

**Marcin Budzyński, Kazimierz Jamroz, Wojciech Kustra**

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej

## **SZACOWANIE MIAR BEZPIECZEŃSTWA RUCHU DROGOWEGO DLA OCENY EFEKTYWNOŚCI INWESTYCJI DROGOWYCH**

Rękopis dostarczono: kwiecień 2016

**Streszczenie:** Koszty wypadków drogowych to jeden z elementów składowych kosztów, które stanowią podstawę do analiz efektywności ekonomicznej inwestycji drogowych. Obok kosztów eksploatacji pojazdów, czasu podróży i czasu pracy oraz kosztów emisji spalin i hałasu, koszty wypadków drogowych decydują o tym czy dana inwestycja będzie opłacalna z punktu widzenia efektywności ekonomicznej. Prawidłowe wyliczenie kosztów wypadków dla planowanych inwestycji zależy przede wszystkim od tego jak wyznaczone będą prognozowane wskaźniki wypadków. Wskaźniki te będą zależały od szeregu czynników takich jak klasa drogi, natężenie, parametry geometrii drogi lub ulicy, otoczenia itp. Do analizy i oceny bezpieczeństwa ruchu drogowego (brd) w niniejszej metodzie przyjęto dwie grupy miar, są to: miary wielkości strat społecznych jako miary główne, stosowane do oceny wpływu planowanej drogi na brd oraz miary ryzyka społecznego jako miary pomocnicze, stosowane do oceny ryzyka na istniejącej i planowanej drodze. Na podstawie bazy danych o zdarzeniach drogowych z lat 2008 – 2010 na drogach krajowych, bazy danych o elementach drogowych (BDD – bank danych drogowych), danych o stanie nawierzchni i poboczy z systemów SOSN i SOPO, danych o natężeniu ruchu drogowego z Pomiaru Generalnego z 2010 r., danych uzyskanych z systemu wizualizacji pasa drogowego oraz danych własnych uzyskanych głównie z przeglądów dróg, zbudowano modele wpływu wybranych czynników na miary brd. Do modelowania wskaźników dla inwestycji liniowych przyjęto miary ryzyka społecznego (gęstość wypadków GW, gęstość ofiar rannych GR, gęstość ofiar ciężko rannych GCR, gęstość ofiar śmiertelnych GZ i gęstość ofiar ciężko rannych i śmiertelnych GCRZ), natomiast dla inwestycji punktowych straty społeczne (liczba wypadków LW, liczba ofiar rannych LR, liczba ofiar ciężko rannych LCR, liczba ofiar śmiertelnych LZ, liczba ofiar ciężko rannych i śmiertelnych LCRZ). Opracowana metoda będzie narzędziem umożliwiającym ocenę bezpieczeństwa ruchu drogowego dla różnych typów inwestycji, na różnych etapach procesu projektowego dla inwestycji realizowanych na drogach krajowych. Wyniki przedstawiające wpływ wybranych czynników na modele zmiennych opisujących poziom bezpieczeństwa ruchu drogowego należy wykorzystać do wytycznych, instrukcji, przykładów dobrych praktyk zalecanych i stosowanych przez projektantów. Przykładem może być negatywny wpływ szerokich poboczy utwardzonych na ciężkość wypadków.

**Słowa kluczowe:** bezpieczeństwo, miary, efektywność

## 1. WSTĘP

Koszty wypadków drogowych to jeden z elementów składowych kosztów, które stanowią podstawę do analiz efektywności ekonomicznej inwestycji drogowych. Obok kosztów eksploatacji pojazdów, czasu podróży i czasu pracy oraz kosztów emisji spalin, koszty wypadków drogowych decydują o tym czy dana inwestycja będzie efektywna z punktu widzenia opłacalności ekonomicznej.

Oszczędności uzyskiwane przez zmniejszenie liczby wypadków drogowych i ich ofiar to średnio ok. 10% korzyści ekonomicznych dla przeciętnej inwestycji drogowej (występują jednak projekty dla których ta wartość jest znacznie wyższa), ale problematyka bezpieczeństwa ruchu drogowego (brd) zajmuje bardzo ważną pozycję przy ocenie projektów przez instytucje Unii Europejskiej. Prawidłowe wyliczenie kosztów wypadków dla planowanych inwestycji zależy przede wszystkim od tego, jak wyznaczone będą prognozowane wskaźniki wypadków. Wskaźniki te będą zależą od szeregu czynników takich jak klasa drogi, natężenie, parametry geometrii drogi lub ulicy, otoczenia itp.

