

**Transport Miejski i Regionalny (skrót TMiR)**

Czasopismo wydawane od 2004 roku jako kontynuacja tytułu „Transport Miejski”, wydawanego od 1982 r. ISSN-1732-51-53

**Redaktor naczelny**

Prof. dr hab. inż. Wiesław Starowicz (Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji RP, Oddział w Krakowie)  
starowicz@sitk.org.pl

**Sekretarz redakcji**

Mgr Janina Mrowińska (Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji RP, Oddział w Krakowie)  
mrowinska@sitk.org.pl

**Rada naukowo-programowa**

Prof. PK dr hab. inż. Andrzej Szarata (Politechnika Krakowska) – przewodniczący, członkowie: profesor Tom Rye (Transport Research Institute, Edynburg, Wielka Brytania), prof. dr hab. inż. Antoni Szydło (Politechnika Wrocławska), profesor Igor Taran (Narodowy Górniczy Uniwersytet, Katedra Zarządzania w Transporcie, Dniepropietrowsk, Ukraina), profesor Ming Zhong (Intelligent Transport Systems Research Center, Wuhan, Chiny)

**Redaktorzy tematyczni**

prof. dr hab. inż. Stanisław Gaca (Politechnika Krakowska – inżynieria ruchu), dr inż. Ryszard Janecki (Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji RP, Oddział w Krakowie), mgr inż. Mariusz Szalkowski (Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne SA w Krakowie – transport miejski), prof. UE dr hab. Robert Tomanek (Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach – ekonomika transportu), dr inż. Jacek Malasek – aktualności ze świata

**Redaktor statystyczny**

Dr inż. Jolanta Zurowska (Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji RP, Oddział w Krakowie)

**Redaktor językowy i streszczenia w języku angielskim**

Mgr Agata Mierzyńska (Urząd Miasta Krakowa)

**Projekt graficzny okładki**

Mgr inż. arch. Lucyna Starowicz

**Adres redakcji**

ul. Siostrzana 11, 30-804 Kraków  
tel./fax 12 658 93 74  
e-mail: tmir@sitkrp.org.pl  
Strona w Internecie: <http://tmir.sitk.org.pl>

**Wydawca**

Wydawnictwa SITK RP Sp. z o.o.  
ul. Czackiego 3/5, 00-043 Warszawa  
[www.sitkrp.org.pl](http://www.sitkrp.org.pl)

**Nakład**

500 egzemplarzy

**Skład**

Tomasz Wojtanowicz

**Druk**

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji  
ul. K. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom

**Deklaracja o wersji pierwotnej czasopisma**

Główną wersją czasopisma jest wersja papierowa  
Artykuły w wersji elektronicznej są dostępne na stronie czasopisma z półrocznym opóźnieniem

**Bazy indeksujące artykuły TMiR**

Baza BAZTECH – <http://baztech.icm.edu.pl/>  
Baza Index Copernicus – <http://indexcopernicus.com/>

**Prawa autorskie**

Copyright © Transport Miejski i Regionalny, 2022

**Informacje dodatkowe**

Za treść i formę ogłoszeń oraz reklam Redakcja nie odpowiada.

## Spis treści

<b>Vitalii Naumov, Andrzej Szarata, Hanna Vasiutina</b> .....	<b>3</b>
<i>Krajowy model ciężarowego transportu drogowego na podstawie wyników badań TD-E</i>	
<i>National model of the road cargo transport based on the TD-E survey results</i>	
<b>Krystian Birr</b> .....	<b>10</b>
<i>Metodyka pozyskiwania danych BIG DATA z telefonii komórkowej i możliwości ich wykorzystania w modelowaniu podróży</i>	
<i>Methodology of Big Data acquisition from mobile telephony and possibilities of their use in travel modelling</i>	
<b>Konrad Biszko, Jacek Oskarbski</b> .....	<b>18</b>
<i>Modelowanie emisji z wykorzystaniem symulacji mikroskopowych</i>	
<i>Emissions modelling using microscopic traffic simulation</i>	
<b>Robert Kruk, Przemysław Brona</b> .....	<b>26</b>
<i>Wartości dodane gałęzi gospodarki jako czynniki determinujące zmiany w przewozach poszczególnych grup ładunków</i>	
<i>Value-added sectors of the economy as determinants of changes in the transport of particular groups of cargo</i>	

**Reklama w „Transporcie Miejskim i Regionalnym”**

Koszt reklamy w czasopiśmie wynosi:

4. strona okładki (kolor)	5000 zł + VAT
2., 3. strona okładki (kolor)	3500 zł + VAT
jedna strona wewnątrz numeru (cz.-b.)	1500 zł + VAT
jedna strona wewnątrz numeru (kolor)	2500 zł + VAT

Cena tekstów sponsorowanych oraz wkładek tematycznych do uzgodnienia.  
W przypadku reklam w kilku kolejnych numerach możliwy upust do 20%.  
Zgłoszenia w sekretariacie redakcji – Janina Mrowińska, tel. (12) 658-93-74

**Punktacja artykułów**

Nowy Komunikat Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 31 lipca 2019 r. w sprawie wykazu czasopism naukowych wraz z przypisaną liczbą punktów w obszarze transportu obejmuje tylko niektóre wydawane w Polsce anglojęzyczne czasopisma. *Transport Miejski i Regionalny* nie znajduje się na liście, ale był poprzednio punktowany zatem ma przypisane 5 punktów.

**Prenumerata TMiR w 2022 roku**

Cena egzemplarza – **25 zł** (zagraniczna – **12 euro** z kosztami przesyłki)  
Koszt prenumeraty półrocznej – **150 zł** (zagraniczna – **72 euro** z kosztami przesyłki)  
Koszt prenumeraty rocznej – **300 zł** (zagraniczna – **144 euro** z kosztami przesyłki)  
Studenci – 50% zniżki (na podstawie kserokopii aktualnej legitymacji studenckiej)  
Zamówienia: Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej Oddział w Krakowie  
Sklep internetowy: <http://www.sitk.org.pl/sklep> (prenumerata oraz sprzedaż numerów archiwalnych)  
Płatność: konto: 43 1240 4722 1111 0000 4859 0666

## Streszczenia angielskie – Abstracts in English

**Vitalii Naumov, Andrzej Szarata, Hanna Vasiutina**

*National model of the road cargo transport based on the TD-E survey results*

**Abstract:** Simulation models of transport systems are a key tool for addressing many issues in the field of management of these systems. The methodologies for creating such models use data sets on both transport infrastructure and demand for the freights or passenger transport, however, many factors are considered based on assumptions due to the complexity. This article describes the approach to modeling the cargo transportation system for road transport in Poland based on data obtained by the Central Statistical Office from the TD-E survey. This approach avoids many assumptions about the demand as the demand parameters are estimated based on a sample representing the general population – a set of all economic entities generating freight traffic. Basic procedures in the developed approach have been implemented as Python scripts. As a result of the use of the proposed methodology, a country-wide road transport model was obtained based on the TD-E survey from 2018. The adequacy of the developed model was assessed based on the results of the General Traffic Survey from 2015. The obtained model is of satisfactory quality (the coefficient of determination equals 0.62), which can be improved after calibrating the space resistance functions and improving the traffic distribution procedure.

**Key words:** road freight transport, traffic studies, simulation model.

**Krystian Birr**

*Methodology of Big Data acquisition from mobile telephony and possibilities of their use in travel modelling*

**Abstract:** The objective of this article is to present examples of possible data sources of great volume (Big Data) with particular emphasis on methods of obtaining data from mobile networks (SIM cards) and potential for its application in travel modelling on a macroscopic level. Based on experience gained during purchasing Big Data from several providers for regional government units in the Pomeranian voivodeship, the most essential methodical issues of data collecting and verification about population location and trips were described.

**Key words:** road transport, Big Data, travel modelling.

**Konrad Biszko, Jacek Oskarbski**

*Emissions modelling using microscopic traffic simulation*

**Abstract:** The article deals with issues related to modeling of exhaust emissions using microscopic traffic simulations. The aim of the study was to develop a traffic model that can be used to calculate vehicle emissions taking into account the type of intersection and traffic volumes. The article focuses on fuel consumption and carbon dioxide emission values. The literature was analyzed for factors affecting emissions that depend on human, vehicle, and infrastructure. Mathematical models were reviewed to calculate instantaneous values, often related to fuel consumption, which form the basis for estimating emissions. The selected model was implemented in

a microsimulation software module to analyze emissions as a function of traffic volume at a roundabout intersection and a priority intersection. The results are presented for variants of network models that include only the approach and crossing of the intersection and those that independently account for vehicle acceleration beyond the intersection. The final part of the article discusses the selected assumptions that can be taken into account in the analyses and have an impact on the results obtained. It also discusses the issues of model accuracy and proposes solutions that enable an increase in the level of detail of obtained results.

**Key words:** traffic modelling, exhaust emission modelling, CO<sub>2</sub> emissions.

**Robert Kruk, Przemysław Brona**

*Value-added sectors of the economy as determinants of changes in the transport of particular groups of cargo*

**Abstract:** The article presents a methodology for forecasting railway and road transport of goods based on macroeconomic factors which are the values added of specific sectors of the economy. The amounts of values added determine the role of a particular sector of the economy in creating GDP. In the case of sectors considered to be transport-intensive, they may also specify the demand for transport of particular groups of goods. It is possible to forecast the annual freight transport in the considered time period based on the estimated rates of changes in transport depending on the estimated changes in the values added of individual transport modes defined as transport-intensive. Changes in the land transport are specified separately for defined groups of goods depending on the economic sectors to which they are assigned. Railway transport of goods in a specific year in each specific groups of goods is defined as the share of railway transport in freight land transport. Railway transport share indexes are also a function of changes in the amount of value added by each sector of the economy. The paper also presents a methodology for defining flexibility function for both changes in transport in specific groups of goods as well as the share of railway transport in the land freight transport. The methodology can be used in developing forecasts for transportation infrastructure feasibility studies documentation.

**Key words:** transport, railway transport, transport of goods, transport forecasts.

**VITALII NAUMOV**

dr hab. inż. prof. dr hab. inż.,  
Politechnika Krakowska,  
ul. Warszawska 24, Kraków 31-155,  
tel.: +48 12 374 30 83,  
e-mail: vitalii.naumov@pk.edu.pl

**ANDRZEJ SZARATA**

prof. dr hab. inż., Politechnika  
Krakowska, ul. Warszawska 24, Kraków  
31-155, e-mail: aszrata@pk.edu.pl

**HANNA VASIUTINA**

mgr inż., Politechnika Krakowska, ul.  
Warszawska 24, Kraków 31-155, e-mail:  
hanna.vasiutina@doktorant.pk.edu.pl

# Krajowy model ciężarowego transportu drogowego na podstawie wyników badań TD-E<sup>1</sup>

**Streszczenie:** Modele symulacyjne systemów transportowych są kluczowym narzędziem do rozwiązywania wielu zagadnień z zakresu zarządzania tymi systemami. Metodologie tworzenia tych modeli wykorzystują zestawy danych zarówno o infrastrukturze transportowej, jak i o popycie na dostawę towarów lub przewozy pasażerów, jednak w tym zakresie wiele czynników uwzględniano na podstawie przypuszczeń z powodu złożoności modelowanych obiektów. W niniejszym artykule opisano podejście do modelowania systemu przewozów towarowych transportem drogowym w skali całej Polski, w oparciu o dane uzyskiwane przez Główny Urząd Statystyczny na podstawie badania TD-E. Takie podejście pozwala uniknąć wielu przypuszczeń dotyczących popytu na przewozy towarowe, ponieważ parametry tego popytu są oszacowywane w oparciu o próbkę reprezentującą populację generalną – zbiór wszystkich podmiotów gospodarczych kraju generujących ruch towarowy. Podstawowe procedury w opracowanym podejściu do modelowania systemu transportu towarowego zaimplementowano w postaci skryptów w języku Python. W wyniku wykorzystania proponowanej metodologii uzyskano model ciężarowego transportu drogowego w skali całego kraju na podstawie danych badania TD-E z roku 2018. Ocenę adekwatności opracowanego modelu przeprowadzono w oparciu o wyniki Generalnego Pomiaru Ruchu z roku 2015 na podstawie współczynnika determinacji jako miary jakości. Uzyskany model charakteryzuje się zadowalającą jakością (wartość współczynnika determinacji wyniosła 0.62), która może być poprawiona po kalibracji funkcji oporu przestrzeni oraz udoskonalenia procedury rozkładu ruchu na sieć drogową.

**Słowa kluczowe:** transport drogowy ładunków, badania ruchu, model symulacyjny.

## Wprowadzenie

Modele systemów transportowych pozostają od wielu lat najpotężniejszym, a przy tym podstawowym, instrumentem do przeprowadzenia badań złożonych rzeczywistych systemów transportowych, analizy ich podsystemów oraz badania relacji między poszczególnymi elementami systemów [1]. Rezultaty uzyskane w wyniku dokładnej analizy modeli transportowych pomagają naukowcom, decydentom i planistom transportu w zrozumieniu i interpretacji rzeczywistych procesów oraz służą jako narzędzie do rozwiązywania różnych problemów i wyzwań w dziedzinie transportu.

W związku z szybkim postępem technologicznym, wzrostem gospodarczym i procesami urbanizacyjnymi jednym z najpoważniejszych wyzwań w zakresie transportu stał się problem szybkiego wzrostu zapotrzebowania na usługi

transportowe, przekraczającego możliwości jego zaspokojenia. Jako rozwiązanie można zaproponować rozwój bardziej zrównoważonych systemów transportowych, które są w stanie zaspokoić istniejące potrzeby w przewozach towarowych i pasażerskich [2], zapewnić poprawę efektywności transportu i przejście na elektryfikację pojazdów drogowych [3], zagwarantować przejście od ciężkich pojazdów drogowych do pojazdów lekkich i transportu kolejowego [4].

Jednym z głównych celów modelowania systemów transportowych jest symulacja ruchu pojazdów do dalszej analizy, przewidywania warunków ruchu oraz optymalizacji sieci transportowej. Obecnie w literaturze naukowej prezentowana jest duża liczba różnorodnych modeli do symulacji transportu. Modele te wymagają szczegółowego scharakteryzowania wejściowych parametrów ruchu i infrastruktury transportowej dotyczących rzeczywistych warunków ruchu. Istotnym elementem modelowania transportu są źródła i metody pozyskiwania, przetwarzania i walidacji danych do symulacji [5]. Wśród najczęstszych źródeł danych znajdują się kwestionariusze i wywiady, istniejąca literatura, raporty statystyczne (krajowe badanie gospodarstw domowych, dane o ruchu drogowym i ludności, zbiór danych z zarządu dróg itp.), informacje gromadzone „w terenie”, a także informacje pozyskiwane z inteligentnych systemów transportowych (z systemów Floating Car Data lub systemu opłat drogowych).

Modele symulacji ruchu są podzielone na różne grupy w zależności od parametrów wejściowych, stopnia szczegółowości uzyskiwanych wyników, obszaru zastosowania oraz innych charakterystyk. W zależności od poziomu szczegółowości modele ruchu dzieli się zwykle na makroskopowe, mezoskopowe, mikroskopowe oraz hybrydowe [6]. Model typu makroskopowego przedstawia przepływ ruchu jako strumień zintegrowany, mikroskopowy model obrazuje zachowanie poszczególnych uczestników procesu transportowego na bardzo precyzyjnym poziomie, podczas gdy mezoskopowy model zawiera cechy obu tych modeli [7]. Wszystkie wymienione modele można wykorzystać do symulacji sieci transportowych o różnej skali (od modelowania obszaru miejskiego do wielkoskalowego modelu całego kraju) przy użyciu różnych programów do symulacji ruchu [8].

