

# ROZWÓJ SPOŁECZNO-GOSPODARCZY GŁÓWNYM UWARUNKOWANIEM BEZPIECZEŃSTWA RUCHU DROGOWEGO

## HUMAN-ECONOMIC DEVELOPMENT AS THE MAIN CONDITION OF ROAD SAFETY

### Wprowadzenie

Pierwszy wypadek drogowy z udziałem pojazdu mechanicznego, czyli uderzenie w drzewo pierwszego samochodu parowego skonstruowanego przez N.J. Cugnot'a, wydarzył się w roku 1771. Od tego czasu na świecie doszło do kilkaset milionów wypadków drogowych, w których zginęło ponad 60 milionów osób. W ciągu roku na świecie w wypadkach drogowych ginie około 1,3 miliona osób, a kolejne 50 milionów odnosi obrażenia [1]. Prawie połowa ofiar śmiertelnych ma miejsce w Azji, a największa roczna liczba ofiar śmiertelnych występuje w krajach o bardzo dużej liczbie ludności, ale jeszcze o niskim poziomie motoryzacji, tj. w Chinach (110 tys.) i w Indiach (52 tys.).

Analizując stopień zmian liczby ofiar śmiertelnych wypadków drogowych na świecie, obserwujemy duży rozrzut poziomu bezpieczeństwa ruchu drogowego w poszczególnych krajach. Śmiertelność wypadków drogowych zawiera się dla analizowanych krajów na świecie w przedziale od 4,5 do 450 ofiar śmiertelnych wypadków drogowych na 1 milion mieszkańców. Ponadto można stwierdzić, że największe przyrosty liczby ofiar śmiertelnych w ciągu ostatniej dekady obserwujemy w krajach azjatyckich, natomiast największą redukcję obserwuje się w rozwiniętych krajach europejskich [2]. Nasuwają się zatem pytania:

- od czego zależy poziom śmiertelności w wypadkach drogowych w poszczególnych krajach?
- dlaczego występują tak duże dysproporcje w poziomie bezpieczeństwa użytkowników dróg między krajami wysoko rozwiniętymi i krajami rozwijającymi się?
- jakie są prognozy bezpieczeństwa ruchu drogowego dla następnego pokolenia?

Odpowiedzi na te pytania nurtujące wiele organizacji międzynarodowych, naukowców i poszczególne społeczeństwa nie są proste. Na niektóre z nich próbowano odpowiedzieć w formie badań i teoretycznych studiów lub formie praktycznej, np. opracowując oraz wdrażając krajowe i re-

gionalne programy bezpieczeństwa ruchu drogowego. Konieczne są jednak dalsze badania naukowe zmierzające w pierwszej kolejności do identyfikacji głównych czynników wpływających na poziom bezpieczeństwa ruchu drogowego w danym kraju, a następnie do opracowania metod prognozowania miar bezpieczeństwa ruchu drogowego i metod zarządzania nim. Pierwsze z wymienionych zagadnień jest tematem niniejszego artykułu.

### Śmiertelność demograficzna w wypadkach drogowych

Śmiertelność (ang. *mortality*) jest jednym z powszechnie stosowanych wskaźników zdrowia publicznego i oznacza udział liczby zgonów w populacji mieszkańców analizowanego obszaru, w jednostce czasu. W przypadku bezpieczeństwa ruchu drogowego śmiertelność może być odnoszona do danych demograficznych lub motoryzacyjnych. Bardzo często stosowaną miarą bezpieczeństwa ruchu drogowego jest wskaźnik śmiertelności demograficznej w wypadkach drogowych (zwaną również ofiarnością demograficzną zabitych), definiujemy jako stosunek liczby ofiar śmiertelnych LZ do liczby mieszkańców LM w jednostce czasu i opisujemy wzorem:

$$WSD = \frac{LZ}{LM} \quad (1)$$

gdzie:

WSD – wskaźnik śmiertelności demograficznej w wypadkach drogowych w ciągu roku na analizowanym obszarze (ofiar śmiertelnych/1 mln mieszkańców/rok)

LZ – liczba ofiar śmiertelnych wypadków drogowych w ciągu roku na analizowanym obszarze (ofiar śmiertelnych/rok)

LM – liczba mieszkańców na analizowanym obszarze (mln osób/rok).