Wpływ zależności czynników drogowo-ruchowych na liczbę wypadków i ofiar na odcinkach drogowych prowadzony jest najczęściej z podziałem na typ drogi oraz lokalizację: autostrady zamiejskie [Ma J., 2006], autostrady miejskie [Anastasopoulos P.C i in., 2012], zamiejskie drogi jednojezdniowe [Agent K.R. i in., 2001] zamiejskie drogi wielojezdniowe [Garber N.J. i in., 2001] miejskie drogi zarówno jednojezdniowe jak i wielojezdniowe [Shankar V.N. i in., 2003]. Budowa modeli prognostycznych może również odbywać się dla ściśle określonego elementu sieci drogowej np. węzły drogowe [Bonneson J. i in., 2012]. Można również spotkać się z pracami zajmującymi się tylko skrzyżowaniami, jako jednym z najbardziej newralgicznych miejsc infrastruktury transportowej [Bared J.G. i in., 1998].

Z przeglądu literatury wynika, że jako zmienne niezależne w budowanych prognostycznych modelach matematycznych wykorzystywano następujące zmienne:

- liczby zdarzeń (wypadków, kolizji) [AASHTO, 2010],
- liczby wypadków z ofiarami śmiertelnymi [Bijleveld F.D., 2005],
- liczby wypadków z ofiarami rannymi lub ciężko rannymi [Caliendo C. i in., 2013],
- liczby ofiar rannych, śmiertelnych lub ogółu ofiar [Ivan J.N. i in., 2006],
- stopień ciężkości wypadków z podziałem na lekko rannych, średnio rannych, ciężko rannych, ofiary śmiertelne [Ma J., 2006],
- gęstość wypadków [Shankar V.N. i in., 2003],
- koncentracja wypadków [Iyinan A.F. i in., 1997].

Do roku 2015, metody analizy ekonomicznej wykorzystywane w Polsce: Metoda kosztów i korzyści stosowana przez IBDiM – Instytut Badawczy Dróg i Mostów w Warszawie [IBDiM 2008] oraz przez Inicjatywę JASPERS [JASPERS, 2009] bazowały na wskaźnikach wypadków, które z jednej strony nie zostały zweryfikowane w odniesieniu do obecnego poziomu bezpieczeństwa ruchu drogowego w Polsce, a z drugiej były niewystarczające, jeżeli chodzi o prognozowanie liczby wypadków dla wybranych typów inwestycji na drogach krajowych. Brak wiarygodnych i zweryfikowanych wartości wskaźników wypadków mogło obniżyć jakość całej analizy ekonomicznej, wykazującej opłacalność inwestycji drogowych.



W związku z tym konieczne było opracowanie metody prognozowania wskaźników wypadków dla różnych typów inwestycji oraz z przeznaczeniem dla różnych poziomów procesu inwestycyjnego. Metoda dotyczy:

- studiów korytarzowych i analiz dla długich odcinków (ciąg drogowy obejmujący zakresem odcinki przechodzące przez tereny zabudowane i niezabudowane wraz z ewentualnymi obejściami miejscowości),
- studiów Techniczno – Ekonomiczno – Środowiskowych dla długich odcinków i średnich odcinków (obejścia miast i miejscowości, przejścia przez miasta i miejscowości, odcinki pomiędzy miejscowościami),
- koncepcji programowych – dla średnich odcinków oraz dla elementów drogowych (skrzyżowania i węzły),
- projektów budowlanych o największej szczegółowości analiz.

Niniejsze opracowanie bazuje na metodzie opracowanej na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad [Budzyński M. i in., 2013].

