano w według kilkustopniowej procedury. W pierwszej kolejności posortowano dane dotyczących liczby i wielkości uszkodzeń barier ochronnych na wybranych odcinkach dróg rosnąco według natężenia ruchu pojazdów na tych odcinkach. Następnie wyznaczono reszty dla każdej obserwacji oraz reszty skumulowane dla kolejnych obserwacji. Potem wyznaczono granice odchylenia standardowego reszt skumulowanych dla każdej obserwacji. Następnie wykonano wykresy reszt skumulowanych wraz z granicami podwojonych odchyłeń standardowych ($2\sigma_i$ i $-2\sigma_i$). Potem dokonano weryfikacji i oceny wykresu CURE. Wykresy CURE pozwolą przedstawić różnicę pomiędzy wartością obserwowaną, a przewidywaną zbudowanego modelu i jednocześnie pozwolą wizualnie określić, czy i dla jakiego zakresu natężenia ruchu model przeszacowuje lub niedoszacowuje dane rzeczywiste. Zakłada się, iż dobre dopasowanie modelu występuje w momencie, gdy reszty skumulowane oscylują wokół wartości zerowej i leżą między dwiema granicami odchylenia standardowego. W momencie przekroczenia górnej lub dolnej granicy ufności sugeruje, że nie należy stosować modelu dla tego zakresu natężenia ruchu.

Dopasowanie modelu do oceniano na: bardzo dobre, gdy wykres reszt skumulowanych w leżał między dwiema granicami odchylenia standardowego dla pełnego zakresu natężenia ruchu; dobre, gdy 90 % reszt skumulowanych zawierało się między granicami dwóch odchyłeń standardowych i posiadał maksymalnie jedno wykroczenie poza granice dwóch odchyłeń standardowych; słabe w pozostałych przypadkach.

W czwartym kroku (K.2.4) zastosowano kryterium informacyjne *Akaike (AIC - Akaike Information Criterion)*, w którym preferowane są modele z mniejszymi wartościami *AIC*. Kryterium to wykorzystano przede wszystkim w celu porównania zbudowanych modeli ze względu na ich różną liczbę zmiennych niezależnych (k), wielkość próby (n) i sumę kwadratów reszt (*RSS*). Wartości kryterium *AIC* dla poszczególnych modeli wyznaczono ze wzoru 8.24.

$$AIC = 2k + n \cdot \log\left(\frac{RSS}{n}\right) \quad (8.24)$$

Według kryterium K.3 sprawdzano spełnienie warunków brzegowych. Ze zbioru opracowanych modeli wybierano te, które spełniały warunki brzegowe. Na podstawie przeglądu literatury [151], przyjęto, że modele powinny spełniać następujące warunki brzegowe:

- 1) warunek brzegowy WB1 dotyczący liczby i gęstości zdarzeń z barierami ochronnymi:

$$LZDB = 0 \text{ i } GZDB = 0 \text{ dla } SDR = 0$$

oraz

$$LZDB = LZDB_{max} \text{ i } GZDB = GZDB_{max} \text{ dla } SDR = SDR_{opt}$$

- 2) warunek brzegowy WB2 dotyczący koncentracji zdarzeń z barierami:

$$KZDB = KZDB_{max} \text{ dla } SDR = SDR_{min}$$

oraz

$$KZDB = KZDB_{min} \text{ dla } SDR = SDR_{max}$$

- 3) warunek brzegowy WB3 dotyczący długości i gęstości uszkodzeń barier ochronnych:

$$LUO = 0 \text{ dla } LZDB = 0$$

- 4) warunek brzegowy WB4 dotyczący długości i gęstości uszkodzeń barier ochronnych:

$$LUO = LUO_{max} \text{ dla } LZDB = LZDB_{max}$$

oraz

$$LUO = LUO_{max} \text{ dla } SDR = SDR_{opt}$$

Etap III obejmuje ustalenie granic akceptowalności modeli. Biorąc pod uwagę przygotowane kryteria ustalono zakresy i poziomy akceptowalności modeli, w zależności od szacowanej miary, które zestawiono w tabl. 8.4.

Tab. 8.4 Przyjęte poziomy akceptowalności modeli

Nr kryterium	Granice akceptowalności modeli					
	Liczba zdarzeń z barierami LZDB	Gęstości zdarzeń z barierami GUO	Koncentracja zdarzeń z barierami KZDB	Długość uszkodzeń barier LUO	Gęstość uszkodzeń barier GUO	
K1	K1.1	Reszty studentyzowane małe $r_i \leq 2$ lub średnie $r_i \leq 4$ dla dużych zbiorów danych ($n > 200$).				
	K1.2	Obserwacje wpływowe ($D > 0,5$) podlegają szczegółowej analizie reszt (K1.1).				
	K1.3	Siła współzależności między zmiennymi $R_{sij} < 0,5$				
	K1.4	Prawdopodobieństwo testowe na poziomie $p \leq 0,05$ lub wyjątkowo na granicy istotności.				
K2	K2.1	Wartość skorygowanego współczynnika determinacji $R_{sk}^2 \geq 0,7$				
	K2.2	Preferowany jest model o najniższej wartości błędu $RMSE$				
	K2.3	Bardzo dobre lub dobre dopasowanie w ramach analizy $CURE Plot$				
	K2.4	Preferowany jest model o najniższej wartości AIC dla wybranej funkcji wiążącej i zbioru analizowanych danych.				
K3	K3	Spełnione WB1		Spełnione WB2	Spełnione WB3 i WB4	

Źródło: Opracowanie własne

Etap IV obejmuje ocenę i wybór modeli najlepiej aproksymujących dane rzeczywiste. Ocenę i wybór modeli najlepiej aproksymujących dane rzeczywiste wykonano poprzez porównanie modeli w zbiorach z podziałem na dane wykorzystane do ich budowy oraz grupę modelu przyjętą w rozdziale 8.5.2. Modele porównywano pod względem przyjętych kryteriów i ich granic akceptowalności (tablica 8.4). Wybrano ostatecznie modele mieszczące się w przyjętych granicach akceptowalności ze wskazaniem modelu preferowanego.

8.6. Zestawienie proponowanych modeli

8.6.1. Zestawienie ogólne modeli

Kluczową cechą danych wykorzystanych do budowy modeli autorskich modeli matematycznych przeznaczonych do szacowania częstości i wielkości uszkodzeń drogowych barier ochronnych na odcinkach dróg, było indywidualne traktowanie każdego odcinka drogi jako osobnej obserwacji. Takie podejście pozwoliło na identyfikację i zrozumienie złożonych zależności między charakterystycznymi dla *i*-tego odcinka drogi zmiennymi, a częstością czy wielkością uszkodzeń drogowych barier ochronnych.

W tablicy 8.5 i 8.6 zestawiono proponowane modele szacowania liczby i wielkości uszkodzeń drogowych barier ochronnych. W przypadku modeli liczby zdarzeń *LZDB* zastosowano cztery struktury modeli opisane w rozdziale 8.5.1. tj. modele *LZDB^A*, *LZDB^B*, *LZDB^C* oraz *LZDB^D*. Podobnie miało to miejsce w przypadku modeli szacowania długości uszkodzeń, gdzie również zastosowano trzy struktury modeli: *LZDB^E*, *LZDB^F*. Do budowy modeli z grupy A - F wykorzystano dane ogólne (DO-2J) oraz zbiór danych szczegółowych (DS-2J). Wykorzystane zbiory danych opisano w rozdziale 8.3.

Tab. 8.5 Zestawienie proponowanych modeli szacowania liczby zdarzeń z drogowymi barierami ochronnymi

Modele matematyczne liczby zdarzeń z barierami ochronnymi				
Grupy modeli	Numer modelu	Struktura modelu	Równanie estymowanej funkcji	
Modele jednoskładnikowe	A1(n)	$LZDB_i^A = f(DL_i, SDR_i, X_i)$	$LZDB_i^{A1} = WZA_i^{\beta_j} \cdot PP_i^{\beta_j} \cdot \exp(\beta_0 + \sum_{j=1}^J \beta_j \cdot X_{ij})$	
	A2(n)		$LZDB_i^{A2} = WZA \cdot DL_i^{\beta_j} \cdot SDR_i^{\beta_j} \cdot \exp(\beta_0 + \sum_{j=1}^J \beta_j \cdot X_{ij})$	
	A3(n)		$LZDB_i^{A3} = PP_i^{\beta_j} \cdot \exp(\beta_0 + \sum_{j=1}^J \beta_j \cdot X_{ij})$	
Modele wieloskładnikowe	Uwzględniające prawdopodobieństwo zdarzeń	B1(n)	$LZDB_i^B = E_{PP,i} \cdot P_{LZDB,T,i}$ $LZDB_i^{B1} = PP_i \cdot \exp(\beta_0 + \sum_{j=1}^J \beta_j \cdot X_{ij})$	
		Uwzględniające gęstość zdarzeń	C1(n)	$GZDB_i^{C1} = WZA_i \cdot SDR_i^{\beta_j} \cdot \exp(\beta_0 + \sum_{j=1}^J \beta_j \cdot X_{ij})$
	C2(n)		$GZDB_i^{C2} = SDR_i^{\beta_j} \cdot \exp(\beta_0 + \sum_{j=1}^J \beta_j \cdot X_{ij})$	
	C3(n)		$GZDB_i^{C3} = SDR_i^{\beta_j} \cdot WZA_i^{\beta_j} \cdot \exp(\beta_0 + \sum_{j=1}^J \beta_j \cdot X_{ij})$	
	C4(n)		$GZDB_i^{C4} = SDR_i \cdot \exp(\beta_0 + \sum_{j=1}^J \beta_j \cdot X_{ij})$	
	Uwzględniające koncentrację zdarzeń	D1(n)	$LZDB_i^D = E_{PP,i} \cdot KZDB_i^D$	$KZDB_i^{D1} = \exp(\beta_0 + \sum_{j=1}^J \beta_j \cdot X_{ij})$
		D2(n)		$KZDB_i^{D2} = SDR_i^{\beta_j} \cdot \exp(\beta_0 + \sum_{j=1}^J \beta_j \cdot X_{ij})$
		D3(n)		$KZDB_i^{D3} = WZA_i \cdot SDR_i^{\beta_j} \cdot \exp(\beta_0 + \sum_{j=1}^J \beta_j \cdot X_{ij})$

Źródło: Opracowanie własne

Tab. 8.6 Zestawienie proponowanych modeli szacowania długości uszkodzeń drogowych barier ochronnych

Modele matematyczne wielkości uszkodzeń barier ochronnych			
Grupy modeli	Numer modelu	Struktura modelu	Równanie estymowanej funkcji
Modele jednoskładnikowe	E1(n)	$LUO_i^E = f(LZDB_i^M, X_i)$	$LUO_i^{E1} = LZDB_i^M \cdot WZA_i^{\beta_j} \cdot \exp(\beta_0 + \sum_{j=1}^J \beta_j \cdot X_{ij})$
	E2(n)		$LUO_i^{E2} = LZDB_i^M \cdot \exp(\beta_0 + \sum_{j=1}^J \beta_j \cdot X_{ij})$
	E3(n)		$LUO_i^{E3} = LZDB_i^M \cdot SDR_i^{\beta_j} \cdot \exp(\beta_0 + \sum_{j=1}^J \beta_j \cdot X_{ij})$
	E4(n)		$LUO_i^{E4} = LZDB_i^M \cdot SDR_i^{\beta_j} \cdot \exp(\beta_0 + \sum_{j=1}^J \beta_j \cdot X_{ij})$
Modele wieloskładnikowe Uwzględniające gęstość uszkodzeń	F1(n)	$LUO_i^F = DL_i \cdot GUO_i^F$ gdzie: $GUO_i^F = f(GZDB_i^M, X_i)$	$GUO_i^{F1} = GZDB_i^M \cdot \exp(\beta_0 + \sum_{j=1}^J \beta_j \cdot X_{ij})$
	F2(n)		$GUO_i^{F2} = GZDB_i^M \cdot \exp(\beta_0 + \sum_{j=1}^J \beta_j \cdot X_{ij})$
	F3(n)		$GUO_i^{F3} = GZDB_i^M \cdot SDR_i^{\beta_j} \cdot \exp(\beta_0 + \sum_{j=1}^J \beta_j \cdot X_{ij})$

Źródło: Opracowanie własne

Wykorzystując przygotowane zbiory danych dla wybranych funkcji wiążących przystąpiono do estymacji parametrów równań. Estymację parametrów modeli regresyjnych przeprowadzono przy użyciu oprogramowania Statgraphic oraz Statistica 13, z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów i algorytmu Levenberga-Marquardta. Podstawowym zadaniem algorytmu była minimalizacja funkcji błędu, której argumentami były parametry modelu. Algorytm ten iteracyjnie aktualizował wartości parametrów modelu, co skutkowało poprawą wartości funkcji błędu i doboru optymalnych wartości parametrów równania.

Wybór modeli najlepiej aproksymujących dane rzeczywiste, spośród każdej grupy modeli dla wybranej funkcji wiążącej (równania estymowanej funkcji) i zbioru danych (DO-2J, DS-2J), było możliwe dzięki wyłonieniu i porównaniu kryteriów głównych (R_{sk}^2 , AIC) i pomocniczych ($RMSE$, $CURE Plot$). Należy zauważyć, że preferowane były oszacowane modele z wysokim skorygowanym współczynnikiem determinacji R_{sk}^2 niskimi wartościami AIC oraz $RMSE$. Ponadto preferowane były modele z bardzo dobrym lub dobrym dopasowaniem wykresów reszt skumulowanych $CURE plot$. Analizę wykresów skumulowanych reszt ($CURE Plot$) wykonano, aby wizualnie określić, czy i gdzie model przeszacowuje lub niedoszacowuje dane rzeczywiste. Rosnący wykres reszt skumulowanych odnosi się do obszarów, w których obserwowane miary są większe niż przewidywane w modelu, a zatem tam, gdzie równanie modelu niedoszacowuje wyników. Malejący wykres odnosi się natomiast do obszarów, w których wyniki są przeszacowane. Oszacowane reszty skumulowane ($CURE Plot$) pozwoliły na weryfikację dla jakich zakresów natężenia ruchu model może zostać wykorzystany. Jeśli górna lub dolna granica dwóch odchyłeń została przekroczona, nie zaleca się stosowania modelu w tym zakresie natężenia ruchu.

8.6.2. Modele liczby zdarzeń

W ramach budowy modeli liczby zdarzeń o strukturze jednoskładnikowej $LZDB_i^A$ oraz dwuskładnikowej $LZDB_i^B$ (uwzględniające prawdopodobieństwo zdarzeń) przeanalizowano i oceniono 62 modeli, spośród których wyselekcjonowano 18 najlepiej aproksymujących dane rzeczywiste pod kątem spełnienia kryteriów zdefiniowanych w rozdziale 8.5.4. Prace prowadzone były z wykorzystaniem 15 zmiennych niezależnych dla modeli ze zbioru danych ogólnych (DO-2J) i 24 zmiennych dla modeli bazujących na danych szczegółowych (DS-2J). W tabeli 8.7, 8.8 oraz na rysunku 8.7, dla wybranych testowanych funkcji wiążących z grupy A oraz B, zestawiono oszacowane parametry regresji oraz związane z nimi parametry dobroci dopasowania.

Na podstawie analizy opracowanych modeli matematycznych dotyczących liczby zdarzeń z barierami ochronnymi stwierdzono, że:

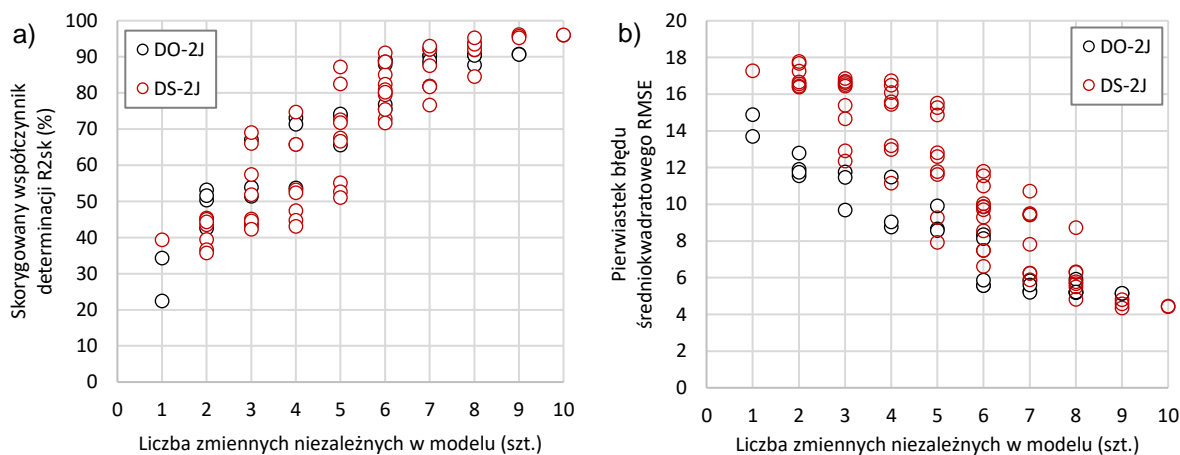
1. Wszystkie szacowane parametry dla zmiennych odnoszących się do ruchu i geometrii drogi są spójne między modelami dla danych ogólnych oraz szczegółowych i posiadają określony wpływ (dodatni lub ujemny).
2. We wszystkich zbudowanych modelach statystycznie istotne okazały się zmienne wystawienia na ryzyko (E) tj. długość odcinka (DL), natężenie ruchu drogowego (SDR) oraz ich iloczyn w postaci pracy przewozowej (PP). Ale wykorzystując do opisu zmiennych zależnych jedynie te zmienne podstawowe, uzyskano wartość skorygowanego współczynnika determinacji R_{sk}^2 w zakresie 0,224-

0,531. Natomiast wprowadzając dodatkowe zmienne opisujące cechy geometryczno-ruchowe na odcinku drogi, uzyskano wzrost współczynnika determinacji R^2_{sk} do 0,959.

3. Z przedstawionych modeli liczby zdarzeń z barierami wynika, że najbardziej istotnymi zmiennymi niezależnymi wpływającymi na wzrost współczynnika R^2_{sk} oraz redukcję błędu $RMSE$ jest 10 zmiennych niezależnych, a w szczególności:

- W przypadku modeli bazowych (DO-2J) zmienne ilościowe: gęstość łuków poziomych (GLPO), udział pojazdów ciężarowych z przyczepą (UCP) oraz zmienne jakościowe: współczynnik wykrywalności zdarzeń grupa A (WZA), falistość odcinka drogi (FA), współczynnik udziału krawędzi jezdni wyposażonych w bariery linowe (WBL), współczynnik wykrywalności zdarzeń grupa B (WZB).
- W przypadku modeli szczegółowych (DS-2J) zmienne ilościowe: gęstość łuków poziomych (GLPO), udział pojazdów ciężarowych z przyczepą (UCP), udział krawędzi jezdni wyposażonych w bariery ochronne (UB) i poszczególnych jego rodzajów tj. stalowych (UBS), linowych (UBL), betonowych (UBB), odległość barier od krawędzi jezdni (SB), prawdopodobieństwo uderzenia pojazdu w barierę (PUB) oraz zmienne jakościowe: Współczynnik wykrywalności zdarzeń grupa A (WZA), falistość odcinka drogi (FA).

4. Zwiększenie liczby parametrów w modelach prowadzi do poprawy jakości modeli w obu grupach danych (ogólnych i szczegółowych), co jest widoczne zarówno w rosnącym R^2_{sk} , jak i malejącym $RMSE$ (rysunek 8.7). Modele zbudowane dla grupy danych szczegółowych (DS-2J) lepiej są dopasowane do danych, co przejawia się wyższymi wartościami skorygowanego R^2_{sk} i niższymi wartościami $RMSE$ w porównaniu do grupy danych ogólnych (DO-2J). Modele z około 7-9 parametrami wydają się być optymalne pod względem dopasowania i dokładności predykcji, przy większej liczbie parametrów może dojść do przeuczenia modelu (overfitting'u).



Rys. 8.7 Wizualna ocena jakości modeli liczby zdarzeń z barierami pod względem liczby parametrów w ocenie a) skorygowanego współczynnika determinacji b) pierwiastka błędu średniokwadratowego

Źródło: Opracowanie własne

5. Największe wskaźniki determinacji i najmniejsze wartości zarówno błędu średniokwadratowego jak i kryterium informacyjnego Akaike uzyskano dla modeli wykorzystujących funkcję potęgowo-wykładniczą.

Tab. 8.7 Zestawienie wartości współczynników równania modeli liczby zdarzeń z barierami ochronnymi z grupy A i B (DO-2J)

Zmienne niezależne / wskaźniki oceny			Wartości współczynnika równania dla modeli LZDB ^A i LZDB ^B								
			Dane ogólne (DO-2J)								
			A1(1)	A1(10)	A2(1)	A2(9)	A3(1)	A3(3)	B1(1)	B1(8)	B1(9)
Wyraz wolny	-	β_0	-8,919	-8,425	-1,776	-2,397	-2,270	-2,898	-1,928	-1,920	-2,502
Średni dobowy ruch pojazdów	SDR	β_1	-0,012		0,678	0,730	-0,013	-0,011	-0,012	-0,011	-0,010
Udział pojazdów ciężarowych z przyczepą	UCP	β_4	-2,020	-1,055	-1,783		-2,073		-2,061	-2,104	
Współczynnik wykrywalności zdarzeń grupa A	WZA	β_7	0,537	0,936			0,696	0,738	0,705	0,708	0,748
Współczynnik wykrywalności zdarzeń grupa B	WZB	β_8		-0,645						-0,439	
Gęstość łuków poziomych	GLPO	β_9	0,688	0,664	0,783	0,971	0,693	0,910	0,639	0,630	0,841
Odcinek falisty	FA	β_{10}	0,749	0,876	0,716	0,765	0,747	0,809	0,766	0,760	0,828
Wsp. udziału krawędzi jezdni zab. barierami linowymi	WBL	β_{11}	0,731	0,841	0,620	0,641	0,718	0,750	0,712	0,706	0,740
Praca przewozowa	PP	β_{27}	1,064	0,981			1,071	1,083			
Długość odcinka drogi	DL	β_{28}			1,090	1,102					
Liczba obserwacji	n		217	217	217	217	217	217	217	217	217
Liczba parametrów	k		8	8	7	6	8	7	7	8	6
Kryterium informacyjne Akaike	AIC		322,57	347,57	324,38	333,30	323,36	335,52	323,21	322,21	318,21
Pierwiastek błędu średniokwadratowego	$RMSE$		5,182	5,918	5,276	5,577	5,204	5,597	5,204	5,173	5,649
Analiza wykresu CURE Plot	$CURE$		Słabe	Słabe	Dobre	Dobre	Słabe	Słabe	Słabe	Słabe	Słabe
Skorygowany współczynnik determinacji	R^2_{sk}		0,906	0,877	0,902	0,891	0,905	0,890	0,905	0,906	0,888

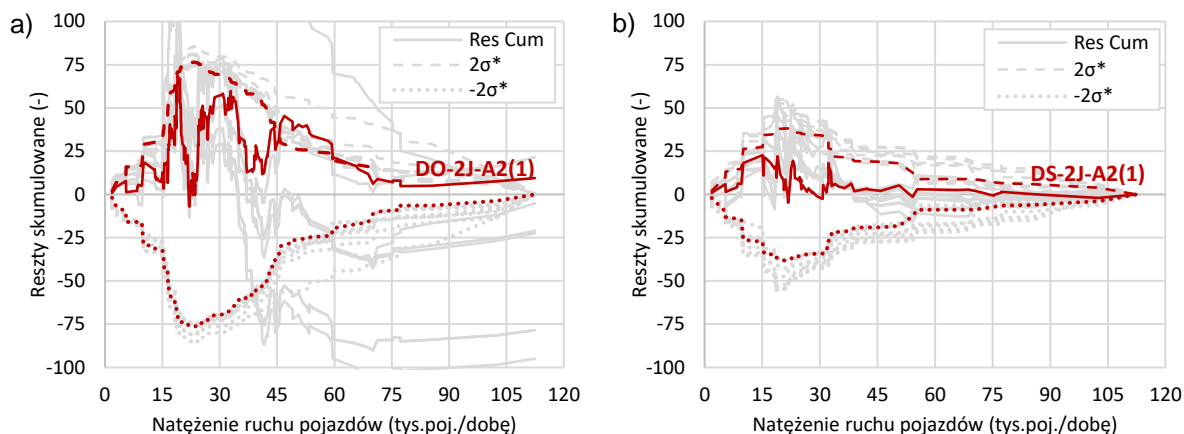
Źródło: Opracowanie własne

Tab. 8.8 Zestawienie wartości współczynników równania modeli liczby zdarzeń z barierami ochronnymi z grupy A i B (DS-2J)

Zmienne niezależne / wskaźniki oceny			Wartości współczynnika równania dla modeli LZDB ^A i LZDB ^B								
			Dane szczegółowe (DS-2J)								
			A1(1)	A1(2)	A2(1)	A2(2)	A2(3)	A3(1)	A3(2)	B1(1)	B1(3)
Wyraz wolny	-	β_0	-3,019	-0,762	-3,648	-1,042	-2,247	-3,806	-1,640	-1,953	-1,497
Średni dobowy ruch pojazdów	SDR	β_1	-0,011	-0,013	0,781	0,564	0,572	-0,011	-0,013	-0,012	-0,016
Udział pojazdów ciężarowych z przyczepą	UCP	β_4	-1,807	-2,650	-1,459	-2,076	-1,745	-1,815	-2,669	-1,956	-2,497
Współczynnik wykrywalności zdarzeń grupa A	WZA	β_7	0,562	0,704				0,748	0,870		
Gęstość łuków poziomych	GLPO	β_9	0,929	0,425	1,083	0,579	0,808	0,941	0,436	0,725	0,509
Odcinek falisty	FA	β_{10}	0,653	0,668	0,654	0,677	0,642	0,652	0,667	0,703	0,671
Udział krawędzi jezdni zab. barierami - stalowymi	UBS	β_{17}	1,181		1,356			1,213		0,809	
Udział krawędzi jezdni zab. barierami - betonowymi	UBB	β_{18}	-3,319		-3,537			-3,254		-3,507	
Udział krawędzi jezdni zab. barierami - linowymi	UBL	β_{19}	1,745		1,817			1,755		1,396	
Udział krawędzi jezdni zab. barierami	UB	β_{20}					1,325				0,950
Udział krawędzi jezdni zab. barierami betonowymi	SB	β_{21}					-0,103				-0,124
Udział krawędzi jezdni zab. barierami linowymi	PUB	β_{24}		0,295		0,290			0,287		
Średni dobowy ruch pojazdów	SDR ₂	β_{27}	1,145	0,969				1,151	0,973		
Długość odcinka drogi	DL	β_{28}			1,198	1,017	1,085				
Liczba obserwacji	n		85	85	85	85	85	85	85	85	85
Liczba parametrów	k		10	8	9	7	8	10	8	8	7
Kryterium informacyjne Akaike	AIC		125,78	148,42	122,84	145,90	138,18	125,21	148,04	129,10	146,21
Pierwiastek błędu średniokwadratowego	$RMSE$		4,452	6,315	4,354	6,231	5,496	4,417	6,282	4,815	6,254
Analiza wykresu CURE Plot	$CURE$		B.dobre	B.dobre	B.dobre	B.dobre	B.dobre	B.dobre	B.dobre	B.dobre	B.dobre
Skorygowany współczynnik determinacji	R^2_{sk}		0,960	0,919	0,962	0,921	0,939	0,960	0,920	0,953	0,921

Źródło: Opracowanie własne

Spośród wszystkich przeanalizowanych modeli ze zbioru danych ogólnych i szczegółowych (tabela 8.7, 8.8) ze względu na przyjęte kryteria, najlepiej oceniono modele A2(1). Należy zauważyć, że w przypadku danych ogólnych model ten nie charakteryzuje się najmniejszą wartością RMSE lecz, jako jeden z dwóch wykazał dobre dopasowanie w ramach wykonanej analizy CURE Plot. W przypadku modelu A2(1) wykres CURE (rysunek 8.8a) nie mieścił się w granicach $\pm 2\sigma$ dla całego zakresu rozważanych wielkości ruchu, dlatego też model zaleca się stosować w ograniczonym zakresie.



Rys. 8.8 Wykresy reszt skumulowanych dla modeli liczby zdarzeń z barierami ochronnymi ze zbioru danych a) ogólnych b) szczegółowych

Źródło: Opracowanie własne

Modele liczby zdarzeń z barierami ochronnymi na odcinkach dróg dwujezdniowych najlepiej aproksymujące dane rzeczywiste do obserwowanych przedstawiają równania 8.25, 8.26, te modele rekomenduje się do praktycznego stosowania.

1) Rekomendowany model liczby zdarzeń z barierami ochronnymi (zd./rok) dla zbioru danych ogólnych:

$$LZDB_i^{A2(1)} = WZA_i \cdot DL_i^{1,090} \cdot SDR_i^{0,687} \cdot \exp(-1,776 - 1,783 \cdot UCP_i + 0,783 \cdot GLPO_i + 0,716 \cdot FA_i + 0,620 \cdot WBL_i) \quad (8.25)$$

2) Rekomendowany model liczby zdarzeń z barierami ochronnymi (zd./rok) dla zbioru danych szczegółowych:

$$LZDB_i^{A2(1)} = WZA_i \cdot DL_i^{1,198} \cdot SDR_i^{0,781} \cdot \exp(-3,648 - 1,459 \cdot UCP_i + 1,083 \cdot GLPO_i + 0,654 \cdot FA_i + 1,356 \cdot UBS_i - 3,319 \cdot UBB_i + 1,817 \cdot UBL_i) \quad (8.26)$$

8.6.3. Modele gęstości zdarzeń

W ramach budowy modeli szacowania liczby zdarzeń o strukturze dwuskładnikowej $LZDB_i^C$ w których modelowanym składnikiem była gęstość zdarzeń $GZDB_i^C$, przeanalizowano i oceniono 60 modeli, spośród których wyselekcjonowano 18 najlepiej aproksymujących dane rzeczywiste pod kątem spełnienia kryteriów zdefiniowanych w rozdziale 8.5.4. Prace prowadzone były z wykorzystaniem 15 zmiennych niezależnych dla modeli ze zbioru danych ogólnych (DO-2J) i 24 zmiennych dla modeli bazujących na danych szczegółowych (DS-2J). W tabeli 8.9 i 8.10 dla wybranych testowanych modeli przedstawiono oszacowane parametry regresji oraz związane z nimi parametry dobroci dopasowania.

Na podstawie analizy opracowanych modeli matematycznych dotyczących gęstości zdarzeń z barierami ochronnymi stwierdzono, że:

1. Wszystkie szacowane parametry dla zmiennych odnoszących się do ruchu i geometrii drogi są spójne między modelami dla danych ogólnych oraz szczegółowych i posiadają określony wpływ (dodatni lub ujemny).
2. We wszystkich zbudowanych modelach statystycznie istotna okazała się zmienna wystawienia na ryzyko tj. natężenie ruchu drogowego (SDR), wykorzystując tylko tą zmienną do uzyskano wartość skorygowanego współczynnika determinacji R^2_{sk} w zakresie 0,048-0,172. Wprowadzenie dodatkowych zmiennych opisujących cechy geometryczno-ruchowe na odcinku drogi uzyskano wzrost współczynnika determinacji R^2_{sk} do 0,869.
3. Z przedstawionych modeli gęstości zdarzeń z barierami ochronnymi wynika, że najbardziej istotnymi zmiennymi niezależnymi wpływającymi na zmienną wzrost współczynnika R^2_{sk} oraz redukcję błędu $RMSE$ są:
 - a) W przypadku modeli bazowych (DO-2J) zmienne ilościowe: gęstość łuków poziomych GLPO, udział pojazdów ciężarowych z przyczepą UCP oraz zmienne jakościowe: Współczynnik wykrywalności zdarzeń grupa A WZA, falistość odcinka drogi FA, współczynnik barier linowych WBL.
 - b) W przypadku modeli szczegółowych (DS-2J) zmienne ilościowe: gęstość łuków poziomych GLPO zamiennie z współczynnikiem krętości odcinka drogi WKO, udział pojazdów ciężarowych z przyczepą UCP, udział barier UB i poszczególnych jego rodzajów tj. stalowych UBS i linowych UBL, odległość barier od krawędzi jezdni SB, oraz zmienne jakościowe: Współczynnik wykrywalności zdarzeń grupa A WZA, falistość odcinka drogi FA.
4. Zwiększenie liczby parametrów podobnie, jak w przypadku modeli z grupy A prowadzi do poprawy jakości modeli w obu grupach danych (ogólnych i szczegółowych), co jest widoczne zarówno w rosnącym R^2_{sk} , jak i malejącym $RMSE$.
5. Modele z grupy danych szczegółowych (DS-2J) wykazują się lepszym dopasowaniem do danych, co przejawia się wyższymi wartościami skorygowanego R^2 i niższymi wartościami $RMSE$ w porównaniu do grupy danych ogólnych (DO-2J). Modele z około 7-9 parametrami ocenia się jako optymalne pod względem dopasowania i dokładności predykcji, przy większej liczbie parametrów może dojść do przeuczenia modelu (overfitting'u) w szczególności w przypadku danych szczegółowych (DS-2J). Największe wskaźniki determinacji i najmniejsze wartości zarówno błędu średniokwadratowego jak i kryterium informacyjnego Akaike uzyskano dla modeli wykorzystujących funkcję potęgowo-wykładniczą.
6. W wyselekcjonowanych modelach najlepiej aproksymujących dane rzeczywiste, statystycznie nieistotne okazały się zmienne: gęstość wjazdów i zjazdów na odcinku drogi GWiZ, liczba pasów ruchu w przekroju drogi LPR, udział pojazdów osobowych UO.

Tab. 8.9 Zestawienie wartości współczynników równania modeli gęstości zdarzeń z barierami ochronnymi z grupy C (DO-2J)

Zmienne niezależne			Wartości współczynnika równania dla modelu GZDB ^c								
			Dane ogólne (DO-2J)								
			C1(1)	C1(2)	C2(1)	C2(2)	C3(1)	C3(2)	C3(3)	C4(1)	C4(2)
Wyraz wolny	-	β_0	-1,289	-1,193	-1,836	-1,750	-1,195	-1,119	-0,778	-2,995	-1,976
Średni dobowy ruch pojazdów	SDR	β_1	0,613	0,582	0,542	0,515	0,546	0,518	0,438	-0,010	-0,015
Udział pojazdów ciężarowych z przyczepą	UCP	β_4	-2,417	-2,544	-2,440	-2,539	-2,422	-2,522	-2,616	-2,361	-5,687
Współczynnik wykrywalności zdarzeń grupa A	WZA	β_7			0,683	0,671	0,469	0,455	0,425	0,586	0,575
Współczynnik wykrywalności zdarzeń grupa B	WZB	β_8	-0,586		-0,603		-0,606			-0,612	-0,645
Gęstość łuków poziomych	GLPO	β_9	0,687	0,701	0,716	0,731	0,711	0,727	0,699	0,670	
Odcinek falisty	FA	β_{10}	0,789	0,791	0,764	0,766	0,767	0,769	0,745	0,806	1,130
Wsp. udziału krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami linowymi	WBL	β_{11}	1,012	1,026	0,985	0,995	1,004	1,013		1,114	0,990
Liczba obserwacji	n		215	215	215	215	215	215	215	215	215
Liczba parametrów	k		7	6	8	7	8	7	6	8	7
Kryterium informacyjne Akaike	AIC		-67,55	-62,44	-73,60	-68,28	-73,57	-68,13	-46,52	-70,38	-26,20
Pierwiastek błędu średniokwadratowego	$RMSE$		0,656	0,680	0,631	0,654	0,631	0,655	0,741	0,642	0,817
Analiza wykresu CURE Plot	$CURE$		B.dobre	Dobre	B.dobre	B.dobre	B.dobre	Dobre	B.dobre	Słabe	Dobre
Skorygowany współczynnik determinacji	R^2_{sk}		0,859	0,849	0,870	0,860	0,870	0,860	0,820	0,865	0,781

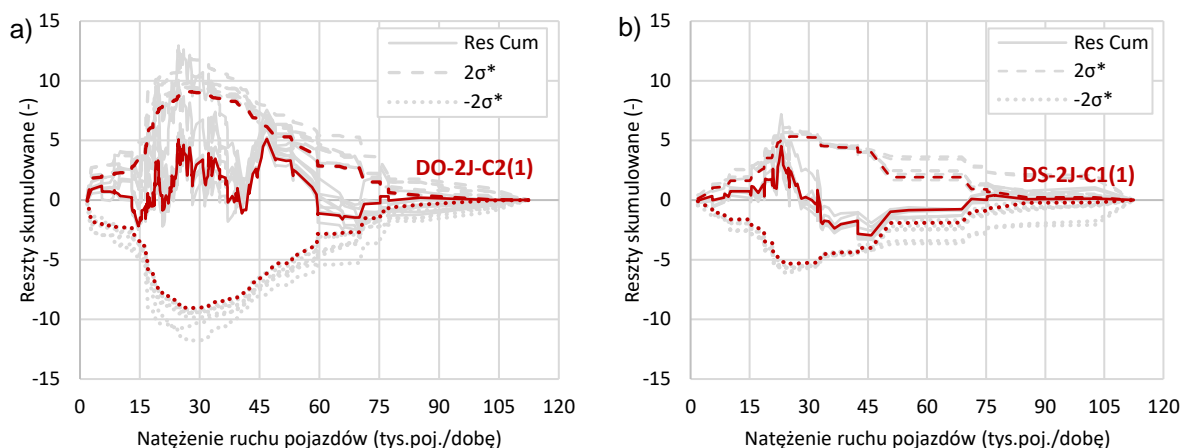
Źródło: Opracowanie własne

Tab. 8.10 Zestawienie wartości współczynników równania modeli gęstości zdarzeń z barierami ochronnymi z grupy C (DS-2J)

Współczynnik regresji			Wartości współczynnika równania dla modelu GZDB ^c								
			Dane szczegółowe (DS-2J)								
			C1(1)	C1(2)	C1(3)	C2(1)	C2(2)	C3(1)	C3(2)	C3(3)	C4(1)
Wyraz wolny	-	β_0	-1,494	-0,962	-1,099	-2,767	-2,449	-1,496	-0,966	-1,104	-3,884
Średni dobowy ruch pojazdów	SDR	β_1	0,510	0,385	0,431	0,505	0,399	0,509	0,388	0,446	-0,010
Udział pojazdów ciężarowych z przyczepą	UCP	β_4	-1,510	-2,093	-1,495	-1,459	-2,052	-1,492	-2,114	-1,557	-1,426
Współczynnik wykrywalności zdarzeń grupa A	WZA	β_7				1,000	1,000	0,972	1,043	1,216	0,952
Gęstość łuków poziomych	GLPO	β_9	0,742	0,648		0,748	0,664	0,742	0,648		0,746
Odcinek falisty	FA	β_{10}	0,626	0,609	0,616	0,644	0,618	0,629	0,604	0,582	0,620
Współczynnik krętości odcinka drogi	WKO	β_{15}			0,011					0,012	
Udział krawędzi jezdni zab. barierami - stalowymi	UBS	β_{17}	1,071		1,524	1,047		1,062		1,581	1,060
Udział krawędzi jezdni zab. barierami - linowymi	UBL	β_{19}	1,606		1,911	1,524		1,599		1,959	1,757
Udział krawędzi jezdni zab. barierami	UB	β_{20}		1,232			1,242		1,246		
Średnia odległość barier od krawędzi jezdni	SB	β_{21}	-0,203	-0,233	-0,368	-0,193	-0,228	-0,200	-0,236	-0,393	-0,168
Liczba obserwacji	n		82	82	82	82	82	82	82	82	82
Liczba parametrów	k		8	7	8	9	8	9	8	9	9
Kryterium informacyjne Akaike	AIC		-21,74	-18,81	-11,68	-18,79	-16,99	-19,74	-16,85	-10,19	-16,90
Pierwiastek błędu średniokwadratowego	$RMSE$		0,619	0,659	0,712	0,632	0,662	0,623	0,663	0,713	0,649
Analiza wykresu CURE Plot	$CURE$		B.dobre	B.dobre	B.dobre	B.dobre	B.dobre	B.dobre	B.dobre	B.dobre	Słabe
Skorygowany współczynnik determinacji	R^2_{sk}		0,928	0,919	0,905	0,925	0,918	0,927	0,918	0,905	0,921

Źródło: Opracowanie własne

Spośród wszystkich przeanalizowanych modeli ze zbioru danych ogólnych i szczegółowych (tabela 8.9-8.10), ze względu na przyjęte kryteria najlepiej oceniono modele C2(1) w grupie danych ogólnych oraz C1(1) w grupie danych szczegółowych. Należy podkreślić, że zarówno w przypadku danych ogólnych jak i szczegółowych modele te charakteryzowały się najmniejszą wartością RMSE. Ponadto w ramach wykonanej analizy CURE Plot (rysunek 8.9) wykazano, że modele te mieszczą się w granicach $\pm 2\sigma$ dla całego zakresu rozważanych wielkości ruchu, dlatego też modele można stosować w pełnym zakresie analizowanego natężenia ruchu.