Badanie prezentowane w artykule wykonano jako jedno z kluczowych zadań projektu naukowo-badawczego „Inteligentny system produkcji statystyk transportu drogowego i morskiego z wykorzystaniem wielkich wolumenów danych

<sup>1</sup> Wkład autorów w publikację: V. Naumov 40%, A. Szarata 40%, H. Vasiutina 20%.

na rzecz kształtowania polityki transportowej kraju” w ramach Strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych „Społeczny i gospodarczy rozwój Polski w warunkach globalizujących się rynków” GOSPOSTRATEG.

Celem badania było stworzenie modelu symulacyjnego systemu transportu drogowego w skali całego kraju do oszacowania natężenia ruchu na odcinkach sieci drogowej oraz pracy przewozowej, wykonywanej przez pojazdy towarowe.

Wykorzystanie modelu symulacyjnego systemu transportu drogowego Polski zasilanego w czasie rzeczywistym przez aktualne dane statystyczne m.in. pozwala:

- oszacować wielkości generowanego i absorbowanego ruchu ciężarowego w rejonach komunikacyjnych bez przeprowadzenia kosztownych badań ankietowych,
- prognozować pracę przewozową generowaną przez jednostki gospodarcze dla przewozów krajowych oraz zagranicznych,
- oszacować obciążenie poszczególnych odcinków sieci drogowej.

Istotnym ograniczeniem w projekcie przy opracowaniu modelu systemu transportowego był brak możliwości stosowania specjalistycznych programów komputerowych (PTV Visum lub Aimsun), ponieważ zakup licencji komercyjnych dla podobnego oprogramowania do wykorzystania przez użytkownika końcowego (Główny Urząd Statystyczny) nie był przewidziany w budżecie tego projektu.

### Metodyka stworzenia modelu symulacyjnego

Opracowana metodyka stworzenia modelu symulacyjnego systemu transportu drogowego przewiduje realizację następujących etapów (implementację poszczególnych podsystemów):

1. Stworzenie modelu sieci transportowej.
2. Wyodrębnienie rejonów komunikacyjnych.
3. Opracowanie modelu popytu transportowego (generacja oraz rozkład przestrzenny ruchu).
4. Rozkład przewozów na sieć drogową.

Ponieważ symulacje systemu transportu drogowego w skali całego kraju są procedurami czasochłonnymi, wymagającymi dużej ilości zasobów obliczeniowych, w celu zaimplementowania modelu w języku Python opracowano specjalistyczne oprogramowanie.

### Model sieci transportowej

Podstawą modelu matematycznego sieci transportowej jest graf, wierzchołkami którego są skrzyżowania, a krawędziami – odcinki sieci drogowej:

$$\mathbf{G} = \langle \mathbf{N}, \mathbf{L} \rangle,$$

gdzie:

- $\mathbf{G}$  – model sieci drogowej,
- $\mathbf{N}$  – zbiór wierzchołków – wszystkich skrzyżowań uwzględnionych w modelu sieci drogowej,
- $\mathbf{L}$  – zbiór krawędzi – wszystkich odcinków sieci drogowej uwzględnionych w modelu.

Każdy wierzchołek  $\eta_i$  w grafie  $\mathbf{G}$  opisany jest na podstawie zestawu atrybutów:

$$\eta_i = \langle code_i, lat_i, lon_i, out_i, in_i \rangle, \forall \eta_i \in \mathbf{N}, i = 1 \dots N_N,$$

gdzie:

$code_i$  – unikatowy całkowitoliczbowy kod  $i$ -tego wierzchołka,  $code_i \in \mathbb{N}^+$ ,

$lat_i$  oraz  $lon_i$  – współrzędne geograficzne  $i$ -tego wierzchołka (szerokość i długość),

$out_i$  – zbiór wszystkich krawędzi grafu, dla których  $i$ -ty wierzchołek jest punktem źródłowym,  $out_i \subset \mathbf{L}$ ,

$in_i$  – zbiór wszystkich krawędzi, dla których  $i$ -ty wierzchołek jest punktem docelowym,  $in_i \subset \mathbf{L}$ ,

$N_N$  – liczba wierzchołków w grafie.

Poszczególne krawędzie  $\lambda_j$  w grafie  $\mathbf{G}$ , reprezentującym sieć transportową, charakteryzowane są następującym zestawem atrybutów:

$$\lambda_j = \langle code_j, \eta_j^{out}, \eta_j^{in}, params_j \rangle, \forall \lambda_j \in \mathbf{L}, j = 1 \dots N_L,$$

gdzie:

$code_j$  – unikatowy całkowitoliczbowy kod  $j$ -tej krawędzi,  $code_j \in \mathbb{N}^+$ ,

$\eta_j^{out}$  oraz  $\eta_j^{in}$  – wierzchołki źródłowy oraz docelowy  $j$ -tej krawędzi,  $\eta_j^{out} \in \mathbf{N}, \eta_j^{in} \in \mathbf{N}$ ,

$params_j$  – zestaw parametrów numerycznych, charakteryzujących  $j$ -tą krawędź (długość odcinka sieci drogowej, liczba pasów ruchu, kod kategorii drogi, itp.),

$N_L$  – liczba krawędzi w grafie.

Jako dane wejściowe do modelu sieci drogowej, wykorzystywane są parametry aktualnego regionalnego modelu ruchu stworzonego w ramach projektu NCBR i GDDKiA „Zasady prognozowania ruchu drogowego z uwzględnieniem innych środków transportu” (numer wniosku RID-I/62). Dane wejściowe do modelu grafu z shape-pliku, zawierającego parametry sieci transportowej, pobierane są w środowisku QGIS (stworzono warstwę wierzchołków oraz eksportowano parametry sieci do csv-pliku, dokonując rozszerzenia współrzędnych warstwy wierzchołków w standardzie przestrzennego systemu WGS84). W wyniku uzyskano model sieci transportu drogowego Polski, który zawiera 13 239 wierzchołków oraz 15 010 krawędzi. Reprezentację graficzną modelu sieci transportu drogowego, stworzonego za pomocą opracowanego oprogramowania, przedstawiono na rysunku 1 (wykres stworzono z wykorzystaniem narzędzi pakietu *networkx*).

Opracowany model sieci drogowej jest podstawą dla kolejnych etapów procesu modelowania systemu transportowego kraju.



Rys. 1. Reprezentacja modelu sieci drogowej Polski stworzonego za pomocą opracowanego oprogramowania  
Źródło: opracowanie własne

### Rejony komunikacyjne

Rejony komunikacyjne w modelu systemu transportu drogowego kraju przyjęto na podstawie aktualnego podziału terytorialnego kraju na rejony (rejestr TERYT). Łączna liczba rejonów komunikacyjnych w opracowanym modelu wyniosła 2 515.

Dla każdego z rejonów komunikacyjnych w modelu systemu transportowego określa się centrum ciężkości – centroid. Centroidy definiowane są w modelu jako wierzchołki grafu, są one podłączane do sieci transportowej za pomocą konektorów – wirtualnych odcinków sieci drogowej implementowanych jako krawędzie z zerowymi parametrami numerycznymi.

Procedurę zdefiniowania parametrów centroid dla rejonów komunikacyjnych opracowano w postaci skryptu. W tym celu zastosowano bibliotekę specjalistyczną OpenCage Geocoder (<https://opencagedata.com>). Dla każdej jednostki terytorialnej zdefiniowano współrzędne GPS jej centrum ciężkości. Jako dane wejściowe opracowany skrypt wykorzystuje plik zawierający nazwy jednostek terytorialnych oraz odpowiednie identyfikatory TERYT. Wynikiem uruchomienia skryptu jest plik zawierający dodatkowo współrzędne GPS poszczególnych centroid. Reprezentację graficzną położenia centroid rejonów komunikacyjnych oszacowanego na podstawie opracowanego skryptu, przedstawiono na rysunku 2.

### Model popytu transportowego

Model popytu transportowego proponuje się kształtować na podstawie liczby podmiotów gospodarczych zarejestrowanych w poszczególnych jednostkach terytorialnych (według danych GUS) oraz na podstawie opracowania wyników badań ankietowych TD-E pozwalających na okre-



Rys. 2. Położenie centroid rejonów komunikacyjnych w modelu systemu transportowego  
Źródło: opracowanie własne

ślenie ruchu generowanego przez podmioty gospodarcze w zależności od ich rodzaju.

Proponowana metodyka budowy modelu popytu transportowego zawiera następujące etapy:

- określenie liczby podmiotów gospodarczych z rozbięciem na grupy według Polskiej Klasyfikacji Działalności (PKD 2007) oraz według wielkości przedsiębiorstw (duże, średnie, małe) dla każdej jednostki terytorialnej,
- oszacowanie ruchu ciężarowego generowanego przez różnego rodzaju jednostki gospodarcze w skali rocznej, oddzielnie dla ruchu źródłowego (podróże mające na celu wywóz towarów z analizowanej jednostki do innych przedsiębiorstw) oraz ruchu docelowego (podróże wykonywane w celu dostawy towarów od innych przedsiębiorstw do analizowanej jednostki),
- określenie potencjałów ruchotwórczych (produkcję oraz atrakcję) jednostek terytorialnych na podstawie ewidencji podmiotów gospodarczych oraz danych o ruchu ciężarowym generowanym przez poszczególne rodzaje jednostek,
- kształtowanie macierzy podróży (rozkładu przestrzennego podróży – więźby ruchu) na podstawie wartości potencjałów ruchotwórczych jednostek terytorialnych.

W celu kształtowania bazy danych, zawierających liczbę podmiotów gospodarczych dla różnych działów (według klasyfikacji PKD 2007 – 57 działów: 01, 02, 03, 05, ..., 81, 82) oraz różnych wielkości przedsiębiorstw (duże, średnie, małe) dla poszczególnych jednostek terytorialnych opracowano skrypt, który jako dane wejściowe wykorzystuje csv-pliki zawierające liczbę przedsiębiorstw dla każdej klasy PKD 2007 zarejestrowanych w odpowiedniej jedno-

stce terytorialnej. Wynikiem uruchomienia skryptu są csv-pliki, które zawierają dla każdej jednostki terytorialnej liczbę przedsiębiorstw reprezentujących każdy z działów klasyfikacji PKD 2007.

### Modelowanie popytu na podróże krajowe

W celu oszacowania średniego ruchu ciężarowego generowanego przez różnego rodzaju jednostki gospodarcze, oszacowania wartości potencjałów ruchotwórczych oraz kształtowania macierzy podróży opracowano skrypt w języku Python. Jako dane wejściowe, przygotowany skrypt wykorzystuje następujące informacje:

- dane o jednostkach terytorialnych,
- dane o liczbie podmiotów gospodarczych zarejestrowanych w poszczególnych jednostkach terytorialnych (dla dużych, średnich oraz małych przedsiębiorstw),
- dane roczne z kwestionariuszy TD-E (w niniejszym opracowaniu analizowano dane za rok 2018 wielkością 151 532 rekordy).

Wynikiem wykonania skryptu jest csv-plik zawierający macierz podróży.

Macierz podróży  $T$  jest macierzą kwadratową wartości całkowitoliczbowych: wiersze macierzy reprezentują jednostki terytorialne występujące jako źródła podróży, a kolumny macierzy odpowiadają jednostkom występującym jako cel podróży. Elementami macierzy podróży mogą być również wartości zmiennoprzecinkowe, jeżeli macierz reprezentuje wartości oczekiwane liczby podróży.

Wartości macierzy podróży  $\tau_{ij}$  wskazują na średnią liczbę podróży wykonywanych z  $i$ -tego do  $j$ -tego rejonu komunikacyjnego. Elementy diagonalne macierzy podróży, znajdujące się na głównej przekątnej, reprezentują ruch wewnętrzny w rejonach.

Element macierzy podróży jest oszacowywany na podstawie modelu grawitacyjnego:

$$\tau_{ij} = \frac{P_i \cdot A_j \cdot f_{ij}}{\sum_{k=1}^{N_T} A_k \cdot f_{ik}}$$

gdzie:

- $P_i$  – produkcja dla  $i$ -tego rejonu komunikacyjnego,
- $A_j$  – atrakcja dla  $j$ -tego rejonu komunikacyjnego,
- $f_{ij}$  – wartość funkcji oporu przestrzeni (charakteryzuje odległość lub czas przejazdu pomiędzy  $i$ -tym a  $j$ -tym rejonem komunikacyjnym),
- $N_T$  – liczba rejonów komunikacyjnych ( $N_T = 2515$ ).

Najczęściej stosowanym podejściem do zdefiniowania funkcji oporu przestrzeni jest wykorzystanie wartości, odwrotnej do kwadratu odległości między rejonami komunikacyjnymi:

$$f_{ij} = L_{ij}^{-2},$$

gdzie:

- $L_{ij}$  – najkrótsza odległość między  $i$ -tym a  $j$ -tym rejonem komunikacyjnym, oszacowana dla istniejącej sieci drogowej [km].

Jeżeli opór przestrzeni nie uwzględnia się w modelu popytu transportowego, dla wszystkich par  $i$  oraz  $j$  przyjmuje się  $f_{ij} \equiv 1$ .

Produkcję  $P_i$  oraz  $A_i$  atrakcję dla  $i$ -tej jednostki terytorialnej (jednostki terytorialne w modelu są tożsame z rejonami komunikacyjnymi) proponuje się oszacowywać na podstawie danych TD-E w następujący sposób:

$$A_i = \sum_{k=1}^{N_D} (b_{ik} \cdot a_k^{(B)} + m_{ik} \cdot a_k^{(M)} + s_{ik} \cdot a_k^{(S)}),$$

$$P_i = \sum_{k=1}^{N_D} (b_{ik} \cdot p_k^{(B)} + m_{ik} \cdot p_k^{(M)} + s_{ik} \cdot p_k^{(S)}),$$

gdzie:

- $b_{ik}$ ,  $m_{ik}$  oraz  $s_{ik}$  – liczba dużych, średnich oraz małych przedsiębiorstw  $k$ -tego rodzaju zarejestrowanych w  $i$ -tej jednostce terytorialnej,
- $a_k^{(B)}$ ,  $a_k^{(M)}$  oraz  $a_k^{(S)}$  – średnia roczna liczba źródłowych podróży generowanych przez duże, średnie oraz małe przedsiębiorstwo  $k$ -tego rodzaju,
- $p_k^{(B)}$ ,  $p_k^{(M)}$  oraz  $p_k^{(S)}$  – średnia roczna liczba docelowych podróży generowanych przez duże, średnie oraz małe przedsiębiorstwo  $k$ -tego rodzaju,
- $N_D$  – liczba rodzajów jednostek gospodarczych według klasyfikacji PKD 2007 ( $N_D = 57$ ).