## 2. METODYKA PROGNOZOWANIA MIAR BEZPIECZEŃSTWA

### 2.1. ZAŁOŻENIA

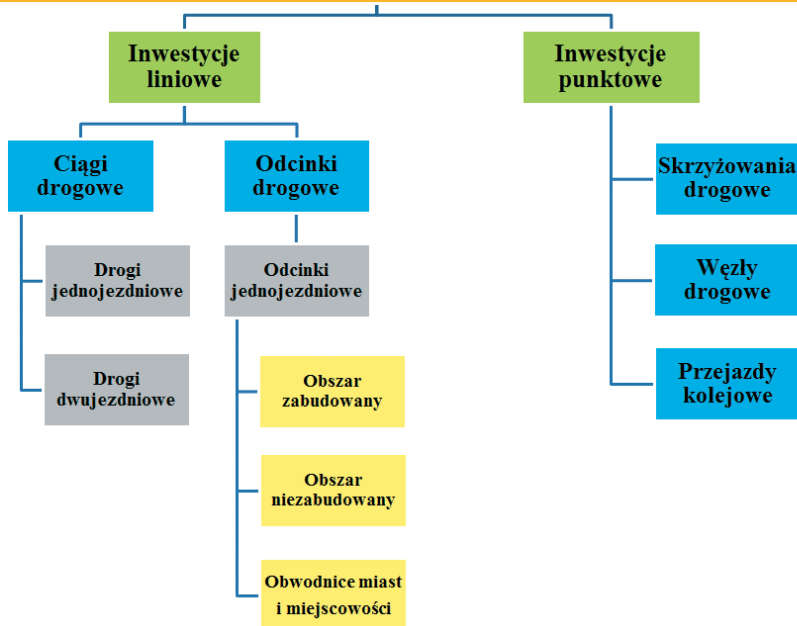
Proponowana metoda daje możliwość oceny bezpieczeństwa ruchu dla planowanej inwestycji na różnych etapach projektowych, z uwzględnieniem wariantowania inwestycji, przygotowania danych z zakresu brd do analiz ekonomicznych i analizy wielokryterialnej. Wszystkie warianty inwestycyjne powinny być rozpatrywane na tym samym poziomie szczegółowości, gdyż analiza wielokryterialna, uwzględniająca także aspekty środowiskowe i ekonomiczne, może wskazać w łącznej ocenie jako najlepszy inny wariant niż najlepszy z punktu widzenia brd. Metoda zakłada, że:

- analizy są prowadzone dla ciągów drogowych (10 – 50 km), odcinków drogowych (0,5 – 10 km), obiektów punktowych (skrzyżowania, węzły drogowe),
- odcinki dróg dzieli się na odcinki jednorodne ze względu na przekrój poprzeczny, tj. na odcinki jednojezdniowe, dwukierunkowe i odcinki dwujezdniowe,
- odcinki opisywane są takimi cechami, jak: typ przekroju poprzecznego, lokalizacja drogi, rodzaj otoczenia drogi, natężenie ruchu i struktura rodzajowa w każdym roku prognozy.

Dla wszystkich typów inwestycji metoda dotyczy zarówno istniejących ciągów drogowych, odcinków drogowych lub inwestycji punktowych, które będą przebudowywane lub modernizowane oraz inwestycji związanych z nowymi ciągami drogowymi, odcinkami drogowymi lub inwestycjami punktowymi. W metodzie prognozowania wskaźników brd wyróżniono następujący rodzaj inwestycji (rys. 1):



## Metoda prognozowania wskaźników bezpieczeństwa ruchu drogowego dla potrzeb analiz ekonomicznych dla inwestycji na drogach krajowych



Rys. 1. Schemat metody prognozowania wskaźników brd z uwzględnieniem rodzaju inwestycji, liczby jezdni oraz lokalizacji

Podział przedstawiony na rys. 1 wynika ze specyfiki wyróżnionych rodzajów inwestycji i wpływu różnych czynników na poziom bezpieczeństwa ruchu drogowego, np. dla długich odcinków drogowych brak możliwości wyróżniania obszarów zabudowanych i niezabudowanych, występuje też duże zróżnicowanie pomiędzy inwestycjami liniowymi i punktowymi.

## 2.2. PRZYJĘTE MIARY BEZPIECZEŃSTWA

Do analizy i oceny bezpieczeństwa ruchu drogowego w niniejszej metodzie przyjęto dwie grupy miar bezpieczeństwa, są to:

- miary strat społecznych, jako miary główne, stosowane do oceny wpływu planowanej drogi na brd,
- miary ryzyka społecznego, jako miary pomocnicze, stosowane do oceny ryzyka na istniejącej i planowanej drodze.