Rys. 8.9 Wykresy reszt skumulowanych dla modeli gęstości zdarzeń z barierami ochronnymi ze zbioru danych a) ogólnych b) szczegółowych

Źródło: Opracowanie własne

Modele gęstości zdarzeń z barierami ochronnymi na odcinkach dróg dwujezdniowych najlepiej aproksymujące dane rzeczywiste do obserwowanych przedstawiają równania 8.27, 8.28, te modele rekomenduje się do praktycznego stosowania.

- 1) Rekomendowany model gęstości zdarzeń z barierami ochronnymi (zd./km/rok) dla zbioru danych ogólnych:

$$GZDB_i^{C2(1)} = SDR_i^{0,542} \cdot \exp(-1,836 - 2,440 \cdot UCP_i + 0,716 \cdot GLPO_i + 0,683 \cdot WZA_i + 0,764 \cdot FA_i + 0,985 \cdot WBL_i - 0,603 \cdot WZB_i) \quad (8.27)$$

- 2) Rekomendowany model gęstości zdarzeń z barierami ochronnymi (zd./km/rok) dla zbioru danych szczegółowych:

$$GZDB_i^{C1(1)} = SDR_i^{0,510} \cdot WZA_i \cdot \exp(-1,494 - 1,510 \cdot UCP_i + 0,742 \cdot GLPO_i + 0,626 \cdot FA_i + 1,071 \cdot UBS_i + 1,606 \cdot UBL_i - 0,203 \cdot SB_i) \quad (8.28)$$

8.6.4. Modele koncentracji zdarzeń

W ramach budowy modeli szacowania liczby zdarzeń o strukturze dwuskładnikowej $LZDB_i^D$, w których modelowanym składnikiem była koncentracja zdarzeń z barierami ochronnymi $KZDB_i^D$, przeanalizowano i oceniono 47 modeli, spośród których wyselekcjonowano 15 najlepiej aproksymujących dane rzeczywiste pod kątem spełnienia kryteriów zdefiniowanych w rozdziale 8.5.4. Prace prowadzone były z wykorzystaniem 15 zmiennych niezależnych dla modeli ze zbioru danych ogólnych (DO-2J) i 24 zmiennych dla modeli bazujących na danych szczegółowych (DS-2J). W tabeli

8.11 i 8.12 dla wybranych testowanych modeli przedstawiono oszacowane parametry regresji oraz związane z nimi parametry dobroci dopasowania.

Na podstawie analizy opracowanych modeli matematycznych dotyczących koncentracji zdarzeń z barierami ochronnymi stwierdzono, że:

1. Wszystkie szacowane parametry dla zmiennych odnoszących się do ruchu i geometrii drogi są spójne między modelami dla danych ogólnych oraz szczegółowych i posiadają określony wpływ (dodatni lub ujemny).
2. We wszystkich zbudowanych modelach statystycznie istotna okazała się zmienna wystawienia na ryzyko tj. natężenie ruchu drogowego (SDR). Wykorzystując tą zmienną w modelu uzyskano wartość skorygowanego współczynnika determinacji R^2_{sk} jedynie na poziomie 0,05. Wprowadzenie dodatkowych zmiennych opisujących cechy geometryczno-ruchowe na odcinku drogi uzyskano wzrost współczynnika determinacji R^2_{sk} do 0,810 i 0,896 w przypadku danych szczegółowych.
3. Z przedstawionych modeli gęstości zdarzeń z barierami wynika, że najbardziej istotnymi zmiennymi niezależnymi wpływającymi na wzrost współczynnika R^2_{sk} oraz redukcję błędu $RMSE$ są:
 - a) W przypadku modeli bazowych (DO-2J) zmienne ilościowe: gęstość łuków poziomych GLPO, udział pojazdów ciężarowych z przyczepą UCP oraz zmienne jakościowe: Współczynnik wykrywalności zdarzeń grupa A WZA, falistość odcinka drogi FA, współczynnik barier linowych WBL.
 - b) W przypadku modeli szczegółowych (DS-2J) zmienne ilościowe: gęstość łuków poziomych GLPO zamiennie ze współczynnikiem krętości odcinka drogi WKO, udział pojazdów ciężarowych z przyczepą UCP, udział barier UB i poszczególnych jego rodzajów tj. stalowych UBS i linowych UBL, odległość barier od krawędzi jezdni SB, oraz zmienne jakościowe: Współczynnik wykrywalności zdarzeń grupa A WZA, falistość odcinka drogi FA.
4. Zwiększenie liczby parametrów podobnie jak w przypadku modeli z grupy A-C prowadzi do poprawy jakości modeli w obu grupach danych (ogólnych i szczegółowych), co jest widoczne zarówno w rosnącym R^2_{sk} , jak i malejącym $RMSE$ (tabela 8.11-8.12). Modele z grupy danych szczegółowych (DS-2J) wykazują się lepszym dopasowaniem do danych, co przejawia się wyższymi wartościami skorygowanego R^2 i niższymi wartościami $RMSE$ w porównaniu do grupy danych ogólnych (DO-2J).
5. Modele z grupy danych bazowych z 4-7 parametrami i 6-9 parametrami z grupy danych szczegółowych ocenia się jako optymalne pod względem dopasowania i dokładności predykcji. Największe wskaźniki determinacji i najmniejsze wartości zarówno błędu średniokwadratowego, jak i kryterium informacyjnego Akaike, uzyskano dla modeli wykorzystujących funkcję potęgowo-wykładniczą.
6. W wyselekcjonowanych modelach najlepiej aproksymujących dane rzeczywiste, statystycznie nieistotne okazały się zmienne: gęstość miejsc obsługi podróżnych na odcinku drogi GMOP, gęstość wjazdów i zjazdów na odcinku drogi GWiZ, liczba pasów ruchu w przekroju drogi LPR, udział pojazdów osobowych UO.

Tab. 8.11 Zestawienie wartości współczynników równania modelu koncentracji zdarzeń z barierami ochronnymi z grupy D (DO-2J)

Współczynnik regresji			Wartości współczynnika równania dla modelu KZDB ^D					
			Dane ogólne (DO-2J)					
			D1(1)	D1(2)	D2(1)	D2(2)	D3(1)	D3(2)
Wyraz wolny	-	β_0	-1,783	-1,350	-1,034	-0,487		
Średni dobowy ruch pojazdów	SDR	β_1	-0,015	-0,015	-0,416	-0,404	-0,468	-0,512
Udział pojazdów ciężarowych z przyczepą	UCP	β_4	-2,403	-2,300	-2,421	-2,260	-2,676	-2,598
Współczynnik wykrywalności zdarzeń grupa A	WZA	β_7	0,559		0,760			
Gęstość łuków poziomych	GLPO	β_9	0,683	0,658	0,710	0,679	0,722	1,151
Odcinek falisty	FA	β_{10}	0,748	0,793	0,758	0,812	0,732	
Współczynnik udziału krawędzi jezdni zab. barierami linowymi	WBL	β_{11}	0,985	0,963	0,955	0,918	0,965	0,856
Liczba obserwacji		n	215	215	215	215	215	215
Liczba parametrów		k	7	6	7	6	5	4
Kryterium informacyjne Akaike		AIC	-481,99	-479,80	-488,12	-482,18	-485,68	-444,02
Pierwiastek błędu średniokwadratowego		$RMSE$	0,0714	0,0728	0,0691	0,0719	0,0711	0,0896
Analiza wykresu CURE Plot		$CURE$	Dobre	Dobre	Dobre	Słabe	B. dobre	B. dobre
Skorygowany współczynnik determinacji		R^2_{sk}	0,809	0,801	0,821	0,806	0,810	0,698

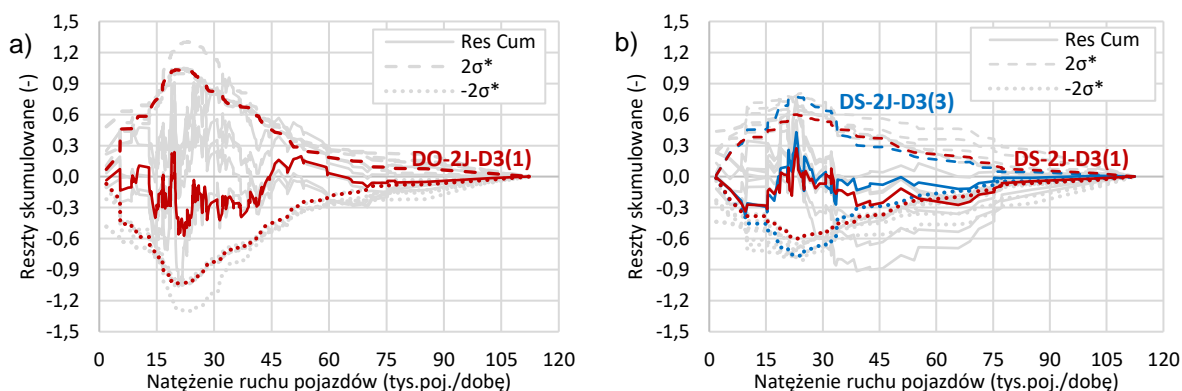
Źródło: Opracowanie własne

Tab. 8.12 Zestawienie wartości współczynników równania modelu koncentracji zdarzeń z barierami ochronnymi z grupy D (DS-2J)

Zmienne niezależne / wskaźniki oceny			Wartości współczynnika równania dla modelu KZDB ^D								
			Dane szczegółowe (DS-2J)								
			D1(1)	D1(2)	D1(4)	D2(1)	D2(2)	D2(3)	D3(1)	D3(2)	D3(3)
Wyraz wolny	-	β_0	-3,092	-2,430	-2,315	-2,315	-1,912	-1,841	-1,020	-0,789	-0,822
Średni dobowy ruch pojazdów	SDR	β_1	-0,017	-0,028	-0,467	-0,467	-0,528	-0,392	-0,473	-0,532	-0,453
Udział pojazdów ciężarowych z przyczepą	UCP	β_4		-1,520				-1,217			
Współczynnik wykrywalności zdarzeń grupa A	WZA	β_7	0,959	0,912	1,281	1,281	1,076	0,868			
Gęstość łuków poziomych	GLPO	β_9	0,813	0,683	0,855	0,855	0,812		0,846	0,807	
Odcinek falisty	FA	β_{10}	0,805	0,630	0,806	0,806	0,728	0,767	0,800	0,719	0,757
Współczynnik krętości odcinka drogi	WKO	β_{15}						0,010			0,012
Udział krawędzi jezdni zab. barierami - stalowymi	UBS	β_{17}	1,167		1,121	1,121		1,281	1,124		1,489
Udział krawędzi jezdni zab. barierami - betonowymi	UBB	β_{18}									-8,812
Udział krawędzi jezdni zab. barierami - linowymi	UBL	β_{19}	1,974		1,902	1,902		2,101	1,955		2,162
Udział krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami	UB	β_{20}		1,428			1,289			1,283	
Średnia odległość barier od krawędzi jezdni	SB	β_{21}	-0,171	-0,230	-0,184	-0,184	-0,225	-0,172	-0,195	-0,233	-0,314
Liczba obserwacji		n	84	84	84	84	84	84	84	84	84
Liczba parametrów		k	8	8	8	8	7	9	7	6	8
Kryterium informacyjne Akaike		AIC	-177,1	-164,8	-171,6	-183,3	-167,9	-159,0	-184,9	-168,1	-164,7
Pierwiastek błędu średniokwadratowego		$RMSE$	0,0746	0,0881	0,0798	0,0684	0,0863	0,0934	0,0684	0,0880	0,0884
Analiza wykresu CURE Plot		$CURE$	Słabe	Słabe	Dobre	Dobre	Dobre	B.dobre	Dobre	Dobre	B.dobre
Skorygowany współczynnik determinacji		R^2_{sk}	0,877	0,828	0,859	0,896	0,835	0,807	0,896	0,829	0,827

Źródło: Opracowanie własne

Spośród wszystkich przeanalizowanych modeli (tabela 8.11-8.12), ze względu na przyjęte kryteria najlepiej oceniono modele D3(1). Należy podkreślić, że zarówno w przypadku danych ogólnych jak i szczegółowych modele te charakteryzowały się najmniejszą wartością RMSE. Należy również zauważyć, że w przypadku danych szczegółowych model ten charakteryzuje się jedynie dobrym dopasowaniem więc model zaleca się stosować jedynie w ograniczonym zakresie. Modelem alternatywnym z najwyższą wartością RMSE, najwyższą AIC i bardzo dobrym dopasowaniem w ramach wykonanej analizy CURE Plot jest model D3(3) oznaczony niebieskim kolorem (rysunek 8.10b i tabela 8.12), którego można stosować w pełnym zakresie analizowanego natężenia ruchu.



Rys. 8.10 Wykresy reszt skumulowanych dla modeli koncentracji zdarzeń z barierami ochronnymi ze zbioru danych a) ogólnych b) szczegółowych

Źródło: Opracowanie własne

Modele koncentracji zdarzeń z barierami ochronnymi na odcinkach dróg dwujezdniowych najlepiej aproksymujące dane rzeczywiste do obserwowanych przedstawiają równania 8.29, 8.30, 8.31, te modele rekomenduje się do praktycznego stosowania.

- 1) Rekomendowany model koncentracji zdarzeń z barierami ochronnymi (zd./mln poj.km/rok) dla zbioru danych ogólnych:

$$KZDB_i^{D3(1)} = WZA_i \cdot SDR_i^{-0,468} \cdot \exp(-2,676 \cdot UCP_i + 0,722 \cdot GLPO_i + 0,732 \cdot FA_i + 0,965 \cdot WBL_i) \quad (8.29)$$

- 2) Rekomendowane modele koncentracji zdarzeń z barierami ochronnymi (zd./mln poj.km/rok) dla zbioru danych szczegółowych:

$$KZDB_i^{D3(1)} = SDR_i^{-0,473} \cdot WZA_i \cdot \exp(-1,020 + 0,846 \cdot GLPO_i + 0,800 \cdot FA_i + 1,124 \cdot UBS_i + 1,955 \cdot UBL_i - 0,195 \cdot SB_i) \quad (8.30)$$

oraz

$$KZDB_i^{D3(3)} = SDR_i^{-0,453} \cdot WZA_i \cdot \exp(-0,821 + 0,012 \cdot WKO_i + 0,757 \cdot FA_i + 1,489 \cdot UBS_i - 8,812 \cdot UBB_i + 2,162 \cdot UBL_i - 0,314 \cdot SB_i) \quad (8.31)$$

8.6.5. Modele długości uszkodzeń barier

W ramach budowy modeli szacowania długości uszkodzeń barier ochronnych o strukturze jednoskładnikowej LUO_i^E przeanalizowano i oceniono 59 modeli, spośród których wyselekcjonowano 16 najlepiej aproksymujących dane rzeczywiste, pod kątem spełnienia kryteriów zdefiniowanych w rozdziale 8.5.4. Prace prowadzone były z wykorzystaniem 15 zmiennych niezależnych dla modeli ze zbioru danych ogólnych (DO-2J) i 24 zmiennych dla modeli bazujących na danych szczegółowych (DS-

2J). W tabeli 8.13, 8.14 dla wybranych testowanych modeli przedstawiono oszacowane parametry regresji oraz związane z nimi parametry dobroci dopasowania.

Na podstawie analizy opracowanych modeli matematycznych dotyczących długości uszkodzeń barier ochronnych stwierdzono, że:

1. Wszystkie szacowane parametry dla zmiennych odnoszących się do ruchu i geometrii drogi są spójne między modelami dla danych ogólnych oraz szczegółowych i posiadają określony wpływ (dodatni lub ujemny).
2. We wszystkich zbudowanych modelach statystycznie istotne okazały się zmienne wystawienia na ryzyko uszkodzenia barier ochronnych, tj. liczby zdarzeń z barierami ochronnymi (LZDB) i/lub natężenie ruchu drogowego (SDR). Wykorzystując tylko te zmienne w modelu uzyskano wartość skorygowanego współczynnika determinacji R^2_{sk} w zakresie 0,502-0,816. Wprowadzając dodatkowe zmienne opisujące cechy geometryczno-ruchowe na odcinku drogi, uzyskano wzrost współczynnika determinacji R^2_{sk} do 0,970.
3. Z przedstawionych modeli liczby zdarzeń z barierami wynika, że najbardziej istotnymi zmiennymi niezależnymi wpływającymi na wzrost współczynnika R^2_{sk} oraz redukcję błędu $RMSE$ są:
 - a) W przypadku modeli bazowych (DO-2J) zmienne ilościowe: udział pojazdów ciężarowych z przyczepą UCP oraz zmienne jakościowe: Współczynnik wykrywalności zdarzeń grupa A WZA, falistość odcinka drogi FA, współczynnik barier linowych WBL.
 - b) W przypadku modeli szczegółowych (DS-2J) zmienne ilościowe: udział pojazdów ciężarowych z przyczepą UCP, współczynnik krętości odcinka drogi WKO, średnią prędkość dopuszczalną na odcinku drogi VDOP, udział krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami poszczególnych rodzajów, tj. stalowych UB_s, linowych UB_L, betonowych UB_B, odległość barier od krawędzi jezdni SB oraz zmienne jakościowe: Współczynnik wykrywalności zdarzeń grupa A WZA, falistość odcinka drogi FA, współczynnik udziału barier linowych na odcinku drogi WBL.
4. Zwiększenie liczby parametrów w modelach prowadzi do poprawy jakości modeli w obu grupach danych (ogólnych i szczegółowych), co jest widoczne zarówno w rosnącym R^2_{sk} , jak i malejącym $RMSE$ (tabela 8.13, 8.14). Modele z grupy danych szczegółowych (DS-2J) wykazują się lepszym dopasowaniem do danych, co przejawia się wyższymi wartościami skorygowanego R^2 i niższymi wartościami $RMSE$ w porównaniu do grupy danych ogólnych (DO-2J).
5. Modele z grupy danych bazowych z 3-6 parametrami i 5-8 parametrami z grupy danych szczegółowych ocenia się, jako optymalne pod względem dopasowania i dokładności predykcji. Największe wskaźniki determinacji i najmniejsze wartości zarówno błędu średniokwadratowego, jak i kryterium informacyjnego Akaike uzyskano dla modeli wykorzystujących funkcję wykładniczą oraz potęgowo wykładniczą.
6. W wyselekcjonowanych modelach najlepiej aproksymujących dane rzeczywiste, statystycznie nieistotne okazały się zmienne: gęstość miejsc obsługi podróżnych na odcinku drogi GMOP, gęstość wjazdów i zjazdów na odcinku drogi GWiZ, oraz zmienne odnoszące się bezpośrednio do liczny zdarzeń z barierami, tj. prawdopodobieństwo uderzenia w barierę wypadającego z jezdni pojazdu PUB, Współczynnik wykrywalności zdarzeń grupa B WZB.

Tab. 8.13 Zestawienie wartości współczynników równania modeli długości uszkodzeń barier ochronnych z grupy E (DO-2J)

Zmienne niezależne / wskaźniki oceny			Wartości współczynnika równania dla modelu LUO ^E							
			Dane ogólne (DO-2J)							
			E1(1)	E1(2)	E2(1)	E2(2)	E3(1)	E3(2)	E4(1)	E4(2)
Wyraz wolny	-	β_0	2,795	3,117	1,793	2,621				
Średni dobowy ruch pojazdów	SDR	β_1					0,748	1,120	0,726	0,900
Udział pojazdów ciężarowych z przyczepą	UCP	β_4	1,810		1,788	1,938	1,855	1,992	1,922	
Współczynnik wykrywalności zdarzeń grupa A	WZA	β_7	0,738	0,922	1,040		1,046		1,025	1,326
Wsp. udziału krawędzi jezdni zabezpieczonych b.linowymi	WBL	β_{11}	0,446	0,434	0,414	0,552	0,454	0,617	0,450	0,436
Średni dobowy ruch pojazdów	SDR ₂	β_{27}					-0,024	-0,038	-0,023	-0,030
Liczba zdarzeń z barierami	LZDB	β_{29}							1,017	0,932
Liczba obserwacji	<i>n</i>		213	213	213	213	213	213	213	213
Liczba parametrów	<i>k</i>		4	3	4	3	5	4	6	5
Kryterium informacyjne Akaike	<i>AIC</i>		815,81	849,65	809,56	840,38	815,43	839,45	817,57	846,67
Pierwiastek błędu średniokwadratowego	<i>RMSE</i>		79,312	95,751	76,689	90,029	78,639	90,170	78,728	93,083
Analiza wykresu CURE Plot	<i>CURE</i>		Słabe	Słabe	Dobre	Słabe	Dobre	Słabe	Słabe	Dobre
Skorygowany współczynnik determinacji	<i>R²_{sk}</i>		0,952	0,930	0,955	0,938	0,953	0,938	0,953	0,934

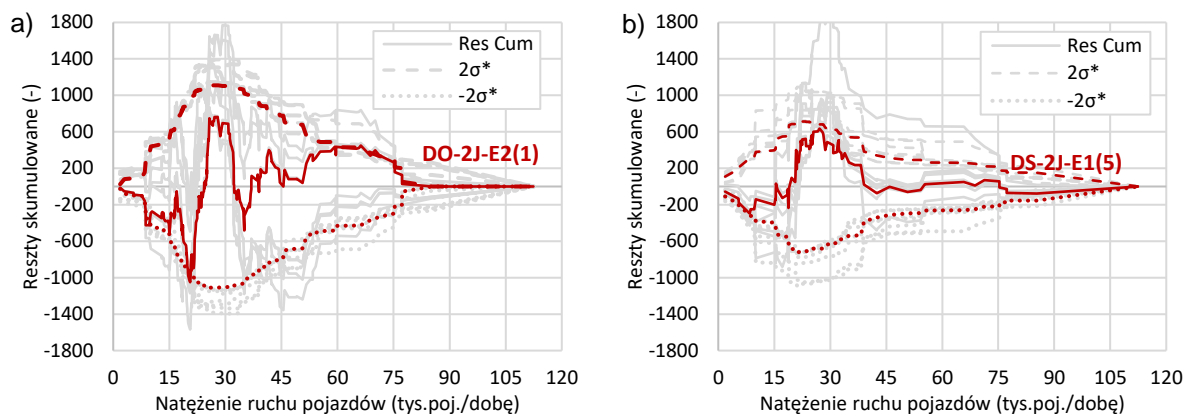
Źródło: Opracowanie własne

Tab. 8.14 Zestawienie wartości współczynników równania modeli długości uszkodzeń barier ochronnych z grupy E (DS-2J)

Współczynnik regresji			Wartości współczynnika równania dla modelu LUO ^E							
			Dane szczegółowe (DS-2J)							
			E1(4)	E1(5)	E2(1)	E2(6)	E3(1)	E3(4)	E4(2)	E4(3)
Wyraz wolny	-	β_0	2,957	3,008	3,021	1,219	1,790	2,176	1,710	2,171
Średni dobowy ruch pojazdów	SDR	β_1	-0,007	-0,008	-0,010		0,503	-0,011	-0,008	-0,011
Udział pojazdów ciężarowych z przyczepą	UCP	β_4				0,722				
Współczynnik wykrywalności zdarzeń grupa A	WZA	β_7	1,065	1,041		1,052			0,700	
Odcinek falisty	FA	β_{10}						-0,060	-0,081	-0,076
Wsp. udziału barier linowych na odcinku drogi	WBL	β_{11}				0,320				
Współczynnik krętości odcinka drogi	WKO	β_{15}	-0,430	-0,481						
Śr. prędkość dop. na odcinku drogi	VDOP	β_{16}				0,006		0,010	0,007	0,010
Udział krawędzi jezdni zabezpieczonych b. stalowymi	UBS	β_{17}	0,600	0,680	0,426		0,466			
Udział krawędzi jezdni zabezpieczonych b. betonowymi	UBB	β_{18}			-9,666		-11,29			-5,630
Udział krawędzi jezdni zabezpieczonych b. linowymi	UBL	β_{19}	0,889	0,952	0,797		0,891	0,389	0,344	0,329
Średnia odległość barier od krawędzi jezdni	SB	β_{21}		-0,038				-0,055		-0,061
Średnioroczne dobowe natężenie ruchu	SDR ₂	β_{27}					-0,026			
Liczba zdarzeń z barierami	LZDB	β_{29}							1,022	1,036
Liczba obserwacji	<i>n</i>		85	85	85	85	85	85	85	85
Liczba parametrów	<i>k</i>		6	7	5	7	6	6	7	8
Kryterium informacyjne Akaike	<i>AIC</i>		334,92	335,94	362,57	344,01	361,56	339,54	335,24	339,72
Pierwiastek błędu średniokwadratowego	<i>RMSE</i>		82,019	81,481	121,705	94,671	118,065	86,922	80,749	84,227
Analiza wykresu CURE Plot	<i>CURE</i>		B.dobre	B.dobre	B.dobre	Słabe	Dobre	Dobre	Dobre	Dobre
Skorygowany współczynnik determinacji	<i>R²_{sk}</i>		0,970	0,970	0,933	0,960	0,937	0,966	0,971	0,968

Źródło: Opracowanie własne

Spośród wszystkich przeanalizowanych modeli (tabela 8.13, 8.14), ze względu na przyjęte kryteria najlepiej oceniono modele E2(1) ze zbioru danych ogólnych oraz E1(5) ze zbioru danych szczegółowych. W przypadku danych ogólnych model E2(1) charakteryzuje się jedynie dobrym dopasowaniem w ramach analizy CURE Plot (rysunek 8.11a), stąd też model zaleca się stosować jedynie w ograniczonym zakresie. W przypadku modelu E1(5) dla danych szczegółowych, wykres CURE (rysunek 8.11b) mieścił się w granicach $\pm 2\sigma$ dla całego zakresu rozważanych wielkości ruchu.



Rys. 8.11 Wykresy reszt skumulowanych dla modeli długości uszkodzeń barier ochronnych ze zbioru danych a) ogólnych b) szczegółowych

Źródło: Opracowanie własne

Modele długości uszkodzeń barier ochronnych na odcinkach dróg dwujezdniowych najlepiej aproksymujące dane rzeczywiste do obserwowanych, przedstawiają równania 8.32, 8.33, te modele rekomenduje się do praktycznego stosowania.

1) Rekomendowany model długości uszkodzeń barier ochronnych (m/rok) dla zbioru danych ogólnych:

$$LUO_i^{E2(1)} = LZDB_i^M \cdot \exp(1,793 + 1,788 \cdot UCP_i + 1,040 \cdot WZA_i + 0,414 \cdot WBL_i) \quad (8.32)$$

2) Rekomendowany model długości uszkodzeń barier ochronnych (m/rok) dla zbioru danych szczegółowych:

$$LUO_i^{E1(5)} = LZDB_i^M \cdot WZA_i^{1,041} \cdot \exp(3,008 - 0,008 \cdot \frac{SDR_i}{1000} - 0,481 \cdot \frac{WKO_i}{100} + 0,679 \cdot UBS_i + 0,951 \cdot UBL_i - 0,038 \cdot SB_i) \quad (8.33)$$

8.6.6. Modele gęstości uszkodzeń

W ramach budowy modeli szacowania długości uszkodzeń barier ochronnych o strukturze dwuskładnikowej LUO_i^F , w których modelowanym składnikiem była gęstość uszkodzeń barier ochronnych na odcinku drogi GUO_i^F , przeanalizowano i oceniono 65 modeli, spośród których wyselekcjonowano 16 najlepiej aproksymujących dane rzeczywiste pod kątem spełnienia kryteriów zdefiniowanych w rozdziale 8.5.4. Prace prowadzone były z wykorzystaniem 15 zmiennych niezależnych dla modeli ze zbioru danych ogólnych (DO-2J) i 24 zmiennych dla modeli bazujących na danych szczegółowych (DS-2J). W tabeli 8.15 dla wybranych testowanych modeli przedstawiono oszacowane parametry regresji oraz związane z nimi parametry dobroci dopasowania.

Na podstawie analizy opracowanych modeli matematycznych dotyczących gęstości uszkodzeń barier ochronnych stwierdzono, że:

1. Wszystkie szacowane parametry dla zmiennych odnoszących się do ruchu i geometrii drogi są spójne między modelami dla danych ogólnych oraz szczegółowych i posiadają określony wpływ (dodatni lub ujemny).
2. We wszystkich zbudowanych modelach statystycznie istotne okazały się zmienne wystawienia na ryzyko uszkodzenia barier ochronnych, tj. gęstość zdarzeń z barierami ochronnymi (GZDB) i/lub natężenie ruchu drogowego (SDR). Wykorzystując tylko te zmienne do opisu modeli, uzyskano wartość skorygowanego współczynnika determinacji R^2_{sk} w zakresie 0,518-0,749. Wprowadzenie dodatkowych zmiennych opisujących cechy geometryczno-ruchowe na odcinku drogi, pozwoliło uzyskać wzrost współczynnika determinacji R^2_{sk} do 0,879 dla zbioru danych ogólnych i 0,921 dla zbioru danych szczegółowych.
3. Z przedstawionych modeli liczby zdarzeń z barierami wynika, że najbardziej istotnymi zmiennymi niezależnymi wpływającymi na wzrost współczynnika R^2_{sk} oraz redukcję błędu $RMSE$ są:
 - a) W przypadku modeli bazowych (DO-2J) zmienne ilościowe: udział pojazdów ciężarowych z przyczepą UCP oraz zmienne jakościowe: współczynnik wykrywalności zdarzeń grupy A WZA, falistość odcinka drogi FA, współczynnik barier linowych WBL.
 - b) W przypadku modeli szczegółowych (DS-2J) zmienne ilościowe: gęstość łuków poziomych GLPO, zamiennie z współczynnikiem krętości odcinka drogi WKO, udział pojazdów ciężarowych z przyczepą UCP, średnią prędkość dopuszczalną na odcinku drogi VDOP, udział krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami poszczególnych rodzajów tj. stalowych UB_s, linowych UB_L, betonowych UB_B, odległość barier od krawędzi jezdni SB oraz zmienne jakościowe: współczynnik wykrywalności zdarzeń grupy A WZA.
4. Zwiększenie liczby parametrów w modelach prowadzi do poprawy jakości modeli w obu grupach danych (ogólnych i szczegółowych), co jest widoczne zarówno w rosnącym R^2_{sk} , jak i malejącym $RMSE$ (tabela 8.15 i 8.16).
5. Modele z grupy danych szczegółowych (DS-2J) wykazują się lepszym dopasowaniem do danych, co przejawia się wyższymi wartościami skorygowanego R^2 i niższymi wartościami $RMSE$ w porównaniu do grupy danych ogólnych (DO-2J). Modele z 6-8 parametrami ocenia się jako optymalne pod względem dopasowania i dokładności predykcji.
6. Największe wskaźniki determinacji oraz najmniejsze wartości zarówno błędu średniokwadratowego, jak i kryterium informacyjnego Akaike uzyskano dla modeli wykorzystujących funkcję wykładniczą oraz potęgowo wykładniczą.
7. W wyselekcjonowanych modelach najlepiej aproksymujących dane rzeczywiste, statystycznie nieistotne okazały się zmienne: gęstość miejsc obsługi podróżnych na odcinku drogi GMOP, gęstość wjazdów i zjazdów na odcinku drogi GWiZ, oraz zmienne odnoszące się bezpośrednio do liczby zdarzeń z barierami tj. prawdopodobieństwo uderzenia w barierę wypadającego z jezdni pojazdu PUB, Współczynnik wykrywalności zdarzeń grupa B WZB.

Tab. 8.15 Zestawienie wartości współczynników równania modeli koncentracji zdarzeń z barierami ochronnymi z grupy F (DO-2J)

Współczynnik regresji			Wartości współczynnika równania dla modelu GUO ^F						
			Dane ogólne (DO-2J)						
			F1(1)	F1(2)	F2(1)	F2(2)	F2(3)	F3(1)	F3(2)
Wyraz wolny	-	β_0	2,177	2,116	2,270	2,303	2,120	0,944	0,976
Średni dobowy ruch pojazdów	SDR	β_1	-0,004	-0,003	-0,003			0,508	0,460
Udział pojazdów ciężarowych z przyczepą	UCP	β_4	0,930	1,049	0,597		0,742	1,129	1,291
Współczynnik wykrywalności zdarzeń grupa A	WZA	β_7	0,825	0,805	0,830	0,860	0,843	0,721	0,699
Odcinek falisty	FA	β_{10}	-0,086			0,188		-0,111	
Współczynnik udziału krawędzi jezdni zab. b.linowymi	WBL	β_{11}	0,469	0,511	0,518	0,660	0,567	0,543	0,592
Średni dobowy ruch pojazdów	SDR ₂	β_{27}						-0,017	-0,015
Gęstość zdarzeń z barierami	GZDB	β_{30}			0,914	0,780	0,915		
Liczba obserwacji		n	210	210	210	210	210	210	210
Liczba parametrów		k	6	5	6	5	5	7	6
Kryterium informacyjne Akaike		AIC	423,00	423,78	420,67	422,04	422,47	419,17	421,90
Pierwiastek błędu średniokwadratowego		$RMSE$	9,646	9,722	9,534	9,686	9,712	9,353	9,495
Analiza wykresu CURE Plot		$CURE$	Słabe	Słabe	Słabe	Słabe	Słabe	Dobre	Dobre
Skorygowany współczynnik determinacji		R^2_{sk}	0,871	0,869	0,874	0,870	0,869	0,879	0,875

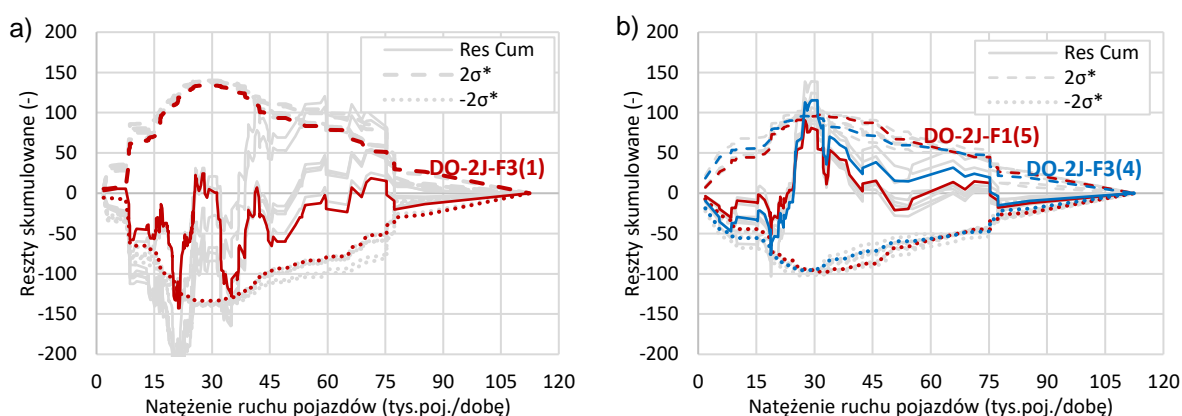
Źródło: Opracowanie własne

Tab. 8.16 Zestawienie wartości współczynników równania modeli gęstości uszkodzeń barier ochronnych z grupy F (DS-2J)

Zmienne niezależne / wskaźniki oceny			Wartości współczynnika równania dla modelu GUO ^F								
			Dane szczegółowe (DS-2J)								
			F1(3)	F1(4)	F1(5)	F2(1)	F2(2)	F2(3)	F3(1)	F3(3)	F3(4)
Wyraz wolny	-	β_0	1,316	1,850	1,138	1,690	0,519	0,818	2,058	2,066	1,470
Średni dobowy ruch pojazdów	SDR	β_1	-0,010	-0,012	-0,009	-0,011	-0,007	-0,008	-0,338	-0,299	-0,315
Współczynnik wykrywalności zdarzeń grupy A	WZA	β_7			0,710		0,906	0,654		0,817	0,833
Gęstość łuków poziomych	GLPO	β_9	0,170				0,322	0,266			0,208
Współczynnik krętości odcinka drogi	WKO	β_{15}							0,208		
Śr. prędkość dop. na odcinku drogi	VDOP	β_{16}	0,015	0,013	0,010	0,013	0,014	0,014	0,015	0,010	0,013
Udział krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami - stalowymi	UBS	β_{17}			0,296						
Udział krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami - betonowymi	UBB	β_{18}	-6,472	-7,818	-5,253	-7,041		-4,928	-5,889	-5,008	-4,647
Udział krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami - linowymi	UBL	β_{19}	0,472	0,392	0,666	0,422	0,547	0,468	0,462	0,356	0,393
Średnia odległość barier od krawędzi jezdni	SB	β_{21}		-0,056							
Liczba zdarzeń z barierami	GZDB	β_{30}				1,044	0,906				
Liczba obserwacji		n	85	85	85	85	85	85	85	85	85
Liczba parametrów		k	6	6	7	6	7	8	6	6	7
Kryterium informacyjne Akaike		AIC	186,28	187,66	188,23	188,24	188,82	187,23	189,68	189,08	187,14
Pierwiastek błędu średniokwadratowego		$RMSE$	10,978	11,197	11,053	11,285	11,143	10,684	11,506	11,138	10,873
Analiza wykresu CURE Plot		$CURE$	Dobre	B.dobre	B.dobre	B.dobre	Dobre	Dobre	Dobre	B.dobre	Dobre
Skorygowany współczynnik determinacji		R^2_{sk}	0,924	0,921	0,923	0,920	0,922	0,928	0,916	0,918	0,925

Źródło: Opracowanie własne

Spośród wszystkich przeanalizowanych modeli (tabela 8.15 i 8.16), ze względu na przyjęte kryteria najlepiej oceniono modele F3(1) ze zbioru danych ogólnych oraz F3(4) i F1(5) ze zbioru danych szczegółowych. Należy podkreślić, że w przypadku danych ogólnych model F-3(1) charakteryzuje się jedynie dobrym dopasowaniem w ramach analizy *CURE Plot* (rysunek 8.12a), stąd też ten model zaleca się stosować jedynie w ograniczonym zakresie. W przypadku danych szczegółowych model F3(4) oznaczony niebieskim kolorem, osiągnął najlepsze dopasowanie pod względem kryteriów głównych (R^2_{sk} , $RMSE$), *jednakże* charakteryzuje się on jedynie dobrym dopasowaniem w ramach wykonanej analizy *CURE Plot* (rysunek 8.12b). Dlatego też, model F3(4) zaleca się stosować w ograniczonym zakresie natężenia ruchu pojazdów. Modelem alternatywnym z najlepszym dopasowaniem, zarówno kryteriów głównych, jak i najniższą oceną *AIC* i bardzo dobrym dopasowaniem w ramach wykonanej analizy *CURE Plot*, jest model F1(5) oznaczony czerwonym kolorem (rysunek 8.12b i tabela 8.16), który można stosować w pełnym zakresie analizowanego natężenia ruchu.