Ponieważ w próbce zawierającej wyniki badań TD-E, nie mieszczą się dane o wszystkich kategoriach i rodzajach przedsiębiorstw (dla próbki z roku 2018 brak danych dla 6 kategorii), niektóre wartości dla średniej liczby podróży zostały aproksymowane na podstawie danych dla innych rodzajów podmiotów gospodarczych. Wartości średniej rocznej liczby źródłowych i docelowych podróży dla poszczególnych rodzajów podmiotów gospodarczych są oszacowywane jako wartości średnie arytmetyczne z próbek zawierających liczbę podróży generowanych przez przedsiębiorstwa odpowiedniego rodzaju (według wyników badań TD-E). W przypadku, jeśli próbka z badań TD-E nie zawiera danych o przedsiębiorstwach określonego rodzaju, średnią liczbę podróży generowanych przez takie przedsiębiorstwa przyjmuje się jako wartość zerową. Jeśli w próbce TD-E są dane o podróżach generowanych przez przedsiębiorstwo określonego rodzaju, jednak nie ma danych dla przedsiębiorstw którejś wielkości, to liczba podróży w tym przypadku jest określana jako średnia z liczby podróży dla przedsiębiorstw pozostałych wielkości (dla których dane w próbce TD-E są).

Sumaryczna liczba podróży, oszacowana za pomocą przedstawionej metodyki na podstawie danych badań z TD-E za rok 2018, wynosi w skali rocznej około 11,4 mln podróży krajowych.

Uzyskana macierz podróży jest jednym z parametrów wejściowych dla procedur oszacowania natężenia ruchu na poszczególnych odcinkach sieci drogowej oraz oszacowania pracy przewozowej dla jednostek terytorialnych.

### Modelowanie popytu na podróże zagraniczne

Ruch ciężarowy w połączeniu międzynarodowym proponuje się symulować dla poszczególnych rejonów komunikacyjnych na podstawie liczby przedsiębiorstw zarejestrowanych na terenie rejonów oraz danych dotyczących liczby podróży zagranicznych z próbki TD-E.

Łączna liczba rekordów zawierających dane o podróżach zagranicznych w próbkce TD-E za rok 2018 wynosi 9 669. Są to podróże wykonywane przez przedsiębiorstwa polskie przy dostawie towarów zarówno z za granicy do kraju (łącznie 4 811 podróży) oraz z Polski do krajów zagranicznych (łącznie 4 858 podróży).

Ponieważ próbka z wynikami ankiet TD-E za rok 2018 zawiera dane o podróżach zagranicznych tylko dla 4 414 przedsiębiorstw, zapewnienie poziomu szczegółowości z dokładnością do działu według PKD 2007 (ten poziom szczegółowości jest przyjęty w metodyce oszacowania macierzy podróży krajowych) nie jest możliwe w przypadku modelowania podróży zagranicznych: na podstawie analizowanej próbki TD-E można oszacować wartości średnie liczby rocznie wykonywanych podróży jedynie dla 39 z 57 działów klasyfikatora. Dlatego ocena liczby podróży zagranicznych jest wykonywana z dokładnością do sekcji PKD 2007 (sekcje A, B, C, D, E, F, G, H, K, N). Nie jest również uwzględniany podział przedsiębiorstw na typy według wielkości.

Dla każdej podróży w analizowanej próbkce zdefiniowano kraj, z którym przekracza się granicę Polski. W modelu popytu transportowego zakłada się, że podróż jest wykonywana do (lub z) kraju, granicę którego przekracza pojazd opuszczając Polskę (lub wjeżdżając do Polski). Kraje sąsiadujące w modelu symulacyjnym są przedstawione jako rejony komunikacyjne, których centroidy połączone są z każdym z wierzchołków reprezentujących odpowiednie przejścia graniczne za pomocą krawędzi o zerowej długości. Potencjały ruchotwórcze danych rejonów komunikacyjnych reprezentują w modelu systemu transportowego popyt na przewozy towarowe w odpowiednim kierunku.

Na podstawie wyników analizy danych ankiet TD-E, średnią roczną liczbę podróży zagranicznych  $\tau_{ij}^{(O|D)}$  dla  $i$ -tej jednostki terytorialnej w  $j$ -tym kierunku proponuje się oszacowywać następująco:

$$\tau_{ij}^{(O|D)} = \sum_{k=1}^{N_s} \frac{\theta_{jk}^{(O|D)}}{\delta_k} \cdot (b_{ik} + m_{ik} + s_{ik}), \quad j \in \{BY, CZ, DE, LT, RU, SK, UA\},$$

gdzie:

- $b_{ik}$ ,  $m_{ik}$  oraz  $s_{ik}$  – liczba dużych, średnich oraz małych przedsiębiorstw  $k$ -tego rodzaju zarejestrowanych w  $i$ -tej jednostce terytorialnej,
- $\theta_{jk}^{(O|D)}$  – empiryczna liczba podróży zagranicznych (na podstawie próbki TD-E) wykonanych przez przedsiębiorstwa  $k$ -tego rodzaju w  $j$ -tym kierunku,
- $\delta_k$  – część przedsiębiorstw  $k$ -tego rodzaju w próbkce TD-E,

(0) – podróże z za granicy do Polski – podróże z Polski za granicę,

$N_s$  – liczba rodzajów jednostek gospodarczych według podziału na sekcje, zgodnie z klasyfikacją PKD 2007 ( $N_s = 10$ ).

Według wyników obliczeń na podstawie próbki TD-E za rok 2018, łączna liczba podróży wykonywanych z za granicy do Polski wynosi około 1 498 tys., a łączna liczba podróży z Polski za granicę – około 1 564 tys.

Uzyskana na podstawie przedstawionej metodyki macierz podróży zagranicznych jest parametrem wejściowym dla procedur oszacowania natężenia ruchu oraz pracy przewozowej.

### Rozkład przewozów na sieć drogową

Rozkład podróży na sieć jest wykonywany w następującej kolejności:

- określenie ścieżek podróży na sieci transportowej dla każdej pary rejonów komunikacyjnych, oprócz par, dla których element macierzy podróży jest wartością zerową,
- oszacowanie obciążenia poszczególnych odcinków sieci drogowej (krawędzi grafu) na podstawie wygenerowanych ścieżek podróży.

Określenie ścieżek podróży jest wykonywane na podstawie algorytmu Dijkstra.

Określenie ścieżek jest najbardziej czasochłonną procedurą obliczeniową w proponowanej metodyce. Dla każdego rejonu komunikacyjnego najkrótsze ścieżki do pozostałych rejonów odtwarzane są na podstawie wektora pomocniczego (liczba elementów wektora równa jest liczbie wierzchołków sieci transportowej), którego elementy wskazują na kody wierzchołków znajdujących się na najkrótszej ścieżce. Dla sieci transportu drogowego Polski procedura obliczenia wektora pomocniczego na podstawie algorytmu Dijkstra dla jednego rejonu trwa około 3 minut (procesor i7, RAM 32 Gb), dla wszystkich 2 515 rejonów – około 126 godzin. Nawet po skróceniu czasu obliczeń w wyniku stosowania algorytmu równoległych obliczeń, łączny czas oszacowania macierzy najkrótszych odległości wynosi około 18 godzin (procesor i7, 8 rdzeni, RAM 32 Gb), jest to wynik niezadowalający.

W celu wykorzystania modelu w praktyce zalecane jest poprzednie przygotowanie plików tekstowych zawierających wektory do odtworzenia ścieżek. Łącznie rozmiar plików do kształtowania najkrótszych ścieżek dla wszystkich rejonów komunikacyjnych w opracowanym modelu wynosi 172 Mb. Procedura rozkładu przewozów na sieć drogową dla zestawu wszystkich rejonów terytorialnych kraju, wykonywana na podstawie wcześniej przygotowanych plików z wektorami pomocniczymi, trwa około 20 minut na komputerze z procesorem i7 i pamięcią o dostępie swobodnym wielkością 32 Gb.

### Oszacowanie natężenia ruchu oraz pracy przewozowej na podstawie wyników symulacji

Natężenie ruchu na poszczególnych odcinkach sieci drogowej jest oszacowywane na podstawie wyników uruchomienia procedury rozkładu przewozów na sieć transportową. Dla  $j$ -tego odcinka sieci drogowej natężenie ruchu ciężarowego określa się jako liczbę wszystkich podróży, dla których najkrótsza ścieżka zawiera dany odcinek sieci.

Ścieżkę podróży pomiędzy  $i$ -tym a  $j$ -tym rejonem komunikacyjnym można zdefiniować jako wektor  $\Omega_{ij}$  długością  $N_L$  (liczba krawędzi w graf-modelu sieci transportowej), przy czym każdy element tego wektora jest zmienną zero-jedynkową:

$$\omega_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli ścieżka pomiędzy } i \text{ a } j \text{ rejonem zawiera odcinek } \lambda_k, \\ 0, & \text{w przeciwnym przypadku,} \end{cases}$$

$$\lambda_k \in L, k = 1 \dots N_L,$$

$$i = 1 \dots N_N, j = 1 \dots N_N.$$

Wtedy natężenie ruchu  $\zeta_k$  na  $k$ -tym odcinku  $\lambda_k$  sieci drogowej można oszacować na podstawie następującego wzoru:

$$\zeta_k = \sum_{i=1}^{N_N} \sum_{j=1}^{N_N} \tau_{ij} \cdot \omega_{ijk}.$$

Wyniki oceny natężenia ruchu generowanego łącznie przez podróże krajowe oraz zagraniczne, uzyskane na podstawie opracowanego modelu systemu transportowego oraz z wykorzystaniem danych TD-E z roku 2018, są przedstawione na rysunku 3.

Pracę przewozową w pojazdokilometrach proponuje się określać dla poszczególnych par rejonów komunikacyjnych na podstawie oszacowanej macierzy podróży oraz odległości podróży najkrótszą ścieżką pomiędzy rejonami.

Odległość podróży  $L_{ij}$  pomiędzy  $i$ -tym a  $j$ -tym rejonem komunikacyjnym na podstawie wektora  $\Omega_{ij}$  oblicza się za pomocą wzoru

$$L_{ij} = \sum_{k=1}^{N_L} l_k \cdot \omega_{ijk},$$

gdzie:

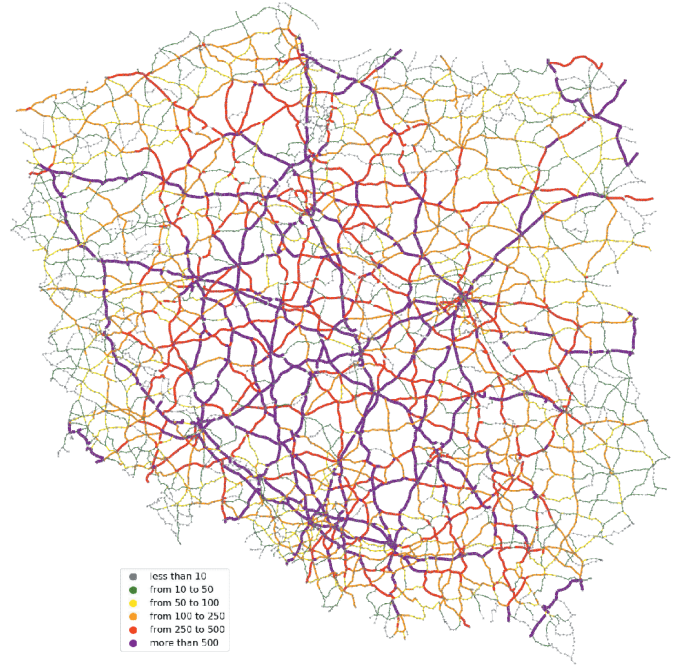
$l_k$  – odległość  $k$ -tego odcinka sieci drogowej [km] (jest podawana w pliku 'links.csv' z danymi o parametrach odcinków sieci lub może być oszacowana na podstawie współrzędnych geograficznych źródłowego i docelowego wierzchołka krawędzi reprezentującej odcinek w modelu sieci transportowej).

Wtedy pracę przewozową  $W_{ij}^{pkm}$  w pojazdokilometrach pomiędzy  $i$ -tym a  $j$ -tym rejonem komunikacyjnym można oszacować następująco:

$$W_{ij}^{pkm} = \tau_{ij} \cdot L_{ij}.$$

Łączna praca przewozowa w pojazdokilometrach dla całego systemu transportowego oszacowywana jest jako suma pracy przewozowej wykonanej dla poszczególnych par rejonów komunikacyjnych:

$$\begin{aligned} W^{pkm} &= \sum_{i=1}^{N_N} \sum_{j=1}^{N_N} W_{ij}^{pkm} = \sum_{i=1}^{N_N} \sum_{j=1}^{N_N} \tau_{ij} \cdot L_{ij} = \\ &= \sum_{i=1}^{N_N} \sum_{j=1}^{N_N} \sum_{k=1}^{N_L} \tau_{ij} \cdot l_k \cdot \omega_{ijk}. \end{aligned}$$



Rys. 3. Wyniki oceny natężenia ruchu łącznie dla podróży krajowych i zagranicznych  
Źródło: opracowanie własne

Pracę przewozową w tonokilometrach określa się na podstawie pracy przewozowej w pojazdokilometrach oraz średniej wagi przewożonego towaru (oszacowanej dla poszczególnych rodzajów podmiotów gospodarczych na podstawie danych TD-E).

Podróże wykonywane pomiędzy parą rejonów komunikacyjnych są różnicowane na podstawie struktury zbioru przedsiębiorstw zarejestrowanych w rejonie źródłowym: gdzie:

$$\tau_{ijk}^{(B)} = \frac{b_{ik} \cdot \tau_{ij}}{\sum_{k=1}^{N_D} (b_{ik} + m_{ik} + s_{ik})},$$

$$\tau_{ijk}^{(M)} = \frac{m_{ik} \cdot \tau_{ij}}{\sum_{k=1}^{N_D} (b_{ik} + m_{ik} + s_{ik})},$$

$$\tau_{ijk}^{(S)} = \frac{s_{ik} \cdot \tau_{ij}}{\sum_{k=1}^{N_D} (b_{ik} + m_{ik} + s_{ik})},$$

$\tau_{ijk}^{(B)}$ ,  $\tau_{ijk}^{(M)}$  oraz  $\tau_{ijk}^{(S)}$  – liczba podróży generowanych pomiędzy  $i$ -tym a  $j$ -tym rejonem komunikacyjnym odpowiednio przez duże, średnie oraz małe przedsiębiorstwa  $k$ -tego rodzaju.

Wtedy pracę przewozową  $W_{ij}^{tkm}$  w tonokilometrach pomiędzy  $i$ -tym a  $j$ -tym rejonem komunikacyjnym można oszacować w następujący sposób:

$$W_{ij}^{tkm} = L_{ij} \cdot \sum_{k=1}^{N_D} (\tau_{ijk}^{(B)} \cdot \bar{q}_k^{(B)} + \tau_{ijk}^{(M)} \cdot \bar{q}_k^{(M)} + \tau_{ijk}^{(S)} \cdot \bar{q}_k^{(S)}), \text{ lub}$$

$$W_{ij}^{tkm} = \tau_{ij} \cdot L_{ij} \cdot \frac{\sum_{k=1}^{N_D} (b_{ik} \cdot \bar{q}_k^{(B)} + m_{ik} \cdot \bar{q}_k^{(M)} + s_{ik} \cdot \bar{q}_k^{(S)})}{\sum_{k=1}^{N_D} (b_{ik} + m_{ik} + s_{ik})},$$

gdzie:

$\bar{q}_k^{(B)}$ ,  $\bar{q}_k^{(M)}$  oraz  $\bar{q}_k^{(S)}$  – średnia masa towaru przewożonego dla odpowiednio dużych, średnich oraz małych przedsiębiorstw  $k$ -tego rodzaju [ton].