Obliczenia prowadzono bazując na czterech miarach bezpieczeństwa: liczbie wypadków LW, liczbie ofiar rannych LR, liczbie ofiar ciężko rannych LCR i liczbie ofiar śmiertelnych



LZ, określonych jako straty społeczne, a następnie przekształcono je na miary ryzyka społecznego: gęstość wypadków GW, gęstość ofiar rannych GR, gęstość ofiar ciężko rannych GCR, gęstość ofiar śmiertelnych GZ oraz łącznie gęstość ofiar ciężko rannych i śmiertelnych GCRZ.

Straty społeczne. Do określenia strat społecznych przyjęto cztery miary: sumaryczna liczba wypadków LW, sumaryczna liczba ofiar rannych LR, sumaryczna liczba ofiar ciężko rannych LCR i sumaryczna liczba ofiar śmiertelnych LZ. Dla przykładu, sumaryczna liczba wypadków SLW w okresie analizy obliczana ze wzoru (1):

$$SLW = \sum_{i=1}^n LW_i \quad (1)$$

gdzie:

$i$  – rok analizy,

$n$  – okres analizy określony liczbą lat: dla stanu istniejącego wymagane  $n = 3$  lata (dla potrzeb niniejszej metody lata 2008 – 2010),

$SLW$  – sumaryczna liczba wypadków w okresie analizy,

$LW_i$  – liczba wypadków w roku  $i$ .

Dane o liczbie wypadków oraz ofiar rannych i śmiertelnych w poszczególnych latach można uzyskać:

- w przypadku analizy stanu istniejącego z bazy danych o wypadkach,
- w przypadku stanu planowanego z prognoz bezpieczeństwa ruchu wykonanych na podstawie niniejszej metody.

Ryzyko społeczne. Do określenia ryzyka społecznego przyjęto trzy miary: gęstość wypadków GLW, gęstość ofiar rannych GLR, gęstość ofiar ciężko rannych i gęstość ofiar śmiertelnych GLZ, które oblicza się na przykładzie gęstości wypadków ze wzoru (2):

$$GLW_i = \frac{LW_i}{L} \quad (2)$$

gdzie:

$L$  – długość istniejącej lub planowanej drogi (km),

$GLW_i$  – gęstość wypadków w roku  $i$ , (wypadków/km),

$LW_i$  – liczba wypadków w roku  $i$ .

### 3. WYNIKI PROGNOZOWANIA

Dla ilustracji przyjętej metody w niniejszym rozdziale przedstawiono prognozowanie liczby wypadków (LW) dla odcinków drogowych zlokalizowanych na terenie niezabudowanym.

Liczba wypadków lub ofiar wypadków (3) zależy od długości analizowanego odcinka i gęstości wypadków lub gęstości ofiar wypadków drogowych. Gęstość wypadków lub ofiar wypadków drogowych (4) uzależniona jest od:

- natężenia ruchu i jego struktury rodzajowej dla każdego roku prognozy,
- czynników charakteryzujących poszczególne odcinki dróg,
- roku prognozy,



- charakterystyk geograficznych, przestrzennych, w tym przypadku województwa na obszarze którego występuje droga.

Dla każdego planowanego wariantu przebiegu drogi liczbę wypadków na poszczególnych odcinkach drogi jednojezdniowej, dwupasowej na obszarze niezabudowanym oblicza się według wzoru (3).

$$LW_{(1Z)} = L \cdot GW_{(1NZ)} \quad (3)$$

przy czym:

$$GW_{(1NZ)} = WGW^{(1NZ)} \cdot f_{LD} \cdot f_{UC} \cdot f_{PRD} \cdot f_{SN} \cdot f_{SKG} \cdot f_{SKP} \cdot f_{SP} \cdot f_{PUS} \cdot f_{JE2} \cdot f_{HP} \quad (4)$$

Oznaczenia:

$LW_{(1NZ)}$  – liczba wypadków (LW) na drodze jednojezdniowej, dwukierunkowej w danym roku prognozy, (wyp./rok),

$L$  – długość analizowanego odcinka drogi (km),

$GW_{(1NZ)}$  – gęstość wypadków (GW) na drodze jednojezdniowej, dwukierunkowej dla danego roku prognozy (wyp./km/rok),