Rys. 8.12 Wykresy reszt skumulowanych dla modeli gęstości uszkodzeń barier ochronnych ze zbioru danych a) ogólnych b) szczegółowych

Źródło: Opracowanie własne

Modele długości uszkodzeń barier ochronnych na odcinkach dróg dwujezdniowych najlepiej aproksymujące dane rzeczywiste do obserwowanych, przedstawiają równania 8.34, 8.35, 8.36.

1) Rekomendowany model gęstość uszkodzeń barier ochronnych (m/rok) dla zbioru danych ogólnych:

$$GUO_i^{F3(1)} = GZDB_i^M \cdot \left(\frac{SDR_i}{1000}\right)^{0,508} \cdot \exp(0,944 + 0,017 \cdot \left(\frac{SDR_i}{1000}\right) + 1,129 \cdot UCP + 0,721 \cdot WZA_i - 0,111 \cdot FA + 0,543 \cdot WBL_i) \quad (8.34)$$

2) Rekomendowane modele gęstości uszkodzeń barier ochronnych (m/rok) dla zbioru danych szczegółowych:

$$GUO_i^{F1(5)} = GZDB_i^M \cdot \exp(1,138 - 0,009 \cdot \left(\frac{SDR_i}{1000}\right) + 0,710 \cdot WZA_i + 0,010 \cdot VDOP_i + 0,296 \cdot UBS_i - 5,253 \cdot UBB_i + 0,666 \cdot UBL_i) \quad (8.35)$$

oraz

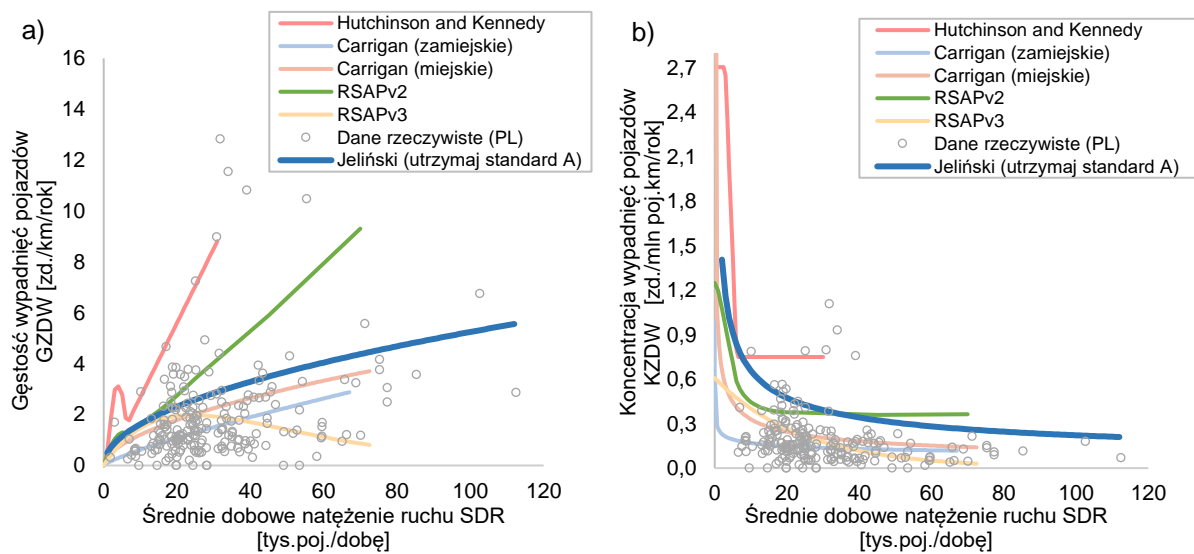
$$GUO_i^{F3(4)} = GZDB_i^M \cdot \left(\frac{SDR_i}{1000}\right)^{-0,315} \cdot \exp(1,470 + 0,833 \cdot WZA_i + 0,208 \cdot GLPO_i + 0,013 \cdot VDOP_i - 4,647 \cdot UBB_i + 0,393 \cdot UBL_i) \quad (8.36)$$

8.7. Podsumowanie i wnioski

Przedmiotem prowadzonych w niniejszym rozdziale badań i analiz była budowa modeli matematycznych, opisujących częstość zdarzeń i wielkość uszkodzeń barier ochronnych na odcinku drogi. W wyniku przeprowadzonej analizy dokonano wyboru modeli, które najlepiej spełniały założone kryteria w zakresie: poprawności przyjętych danych i parametrów, dokładności dopasowania do danych empirycznych, spełnienia stawianych warunków brzegowych (co stanowi spełnienie 3 celu naukowego CN-3). Wyniki przeprowadzonych analiz pozwoliły udzielić odpowiedzi na postawione pytania badawcze, a także pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

1. Do szacowania liczby zdarzeń pojazdów z barierami ochronnymi oraz wielkości uszkodzeń strat związanych z uszkodzeniem bariery ochronnej przyjęto następujące miary reprezentujące:
 - a) częstość zdarzeń: liczba zdarzeń z barierami ochronnymi na odcinku drogi (LZDB), gęstość zdarzeń z barierami ochronnymi na odcinku drogi (GZDB), koncentracja zdarzeń z barierami ochronnymi na odcinku drogi (KZDB).
 - b) wielkość uszkodzeń: długość uszkodzeń barier ochronnych na odcinku drogi (LUO), gęstość uszkodzeń barier ochronnych na odcinku drogi (GUO).
2. W zależności od stopnia dostępności danych, modele dotyczące szacowania częstości i wielkości uszkodzeń barier ochronnych podzielono na:
 - a) modele ogólne bazujące na łatwo dostępnych danych i umożliwiającym stosunkowo szybkie wyznaczenia wybranych miar,
 - b) modele szczegółowe bazujące na danych wymagających dłuższych obliczeń oraz dostępu m.in. do dokumentacji projektowej odcinka drogi).
3. Z grupy czynników wpływających na zmianę częstości i wielkości uszkodzeń barier ochronnych na odcinku drogi, wybrano czynniki reprezentujące geometrię drogi oraz jej wyposażenie, konstrukcje barier, metody utrzymania drogi, a także parametry ruchu pojazdów na drodze.
4. Wykorzystując analizę siły związków pomiędzy zmiennymi niezależnymi i zależnymi (przy pomocy współczynnika korelacji liniowej, rang Spearmana lub statystyką F) określono wstępnie najbardziej istotne czynniki wpływające na częstość zdarzeń i wielkość uszkodzeń barier ochronnych.
5. W celu wyeliminowania efektu nadmiarowości w procesie budowy modeli, wykonano analizę korelacji między poszczególnymi zmiennymi niezależnymi, która pozwoliła na wyeliminowanie zmiennych niezależnych silnie z sobą skorelowanych.
6. Wykorzystując zebrane dane dotyczące odcinków dróg, opracowano po 6 – 9 modeli ogólnych i modeli szczegółowych zależności poszczególnych miar częstości zdarzeń (LZDB, GZDB i KZDB) oraz wielkości uszkodzeń barier (LUO i GUO) od najbardziej istotnych czynników, z których wybrano po jednym modelu najlepiej spełniającym przyjęte kryteria i warunki brzegowe.
7. Najbardziej istotnymi czynnikami wpływającymi na częstość zdarzeń z barierami drogowymi na odcinkach dróg są: długość odcinka drogi (DL), praca przewozowa (PP), średni dobowy ruch pojazdów (SDR), falistość odcinka drogi (FA), udział pojazdów osobowych i ciężarowych (UO,UCP), gęstość łuków poziomych (GLPO), wskaźnik krętości odcinka drogi (WKO), współczynnik wykrywalności zdarzeń (WZA), odległości barier od krawędzi jezdni (SB, SBd, SBs), prawdopodobieństwo uderzenia w barierę (PUB), gęstość wjazdów i zjazdów (GWiZ, GMOP).

8. Najbardziej istotnymi czynnikami wpływającymi na wielkość uszkodzeń barier na odcinkach dróg są: wielkości uszkodzeń barier, którymi są: liczba (LZDB) i gęstość zdarzeń z barierami ochronnymi (GZDB), średni dobowy ruch pojazdów (SDR), średnia prędkość dopuszczalna (VDOP), falistość odcinka drogi (FA), udział pojazdów ciężarowych z przyczepą (UCP), gęstość łuków poziomych (GLPO), wskaźnik krętości odcinka drogi (WKO), współczynnik wykrywalności zdarzeń (WZA), współczynnik klasy drogi (WKD), odległości barier od krawędzi jezdni (SB, SBd, SBs).
9. Porównując wykresy opracowanych modeli gęstości wypadnięć pojazdów (rys. 8.13a) i koncentracji wypadnięć pojazdów, na odcinkach dróg dwujezdniowych (rysunek 8.13b) od średniorocznego natężenia ruchu z wykresami dostępnych modeli opracowanych przez innych autorów, na tle danych z badań, stwierdzono ich dużą zbieżność.



Rys. 8.13 Proponowane wybrane modele szczegółowe autora na tle dostępnych modeli dotyczącymi szacowania a) gęstości wypadnięć pojazdów, b) koncentracji wypadnięć pojazdów, na odcinkach dróg dwujezdniowych

Źródło: opracowanie własne na podstawie [151]

9. BADANIA WPŁYWU WYBRANYCH CZYNNIKÓW NA FUNKCJONOWANIE BARIER

9.1. Metodyka badania wpływu wybranych czynników

W niniejszym rozdziale przedstawiono metodykę badania wpływu wybranych czynników na funkcjonowanie barier ochronnych. Celem tych badań jest zrozumienie dynamiki wpływu poszczególnych czynników na modelowane miary częstości i wielkości rejestrowanych uszkodzeń barier ochronnych. Wyniki tych analiz, stanowią dodatkowo podstawę do formułowania rekomendacji oraz zaleceń dotyczących optymalizacji i zarządzania drogowymi barierami ochronnymi z uwzględnieniem zmienności warunków oraz specyfiki badanych systemów.

Zbudowane modele regresyjne pozwoliły na oszacowanie wpływu poszczególnych czynników na wybraną miarę. Aby ocenić wpływ wszystkich zmiennych niezależnych na zmienną zależną, zastosowano wskaźnik elastyczności łukowej (AE - z ang. Arc Elasticity). Wybór tego wskaźnika wynikał przede wszystkim z użycia nieliniowych funkcji łączących, podczas budowy modeli. Wykorzystanie wskaźnika AE pozwoliło określić średnią wartość procentowej zmiany zmiennej zależnej Y w przypadku jednoprocetowej zmiany zmiennej niezależnej x^i w przedziale między dwoma punktami granicznymi t_1, t_2 na krzywej obrazującej ten wpływ. W przypadku wartości granicznych przyjęto, że zmienna niezależna przyjmuje wartości od minimum do maksimum, natomiast wartości pozostałych zmiennych niezależnych przyjmują wartości średnie, lub najbliższe średnim wartościom (w szczególności w przypadku zmiennych jakościowych), przyjęte na podstawie tablicy 8.2-8.3. Ostatecznie wartość AE obliczana została według wzoru 9.1 [184],[104]:

$$AE_{Y/x_i} = \frac{\Delta Y / Y_{avg}}{\Delta x_i / x_{i,avg}} = \frac{(Y_{t_2} - Y_{t_1})}{0,5 \cdot (Y_{t_2} + Y_{t_1})} \div \frac{(x_{t_2}^i - x_{t_1}^i)}{0,5 \cdot (x_{t_2}^i + x_{t_1}^i)} \quad (9.1)$$

gdzie:

AE_{Y/x_i} – wskaźnik elastyczności łukowej

Y_{t_2}, Y_{t_1} - wartość zmiennej zależnej dla granic analizowanej przedziału zmiennej niezależnej t_1, t_2

$x_{t_2}^i, x_{t_1}^i$ - wartość i-tej zmiennej niezależnej dla jej granic przedziału t_1, t_2 .

Analizę elastyczności łukowej przeprowadzono dla wybranych, najlepiej ocenionych modeli poszczególnych miar częstości i wielkości uszkodzeń barier ochronnych, zaprezentowanych w rozdziale 8.6. W celu oszacowania wpływu wybranych zmiennych niezależnych w modelach LUO_i^E, GUO_i^F opisanych wzorami 8.32-8.35, w których jedną ze zmiennych niezależnych była modelowana wcześniej liczba zdarzeń lub gęstość zdarzeń przyjęto, że ich wartość pozostanie na stałym poziomie. Podejście to pozwoliło na oszacowanie wpływu wybranej zmiennej niezależnej (np. UCP, SDR), występującej wyłącznie w analizowanym modelu (LUO_i^E, GUO_i^F), a nie szacowaniu wartości skumulowanych tej zmiennej w przypadku, kiedy zmienna ta występowała także w modelach $LZDB_i^M$ czy $GZDB_i^M$.

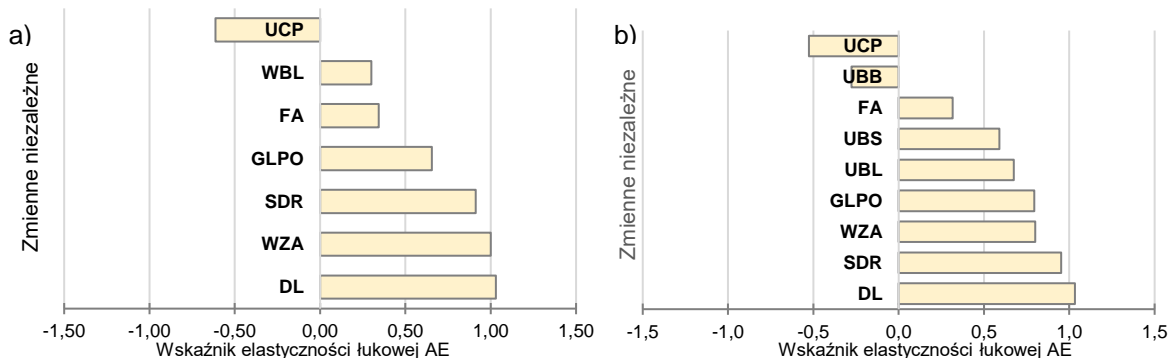
9.2. Analiza wpływu wybranych czynników

9.2.1. Liczba zdarzeń z barierami ochronnymi

Analizę wpływu zmiennych niezależnych opisujących liczbę zdarzeń z barierami ochronnymi (LZDB), przeprowadzono dla najlepiej ocenionych w rozdziale 8.6 modeli dla danych ogólnych oraz szczegółowych, opisanych kolejno wzorem 8.25 i 8.26. Dla wymienionych modeli obliczono wskaźniki elastyczności łukowej AE, których wyniki w postaci graficznej przedstawiono na rysunku 9.1 oraz tabeli 9.1.

Wybrane modele wskazują dziesięć istotnych zależności pomiędzy ruchem pojazdów, geometrią, wyposażeniem i utrzymaniem drogi, a zarejestrowaną liczbą zdarzeń z barierami ochronnymi:

- wpływających na zwiększenie liczby zdarzeń z barierami: długość odcinka drogi (DL), średni dobowy ruch pojazdów (SDR), współczynnik wykrywalności zdarzeń grupy A (WZA), gęstość łuków poziomych (GLPO), udział oraz współczynnik krawędzi jezdni wyposażonych w bariery linowe (UBL, WBL), udział krawędzi jezdni wyposażonych w bariery stalowe (UBS), falistość odcinka (FA),
- wpływających na zmniejszenie liczby zdarzeń z barierami ochronnymi: udział pojazdów ciężarowych z przyczepą (UCP), udział barier betonowych (UBB).



Oznaczenia: DL - długość odcinka, FA – odcinek falisty, GLPO – gęstość łuków poziomych, SDR – średni dobowy ruch pojazdów, UBB – udział barier betonowych, UBL – udział barier linowych, UBS – udział barier stalowych, UCP – udział pojazdów ciężarowych z przyczepą, WBL – współczynnik udziału barier linowych, WZA – współczynnik wykrywalności zdarzeń grupy A.

Rys. 9.1 Wpływ zmiennych niezależnych na liczbę zdarzeń z barierami ochronnymi w wybranych modelach bazujących na a) danych ogólnych (DO-2J-A2(1)), b) danych szczegółowych (DS-2J-A2(1))

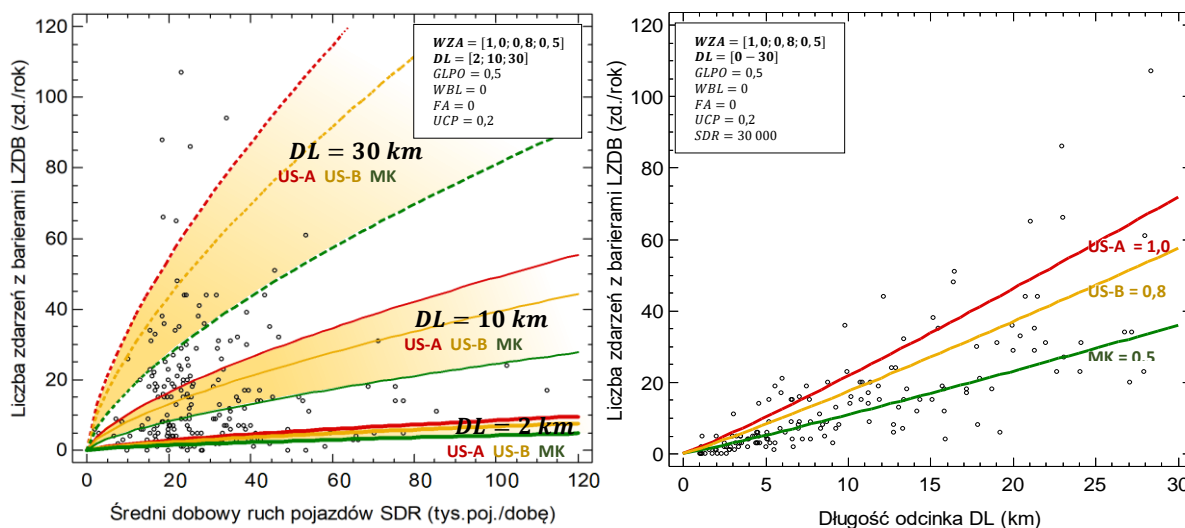
Źródło: Opracowanie własne

Tab. 9.1 Zestawienie wpływu zmiennych niezależnych na zmianę liczby zdarzeń z barierami w przypadku wzrostu wartości zmiennej niezależnej z wybranego modelu o 1%.

Analizowana zmienna niezależna		Zmiana obserwowanych wartości liczby zdarzeń z barierami LZDB (%)	
		Model bazowy DO-2J-A2(1)	Model szczegółowy DS-2J-A2(1)
DL	Długość odcinka drogi	1,03	1,03
SDR	Średni dobowy ruch pojazdów	0,91	0,95
WZA	Współczynnik wykrywalności zdarzeń grupy A	1,00	0,80
GLPO	Gęstość łuków poziomych	0,65	0,79
UBL	Udział krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami linowymi		0,67
UBS	Udział krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami stalowymi		0,59
FA	Falistość odcinka drogi	0,34	0,32
WBL	Współczynnik udziału krawędzi jezdni zabezp. b.linowymi	0,30	
UCP	Udział pojazdów ciężarowych	-0,61	-0,28
UBB	Udział krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami betonowymi		-0,58

Źródło: Opracowanie własne

Analizując otrzymane wyniki stwierdzono, że długość odcinka drogi (DL) oraz natężenie ruchu drogowego (SDR), jako zmienne wystawienia na ryzyko mają największy wpływ na zwiększenie liczby rejestrowanych zdarzeń z barierami ochronnymi na odcinkach dróg dwujezdniowych (rysunek 9.2a). Istotność tych zmiennych potwierdzają również wnioski z badań literaturowych w modelach częstotliwości wypadnięć pojazdów z jezdni.



Rys. 9.2 Wpływ na liczbę zdarzeń z barierami: a) natężenia ruchu (SDR) i długości odcinka (DL) b) długości odcinka (DL), względem modelu wskaźnika wykrywalności (WZA) modelu DO-2J-A2(1)

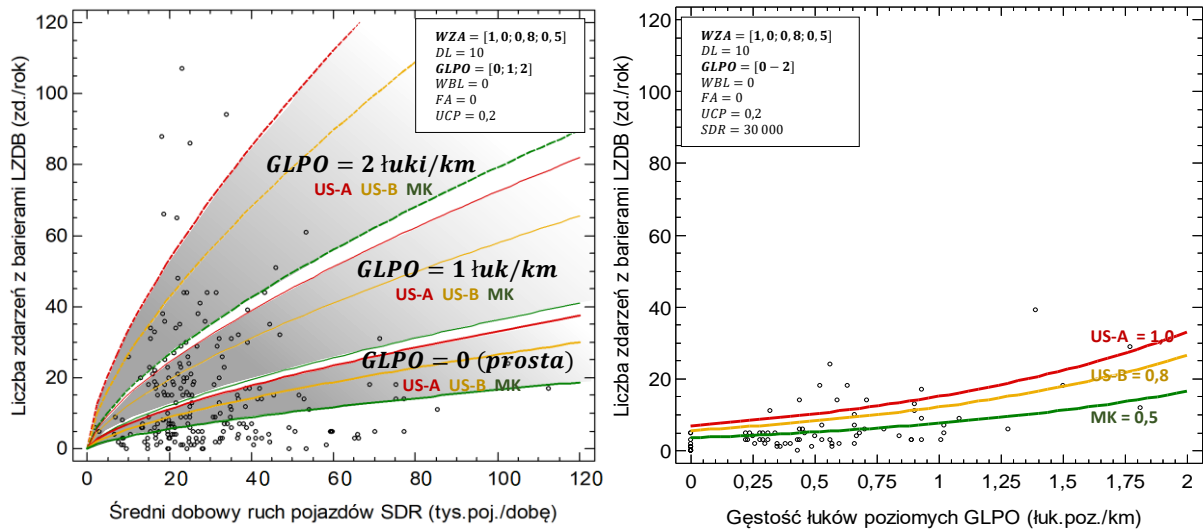
Źródło: Opracowanie własne

Kolejnym najbardziej istotnym elementem związanym z zwiększeniem liczby zarejestrowanych przez służby utrzymaniowe zdarzeń z barierami jest wskaźnik wykrywalności zdarzeń (WZA). Wyższy standard utrzymania przyczynia się do częstszych kontroli urządzeń brd (np. przejazd co 2h zamiast co 1-3 dni) oraz większych wymagań estetyki i bezpieczeństwa na drodze. Skutkuje to zwiększeniem szans zlokalizowania uszkodzonych barier, kwalifikacji ich do wymiany i ostatecznie zarejestrowania zdarzenia przez służby utrzymaniowe.

W zbudowanych modelach na rysunkach 9.2-9.4 widać wyraźne różnice w liczbie rejestrowanych zdarzeń pomiędzy poszczególnymi modelami utrzymania: model utrzymaj standard A (US-A), model utrzymaj standard B (US-B) oraz model klasyczny (MK) w różnych warunkach. Najwyższym wskaźnikiem wykrywalności zdarzeń charakteryzują się odcinki dróg, na których stosowany jest model utrzymaj standard A, którego wartość wskaźnika WZA wynosi 1. Wartość równa 1 oznacza wykrywalność i rejestrowalność zdarzeń z barierami ochronnymi na najwyższym poziomie, tj. bliskim, równym 100%. Nieco niższą wartością wskaźnika wykrywalności charakteryzują się odcinki, na których stosowany jest model utrzymaj standard B (US-B), którego wartość WZA wynosi 0,8. Najniższym wskaźnikiem WZA opisane są odcinki, na których zastosowano model klasyczny (MK), w tym przypadku wartość WZA=0,5. Model klasyczny (MK) charakteryzuje się najniższym współczynnikiem wykrywalności zdarzeń WZA, w związku z czym liczba wykrytych zdarzeń związanych z uszkodzeniem barier jest dużo mniejsza niż w przypadku modelu US-A.

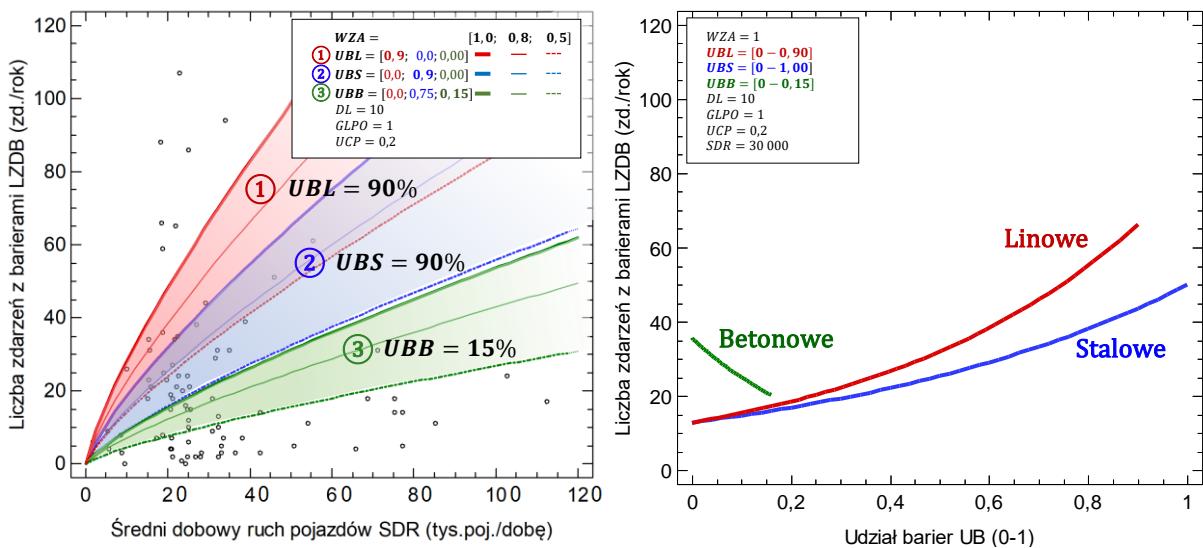
Największy wpływ związany z parametrami geometrycznymi odcinka drogi ma zmienna związana z gęstością łuków poziomych (GLPO) oraz występowaniem średnich spadków podłużnych odcinka

drogi $\geq 5\%$ (FA), które wpływają na zwiększenie liczby zdarzeń z barierami. W porównaniu do odcinków prostych, odcinki na których przypada średnio 1 i 2 łuki/km (rysunek 9.3a), wykazują średni wzrost liczby zdarzeń o 16-20% (1 łuk/km) i 33-40% (2 łuki/km) w zależności od przyjętego modelu. Z kolei pojawienie się na odcinku drogi odcinków falistych może spowodować dodatkowo średni wzrost liczby zdarzeń nawet o 34%.



Rys. 9.3 Wpływ na liczbę zdarzeń z barierami: a) natężenia ruchu (SDR) i gęstości łuków poziomych (GLPO) b) gęstości łuków poziomych (GLPO), względem wskaźnika wykrywalności (WZA) modelu DO-2J-A2(1)

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 9.4 Wpływ na liczbę zdarzeń z barierami: a) natężenia ruchu (SDR) i udziału poszczególnych typów barier (UBL, UBS, UBB) względem współczynnika (WZA), b) udziału poszczególnych typów barier (UBL, UBS, UBB), modelu DS-2J-A2(1)

Źródło: Opracowanie własne

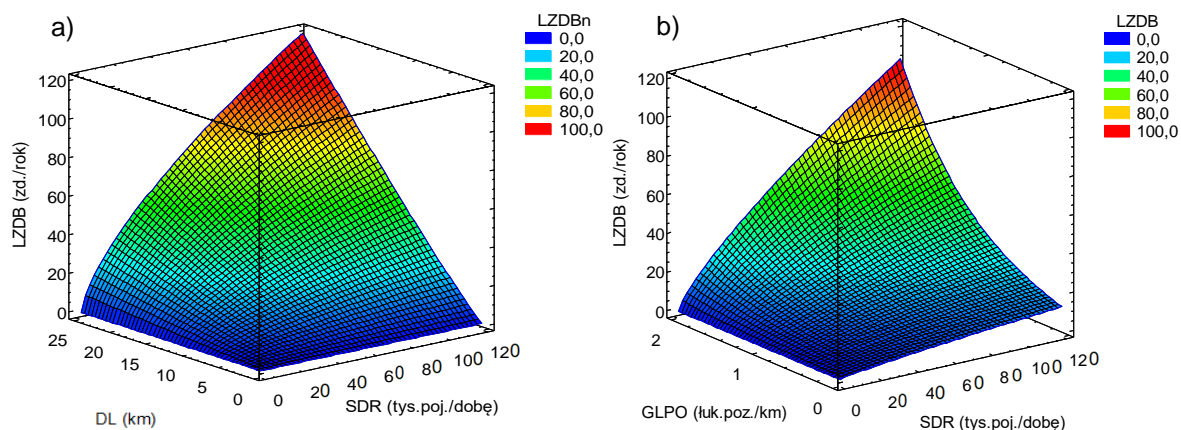
Ze względu na charakterystykę stosowanych na odcinku drogi barier ochronnych, istotny okazał się udział krawędzi jezdni wyposażonych w bariery z wyróżnieniem materiału, z jakiego została ona wykonana (UBS, UBL, UBB). Bariery stalowe, linowe i betonowe w różny sposób (dodatni, jak i ujemny) wpływają na rejestrowaną liczbę zdarzeń z barierami ochronnymi. Jak można zaobserwować

na rysunku 9.4a i 9.4b, analizowany model A2(1) dla danych szczegółowych wskazuje, że zwiększenie udziału krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami stalowymi lub linowymi na odcinku drogi, wpływa na zwiększenie rejestrowanej liczby zdarzeń z barierami. Należy w tym miejscu podkreślić, że zbudowane modele dotyczą jedynie zdarzeń, w wyniku których doszło do uszkodzeń kwalifikujących się do naprawy (w ocenie służby utrzymaniowej), a nie jej rzeczywistej liczby. Oznacza to tym samym, że materiał, z którego wykonana jest bariera ochronna nie wpływa na wzrost lub zmniejszenie rzeczywistej liczby zdarzeń, a jedynie na liczbę zdarzeń poważnych, w ujęciu których bariery wymagały naprawy i zostały zarejestrowane.

O ile zależność wzrostu liczby rejestrowanych zdarzeń wraz ze wzrostem udziału krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami na odcinku drogi jest oczywista (brak barier = brak zdarzeń z barierami), o tyle cenniejsze wydają się zależności pomiędzy zmianą liczby zdarzeń ze względu na materiał z jakiego zostały wykonane (rysunek 9.4b). Należy zaznaczyć, że sumaryczny udział krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami (UBL+UBS+UBB) nie przekracza wartości równej 1,0 (tzn. 100% krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami). Analiza pomiędzy udziałem omawianych trzech typów barier (linowych, stalowych, betonowych) wskazuje, że więcej zdarzeń odnotowuje się na odcinkach, gdzie dominują bariery linowe. Zależność ta wynika przede wszystkim ze specyfiki istotności i wielkości uszkodzeń, które są kwalifikowane przez służby utrzymaniowe do naprawy lub nie. Jak wskazano w przeglądzie literatury, bariery linowe w odniesieniu do barier stalowych i betonowych charakteryzują się mniejszym zakresem osiąganych sztywności (rysunek 2.16). Własność ta przekłada się bezpośrednio na długość kontaktu pojazdu z barierą i wielkość uszkodzeń tych barier [72], a to z kolei może mieć wpływ na wykrycie powstałych uszkodzeń i/lub zakwalifikowanie ich do naprawy (niewielkie uszkodzenia są znacznie rzadziej dostrzegane i kwalifikowane do naprawy). Zależność tą potwierdzają również własne obserwacje z badań terenowych i symulacyjnych. Bariery ochronne uderzone z tą samą energią czy prędkością generują różne długości uszkodzeń (rysunek 6.4b, 7.14). W niektórych przypadkach uderzeń pojazdów z niewielką energią kinetyczną poprzeczną (*EKP*), tj. przy małym kącie najazdu ($\leq 5^\circ$), prędkości ($\leq 100\text{km/h}$) i masie pojazdu do 1,5 t, bariery stalowe sztywne („*Typ III*”) generowały zarysowania i odkształcenia bliskie zeru, natomiast bariery betonowe generowały jedynie zarysowania i pęknięcia. Fakt ten, w przypadku barier betonowych wyjaśniać może ujemny wpływ parametru modelu (UBB) na zmianę liczby rejestrowanych na odcinku zdarzeń. Ze względu na niewielki przebadany zakres udziału barier betonowych na odcinkach dróg, model A2(1) należy stosować jedynie w granicach udziału tego typu barier wskazanych w tabelicy 8.3.

Z pozostałych zmiennych niezależnych, na uwagę zasługuje zmienna związana ze strukturą ruchu pojazdów, tj. udział pojazdów ciężarowych na odcinku drogi (UCP). Jedną z przyczyn ujemnego wpływ tego parametru na liczbę rejestrowanych zdarzeń z barierami może być analizowany przez innych badaczy [159], wpływ udziału pojazdów ciężkich na parametry ruchu pojazdów na drodze, w tym przede wszystkim zmiany prędkości pojazdów osobowych na odcinku drogi. Niższa prędkość pojazdu wpływa przede wszystkim na czas reakcji kierowcy, drogę hamowania, siły odśrodkowe mogące wpłynąć przy wysokich prędkościach na zmniejszenie lub utratę przyczepności pojazdu z podłożem. Wszystko to przekłada się bezpośrednio na ryzyko wypadnięcia pojazdu z jezdni i siłę uderzenia w barierę ochronną.

Dla potrzeb wizualizacji wpływu trzech najistotniejszych zmiennych analizowanych modeli szacowania liczby zdarzeń z barierami, na rysunku 9.5 przedstawiono przykład przestrzennego wpływu długości odcinka (DL), średniego dobowego ruchu pojazdów (SDR) oraz gęstości łuków poziomych (GLPO) na zmianę wartości liczby zdarzeń z barierami ochronnymi. Z przedstawionego na rysunku 9.5a wykresu wynika, że najwyższe wartości liczby zdarzeń odnotować można na długich odcinkach dróg, na których występuje duży ruch pojazdów (SDR). Ponadto liczba zdarzeń na tych odcinkach zależna jest od gęstości łuków poziomych, na których dochodzi najczęściej do wypadnięcia i uderzenia pojazdu w zlokalizowane tam bariery ochronne (rysunek 9.5b).

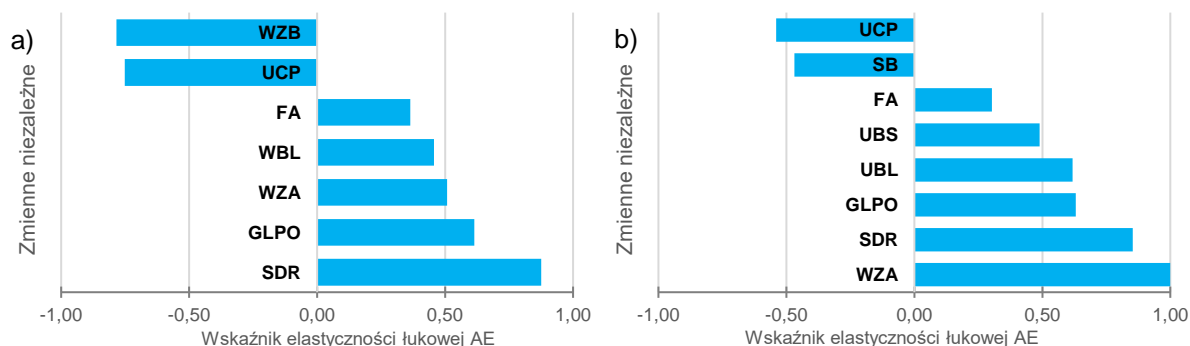


Rys. 9.5 Wizualizacja wpływu natężenia ruchu (SDR) oraz a) długości odcinka (DL), b) gęstości łuków poziomych (GLPO), na liczbę zdarzeń z barierami ochronnymi modelu DO-2J-A2(1)

Źródło: Opracowanie własne

9.2.2. Gęstość zdarzeń z barierami ochronnymi

Drugą analizę wpływu zmiennych niezależnych opisujących częstość zdarzeń opisaną gęstością zdarzeń z barierami ochronnymi (GZDB), przeprowadzono ponownie dla najlepiej ocenionych w rozdziale 8.6 modeli dla danych ogólnych oraz szczegółowych, opisanych kolejno wzorem 8.27 i 8.28. Dla wymienionych modeli obliczono wskaźniki elastyczności łukowej AE, których wyniki w postaci graficznej przedstawiono na rysunku 9.6 oraz tabeli 9.2.



Oznaczenia: FA – odcinek falisty, GLPO – gęstość łuków poziomych, SB – średnia odległość barier od krawędzi jezdni, SDR – średni dobowy ruch pojazdów, UBL – udział barier linowych, UBS – udział barier stalowych, UCP – udział pojazdów ciężarowych z przyczepą, WBL – współczynnik udziału barier linowych, WZA – współczynnik wykrywalności zdarzeń grupy A, WZB – współczynnik wykrywalności zdarzeń grupy B.