Łączna praca przewozowa  $W^{tkm}$  w tonokilometrach dla całego systemu transportu drogowego oszacowywana jest jako suma wartości pracy przewozowej dla poszczególnych par rejonów komunikacyjnych:

$$W^{tkm} = \sum_{i=1}^{N_N} \sum_{j=1}^{N_N} W_{ij}^{tkm} = \sum_{i=1}^{N_N} \sum_{j=1}^{N_N} \tau_{ij} \cdot L_{ij} \cdot \frac{\sum_{k=1}^{N_D} (b_{ik} \bar{q}_k^{(B)} + m_{ik} \bar{q}_k^{(M)} + s_{ik} \bar{q}_k^{(B)})}{\sum_{k=1}^{N_D} (b_{ik} + m_{ik} + s_{ik})}$$

Dla macierzy kwadratowej, elementami której są wartości  $W_{ij}^{tkm}$ , pracę przewozową  $W_{(prod)i}^{tkm}$  generowaną przez poszczególne jednostki terytorialne, można oszacować jako sumę elementów w odpowiednich wierszach macierzy:

$$W_{(prod)i}^{tkm} = \sum_{j=1}^{N_N} W_{ij}^{tkm}$$

Odpowiednio, pracę przewozową  $W_{(attr)j}^{tkm}$  konsumowaną przez jednostki terytorialne, można oszacować jako sumę elementów w kolumnach macierzy:

$$W_{(attr)j}^{tkm} = \sum_{i=1}^{N_N} W_{ij}^{tkm}$$

### Ocena adekwatności modelu systemu transportowego

Ocenę adekwatności opracowanego modelu systemu transportu drogowego kraju proponuje się wykonywać na podstawie współczynnika determinacji  $R^2$  dla zestawu natężeń ruchu towarowego na wybranych odcinkach sieci drogowej oraz odpowiadającego im zestawu natężeń, wartości, które uzyskano empirycznie w wyniku pomiarów:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{\tilde{N}_L} (\zeta_i - \hat{\zeta}_i)^2}{\sum_{i=1}^{\tilde{N}_L} (\hat{\zeta}_i - \bar{\zeta})^2}$$

gdzie:

- $\zeta_i$  oraz  $\hat{\zeta}_i$  – teoretyczne (zmodelowane) oraz empiryczne (obserwowane w badaniach terenowych) wartości natężeń na  $i$ -tym odcinku sieci drogowej [poj./doba],
- $\bar{\zeta}$  – średnia arytmetyczna wartość natężenia z zestawu wartości empirycznych [poj./doba],
- $\tilde{N}_L$  – liczba odcinków sieci drogowej, na których zostały przeprowadzone pomiary natężenia ruchu podczas badań terenowych.

Jako wartości referencyjne do oszacowania adekwatności modelu są wykorzystywane wyniki ostatniego Generalnego Pomiaru Ruchu (GPR 2015). Badaniem GPR 2015 zostały objęte 88.7% wszystkich odcinków sieci drogowej (średnie dobowe natężenia zostały oszacowane dla 13 315 odcinków z 15 010 odcinków sieci drogowej). Porównanie wartości teoretycznych natężeń ruchu towarowego, generowanego łącznie przez podróże krajowe i zagraniczne, z odpowiednimi wartościami empirycznymi przeprowadzono dla zestawu tych odcinków sieci, na których wartości empiryczne są znane.

Wartość współczynnika determinacji, obliczonego dla empirycznych natężeń uzyskanych w wyniku GPR 2015 oraz natężeń ruchu oszacowanych na podstawie opracowanego modelu, wynosi 0.62, co świadczy o zadowalającym dopasowaniu oraz – o adekwatności modelu.

Dla każdego ze zbadanych odcinków sieci drogowej dodatkowo oszacowano bezwzględny błąd modelu  $\varepsilon_i$ :

$$\varepsilon_i = \frac{|\zeta_i - \hat{\zeta}_i|}{\hat{\zeta}_i} \cdot 100\%$$

Wyniki oceny bezwzględnego błędu modelu pozwalają stwierdzić, że średni błąd dla wszystkich sprawdzanych odcinków sieci wynosi 10,34%. Wśród wszystkich empirycznie zbadanych odcinków zdefiniowano odcinki, dla których błąd modelu jest niższy niż 5% (lub – stopień dopasowania jest powyżej 95%).

### Podsumowanie

Zaproponowana metodologia modelowania ciężarowego transportu drogowego opiera się na reprezentacyjnych danych wykorzystywanych w procedurach modelowania popytu, co pozwala uniknąć stosowania czasochłonnych heurystyk do symulacji popytu na podstawie modeli ekonometrycznych. Uzyskiwany w jej wyniku model systemu transportowego cechuje się zadowalającą adekwatnością, która może być poprawiona po zastosowaniu bardziej zaawansowanych technik kalibracji parametrów modelu.

Jako zaletę opracowanego podejścia należy wymienić stosowanie oprogramowania z otwartym kodem, bez korzystania z narzędzi komercyjnych. Umożliwia to wykorzystanie proponowanej metodologii przez Główny Urząd Statystyczny w celu oszacowania pracy przewozowej generowanej przez poszczególne jednostki terytorialne oraz prognozowania średniego natężenia ruchu na wybranych odcinkach sieci drogowej kraju.

Jako kierunki dalszych prac nad poprawą modelu zaplanowano refaktoryzację algorytmu rozkładu ruchu poprzez zdefiniowanie ścieżek na podstawie czasu przejazdu oraz poprawę wydajności algorytmu ustalenia najkrótszych ścieżek poprzez implementację obliczeń równoległych.

### Literatura

1. Cascetta E., *Transportation systems analysis. Models and applications*, 2nd ed., Springer: New York, USA, 2009.
2. Janić M., *Transport systems: Modelling, planning, and evaluation*, 1st ed., CRC Press: Boca Raton, USA, 2017.
3. Khalili S., Rantanen E., Bogdanov D., Breyer C., *Global transportation demand development with impacts on the energy demand and greenhouse gas emissions in a climate-constrained world*. Energies 2019, 12, 3870.
4. de Blas I., Mediavilla M., Capellán-Pérez I., Duce C., *The limits of transport decarbonization under the current growth paradigm*, "Energy Strategy Reviews", 2020, 32, 100543.
5. Naumov V., Szarata A., Vasiutina H., *A Methodological approach to the real-time data analysis from the viaTOLL system*, Lecture Notes in Networks and Systems 2021, 208.
6. Storani F., Di Pace, R., Bruno F., Fiori C., *Analysis and comparison of traffic flow models: a new hybrid traffic flow model vs benchmark model*, "European Transport Research Review" 2021, 13, 58.
7. Möller D.P.F., *Introduction to transportation analysis, modeling and simulation*, Springer: London, UK, 2014.
8. Pell A., Meingast, A., Schauer O., *Trends in Real-time traffic simulation*, "Transportation Research Procedia", 2017, 25.

# Metodyka pozyskiwania danych big data z telefonii komórkowej i możliwości ich wykorzystania w modelowaniu podróży<sup>1</sup>

**KRYSTIAN BIRR**

dr inż., Politechnika Gdańska,  
Wydział Inżynierii Lądowej  
i Środowiska, Katedra Inżynierii  
Drogowej i Transportowej,  
ul. Narutowicza 11/12,  
80-233 Gdańsk, tel. 58 3472731,  
e-mail: krystian.birr@pg.edu.pl

**Streszczenie:** Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie przykładowych możliwych źródeł danych o wielkim wolumenie (big data) ze szczególnym uwzględnieniem metody pozyskania danych z telefonii komórkowej – kart SIM oraz potencjału ich wykorzystania w modelowaniu podróży na poziomie makroskopowym. Na podstawie doświadczeń zdobytych podczas zakupu danych typu big data od kilku dostawców dla jednostek samorządowych w województwie pomorskim opisano najważniejsze zagadnienia metodyczne związane problematyką pozyskania i weryfikacji danych big data o rozmieszczeniu i przemieszczeniach ludności.

**Słowa kluczowe:** ruch drogowy, big data, modelowanie podróży.

## Wprowadzenie

Rozwój technologii w ostatnich dziesięcioleciach oraz konieczność cyfryzacji i przetwarzania ogromnej ilości danych stworzyły nowe możliwości pozyskiwania informacji o funkcjonowaniu systemów wykorzystywanych w codziennym życiu. Większość organizacji, bez względu na wielkość, profil działalności i zasoby finansowe, podejmuje działania w zakresie pozyskiwania informacji, ich gromadzenia i przetwarzania. W zakresie planistycznym związanym z rozwojem przestrzeni oraz systemu transportowego, nowe technologie umożliwiają gromadzenie użytecznych informacji, które mogą stać się fundamentem kreowania polityki przestrzennej i szerzej – polityki rozwoju. Współcześnie podejmowanie właściwych decyzji planistycznych w projektowaniu zagospodarowania przestrzennego czy też szerzej podejmowanych działań w sferze publicznej wymaga stosowania właściwych narzędzi rozpoznania i diagnozy stanu przestrzeni, a także przy ich użyciu dokonywania prognoz zmian. Jednym z takich narzędzi są wielopoziomowe modele transportowe przetwarzające i dostarczające dane wspomagające decyzje dotyczące rozwoju transportowego analizowanego obszaru. Do właściwego działania tych narzędzi niezbędne jest jednak pozyskanie wiarygodnego i reprezentatywnego zbioru danych. Obecnie podstawą ich pozyskiwania są kompleksowe badania ruchu, zlecane regularnie w największych miastach, a ostatnimi laty także na poziomie metropolii, regionu, częściowo także kraju.

Postępujący rozwój technologiczny stworzył nowe możliwości zdobywania danych, które w zasadzie mogą być pozyskiwane bez jakiegokolwiek zaangażowania człowieka. Dotyczy to przykładowo danych z systemów kart płatniczych, sieci telefonii komórkowej czy też samych pojazdów. Źródła te, wykorzystywane przez administrację publiczną, mogą być podstawą lub elementem szeregu wniosków istotnych dla bieżącego i strategicznego zarządzania proce-

sami rozwojowymi w dynamicznie zmieniającej się rzeczywistości.

Celem artykułu jest przedstawienie przykładowych możliwych źródeł danych o wielkim wolumenie (big data), ze szczególnym uwzględnieniem metody pozyskania danych z telefonii komórkowej – kart SIM oraz potencjału ich wykorzystania w modelowaniu podróży na poziomie makroskopowym.

## Stan badań w wykorzystywaniu kart SIM w modelowaniu podróży

W literaturze światowej zagadnienie praktycznego wykorzystania kart SIM w modelowaniu podróży nie jest szeroko rozwijane, choć oczywiście również prowadzone są badania w tym zakresie. W jednej z pierwszych publikacji [1] związanych z tym zagadnieniem dokonano opisu metody generowania macierzy źródło-miejsce docelowe (O-D) z wykorzystaniem „ruchomych” danych telefonicznych. Autorzy skoncentrowali się na modelowaniu rozkładu dobowego podróży oraz identyfikacji rozkładu przestrzennego. Przedstawiono także możliwość wykorzystania zbudowanego modelu podróży do prognozowania ruchu na odcinkach sieci transportowej z wykorzystaniem oprogramowania PTV VISUM. Dane z telefonii komórkowej wykorzystano zatem do kalibracji i weryfikacji modelu.

Nieco inny aspekt wykorzystania danych o wielkim wolumenie poruszono między innymi w publikacjach [2, 3] odnoszących się do danych z sondowania pojazdów (*floating car data* – FCD), czyli danych pozyskiwanych z urządzeń zainstalowanych w pojazdach, do których można zaliczyć także aplikacje nawigacyjne. Autorzy wskazują na możliwość wykorzystania tego rodzaju danych zarówno do szacowania rozkładu przestrzennego ruchu samochodowego, a także do analiz prędkości przejazdu na odcinkach sieci transportowej.

Najnowsze publikacje wskazują na możliwość wykorzystania danych z telefonii komórkowej w badaniach przepływu ludności w trakcie pandemii COVID-19 [4]. W pracy zaproponowano wykorzystanie danych roamingowych do modelowania podróży międzynarodowych. Wykorzystano modele grawitacyjne i radiacyjne do uchwycenia przepływów przed i podczas wprowadzania ograniczeń w przemieszczaniu się. Ponieważ tradycyjne modele podróży mają pewne ograniczenia w zakresie modelowania podróży, dla takich stanów w artykule autorzy przedstawili propozycję COVID Gravity Model (CGM), czyli rozszerzenie tradycyjnego modelu grawitacyjnego, który jest dostosowany do scenariusza pandemii, bazując

<sup>1</sup> ©Transport Miejski i Regionalny, 2022.

na danych z kart SIM z okresu trwania pandemii. Pomijając kwestię wyzwania związanego z prognozowaniem ruchu, powyższe podejście również ukazuje potencjał wykorzystania tego rodzaju danych.

Wśród publikacji polskich autorów swoje szerokie doświadczenie w tym zakresie przedstawiali A. Brzeziński, T. Dybicz oraz Ł. Szymański, którzy są pionierami w zakresie wykorzystywania danych z kart SIM w modelowaniu podróży. Na podstawie doświadczeń sporządzili publikacje opisujące możliwość wykorzystania danych big data w budowie modeli oraz kalibracji macierzy podróży [5, 6, 7]. W swoich publikacjach opisali analizy podróży na podstawie kart SIM w obszarze aglomeracji warszawskiej oraz wykorzystaniu tych danych na etapie korekty generacji ruchu oraz wspomagania modelowania rozkładu przestrzennego, wykazując ostatecznie wysoki stopień zgodności liczby podróży w poszczególnych relacjach względem danych z kompleksowych (warszawskich) badań ruchu. W podobnym zakresie również R. Kucharski z zespołem wykorzystali dane z kart SIM do aktualizacji modelu dla aglomeracji krakowskiej [8]. W zakresie projektu badawczego INMOP 3 Brzeziński z zespołem podjęli próbę analizy możliwości wykorzystania big data, w tym danych z kart SIM operatora telefonii komórkowej, oraz dane z sondowania pojazdów jako źródła danych do przeprowadzania analiz ruchu i modelowania podróży wszystkimi środkami transportu w Polsce z wykorzystaniem budowanego w ramach tego projektu krajowego modelu podróży, wykorzystywanego obecnie przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad [9]. Uzyskane wyniki streszczono między innymi w publikacji [10], ukazując potencjał wykorzystania tego rodzaju danych w modelowaniu podróży.

### Źródła pozyskiwania danych

Jak napisano we wstępie, rozwój technologii stwarza nowe możliwości w zakresie gromadzenia i przetwarzania danych o wielkim wolumenie, możliwych do wykorzystania w narzędziach do wspomagania decyzji w zakresie planowania rozwoju i zarządzania transportem. Na rynku polskim możliwe jest również pozyskanie tego rodzaju danych, jednak istotnym aspektem jest zdefiniowanie celu i pozyskanie oraz możliwości przetworzenia danych. Big data nie muszą być wykorzystywane do modelowania podróży. Ich potencjał jest znacznie szerszy i nawet dane historyczne mogą być wartościowym wkładem ukazującym stan funkcjonowania systemu transportowego, a także zagospodarowania przestrzennego. Dane te nie muszą również dotyczyć przemieszczeń, ale też dostarczają informację o rozmieszczeniu i przemieszczeniach ludności w różnych stanach i okresach.