$WGW^{(1NZ)}$  – współczynnik wpływu natężenia ruchu na odcinku drogi jednojezdniowej, dwukierunkowej dla danej klasy drogi,

$f_{LDW}$  – współczynnik wpływu lokalizacji drogi wg województw LDW, uwzględniający specyfikę danego województwa,

$f_{UC}$  – współczynnik udziału ruchu pojazdów ciężkich UC (ciężarowych i autobusów) na analizowanym odcinku drogi jednojezdniowej w danym roku prognozy (%),

$f_{PRD}$  – współczynnik wpływu występowania dodatkowego pasa ruchu PRD,

$f_{SN}$  – współczynnik wpływu stanu technicznego nawierzchni SN,

$f_{SKG}$  – współczynnik wpływu łącznego gęstości skrzyżowań SKK (z drogami krajowymi), SKW (skrzyżowań z drogami wojewódzkimi), WZZ (gęstości wjazdów i zjazdów w obrębie węzłów drogowych),

$f_{SKP}$  – współczynnik wpływu gęstości skrzyżowań innych niż z drogami krajowymi i wojewódzkimi SKI (z drogami powiatowymi i gminnymi) oraz gęstości wjazdów publicznych ZPU,

$f_{SP}$  – współczynnik stanu technicznego pobocza SP,

$f_{PUS}$  – współczynnik wpływu występowania pobocza utwardzonego szerokiego PUS,

$f_{JE2}$  – współczynnik wpływu występowania krótkich odcinków z drugą jezdnią na odcinkach jednojezdniowych JE2,

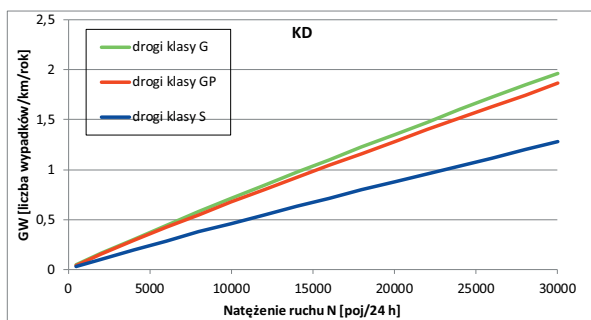
$f_{HP}$  – współczynnik wpływu horyzontu prognozy, uwzględniający poziom rozwoju społeczno-gospodarczego kraju i podejmowanych działań systemowych na rzecz bezpieczeństwa ruchu drogowego HP.

Dla analizowanych czynników można zaobserwować następujące wpływy na gęstość wypadków  $GW^{(1NZ)}$ :

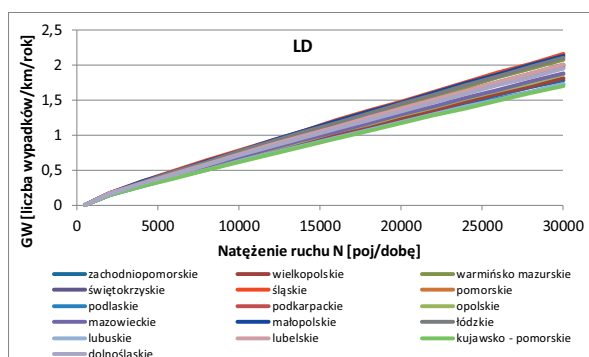
- rosnący – natężenie ruchu, klasa drogi KD, lokalizacja drogi LD, stan pobocza SP, gęstość skrzyżowań głównych SKG (z drogami krajowymi), gęstość skrzyżowań pozostałych SKP i wjazdów publicznych ZPU,
- malejący – udział pojazdów ciężkich UC, stan nawierzchni SN, udział odcinków z dodatkowym pasem ruchu PRD, udział odcinków z drugą jezdnią JE2.

Na poniższych wykresach przedstawiono graficznie wpływ wybranych czynników na gęstość wypadków (rys. 3 – 6).