Rys. 9.6 Wpływ zmiennych niezależnych na gęstość zdarzeń z barierami ochronnymi w wybranych modelach bazujących na a) danych ogólnych (DO-2J-C2(1)), b) danych szczegółowych (DS-2J-C1(1))

Źródło: Opracowanie własne

Wybrane modele wskazują dziesięć istotnych zależności pomiędzy ruchem pojazdów, geometrią, wyposażeniem i utrzymaniem drogi, a zarejestrowaną gęstością zdarzeń z barierami ochronnymi. Statystycznie istotne w modelach okazały się zmienne niezależne:

- wpływające na zwiększenie gęstości zdarzeń z barierami: średni dobowy ruch pojazdów (SDR), współczynnik wykrywalności zdarzeń grupa A (WZA), gęstość łuków poziomych (GLPO), udział oraz współczynnik krawędzi jezdni wyposażonych w bariery linowe (UBL, WBL), udział krawędzi jezdni wyposażonych w bariery stalowe (UBS), falistość odcinka (FA),
- wpływające na zmniejszenie liczby zdarzeń z barierami ochronnymi, odpowiednio: wskaźnik wykrywalności zdarzeń, udział pojazdów ciężarowych z przyczepą (UCP), średnia odległość barier od krawędzi jezdni (SB).

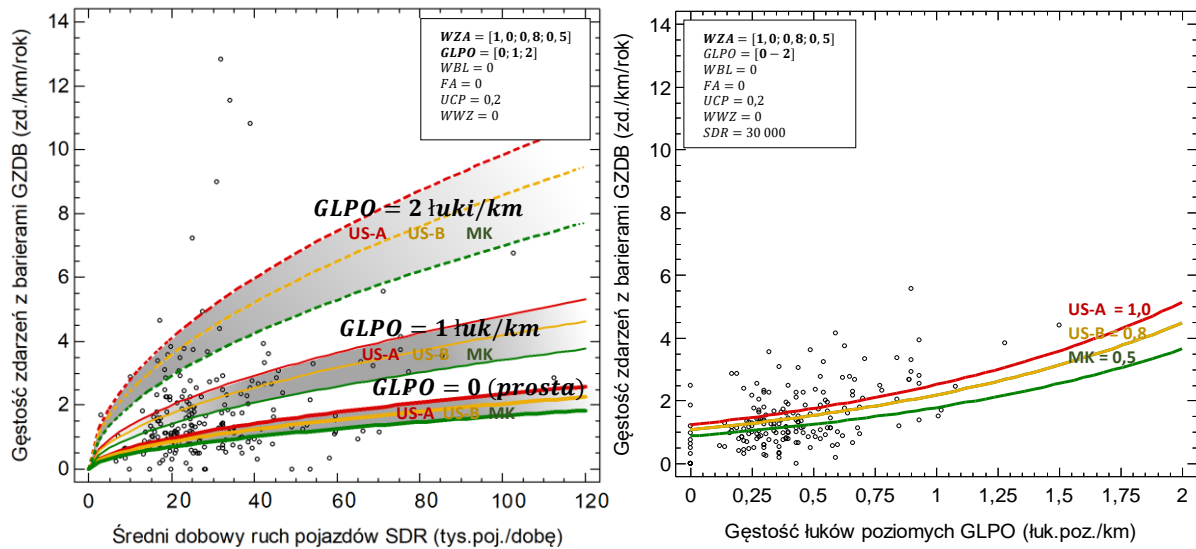
Tab. 9.2 Zestawienie wpływu zmiennych niezależnych na zmianę gęstości zdarzeń z barierami w przypadku wzrostu wartości zmiennej niezależnej z wybranego modelu o 1%.

Analizowana zmienna niezależna		Zmiana obserwowanych wartości gęstości zdarzeń z barierami GZDB (%)	
		Model bazowy DO-2J-C2(1)	Model szczegółowy DS-2J-C1(1)
SDR	Średni dobowy ruch pojazdów	0,88	0,85
WZA	Współczynnik wykrywalności zdarzeń grupy A	0,51	1,00
GLPO	Gęstość łuków poziomych	0,61	0,63
WBL	Współczynnik udziału krawędzi jezdni zabezp. b.linowymi	0,46	
UBL	Udział krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami linowymi		0,62
UBS	Udział krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami stalowymi		0,49
FA	Falistość odcinka drogi	0,36	0,30
SB	Średnia odległość bariery od krawędzi jezdni w przekroju drogi		-0,47
UCP	Udział pojazdów ciężarowych	-0,75	-0,54
WZB	Współczynnik wykrywalności zdarzeń grupy B	-0,78	

Źródło: Opracowanie własne

Analizując otrzymane wyniki stwierdzono, że natężenie ruchu drogowego (SDR), jako zmienna wystawienia na ryzyko ma największy wpływ na zwiększenie gęstości rejestrowanych zdarzeń z barierami ochronnymi na odcinkach dróg (rysunek 9.7a). Istotność tej zmiennej podobnie, jak w przypadku modeli szacowania liczby zdarzeń, można potwierdzić wnioskami z badań literaturowych w modelach częstości wypadnięć pojazdów z jezdni.

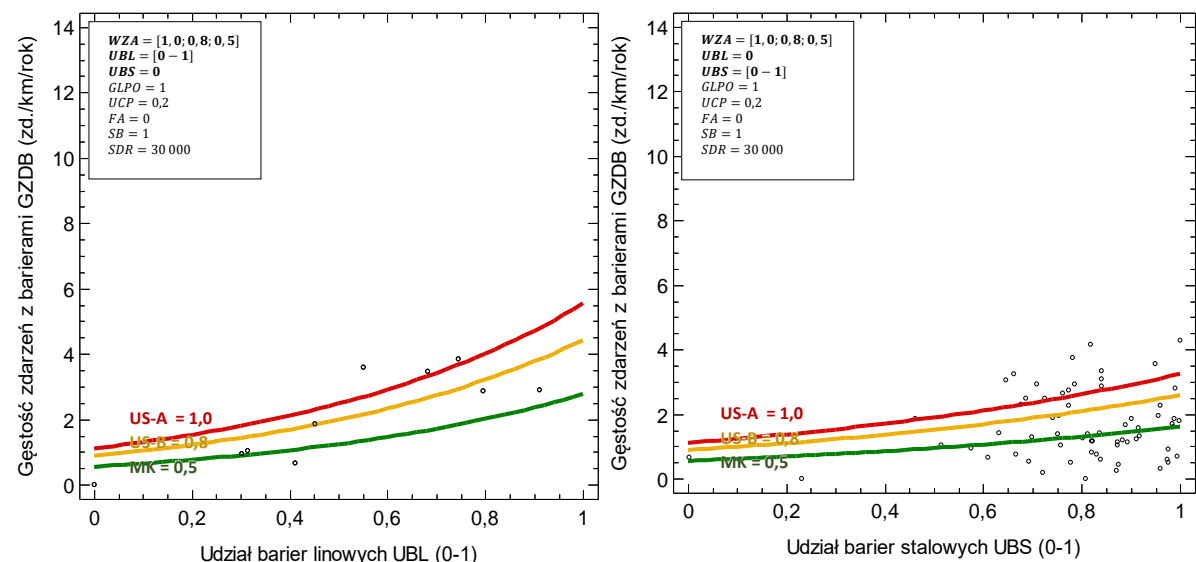
Za zwiększenie gęstości zarejestrowanych przez służby utrzymaniowe zdarzeń z barierami statystycznie istotnie odpowiadają zmienne związane ze stopniem wykrywalności zdarzeń, tj. współczynnik wykrywalności z grupy A (WZA), związany z modelem utrzymania odcinka drogi oraz B współczynnik wykrywalności zdarzeń z grupy B (WZB), związany z jednostką/firmą utrzymanią zajmującą się utrzymaniem barier na odcinku drogi. W zaprezentowanych modelach na rysunkach 9.7-9.10 widoczne są wyraźne różnice w gęstości liczby zdarzeń pomiędzy poszczególnymi wskaźnikami wykrywalności zdarzeń (WZA), przypisanych do odpowiednich modeli utrzymania drogi (US-A=1,0, US-B=0,8 i MK=0,5) w różnych warunkach.



Rys. 9.7 Wpływ na gęstość zdarzeń z barierami: a) natężenia ruchu (SDR) i gęstości łuków poziomych (GLPO) b) gęstości łuków poziomych (GLPO), względem współczynnika wykrywalności zdarzeń (WZA) modelu DO-2J-C2(1)

Źródło: Opracowanie własne

Za zwiększenie gęstości zdarzeń z barierami ochronnymi odpowiedzialne są również parametry geometryczne odcinka drogi, co widoczne jest zarówno w modelu dla danych bazowych, jak i szczegółowych. Do zmiennych tych zalicza się gęstość łuków poziomych (GLPO) oraz występowanie średnich spadków podłużnych odcinka drogi $\geq 5\%$ ($FA=1$). W przypadku zmiennej GLPO, porównując odcinki proste z tymi na których występuje (rysunek 9.7b) 1 łuki/km lub 2 łuki/km, odnotowuje się średnio 30-32 % wzrost gęstości zdarzeń (w przypadku $GLPO=1$) i 61-63 % wzrost miary GZDB (w przypadku gry $GLPO=2$). Dodatkowo występowanie na takim odcinku spadków podłużnych $\geq 5\%$ ($FA=1$) powoduje średni wzrost gęstości zdarzeń o 30-36% w zależności od przyjętego modelu.

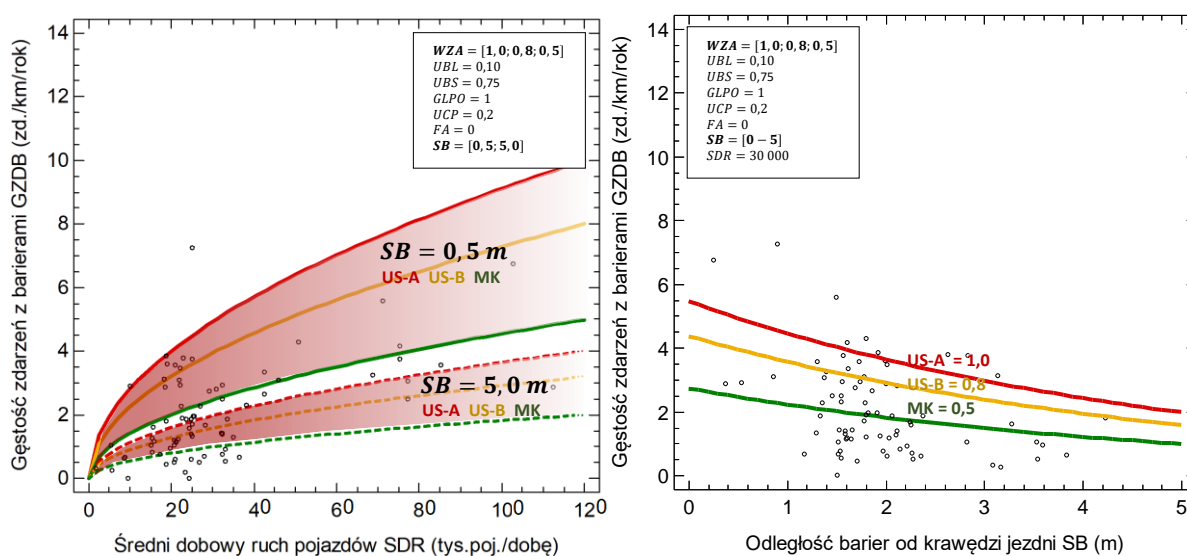


Rys. 9.8 Wpływ na gęstość zdarzeń z barierami: a) udziału barier linowych (UBL), b) udziału barier stalowych, względem współczynnika wykrywalności zdarzeń (WZA) modelu DS-2J-C1(1)

Źródło: Opracowanie własne

Udział barier stalowych (UBS) oraz udział i wskaźnik udziału barier linowych (UBL, WBL) na odcinku drogi, okazały się mieć istotny wpływ również w przypadku gęstości zdarzeń z barierami ochronnymi. Zwiększenie udziału barier stalowych lub linowych na odcinku drogi wpływa na zwiększenie rejestrowanej liczby zdarzeń z barierami (rysunek 9.8). W przypadku barier stalowych 1% wzrost parametru powoduje średnio wzrost gęstości zdarzeń o 0,49%, natomiast linowych 0,62%. Potwierdza to wnioski wskazane w modelach liczby zdarzeń z barierami, iż więcej zdarzeń odnotowuje się na odcinkach, gdzie dominują bariery linowe.

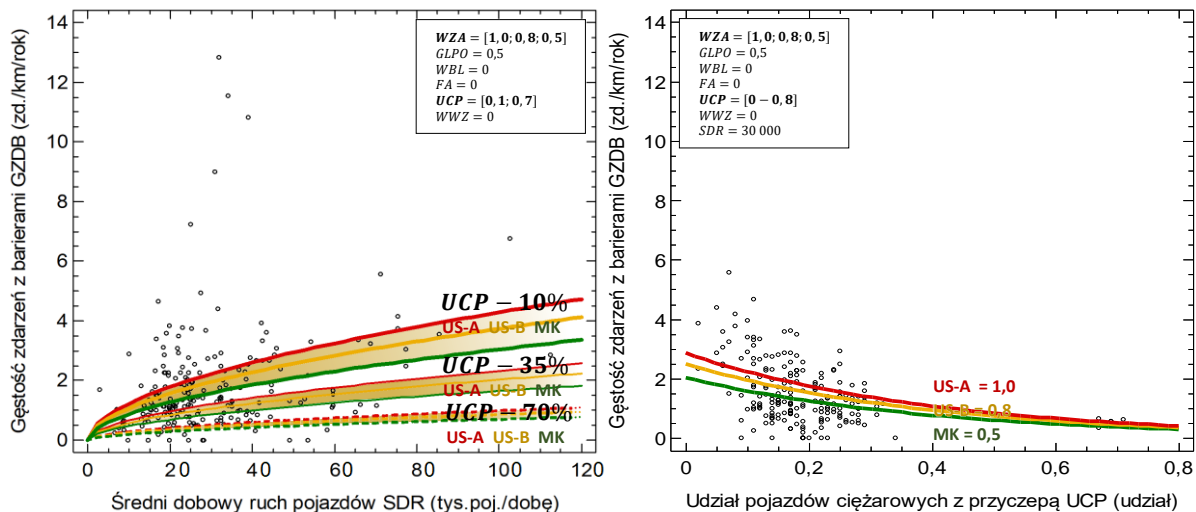
Ze względu na charakterystykę stosowanych na odcinku drogi barier ochronnych, prócz rozkładu udziału barier ochronnych na odcinku drogi, istotna statystycznie okazuje się także ich odległość od krawędzi jezdni (SB, rysunek 9.9). Zmiana parametru związanego z odsunięciem bariery względem krawędzi jezdni o 10% (0,5m), spowoduje średnio spadek gęstości zdarzeń o 4,7%. Oznacza to, że wraz ze wzrostem odległości bariery od krawędzi jezdni, zmniejszy się prawdopodobieństwo wypadnięcia, w wyniku którego pojazd dojechał i uderzył w barierę z energią będącą w stanie znacząco uszkodzić barierę. Podobny wniosek wyciągnięto podczas analiz i budowy modelu prawdopodobieństwa uderzenia pojazdu w barierę ochronną (zmienną niezależną PUB), zbudowanego na podstawie danych odcinka autostrady A1 w rozdziale 7.3.3.



Rys. 9.9 Wpływ na gęstość zdarzeń z barierami: a) natężenia ruchu (SDR) i odległości barier od krawędzi jezdni (SB) b) odległości barier od krawędzi jezdni (SB), względem wskaźnika wykrywalności zdarzeń (WZA) modelu DS-2J-C1(1)

Źródło: Opracowanie własne

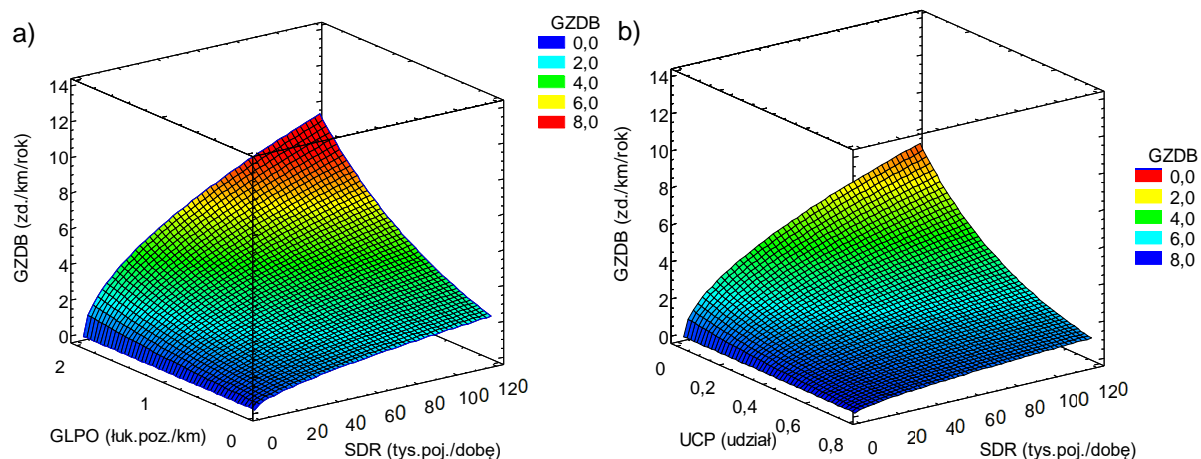
Zmienna związana z strukturą ruchu pojazdów, tj. udział pojazdów ciężarowych na odcinku drogi (UCP), wykazała jednoznaczny ujemny wpływ na gęstość liczby zdarzeń z barierami. Jak przedstawiono w tabeli 9.2 i na rysunku 9.10 oznacza to, że wzrost udziału pojazdów ciężarowych na odcinku drogi o 1%, spowoduje średni spadek gęstości zdarzeń z barierami ochronnymi o 0,54-0,75% w zależności od przyjętego modelu.



Rys. 9.10 Wpływ na gęstość zdarzeń z barierami: a) natężenia ruchu (SDR) i udziału pojazdów ciężarowych z przyczepą (UCP), b) udziału pojazdów ciężarowych z przyczepą (UCP), względem wskaźnika wykrywalności zdarzeń (WZA) modelu DO-2J-C2(1)

Źródło: Opracowanie własne

Dla potrzeb wizualizacji wpływu najistotniejszych zmiennych analizowanych modeli szacowania gęstości zdarzeń z barierami, na rysunku 9.11 przedstawiono przykład przestrzennego wpływu średniego dobowego ruchu pojazdów (SDR), gęstości łuków poziomych (GLPO) oraz udziału pojazdów ciężarowych z przyczepą (UCP) na zmianę wartości gęstości zdarzeń z barierami ochronnymi. Z przedstawionego na rysunku 9.11a wykresu wynika, że najwyższe wartości liczby zdarzeń odnotować można na odcinkach dróg, na których występuje duży ruch pojazdów (SDR) i duża gęstość łuków poziomych (GLPO). Ponadto gęstość zdarzeń z barierami wyższa jest na odcinkach, gdzie udział ruchu pojazdów ciężarowych będzie bardzo niski (rysunek 9.5b).

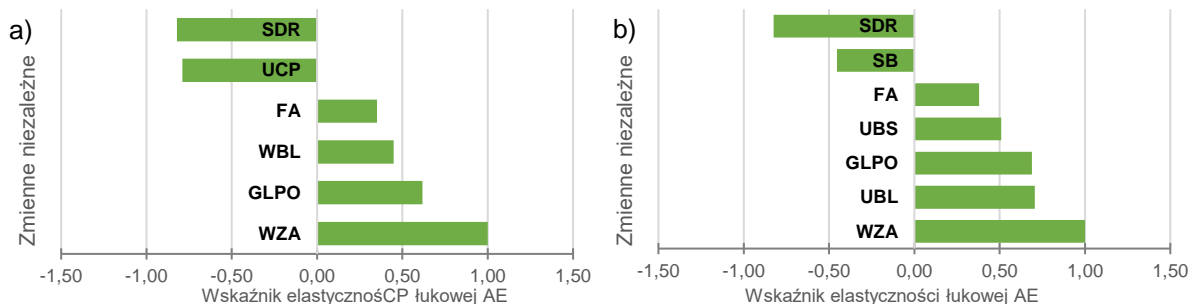


Rys. 9.11 Wizualizacja wpływu natężenia ruchu (SDR) oraz a) gęstości łuków poziomych (GLPO), b) udziału pojazdów ciężarowych z przyczepą (UCP), na gęstość zdarzeń z barierami ochronnymi modelu DO-2J-C2(1)

Źródło: Opracowanie własne

9.2.3. Koncentracja zdarzeń z barierami ochronnymi

Analizę wpływu zmiennych niezależnych opisujących koncentrację zdarzeń z barierami ochronnymi, przeprowadzono dla najlepiej ocenionych w rozdziale 8.6 modeli, dla danych ogólnych oraz szczegółowych, opisanych kolejno wzorem 8.29 i 8.30. Dla wymienionych modeli obliczono wskaźniki elastyczności łukowej AE, których wyniki w postaci graficznej przedstawiono na rysunku 9.12 oraz tabeli 9.3.



Oznaczenia: FA – odcinek falisty, GLPO – gęstość łuków poziomych, SB – średnia odległość barier od krawędzi jezdni, SDR – średni dobowy ruch pojazdów, UBL – udział barier linowych, UBS – udział barier stalowych, UCP – udział pojazdów ciężarowych z przyczepą, WBL – współczynnik udziału barier linowych, WZA – współczynnik wykrywalności zdarzeń grupy A.

Rys. 9.12 Wpływ zmiennych niezależnych na koncentrację zdarzeń z barierami ochronnymi w wybranych modelach bazujących na a) danych ogólnych (DO-2J-D3(1)), b) danych szczegółowych (DS-2J-D3(1))

Źródło: Opracowanie własne

Wybrane modele wskazują dziewięć istotnych zależności pomiędzy ruchem pojazdów, geometrią, wyposażeniem i utrzymaniem drogi, a koncentracją zdarzeń z barierami ochronnymi:

- wpływających na zwiększenie wskaźnika koncentracji zdarzeń z barierami: współczynnik wykrywalności zdarzeń grupy A (WZA), gęstość łuków poziomych (GLPO), udział oraz współczynnik krawędzi jezdni wyposażonych w bariery linowe (UBL, WBL), udział krawędzi jezdni wyposażonych w bariery stalowe (UBS), falistość odcinka drogi (FA),
- wpływających na zmniejszenie wskaźnika koncentracji zdarzeń z barierami: średni dobowy ruch pojazdów (SDR), udział pojazdów ciężarowych z przyczepą (UCP), odległość bariery od krawędzi jezdni (SB).

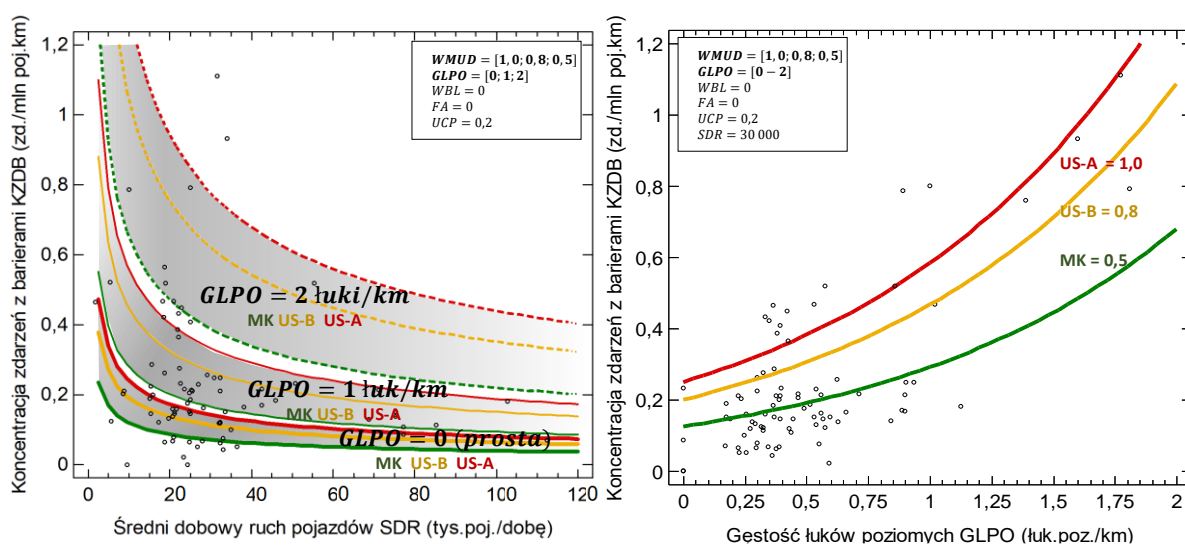
Tab. 9.3 Zestawienie wpływu zmiennych niezależnych na zmianę gęstości zdarzeń z barierami w przypadku wzrostu wartości zmiennej niezależnej z wybranego modelu o 1%.

Analizowana zmienna niezależna		Zmiana obserwowanych wartości koncentracji zdarzeń z barierami KZDB (%)	
		Model bazowy DO-2J-D3(1)	Model szczegółowy DS-2J-D3(1)
WZA	Współczynnik wykrywalności zdarzeń grupy A	1,00	1,00
GLPO	Gęstość łuków poziomych	0,62	0,69
UBL	Udział krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami linowymi		0,71
WBL	Współczynnik udziału krawędzi jezdni zabezp. b.linowymi	0,45	
UBS	Udział krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami stalowymi		0,51
FA	Falistość odcinka drogi	0,35	0,38
SB	Średnia odległość bariery od krawędzi jezdni w przekroju drogi		-0,45
UCP	Udział pojazdów ciężarowych	-0,79	
SDR	Średni dobowy ruch pojazdów	-0,82	-0,83

Źródło: Opracowanie własne

Analizując otrzymane wyniki stwierdzono, że stopień wykrywalności zdarzeń (WZA) jest najistotniejszym czynnikiem mającym wpływ na koncentrację rejestrowanej liczby zdarzeń z barierami ochronnymi. Wyższe standardy utrzymania drogi wpływają nie tylko na wzrost odnotowanej liczby czy gęstości zdarzeń, ale również na wzrost wskaźnika koncentracji zdarzeń na odcinku drogi. Omawiany wpływ można zaobserwować na rysunkach 9.13-9.15 dla wybranych czynników modeli.

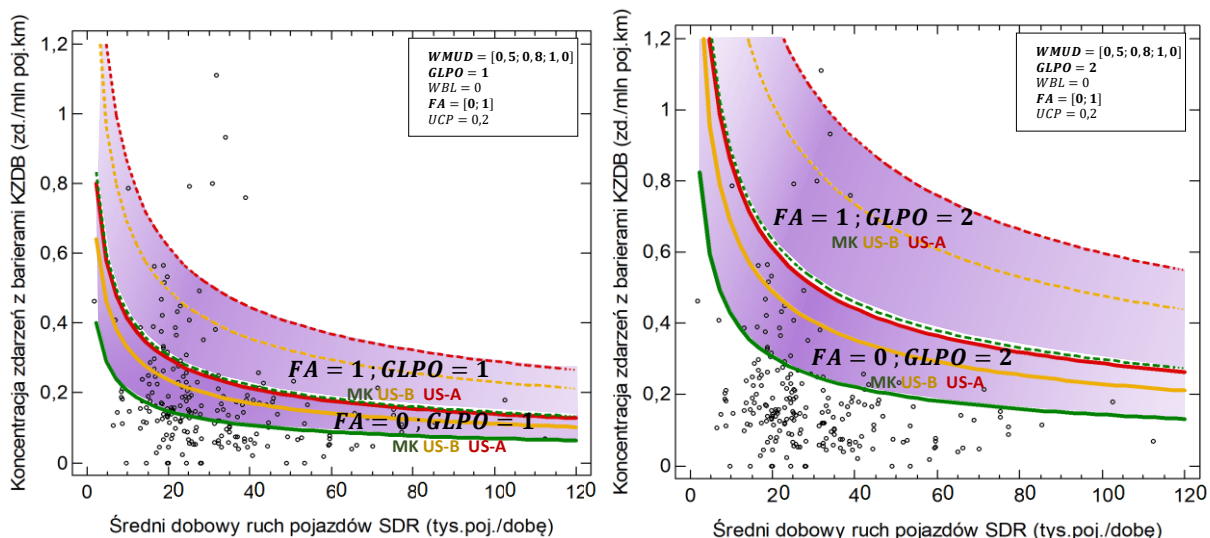
Stwierdza się również, że zmienne dotyczące ruchu (SDR) i jego struktury (UCP) na odcinku drogi mają drugie najważniejsze pod względem istotności znaczenie za zmianę koncentracji liczby zdarzeń na odcinku drogi. Obydwie zmienne wykazują ujemny wpływ na zmianę parametru analizowanej miary (KZDB). Otrzymana hiperboliczna zależność wskaźnika koncentracji zdarzeń z barierami od natężenia ruchu drogowego (rysunek 9.13a) jest odwzorowaniem i potwierdzeniem teoretycznej zależności ryzyka i narażenia w kontekście analizowanej liczby zdarzeń [43].



Rys. 9.13 Wpływ na koncentrację zdarzeń z barierami: a) natężenia ruchu (SDR) i gęstości łuków poziomych (GLPO) b) gęstości łuków poziomych (GLPO), względem współczynnika wykrywalności zdarzeń (WZA) modelu DS-2J-D3(1)

Źródło: Opracowanie własne

Za zwiększenie koncentracji zdarzeń z barierami odpowiedzialne są również parametry geometryczne odcinka drogi, widoczne zarówno w modelu dla danych bazowych jak i szczegółowych. Do zmiennych tych zalicza się gęstość łuków poziomych (GLPO) oraz występowanie średnich spadków podłużnych odcinka drogi $\geq 5\%$ (FA). W przypadku zmiennej GLPO, porównując odcinki proste z tymi na których występuje (rysunek 9.13b) 1 łuk/km lub 2 łuki/km, odnotowuje się średnio 31-34 % wzrost wskaźnika koncentracji zdarzeń (w przypadku GLPO=1) i 62-69 % wzrost wskaźnika KZDB (w przypadku gry GLPO=2). Dodatkowo występowanie na takim odcinku spadków podłużnych $\geq 5\%$ (FA=1) powoduje średni wzrost koncentracji zdarzeń o 35-38% w zależności od przyjętego modelu. Na rysunku 9.14 przedstawiono zakres koncentracji zdarzeń (KZDB) jakie obejmują odcinki na których występuje duża (rysunek 9.14a, GLPO=1) i bardzo duża (rysunek 9.14b, GLPO=2) gęstość łuków poziomych na których występują (FA=1) bądź nie występują (FA=0) odcinki o spadkach podłużnych przekraczających 5%.

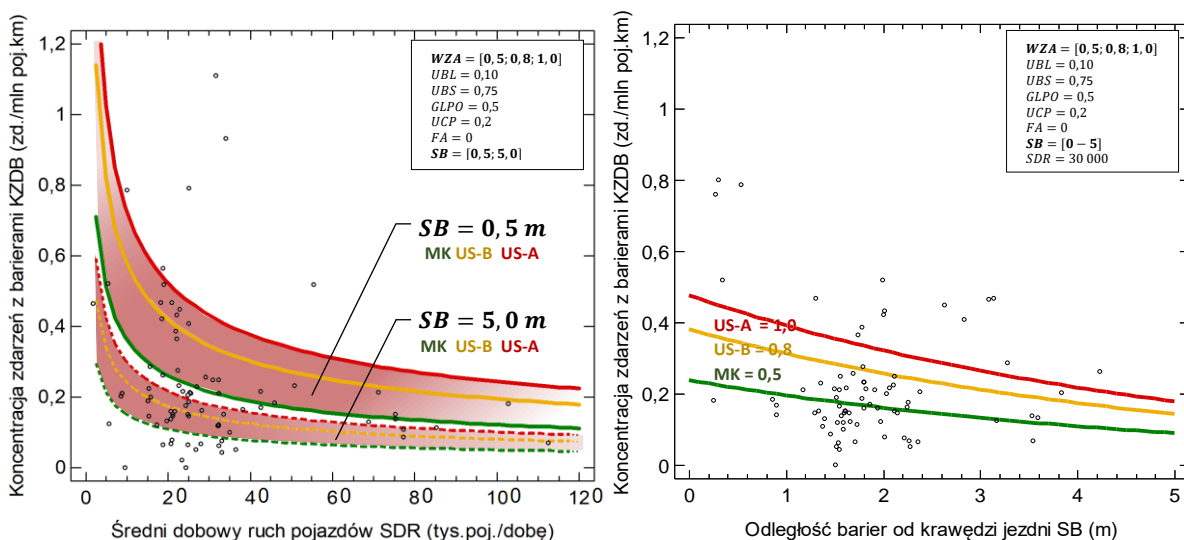


Rys. 9.14 Wpływ na koncentrację zdarzeń z barierami natężenia ruchu (SDR) gęstości łuków poziomych a) GLPO = 1 b) GLPO = 2, dla odcinków o spadkach podłużnych $\geq 5\%$ (FA=1) względem współczynnika (WZA) modelu DO-2J-D3(1)

Źródło: Opracowanie własne

Udział barier stalowych (UBS) oraz udział i wskaźnik udziału barier linowych (UBL, WBL) na odcinku drogi mają istotny wpływ również w przypadku koncentracji zdarzeń z barierami ochronnymi. Zwiększenie udziału barier stalowych lub linowych na odcinku drogi wpływa na zwiększenie koncentracji zdarzeń z barierami. W przypadku barier stalowych 1% wzrost parametru powoduje średni wzrost koncentracji zdarzeń o 0,51 % natomiast linowych 0,71%.

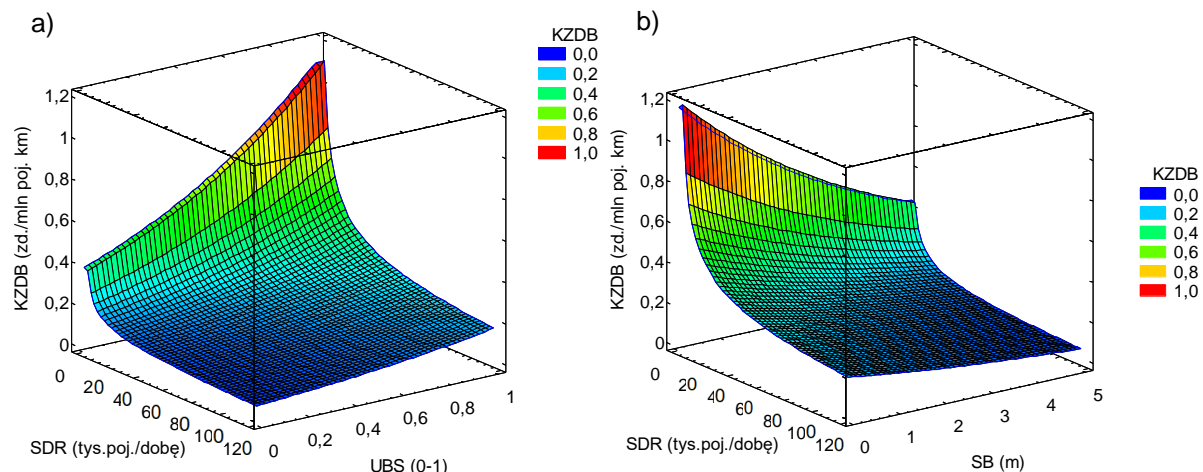
Równie istotny wpływ, co udział krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami, ma ich odległość od krawędzi jezdni SB. Zmiana parametru związanego z odsunięciem bariery względem krawędzi jezdni o 10% (0,5m), spowoduje średni spadek koncentracji zdarzeń o 4,5%. Zależność tą graficznie przedstawiono na rysunku 9.15.



Rys. 9.15 Wpływ na koncentrację zdarzeń z barierami: a) natężenia ruchu (SDR) i odległości barier od krawędzi jezdni (SB) b) odległości barier od krawędzi jezdni (SB), względem wskaźnika wykrywalności zdarzeń (WZA) modelu DS-2J-D3(1)

Źródło: Opracowanie własne

Dla potrzeb wizualizacji wpływu wybranych zależności modelu DO-2J-D3(1), na rysunku 9.16 przedstawiono przykład ich przestrzennego wpływu, tj. wpływu średniego dobowego ruchu pojazdów (SDR) udziału krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami stalowymi (UBS) i odległości barier od krawędzi jezdni (SB), na zmianę wartości koncentracji zdarzeń z barierami ochronnymi.



Rys. 9.16 Wizualizacja wpływu natężenia ruchu (SDR) oraz a) udziału krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami stalowymi (UBS), b) odległości barier od krawędzi jezdni (SB) na koncentrację zdarzeń z barierami ochronnymi modelu DO-2J-D3(1)

Źródło: Opracowanie własne

Z przedstawionego na rysunku 9.16a trójwymiarowego wykresu wynika, że najwyższe wartości koncentracji zdarzeń z barierami ochronnymi, występują na odcinkach dróg o stosunkowo niewielkim natężeniu ruchu pojazdów (SDR) i wysokim udziale krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami ochronnymi. Zależność ta tyczy się zarówno prezentowanych na rysunku 9.16a udziałów dla barier stalowych (UBS), jak i barier linowych (UBL), które w różnym udziale, mogą wystąpić na analizowanym odcinku drogi. Ponadto koncentracja zdarzeń z barierami na tych odcinkach, zależy również od średniej odległości tych barier od krawędzi jezdni. Na rysunku 9.16b zaobserwować można, jak zmienia się koncentracja zdarzeń z barierami ze względu na dobowy ruch pojazdów (SDR) i lokalizację barier względem krawędzi jezdni (SB).

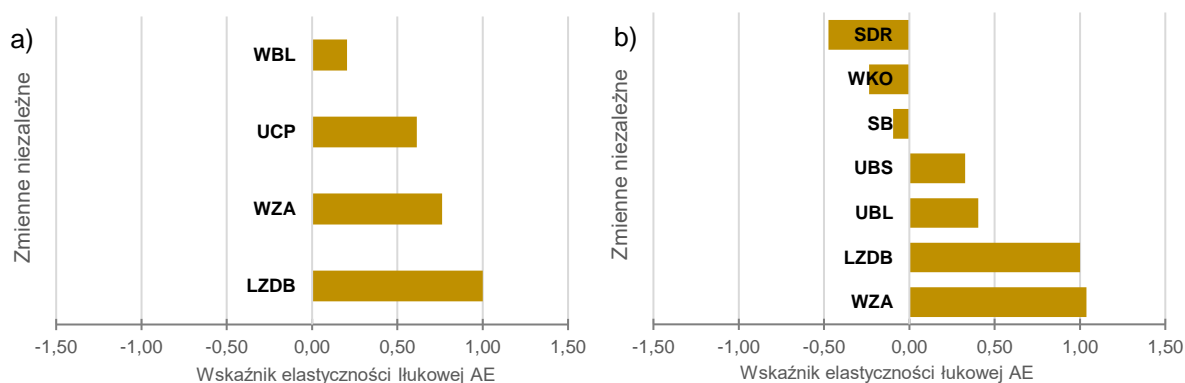
9.2.4. Długość uszkodzeń barier ochronnych

Analizę wpływu zmiennych niezależnych opisujących długość uszkodzeń barier ochronnych na odcinku drogi, przeprowadzono dla najlepiej ocenionych w rozdziale 8.6 modeli dla danych ogólnych oraz szczegółowych, opisanych w kolejności wzorem 8.32, 8.33. Dla wymienionych modeli obliczono, jak w przypadku wcześniejszych analiz, wskaźniki elastyczności łukowej AE, których wyniki w postaci graficznej przedstawiono na rysunku 9.17 oraz tabeli 9.4.