Spośród obecnie możliwych źródeł danych o rozmieszczeniu i przemieszczeniach ludności można wyróżnić:

- **dane z kart SIM** – dane dostarczane przez operatorów telefonów komórkowych lub, w niektórych przypadkach, pośredników. Dane te bazują na punktach logowania się użytkowników sieci komórkowej, lokalizowanych za pomocą infrastruktury operatora, na którą składają się maszty telefonii komórkowej i umieszczo-

ne na nich urządzenia nadawcze i odbiorcze. Użytkownik lokalizowany jest w obrębie środka ciężkości obszarów (tzw. celki) obsługiwanych przez dany maszt, skierowanych w trzech kierunkach od masztu. Z obszaru celek użytkownicy sumowani są do zadanych obszarów, np. gmin i dzielnic. W zależności od zakresu zamówienia dane te mogą być pozyskane jedynie od jednego operatora lub kilku, co przekłada się na zwiększenie próby. Przykładowo, na rynku polskim występuje 4 głównych operatorów, których udział w rynku jest zbliżony, co przekłada się na informację o około 25% użytkowników w przypadku pozyskania danych od jednego operatora. Uwzględniając dodatkowo konieczność anonimizacji danych oraz udziału zgód użytkowników na przetwarzanie tych danych, wielkość próby w populacji może spaść do 15–20%;

- **dane z aplikacji wykorzystujących lokalizację GPS telefonów komórkowych** – dane pozyskane w wyniku zapytań reklamowych lub od wydawców aplikacji. Dane te dostarczane są przez firmy analityczne i marketingowe specjalizujące się w reklamie mobilnej. Użytkownik lokalizowany jest z wysoką dokładnością (dokładność GPS) w przypadku wyświetlenia reklamy na urządzeniu mobilnym (np. Google AdSense) lub poprzez dane zbierane przez różne aplikacje mobilne, monitorujące położenie użytkownika (aplikacje sklepów, restauracji, sportowe, wynajmu pojazdów i inne). Doświadczenie autora wykazało teoretyczny dostęp do próby około 80% użytkowników telefonów komórkowych. To samo doświadczenie wykazało jednak niedoskonałość w przetworzeniu tych danych przez dostawców, a tym samym niską jakość otrzymywanych wyników. Źródło to charakteryzuje się wysokim potencjałem, jednak konieczne jest posiadanie narzędzi do weryfikacji jakości otrzymanych danych oraz kontrola metodyki ich pozyskiwania i przetwarzania przez dostawcę;
- **dane z GPS pojazdów oraz aplikacji nawigacyjnych** – w podstawowym zakresie zbieranych danych możliwe jest pozyskanie danych o lokalizacji i czasie pojawienia się pojazdu, jego kierunku poruszania się, prędkości chwilowej. Wraz z rozwojem technologii pojawiają się także dodatkowe dane związane z warunkami ruchu pojazdów. Możliwa jest identyfikacja rodzaju pojazdu, wyróżniając pojazdy ciężkie i lekkie. Na podstawie tych danych możliwe jest poznanie informacji o relacjach przejazdu źródło-cel pojazdów, a także o prędkościach przejazdu na poszczególnych odcinkach sieci drogowej. Umożliwia to identyfikację miejsc występowania zatorów drogowych, prowadzenie badań związanych ze zdarzeniami drogowymi. Ponadto, z punktu widzenia modelowania ruchu, w połączeniu z danymi o natężeniu ruchu możliwe jest opracowanie funkcji oporu odcinka oraz oszacowanie wartości prędkości w ruchu swobodnym na poszczególnych typach odcinków;

- **dane z systemów sterowania ruchem** – dane gromadzone przez zarządców i operatorów systemów sterowania ruchem. Dane te, w zależności od budowy systemu, umożliwiają pozyskanie danych o natężeniu ruchu na przekrojach i skrzyżowaniach, ale także o czasie przejazdu pojazdów pomiędzy wybranymi punktami z wykorzystaniem łączności bluetooth lub identyfikacji pojazdów po numerach rejestracyjnych. Dodatkowo, z uwzględnieniem systemu priorytetyzacji pojazdów transportu zbiorowego oraz informacji pasażerskiej, możliwe jest także pozyskanie danych o czasie przejazdu odcinków międzyprzystankowych lub między skrzyżowaniami lub poszczególnymi punktami meldunkowymi [11]. Łącząc powyższe z systemem automatycznego zliczania liczby pasażerów wsiadających i wysiadających, możliwe jest także zdobycie danych o wielkości ruchu pasażerskiego. Wszystkie z powyższych danych stanowią istotny element w kalibracji modeli podróży, ale także być podstawą do wprowadzania usprawnień i rozwoju lokalnego systemu transportowego;
- **dane z kart płatniczych** – dane umożliwiające identyfikację czasu i miejsc wykonywania podróży z informacją o miejscu zamieszkania użytkownika (na podstawie regularności i rodzaju wykonywanych transakcji), celu podróży (transakcje w miejscu poza miejscem zamieszkania), w ograniczonym stopniu wykorzystanego środka transportu (transakcja na stacji paliw, w kasie biletowej lub na lotnisku) oraz majątności użytkownika (wielkość transakcji w hotelu, restauracji). Tęgo rodzaju dane wykazują potencjał przede wszystkim w przypadku podróży ponadlokalnych, w szczególności o charakterze turystycznym i biznesowym. Mogą być dobrym uzupełnieniem danych z telefonii komórkowej. To innowacyjne źródło danych, będzie przedmiotem kolejnych badań autora.

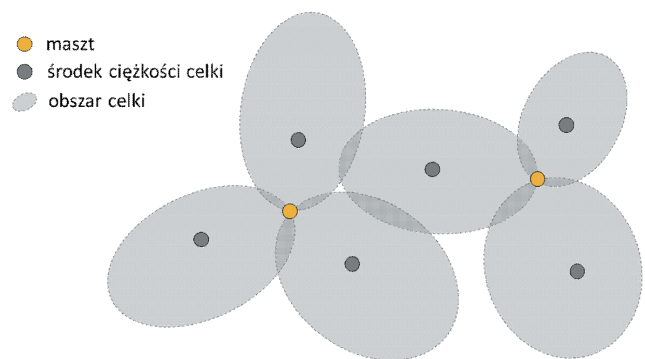
### Metodyka pozyskiwania danych z telefonii komórkowej

Jak przedstawiono w poprzednim rozdziale, istnieje kilka źródeł danych o wielkim wolumenie możliwych do wykorzystania w planowaniu i zarządzaniu rozwojem systemu transportowego. W niniejszym rozdziale skoncentrowano się na danych pozyskiwanych z telefonii komórkowej (kart SIM lub GPS). Bazując na doświadczeniu autora zdobytym podczas zakupu tego rodzaju danych od kilku operatorów dla jednostek samorządowych w województwie pomorskim, wyróżniono kilka istotnych elementów, na które należy, zdaniem autora, zwrócić szczególną uwagę, decydując się na zakup tego rodzaju danych.

#### Podział obszaru na rejonu transportowe

Podstawowym elementem procesu przygotowawczego do pozyskania danych big data jest zdefiniowanie obszaru analizy oraz jego delimitacja. Aspekt ten jest istotny zarówno w przypadku zakupu danych z kart SIM, jak i GPS, ponieważ nawet w przypadku danych GPS, w tym FCD, występuje ryzyko błędnej identyfikacji lokalizacji ze

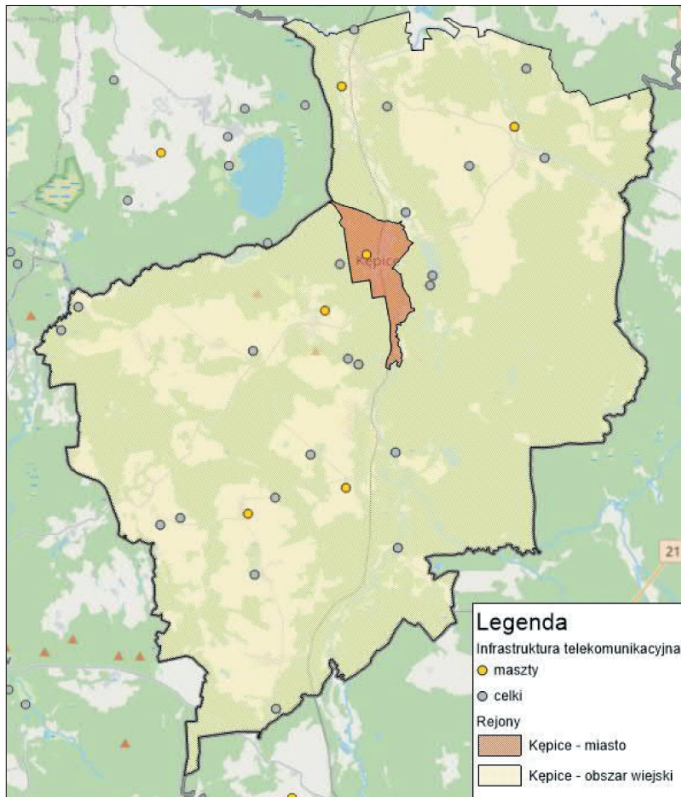
względem na dokładność GPS w danym obszarze, wynikające z uwarunkowań zewnętrznych, np. wysokości budynków. W przypadku kart SIM istotne jest rozpoznanie rozmieszczenia masztów stacji bazowych (BTS) w analizowanym obszarze. Lokalizacje BTS warunkują możliwą skalę delimitacji analizowanego obszaru – na dany rejon powinien przypadać co najmniej jeden BTS, zlokalizowany możliwie blisko geograficznego środka ciężkości danego rejonu. Stacje zlokalizowane przy granicy rejonu obciążone są większym ryzykiem błędu. Oczywiście im większa liczba stacji, tym bardziej ograniczony zostaje błąd lokalizacji. Ma to szczególne znaczenie ze względu na zasięg danego BTS oraz ryzyko logowania się telefonu do BTS przypisanego do sąsiedniego rejonu. W praktyce, zazwyczaj na jednym maszcie BTS operuje się tzw. celkami umieszczonymi w trzech kierunkach (rys. 1). Dla celek kalkulowane są środki ciężkości. Operator telekomunikacyjny nie jest w stanie określić, w którym miejscu wewnątrz celki znajduje się użytkownik. Dlatego jako jego położenie przyjmuje się środek ciężkości celki, z której on aktualnie korzysta.



Rys. 1. Schemat pokrycia obszaru celkami  
Źródło: opracowanie własne

Badania i analizy autora dla województwa pomorskiego wykazały, że w przypadku dużych miast optymalnym podziałem jest podział na dzielnice, a w obszarze pozamiejskim na gminy. W przypadku większej gęstości stacji bazowych, szczególnie w obszarach podmiejskich, zasadne może być dokonanie podziału gminy na rejonu. Należy przy tym pamiętać, że z uwagi na ograniczenia techniczne, polegające na ograniczonej liczbie celek przypadających na dany rejon, a także z uwagi na automatyczne przełączanie się komórek między celkami (tzw. szum, który może być częściowo filtrowany), zastosowana metoda ma niską dokładność w zakresie opracowania danych dla przemieszczeń wewnątrzrejonowych.

Dokonując podziału obszaru na rejonu transportowe, należy także uwzględnić ich kształt. Utrudnione może być pozyskanie danych dla rejonów podłużnych lub w kształcie litery L, U, O. Rejonu podłużne mogą wynikać na przykład z podziału administracyjnego. W takim przypadku, jeśli rejonu są małe, zalecane jest ich zagregowanie z któryś z sąsiadujących rejonów. Przypadki z kształtami L i U występują, kiedy punktem wyjścia jest podział administracyjny,



Rys. 2. Przykład problematycznego podziału na rejony ze względu na kształt oraz lokalizację celek  
Źródło: opracowanie własne

na przykład gminny. Często mniejsze gminy miejskie są otoczone przez gminę wiejską. W takim przypadku również należy albo zagregować rejony, albo dokonać dodatkowego podziału rejonu o tego rodzaju kształcie na kilka części (zazwyczaj dwie), jeśli liczba BTS na to pozwala. Na rysunku powyżej przedstawiono przykładową problematyczną lokalizację, dla której uzyskano zaburzone wyniki bez agregacji rejonów (rys. 2) z uwagi na geometrię rejonu miasta Kępice oraz rozmieszczenie masztów i przypisanych do nich celek.

### Definicje

Kolejnym etapem procesu przygotowawczego do zakupu danych jest ustalenie zakresu danych wynikowych. W zależności od zakresu możliwe jest ustalenie tzw. definicji, czyli kryteriów określających przyjęte w selekcji dane oraz interpretację otrzymanych wyników. Dane z telefonii komórkowej pozwalają na pozyskanie informacji zarówno o przemieszczeniach ludności (tzw. przepływy), jak i ich rozmieszczeniu w przestrzeni (tzw. migawki). W zakresie migawek można podjąć próbę identyfikacji liczby mieszkańców, codziennych użytkowników, turystów, odwiedzających lub inne. Przypisanie cech np. mieszkańca do danego użytkownika umożliwia w kolejnym etapie identyfikację jego przemieszczeń, oczywiście w przypadku spełnienia wymogów anonimizacji danych.

Powyższe podejście zastosowano w województwie pomorskim w zamówieniu realizowanym na zlecenie Pomorskiego Biura Planowania Regionalnego, Obszaru Metropolitalnego Gdańsk-Gdynia-Sopot, Urzędu Miasta Gdańska oraz Urzędu Miasta Gdyni [12]. Przystępując do zadania,

zdefiniowano kilka wariantów definicji mieszkańców, użytkowników itd., a następnie, korzystając z uprzejmości Wykonawcy dostarczającego dane, firmy T-Mobile, przeprowadzono iteracje testujące poszczególne definicje. Z uwagi na obszerność zagadnienia w niniejszym artykule posłużono się przykładem definicji określających liczbę mieszkańców z pominięciem pozostałych grup. Poniżej przedstawiono przykładowe definicje liczby mieszkańców obszaru:

- definicja nr 1: liczba mieszkańców – liczba osób przebywających w jednym miejscu tzw. nieruchome karty SIM w godzinach nocnych tj. 3.00–4.00, przez 15 lub więcej dni w miesiącu;
- definicja nr 2: liczba mieszkańców – liczba osób przebywających najdłużej w danym rejonie względem pozostałych rejonów w godzinach 19.00–7.00 przez 15 lub więcej dni w miesiącu;
- definicja nr 3: liczba mieszkańców – liczba osób przebywających najdłużej w danym rejonie względem pozostałych rejonów w godzinach 19.00–7.00. Warunek: osoba spędziła min. 15 nocy w województwie pomorskim.

Dla każdej z powyższych definicji otrzymano różne wartości wynikowe, co świadczy o istocie zastosowanego podejścia i wyboru właściwej do danego zadania definicji (tab. 1).

Tabela 1

Zestawienie przykładowych danych porównawczych dla różnych definicji liczby mieszkańców						
Liczba mieszkańców	Miesiąc: październik 2019			Miesiąc: sierpień 2019		
	Definicja 1	Definicja 2	Definicja 3	Definicja 1	Definicja 2	Definicja 3
Gdańsk	478 671	521 055	582 734	400 329	434 431	516 695
Gdynia	231 266	249 419	274 466	199 303	214 625	249 346
woj. pomorskie	2 087 421	2 237 091	2 421 767	1 970 426	2 103 115	2 373 854

Źródło: opracowanie własne na podstawie [12]

Ostatecznie na podstawie iteracyjnych analiz uzyskanych wyników, ich logiki oraz korelacji z innymi źródłami danych będących w dyspozycji jednostek samorządowych oraz danych Głównego Urzędu Statystycznego, do dalszych analiz wybrano jedną definicję. W przypadku liczby mieszkańców była to powyższa definicja nr 2. W zakresie pozostałych definicji przyjęto zgodnie z tabelą 2. Uzyskane dane zobrazowano w postaci graficznej oraz porównano do bazy GUS, wykazując między innymi przybliżoną zgodność w zakresie ogólnej liczby mieszkańców województwa pomorskiego, większą o około 10% liczbę osób mieszkających w Gdańsku oraz mniejszą liczbę mieszkańców większości gmin pozamiejskich.