Najstarszym makromodelem stosowanym w prognozowaniu liczby ofiar śmiertelnych jest model Smeeda [3] z roku 1949 opracowany na danych z 20 krajów, w którym liczbę ofiar śmiertelnych uzależniono od liczby osób miesz-

<sup>1</sup> Dr hab. inż., Katedra Inżynierii Drogowej, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, kjamroz@pg.gda.pl

kających i liczby pojazdów zarejestrowanych na analizowanym obszarze według formuły (2) lub (3):

$$D = 0,0003 \cdot (p^2 \cdot n)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

lub

$$\frac{D}{p} = 0,0003 \cdot \sqrt[3]{\frac{n}{p}} \quad (3)$$

gdzie:

D – liczba ofiar śmiertelnych wypadków drogowych w ciągu roku na analizowanym obszarze (tys. ofiar śmiertelnych/rok)

p – liczba mieszkańców na analizowanym obszarze (tys. osób/rok)

n – liczba pojazdów na analizowanym obszarze (tys. pojazdów/rok).

Model ten rozwinął Adams [4] i zastosował dla kilkunastu krajów. Zmodyfikowany model Smeeda zastosowano w wielu krajach. Wadą tego modelu jest brak możliwości reakcji na zmiany gospodarcze, społeczne i infrastrukturalne poszczególnych krajów. Współczynniki występujące w równaniach (2) i (3) powinny być aktualizowane, co ogranicza przydatność prognostyczną modelu.

Przykładem niedostosowania modelu Smeeda do warunków rzeczywistych jest prognoza dla Wielkiej Brytanii przedstawiona na rysunku 1. Niezależnie od tego model ten jest uznawany za bazy w szacowaniu liczby ofiar śmiertelnych w wypadkach drogowych na obszarze kraju, regionu, miasta. Stosowano także inne modele, uwzględniając różne czynniki, takie jak: produkt narodowy brutto, pracę przewoźną, długość dróg, usprawnienia infrastruktury, poziom korupcji, poziom bezrobocia, poziom konsumpcji alkoholu itp.

Przedstawiony na rysunku 1 przykład wskazuje na wystąpienie punktu przełamania na wykresie liczby ofiar śmiertelnych w wypadkach drogowych (w przypadku Wielkiej Brytanii był to rok 1965), którego nie uwzględniają proste modele prognostyczne liczby ofiar śmiertelnych. Dlatego konieczna była zmiana w budowie prostych modeli prognostycznych. Kluczowymi w tym przypadku są prace Kopits [5], Koornstry [6], Yannis'a [7], w których przedstawiono analizę zmian śmiertelności w wypadkach drogowych i czynników wpływających na jej wielkość i zmiany.

W roku 2003 Kopits i Cropper na zlecenie Banku Światowego [5] zastosowały model ekonometryczny do opisu zależności śmiertelności w wypadkach od zmian poziomu gospodarczego kraju. Do modelowania wykorzystano ogólny model Kuznetsa zastosowany wcześniej w ekologii [8]. Na bazie danych z 88 krajów z okresu 1963–1999, obejmujących liczbę ofiar śmiertelnych, liczbę mieszkańców, liczbę pojazdów, produkt narodowy brutto, zastosowano do opisu omawianej zależności ekonometryczny model o ogólnej postaci:

$$\ln\left(\frac{LZ}{LM}\right)_{it} = a_i + G(t) + F[\ln(JPNB_{it})] + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

gdzie:

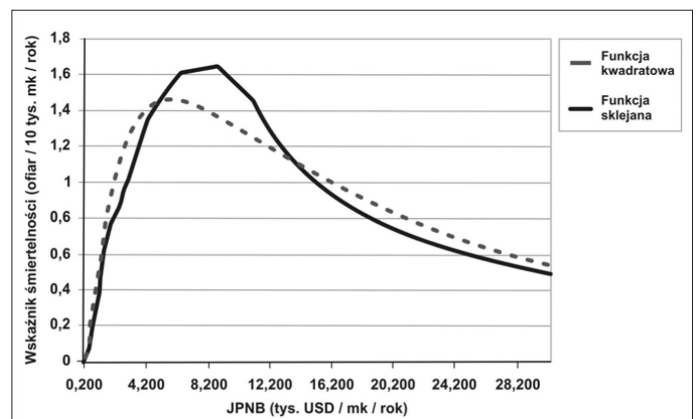
$a_i$  – stała charakteryzująca kraj

$G(t)$ ,  $F[\ln(JPNB_{it})]$  – funkcje, które są wyznaczane na podstawie danych empirycznych

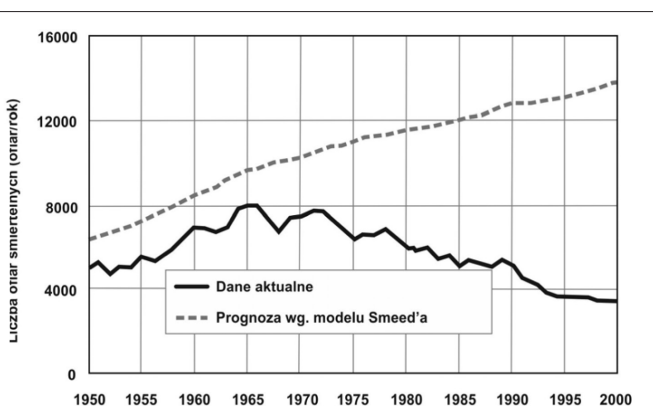
$JPNB_{it}$  – rzeczywisty, jednostkowy produkt narodowy brutto w kraju  $i$ , w roku  $t$ ,

$\varepsilon_{it}$  – błąd prognozy.

Przedstawiony model uwzględnia punkt przełamania zależności wskaźnika śmiertelności w wypadkach drogowych od produktu krajowego brutto. Przełamanie to występuje w tym przypadku dla PNB < 10 tysięcy USD/mieszkańca. Taką prawidłowość potwierdzają także prace Koornstry, który przedstawił między innymi zależność śmiertelności demograficznej od produktu narodowego brutto w przeliczeniu na jednego mieszkańca w roku 2000, dla uśrednionych danych z ponad 100 krajów (podzielonych na 8 grup). Uzyskany wykres odpowiada w przybliżeniu przebiegowi funkcji według modelu potęgowo-wykładniczego. Optimum funkcji uzyskano przy PNB = 5 tysięcy USD/mieszkańca. Niestety stwierdza on, że ta zależność nie może być stosowana do prognozowania śmiertelności wypadków drogowych ze względu na brak monotoniczności [6]. W modelach tych, oprócz jednostkowego produktu narodowego brutto, brano pod uwagę także: wskaźnik rozwoju społeczno-gospodarczego, wskaźnik motoryzacji.



Rys. 2. Wykresy zależności wskaźnika śmiertelności w wypadkach drogowych od jednostkowego produktu narodowego brutto PNB[5]



1. Prognoza liczby ofiar śmiertelnych w Wielkiej Brytanii według modelu Smeeda

## Analiza czynników wpływających na śmiertelność w wypadkach drogowych

Korzystając z dostępnych baz danych (ECMT, Eurostat, FAO, IRF, IRTAD, OECD, TI, UN, WB, WHO) i wielu innych źródeł, zebrano dane empiryczne dotyczące liczby ofiar śmiertelnych oraz wiele danych charakteryzujących 60 krajów świata z lat 1973–2008. Obejmowały one dla analizowanych krajów w poszczególnych latach dane: geograficzne (powierzchnia kraju, udział gruntów ornych), demograficzne (liczba mieszkańców, gęstość zaludnienia, udział mieszkańców miast), ekonomiczne (produkt narodowy, jednostkowy produkt narodowy), społeczne (wskaźnik rozwoju społeczno-gospodarczego, wskaźnik długości życia, wskaźnik korupcji, wskaźnik spożycia alkoholu), motoryzacyjne (liczba pojazdów ogółem, liczba pojazdów motorowych, udział pojazdów motorowych, wskaźnik motoryzacji ogółem, wskaźnik motoryzacji pojazdów motorowych), drogowe (długość dróg ogółem, dróg twardych oraz autostrad i dróg ekspresowych; gęstość obszarowa i demograficzna dróg ogółem, dróg twardych oraz autostrad i dróg ekspresowych), transportowe (praca przewozowa, średnia droga przebyta przez mieszkańca pojazdami). Łącznie uzyskano dane dla 30 zmiennych niezależnych [9].