Wybrane modele wskazują dziesięć istotnych zależności pomiędzy ruchem pojazdów, geometrią, wyposażeniem i utrzymaniem drogi, a zarejestrowaną długością uszkodzeń barier ochronnych:

- wpływających na zwiększenie długości uszkodzeń: współczynnik wykrywalności zdarzeń (WZA), liczba zdarzeń z barierami ochronnymi (LZDB), udział pojazdów ciężarowych z przyczepą (UCP), udział oraz współczynnik krawędzi jezdni wyposażonych w bariery linowe (UBL, WBL), udział krawędzi jezdni wyposażonych w bariery stalowe (UBS),

- wpływających na zmniejszenie długości uszkodzeń odpowiednio: średni dobowy ruch pojazdów (SDR), wskaźnik krętości odcinka drogi (WKO), odległość bariery od krawędzi jezdni (SB).



Oznaczenia: LZDB – liczba zdarzeń z barierami ochronnymi na odcinku drogi, SB – średnia odległość barier od krawędzi jezdni, SDR – średni dobowy ruch pojazdów, UBB – udział barier betonowych, UBL – udział barier linowych, UBS – udział barier stalowych, UCP – udział pojazdów ciężarowych z przyczepą, WBL – współczynnik udziału barier linowych, WKO – wskaźnik krętości odcinka drogi, WZA – współczynnik wykrywalności zdarzeń grupy A.

Rys. 9.17 Wpływ zmiennych niezależnych na długość uszkodzeń barier ochronnych w wybranych modelach bazujących na a) danych ogólnych (DO-2J-E2(1)), b) danych szczegółowych (DS-2J-E1(5))

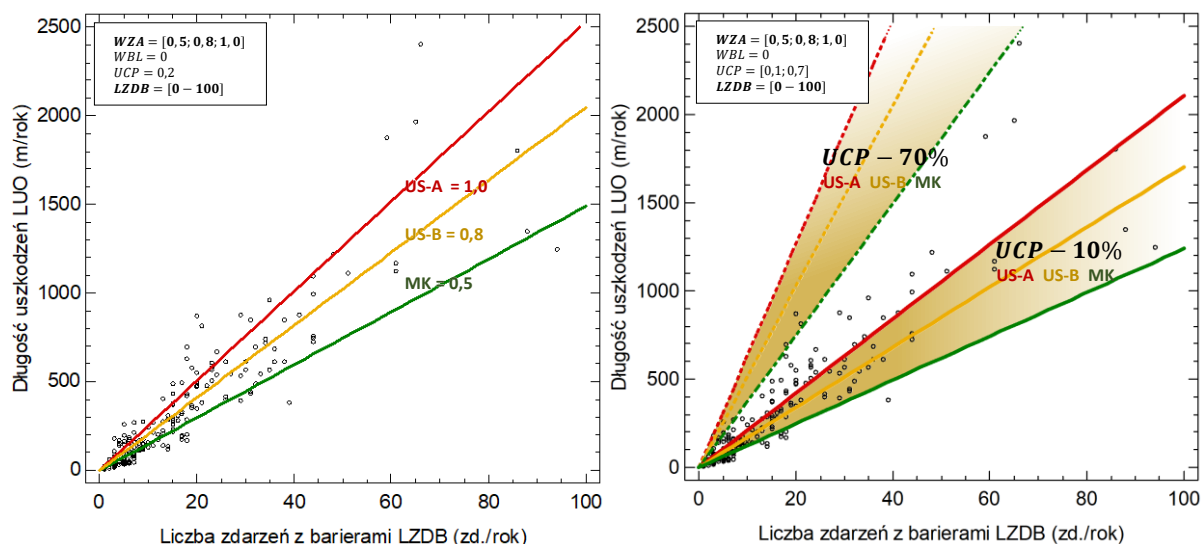
Źródło: Opracowanie własne

Tab. 9.4 Zestawienie wpływu zmiennych niezależnych na zmianę długości uszkodzeń barier ochronnych w przypadku wzrostu wartości zmiennej niezależnej z wybranego modelu o 1%.

Analizowana zmienna niezależna		Zmiana obserwowanych wartości długości uszkodzeń barier ochronnych LUO (%)	
		Model bazowy DO-2J-E2(1)	Model szczegółowy DS-2J-E1(5)
LZDB	Liczba zdarzeń z barierami ochronnymi	1,00	1,00
WZA	Współczynnik wykrywalności zdarzeń grupy A	0,76	1,04
UCP	Udział pojazdów ciężarowych	0,61	
UB _l	Udział krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami linowymi		0,40
UB _s	Udział krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami stalowymi		0,33
WBL	Współczynnik udziału krawędzi jezdni zabezp. b.linowymi	0,20	
SB	Średnia odległość bariery od krawędzi jezdni w przekroju drogi		-0,10
WKO	Wskaźnik krętości odcinka drogi		-0,24
SDR	Średni dobowy ruch pojazdów		-0,47

Źródło: Opracowanie własne

W procesie budowy modeli długości uszkodzeń drogowych barier ochronnych, jako element składowy wykorzystano miarę liczby zdarzeń z barierami ochronnymi (*LZDB*). Dzięki temu podejściu udało się uzyskać znacznie wyższe wartości wskaźników dobroci dopasowania (R^2_{sk} , *RMSE*, *AIC*, *CURE Plot*) wybranych funkcji do danych obserwowanych. Miara *LZDB* opisana równaniem 8.25 i 8.26 analizowanych modeli, obejmuje zarówno zmienne związane z narażeniem na ryzyko (*SDR*, *DL*), jak i zmienne niezależne związane z wykrywalnością zdarzeń (*WZA*), strukturą ruchu pojazdów (*UCP*), geometrią drogi (*GLPO*, *FA*) czy charakterystyką występującej na niej urządzeń (*UBS*, *UBL*, *WBL*, *UBB*). W analizowanych modelach długości uszkodzeń dla danych bazowych i szczegółowych, zmienna *LZDB* uzyskiwała najwyższe wartości wskaźnika elastyczności łukowej. Wzrost liczby zdarzeń z barierami ochronnymi o 1% powoduje wzrost długości uszkodzeń na tym odcinku również o 1% (rysunek 9.18).



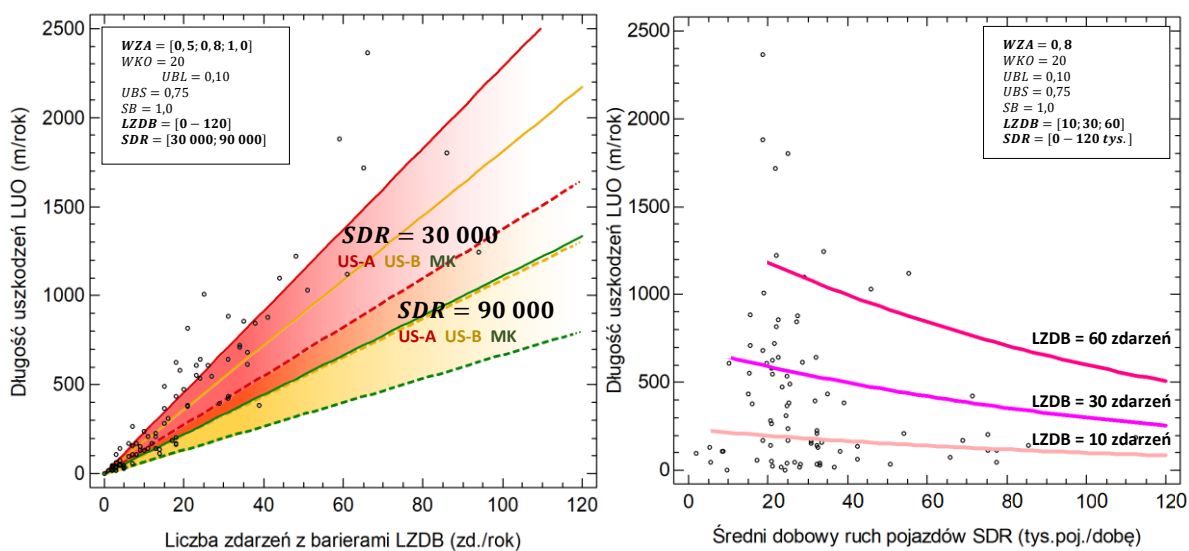
Rys. 9.18 Wpływ na długość uszkodzeń: a) liczby zdarzeń z barierami (LZDB), b) liczby zdarzeń z barierami (LZDB) i udziału pojazdów ciężarowych z przyczepą (UCP), względem współczynnika wykrywalności zdarzeń (WZA) modelu DO-2J-E2(1)

Źródło: Opracowanie własne

Analizując otrzymane wyniki stwierdzono, że stopień wykrywalności zdarzeń (WZA) jest również, jak w przypadku liczby, gęstości i koncentracji zdarzeń z barierami, jednym z najistotniejszych czynników mającym wpływ na zmianę rejestrowanych długości uszkodzeń barier ochronnych. Wpływ ten wskazuje, że wyższe standardy utrzymania drogi wpływają nie tylko na wzrost współczynnika odnotowanej częstości zdarzeń z barierami, ale również na wzrost rejestrowanych długości uszkodzeń. Związek ma to ponownie z oceną i klasyfikacją zaistniałych uszkodzeń. Wysoki standard utrzymania drogi wiąże się z zachowaniem wyższych standardów bezpieczeństwa i estetyką drogi, a co za tym idzie, wymiany każdego nawet najmniejszego uszkodzenia bariery ochronnej (wygięcie, zarysowań, pęknięć). Z przeprowadzonych podczas zbierania danych terenowych wywiadów, analiz porównawczych danych i zdjęć długości uszkodzeń wynika, że najczęściej w przypadku niższych standardów utrzymania drogi, długość barier, która faktycznie uległa wygięciu, zarysowaniu lub pęknięciu nie zawsze kwalifikowała się do wymiany. W niektórych zdarzeniach skrajne fragmenty barier ochronnych, nie zostały w każdym przypadku zakwalifikowane do naprawy, a jedynie do przesunięcia czy wypionowania słupków (tzw. wyciągnięcia). Przykładem są segmenty barier betonowych czy lica prowadnicy i słupków barier stalowych i linowych, które w ocenie służby utrzymaniowej mogły nie wymagać wymiany. W związku z powyższym uzasadniona jest istotność współczynnika wykrywalności zdarzeń (WZA) w kontekście odnotowanych wielkości uszkodzeń barier ochronnych. Omawiany wpływ można zaobserwować na rysunkach 9.18-9.21 dla wybranych czynników modeli.

Stwierdzono również, że zmienne dotyczące ruchu (SDR) i jego struktury (UCP) na odcinku drogi mają istotne znaczenie za zmianę długości uszkodzeń barier ochronnych (rysunek 9.18 i 9.19). Wraz ze wzrostem ruchu pojazdów (SDR) zmniejsza się długość rejestrowanych uszkodzeń barier ochronnych (rysunek 9.19b). Wpływ ten można odnieść bezpośrednio do zależności fundamentalnej pomiędzy parametrami ruchu potoku pojazdów – natężeniem, prędkością i gęstością potoku pojazdów. Zgodnie z twierdzeniem, wraz ze wzrostem natężenia ruchu pojazdów, wzrasta też gęstość ruchu a spada prędkość pojazdów - z ruchu swobodnego na ruch wymuszony. W związku z zakładanym

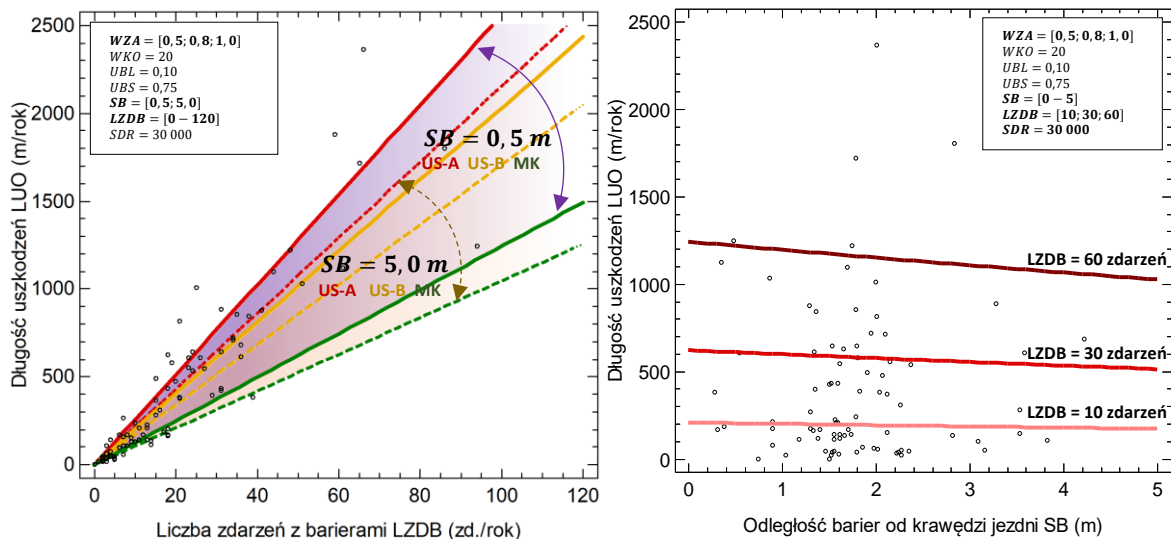
zmniejszeniem się prędkości pojazdów w potoku, zgodnie ze wzorem 2.1 zmniejszy się także średnia energia kinetyczna pojazdów mogących wypaść z jezdni i uderzyć w barierę ochronną. Spadek energii kinetycznej pojazdu podczas uderzenia w barierę przekłada się z kolei na zmniejszenie się ugięcia dynamicznego bariery (rysunek 6.2a), a w konsekwencji również na długość zarejestrowanych uszkodzeń w pojedynczym zdarzeniu (rysunek 6.4b, 6.8b). Zgodnie z otrzymanymi zależnościami (tabela 9.4), sytuację zmienić może udział pojazdów ciężarowych z przyczepą (UCP) poruszających się po odcinku drogi. Wzrost udziału pojazdów ciężarowych, przyczyni się do wzrostu rozkładu energii kinetycznej pojazdów na odcinku drogi tym samym do sumy długości uszkodzeń na odcinku drogi. Jak można zaobserwować na rysunku 5.10, średnia długość uszkodzeń barier w zdarzeniu z udziałem pojazdu ciężarowego z przyczepą (CP) wynosi 42,0 m, natomiast z pojazdem osobowym (OL, OS, OC, S) 18,4 m. Uzasadnione jest zatem stwierdzenie, że wzrost udziału pojazdów ciężarowych z przyczepą (UCP) wpływa na zwiększenie się sumarycznej długości uszkodzeń na odcinku drogi (rysunek 9.18b).



Rys. 9.19 Wpływ na długość uszkodzeń: a) liczby zdarzeń z barierami (LZDB) i natężenia ruchu (SDR) względem współczynnika (WZA), b) średniego dobowego ruchu (SDR) względem liczby zdarzeń (LZDB), modelu DO-2J-E5(1)

Źródło: Opracowanie własne

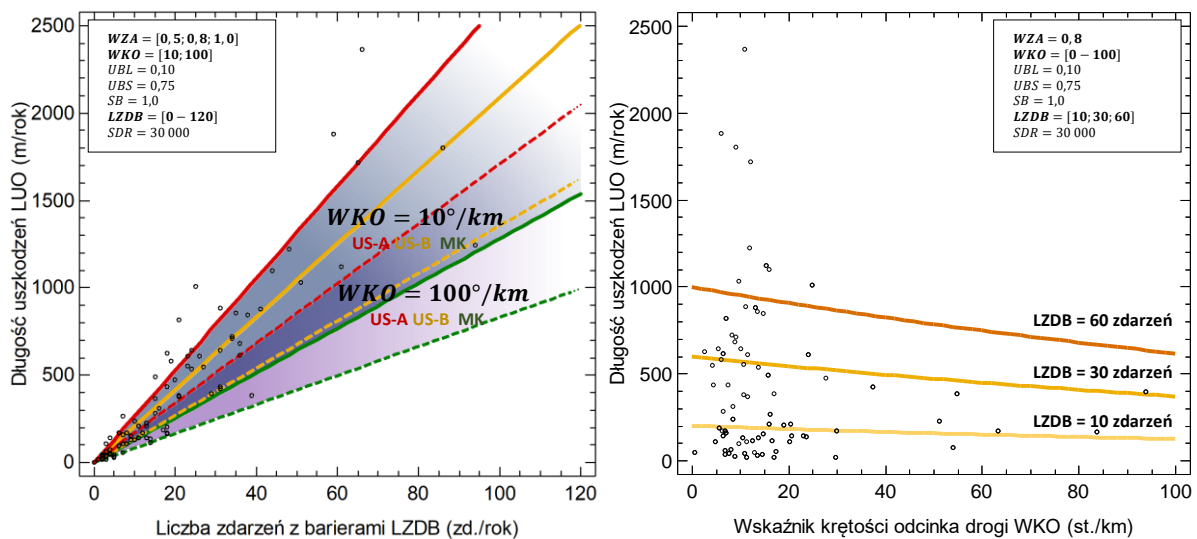
Przeprowadzone analizy wykazały istotność wpływu czynników charakteryzujących stosowane na odcinku drogi bariery ochronne (UBL, UBS) oraz ich odległości względem krawędzi jezdni (SB). Jak wskazano w przeglądzie literatury, bariery linowe i stalowe charakteryzują się odmiennym zakresem osiąganych sztywności, a w konsekwencji też długości uszkodzeń (rysunek 2.16). Ponadto analiza rozkładu długości uszkodzeń pojedynczych zdarzeń z barierami stalowymi, linowymi i betonowymi (rysunek 5.14) wykazała istotne różnice między długością ich uszkodzeń. Z kolei zmiana odległości posadowienia barier ochronnych względem krawędzi jezdni (SB) będzie oznaczała nieznaczny, ale istotny spadek długości uszkodzeń na odcinku drogi. Ujemy wpływ zmiennej SB na długość uszkodzeń, wynika przede wszystkim z wydłużenia drogi hamowania i/lub zmniejszenia kąta najazdu pojazdu na barierę, a tym samym możliwości wytracenia swojej energii przed zderzeniem z barierą ochronną.



Rys. 9.20 Wpływ na długość uszkodzeń: a) liczby zdarzeń (LZDB) i odległości barier od krawędzi jezdni (SB) względem współczynnika (WZA), b) odległości bariery od krawędzi jezdni (SB) względem liczby zdarzeń (LZDB), modelu DO-2J-E5(1)

Źródło: Opracowanie własne

Równie istotny wpływ na zmniejszenie długości uszkodzeń barier ochronnych ma wskaźnik krętości odcinka drogi (rysunek 9.21). Wzrost wskaźnika krętości odcinka drogi (WKO) o $10^\circ/\text{km}$ spowoduje średni spadek długości uszkodzeń barier ochronnych na odcinku drogi o 2,4%.



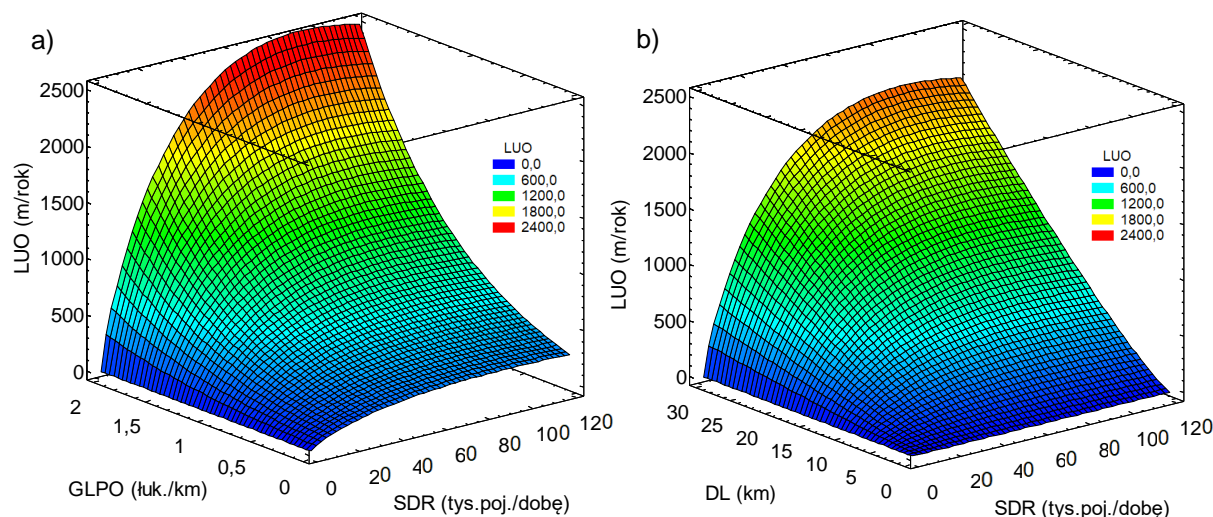
Rys. 9.21 Wpływ na długość uszkodzeń: a) liczby zdarzeń z barierami (LZDB) i wskaźnika krętości odcinka (WKO) względem współczynnika (WZA), b) wskaźnika krętości odcinka (WKO) względem liczby zdarzeń z barierami (LZDB), modelu DO-2J-E5(1)

Źródło: Opracowanie własne

Wzrost wskaźnika krętości odcinka drogi związany jest bezpośrednio ze wzrostem gęstości łuków poziomych na odcinku drogi (GLPO) i/lub pojawieniem się łuków poziomych o stosunkowo małych promieniach. W związku z częstszym występowaniem łuków poziomych na odcinku drogi, zwiększa się prawdopodobieństwo wypadnięcia pojazdów w łuku drogi. W zależności od promienia łuku poziomego w którym znalazł się pojazd, zwiększy się teoretyczny zakres maksymalnych kątów możliwych do osiągnięcia w przypadku wypadnięcia pojazdu (rysunek 7.6b). Charakterystyka i analiza rzeczywistych

kątów uderzeń względem długości uszkodzeń pojedynczych zdarzeń wskazuje, że wzrost kąta uderzenia wpływa na zmniejszenie długości uszkodzeń barier ochronnych (rysunek 5.6).

Dla potrzeb wizualizacji skumulowanego wpływu analizowanych czynników na długość uszkodzeń barier ochronnych (LUO), wartości LZDB obliczано wykorzystując opracowany model dla danych szczegółowych (równanie 8.26). Na rysunku 9.22 przedstawiono przykład przestrzennego wpływu średniego dobowego ruchu pojazdów (SDR) gęstości łuków poziomych (GLPO) oraz długości odcinka (DL) na zmianę długości uszkodzeń barier ochronnych (LUO).



Rys. 9.22 Wizualizacja wpływu natężenia ruchu (SDR) oraz a) gęstości łuków poziomych (GLPO), b) długości odcinka (DL) na długość uszkodzeń barier ochronnych modelu DS-2J-E1(5)

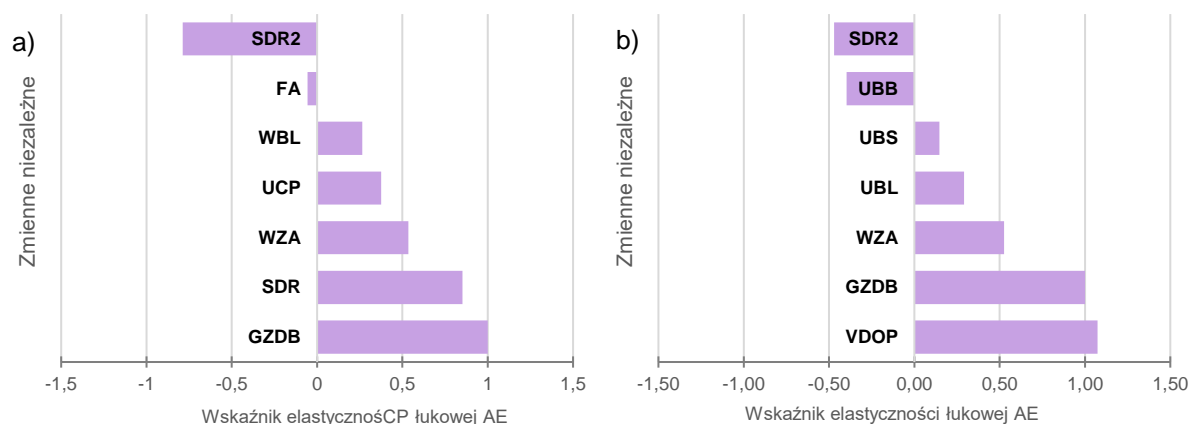
Źródło: Opracowanie własne

9.2.5. Gęstość uszkodzeń barier ochronnych

Analizę wpływu zmiennych niezależnych opisujących gęstość uszkodzeń barier ochronnych na odcinku drogi, przeprowadzono dla najlepiej ocenionych w rozdziale 8.6 modeli dla danych ogólnych oraz szczegółowych opisanych kolejno wzorem 8.34 i 8.35. Dla wymienionych modeli obliczono, jak w przypadku wcześniejszych analiz, wskaźniki elastyczności łukowej AE, których wyniki w postaci graficznej przedstawiono na rysunku 9.23 oraz tabeli 9.5.

Wybrane modele wskazują jedenaście istotnych zależności pomiędzy ruchem pojazdów, geometrią, wyposażeniem i utrzymaniem drogi, a zarejestrowaną gęstością uszkodzeń barier ochronnych:

- wpływających na zwiększenie gęstości uszkodzeń na odcinku drogi: średnia prędkość dopuszczalna pojazdów (VDOP), gęstość zdarzeń z barierami ochronnymi (GZDB), średni dobowy ruch pojazdów (SDR) współczynnik wykrywalności zdarzeń grupy A (WZA), udział pojazdów ciężarowych z przyczepą (UCP), udział oraz współczynnik krawędzi jezdni wyposażonych w bariery linowe (UBL, WBL), udział krawędzi jezdni wyposażonych w bariery stalowe (UBS),
- wpływających na zmniejszenie długości uszkodzeń na odcinku drogi odpowiednio: średni dobowy ruch pojazdów (SDR2), udział barier betonowych (UBB), falistość odcinka drogi (FA).



Oznaczenia: FA – odcinek falisty, GZDB – gęstość zdarzeń z barierami ochronnymi na odcinku drogi, SDR, SDR2 – średni dobowy ruch pojazdów, UBB – udział barier betonowych, UBL – udział barier linowych, UBS – udział barier stalowych, UCP – udział pojazdów ciężarowych z przyczepą, WBL – współczynnik udziału barier linowych, WZA – współczynnik wykrywalności zdarzeń grupy A, VDOP – śr. prędkość dopuszczalna na odcinku drogi.

Rys. 9.23 Wpływ zmiennych niezależnych na gęstość uszkodzeń barier ochronnych w wybranych modelach bazujących na a) danych ogólnych (DO-2J-F3(1)), b) danych szczegółowych (DS-2J-F1(5))

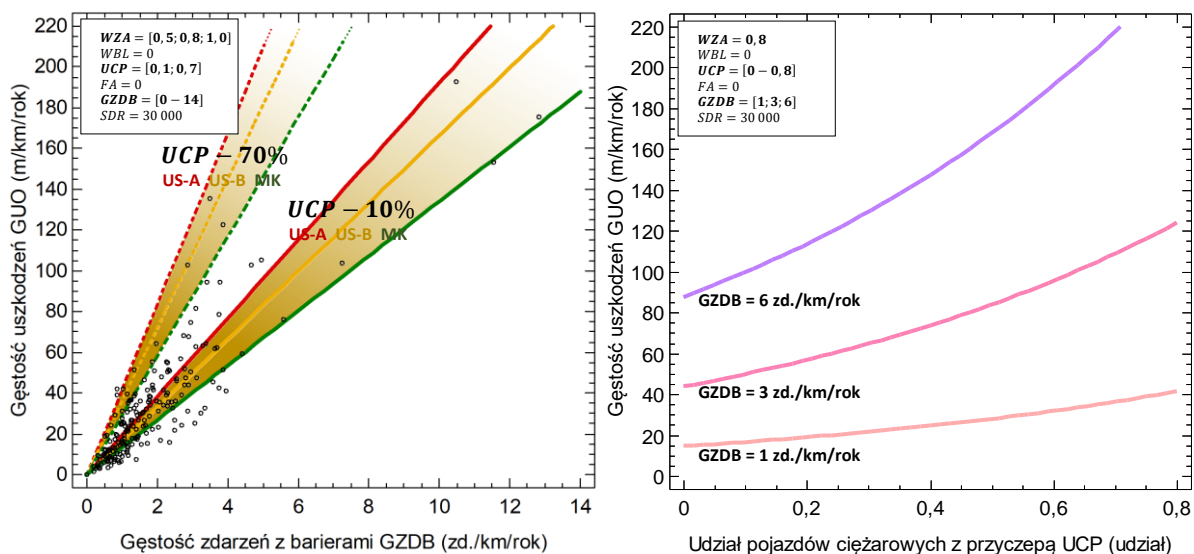
Źródło: Opracowanie własne

Tab. 9.5 Zestawienie wpływu zmiennych niezależnych na zmianę długości uszkodzeń barier ochronnych w przypadku wzrostu wartości zmiennej niezależnej z wybranego modelu o 1%.

Analizowana zmienna niezależna		Zmiana obserwowanych wartości gęstości uszkodzeń barier ochronnych GUO (%)	
		Model bazowy DO-2J-F3(1)	Model szczegółowy DS-2J-F1(5)
VDOP	Średnia prędkość dopuszczalna na odcinku drogi		1,07
GZDB	Gęstość zdarzeń z barierami ochronnymi	1,00	1,00
SDR	Średni dobowy ruch pojazdów	0,85	
WZA	Współczynnik wykrywalności zdarzeń grupy A	0,54	0,53
UCP	Udział pojazdów ciężarowych	0,38	
UBL	Udział krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami linowymi		0,29
UBS	Udział krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami stalowymi		0,15
WBL	Współczynnik udziału krawędzi jezdni zabezp. b.linowymi	0,27	
FA	Odcinek falisty	-0,06	
UBB	Udział krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami betonowymi		-0,40
SDR2	Średni dobowy ruch pojazdów (w liniowym predyktorze)	-0,79	-0,47

Źródło: Opracowanie własne

Podczas budowy modeli gęstości uszkodzeń drogowych barier ochronnych, jako element składowy wykorzystano miarę gęstości zdarzeń z barierami ochronnymi (GZDB). Dzięki temu podejściu, podobnie, jak w przypadku modeli *LUO*, udało się uzyskać znacznie wyższe wartości wskaźników dobroci dopasowania (R^2_{sk} , *RMSE*, *AIC*, *CURE Plot*) wybranych funkcji do danych obserwowanych. Analizowana miara GZDB opisana równaniem 8.27 czy 8.28, obejmuje zarówno zmienną związaną z narażeniem na ryzyko (SDR), jak i zmienne niezależne związane z wykrywalnością zdarzeń (WZA, WZB), strukturą ruchu (UCP), geometrią drogi (GLPO, FA), czy charakterystyką występujących na niej urządzeń (UBS, UBL, WBL, SB). W analizowanych modelach szacowania gęstości uszkodzeń dla danych bazowych i szczegółowych, zmienna GZDB uzyskiwała najwyższe wartości wskaźnika elastyczności łukowej. Wzrost gęstości zdarzeń z barierami ochronnymi o 1%, powoduje wzrost długości uszkodzeń na tym odcinku również o 1% (tabela 9.5. rysunek 9.24).



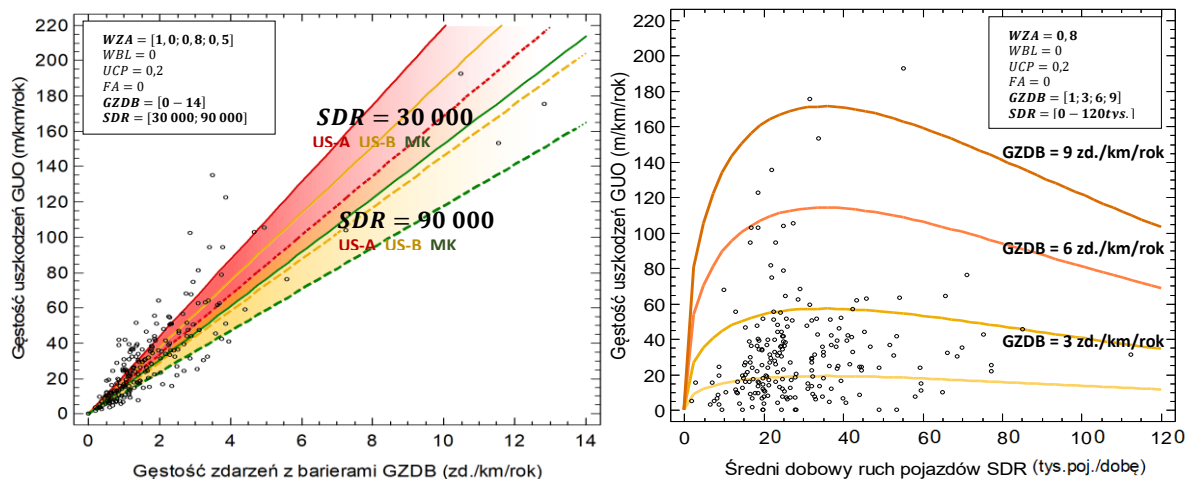
Rys. 9.24 Wpływ na gęstość uszkodzeń: a) gęstości zdarzeń (GZDB) i udziału ciężarowych z przyczepą (UCP) względem współczynnika (WZA), b) udziału ciężarowych z przyczepą (UCP) względem gęstości zdarzeń (GZDB), modelu DO-2J-F3(1)

Źródło: Opracowanie własne

Najistotniejszy wpływ, jaki można zaobserwować spośród analizowanych modeli (tabela 9.5), wykazała zmienna odnosząca się do średniej dozwolonej prędkości na odcinku drogi (VDOP). Na zmianę tego parametru w miejscach, gdzie nie są prowadzone roboty długoterminowe, wpływ miały przede wszystkim lokalne ograniczenia prędkości. Lokalne ograniczenia prędkości stosowane są przede wszystkim, aby zapewnić odpowiedni poziom bezpieczeństwa użytkowników drogi. Nawierzchnia drogi, jej krętość, nachylenia, liczba łuków poziomych oraz lokalnie zmiany warunków atmosferycznych wpływają na pogorszenie poziomu bezpieczeństwa użytkowników na danym fragmencie drogi, w związku z tym ograniczenia prędkości są często dostosowywane są w tych miejscach do tych warunków, aby zmniejszyć ryzyko utraty kontroli nad pojazdem. Zmienna VDOP zastosowana w modelu z danymi szczegółowymi (DS-2J-F1(5)), wpływa na zwiększenie gęstości uszkodzeń barier ochronnych. Zgodnie ze wzorem 2.1 wraz ze wzrostem prędkości zwiększy się średnia energia kinetyczna pojazdów mogących wypaść z jezdni i uderzyć w barierę ochronną. Wzrost energii kinetycznej pojazdów podczas uderzenia w barierę przekłada się z kolei na większe ugięcia dynamiczne bariery (rysunek 6.2a), a w konsekwencji również na długość uszkodzeń pojedynczych zdarzeń (rysunek 6.4b, 6.8b).

Stwierdzono również, że zmienne dotyczące warunków ruchu (SDR_1 , SDR_2) i jego struktury (UCP) na odcinku drogi mają istotny wpływ za zmianę gęstości uszkodzeń barier ochronnych. W modelu wykonanym na danych ogólnych (wzór 8.34) zaobserwowano zarówno dodatni jak i ujemny wpływ natężenia ruchu pojazdów na długość rejestrowanych uszkodzeń. Dodatni wpływ SDR_1 , podobnie jak zmiennej GZDB odpowiada za zwiększenie narażenia barier ochronnych na uszkodzenia barier ochronnych. Ujemny wpływ SDR_2 , występującym w liniowym predyktorze modeli wiąże się bezpośrednio z warunkami ruchu na odcinku drogi. W modelu szczegółowym, gdzie zmienna SDR występuje jedynie w liniowym predyktorze zaobserwowano wyłącznie ujemny wpływ zmiennej SDR na gęstość uszkodzeń. W przypadku danych szczegółowych w przyjętym modelu (wzór 8.35) za narażenie

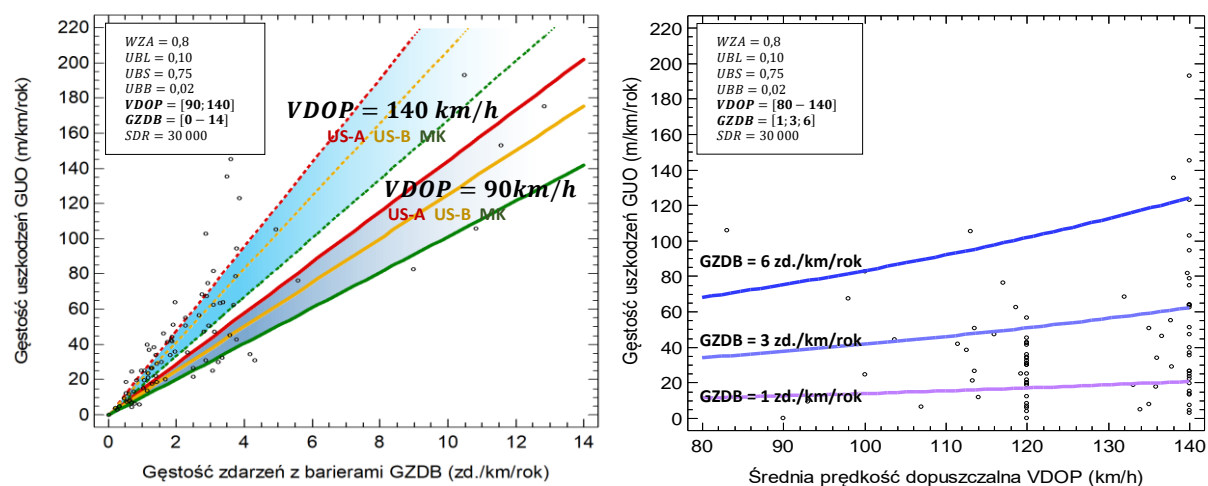
barier ochronnych na uszkodzenia odpowiedzialna jest wyłącznie liczba zdarzeń z barierami. Stąd też dodatni wpływ SDR widoczny jest jedynie, gdy do obliczeń włączony zostanie model na gęstość zdarzeń z barierami ochronnymi (wzór 8.28). Zależność tą zaobserwować można na rysunku 9.28, gdzie przedstawiono przykład wizualizacji skumulowanego wpływu analizowanych czynników na gęstość uszkodzeń barier ochronnych (GUO).