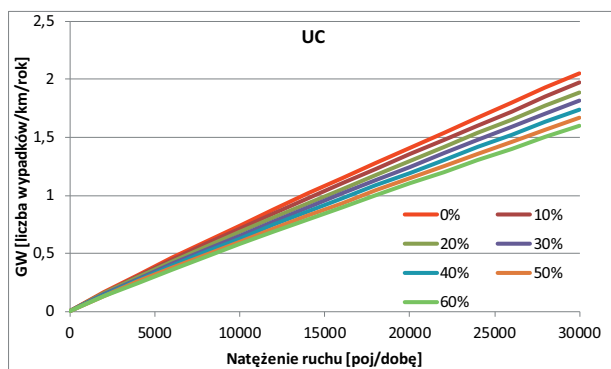




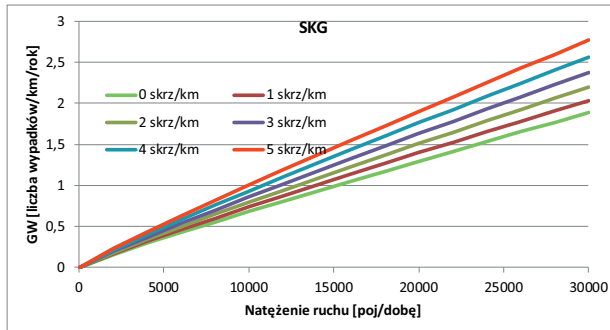
Rys. 3. Wpływ klasy drogi KD na gęstość wypadków GW dla odcinków drogowych na drogach jednojezdniowych



Rys. 4. Wpływ lokalizacji drogi LD na gęstość wypadków GW dla odcinków drogowych na drogach jednojezdniowych



Rys. 5. Wpływ udziału pojazdów ciężkich UC na gęstość wypadków GW dla odcinków drogowych na drogach jednojezdniowych



Rys. 6. Wpływ gęstości skrzyżowań głównych SKG na gęstość wypadków GW dla odcinków drogowych na drogach jednojezdniowych

#### 4. PODSUMOWANIE I KIERUNKI DALSZYCH PRAC

Równoległe do prac nad wskaźnikami bezpieczeństwa dla analiz ekonomicznych opracowano uaktualnienie kosztów zdarzeń drogowych [Jażdżik-Osmólska A., 2013]. Opracowane wskaźniki zostały wykorzystane w aktualizacji opracowania JASPERS dotyczącego infrastruktury drogowej [JASPERS, 2015].

Na podstawie dotychczasowych wyników badań i analiz rekomenduje się następujące dalsze działania zmierzające do aktualizacji metody i jej rozbudowy:

- Konieczne jest uporządkowanie i aktualizowanie Banku Danych Drogowych, w celu zwiększenia jakości wykonywanych analiz związanych z wpływem czynników drogowych na miary bezpieczeństwa ruchu drogowego.
- Kolejnym etapem badań i analiz powinno być wprowadzenie do metody prognozowania wskaźników bezpieczeństwa ruchu drogowego większej liczby elementów charakteryzujących geometrię ciągów drogowych, odcinków drogowych i obiektów punktowych – przede wszystkim związanych z ukształtowaniem pionowym i poziomym drogi.
- Opracowana metoda będzie narzędziem umożliwiającym ocenę bezpieczeństwa ruchu drogowego dla różnych typów inwestycji, na różnych etapach procesu projektowego dla inwestycji realizowanych na drogach krajowych.
- Metoda może stanowić część metodyki oceny zagrożeń na drogach krajowych, po opracowaniu metody wykonywania kontroli infrastruktury drogowej pod kątem bezpieczeństwa ruchu drogowego.
- Wyniki przedstawiające wpływ wybranych czynników na modele zmiennych opisujących poziom bezpieczeństwa ruchu drogowego należy wykorzystać do wytycznych, instrukcji, przykładów dobrych praktyk zalecanych i stosowanych przez projektantów. Przykładem może być negatywny wpływ szerokich poboczy utwardzonych na ciężkość wypadków.