W celu identyfikacji najbardziej istotnych zmiennych niezależnych przeprowadzono analizę siły współzależności pomiędzy zmiennymi niezależnymi ( $X$ ) i wybranymi miarami bezpieczeństwa ( $Y$ ). Do badania zależności między zmiennymi  $X$  i  $Y$  wykorzystano współczynnik korelacji liniowej Pearsona, będący miarą siły związku liniowego między dwiema cechami mierzalnymi. Na podstawie analizy otrzymanych wyników stwierdzono, że bardzo silna zależność liniowa występuje pomiędzy liczbą ofiar śmiertelnych LZ a liczbą mieszkańców LM oraz liczbą pojazdów ogółem LP, natomiast dość silna zależność występuje pomiędzy liczbą ofiar śmiertelnych LZ, a produktem narodowym brutto GDP oraz pracą przewozową pojazdów PP. Natomiast słaba lub bardzo słaba współzależność liniowa występuje pomiędzy analizowanymi zmiennymi niezależnymi a śmiertelnością wypadków drogowych WSD. Należy przypuszczać zatem, że są to uwikłane zależności nieliniowe. Sprawdzone to, wykorzystując sieci neuronowe, określając najbardziej istotne czynniki reprezentowane przez zmienne niezależne, wpływające na poszczególne miary bezpieczeństwa (zmienne zależne). Po przeprowadzonych szczegółowych analizach z grupy 30 czynników najbardziej istotnymi dla zmian śmiertelności wypadków drogowych okazały się następujące czynniki: jednostkowy dochód narodowy JPSN (mierzony parytetem siły nabywczej) reprezentujący zmienne ekonomiczne kraju; wskaźnik rozwoju społeczno-gospodarczego HDI; gęstość ludności GLM jako zmienne demograficzne; udział ludności mieszkającej w miastach ULM i wskaźnik udziału gruntów ornych UGR jako zmienne reprezentujące zagospodarowanie przestrzenne kraju; wskaźnik długości życia LEI, reprezentujący poziom opieki zdrowotnej

kraju; wskaźnik korupcji WKP, reprezentujący poziom funkcjonowania systemu organizacyjnego państwa; wskaźnik spożycia alkoholu WKA, reprezentujący zmienne społeczne i kulturowe; wskaźnik motoryzacji pojazdów motorowych WMP, reprezentujący zmienne motoryzacyjne (wielkość floty pojazdów); udział pojazdów motorowych UPM, reprezentujący strukturę floty pojazdów; stopień stosowania pasów bezpieczeństwa USB; jako miara kultury bezpieczeństwa; gęstość dróg twardych GDT i gęstość autostrad i dróg ekspresowych GDAE, jako zmiennych infrastrukturalnych; średnia droga przebyta przez mieszkańca kraju pojazdami SDPM, reprezentująca zmienne transportowe.

## Model zmian wskaźnika śmiertelności demograficznej w wypadkach drogowych

W literaturze spotyka się kilka przypadków modelowania wskaźnika SD przy zastosowaniu modeli wykładniczych [6] lub modelu Kuznetza [5]. Natomiast do modelowania śmiertelności demograficznej w wypadkach drogowych WSD przyjęto funkcję potęgowo-wykładniczą opisaną wzorem (5) jako najlepiej aproksymującej analizowane dane empiryczne [9]:

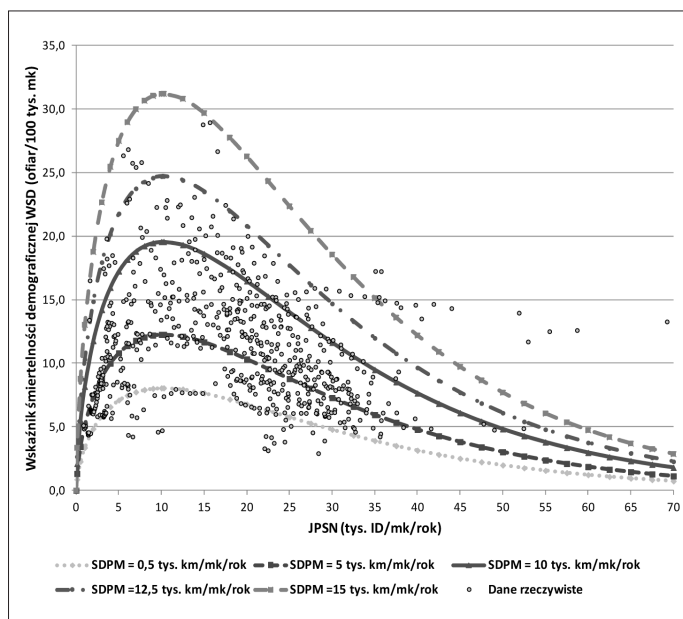
$$WSD = a \cdot JPSN^b \cdot GLM^c \exp(-d \cdot JPSN + e \cdot SDPM - f \cdot UGR - g \cdot LEI - h \cdot WKP + i \cdot WKA - j \cdot USB + k \cdot GDT - l \cdot GDAE)$$

gdzie:

- JPSN – jednostkowy dochód narodowy, mierzony parytetem siły nabywczej (tys. ID/mieszkańca/rok)
- GLM – gęstość zaludnienia obszaru (mieszkańców/1 km<sup>2</sup>/rok)
- SDPM – średnia droga przebyta przez mieszkańca pojazdami (tys. km/mieszkańca/rok)
- UGR – udział gruntów rolnych (%)
- LEI – wskaźnik średniej, przewidywanej długości życia mieszkańców
- WKP – wskaźnik korupcji
- WKA – wskaźnik konsumpcji alkoholu (l/mk/rok)
- USB – wskaźnik stosowania pasów bezpieczeństwa przez uczestników ruchu w pojazdach (%)
- GDT – gęstość dróg twardych (km/100km<sup>2</sup>)
- GDAE – gęstość dróg ekspresowych i autostrad (km/100km<sup>2</sup>)
- $a, b, \dots, l$  – współczynniki równania, opisy zmiennych niezależnych zamieszczono w poprzednim rozdziale.

Parametry równania obliczono, wykorzystując pakiet obliczeniowy STATISTICA [10]. W przedstawionym modelu użyto dziesięciu zmiennych niezależnych reprezentujących charakterystyki poszczególnych krajów i ich systemów transportowych.

W ten sposób uzyskano prosty model zmian WSD wykorzystujący funkcje potęgowo-wykładniczą z JPSN jako parametrem skali reprezentującym poziom rozwoju



Rys. 3. Wykres rzeczywistych i prognozowanych wartości liczbowych wskaźnika śmiertelności demograficznej w wypadkach drogowych [9].

społeczno-gospodarczego kraju (rys. 3). W początkowym okresie rozwoju społeczno-gospodarczego kraju wraz ze wzrostem jednostkowego dochodu narodowego brutto JPSN wzrasta także dość gwałtownie wartość liczbową wskaźnika WSD, aż do osiągnięcia maksimum (w punkcie przełamania  $JPSN_{BP} = 6,8$  tys. ID/mieszkańca, wg cen aktualnych). Potem po przekroczeniu tego punktu wraz z dalszym wzrostem JPSN zaczyna się zmniejszać wartość liczbową WSD, początkowo dość gwałtownie, a następnie coraz wolniej w sposób asymptotyczny do osi JPSN. Punkt przełamania funkcji WSD znajduje się zatem w pierwszej ćwiartce spotykanego zakresu JPSN.