Rys. 9.25 Wpływ na gęstość uszkodzeń: a) gęstości zdarzeń z barierami (GZDB) i natężenia ruchu (SDR) względem współczynnika (WZA), b) natężenia ruchu (SDR) względem gęstości zdarzeń z barierami (GZDB) modelu DO-2J-F3(1)

Źródło: Opracowanie własne

W odniesieniu do warunków ruchowych, istotne znaczenie w modelach długości uszkodzeń uzyskała zmienna odnosząca się do udziału pojazdów ciężarowych z przyczepą (UCP). Wzrost udziału pojazdów ciężarowych z przyczepą na odcinku drogi, przyczyni się do wzrostu gęstości zdarzeń z tego typu pojazdami, w konsekwencji zwiększy się również długość, jak i gęstość uszkodzeń barier ochronnych na odcinku drogi. Zgodnie z tabelą 9.5, wzrost udziału pojazdów ciężarowych z przyczepą na odcinku drogi o 1% może przyczynić się do wzrostu gęstości uszkodzeń o 0,38%.

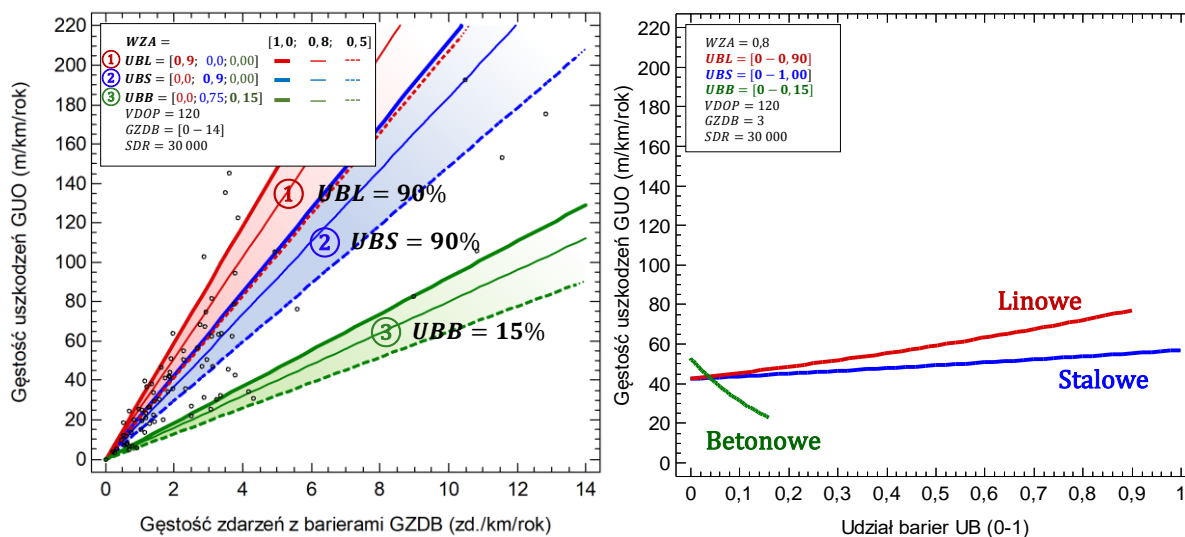


Rys. 9.26 Wpływ na gęstość uszkodzeń: a) gęstości zdarzeń (GZDB) i śr. prędkości dopuszczalnej (VDOP) względem współczynnika (WZA), b) śr. prędkości dopuszczalnej (VDOP) względem gęstości zdarzeń (GZDB), modelu DO-2J-F1(5)

Źródło: Opracowanie własne

Analizując otrzymane wyniki stwierdzono, że stopień wykrywalności zdarzeń (WZA) jest również, jak i w przypadku modeli długości uszkodzeń z barierami (LUO), jednym z najistotniejszych czynników mającym wpływ na zmianę rejestrowanych gęstości uszkodzeń barier ochronnych (GUO). Wpływ ten ponownie wskazuje, że wyższe standardy utrzymania drogi wpływają nie tylko na wzrost rejestrowanych długości uszkodzeń, ale również na wzrost gęstości ich uszkodzeń. Związek ma to ponownie z oceną i klasyfikacją zaistniałych uszkodzeń, jak miało to miejsce w przypadku modeli długości uszkodzeń (LUO). Omawiany wpływ można zaobserwować na rysunkach 9.24-9.27 dla wybranych czynników analizowanych modeli.

Ze względu na charakterystykę stosowanych na odcinku drogi barier ochronnych, istotny okazał się udział i materiał, z jakiego została wykonana bariera ochronna (UBS, UBL, UBB). Bariery stalowe, linowe i betonowe w różny sposób (dodatni jak i ujemny) wpływają na zmianę odnotowanej gęstości uszkodzeń barier ochronnych. Oznacza to tym samym, że materiał, z którego wykonana jest bariera ochronna wpływa na wzrost lub zmniejszenie odnotowywanych gęstości uszkodzeń barier ochronnych. O ile zależność wzrostu gęstości uszkodzeń rejestrowanych uszkodzeń barier ochronnych wraz ze wzrostem udziału barier na odcinku drogi jest oczywista (brak barier = brak uszkodzeń), o tyle cenniejsze wydają się zależności pomiędzy zmianą gęstości uszkodzeń ze względu na materiał, z jakiego zostały wykonane (rysunek 9.27b). Analizy wskazują, że większe gęstości odnotowuje się na odcinkach, gdzie dominują bariery linowe. Zależność ta wynika przede wszystkim ze specyfiki wielkości pochłanianej energii przez tego typu bariery. Ponownie odnosząc się do przeglądu literatury, bariery linowe i stalowe charakteryzują się odmiennym zakresem osiąganych sztywności, a w konsekwencji też długości uszkodzeń (rysunek 2.16). Potwierdzeniem jest również wykonana analiza rozkładu długości uszkodzeń pojedynczych zdarzeń z barierami stalowymi, linowymi i betonowymi (rysunek 5.14).



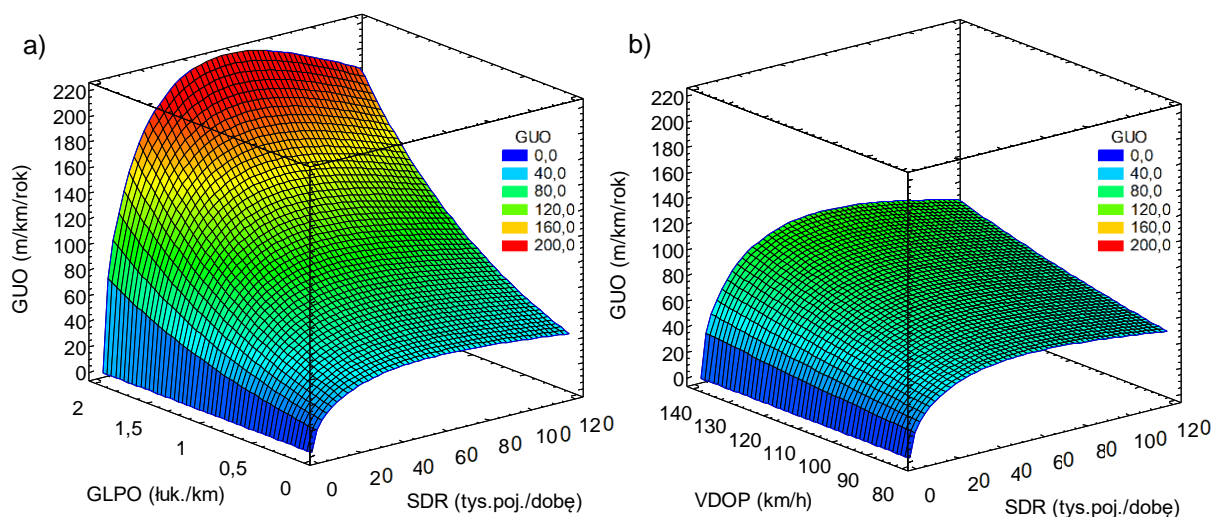
Rys. 9.27 Wpływ na gęstość uszkodzeń: a) gęstości zdarzeń (GZDB) i udziału poszczególnych typów barier (UBL, UBS, UBB) względem współczynnika (WZA), b) udziału poszczególnych typów barier (UBS, UBL, UBB) modelu DO-2J-F1(5)

Źródło: Opracowanie własne

Najmniej istotnym wpływ na zmianę gęstości uszkodzeń barier ochronnych odnotowano w przypadku zmiennej odnoszącej się do spadków podłużnych odcinka drogi (FA). Pojawienie się na

odcinku drogi spadków podłużnych odcinka drogi $\geq 5\%$ wpływa średnio na zmniejszenie gęstości uszkodzeń barier ochronnych o 6%.

Dla potrzeb wizualizacji skumulowanego wpływu analizowanych czynników na gęstość uszkodzeń barier ochronnych (GUO), wartości GZDB obliczано wykorzystując opracowany model dla danych szczegółowych (równanie 8.28). Na rysunku 9.28 przedstawiono przykład przestrzennego wpływu średniego dobowego ruchu pojazdów (SDR), gęstości łuków poziomych (GLPO) oraz średniej prędkości dopuszczalnej (VDOP) na zmianę gęstości uszkodzeń barier ochronnych na odcinku drogi (GUO).



Rys. 9.28 Wizualizacja wpływu natężenia ruchu (SDR) oraz a) gęstości łuków poziomych (GLPO), b) średniej prędkości dopuszczalnej (VDOP) na gęstość uszkodzeń barier ochronnych modelu DS-2J-F1(5)

Źródło: Opracowanie własne

9.3. Wnioski z badań

Korzystając z opracowanych modeli analizowanych miar częstości i wielkości uszkodzeń barier ochronnych na dwujezdniowych odcinkach dróg krajowych przeprowadzono analizę wpływu wybranych, najbardziej istotnych czynników konstrukcyjnych, drogowych i ruchowych na wielkość zmian tych miar (co stanowi spełnienie 4 celu naukowego CN-4 rozprawy). Wyniki przeprowadzonych analiz pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

1. Zastosowanie analizy elastyczności łukowej umożliwiło przeprowadzenie oszacowania wpływu wybranych zmiennych niezależnych dla wybranych, najlepiej ocenionych modeli poszczególnych miar częstości i wielkości uszkodzeń barier ochronnych.
2. W przypadku modeli szacowania rejestrowanej przez służby utrzymaniowe liczby zdarzeń z barierami (LZDB) istotny wpływ:
 - a) na zwiększenie liczby zdarzeń z barierami mają: długość odcinka drogi (DL), średni dobowy ruch pojazdów (SDR), współczynnik wykrywalności zdarzeń grupy A (WZA), gęstość łuków poziomych (GLPO), stopień wyposażenia drogi w bariery linowe (UBL, WBL) i w bariery stalowe (UBS), falistość odcinka (FA),
 - b) na zmniejszenie liczby zdarzeń z barierami ochronnymi mają: udział pojazdów ciężarowych z przyczepą (UCP), udział barier betonowych (UBB).

3. W przypadku modeli szacowania gęstości zdarzeń z barierami ochronnymi (GZDB) istotny wpływ:
 - a) na zwiększenie gęstości zdarzeń z barierami mają: średni dobowy ruch pojazdów (SDR), stopień wykrywalności zdarzeń grupa A (WZA), gęstość łuków poziomych (GLPO), stopień wyposażenia jezdni w bariery linowe (UBL, WBL) i bariery stalowe (UBS), falistość odcinka (FA),
 - b) na zmniejszenie liczby zdarzeń z barierami ochronnymi mają: udział pojazdów ciężarowych z przyczepą (UCP), średnia odległość barier od krawędzi jezdni (SB).
4. W przypadku modeli szacowania wskaźnika koncentracji rejestrowanych zdarzeń z barierami ochronnymi (KZDB) istotny wpływ:
 - a) na zwiększenie wskaźnika koncentracji zdarzeń z barierami mają: stopień wykrywalności zdarzeń grupy A (WZA), gęstość łuków poziomych (GLPO), stopień wyposażenia jezdni w bariery linowe (UBL, WBL) i w bariery stalowe (UBS), falistość odcinka drogi (FA),
 - b) na zmniejszenie wskaźnika koncentracji zdarzeń z barierami mają: średni dobowy ruch pojazdów (SDR), udział pojazdów ciężarowych z przyczepą (UCP), odległość bariery od krawędzi jezdni (SB).
5. W przypadku modeli szacowania rejestrowanej przez służby utrzymaniowe długości uszkodzeń barier ochronnych (LUO) istotny wpływ:
 - a) na zwiększenie długości uszkodzeń mają: stopień wykrywalności zdarzeń (WZA), liczba zdarzeń z barierami ochronnymi (LZDB), udział pojazdów ciężarowych z przyczepą (UCP), stopień wyposażenia krawędzi jezdni w bariery linowe (UBL, WBL) i w bariery stalowe (UBS),
 - b) na zmniejszenie długości uszkodzeń mają: średni dobowy ruch pojazdów (SDR), wskaźnik krętości odcinka drogi (WKO), odległość bariery od krawędzi jezdni (SB).
6. W przypadku modeli szacowania rejestrowanej przez służby utrzymaniowe gęstości uszkodzeń barier ochronnych (GUO) istotny wpływ:
 - a) na zwiększenie gęstości uszkodzeń na odcinku drogi mają: średnia prędkość dopuszczalna pojazdów (VDOP), gęstość zdarzeń z barierami ochronnymi (GZDB), średni dobowy ruch pojazdów (SDR), stopień wykrywalności zdarzeń grupy A (WZA), udział pojazdów ciężarowych z przyczepą (UCP), stopień wyposażenia krawędzi jezdni w bariery linowe (UBL, WBL) i w bariery stalowe (UBS),
 - b) na zmniejszenie długości uszkodzeń na odcinku drogi odpowiednio: średni dobowy ruch pojazdów (SDR₂), udział barier betonowych (UBB), falistość odcinka drogi (FA).
7. Wpływ wybranych zmiennych niezależnych w zaproponowanych modelach jest logiczny i zgodny z interpretacją roli tych zmiennych zaobserwowanych przez innych badaczy oraz wcześniejszych prac własnych autora [10],[89],[90].

10. PROPOZYCJA UZUPEŁNIENIA METODY SZACOWANIA LICZBY ZDARZEŃ I DŁUGOŚCI USZKODZEŃ BARIER OCHRONNYCH NA ODCINKACH DRÓG

10.1. Koncepcja metody szacowania liczby zdarzeń i wielkości uszkodzeń

10.1.1. Wprowadzenie

W wyniku realizowanego w latach 2016-2019 projektu RID-3B [146], powstał w Polsce m.in. pierwszy projekt metody (LifeRoSe), dotyczącej szacowania długości uszkodzeń barier ochronnych na odcinkach dróg. Prace w ramach przywołanej metody LifeRoSe, prowadzone przy udziale autora niniejszej, zostały wykorzystane i rozwinięte badaniami wykonanymi w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej.

Zaproponowane w rozdziale 8.6, modele szacowania częstości i wielkości uszkodzeń barier ochronnych, pozwoliły na przygotowanie propozycji uzupełnienia metody LifeRoSe. Propozycja ta dotyczy zmiany dotychczas stosowanych w metodzie modeli matematycznych, dotyczących wyznaczania liczby rejestrowanych zdarzeń z barierami (LZDB) i wynikających z nich długości uszkodzeń tych barier (LUO) na odcinkach dróg dwujezdniowych. Dotychczas stosowane w metodzie LifeRoSe modele charakteryzowały się jedynie umiarkowanym lub dobrym dopasowaniem do danych rzeczywistych. Zastosowana tam metoda ogólna szacowania częstości i wielkości uszkodzeń barier ograniczała się wyłącznie do odcinków dróg jednorodnych pod względem natężenia i struktury ruchu pojazdów, bez uwzględnienia lokalnych ograniczeń prędkości i przy niewielkich wahaniach parametrów geometrycznych drogi (tj. odcinków płaskich o niskim wskaźniku krętości).

W ramach niniejszej pracy rozwinięto modele ogólne i szczegółowe poprzez poszerzenie zbioru zmiennych niezależnych, które przyczyniły się do poprawy parametrów dobroci dopasowania modeli szacowania częstości i wielkości uszkodzeń barier do danych uzyskanych z badań terenowych, poligonowych i symulacyjnych. Opracowano modele matematyczne charakteryzujące się bardzo dobrym dopasowaniem do danych rzeczywistych. Wśród nowych zmiennych niezależnych użytych w opracowanych modelach zależności, najbardziej istotnymi okazały się: gęstość łuków poziomych (GLPO), odległość bariery ochronnej od krawędzi jezdni (SB) oraz stopień wykrywalności zdarzeń z barierami ochronnymi przez służby utrzymaniowe (WZA), będący miarą reprezentującą zastosowany na analizowanym odcinku model utrzymania drogi.

Przedstawiona w niniejszym rozdziale metoda szacowania wielkości i długości uszkodzeń na odcinkach dróg, stanowi realizację celu praktycznego CP-2.

10.1.2. Założenia

1. Metodę szacowania długości uszkodzeń drogowych barier ochronnych stosuje się wyłącznie dla odcinków dróg dwujezdniowych, tj. autostrad, dróg ekspresowych i dróg głównych przyspieszonych, na których nie będą prowadzone długoterminowe przebudowy lub modernizacje.
2. Szacowanie długości uszkodzeń drogowych barier ochronnych prowadzi się trzema metodami:
 - I. Ogólną dla odcinków dróg – w przypadku braku danych szczegółowych o warunkach ruchowych wyposażeniu w urządzenia brd i geometrii drogi.
 - II. Szczegółową dla odcinków dróg – w przypadku, kiedy dostępne są dane szczegółowe o warunkach ruchowych wyposażeniu w urządzenia brd i geometrii drogi.

- III. Szczegółową dla pojedynczych uderzeń pojazdów w wybrany rodzaj bariery – w celu oszacowania długości uszkodzeń bariery i jej parametrów funkcjonalnych.
3. Zaproponowane metody stosuje się do szacowania częstości i wielkości uszkodzeń bariery stalowych, linowych i betonowych.
4. Podstawowymi miarami częstości i wielkości uszkodzeń barier ochronnych na odcinkach dróg są: liczba zderzeń pojazdów z barierami LZDB oraz długość uszkodzeń barier ochronnych LUO, natomiast pozostałe miary: gęstość zdarzeń GZDB, koncentracja zdarzeń KZDB oraz gęstość uszkodzeń są miarami pomocniczymi służącymi do szacowania miar podstawowych.
5. W przypadku pojedynczych uderzeń pojazdu w barierę ochronną podstawowymi miarami są: prawdopodobieństwo uszkodzenia bariery PUB oraz długość uszkodzenia bariery LUB.

10.1.3. Dane wyjściowe

Uwzględniając powyższe założenia przed przystąpieniem do szacowania miar uszkodzeń barier ochronnych, należy zebrać odpowiednie dane dotyczące: klasy drogi, jej parametrów geometrycznych, metody utrzymania drogi, parametrów ruchu, statystyk zdarzeń drogowych. Szczegółowe wymagania dotyczące zakresu danych przedstawiono przy opisie poszczególnych metod.

10.2. Metoda ogólna szacowania liczby i wielkości uszkodzeń barier na odcinkach dróg

10.2.1. Założenia i dane

Metoda ogólna stosowana na poziomie strategicznym służy do wstępnego rozpoznania częstości i wielkości uszkodzeń barier ochronnych na odcinku drogi. Na wstępnych etapach analiz, dysponuje się ograniczoną liczbą danych, dlatego dokładność szacowania liczby i długości uszkodzeń barier ochronnych może być obciążona większymi błędami niż w przypadku zastosowania metody szczegółowej.

Metoda ogólna może być stosowana wyłącznie do szacowania liczby zdarzeń z barierami LZDB i długości uszkodzeń barier LUO na jednorodnych odcinkach dróg pod względem natężenia i struktury potoku pojazdów, na których nie występują zróżnicowanie stopnia udziału krawędzi jezdni, wyposażonych w bariery różnego typu (stalowe, linowe, betonowe).

Do szacowania liczby zdarzeń z barierami LZDB i długości uszkodzeń barier LUO metodą ogólną, niezbędne są następujące dane: długość analizowanego odcinka drogi (DL), gęstość łuków poziomych (GLPO), występowanie pochyleń podłużnych $\geq 5\%$ (FA), średnie dobowe natężenie ruchu (SDR), udział pojazdów ciężarowych z przyczepą (UCP), występowanie barier linowych (WBL), model utrzymania drogi (WZA).

10.2.2. Szacowanie liczby zdarzeń z barierami

Liczbę zdarzeń z barierami ochronnymi LZDB, rejestrowaną przez służby utrzymaniowe na analizowanym odcinku drogi, można oszacować metodą ogólną w sposób bezpośredni i w sposób pośredni.

W sposób bezpośredni liczbę zdarzeń z barierami ochronnymi LZDB, rejestrowaną przez służby utrzymaniowe na analizowanym odcinku drogi, można oszacować metodą ogólną według wzoru 10.1.

$$LZDB_i = WZA_i \cdot DL_i^{1,090} \cdot SDR_i^{0,687} \cdot \exp(-1,776 - 1,783 \cdot UCP_i + 0,783 \cdot GLPO_i + 0,716 \cdot FA_i + 0,620 \cdot WBL_i) \quad (10.1)$$

gdzie:

WZA_i – współczynnik wykrywalności zdarzeń, grupa A, wartość liczbowa dobierana z tabeli 10.1,

DL_i – długość i-tego odcinka drogi (km),

SDR_i – średni dobowy ruch pojazdów na i-tym odcinku drogi (tys. poj./24h),

UCP_i – udział pojazdów ciężarowych z przyczepą (-),

$GLPO_i$ – gęstość łuków poziomych (łuków/km),

FA_i – falistość odcinka drogi powyżej 5 %, nie występuje lub występuje (0; 1),

WBL_i – współczynnik udziału krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami linowymi (0;0,5;1,0).

Dane dotyczące wielkości ruchu (SDR) oraz o udziale pojazdów ciężarowych z przyczepą (UCP), należy wyznaczyć na podstawie wyników ogólnokrajowego programu pomiaru natężenia ruchu na drogach krajowych (Generalny Pomiar Ruch – GPR) lub własnych pomiarów. Zasady prognozowania wskaźników wzrostu ruchu pojazdów przyjmuje się zgodnie z wymaganiami do analiz i prognoz ruchu Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad.

Wartość wskaźnika wykrywalności zdarzeń z barierami ochronnymi należy dobrać wg tabeli 10.1, w zależności od obowiązującego na analizowanym odcinku drogi standardu utrzymania.

Tab. 10.1 Wartość wskaźnika wykrywalności zdarzeń z barierami ochronnymi względem stosowanego na odcinku drogi modelu utrzymania

Model utrzymania drogi	Wartość wskaźnika wykrywalności zdarzeń z barierami WZA (-)
Model utrzymaj standard A (US-A)	1,0
Model utrzymaj standard B (US-B)	0,8
Model klasyczny (MK)	0,5

Źródło: Opracowanie własne

Wartość liczbową współczynnika udziału krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami linowymi należy dobrać wg oceny występowania barier linowych na odcinku drogi. W przypadku braku barier linowych na odcinku drogi, należy przyjąć $WBL=0$, w przypadku występowania barier linowych na odcinku drogi, należy przyjąć wartość $WBL=0,5$ – gdy bariery zabezpieczają do 50% krawędzi jezdni oraz wartość $WBL=1,0$ w przypadku, gdy pokrywają ponad 50% krawędzi jezdni.

Występowanie odcinków o pochyleniu podłużnym większych niż 5% (FA) należy ocenić na podstawie dostępnej dokumentacji projektowej drogi lub własnych obserwacji czy pomiarów.

Wartość liczbową gęstości łuków poziomych należy oszacować wg wzoru 10.2.

$$GLPO_i = \frac{LLPO_i}{DL_i} \quad (10.2)$$

gdzie:

$GLPO$ – wskaźnik krętości odcinka drogi ($^{\circ}/km$)

$LLPO_i$ – kąt zwrotu trasy ($^{\circ}$)

L_n – długość odcinka (km)

W sposób pośredni liczbę zdarzeń z barierami ochronnymi LZDB, rejestrowaną przez służby utrzymaniowe na analizowanym odcinku drogi można oszacować metodą ogólną według wzorów 10.3, 10.4.

$$LZDB_i = DL_i \cdot GZDB_i \quad (10.3)$$

$$LZDB_i = PP_i \cdot KZDB_i \quad (10.4)$$

gdzie:

$GZDB_i$ – gęstość zdarzeń z barierami na odcinku dróg dostępna lub oszacowana za pomocą wzoru 8.27 (zd/km/rok),

$KZDB_i$ – koncentracja zdarzeń z barierami na odcinku dróg dostępna lub oszacowana za pomocą wzoru 8.29 (zd./km/rok).

10.2.3. Szacowanie długości uszkodzeń barier

Długość uszkodzeń barier ochronnych LUO, rejestrowaną przez służby utrzymaniowe na analizowanym odcinku drogi, można oszacować metodą ogólną w sposób bezpośredni i w sposób pośredni.

W sposób bezpośredni długość uszkodzeń barier ochronnych LUO na analizowanym odcinku dróg można oszacować metodą ogólną za pomocą wzoru 10.5.

$$LUO_i = LZDB_i \cdot \exp(1,793 + 1,788 \cdot UCP_i + 1,040 \cdot WZA_i + 0,414 \cdot WBL_i) \quad (10.5)$$

gdzie:

LUO_i – długość uszkodzeń barier ochronnych na i-tym odcinku drogi (m/rok),

$LZDB_i$ – liczba rejestrowanych (lub oszacowanych za pomocą wzoru 10.1) zdarzeń z barierami ochronnymi na i-tym odcinku drogi w ciągu roku (zd./km/rok),

UCP_i – udział pojazdów ciężarowych z przyczepą (-),

WZA_i – współczynnik wykrywalności zdarzeń, grupa A (0,5; 0,8; 1,0)

WBL_i – współczynnik udziału krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami linowymi (0; 0,5; 1,0).

W sposób pośredni długość uszkodzeń barier ochronnych LUO, rejestrowaną przez służby utrzymaniowe na analizowanym odcinku drogi można oszacować metodą ogólną według wzoru 10.6.

$$LUO_i = DL_i \cdot GUO_i \quad (10.6)$$

gdzie:

GUO_i – gęstość uszkodzeń barier ochronnych na odcinku drogi dostępna lub oszacowana za pomocą wzoru 8.34 (m/km/rok).

10.3. Metoda szczegółowa szacowania liczby i wielkości uszkodzeń barier na odcinkach dróg

10.3.1. Założenia i dane

Metoda szczegółowa stosowana na poziomie operacyjnym i eksploatacyjnym służy do szacowania liczby i wielkości uszkodzeń barier ochronnych na odcinku drogi. Metoda szczegółowa może być stosowana na etapie wyboru rodzaju bariery oraz na etapie przygotowania ofert przetargowych na utrzymanie analizowanego odcinka drogi. W tych przypadkach, przystępując do analiz dysponuje się

znacznie większym zakresem danych, dlatego dokładność szacowania liczby i długości uszkodzeń barier ochronnych może być znacznie większa niż w przypadku zastosowania metody ogólnej.

Metoda szczegółowa może być stosowana do szacowania liczby zdarzeń z barierami LZDB i długości uszkodzeń barier LUO na odcinkach dróg zawierających zróżnicowaną długość różnych rodzajów barier.

Do szacowania liczby zdarzeń z barierami LZDB i długości uszkodzeń barier LUO metodą szczegółową, niezbędne są następujące dane: udział pojazdów ciężarowych z przyczepą UCP, współczynnik krętości odcinka drogi WKO, średnia prędkość dopuszczalną na odcinku drogi VDOP, udział krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami poszczególnych rodzajów tj. stalowych UB_S, linowych UB_L, betonowych UB_B, odległość barier od krawędzi jezdni SB oraz współczynnik wykrywalności zdarzeń grupa A WZA, falistość odcinka drogi FA, współczynnik udziału barier linowych na odcinku drogi WBL.

10.3.2. Szacowanie liczby zdarzeń

Liczbę zdarzeń z barierami ochronnymi LZDB, rejestrowaną przez służby utrzymaniowe na analizowanym odcinku drogi, można oszacować metodą szczegółową w sposób bezpośredni i w sposób pośredni.

W sposób bezpośredni liczbę zdarzeń z barierami ochronnymi LZDB, rejestrowaną przez służby utrzymaniowe na analizowanym odcinku drogi, można oszacować metodą szczegółową według wzoru 10.7.

$$LZDB_i = WZA_i \cdot DL_i^{1,198} \cdot SDR_i^{0,781} \cdot \exp(-3,648 - 1,459 \cdot UCP_i + 1,083 \cdot GLPO_i + 0,654 \cdot FA_i + 1,356 \cdot UBS_i + 1,817 \cdot UBL_i - 3,319 \cdot UBB_i) \quad (10.7)$$

gdzie:

$LZDB_i$ – liczba zdarzeń z barierami ochronnymi na i-tym odcinku drogi w ciągu roku (*zd./km/rok*),

WZA_i – współczynnik wykrywalności zdarzeń, grupa A, wartość liczbową dobierana z tabeli 10.1,

DL_i – długość i-tego odcinka drogi (*km*),

SDR_i – średni dobowy ruch pojazdów i-tego odcinka drogi (*tys.poj./24h*),

UCP_i – udział pojazdów ciężarowych z przyczepą (-),

$GLPO_i$ – gęstość łuków poziomych (*łuków/km*),

FA_i – falistość odcinka drogi (0; 1),

UBS_i – udział krawędzi jezdni wyposażonych w stalowe bariery ochronne na i-tym odcinku drogi (-),

UBL_i – udział krawędzi jezdni wyposażonych w linowe bariery ochronne na i-tym odcinku drogi (-),

UBB_i – udział krawędzi jezdni wyposażonych w betonowe bariery ochronne na i-tym odcinku drogi (-),

Średni dobowy ruch pojazdów (SDR) oraz współczynnik wykrywalności zdarzeń (WZA) należy przyjąć analogicznie, jak w przypadku metody ogólnej (z wykorzystaniem danych GPR oraz tablicy 10.1). Wartość parametru krętości odcinka drogi należy oszacować na podstawie wzoru 10.8. Wskaźnik krętości odcinka drogi to suma n kątów zwrotu trasy na i-tym odcinku drogi do łącznej długości odcinka bazowego. Wskaźnik krętości odcinka drogi należy wyznaczyć dla niwelety, której przebieg pokrywa się z osią pasa dzielącego (w przypadku drogi dwujezdniowej). Informacje na temat odcinków prostych,

łuków poziomych, wraz z krzywymi przejściowymi oraz promieniami łuków, należy odczytać z projektów organizacji ruchu. Wartość liczbowa gęstości łuków poziomych należy oszacować wg wzoru 10.2.

$$WKO = \frac{\sum \alpha_n}{DL_i} \quad (10.8)$$

gdzie:

WKO – wskaźnik krętości odcinka drogi ($\frac{^\circ}{km}$)

α_n – kąt zwrotu trasy ($^\circ$)

DL_i – długość i-tego odcinka drogi (km)

Udział krawędzi jezdni wyposażonych w bariery ochronne stalowe czy linowe, należy oszacować na podstawie wzoru 10.9, wykorzystując aktualne projekty organizacji ruchu dla odcinka drogi.

$$UB_{k_i} = \frac{DB_{P1} + DB_{L1} + DB_{P2} + DB_{L2}}{2 \cdot n_i \cdot DL_i} \quad (10.9)$$

gdzie:

UB_{n_i} – udział krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami n tego rodzaju na i-tym odcinku drogi (-),

$DB_{P1,2}$ – długość prawej krawędzi jezdni nr 1 i 2 zabezpieczonej barierą ochronną k-tego rodzaju (km),

$DB_{L1,2}$ – długość lewej krawędzi jezdni nr 1 i 2 zabezpieczonej barierą ochronną k-tego rodzaju (km),

DL_i – długość i-tego odcinka drogi (km),

n_i – liczba jezdni (szt.).

W sposób pośredni liczbę zdarzeń z barierami ochronnymi LZDB, rejestrowaną przez służby utrzymaniowe na analizowanym odcinku drogi można oszacować metodą szczegółową, według wzorów 10.10, 10.11.

$$LZDB_i = DL_i \cdot GZDB_i \quad (10.10)$$

$$LZDB_i = PP_i \cdot KZDB_i \quad (10.11)$$

gdzie:

$GZDB_i$ – gęstość zdarzeń z barierami na odcinku dróg dostępna lub oszacowana za pomocą wzoru 8.28 ($zd/km/rok$),

$KZDB_i$ – koncentracja zdarzeń z barierami na odcinku dróg dostępna lub oszacowana za pomocą wzoru 8.30 lub 8.31 ($zd./km/rok$).

10.3.3. Szacowanie długości uszkodzeń

Długość uszkodzeń barier ochronnych LUO, rejestrowaną przez służby utrzymaniowe na analizowanym odcinku drogi, można oszacować metodą szczegółową w sposób bezpośredni i w sposób pośredni.

W sposób bezpośredni długość uszkodzeń barier ochronnych LUO, rejestrowaną przez służby utrzymaniowe na analizowanym odcinku drogi, można oszacować metodą szczegółową za pomocą wzoru 10.12.

$$LUO_i^{E1(5)} = LZDB_i^M \cdot WZA_i^{1,041} \cdot \exp(3,008 - 0,008 \cdot \frac{SDR}{1000} - 0,481 \cdot \frac{WKO_i}{100} + 0,679 \cdot UBS_i + 0,951 \cdot UBL_i - 0,038 \cdot SB_i) \quad (10.12)$$

gdzie:

LUO_i – długość uszkodzeń barier ochronnych na i-tym odcinku (m/rok),

$LZDB_i$ – liczba rejestrowanych (lub oszacowanych za pomocą wzoru 10.13) zdarzeń z barierami ochronnymi na i-tym odcinku drogi w ciągu roku ($zd./km/rok$),

WZA_i – współczynnik wykrywalności zdarzeń, grupa A (0,5; 0,8; 1,0),

SDR_i – średni dobowy ruch pojazdów i-tego odcinka drogi ($tys.poj./24h$),

WKO_i – wskaźnik krętości na i-tym odcinku drogi ($\frac{0}{km}$),

UBS_i – udział krawędzi jezdni wyposażonych w stalowe bariery ochronne na i-tym odcinku drogi (-),

UBL_i – udział krawędzi jezdni wyposażonych w linowe bariery ochronne na i-tym odcinku drogi (-),

SB_i – średnia odległość barier ochronnych od krawędzi jezdni (m).

Według metody szczegółowej dla odcinków dróg, czynnikami wpływającym na długość uszkodzeń barier ochronnych na odcinku drogi są: liczba zdarzeń z barierami ochronnymi ($LZDB$), współczynnik wykrywalności zdarzeń związany z zastosowanym na odcinku drogi modelem utrzymania drogi (WZA), średnioroczne natężenie ruchu pojazdów (SDR), wskaźnik krętości odcinka drogi (WKO), wartość udziału krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami linowymi (UBL) i barierami stalowymi (UBS) oraz średnia odległość tych barier od krawędzi jezdni (SB).

W sposób pośredni długość uszkodzeń barier ochronnych LUO , rejestrowaną przez służby utrzymaniowe na analizowanym odcinku drogi, można oszacować metodą szczegółową według wzoru 10.13.

$$LUO_i = DL_i \cdot GUO_i \quad (10.13)$$

gdzie:

GUO_i – gęstość zdarzeń z barierami na odcinku dróg dostępna lub oszacowana za pomocą wzoru 8.35 lub 8.36 ($m/km/rok$).

10.4. Metoda szacowania prawdopodobieństwa uderzenia pojazdu i wielkości uszkodzenia bariery dla pojedynczego zdarzenia

10.4.1. Założenia i dane

Metoda szacowania prawdopodobieństwa uderzenia i wielkości uszkodzenia bariery dla pojedynczego zdarzenia stosowana może być na etapie projektowania konstrukcji bariery do oceny parametrów jej funkcjonowania, w przypadku uderzenia pojazdu o zadanych parametrach (masa, prędkość, kąt uderzenia). Metoda ta może być stosowana także na etapie wyboru rodzaju bariery w procesie projektowania wyposażenia drogi. Posługując się tą metodą, możemy określić wpływ podstawowych czynników (rodzaj bariery, masa i prędkość pojazdu) na wielkość uszkodzeń bariery.

Metoda ta może być stosowana do szacowania poziomu prawdopodobieństwa uderzenia pojazdu w barierę drogową $PZDB$ i długości uszkodzenia bariery LU w przypadku uderzenia pojazdu w barierę. Do szacowania prawdopodobieństwa uderzenia pojazdu w barierę $PZDB$ i długości uszkodzenia bariery LU niezbędne są następujące dane: długość odcinka DL , średni dobowy ruch SDR , średnia prędkość dopuszczalna na odcinku drogi $VDOP$, udział krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami poszczególnych rodzajów tj. stalowych UBS , linowych UBL , betonowych UBB , odległość barier od krawędzi jezdni SB oraz współczynnik wykrywalności zdarzeń grupa A WZA ; masa pojazdu MP ,

prędkość pojazdu VP, kąt uderzenia pojazdu w barierę KU, rodzaj bariery (stalowa, linowa, betonowa) i sztywność bariery K.

10.4.2. Szacowanie prawdopodobieństwa uderzenia pojazdu w barierę

Prawdopodobieństwo uderzenia pojazdu w barierę i zarejestrowania tego zdarzenia PZDB na analizowanym odcinku drogi, można oszacować korzystając ze wzoru 10.14

$$P_{ZDB} = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5 \quad (10.14)$$

gdzie:

P_1 – prawdopodobieństwo wypadnięcia pojazdu z drogi (zd./mln poj.km/rok),

P_2 – prawdopodobieństwo wypadnięcia pojazdu w strefie zagrożenia zderzenia z barierą ochronną (-),

P_3 – prawdopodobieństwo dojazdu i uderzenia pojazdu w barierę ochronną (-),

P_4 – prawdopodobieństwo uszkodzenia bariery ochronnej (-),

P_5 – prawdopodobieństwo rejestracji uszkodzeń barier ochronnych (-),

Prawdopodobieństwo P_1 wypadnięcia pojazdu z drogi na analizowanym odcinku drogi, można oszacować korzystając ze wzoru 10.15.

$$P_1 = P(W | X_1, Z_1) = K_{wi} \quad (10.15)$$

Przy czym:

$$K_{wi} = \frac{\sum_t LZD_{w,t} \cdot 10^6}{365 \cdot \sum_t (SDR_{t,i} \cdot DL_i)} \quad (10.16)$$

Prawdopodobieństwo P_{2-4} , że wypadający pojazd uderzy w barierę zależy od wielu czynników takich, jak prędkość V i kąt wypadnięcia pojazdu z jezdni KU, odległość bariery od krawędzi jezdni SB, długość strefy występowania barier Ls. Prawdopodobieństwo P_{2-4} , można oszacować korzystając ze wzoru 10.17 oraz zasad przedstawionych w rozdz. 7.3.

$$P_{2-4} = P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 = f(V, SB, KU, Ls) \quad (10.17)$$

W przypadku autostrady A1 prawdopodobieństwo, że wypadający pojazd uderzy w barierę P_{2-4} wynosi od 0,700 – 0,875.