Spośród przedstawionych definicji dodatkowego komentarza wymaga definicja liczby turystów, którą należy interpretować dosłownie, jak opisano to w polu interpretacji. Nie są to zatem tylko „typowi” turyści, którzy spędzają urlop w danym miejscu, ale także osoby spędzające noc poza miejscem zamieszkania i regularnego użytkownika (podróże biznesowe, spotkania towarzyskie). W celu pozycy-

Tabela 2

Zestawienie definicji wykorzystanych w analizach dla województwa pomorskiego		
Grupa	Interpretacja	Definicja
liczba mieszkańców	liczba stałych mieszkańców w danym rejonie – średnia w danym miesiącu	liczba osób przebywających najdłużej w danym rejonie względem pozostałych rejonów w godzinach 19.00–7.00 przez 15 lub więcej dni w miesiącu
liczba użytkowników	liczba osób przebywających regularnie w danym obszarze w ciągu dnia (np. pracujących, uczących się), niebędącym miejscem zamieszkania	liczba użytkowników – na podstawie miejsca najdłuższego przebywania w godzinach 7.00-19.00 przez 11 lub więcej dni roboczych w miesiącu
liczba odwiedzających	liczba osób odwiedzających dany rejon w ciągu dnia w celu zaspokojenia potrzeb (np. biznesowych, osobistych), który nie jest ani miejscem ich zamieszkania, ani regularnego użytkowania	liczba osób, która spędziła w danym rejonie co najmniej 4 godziny w godz. 23.00-7.00 przez nie więcej niż 14 dni w miesiącu. Osoby nieuznane za mieszkańców ani użytkowników danej gminy
liczba turystów	liczba osób, która spędziła od 1 do 14 nocy w danym rejonie transportowym, niebędącym miejscem zamieszkania ani regularnego użytkowania	liczba osób przebywających w danym rejonie transportowym w godz. 7.00-23.00 przez minimum 2 godziny. Osoby, których miejscem zamieszkania lub użytkowania nie jest dana gmina

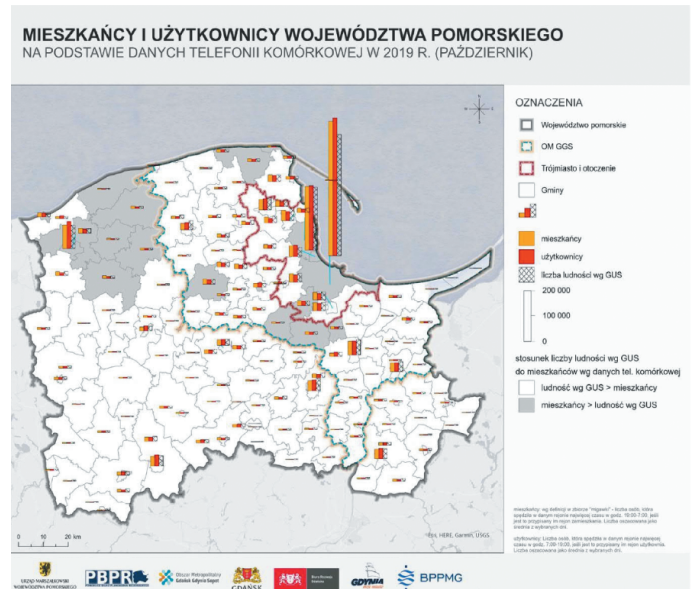
Źródło: opracowanie własne na podstawie [12]

skania informacji o „typowych” turystach powyższą definicję można rozszerzyć poprzez doprecyzowanie na przykład zakresu liczby dni spędzonych w danym miejscu. Kwestię tę pominięto w analizach dla województwa pomorskiego z przyczyn organizacyjnych.

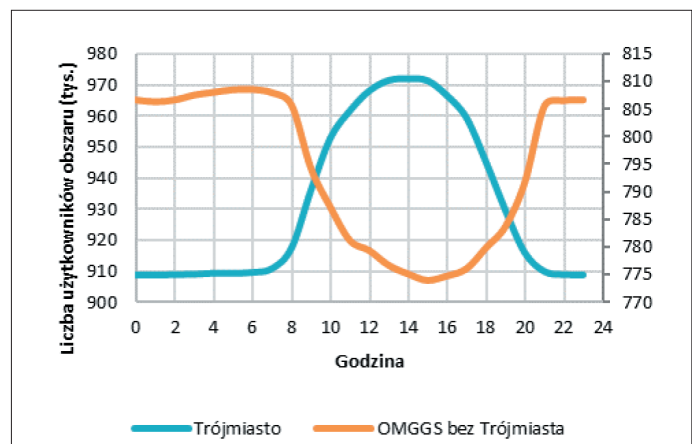
Dodatkowo, w przypadku odwiedzających i turystów, dokonano podziału ze względu na miejsce zamieszkania, uzyskując w ten sposób informację o liczbie odwiedzających i turystów mieszkających w OMGGs, województwie pomorskim, pozostałej części Polski, za granicą.

Przedstawione powyżej definicje nie należy traktować jako jedynych właściwych, jednak wykonane analizy wskazują na istotę przypisania uwagi do przyjętej definicji w celu właściwej interpretacji uzyskanych wyników i celu ich dalszego wykorzystywania. Spośród alternatywnych definicji równie zasadne są definicje odnoszące się do czasu przebywania w danym rejonie w ciągu roku – na przykład w okresie nocnym, co umożliwiłoby uzyskanie danych o liczbie mieszkańców w odniesieniu do roku, a nie miesiąca. Powyższe wymaga jednak od dostawcy pracy na danych rocznych. Z wykorzystaniem powyższych cech przypisanych do użytkowników możliwe było opracowanie ich węzłów przemieszczeń. Zidentyfikowano tym samym na przykład relacje podróży turystycznych, a także podróże pomiędzy rejonem zamieszkania a rejonem regularnego użytkowania, odwzorowujących potencjalne podróże obowiązkowe. Poszerzone wyniki analiz dla województwa pomorskiego przedstawiono w raporcie [12].

Oprócz danych opracowanych na podstawie definicji możliwe jest także pozyskanie rozmieszczenia kart SIM w danej chwili na podstawie ich ostatniego miejsca logowania. Zestawiając ze sobą takie dane w przedziale godzinowym, możliwe jest zidentyfikowanie migracji ludności w ciągu doby. Na rysunku 4 przedstawiono przykładową zmianę liczby osób przebywających w Trójmieście i pozostałym obszarze OMGGs.



Rys. 3. Liczba mieszkańców i użytkowników w rejonach – porównanie do GUS  
Źródło: raport [12]



Rys. 4. Godzinowe rozmieszczenie ludności w Trójmieście i pozostałej części OMGGs  
Źródło: raport [12]

**Problematyka rozszerzenia próby**

Wykonane badania i analizy wykazały, że kluczowym aspektem w przetwarzaniu danych wynikowych z telefonii komórkowych jest problematyka rozszerzenia próby na populację. Najprostszym i najczęstszym dotychczasowym podejściem jest stosowanie przez dostawców współczynnika rozszerzającego próbę na populację, obliczonego na podstawie liczby kart SIM, dla których użytkownicy wyrazili zgodę na przetwarzanie danych osobowych oraz liczby mieszkańców Polski na podstawie danych GUS. Podejście to, jakkolwiek logiczne, w skali globalnej doprowadza do rozbieżności w przypadku występowania różnych udziałów operatorów w danym obszarze.

Zjawisko to występuje szczególnie w obszarach pozamiejskich, gdzie z uwagi na zasięg sieci komórkowej mieszkańcy preferują wybór jednego lub dwóch operatorów. Sytuacja ta doprowadza do powstawania błędów w skali szacowanej liczby mieszkańców oraz podróży związanych z danym rejonem. Problem ten dotyczy przede wszystkim przypadku podziału obszaru na gminy.

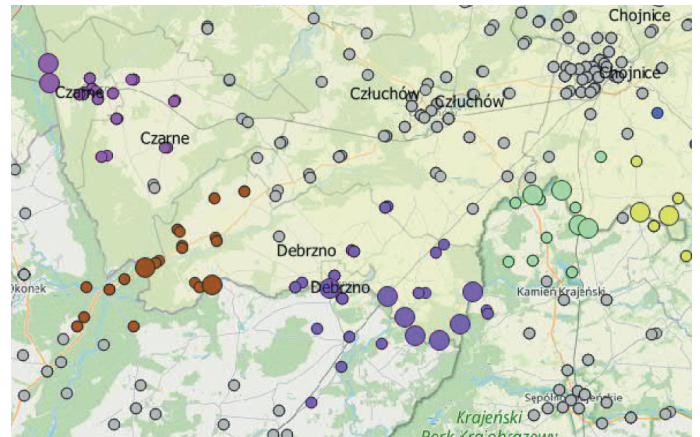
Przeprowadzone badania dla obszaru Trójmiasta nie wykazały istotności tego problemu. Podobnie w przypadku skali powiatowej, gdzie dane dla podróży międzypowiatowych oraz liczby mieszkańców były skorelowane z innymi bazami danych. W przypadku gmin rozwiązaniem minimalizującym powyższy problem jest zastosowanie wskaźnika korygującego, obliczonego na podstawie wyników badań udziału danego operatora w obsłudze mieszkańców. Dane takie wymagają jednak przeprowadzenia badania ankietowego wśród reprezentatywnej próby mieszkańców, co wiąże się z dodatkowymi kosztami, lecz jest zalecane do uzyskania wiarygodnych wyników.

### Kordony

W przypadku ograniczonych możliwości pozyskiwania danych o ruchu zewnętrznym i tranzytowym z innych źródeł, w tym danych z FCD wykorzystujących GPS, możliwe jest skorzystanie z danych z kart SIM. Podobnie jak w przypadku poprzednich zagadnień, tutaj również wysoce zalecana jest weryfikacja zastosowanej metody oraz uzyskanych wyników. W przypadku analiz dla województwa pomorskiego, dla określenia ruchu na kordonach opracowano dwie reguły:

1. **Reguła zewnętrznej granicy.** Podczas przekraczania granic województwa oraz OMGGs podróżujący mogą w niektórych sytuacjach pojawić się w celkach przypisanych więcej niż jednemu kordonowi. Wtedy przypisanie do kordonu jest uzależnione od tego, która celka jest bardziej na zewnątrz. Dlatego przypisujemy kordony wg poniższej logiki:
  - a) przemieszczenia źródłowe: czyli sytuacje, gdy osoba wyjeżdża z obszaru analizy – o przypisaniu do kordonu decyduje ostatnia celka sparowana z kordonem, w której pojawił się podróżujący;
  - b) przemieszczenia docelowe: o przypisaniu do kordonu decyduje pierwsza celka sparowana z kordonem, w której pojawił się podróżujący;
  - c) przemieszczenia tranzytowe: obydwie powyższe reguły są stosowane, zależnie czy jest to wlot, czy wylot z obszaru objętego badaniem.
2. **Reguła pojawienia się.** W tej regule chodzi o uchwycenie osób przyjeżdżających z zagranicy, dla których nie jest możliwe ustalenie początku lub końca podróży (miały one miejsce poza siecią operatora). Dotyczy ona portów oraz lotniska. Dlatego:
  - a) jeśli osoba nie była widoczna przez minimum 6 godzin w sieci, wtedy sprawdzamy, czy osoba ta najpierw pojawiła się w którymś z portów lub na lotnisku;
  - b) jeśli osoba przestaje być widoczna przez minimum 6 godzin w sieci, wtedy sprawdzamy, czy osoba ta pojawiła się w ostatnim miejscu w którymś z portów lub na lotnisku.

Zastosowanie powyższych reguł wymusza wykonanie działania poprzedzającego polegającego na identyfikacji celk przypisanych do danego kordonu, uwzględniających przemieszczających się użytkowników, którzy niekoniecz-



Rys. 5. Przykład przypisania grup celk w problematycznych obszarach kordonowych  
Źródło: opracowanie własne

nie muszą zalogować się do danej celki. Dlatego też grupa tych celk musi obejmować odpowiedni obszar wzdłuż danej drogi. Problem pojawia się jednak w przypadku występowania kilku kordonów obok siebie lub przebiegania drogi w niedalekiej odległości od granicy analizowanego obszaru. W takich przypadkach konieczne jest zastosowanie dodatkowych reguł, weryfikacja grup celk lub agregacja kordonów. W badaniach dla województwa pomorskiego zidentyfikowano dwie problematyczne lokalizacje na kordonach:

- a) kordon trasy S7, przebiegającej wzdłuż wschodniej granicy województwa pomorskiego – z uwagi na bliskość trasy, część podróży pojawiała się w obszarze analizy podwójnie: w okolicy Elbląga oraz w okolicy Żuławy Sztumskiej;
- b) kordony na południowo-zachodniej granicy województwa – z uwagi na dużą liczbę punktów kordonowych (rys. 5).

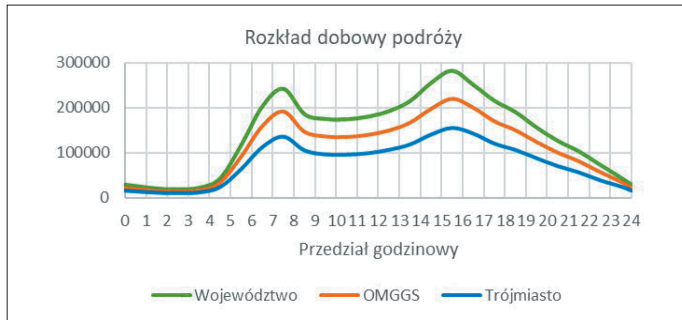
Dla każdego z powyższych przypadków zastosowano pogłębioną analizę doboru celk do kordonów oraz identyfikację logowania się do celk poza obszarem analizy.

### Zastosowanie pozyskanych danych w modelowaniu

Zgodnie z doświadczeniami wskazanymi w literaturze, przywołanej w rozdziale 2, pozyskane dane z telefonii komórkowej można wykorzystać do budowy i kalibracji makroskopowych modeli podróży. W kolejnych podrozdziałach wyszczególniono oraz pokrótce opisano możliwości wykorzystania tych danych. Szersze informacje dotyczące tych zagadnień można odnaleźć we wskazanej literaturze.

### Rozkład dobowy ruchu

Podstawową informacją możliwą do opracowania na podstawie danych z telefonii komórkowej jest charakterystyka popytu w zakresie rozkładu dobowego, określającego liczbę podróży rozpoczynanych w danym obszarze w poszczególnych przedziałach godzinowych. Na rysunku 6 zaprezentowano wyniki rozkładu dobowego podróży z podziałem na obszar Trójmiasta, OMGGs oraz województwa pomorskiego.