## Bibliografia

1. AASHTO (2010): Highway Safety Manual, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington.
2. Agent K.R., Pigman J.P., Stama (2001): Countermeasures for fatal crashes on two-lane rural roads, Kentucky Transportation Center.
3. Anastasopoulos P.C., Mannering F., Shankar V.N., Haddock J.E. (2012): A study of factors affecting highway accident rates using the random-parameters tobit model, *Accid. Anal. Prev.* 45 (2012) 628–33.
4. Bared J.G., Vogt A. (1998): Accident models for two-lane rural roads: segments and intersections, Federal Highway Administration.
5. Bijleveld F.D. (2005): The covariance between the number of accidents and the number of victims in multivariate analysis of accident related outcomes., *Accid. Anal. Prev.* 37, 591–600.
6. Bonneson J., Geedipally S., Pratt M.P., Lord D. (2012): Safety prediction methodology and analysis tool for freeways and interchanges, National Cooperative Highway Research Program Transportation Research Board of The National Academies.
7. Budzyński M., Kustra W., Jamroz K., Gaca S., Michalski L., Guminska L. (2013): Metoda prognozowania wskaźników BRD dla potrzeb analiz efektywności ekonomicznej inwestycji realizowanych na drogach krajowych w Polsce - Opracowanie na zlecenie GDDKiA, Politechnika Gdańska, Politechnika Krakowska.
8. Caliendo C., Guglielmo M.L. De, Guida M. (2013): A crash-prediction model for road tunnels, *Accid. Anal. Prev.* 55, 107–115.
9. Garber N.J., Ehrhart A.A. (2009): The effect of speed, flow, and geometric characteristics on crash rates for different types of virginia highways, Virginia Transportation Research Council, Virginia Transportation Research Council.
10. IBDiM (2008): Instrukcja oceny efektywności ekonomicznej przedsięwzięć drogowych i mostowych, Warszawa.
11. Ivan J.N., Garder P.E., Deng Z., Zhang C. (2006): The effect of segment characteristics on the severity of head-on crashes on two-lane rural highways, University of Connecticut, University of Maine.
12. Iyınam A.F., Iyınam S., Ergun M. (1997): Analysis of Relationship Between Highway Safety and Road Geometric Design Elements : Turkish Case, Technical University of Istanbul.
13. JASPERS (2008): Niebieska Księga – Infrastruktura Drogowa.
14. JASPERS (2015): Niebieska księga - infrastruktura Drogowa.
15. Jażdżik-Osmólska A., Kretkiewicz B., Breńska U. (2012): Metodologia i wycena kosztów wypadków drogowych na sieci dróg w Polsce, IBDiM, Warszawa.
16. Ma J. (2006) Bayesian multivariate poisson-lognormal regression for crash prediction on rural two-lane highways, University of Texas at Austin.
17. Shankar V.N., Ulfarsson G.F., Pendyala R.M., Nebergall M.B. (2003): Modeling crashes involving pedestrians and motorized traffic, *Saf. Sci.* 41, 627–640.

## ESTIMATING ROAD SAFETY MEASURES FOR THE PURPOSES OF ROAD PROJECT EFFECTIVENESS EVALUATION

**Summary:** The costs of road accidents are one of the cost components to be considered when analysing the economic effectiveness of road projects. A project's economic efficiency depends on a number of factors such as vehicle operating costs, travel time, working time and the costs of emissions, noise and road accidents. When calculating the costs of accidents for new roads, a lot depends on how forecasted accident rates will be determined. These rates will be related to a number of factors such as road class, traffic volume, road or street parameters, roadside, etc. Two groups of road safety measures are used to analyse and evaluate road safety in this method. They are societal consequences as the primary measures for evaluating how the new road will affect road safety and measures of societal risk as secondary measures for assessing risk on an existing and planned road. Models of how selected factors affect road safety are built using road accident data for the years 2008 – 2010 on national roads, road element database (BDD – road data bank), data on the condition of roadways and shoulders from SOSN and SOPO systems, road traffic data from the 2010 General Test, data from



the roadway visualisation system and the authors' own data from road reviews. Road project rates were modelled with measures of societal risk (accident density AD, injury density ID, serious injury density SID, fatality density FD and serious injury and fatality density SIFD). Nodal projects were modelled with societal consequences (number of accidents NA, number of injuries NI, number of serious injury NSI, number of fatalities NF, number serious injuries and fatalities NSIF). The method will provide a tool that will help with assessing road safety for different types of road projects at different stages of design for projects delivered on national roads. The results presenting the effects of selected factors on models of road safety variables should be used for developing guidelines, instructions, examples of good practice recommended and used by designers. The negative effect of wide hard shoulders on accident severity is an example.

**Keywords:** safety, measures, effectiveness