Wartość liczbową wskaźnika WSD (przy tej samej wartości liczbowej parametru skali JPSN):

- rośnie wraz ze wzrostem: średniej drogi przebytej przez pojazdy w przeliczeniu na mieszkańca SDPM, poziomu spożycia alkoholu WKA oraz gęstości dróg twardej GDT,
- maleje wraz ze wzrostem: gęstości ludności GLM, wskaźnika udziału gruntów ornych UGR, wskaźnika długości życia mieszkańców LEI, wskaźnika korupcji WKP oraz gęstości autostrad i dróg ekspresowych GDAE.

Zaproponowany model zmienności wskaźnika WSD i zastosowanie do większości krajów świata. Odchylenia tego modelu występują dla grupy krajów rozwijających (przyspieszenia rozwoju motoryzacji nie adekwatnego poziomu rozwoju systemu transportu, systemu ochrony zdrowia, kultury bezpieczeństwa) oraz grupy krajów o wysokim poziomie przychodów, w których działania na rzecz bezpieczeństwa ruchu drogowego są stosowane w małym zakresie, tj. znacznie poniżej możliwości finansowych i organizacyjnych tych krajów.

## Podsumowanie

Przedstawiony w niniejszym artykule model wskaźnika śmiertelności w wypadkach drogowych WSD dobrze wyjaśnia istotę zmian poziomu bezpieczeństwa ruchu drogowego w zależności od poziomu rozwoju społeczno-gospodarczego kraju. Zmiana wskaźnika WSD opisanego modelem potęgowo-wykładniczym składa się z trzech charakterystycznych części: wzrostowej, przełamania i spadkowej. Jej maksymalna wartość zależy od wielu czynników, z których najważniejsze to: mobilność mieszkańców, poziom ochrony zdrowia, system organizacyjny państwa, struktura sieci drogowej, zagospodarowanie przestrzenne kraju, kultura bezpieczeństwa. Funkcja ta może być wykorzystana do wyjaśniania aktualnego stanu bezpieczeństwa ruchu drogowego oraz jego prognoz.

Znając wpływy poszczególnych zmiennych niezależnych, rządy i instytucje zarządzające bezpieczeństwem ruchu drogowego w poszczególnych krajach mogą wpływać na zmniejszenie śmiertelności w wypadkach drogowych, podejmując działania na poziomie strategicznym, np. poprzez:

- usprawnienie systemu organizacyjnego państwa, między innymi – budowa systemu zarządzania bezpieczeństwem ruchu drogowego;
- rozbudowę systemu ochrony zdrowia;
- budowę i rozwijanie sieci drogowej o drogi o wysokich standardach bezpieczeństwa;
- wpływanie na zmiany zachowań transportowych mieszkańców: zmniejszenie wykorzystania pojazdów samochodowych w podróży na rzecz innych, bezpieczniejszych środków transportu, stosowanie zabezpieczeń przez uczestników ruchu w pojeździe, zmniejszenie poziomu konsumpcji alkoholu.

## Literatura

1. *Global status report on road safety: time for action*, World Health Organization, Geneva 2009.
2. *World report on road traffic injury prevention*, WHO, Geneva 2004.
3. Smeed R.J., *Some statistical aspects of safety research*, „Journal of the Royal Stat. Soc.”, Serie A, 1949.
4. Adams J., *Risk*, University College London, UCL Press 1995.
5. Kopits E., Cropper M., *Traffic Fatalities and Economic Growth*, The World Bank, Policy Research Working Paper, 2003.
6. Koornstra M., *Prediction of traffic fatalities and prospects for mobility becoming sustainable – safe*, Sadhana Vol. 32, Part 4, 2007.
7. Yannis G., Antoniou C., Papadimitriou E., Katsochis D., *When may road fatalities start decrease?* „Journal of Safety Research”, 2011.
8. Kuznets, S., *Economic growth and income inequality*, „American Economic Review”, vol. 65, 1955.
9. Jamroz K., *Metoda zarządzania ryzykiem w inżynierii drogowej*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2011.
10. *Statistica – przewodnik*, StatSoft Inc. Kraków 2008.