Rys. 6. Rozkład dobowy podróży na podstawie danych z telefonii komórkowej  
Źródło: raport [12]

**Dane o liczbie podróży**

Liczba zidentyfikowanych podróży w poszczególnych relacjach może zostać odniesiona do grup podróży międzygminnych, międzypowiatowych, wewnętrznych (wewnątrz analizowanego obszaru) i zewnętrznych (w tym tranzytowych) (tab. 3). Na tej podstawie możliwe jest oszacowanie ruchliwości mieszkańców w zakresie rodzaju podróży z podziałem dla każdego rejonu (np. gminy, dzielnicy) z osobna. Podobnie jak w przypadku badań zespołu A. Brzezińskiego [5] możliwe jest także określenie udziału podróży z danej gminy, na przykład do stolicy województwa, miasta powiatowego itd. Rozwiązanie to z powodzeniem zastosowano również w autorskim modelu dla województwa pomorskiego zwiększając jego stopień dokładności.

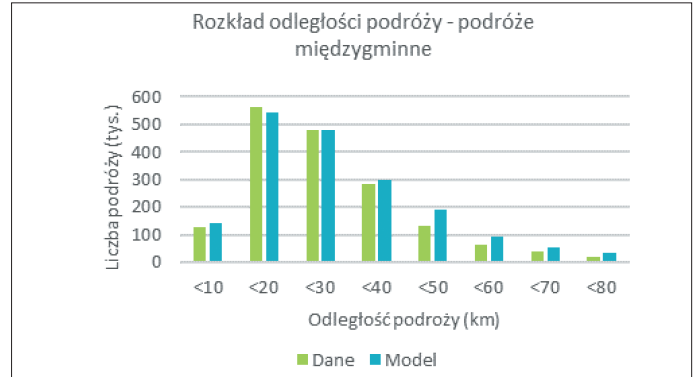
Tabela 3

Przykładowe zestawienie danych o liczbie podróży z telefonii komórkowej				
Dane z poziomu województwa	Październik		Sierpień	
	Dzień powszedni	Dzień weekendu	Dzień powszedni	Dzień 18.08.2019
Liczba wszystkich podróży	7 288 522	6 127 660	7 554 377	6 413 500
Liczba podróży wewnętrznych	6 967 861	5 807 283	7 134 645	5 799 795
Liczba podróży wew. międzygminnych	2 143 773	1 812 583	2 299 682	1 860 076
Liczba podróży wew. międzypowiatowych	1 211 902	995 497	1 242 680	937 308

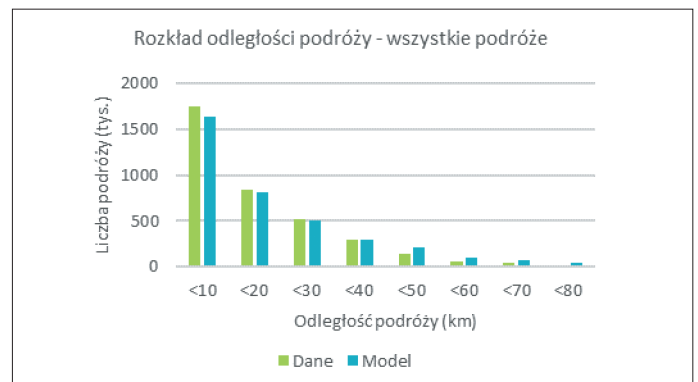
Źródło: raport [12]

**Modelowanie rozkładu przestrzennego**

Dokonując zestawienia liczby podróży w poszczególnych relacjach z odległościami podróży obliczonymi na przykład w modelach makroskopowych, możliwe jest opracowanie funkcji oporu przestrzeni. Możliwy zakres analiz w tym zakresie jest ograniczony ze względu na niewielką możliwość w identyfikacji motywacji podróży. Dane te jednak wydają się mieć potencjał do wykorzystania, na przykład do szacowania funkcji oporu dla podróży turystycznych, co będzie przedmiotem kolejnych badań autora. Z uwagi na powyższe w standardowych modelach pozyskane w ten sposób dane mogą zostać wykorzystane do kalibracji i walidacji rozkładu przestrzennego dla wszystkich podróży, co również dokonano dla modelu województwa pomorskiego (rys. 7, 8).



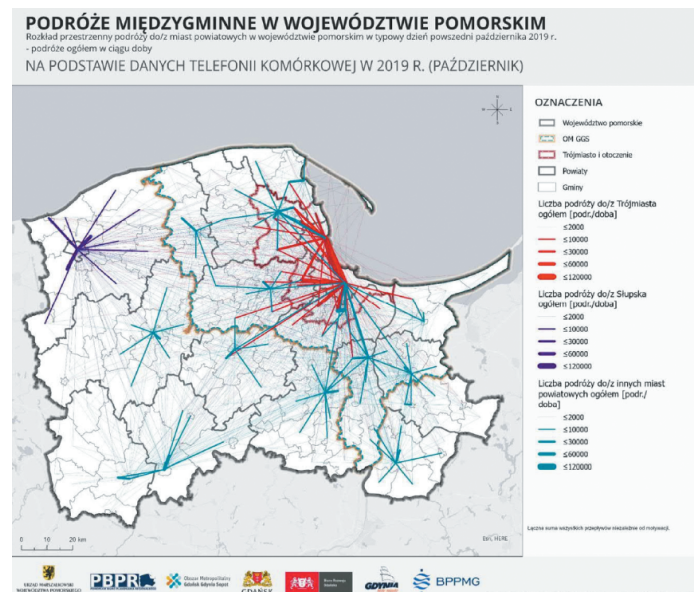
Rys. 7. Rozkład odległości podróży dla podróży międzygminnych – porównanie danych z wartościami z modelu podróży dla województwa pomorskiego  
Źródło: raport [12]



Rys. 8. Rozkład odległości podróży dla wszystkich podróży – porównanie danych z wartościami z modelu podróży dla województwa pomorskiego  
Źródło: raport [12]

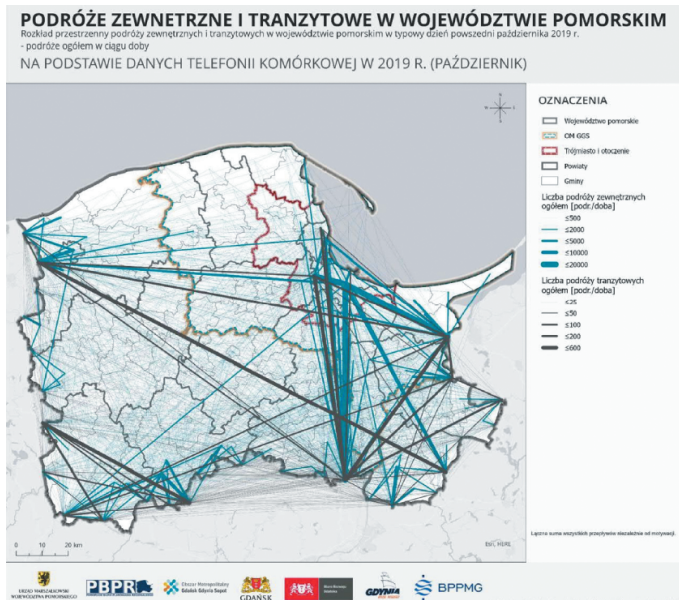
**Ruch zewnętrzny i tranzytowy**

Z uwagi na trudność techniczno-prawną w wykonywaniu badań ankietowych na kordonach, dane big data z telefonii komórkowej są obecnie jedną z ciekawszych alternatyw w pozyskiwaniu danych o ruchu zewnętrznym i tranzytowym. Dane te, zweryfikowane przez pomiary natężenia ruchu i potoków pasażerskich w transporcie zbiorowym, można wykorzystać do kalibracji rozkładu przestrzennego (rys. 9, 10).



Rys. 9. Rozkład podróży wewnętrznych na podstawie danych z telefonii komórkowej  
Źródło: raport [12]





Rys. 10. Rozkład podróży zewnętrznych i tranzytowych na podstawie danych z telefonii komórkowej  
źródło: raport [12]

## Wnioski i rekomendacje

Wykonane badania i analizy wykazują wysoki potencjał danych o wielkim wolumenie w zakresie ich wykorzystania do identyfikacji rozmieszczenia, migracji, przemieszczeń osób w celu analizy funkcjonowania badanego obszaru. W zakresie analiz transportowych dostępne w Polsce źródła danych nie ograniczają się jedynie do danych z telefonii komórkowych. Możliwe jest także pozyskiwanie danych z innych źródeł big data na podstawie danych z sondowania pojazdów oraz z systemów sterowania ruchem i zarządzania transportem zbiorowym.

Z uwagi na kilka możliwości pozyskania tego rodzaju danych oraz ze względu na różnych dostawców, promujących zróżnicowane podejścia metodyczne o różnej jakości, istotne jest odpowiednie rozpoznanie zagadnienia, określenie celu zakupu danych, opracowanie zakresu potrzebnych danych, wybór właściwej metodyki przetwarzania danych, a następnie ich weryfikacja oraz właściwa interpretacja. W niniejszym artykule przedstawiono podstawowe zagadnienia dotyczące ważnych aspektów metodycznych w zakresie możliwości i ograniczeń technicznych w pozyskiwaniu tego rodzaju danych, a także przykładowych obszarów weryfikacji danych.

Wskazane w artykule niektóre z ograniczeń dotyczących dokładności lokalizacji kart SIM, z uwagi na rozmieszczenie BTS i celek, będą zmniejszane wraz z rozwojem sieci 5G i budową nowych stacji bazowych. Ponadto operatorzy sieci komórkowej mają możliwość pozyskiwania podstawowych danych na podstawie transferowanych danych, wskazujących czas korzystania z danego rodzaju aplikacji mobilnych, czy też ogólny sposób korzystania z telefonu. Odpowiednia analiza tego rodzaju danych powinna umożliwić identyfikację przedziału wiekowego użytkownika, jego płęć i inne dane. Potencjał tego źródła danych jest znacznie szerszy i wymagać będzie dalszych badań i analiz.

Dane z sieci komórkowych oraz innych wskazanych w niniejszym artykule źródeł big data, mogą być z powodze-

niem wykorzystywane do budowy i kalibracji makroskopowych modeli podróży. Dane o przemieszczeniach ludności na tym poziomie dokładności nie można jednak traktować jako danych wystarczających. Z uwagi na brak informacji o charakterystyce podróży, w szczególności motywacji oraz wybranego środka transportu, niezbędne jest bazowanie na tradycyjnych źródłach danych, w szczególności na wywiadach w gospodarstwach domowych z wykorzystaniem dzienniczków podróży. Big data mają jednak potencjał do wykorzystania w zakresie modelowania podróży o charakterze turystycznym oraz w rozbudowie modeli na inne okresy prognostyczne niż typowy dzień powszedni.

Pełny raport z danych zakupionych dla województwa pomorskiego, z którego wykorzystano dane w tym artykule dostępny jest na stronach wskazanych jednostek samorządowych oraz w postaci streszczenia na stronie bigdata.birr.pl (alias przekierowujący).

## Literatura

1. Friedrich M., Immisch K., Jehlicka P., Otterstätter T., Schlaich J., *Generating origin-destination matrices from mobile phone trajectories*, "Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board", 2010, no 2196.
2. Bowman C.N., Miller J.A., *Modeling traffic flow using simulation and Big Data analytics*, 2016 Winter Simulation Conference (WSC), 2016.
3. Dabbas H., Fourati W., Friedrich B., *Floating Car Data for Traffic Demand Estimation – Field and Simulation Studies*, 2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems,
4. Luca M., Lepri B., Frias-Martinez E., Lutu A. *Modeling international mobility using roaming cell phone traces during COVID-19 pandemic*. EPJ Data Science, 4/2022.
5. Brzeziński A., Dybicz T., Szymański Ł., *Demand model in the agglomeration using SIM cards*, "Archives of Civil Engineering", 1/2019.
6. Brzeziński A., Dybicz T., *Possibility of Big Data application for OD-matrix calibration in transport demand models*, "Archives of Civil Engineering", 1/2021.
7. Brzeziński A., Dybicz T., Szymański Ł., *Doświadczenia z budowy modelu ruchu dla obszaru metropolitalnego Warszawy z wykorzystaniem innowacyjnych źródeł danych*, "Annały inżynierii ruchu i planowania transportu", t. III, Planowanie ruchu a wyzwania globalne, SITK, 2009.
8. Kucharski R., Mielczarek J., Drabicki A., Szarata A., *Metoda aktualizacji modelu podróży z wykorzystaniem macierzy przemieszczeń telefonów komórkowych*, "Transport Miejski i Regionalny", 2018, nr 5.
9. Brzeziński A., Projekt INMOP3, *Intermodalny Krajowy Model Ruchu*, Konferencja Naukowo-Techniczna, Innowacyjne Metody Prognozowania Ruchu Krajowego – Regionalnego – Lokalnego, Warszawa, 28 maja 2019.
10. Suchorzewski W., Brzeziński A., Waltz A., *Modelowanie i prognozowanie ruchu – od liczydła do Big Data*, "Transport Miejski i Regionalny", 2020, nr 12.
11. Helbin M., Wyszomirski O., *Możliwości wykorzystania Big Data w badaniach popytu i podaży w transporcie miejskim*, "Transport Miejski i Regionalny", 2019, nr 2.
12. Raport: Analiza aktywności i potencjału ludnościowego województwa pomorskiego, obszaru metropolitalnego i Trójmiasta w oparciu o zachowania użytkowników sieci telefonii komórkowych w 2019 r., Praca zbiorowa (Birr K. i inni), Gdańsk-Gdynia 2021.

# Modelowanie emisji z wykorzystaniem symulacji mikroskopowych<sup>1,2</sup>

## KONRAD BISZKO

mgr inż., doktorant, Katedra Inżynierii Drogowej i Transportowej, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, e-mail: konrad.biszko@pg.edu.pl

## JACEK OSKARBSKI

dr hab. inż., prof. PG, Katedra Inżynierii Drogowej i Transportowej, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, e-mail: jacek.oskarbski@pg.edu.pl

**Streszczenie:** W artykule poruszono zagadnienia związane z modelowaniem emisji spalin z wykorzystaniem mikroskopowych symulacji ruchu drogowego. Celem pracy było opracowanie modelu ruchu, na podstawie którego możliwe jest obliczenie emisji z pojazdów z uwzględnieniem typu skrzyżowania oraz wartości natężeń ruchu. W artykule skupiono się na wartościach zużycia paliwa i emisji dwutlenku węgla. Przeanalizowano literaturę w zakresie czynników wpływających na emisję, które zależne są od człowieka, pojazdu i infrastruktury. Dokonano przeglądu matematycznych modeli pozwalających na obliczenie wartości chwilowych, często związanych ze zużyciem paliwa, które stanowią podstawę do oszacowania emisji. Wybrany model został zaimplementowany do modułu oprogramowania mikrosymulacyjnego w celu analizy wielkości emisji, w zależności od natężenia ruchu na skrzyżowaniu o ruchu okrężnym i skrzyżowaniu z pierwszeństwem przejazdu. Przedstawiono wyniki badań z uwzględnieniem wariantów modeli sieci obejmujących jedynie dojazd i przejazd przez skrzyżowanie oraz niezależnie uwzględniających rozpędzanie pojazdów za skrzyżowaniem. W końcowym fragmencie artykułu objęto dyskusją wybrane założenia, możliwe do uwzględnienia w analizach i mające wpływ na osiągnięte wyniki, omówiono kwestie dokładności modelu oraz zaproponowano rozwiązania pozwalające na zwiększenie poziomu szczegółowości osiąganych wyników.