Prawdopodobieństwo P_5 rejestracji uszkodzeń barier ochronnych i podjęcia stosowanych działań naprawczych zależy głównie od zastosowanego modelu utrzymania drogi. Wartość liczbowa P_5 dobiera się z tablicy 10.1.

10.4.3. Szacowanie długości uszkodzenia bariery

Liczbę zdarzeń z barierami ochronnymi LZDB, rejestrowaną przez służby utrzymaniowe na analizowanym odcinku drogi, można oszacować metodą szczegółową w sposób bezpośredni i w sposób pośredni.

Długość uszkodzenia LU_x poszczególnych rodzajów barier ochronnych po uderzeniu pojazdu, można oszacować korzystając ze wzorów 10.18 w przypadku barier stalowych, 10.19 w przypadku barier linowych i 10.20 w przypadku barier betonowych.

$$LU_{S1} = 0,129 \cdot DM^{0,377} \cdot VPL^{0,823} \cdot MP^{0,436} \cdot KU^{-0,451} \cdot \exp(-0,086 \cdot EKL/100) \quad (10.18)$$

$$LU_{L1} = 4,744 \cdot DM^{0,856} \cdot EKL^{-0,296} \cdot EKP^{0,529} \cdot MP^{-0,034} \cdot KU^{-0,296} \quad (10.19)$$

$$LU_{B1} = 14,4 \cdot DM^{0,604} \cdot Kn^{-0,071} \cdot EKL^{0,080} \cdot KU^{0,401} \quad (10.20)$$

gdzie:

LU_X – długość uszkodzenia bariery rodzaju X (m),

VKL – prędkość poprzeczna pojazdu uderzającego w barierę w czasie testu symulacyjnego (m/s),

DM – znormalizowane ugięcie dynamiczne bariery, ustalone w wyniku testu symulacyjnego bariery (m),

K – sztywność bariery, ustalona na podstawie parametrów bariery uzyskanych w czasie testu symulacyjnego (kJ/m²),

EKL – energia kinetyczna poprzeczna pojazdu uderzającego w barierę w czasie testu zderzeniowego (kJ).

Ograniczona liczba testów symulacyjnych, wymaga ostrożnej interpretacji przedstawionych modeli w szczególności w brzegowych zakresach zmiennych niezależnych.

11. PODSUMOWANIE PRACY I REKOMENDACJE

11.1. Wnioski

Barierę ochronną umieszcza się na mostach, wiaduktach, pasach dzielących jezdnie, a także przy krawędzi jezdni, gdy w strefie bezpieczeństwa znajdują się przeszkody stałe. Prawdopodobnie zaprojektowana i zamontowana bariera ochronna powinna spełniać wiele właściwości funkcjonalnych takich jak: bezpieczeństwo, niezawodność, sprawność, efektywność, gotowość itp. Obowiązujące normy określają zasady certyfikacji barier na podstawie wyników testów zderzeniowych, ale nie wskazują wymiarów, kształtu ani materiału z jakiego ma być wykonana bariera ochronna, ani parametrów funkcjonalnych, pozostawiając ich dobór do rozstrzygnięcia projektantom i administracji drogowej.

Problem otoczenia dróg należy do najpoważniejszych kwestii w zakresie bezpieczeństwa ruchu drogowego i od lat są prowadzone badania dotyczące identyfikacji zagrożeń w otoczeniu drogi oraz nad skutecznością stosowanych rozwiązań poprawiających bezpieczeństwo użytkowników dróg.

W Polsce problematyka funkcjonowania barier ochronnych (drogowych i mostowych) rozwijana była od lat 80-tych ubiegłego wieku [114], a pierwsze próby zastosowania badań symulacyjnych były prowadzone na początku XXI wieku [96],[15],[40]. Nie prowadzono niestety prac badawczych dotyczących konstrukcji i funkcjonowania barier ochronnych stosowanych na drogach w Polsce. Dopiero Program Badawczy RID, przyjęty jako wspólne przedsięwzięcie NCBiR oraz GDDKiA uruchomił dwa projekty badawcze RID 3A (RoSE) [149] i RID 3B (LifeRoSE) [146], dedykowane tym zagadnieniom. W ramach tych projektów przeprowadzono szereg badań terenowych, poligonowych i symulacyjnych umożliwiających zebranie niezbędnych danych. Zbiór tych danych w zakresie uszkodzeń barier był ograniczony, dlatego w kolejnych latach poszerzano bazę danych o wyniki prac własnych, prac zleconych oraz projektów badawczych. Uzyskane w ten sposób zbiory danych, umożliwiły opracowanie modeli matematycznych, opisujących zależność częstości i wielkości uszkodzeń barier ochronnych (drogowych i mostowych) zlokalizowanych na dwujezdniowych drogach krajowych od wybranych, najbardziej istotnych czynników konstrukcyjnych, drogowych, ruchowych i organizacyjnych.

Na podstawie przeprowadzonych badań terenowych, poligonowych i symulacyjnych oraz prac analitycznych i wyników modelowania sformułowano następujące wnioski:

1. Zarządy drogowe, projektanci dróg, projektanci i wykonawcy barier oraz firmy utrzymaniowe od wielu lat zgłaszały potrzebę rozpoznania wielu aspektów funkcjonowania barier ochronnych montowanych na drogach. Wśród wielu problemów konstrukcyjnych, funkcjonalnych i eksploatacyjnych pojawił się nowy, wcześniej nierozpoznawany problem szacowania częstości występowania zderzenia pojazdów z barierami oraz wielkości (długości) uszkodzeń barier ochronnych na utrzymywanych odcinkach dróg. Znajomość tych parametrów umożliwiła szacowanie kosztów utrzymania drogi, w których utrzymanie barier stanowi istotną część.
2. Zastosowanie wielu metod zbierania danych (terenowych, poligonowych i symulacyjnych) oraz nowych technologii pozyskiwania danych (fotogrametria, GIS) umożliwiły pozyskanie dość dużego zbioru zgromadzonych danych o dużej dokładności.

3. Przeprowadzona seria badań terenowych i poligonowych, dotycząca funkcjonowania barier ochronnych podczas i po uderzeniu pojazdu w barierę umożliwiła identyfikację istotnych czynników wpływających na częstość (badania terenowe) i wielkość uszkodzeń (badania poligonowe i terenowe). Dla określenia wpływu wszystkich czynników na funkcjonowanie barier drogowych, które jest bardzo trudne, zastosowano dwie metody badawcze: statystyczne (wykorzystując zbiory danych statystycznych) i mechanistyczne (wykorzystując zależności fizyczne (interakcję) między barierą i uderzającym w nią pojazdem).
4. Wyniki badań poligonowych wykorzystano do opracowania wstępnych modeli matematycznych, opisujących zależności między nimi oraz weryfikację przygotowanych modeli symulacyjnych układu pojazd - bariera. Pozwoliło to na uzupełnienie zbiorów wyników funkcjonowania barier z badań poligonowych (kilkadziesiąt raportów), badaniami symulacyjnymi (kilkaset serii danych), realizowanymi na potrzeby różnych projektów badawczych oraz prac własnych autora.
5. Wykorzystując dane i wyniki uzyskane z badań poligonowych i symulacyjnych opracowano matematyczne modele prawdopodobieństwa uderzenia pojazdu w barierę i modele wielkości uszkodzenia bariery w wyniku uderzenia w nią pojazdu dla każdego rodzaju bariery niezależnie. Przeprowadzone badania i analizy wykazały, że:
 - a) podstawowe parametry konstrukcyjne bariery (szerokość pracująca, ugięcie dynamiczne) oraz miary uszkodzeń bariery zależą od dwóch podstawowych czynników: energii kinetycznej uderzającego w barierę pojazdu (głównie składowej poprzecznej, ale w niektórych przypadkach także składowej podłużnej) oraz odporności konstrukcyjnej bariery ochronnej na uderzenie pojazdu (sztywność lub podatność bariery),
 - b) prawdopodobieństwo wypadnięcia pojazdu z jezdni i uderzenia w barierę ochronną, na analizowanym odcinku drogi zależy od: rodzaju bariery, natężenia ruchu na drodze, prędkości i kąta wypadnięcia pojazdu, stopnia wyposażenia otoczenia jezdni w bariery i odległości bariery od krawędzi jezdni (pasa ruchu), natomiast prawdopodobieństwo wykrycia uszkodzenia i podjęcia działań zależy od sposobu utrzymania analizowanego odcinka drogi;
 - c) długość uszkodzeń spowodowanych przez pojedynczy uderzający w barierę zależy od: prędkości poprzecznej lub energii kinetycznej poprzecznej pojazdu uderzającego w barierę ochronną, ugięcia dynamiczne bariery lub sztywności bariery.
6. Wykorzystując dane i wyniki uzyskane z badań terenowych i eksploracji dostępnych baz danych o wypadkach, o ruchu i o drodze, na odcinkach dróg krajowych, opracowano matematyczne modele:
 - a) częstości zdarzeń drogowych z barierami, mierzonej za pomocą: liczby zdarzeń z barierami jako miary głównej oraz gęstością i koncentracją zdarzeń z barierami, jako miar pomocniczych;
 - b) wielkości uszkodzeń barier ochronnych mierzonej za pomocą: długości uszkodzeń barier, jako miary głównej oraz gęstości uszkodzeń barier jako miary pomocniczej.
7. Opracowano dwie grupy modeli 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). Przeprowadzone badania i analizy wykazały, że:

- a) liczba zdarzeń z barierami ochronnymi na analizowanym odcinku drogi zależy od: długości odcinka drogi, gęstość łuków poziomych, falistości drogi, natężenia ruchu, udziału pojazdów ciężarowych z przyczepą, odległości barier od krawędzi jezdni, stopnia wyposażenia krawędzi jezdni w bariery ochronne oraz stopnia wykrywalności zdarzeń z barierami ochronnymi;
 - b) długość uszkodzeń spowodowanych przez pojazdy uderzające w barierę na analizowanym odcinku drogi krajowej zależy od: natężenia ruchu, udziału pojazdów ciężarowych z przyczepą, krętości odcinka drogi, falistości odcinka drogi, średniej prędkości dopuszczalnej na odcinku drogi, stopnia wyposażenia krawędzi jezdni w bariery różnych rodzajów, odległości barier od krawędzi jezdni oraz stopnia wykrywalności zdarzeń z barierami ochronnymi.
8. Przedstawiona rozprawa zawiera elementy oryginalności:
- a) w skali międzynarodowej w zakresie opracowania modeli matematycznych częstości uderzenia pojazdu w barierę oraz wielkości uszkodzeń bariery na odcinku drogi z uwzględnieniem czynników drogowych, konstrukcyjnych, ruchowych i utrzymaniowych,
 - b) w skali kraju w zakresie:
 - przeprowadzenia serii badań terenowych, poligonowych i symulacyjnych funkcjonowania barier ochronnych i wykorzystania ich wyników do opracowania modeli matematycznych opisujących częstość i wielkość uszkodzeń barier,
 - opracowania metodyki szacowania prawdopodobieństwa uderzenia pojazdu w barierę na odcinku drogi,
 - opracowanie modeli wielkości uszkodzeń spowodowanych pojedynczymi uderzeniami pojazdu w barierę;
 - opracowanie metodyki szacowania wybranych miar częstości i wielkości uszkodzeń barier na odcinkach dróg.

11.2. Propozycje wykorzystania wyników badań

Zaproponowane metody i modele szacowania częstości i wielkości uszkodzeń barier ochronnych stosowanych na odcinkach dwujezdniowych dróg krajowych rekomenduje się do stosowania:

1. W procesie planowania i projektowania drogi, przy wyborze rodzaju barier ochronnych.
2. W procesie przygotowania ofert przetargowych na utrzymanie odcinków dróg do oszacowania liczby potencjalnych napraw i długości barier (poszczególnych rodzajów) wymagających naprawy lub wymiany w przyjętym okresie kontraktu utrzymaniowego.
3. W procesie projektowania konstrukcji bariery do oszacowania jej parametrów konstrukcyjnych.
4. Weryfikacji i uzupełnienia metody szacowania kosztów budowy i funkcjonowania barier w cyklu ich życia.

Ponadto rekomenduje się uzupełnienie Wytycznych zarządzania drogowymi środkami bezpieczeństwa ruchu drogowego w zakresie trwałości i funkcjonalności, Załącznik M1 opracowanych w ramach projektu LifeRoSE (RID 3B) [148],[147] o zaproponowane metody szacowania częstości i wielkości uszkodzeń barier ochronnych stosowanych na drogach krajowych.

11.3. Kierunki dalszych badań

Przedstawione w pracy wyniki badań terenowych, poligonowych i symulacyjnych, a także opracowane modele i metody szacowania częstości i wielkości uszkodzeń barier nie wyczerpują zagadnień związanych z problematyką funkcjonowania barier ochronnych na drogach. Biorąc pod uwagę rozpoznane problemy projektowania, budowy i funkcjonowania barier ochronnych i innych urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego, proponuje się prowadzenie dalszych prac badawczych i rozwojowych w tym zakresie. Najważniejszymi kierunkami dalszych prac, zdaniem autora są:

1. Opracowanie metodyki wykorzystania lidarów, dronów i sztucznej inteligencji do rozpoznawania infrastruktury drogowej, jej uszkodzeń, pomiaru lub szacowania parametrów ruchu pojazdów uderzających w barierę (prędkość, kąt uderzenia, masa pojazdu).
2. Wykonanie poszerzonej serii badań terenowych, poligonowych i symulacyjnych obejmujących: odcinki dróg jednojezdniowych, obszary robót drogowych, miejsca stosowania terminali i poduszek zderzeniowych.
3. Uzupełnienie metody analizy ekonomicznej stosowania barier ochronnych z weryfikacją metody analizy kosztów w cyklu życia LCC (Life Cycle Costing) urządzeń bezpieczeństwa ruchu.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Albuquerque F.D.B., Awadalla M.D.M., *Roadside Fixed-Object Collisions, Barrier Performance, and Fatal Injuries in Single-Vehicle, Run-Off-Road Crashes, Safety*, (2020).
- [2] Amarasingha N., Dissanayake S., *Modeling Frequency of Truck Crashes on Limited-Access Highways, Journal of the Transportation Research Forum*, (2013).
- [3] American Association of State Highway and Transportation Officials, *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, "Green Book"*, (2018).
- [4] American Association of State Highway and Transportation Officials, *Criteria for Restoration of Longitudinal Barriers, Phase II*. Washington, DC, (2021).
- [5] American Association of State Highway and Transportation Officials, *Highway Safety Manual*. Washington, DC, (2010).
- [6] American Association of State Highway and Transportation Officials, *Maintenance Manual for Roadways and Bridges*. Washington, DC., (2007).
- [7] American Association of State Highway and Transportation Officials, *Manual for Assessing Safety Hardware*. (2016).
- [8] American Association of State Highway and Transportation Officials, *Report 656: Criteria for Restoration of Longitudinal Barriers*. (2010).
- [9] Antoniuk M., Gumińska L., Jeliński Ł., Wachnicka J., *Wpływ barier ochronnych na poziom bezpieczeństwa ruchu drogowego, Logistyka*, (2014).
- [10] Antoniuk M., Jeliński Ł., *Badanie wpływu rodzaju otoczenia drogi na liczbę i skutki niebezpiecznych zdarzeń drogowych na przykładzie dróg krajowych województwa pomorskiego Praca dyplomowa*, (2014).
- [11] Baldo N., Indri V., Rondinella F., Daneluz F., *Multivariate Regression of Road Segments' Accident Data in Italian Rural Networks, European Transport*, (2023).
- [12] Bax C.H., De Jong M., Koppenjan J., *Implementing evidence-based policy in a network setting, Public Administration*, (2010).
- [13] Bohatkiewicz J., Dębiński M., *The influence of the police on vehicle speed in built-up areas*, (2022).
- [14] Bonin G., Cantisani G., Loprencipe G., *Analysis of Laboratory Data from Crash Test on Road Safety Barriers, Conference: Atti del III Congresso Internazionale SIVV*, (2005).
- [15] Borkowski W., Hryciów Z., Rybak P., Wysocki J., *Numerical simulation of the standard TB11 and TB32 tests for a concrete safety barrier, KONES Powetrain and Transport*, (2010).
- [16] Bruski D., *Projekt Argentum - Methods for speed estimation of a vehicle at impact with a road safety barrier*, (2023).
- [17] Budzyński M., Gobis A., Jamroz K., Jeliński Ł., Ostrowski K., *Road Restraint Systems as a Basis for Roadside Safety Improvement, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, (2019).
- [18] Budzynski M., Jamroz K., Antoniuk M., *Effect of the Road Environment on Road Safety in Poland, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, (2017).
- [19] Budzynski M., Jamroz K., Jelinski L., Antoniuk M., *Why are trees still such a major hazard to drivers in Poland ?*, (2016).
- [20] Budzyński M., Jamroz K., Jeliński Ł., Antoniuk M., Wilde K., *Otoczenie drogi źródłem zagrożeń dla uczestników ruchu drogowego, Budownictwo*, (2015).
- [21] Budzynski M., Jamroz K., Jelinski L., Bruski D., Pachocki L., Baginski G., *Assessing Roadside Hybrid Energy Absorbers Using the Example of SafeEnd, Materials*, (2022).
- [22] Budzyński M., Jamroz K., Jeliński Ł., Gobis A., *The Effects of Roadside Hazards on Road Accident Severity, Journal of Konbin*, (2019).
- [23] Budzynski M., Jamroz K., Wilde K., Witkowski W., Jelinski L., Bruski D., *The role of numerical tests in assessing road restraint system functionality, European Transport Research Review*, (2020).
- [24] Budzyński M., Kustra W., *Analiza zagrożeń na jednorodnych odcinkach dróg, Drogownictwo*, (2012).
- [25] Budzyński M., Wilde K., Jamroz K., Chrościelewski J., Witkowski W., Burzyński S., Bruski D., Jeliński Ł., Pachocki Ł., *Badania systemów powstrzymujących pojazdy przed wypadnięciem z drogi , ze szczególnym uwzględnieniem obiektów inżynierskich Cz. I*, (2019).
- [26] Burbridge A., Troutbeck R., *Decomartmentalising road safety barrier stiffness in the context of vehicle occupant risk, Journal of the Australasian College of Road Safety*, (2016).
- [27] Burbridge A., *Using Weigh-in-Motion Data To Predict the Likelihood of Exceeding the Capacity of a Road Safety Barrier*, (2015).
- [28] Burbridge A., Troutbeck R., *Measuring the residual risk associated with road safety barriers., U.S. National Research Council, Transportation Research Board, United States of America*, pp. 38-49, (2016).
- [29] CAREC, *Road Safety Engineering Manual 1 - Road Safety Audit*. (2018).
- [30] Carrigan C.E., Ray M.H., *Consideration of Roadside Features in the Highway Safety Manual*. Washington, DC: The National Academies Press., (2022).
- [31] Carrigan C.E., Sheikh N.M., *Proposed Modification Factors for Roadside Slopes*, (2017).
- [32] Cheng G., Cheng R., Pei Y., Xu L., *Probability of Roadside Accidents for Curved Sections on Highways, Mathematical Problems in Engineering*, (2020).
- [33] Coon B.A., Reid J.D., *Reconstruction techniques for energy-absorbing guardrail end terminals, Accident Analysis and Prevention*, (2006).
- [34] Cooper P., *Analysis of Roadside Encroachments-Single Vehicle Run-Off-Road Accident Data Analysis for Five Provinces*. Vancouver, British Columbia, Canada, (1980).

- [35] Cusson D., Lounis Z., Daigle L., *Durability monitoring for improved service life predictions of concrete bridge decks in corrosive environments*, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, (2011).
- [36] Department of Main Roads Road Planning and Design Manual, *Road planning and design manual*. Sydney, (2004).
- [37] DHV ENvironment and Transportation, *Sustainable safe road design: A practical manual*, (2005).
- [38] Dijkstra A., *En route to safer roads, How road structure and road*, (2011).
- [39] Dz.U. 2311 z dnia 26.11.2019, *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 3 lipca 2003 r. w sprawie szczegółowych warunków technicznych dla znaków i sygnałów drogowych oraz urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego i warunków ich umieszczania na drogach.*, (2019).
- [40] Dziewulski P., Niezgoda T., Barnat W., *Numeryczna analiza uderzenia motocyklisty w drogową barierę ochronną z dodatkowymi elementami energochłonnymi poprawiającymi bezpieczeństwo bierne*, *Surface Mining (Górnictwo Odkrywkowe)*, 4/2010, 293-296, (2010).
- [41] Edel R., *Odwodnienie dróg*. Warszawa, (2010).
- [42] Elvik R., *The safety value of guardrails and crash cushions: A meta-analysis of evidence from evaluation studies*, *Accident Analysis and Prevention*, (1995).
- [43] Elvik R., *Towards a general theory of the relationship between exposure and risk*, *TØI Report 1316/2014*, (2014).
- [44] Elvik R., Erke A., Christensen P., *Elementary units of exposure*, *Transportation Research Record*, (2009).
- [45] Elvik R., Høy A., Vaa T., Sørensen M., *The Handbook of Road Safety Measures*, Emerald. strona 1137, (2013).
- [46] ENV 1317-4, *Część 4: Klasy działania, kryteria przyjęcia badań zderzeniowych i metody badań przejść pomiędzy systemami barier*. (2002).
- [47] European Transport Safety Council, *Forgiving roadsides*. (1998).
- [48] Federal Highway Administration, *Development of relationship between truck accidents and geometric design: Phase I*, (1993).
- [49] Federal Highway Administration, *Highway Functional Classification Concepts, Criteria and Procedures*. (2013).
- [50] Federal Highway Administration, *W-Beam Guardrail Repair: A Guide for Highway and Street Maintenance Personnel*, Federal Hi. U.S. Department of Transportation, (2008).
- [51] Fitzpatrick C.D., Harrington C.P., Knodler M.A., Romoser M.R.E., *The influence of clear zone size and roadside vegetation on driver behavior*, *Journal of Safety Research*, (2014).
- [52] Fleisher A., Wier M.L., Hunter M., *A vision for transportation safety: Framework for identifying best practice strategies to advance vision zero*, *Transportation Research Record*, (2016).
- [53] Fligieli M., *Kształtowanie charakterystyk powstrzymywania pojazdów przez bariery drogowe spełniające kryteria badań zderzeniowych Eksploatacja i testy*, (2017).
- [54] Forum of European National Highway Research Laboratories, *New Road Construction Concepts*, Session 2008.
- [55] Fredriksson G., Holmen H.G., *Functional limits of the W-beam safety barrier*, (2014).
- [56] Fredriksson G., Holmen H.G., *The ageing of safety barriers. Functional limits for safety barriers that deviate from the nominal in height and / or perpendicular position*. (2013).
- [57] Freeman P., *Tests of Various Types of Guard Rail.*, *Purdue Engineering Extension Department, Purdue University, Lafayette, IN*, (1934).
- [58] Gabauer D., Gabler H.C., *Review of Current Damage-Level Criteria for Longitudinal Barrier Repair*, *Transportation Research Record*, (2008).
- [59] Gabler H.C., *Roadside Encroachment Database Development and Analysis*. Washington, D. C., (2022).
- [60] Gaca S., *Kryterium bezpieczeństwa ruchu w projektowaniu dróg.*, w *Projekt: Kształtowanie infrastruktury drogowej spełniającej standardy bezpieczeństwa ruchu*, (2018).
- [61] Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M., *Inżynieria Ruchu Drogowego. Teoria i praktyka*. Warszawa, (2011).
- [62] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, *Zasady prognozowania wskaźników wzrostu ruchu wewnętrznego na okres 2008-2040 na sieci drogowej do celów planistyczno projektowych*, (2008).
- [63] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, *Typowe schematy oznakowania robót oraz prowadzonych w pasie drogowym prowadzonych w pasie drogowym*, (2022).
- [64] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, *Wytyczne stosowania drogowych barier ochronnych na drogach krajowych*. Warszawa, (2010).
- [65] Gordon J., *The epidemiology of accidents.*, *American journal of public health and the nation's health*, (1949).
- [66] Goto A., Nakamura H., *Functionally Hierarchical Road Classification Considering the Area Characteristics for the Performance-oriented Road Planning*, *Transportation Research Procedia*, (2016).
- [67] Graham M.D., Burnett W.C., Gibson J.L., Freer R.H., Engineer A., *New Highway Barriers: The Practical Application of Theoretical Design*, (1967).
- [68] Green R.N., German A., Gorski Z.M., Nowak E.S., Tryphonopoulos J.P., Mason D.F., *Unsatisfactory roadside barrier system performance in real-world collisions: Lessons to be learned*, w *SAE Technical Papers*, (1987).
- [69] Guarnieri M., *Landmarks in the history of safety*, *Journal of Safety Research*, (1992).
- [70] Gülich H.A., *Terminals of guardrails and walls on roadsides. - Necessary limitation of protection*, *Bautechnik*, (1999).
- [71] Haddon W., *A logical framework for categorizing highway safety phenomena and activity*, *Journal of Trauma*

- *Injury, Infection and Critical Care*, (1972).
- [72] Hammonds B.R., Roads N.S.W., Services M., *Crash Test Outcomes for Three Generic Barrier Types*, (2012).
- [73] Hauer E., *Lessons Learned from Other Countries. White Papers for: "Toward Zero Deaths: A National Strategy on Highway Safety"*. Ontario, Toronto, (2014).
- [74] Hauer E., Bamfo J., *Two tools for finding what function links the dependent variable to the explanatory variables, Proceedings of the ICTCT 1997 Conference*, (1997).
- [75] Hollnagel E., Green M., *Accident Analysis and Barrier Functions*. (1999).
- [76] Hutchinson J.W., Kennedy T.W., *Medians of Divided Highways - Frequency and Nature of Vehicle Encroachments, College of Engineering, Urbana, IL*, (1966).
- [77] Hutchinson J., *The Significance and Nature of Vehicle Encroachments on Medians of Divided Highways. University of Illinois, Urbana-Champaign*, (1962).
- [78] *Improving Roadside Design to Forgive Human Errors Deliverable, D03 Forgiving Roadside Design Guide*. (2011).
- [79] Jamieson N.J., Waibl G., Daviers R., *Use of roadside barriers versus clear zones. NZ Transport Agency research*. (2011).
- [80] Jamroz K., *Koncepcje kształtowania bezpieczeństwa ruchu drogowego. Część 1. Przegląd koncepcji kształtowania bezpieczeństwa ruchu drogowego*, (2000).
- [81] Jamroz K., *Koncepcje kształtowania bezpieczeństwa ruchu drogowego. Część 2. Możliwości zastosowania koncepcji trzech er w Polsce, Drogownictwo*, (2013).
- [82] Jamroz K., *Metoda zarządzania ryzykiem w inżynierii drogowej*, (2011).
- [83] Jamroz K., *Review of Road Safety Theories And Models, Journal of Konbin*, (2008).
- [84] Jamroz K., Kustra W., Michalski L., *Ocena ryzyka na sieci dróg w Polsce*, (2008).
- [85] Jeliński Ł., Wachnicka J., Jamroz J., Kalisz M., Kaź Mierczak P., Lusa R., Skwierczyński P., *Testing the durability and function of road traffic management devices, MATEC Web of Conferences*, (2017).
- [86] Jeliński Ł., Antoniuk M., *Praca dyplomowa: Badanie wpływu rodzaju otoczenia drogi na liczbę i skutki niebezpiecznych zdarzeń drogowych na przykładzie dróg krajowych województwa pomorskiego. Gdańsk*, (2014).
- [87] Jeliński Ł., Antoniuk M., *Praca konkursowa: Zidentyfikuj zagrożenie - zaproponuj rozwiązanie I Edycja. Gańsk*, (2012).
- [88] Jeliński Ł., Antoniuk M., *Praca konkursowa: Zidentyfikuj zagrożenie - zaproponuj rozwiązanie II Edycja. Gdańsk*, strona 49, (2013).
- [89] Jeliński Ł., Jamroz K., *Studying and analysing the frequency and extent of damage to road safety barriers*, (2018).
- [90] Jeliński Ł., Jamroz K., Jamroz J., Antoniuk M., *Functionality of road safety – identification and analysis of factors*, (2017).
- [91] Jeliński Ł., Jamroz K., Jamroz J., Antoniuk M., *Functionality of road safety devices – identification and analysis of factors, MATEC Web of Conferences*, (2017).
- [92] Jovanis P.P., Chang H.L., *Modeling the Relationship of Accidents To Miles Traveled., Transportation Research Record*, (1986).
- [93] Jurewicz C., Steinmetz L., *Crash performance of safety barriers on high-speed roads, Journal of the Australasian College of Road Safety*, (2012).
- [94] Kempa J., *Charakterystyki ruchu swobodnego na krzywoliniowych odcinkach dróg w planie*, (2008).
- [95] Khan I.U., Vachal K., *Factors affecting injury severity of single-vehicle rollover crashes in the United States, Traffic Injury Prevention*, (2020).
- [96] Kreja I., Mikołajków L., Wekezer J.W., *Komputerowa symulacja zderzeń pojazdów z urządzeniami bezpieczeństwa ruchu drogowego, Drogownictwo*, 8, pp. 247-252, (2000).
- [97] Krystek R., *Zintegrowany System Bezpieczeństwa Transportu. Tom I. Diagnoza bezpieczeństwa transportu w Polsce. Gdańsk*, (2009).
- [98] Kusters M.M., Van der Drift M.J.M., *RIMOB impact attenuator. Findings after eight years of practical experience, Traffic Engineering and Control*, (1991).
- [99] Kustra W., *Modelowanie wybranych miar bezpieczeństwa ruchu na długich odcinkach dróg, Rozprawa doktorska*. (2016).
- [100] Kustra W., *Modelowanie wybranych miar bezpieczeństwa ruchu na długich odcinkach dróg*, (2016).
- [101] Lankarani H.M., *Contact/Impact dynamics applied to crash analysis*. (1997).
- [102] Lee J., Mannering F., *Research Assistant Professor and Chair Analysis of roadside accident frequency and severity and roadside safety management, Final Research Report Research Project T9903, Task 97, Analysis of Roadside Accident Severity & Roadside Safety Management.*, (1999).
- [103] Legutko S., *Podstawy eksploatacji maszyn i urządzeń*. (2004).
- [104] Litman T.A., *Understanding transport demands and elasticities: how prices and other factors affect travel behavior, Victoria Transport Policy Institute*, (2024).
- [105] M. R., B. G., A.B. G., W.W. N., *Guidelines for the design of motorways : RAA, Session 2011*.
- [106] Malcolm H.R., Christine E.C., *Six Decades of Roadside Encroachment Modeling, Transportation Research Record*, (2022).
- [107] Malenkovska Todorova M., Donceva R., Bunevska J., *Role of Functional Classification of Highways in Road Traffic Safety, Transport Problems*, (2009).

- [108] McCullah J., Gray D., Cooperative Highway Program. (2005).
- [109] Mendoza A.E., Wybourn C.A., Mendoza M.A., Cruz M.J., Juillard C.J., Dicker R.A., *The Worldwide Approach to Vision Zero: Implementing Road Safety Strategies to Eliminate Traffic-Related Fatalities, Current Trauma Reports*, (2017).
- [110] Miaou S.-P., *Estimating roadside encroachment rates with the combined strengths of accident- and encroachment-based approaches, FHWA-RD-01-124, Final report*, (2001).
- [111] Miaou S.P., *Estimating vehicle roadside encroachment frequencies by using accident prediction models, Transportation Research Record*, (1997).
- [112] Miaou S.P., Lum H., *Modeling vehicle accidents and highway geometric design relationships, Accident Analysis & Prevention*, (1993).
- [113] Michalski L., *Geometryczne ukształtowanie planu sytuacyjnego drogi jako czynnik wpływający na warunki ruchu pojazdów swobodnych., Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska*, (1986).
- [114] Mikołajków L., *Drogowe bariery ochronne*. (1983).
- [115] Mikołajków L., *Drogowe bariery ochronne, Magazyn „Autostrady”*, strony 14–18, (2006).
- [116] Mikołajków L., *Drogowe bariery ochronne betonowe, Magazyn „Autostrady”*, (2006).
- [117] Mikołajków L., *Drogowe bariery ochronne stalowe, Magazyn „Autostrady”*, strony 16–19, (2006).
- [118] Ministerstwo Transportu i Gospodarki Morskiej, *Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie, Dz.U. 2013 r. poz. 1409, z późn. zm.*, (1999).
- [119] National Cooperative Highway Research Program, *Final Report Roadside Safety Analysis Program (Rsap) Update*, (2012).
- [120] National Cooperative Highway Research Program, *Guidance for the Design and Application of Shoulder and Centerline Rumble Strips*. (2009).
- [121] National Cooperative Highway Research Program, *In-Service Performance Evaluation of Guardrail End Treatments*, Washington, D.C., Session 2018.
- [122] National Cooperative Highway Research Program, *Life-Cycle Cost Analysis for Management of Highway*, (2016).
- [123] National Cooperative Highway Research Program, *NCHRP Report 711, Guidance for the Selection, Use, and Maintenance of Cable Barrier Systems*, (2012).
- [124] National Cooperative Highway Research Program, *Recommended Procedures for the Safety Performance Evaluation of Highway Features - Report 350, Transportation Research*, (1993).
- [125] National Cooperative Highway Research Program, *Roadside Safety Analysis Program (RSAP)—Engineer’s Manual*. (2003).
- [126] National Cooperative Highway Research Program, *Structural supports for highway signs, luminaires, and traffic signals*. (2003).
- [127] National Highway Traffic Safety Administration, *Factors Related to Fatal Single-Vehicle Run-Off-Road Crashes*, (2009).
- [128] National Highway Traffic Safety Administration, *Traffic Safety Facts 2017: A Compilation of Motor Vehicle Crash Data, Dot Hs 812 806*, (2019).
- [129] Niedzińska K.J., Olszewski P., *WRD-22-4 Wytyczne projektowania odcinków dróg zamiejskich. Katalog typowych przekrojów poprzecznych*, (2020).
- [130] Olson R.M., Ivey D.L., Post E.R., Gunderson R.H., Cetiner A., *Bridge Rail Design: Factors, Trends, and Guidelines - Report 149, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, D.C.*, (1974).
- [131] Osman Atahan A., *Roadside Safety Practices in Türkiye*, (2015).
- [132] PIARC, *Road Safety Manual*, (2019).
- [133] PN-EN 1317-1, *Część 1: Terminologia i ogólne kryteria metod badań*. (2010).
- [134] PN-EN 1317-2, *Część 2: Klasy działania, kryteria przyjęcia badań zderzeniowych i metody badań barier ochronnych i balustrad*. (2010).
- [135] PN-EN 1317-3, *Część 3: Klasy działania, kryteria przyjęcia badań zderzeniowych i metody badań poduszek energochłonnych*. (2010).
- [136] PN-EN 1317-5, *Część 5: Wymagania w odniesieniu do wyrobów i ocena zgodności dotycząca systemów powstrzymujących pojazd*, (2012).
- [137] Podhorecki A., Sobczak-pi J., Podhorecka A., Dobiszewska M., *Przegląd materiałów i konstrukcji drogowych oraz mostowych barier ochronnych, Magazyn „Autostrady”*, strony 50–54, (2011).
- [138] Podhorecki A., Sobczak-Piąstka J., Podhorecka A., Dobiszewska M., *Drogowe i mostowe bariery ochronne - Wprowadzenie do problematyki, Magazyn „Autostrady”*, strony 30–33, (2011).
- [139] Politechnika Gdańska Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, *Wytyczne poszerzania jezdni o dodatkowe pasy ruchu w zależności od przewidywanego natężenia ruchu drogowego*. Warszawa, (2017).
- [140] Polskiej R., Kosmicznej A., Konsultacyjnego K., *Dz. U. 2021 poz. 450*, (2021).
- [141] Powers R.D., Hall J.W., Hall L.E., Turner D.S., Board T.R., *The „Forgiving Roadside” Design of Roadside Elements, Transportation Research Circular*. strony 13:1–7, (1998).
- [142] prEN 1317-7, *Część 7: Klasy działania, kryteria przyjęcia badań zderzeniowych i metody badań terminali zderzeniowych*. (2012).
- [143] Preston H., *Roadway Functional Classification*, (2014).
- [144] Prochowski L., *Funkcja ochronna bariery drogowej a pochłanianie energii uderzenia samochodu*,

- Wojskowa Akademia Techniczna, (2010).
- [145] Proctor S., Belcher M., *Development of roadside crash cushions in the U.K*, *Traffic Engineering and Control*, (1990).
- [146] Projekt LifeRoSE, *Wpływ czasu i warunków eksploatacyjnych na trwałość i funkcjonalność elementów bezpieczeństwa ruchu drogowego*, Projekt zrealizowany w ramach wspólnego przedsięwzięcia NCBiR oraz GDDKiA pt. „Rozwój Innowacji Drogowych”. (2019).
- [147] Projekt LifeRoSE, *Wytyczne zarządzania drogowymi środkami bezpieczeństwa ruchu drogowego w zakresie trwałości i funkcjonalności*, *Załączniki - Metody*, (2019).
- [148] Projekt LifeRoSE, *Wytyczne zarządzania drogowymi środkami bezpieczeństwa ruchu drogowego w zakresie trwałości i funkcjonalności - część 1*, (2019).
- [149] Projekt RoSE, *Urządzenia bezpieczeństwa ruchu drogowego*, Projekt zrealizowany w ramach wspólnego przedsięwzięcia NCBiR oraz GDDKiA pt. „Rozwój Innowacji Drogowych”, (2019).
- [150] Ray M.H., Silvestri C., Conron C.E., Mongiardini M., *Experience with cable median barriers in the United States: Design standards, policies, and performance*, *Journal of Transportation Engineering*, (2009).
- [151] Ray M.H., Carrigan C.E., *Six Decades of Roadside Encroachment Modeling*, *Transportation Research Record*, (2023).
- [152] Ray M.H., Carrigan C.E., Ray E.M., *Development of Safety Performance-Based Guidelines for the Roadside Design Guide*, *NCHRP Research Report 972*. (2022).
- [153] Road Barrier Upgrade of Standards (ROBUST), *Robust Project Analysis of test data from European laboratories*, (2005).
- [154] Road Barrier Upgrade of Standards (ROBUST), *WP5 - Computational Mechanics B5 - Temporary Vertical Concrete Safety Barrier, Main Report*, (2005).
- [155] Roadside Infrastructure for Safer European Roads (RISER), *D06 European Best Practice for Roadside Design: Guidelines for Roadside Infrastructure on New and Existing Roads*, (2006).
- [156] Roadside Infrastructure for Safer European Roads (RISER), *D08 European Best Practice for Roadside Design: Guidelines for Maintenance and Operations of Roadside Infrastructure.*, (2006).
- [157] Roadside Infrastructure for Safer European Roads (RISER), *European Best Practice for Roadside Design: Guidelines for Roadside Infrastructure on New and Existing Roads*, *US Patent 2,997,323*, (2005).
- [158] Roadside Infrastructure for Safer European Roads (RISER), *Final Publishable Report*. strona 60, (2006).
- [159] Romanowska A., *Makroskopowe modele ruchu potoku pojazdów na odcinkach międzywęzłowych autostrad i dróg ekspresowych*, (2019).
- [160] Roque C., Cardoso J.L., *SAFESIDE: A computer-aided procedure for integrating benefits and costs in roadside safety intervention decision making*, *Safety Science*, (2015).
- [161] Roque C., Moura F., Lourenço Cardoso J., *Detecting unforgiving roadside contributors through the severity analysis of ran-off-road crashes*, *Accident Analysis and Prevention*, (2015).
- [162] Rutkowski T., *Materiały dydaktyczne, Politechniki Gdańskiej - Podstawowe sposoby opisu niepewności w systemach sterowania*, (2013).
- [163] Ryś D., *Obciążenie dróg przez pojazdy ciężkie i ich wpływ na trwałość zmęczeniową konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych*, (2015).
- [164] Safarpour H., Khorasani-Zavareh D., Soori H., Bagheri-Lankarani K., Ghomian Z., Mohammadi R., *Vision Zero: Evolution History and Developing Trend in Road Safety: A Scoping Review*, *Trauma Monthly*, (2020).
- [165] Saleh P., Philippe N., La Torre F., Helfert M., *A Guidance Document for the Implementation of the CEDR Forgiving Roadsides report*, *National Roads Authority*, (2013).
- [166] Schrum K.D., De Albuquerque F.D.B., Sicking D.L., Faller R.K., Reid J.D., *Benefits of Slope Flattening*, *Journal of Transportation Safety and Security*, (2014).
- [167] Sicking D.L., Ross H.E., *Benefit-Cost Analysis of Roadside Safety Alternatives.*, *Transportation Research Record*, (1986).
- [168] Środowiska P.G.W.I.L. i, *Wytyczne poszerzania jezdni o dodatkowe pasy ruchu w zależności od przewidywanego natężenia ruchu drogowego. Część I – Raport z analiz*. (2016).
- [169] Stamatiadis N., Pigman J.G., Lord D., Sacksteder J., Ruff W., *Impact of Shoulder Width and Median Width on Safety*. (2009).
- [170] Stolle C.S., Sicking D.L., Faller R.K., Reid J.D., *Cable median barrier failure analysis and remediation Phase II*, *Nebraska Department of Transportation Research*, (2013).
- [171] Strache, Wolf P., *An automobile on the sweeping curves of the Autobahn with view of the countryside*. (1936).
- [172] Strycharz B., Edel R., Kliszczewicz B., Olma A., Szeja K., *Zalecenia projektowania, budowy i utrzymania odwodnienia dróg oraz przystanków autobusowych*. Warszawa, strona 185, (2009).
- [173] Terenowski H., *Szacowanie niepewności pomiarów*. strony 77–84, (2010).
- [174] The State of Queensland (Transport and Main Roads), *Safer roads, safer Queensland - Queensland's Road Strategy 2015-21*, (2015).
- [175] Theeuwes J., *Self-explaining roads: What does visual cognition tell us about designing safer roads?*, *Cognitive Research: Principles and Implications*, (2021).
- [176] Theeuwes J., Godthelp H., *Self-explaining roads*, *Safety Science*, (1995).
- [177] Tingvall C., Haworth N., *Vision ZERO: Aa ethical approach to safety and mobility, undefined*, (1999).
- [178] Tingvall C., *The Swedish „Vision Zero” and how parliamentary approval was obtained*, w *Road Safety Research, Policing, Education Conference*, 16-17 November 1998, (1998).

- [179] La Torre F., *Forgiving Roadside Design Guide Deliverable Nr 3*. (2011).
- [180] La Torre F., *Forgiving Roadsides Design Guide*. strona 117p, (2012).
- [181] La Torre F., Domenichini L., Branzi V., Meocci M., Paliotto A., Tanzi N., *Transferability of the highway safety manual freeway model to EU countries, Accident Analysis & Prevention*, (2022).
- [182] La Torre F., Erginbas C., Thomson R., Amato G., Pengal B., Stefan C., Hemmings G., *Selection of the Most Appropriate Roadside Vehicle Restraint System - The SAVeRS Project, Transportation Research Procedia*, (2016).
- [183] La Torre F., Erginbas C., Williams G.L., Thomson R., Hemmings G., Stefan C., *SAVeRS Guideline for the selection of the most appropriate Roadside Vehicle Restraint System CEDR Call2012: Safety: Use of Vehicle Restraint Systems*. (2015).
- [184] Vaziri M., *A comparative appraisal of roadway accident for Asia-Pacific countries, International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, (2010).
- [185] *Vicroads, Guidelines for the protection of gantry and cantilever sign supports*. strony 1–19, (2019).
- [186] Viner J.G., *Rollovers on sideslopes and ditches, Accident Analysis and Prevention*, (1995).
- [187] Wegman F., Elsenaar P., *Sustainable solutions to improve road safety in Netherlands, SWOV*. strony 1–16, (1997).
- [188] Wegman F., Aarts L., Bax C., *Advancing sustainable safety, Safety Science*. strony 323–343, (2008).
- [189] Wielowiejski J., *Na drogach i szlakach Rzymian*. strona 317, (1984).
- [190] Wiktorowska-Jasik A., *Rozwój transportu drogowego w ujęciu historycznym – najważniejsze osiągnięcia światowej motoryzacji*, (2005).
- [191] Wilde K., Bruski D., Burzyński S., Chróścielewski J., Pachocki Ł., *LS-DYNA simulations of the impacts of a 38-ton Heavy Goods Vehicle into a road cable barrier, 12th European LS-DYNA Conference*, (2019).
- [192] Wilde K., Jamroz K., Bruski D., Burzyński S., Chróścielewski J., Witkowski W., *Badania Numeryczne Zderzenia Autobusu W Układzie Bariera I Kratownicowa Konstrukcja Wsporcza, Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*, (2016).
- [193] William K., *The American Highway: The History and Culture of Roads in the United States, McFarland, Incorporated, Publishers*. strona 237, (2012).
- [194] *Wojskowa Akademia Techniczna, Opis i rekonstrukcja wypadków drogowych*. Warszawa, (2006).
- [195] Yannis G., Dragomanovits A., Laiou A., Torre F. La, Domenichini L., Richter T., Ruhl S., Graham D., Karathodorou N., *Development of an online Repository of Accident Prediction Models and Crash Modification Factors, 1 st European Road Infrastructure Congress*, (2016).
- [196] Yannis G., Richter T., La Torre F., Graham D., *PRACT Predicting Road ACcidents - a Transferable methodology across Europe, Project outline*. (2013).
- [197] Zegeer C. V., Council F.M., *Safety relationships associated with cross-sectional roadway elements, Transportation Research Record*, (1995).
- [198] Żółtowski B., Cempla C., *Inżynieria diagnostyki maszyn*. Warszawa, Bydgoszcz, Radom, (2004).
- [199] *Ustawa z dnia 20 czerwca 1997 r. Prawo o ruchu drogowym*. Polska, (2021).

Spis rysunków

Rys. 1.1	Konsekwencje wypadnięcia pojazdów z jezdni na drogach jednojezdniowych	2
Rys. 2.1	Autostrada w Niemczech, lata 30-te XX wieku	5
Rys. 2.2	Przykłady wybranych przekrojów poprzecznych dróg: a) droga jednojezdniowa przekrój 1x2, b) droga dwujezdniowa przekrój 2x2.....	6
Rys. 2.3	Klasyfikacja podstawowa dróg w zależności od kryterium mobilności oraz dostępności dróg w Polsce i na świecie.....	8
Rys. 2.4	Kolejność powstawania i okres rozwijania podstawowych grup teorii bezpieczeństwa ruchu drogowego	9
Rys. 2.5	Przykład zastosowania strefy wolnej od przeszkód	13
Rys. 2.6	Klasyfikacja systemów zabezpieczających użytkowników drogi.....	15
Rys. 2.7	Przykładowe scenariusze rozwiązań projektowych podlegających ocenie brd.....	17
Rys. 2.8	Ryzyko śmiertelnych obrażeń ciała w zderzeniach pojazdów z wybranymi obiektami przy drogach.....	19
Rys. 2.9	Klasyfikacja drogowych barier ochronnych.....	19
Rys. 2.10	Bariera z prowadnicą stalową.....	21
Rys. 2.11	Bariera z prowadnicą linową.....	21
Rys. 2.12	Bariera z prowadnicą betonową	22
Rys. 2.13	Schemat toru jazdy i faz pojazdu uderzającego w barierę drogową	22
Rys. 2.14	Schemat i opis odkształceń powstałych w wyniku uderzenia pojazdu w barierę ochronną	23
Rys. 2.15	Model rozkładu energii kinetycznej pojazdu podczas uderzenia w barierę drogową	24
Rys. 2.16	Schemat ilustrujący względny zakres funkcjonowania różnych systemów barier ochronnych	27
Rys. 2.17	Wartości graniczne energii kinetycznej dla różnych poziomów powstrzymywania barier ochronnych wymagane w testach zderzeniowych	30
Rys. 2.18	Układ bariery w przekroju poprzecznym drogi.....	31
Rys. 2.19	Czynniki wpływające na funkcjonowanie drogowych barier ochronnych	31
Rys. 2.20	Przykład klasyfikacji uszkodzeń.....	33
Rys. 2.21	Udział procentowy uszkodzeń ocenianych przez jednostki utrzymaniowe jako najwyższy priorytet - niezwłocznie naprawić.....	37
Rys. 2.22	Przykład wykorzystania wahadła do testów zderzeniowych z barierami ochronnymi.....	38
Rys. 2.23	Przykład ilustrujący proces przewidywanych efektów wypadnięcia pojazdu dla pojedynczego zdarzenia niebezpiecznego.....	42
Rys. 2.24	Schemat możliwości przebiegu i prawdopodobieństwa zdarzeń niebezpiecznych z barierami ochronnymi	43
Rys. 2.25	Zależność prawdopodobieństwa najechań pojazdu na obiekt w zależności od jego odległości do krawędzi jezdni	45
Rys. 2.26	Częstotliwość wypadnięć pojazdów w zależności od natężenia ruchu pojazdów	46
Rys. 3.1	Program realizacji prac badawczych	51
Rys. 4.1	Schemat struktury prowadzonych badań funkcjonowania drogowych barier ochronnych	54
Rys. 4.2	a) ocena ryzyka indywidualnego najechania na barierę ochronną i słup b) poligon badawczy	55
Rys. 4.3	Baza danych o badanych odcinkach dróg krajowych	56
Rys. 4.4	Poligon badawczy – klasy dróg i przekroje.....	57
Rys. 4.5	Przykład analizy kąta uderzenia pojazdu w barierę ochronną z wykorzystaniem programu Perspective Rectifire	58
Rys. 4.6	Kilometraż dróg krajowych – oprogramowanie do odtwarzania nagrań i przebiegu trasy GPS.....	63
Rys. 4.7	Dokumentacja fotograficzna poligonowych testów zderzeniowych prowadzonych w ramach projektów RoSE i LifeRoSE	66
Rys. 4.8	Infrastruktura badawcza wykorzystana do prowadzenia badań eksperymentalnych zderzeń pojazd/bariera w skali rzeczywistej – Instytut Badawczy Dróg i Mostów	67
Rys. 5.1	Parametry ruchu pojazdów a) średni dobowy ruch pojazdów SDR, b) udział pojazdów ciężarowych UC, na badanych odcinkach referencyjnych dróg.....	71
Rys. 5.2	Dystrybuanty rozkładów masy pojazdów MP (wszystkie drogi).....	72
Rys. 5.3	Histogram średnich prędkości dopuszczalnych VDOP na odcinkach bazowych.....	73
Rys. 5.4	Dystrybuanty empiryczne rozkładów prędkości pojazdów VP	73
Rys. 5.5	Schemat poglądowy – kąt uderzenia w barierę ochronną KU	74
Rys. 5.6	Analiza a) wpływu kątów uderzeń na długość uszkodzeń, b) rozkładu kątów uderzeń pojazdu w barierę ochronną.....	74
Rys. 5.7	Długość barier ochronnych mierzone na odcinku drogi LB.....	77
Rys. 5.8	Najczęściej występujące grupy zdarzeń wywołane najechaniem pojazdu na barierę ochronną.....	82



Rys. 5.9 Grupy zdarzeń K.1-K.3 wywołane najechaniem pojazdu na barierę ochronną.....	83
Rys. 5.10 Grupy zdarzeń K.4-K.6 wywołane najechaniem pojazdu na barierę ochronną.....	84
Rys. 5.11 Grupy zdarzeń K.7-K.9 wywołane najechaniem pojazdu na barierę ochronną.....	84
Rys. 5.12 Klasyfikacja kolizji pojazdu z barierą ochronną a) wg udziału poszczególnych grup zdarzeń b) wg średniej długości uszkodzeń poszczególnych grup zdarzeń	85
Rys. 5.13 Skumulowany rozkład a) gęstości zdarzeń z barierami GZDB (zd./km/rok), b) gęstości uszkodzeń barier ochronnych GUO (m/km/rok), na badanych odcinkach dróg dwujezdniowych	87
Rys. 5.14 Skumulowany rozkład długości uszkodzeń w pojedynczym zdarzeniu z barierą w zależności od a) klasy drogi (KLD), b) rodzaju bariery ochronnej (stalowej, linowej, betonowej) (m), na badanych odcinkach dróg dwujezdniowych	88
Rys. 6.1 Wykres zależności energii kinetycznej poprzecznej wybranego rodzaju pojazdu od prędkości oraz kąta uderzenia w barierę ochronną: kąt uderzenia 7° (kolor czerwony) oraz 20° (kolor czarny)	91
Rys. 6.2 Rozkłady wyników badań zależności: a) szerokości pracującej i ugięcia dynamicznego bariery od energii kinetycznej poprzecznej pojazdu, b) szerokości pracującej bariery od ugięcia dynamicznego.....	93
Rys. 6.3 Rozkłady wyników badań zależności: a) szerokości pracującej i ugięcia dynamicznego bariery od sztywności K bariery, b) szerokości pracującej i ugięcia dynamicznego bariery od podatności S bariery.	93
Rys. 6.4 Rozkłady wyników badań zależności: a) długości styku pojazdu z barierą LSP i długości uszkodzenia bariery LU od energii kinetycznej poprzecznej pojazdu EKL, b) długości styku pojazdu z barierą LSP od energii kinetycznej poprzecznej EKL.....	94
Rys. 6.5 Rozkłady wyników badań zależności: a) długości styku pojazdu z barierą LSP i długości uszkodzenia bariery LU od szerokości pracującej DM b) długości uszkodzenia bariery LU od długości styku pojazdu z barierą LSP od sztywności bariery K	94
Rys. 6.6 Rozkłady wyników badań symulacyjnych zależności szerokości pracującej WMs od: a) sztywności bariery K, b) prędkości poprzecznej pojazdu uderzającego w barierę drogową VPL.	95
Rys. 6.7 Rozkłady wyników badań symulacyjnych zależności długości styku pojazdu z barierą LSP od: a) sztywności bariery K, b) prędkości poprzecznej pojazdu uderzającego w barierę drogową VPL.	96
Rys. 6.8 Rozkłady wyników badań symulacyjnych zależności długości uszkodzeń bariery LU od: a) sztywności bariery K, b) prędkości poprzecznej pojazdu uderzającego w barierę drogową VPL.	96
Rys. 7.1 Schemat czynników wpływających na prawdopodobieństwo i konsekwencje pojedynczego zdarzenia drogowego spowodowanego uderzeniem pojazdu barierę ochronną.....	98
Rys. 7.2 Przyjęte sekwencje procesu wypadnięcia pojazdu z jezdni i zderzenia z barierą ochronną.....	99
Rys. 7.3 Schemat koncepcji procesu obrazującego sekwencje wypadnięcia pojazdu z jezdni i uderzenia w barierę ochronną.....	100
Rys. 7.4 Rozkłady prawdopodobieństwa wypadnięć pojazdów z drogi na odcinku autostrady A1 (odcinek węzeł Rusocin - węzeł Toruń Południe).....	106
Rys. 7.5 Prawdopodobieństwo wypadnięcia pojazdu z drogi na odcinku autostrady A1 (odcinek węzeł Rusocin - węzeł Toruń Południe) w rozkładzie dwumianowym ujemnym (Pascala).....	107
Rys. 7.6 Wykres teoretycznych zależności modelu matematycznego: a) maksymalnego kąta wypadnięcia pojazdu osobowego na odcinku prostym w zależności od odległości pojazdu od krawędzi jezdni (S) i prędkości pojazdu (V), b) maksymalnego wzrostu kąta wypadnięcia ze względu na promień łuku poziomego drogi R (m).....	110
Rys. 7.7 Prawdopodobieństwo skumulowane: a) odległości wypadnięcia pojazdu w strefie bez barier ochronnych, (b) uderzenia w barierę w zależności od jej odległości od krawędzi jezdni – na podstawie odcinka autostrady A1 (odcinek węzeł Rusocin - węzeł Toruń Południe)	113
Rys. 7.8 Prawdopodobieństwo odległości wypadnięcia pojazdu w rozkładzie Weibull'a - na podstawie odcinka autostrady A1 (odcinek węzeł Rusocin - węzeł Toruń Południe).....	113
Rys. 7.9 Wykres udziału liczby wypadnięć pojazdów z jezdni na odcinkach z barierami o różnych długościach i odległości od krawędzi jezdni - na podstawie odcinka autostrady A1 (odcinek węzeł Rusocin - węzeł Toruń Południe)	114
Rys. 7.10 Model prawdopodobieństwa uderzenia pojazdu w barierę ochronną w przypadku wypadnięcia z jezdni - na podstawie odcinka autostrady A1 (odcinek węzeł Rusocin - węzeł Toruń Południe).....	115
Rys. 7.11 Wykresy zależności ugięcia dynamicznego DM (m) wybranej bariery: a) betonowej (modelu DM _{B1}), stalowej (modelu DM _{S1}), c) linowej (modelu DM _{L1}) od: masy MP (kg) i kąta uderzenia pojazdu KU (st.), energii poprzecznej EKL (kJ) oraz prędkości poprzecznej pojazdu uderzającego w barierę VPL (m/s).....	120
Rys. 7.12 Wykresy zależności szerokości pracującej WM (m) bariery: a) betonowej (modelu WM _{B1}) b) stalowej (modelu WM _{S1}) i c) linowej (modelu WM _{L1}) od: sztywności bariery K (kJ/m ²) oraz energii kinetycznej poprzecznej pojazdu EKL (kJ)	120

Rys. 7.13 Rozkłady wyników badań symulacyjnych zależności długości styku pojazdu z barierą LSP (m) dla wybranych barier: a) betonowych, b) stalowych, c) linowych (modelu WM_{L1}), od: ugięcia dynamicznego DM (m), prędkości poprzecznej pojazdu uderzającego w barierę VPL (m/s), energii kinetycznej pojazdu EKL i EKP (kJ)	122
Rys. 7.14 Rozkłady wyników badań symulacyjnych zależności uszkodzeń bariery LU (m) i długości deformacji LD (m) dla bariery: a) betonowej, b) stalowej, c) linowej od: ugięcia dynamicznego DM (m) oraz energii kinetycznej poprzecznej EKLi EKP (kJ)	122
Rys. 8.1 Dostępne modele częstości wypadnięć pojazdów na drogach dwujezdniowych: (a) gęstości wypadnięć pojazdów, (b) koncentracji wypadnięć pojazdów, na tle danych rzeczywistych z badań terenowych własnych	124
Rys. 8.2 Schemat czynników wpływających na poziom prawdopodobieństwa i konsekwencje zdarzeń niebezpiecznych z udziałem drogowej bariery ochronnej na odcinku drogi	125
Rys. 8.3 Dopasowanie rozkładu gęstości prawdopodobieństwa dla zmiennej zależnej a) LZDB b) LUO na podstawie danych empirycznych (ogólnych) dla dróg dwujezdniowych	131
Rys. 8.4 Dopasowanie rozkładu gęstości prawdopodobieństwa dla zmiennej zależnej a) GZDB b) GUO na podstawie danych empirycznych (ogólnych) dla dróg dwujezdniowych	131
Rys. 8.5 Ilustracja siły współzależności pomiędzy zmiennymi niezależnymi dla (a) zbioru danych ogólnych (b) zbioru danych szczegółowych	134
Rys. 8.6 Ilustracja siły zależności pomiędzy zmiennymi niezależnymi i zależnymi dla (a) zbioru danych ogólnych, (b) zbioru danych szczegółowych odcinków dróg dwujezdniowych	136
Rys. 8.7 Wizualna ocena jakości modeli liczby zdarzeń z barierami pod względem liczby parametrów w ocenie a) skorygowanego współczynnika determinacji b) pierwiastka błędu średniokwadratowego	146
Rys. 8.8 Wykresy reszt skumulowanych dla modeli liczby zdarzeń z barierami ochronnymi ze zbioru danych a) ogólnych b) szczegółowych	148
Rys. 8.9 Wykresy reszt skumulowanych dla modeli gęstości zdarzeń z barierami ochronnymi ze zbioru danych a) ogólnych b) szczegółowych	151
Rys. 8.10 Wykresy reszt skumulowanych dla modeli koncentracji zdarzeń z barierami ochronnymi ze zbioru danych a) ogólnych b) szczegółowych	154
Rys. 8.11 Wykresy reszt skumulowanych dla modeli długości uszkodzeń barier ochronnych ze zbioru danych a) ogólnych b) szczegółowych	157
Rys. 8.12 Wykresy reszt skumulowanych dla modeli gęstości uszkodzeń barier ochronnych ze zbioru danych a) ogólnych b) szczegółowych	160
Rys. 8.13 Proponowane wybrane modele szczegółowe autora na tle dostępnych modeli dotyczącymi szacowania a) gęstości wypadnięć pojazdów, b) koncentracji wypadnięć pojazdów, na odcinkach dróg dwujezdniowych	162
Rys. 9.1 Wpływ zmiennych niezależnych na liczbę zdarzeń z barierami ochronnymi w wybranych modelach bazujących na a) danych ogólnych (DO-2J-A2(1)), b) danych szczegółowych (DS-2J-A2(1))	164
Rys. 9.2 Wpływ na liczbę zdarzeń z barierami: a) natężenia ruchu (SDR) i długości odcinka (DL) b) długości odcinka (DL), względem modelu wskaźnika wykrywalności (WZA) modelu DO-2J-A2(1)	165
Rys. 9.3 Wpływ na liczbę zdarzeń z barierami: a) natężenia ruchu (SDR) i gęstości łuków poziomych (GLPO) b) gęstości łuków poziomych (GLPO), względem wskaźnika wykrywalności (WZA) modelu DO-2J-A2(1)	166
Rys. 9.4 Wpływ na liczbę zdarzeń z barierami: a) natężenia ruchu (SDR) i udziału poszczególnych typów barier (UBL, UBS, UBB) względem współczynnika (WZA), b) udziału poszczególnych typów barier (UBL, UBS, UBB), modelu DS-2J-A2(1)	166
Rys. 9.5 Wizualizacja wpływu natężenia ruchu (SDR) oraz a) długości odcinka (DL), b) gęstości łuków poziomych (GLPO), na liczbę zdarzeń z barierami ochronnymi modelu DO-2J-A2(1)	168
Rys. 9.6 Wpływ zmiennych niezależnych na gęstość zdarzeń z barierami ochronnymi w wybranych modelach bazujących na a) danych ogólnych (DO-2J-C2(1)), b) danych szczegółowych (DS-2J-C1(1))	168
Rys. 9.7 Wpływ na gęstość zdarzeń z barierami: a) natężenia ruchu (SDR) i gęstości łuków poziomych (GLPO) b) gęstości łuków poziomych (GLPO), względem współczynnika wykrywalności zdarzeń (WZA) modelu DO-2J-C2(1)	170
Rys. 9.8 Wpływ na gęstość zdarzeń z barierami: a) udziału barier linowych (UBL), b) udziału barier stalowych, względem współczynnika wykrywalności zdarzeń (WZA) modelu DS-2J-C1(1)	170
Rys. 9.9 Wpływ na gęstość zdarzeń z barierami: a) natężenia ruchu (SDR) i odległości barier od krawędzi jezdni (SB) b) odległości barier od krawędzi jezdni (SB), względem wskaźnika wykrywalności zdarzeń (WZA) modelu DS-2J-C1(1)	171
Rys. 9.10 Wpływ na gęstość zdarzeń z barierami: a) natężenia ruchu (SDR) i udziału pojazdów ciężarowych z przyczepą (UCP), b) udziału pojazdów ciężarowych z przyczepą (UCP), względem wskaźnika wykrywalności zdarzeń (WZA) modelu DO-2J-C2(1)	172
Rys. 9.11 Wizualizacja wpływu natężenia ruchu (SDR) oraz a) gęstości łuków poziomych (GLPO), b) udziału pojazdów ciężarowych z przyczepą (UCP), na gęstość zdarzeń z barierami ochronnymi modelu DO-2J-C2(1)	172



Rys. 9.12 Wpływ zmiennych niezależnych na koncentrację zdarzeń z barierami ochronnymi w wybranych modelach bazujących na a) danych ogólnych (DO-2J-D3(1)), b) danych szczegółowych (DS-2J-D3(1))	173
Rys. 9.13 Wpływ na koncentrację zdarzeń z barierami: a) natężenia ruchu (SDR) i gęstości łuków poziomych (GLPO) b) gęstości łuków poziomych (GLPO), względem współczynnika wykrywalności zdarzeń (WZA) modelu DS-2J-D3(1)	174
Rys. 9.14 Wpływ na koncentrację zdarzeń z barierami natężenia ruchu (SDR) gęstości łuków poziomych a) GLPO = 1 b) GLPO = 2, dla odcinków o spadkach podłużnych $\geq 5\%$ (FA=1) względem współczynnika (WZA) modelu DO-2J-D3(1).....	175
Rys. 9.15 Wpływ na koncentrację zdarzeń z barierami: a) natężenia ruchu (SDR) i odległości barier od krawędzi jezdni (SB) b) odległości barier od krawędzi jezdni (SB), względem wskaźnika wykrywalności zdarzeń (WZA) modelu DS-2J-D3(1).....	175
Rys. 9.16 Wizualizacja wpływu natężenia ruchu (SDR) oraz a) udziału krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami stalowymi (UBS), b) odległości barier od krawędzi jezdni (SB) na koncentrację zdarzeń z barierami ochronnymi modelu DO-2J-D3(1)	176
Rys. 9.17 Wpływ zmiennych niezależnych na długość uszkodzeń barier ochronnych w wybranych modelach bazujących na a) danych ogólnych (DO-2J-E2(1)), b) danych szczegółowych (DS-2J-E1(5))	177
Rys. 9.18 Wpływ na długość uszkodzeń: a) liczby zdarzeń z barierami (LZDB), b) liczby zdarzeń z barierami (LZDB) i udziału pojazdów ciężarowych z przyczepą (UCP), względem współczynnika wykrywalności zdarzeń (WZA) modelu DO-2J-E2(1)	178
Rys. 9.19 Wpływ na długość uszkodzeń: a) liczby zdarzeń z barierami (LZDB) i natężenia ruchu (SDR) względem współczynnika (WZA), b) średniego dobowego ruchu (SDR) względem liczby zdarzeń (LZDB), modelu DO-2J-E5(1)	179
Rys. 9.20 Wpływ na długość uszkodzeń: a) liczby zdarzeń (LZDB) i odległości barier od krawędzi jezdni (SB) względem współczynnika (WZA), b) odległości bariery od krawędzi jezdni (SB) względem liczby zdarzeń (LZDB), modelu DO-2J-E5(1)	180
Rys. 9.21 Wpływ na długość uszkodzeń: a) liczby zdarzeń z barierami (LZDB) i wskaźnika krętości odcinka (WKO) względem współczynnika (WZA), b) wskaźnika krętości odcinka (WKO) względem liczby zdarzeń z barierami (LZDB), modelu DO-2J-E5(1).....	180
Rys. 9.22 Wizualizacja wpływu natężenia ruchu (SDR) oraz a) gęstości łuków poziomych (GLPO), b) długości odcina (DL) na długość uszkodzeń barier ochronnych modelu DS-2J-E1(5).....	181
Rys. 9.23 Wpływ zmiennych niezależnych na gęstość uszkodzeń barier ochronnych w wybranych modelach bazujących na a) danych ogólnych (DO-2J-F3(1)), b) danych szczegółowych (DS-2J-F1(5)).....	182
Rys. 9.24 Wpływ na gęstość uszkodzeń: a) gęstości zdarzeń (GZDB) i udziału ciężarowych z przyczepą (UCP) względem współczynnika (WZA), b) udziału ciężarowych z przyczepą (UCP) względem gęstości zdarzeń (GZDB), modelu DO-2J-F3(1).....	183
Rys. 9.25 Wpływ na gęstość uszkodzeń: a) gęstości zdarzeń z barierami (GZDB) i natężenia ruchu (SDR) względem współczynnika (WZA), b) natężenia ruchu (SDR) względem gęstości zdarzeń z barierami (GZDB) modelu DO-2J-F3(1).....	184
Rys. 9.26 Wpływ na gęstość uszkodzeń: a) gęstości zdarzeń (GZDB) i śr. prędkości dopuszczalnej (VDOP) względem współczynnika (WZA), b) śr. prędkości dopuszczalnej (VDOP) względem gęstości zdarzeń (GZDB), modelu DO-2J-F1(5).....	184
Rys. 9.27 Wpływ na gęstość uszkodzeń: a) gęstości zdarzeń (GZDB) i udziału poszczególnych typów barier (UBL, UBS, UBB) względem współczynnika (WZA), b) udziału poszczególnych typów barier (UBS, UBL, UBB) modelu DO-2J-F1(5).....	185
Rys. 9.28 Wizualizacja wpływu natężenia ruchu (SDR) oraz a) gęstości łuków poziomych (GLPO), b) średniej prędkości dopuszczalnej (VDOP) na gęstość uszkodzeń barier ochronnych modelu DS-2J-F1(5).....	186

Spis tablic

Tab. 2.1 Parametry pojazdów testowych stanowiących kryteria testów zderzeniowych	28
Tab. 2.2 Przykład klasyfikacji funkcjonalności barier ochronnych wg uszkodzeń	36
Tab. 2.3 Kryteria napraw uszkodzonych elementów barier ochronnych	37
Tab. 2.4 Przegląd najważniejszych zbiorów danych badań wykorzystanych do modelowania częstości wypadnięć pojazdów	41
Tab. 4.1 Odcinki dróg przyjęte do analiz.	57
Tab. 4.2 Dane wchodzące w skład bazy zdarzeń o badanych odcinkach dróg	57
Tab. 4.3 Zestawienie liczby uzyskanych danych o kątach uderzeń pojazdów w bariery ochronne według rodzajów pojazdu	59
Tab. 4.4 Przykładowe zmienne wchodzące w skład bazy danych o uszkodzeniach DBO	59
Tab. 4.5 Zmienne wchodzące w skład bazy wypadków (baza SEWiK)	60
Tab. 4.6 Zestawienie zmiennych z bazy danych o natężeniu ruchu pojazdów	61
Tab. 4.7 Fragment bazy danych inwentaryzacji odcinków	63
Tab. 4.8 Inwentaryzacja osłon energochłonnych na odcinkach poligonowych	64
Tab. 4.9 Zestawienie zmiennych z bazy inwentaryzacji odcinków bazowych	65
Tab. 4.10 Program badań zderzeniowych wybranych, metalowych i betonowych urządzeń brd	66
Tab. 5.1 Wskaźniki krętości odcinków bazowych wg klasy drogi	75
Tab. 5.2 Gęstość barier ochronnych według poziomów powstrzymywania	77
Tab. 5.3 Średnia odległość barier od krawędzi jezdni na drogach dwujezdniowych	78
Tab. 5.4 Wartość wskaźnika wykrywalności zdarzeń z barierami ochronnymi względem stosowanego na odcinku drogi modelu utrzymania	78
Tab. 5.5 Lokalizacja uderzeń w urządzenia brd	80
Tab. 5.6 Lokalizacja uderzeń w urządzenia brd na jezdni głównej	80
Tab. 5.7 Zdarzenia z urządzeniami brd zarejestrowane na jezdni głównej	80
Tab. 5.8 Rodzaje uszkodzonych urządzeń	81
Tab. 5.9 Liczba zarejestrowanych zdarzeń z barierami wg klasy drogi	81
Tab. 5.10 Liczba zdarzeń i długość zarejestrowanych uszkodzeń barier ochronnych na według sprawcy zdarzenia na drogach dwujezdniowych	82
Tab. 5.11 Zestawienie klasyfikacji kolizji pojazdu z barierą ochronną dla badanych odcinków dróg	85
Tab. 5.12 Wskaźniki intensywności i wielkości uszkodzeń barier ochronnych na wybranych odcinkach bazowych	87
Tab. 6.1 Zestawienie prędkości granicznej VP_{gr} pojazdów dla energii normatywnej EKL_n	92
Tab. 7.1 Liczba (LEN) i udział zarejestrowanych elementów wymagających napraw (UEN) - na podstawie odcinka autostrady A1 (odcinek węzeł Rusocin - węzeł Toruń Południe)	104
Tab. 7.2 Dobroć dopasowania rozkładów dyskretnych względem liczby wypadnięć pojazdów z jezdni - test chi-kwadrat	107
Tab. 7.3 Zestawienie danych o wyposażeniu krawędzi jezdni w bariery ochronne na odcinku autostrady A1 (odcinek węzeł Rusocin - węzeł Toruń Południe)	111
Tab. 7.4 Liczba wypadnięć (LZDW) i udział wypadnięć pojazdów (UZDW) w strefę z barierą ochronną (SZB) i strefę bez bariery (SBB) – na podstawie odcinka autostrady A1 (odcinek węzeł Rusocin - węzeł Toruń Południe)	112
Tab. 7.5 Liczba wypadnięć (LZDW) i udział wypadnięć pojazdów (UZDW) w wyniku których pojazd uderzył lub nie w barierę ochronną, z podziałem na strefę, w której się znajdował – na podstawie odc. autostrady A1 (odc. w. Rusocin – w. Toruń Południe)	112
Tab. 7.6 Zestawienie danych o wypadnięciach pojazdów i zderzeniu z barierą w zależności od długości odcinków drogi z barierami L_s oraz odległości bariery od krawędzi jezdni SB na odcinku autostrady A1 (odc. węzeł Rusocin - węzeł Toruń Południe)	114
Tab. 7.7 Prawdopodobieństwo zarejestrowania uszkodzenia bariery ochronnej - na przykładzie odcinka autostrady A1 (odcinek węzeł Rusocin - węzeł Toruń Południe)	117
Tab. 7.8 Zestawienie modeli opisujących ugięcie dynamiczne bariery (DM) oszacowane na bazie wyników badań poligonowych i symulacyjnych	119
Tab. 7.9 Zestawienie modeli opisujących szerokość pracującą bariery (WM) oszacowane na bazie wyników badań poligonowych i symulacyjnych	119
Tab. 7.10 Zestawienie modeli opisujących długość styku pojazdu z barierą (LSP) oszacowanych na bazie wyników badań poligonowych i symulacyjnych	121
Tab. 7.11 Zestawienie modeli opisujących długość uszkodzeń bariery ochronnej (LU) oszacowanych na bazie wyników badań poligonowych i symulacyjnych	121

Tab. 8.1 Zestawienie wartości dla podstawowych charakterystyk zmiennych zależnych dla dróg dwujezdniowych	130
Tab. 8.2 Zestawienie wartości dla podstawowych charakterystyk zmiennych niezależnych w zbiorze danych ogólnych	132
Tab. 8.3 Zestawienie wartości dla podstawowych charakterystyk zmiennych niezależnych w zbiorze danych szczegółowych	133
Tab. 8.4 Przyjęte poziomy akceptowalności modeli	143
Tab. 8.5 Zestawienie proponowanych modeli szacowania liczby zdarzeń z drogowymi barierami ochronnymi .	144
Tab. 8.6 Zestawienie proponowanych modeli szacowania długości uszkodzeń drogowych barier ochronnych .	144
Tab. 8.7 Zestawienie wartości współczynników równania modeli liczby zdarzeń z barierami ochronnymi z grupy A i B (DO-2J).....	147
Tab. 8.8 Zestawienie wartości współczynników równania modeli liczby zdarzeń z barierami ochronnymi z grupy A i B (DS-2J).....	147
Tab. 8.9 Zestawienie wartości współczynników równania modeli gęstości zdarzeń z barierami ochronnymi z grupy C (DO-2J).....	150
Tab. 8.10 Zestawienie wartości współczynników równania modeli gęstości zdarzeń z barierami ochronnymi z grupy C (DS-2J).....	150
Tab. 8.11 Zestawienie wartości współczynników równania modeli koncentracji zdarzeń z barierami ochronnymi z grupy D (DO-2J).....	153
Tab. 8.12 Zestawienie wartości współczynników równania modeli koncentracji zdarzeń z barierami ochronnymi z grupy D (DS-2J).....	153
Tab. 8.13 Zestawienie wartości współczynników równania modeli długości uszkodzeń barier ochronnych z grupy E (DO-2J).....	156
Tab. 8.14 Zestawienie wartości współczynników równania modeli długości uszkodzeń barier ochronnych z grupy E (DS-2J).....	156
Tab. 8.15 Zestawienie wartości współczynników równania modeli koncentracji zdarzeń z barierami ochronnymi z grupy F (DO-2J).....	159
Tab. 8.16 Zestawienie wartości współczynników równania modeli gęstości uszkodzeń barier ochronnych z grupy F (DS-2J).....	159
Tab. 9.1 Zestawienie wpływu zmiennych niezależnych na zmianę liczby zdarzeń z barierami w przypadku wzrostu wartości zmiennej niezależnej z wybranego modelu o 1%.....	164
Tab. 9.2 Zestawienie wpływu zmiennych niezależnych na zmianę gęstości zdarzeń z barierami w przypadku wzrostu wartości zmiennej niezależnej z wybranego modelu o 1%.....	169
Tab. 9.3 Zestawienie wpływu zmiennych niezależnych na zmianę gęstości zdarzeń z barierami w przypadku wzrostu wartości zmiennej niezależnej z wybranego modelu o 1%.....	173
Tab. 9.4 Zestawienie wpływu zmiennych niezależnych na zmianę długości uszkodzeń barier ochronnych w przypadku wzrostu wartości zmiennej niezależnej z wybranego modelu o 1%.....	177
Tab. 9.5 Zestawienie wpływu zmiennych niezależnych na zmianę długości uszkodzeń barier ochronnych w przypadku wzrostu wartości zmiennej niezależnej z wybranego modelu o 1%.....	182
Tab. 10.1 Wartość wskaźnika wykrywalności zdarzeń z barierami ochronnymi względem stosowanego na odcinku drogi modelu utrzymania	190