**Słowa kluczowe:** modelowanie ruchu, modelowanie emisji spalin, emisja dwutlenku węgla.

## Wprowadzenie

Z roku na rok coraz większy nacisk kładzie się na ograniczanie emisji substancji szkodliwych do środowiska. Transport odpowiada za część produkowanych zanieczyszczeń, dlatego podejmowane są różne kroki, by zmniejszyć jego negatywne oddziaływanie na środowisko. Odpowiednim działaniem jest modyfikacja istniejących elementów systemu transportu i zachowań podróżujących tak, by bez znacznego pogorszenia jakości życia społeczeństwa dostarczyć rozwiązania pozwalające na dążenie do ograniczania substancji szkodliwych. Szczególnie w centrach miast, gdzie populacja jest duża, często występują zatory drogowe, a duże natężenie pojazdów przekłada się na wysoką emisję spalin i hałasu, dochodzi do zmniejszenia komfortu mieszkańców.

Systemy transportu miejskiego stoją przed poważnymi wyzwaniami wynikającymi ze wzrostu liczby prywatnych pojazdów i wskaźników motoryzacji (liczba pojazdów prywatnych na liczbę mieszkańców) [1,2]. W 2018 roku

w krajach Unii Europejskiej (UE) było ponad 256 milionów samochodów osobowych [3]. Prognozy Banku Światowego wskazują, że do 2050 roku liczba pojazdów na drogach podwoi się do 2 miliardów, a prawie 70% prognozowanej liczby ludności świata (około 5,4 miliardów) będzie mieszkać na obszarach miejskich, co potroi liczbę podróży w miastach [4,5]. Według najnowszych szacunków, transport pasażerski (w kilometrach) w Stanach Zjednoczonych wzrośnie o 30–50% do 2100 roku [6], a w krajach UE o 42% do 2050 roku [7].

Władze miast starają się poprawiać sytuację, inwestując w rozwój transportu zbiorowego poprzez rozwijanie dostępczej oferty przewozowej i stosowanie dedykowanych rozwiązań, takich jak buspasy czy priorytety w sygnalizacji świetlnej, mające na celu zachęcić podróżnych do korzystania ze środków, jakimi są autobusy czy tramwaje. Ponadto w celu lokalnego ograniczenia emisji dodatkowe przywileje nadawane są pojazdom elektrycznym, jak na przykład możliwość wjazdu na buspasy czy darmowe parkowanie w wyznaczonych strefach. Jednocześnie ograniczana jest możliwość wjazdu do centrum pojazdom nie spełniającym określonych norm lub pojazdom prywatnym w ogóle. Dodatkowo w zakresie infrastruktury często stosuje się rozwiązania ograniczające korzystanie w podróży z samochodu, jak np. zmniejszenie liczby pasów na szerokich arteriach lub przekształcanie dotychczasowych pasów do ruchu ogólnego w buspasy. Wprowadzane są ponadto priorytety dla aktywnych uczestników ruchu – rowerzystów i pieszych, na przykład poprzez budowę odcinków o ruchu współdzielonym, na których prędkość pojazdu dostosowana jest do spacerujących przechodniów. Rzadko jednak zdarza się, by proponowane rozwiązania były dokładnie badane pod kątem emisji substancji szkodliwych dla zdrowia mieszkańców lub wpływających na zmiany klimatyczne [8]. W szczególności w strefach gęstego zaludnienia wydaje się istotne, by liczni mieszkańcy i piesi, znajdujący się w bezpośredniej lokalizacji drogi, byli narażeni na jak najmniejsze działanie substancji szkodliwych.

Celem artykułu jest zbadanie możliwości opracowania modelu będącego w stanie wspomóc proces oceny wpływu wybranych rozwiązań na emisję substancji szkodliwych. Z uwagi na możliwość odwzorowania rzeczywistości w zakresie rozwiązań drogowych oraz zachowań kierowców w relatywnie dużym stopniu, zdecydowano się na opracowanie

<sup>1</sup> ©Transport Miejski i Regionalny, 2022.

<sup>2</sup> Wkład autorów w publikację: Konrad Biszko 60%, Jacek Oskarbski 40%.

modelu w skali mikroskopowej. W artykule skupiono się przede wszystkim na obliczeniu wartości spalnego paliwa oraz emisji dwutlenku węgla ( $CO_2$ ).

### Wpływ transportu na emisję zanieczyszczeń

Na świecie transport odpowiada za 23% emisji  $CO_2$ , w UE wartość ta wynosi 30% [9], w tym 72% pochodzi z transportu drogowego [10]. Choć z biegiem lat pojawiają się nowe, coraz bardziej restrykcyjne normy emisji i widoczne jest to w zmniejszającej się emisji substancji szkodliwych w nowo produkowanych samochodach [11], podobny udział transportu drogowego w produkcji dwutlenku węgla został zachowany na przestrzeni lat [10, 12]. Emitowanych jest wiele substancji szkodliwych [12], natomiast sektor transportu drogowego odpowiada za emisję około 15% gazów cieplarnianych [9]. Dla obszarów zurbanizowanych można oszacować energię potrzebną do funkcjonowania poszczególnych środków transportu [12]. W tabeli 1 widać, że pojazdy poruszające się po drogach, w szczególności samochody osobowe, uwzględniając wskaźnik MJ/pasażerokm, pochłaniają najwięcej energii [12].

Tabela 1

Zużycie energii (MJ/paskm) przypadające na poszczególne środki transportu w obszarach zurbanizowanych			
Środek transportu	Produkcja	Eksploatacja	Całość
Rower	0.5	0.3	0.8
Tramwaj	0.7	1.4	2.1
Autobus	0.7	2.1	2.8
Kolej	0.9	1.9	2.8
Samochód (benzyna)	1.4	3	4.4
Samochód (diesel)	1.4	3.3	4.7

Źródło: opracowanie własne na podst. [12]

### Czynniki wpływające na wielkość emisji

Większość zanieczyszczeń emitowanych do środowiska można powiązać ze zużyciem paliwa [13–15], dlatego też aspekty z nim związane będą powiązane bezpośrednio z ekologią. Zużycie paliwa jest natomiast powiązane z wieloma różnymi czynnikami, wynikającymi zarówno z otoczenia [13, 16], charakterystyki statycznej i dynamicznej pojazdu [17, 18] oraz czynników ludzkich [19], które często oddziałują na wspomnianą już charakterystykę dynamiczną.

W przypadku cech pojazdów wpływających na emisję, można wyróżnić takie, które pozostają stałe w obrębie danego obszaru analizy. Wśród nich istnieją takie, które zasadniczo nigdy się nie zmieniają, czyli przede wszystkim rodzaj paliwa [10, 14] oraz pojemność silnika [18]. Ponadto pewne cechy mogą ulegać zmianie, jak dodatkowa masa (większa liczba pasażerów, dodatkowy ładunek) [13] oraz powierzchnia przednia pojazdu (rośnie w przypadku przewożenia dodatkowych elementów na dachu pojazdu) [10, 13, 17, 18], ale wymienione cechy nie zmieniają się w przyjętym do badań interwale czasowym. W UE średnia emisja  $CO_2$  wynosi około 125 g/km dla samochodów benzynowych oraz 150 g/km dla pojazdów z silnikiem diesla [10]. Inną możliwością oszacowania emisji  $CO_2$  [14] jest uzależ-

nienie jej ilości wyrażonej w g/km w zależności od średniego zużycia paliwa wyrażonego w l/100km, gdzie zależności prezentują się następująco:

$$CO_2 = 26,5 * FC_d \quad (1)$$

$$CO_2 = 23,6 * FC_g \quad (2)$$

gdzie:

$CO_2$  [g/km] – emitowany dwutlenek węgla,

$FC_d$  [l/100km] – zużycie paliwa (diesel),

$FC_g$  [l/100km] – zużycie paliwa (benzyna).

Według przedstawionych zależności, może dojść do sytuacji, gdzie faktyczna emisja  $CO_2$  będzie niższa dla samochodów z silnikiem diesla [14], jeżeli odpowiednia eksploatacja (ekonomiczna jazda w sprzyjających warunkach ruchu) pojazdu przełoży się na niższe zużycie paliwa w szerzej analizowanym okresie. Pojemność silnika zwykle związana jest ze stałą wartością zużycia paliwa i emisji spalin, niezależnie od eksploatacji. Zużycie to można obliczyć korzystając z zależności:

$$FC_e = y * EC \quad (3)$$

gdzie:

$FC_e$  [ml/min] – zużycie paliwa,

$EC$  [l] – pojemność silnika,

$y$  – współczynnik modelu (przyjmowany 8,5) [18].

Dodatkowa masa może ulegać zmianie pomiędzy przejazdami, ale w obrębie pojedynczego odcinka zwykle jest stała, dlatego też można uznać ją za cechę pozostającą bez zmian, przynajmniej dla poszczególnych pojazdów w obrębie symulacji mikroskopowej. Zwiększenie masy przekłada się na większe opory ruchu, więc i na większą moc konieczną do wyprodukowania przez silnik, by pojazd był w stanie się poruszać [17, 18]. Ten stały element jest więc związany z charakterystykami dynamicznymi pojazdu. Ponadto według badań [13], gdy zwiększono masę pojazdu o dodatkowe 100 kg, a następnie 200 kg, obliczono, że na tym samym odcinku o długości 14,5 km emisja zwiększyła się odpowiednio o 16,15 g i 32,31 g. W tym konkretnym przypadku i wąskim zakresie analizy można zauważyć liniową zależność pomiędzy zwiększaniem masy pojazdu i wzrostem emisji  $CO_2$ . Powierzchnia czoła pojazdu, podobnie jak masa własna, jest elementem, który pozostanie stały dla danego pojazdu w obrębie analizy i również wpłynie na opory ruchu [17, 18], a co za tym idzie na wartość emisji.

Charakterystyka dynamiczna pojazdu, wpływająca na chwilowe zużycie paliwa i emisje, to przede wszystkim prędkość i przyspieszenie [17, 18, 20]. Zużycie paliwa rośnie najbardziej przy dużych wartościach przyspieszenia. Przy zerowym przyspieszeniu i stałej prędkości wartość zużycia paliwa będzie stała, ale tym większa, im większa prędkość, co wynika z rosnących oporów ruchu (opory powietrza rosną wraz z kwadratem prędkości) [21]. Duże zużycie paliwa można zaobserwować również przy niskich prędkościach [13, 22]. Jednakże same wartości prędkości i przyspieszenia

osiągane w danym momencie zależą od człowieka i sposobu, w jaki dany pojazd kieruje, oraz od otoczenia, w którym się znalazł. Kolejnym aspektem związanym z dynamiką ruchu i sposobem kierowania jest dobór odpowiedniego biegu w pojeździe. W zależności od prędkości kierowcy zmieniają biegi (lub dzieje się to w sposób automatyczny) [22], natomiast poszczególne biegi pozwalają na osiągnięcie oczekiwanych wartości prędkości i przyspieszenia, jest to więc kolejny element zależny od kierowcy.

W przypadku otoczenia wpływ na zużycie paliwa i emisje będą miały rozwiązania związane z infrastrukturą [19, 24, 25], zastosowaną organizacją ruchu [24] oraz chwilowymi warunkami atmosferycznymi [15, 16, 26]. Ponadto, do otoczenia można zaliczyć usługi Inteligentnych Systemów Transportu (ITS) [27]. W przypadku infrastruktury różne wartości emisji obliczane są dla różnych typów skrzyżowań [25] lub w zależności od liczby pasów ruchu [24]. Organizacja ruchu związana z zastosowaniem rozwiązań, takich jak dedykowane pasy dla autobusów lub różna struktura programów sygnalizacji świetlnej, które mogą wpływać na zmianę emisji [24]. W przypadku zmiany warunków atmosferycznych (np. opadów deszczu lub śniegu) dochodzi do zmian parametrów ruchu na drodze, zmniejsza się prędkość, zwiększają się odstępstwa między pojazdami, następuje redukcja przepustowości, co może wpływać na powstawanie lub wydłużanie kolejek [16, 26]. Przekłada się to na zmianę dynamiki pojazdów, co może być przyczyną różnego poziomu zużycia paliwa i emisji. Warunki atmosferyczne dotyczą także temperatury otoczenia, która, poza związkiem z panującą pogodą, będzie też wpływać na temperaturę silnika. Jest to aspekt związany z samym pojazdem [15], ponieważ gdy silnik jest rozgrzany, czyli w stanie termicznej stabilności, emitowanych jest mniej substancji szkodliwych. Oczywiście, nawet przy wysokiej temperaturze otoczenia, potrzeba czasu na rozgrzanie się silnika do docelowej temperatury, ale im chłodniejsze otoczenie, tym więcej czasu to zajmie. W mieście, w którym funkcjonują usługi ITS [27], istnieje wiele różnych rozwiązań usprawniających transport, takich jak sterowanie ruchem lub kierowanie pojazdów na alternatywne trasy. To tylko niektóre ze składowych całego systemu przyczyniających się do poprawy warunków ruchu w mieście, jednocześnie wpływając na redukcję emisji.

Elementem spajającym opisane powyżej czynniki jest człowiek odpowiedzialny za prowadzenie pojazdu. To on dobiera prędkość, zachowuje się w różny sposób zależnie od sytuacji i warunków atmosferycznych, w różny sposób reaguje na poszczególne rozwiązania na drodze i panujące warunki ruchu [19, 26, 28].

Podjęcie wykorzystujące symulacje mikroskopowe może pozwolić na odpowiednie skalibrowanie modelu, tak by jak najbardziej odwzorowywał rzeczywistość [29]. Możliwym jest przyjęcie różnych parametrów pozwalających na odwzorowanie rozmaitych warunków pogodowych oraz zachowania kierowców w sieci drogowej. Dobrze skalibrowany model i dokładnie odwzorowane zależności w ruchu drogowym mogą być wykorzystane do analizy

rozwiązań niewystępujących dotychczas w danej lokalizacji [30–34].

Należy pamiętać, że lokalna zmiana w sieci drogowej, może przyczynić się do modyfikacji zachowania kierowców, w odniesieniu np. do wyboru trasy przejazdu. Niektóre podejścia [35, 36] jako jeden z pierwszych kroków przewidują wykonanie i kalibrację rozkładu podróży (źródło-cel), by dopiero w kolejnych krokach kalibrować zachowania kierowców i weryfikować poprawność modelu w skali mikro-skopowej.

### Metody obliczania emisji

Można wyróżnić dwa typowe podejścia do obliczania emisji [23, 30]:

- flotowe – polegające na obliczeniu wartości emisji przy znajomości liczby i struktury rodzajowej pojazdów oraz pokonanej przez nie odległości, często zawierające dodatkowe zmienne, jak np. średnia prędkość;
- chwilowe – polegające na obliczaniu chwilowej emisji pochodzącej z symulacji każdego pojazdu indywidualnie, przy uwzględnieniu chwilowych zmiennych opisujących konkretny pojazd, często używane do symulacji mniejszej liczby pojazdów, ale przy większej dokładności.

Na przestrzeni lat powstało wiele różnych sposobów obliczania emisji, bazujących na różnych parametrach zależnych od oczekiwanego poziomu dokładności oraz posiadanych danych wejściowych. W oprogramowaniu SUMO wykorzystano uproszczone równanie związane z oporami ruchu, które powiązane z wartościami emisji dostępnymi w HBEFA [37], otrzymując równanie do obliczeń wartości emisji:

$$c_0 + c_1va + c_2va^2 + c_3v + c_4v^2 + c_5v^3 \quad (4)$$

gdzie:

$v$  [m/s] – prędkość,

$a$  [m/s<sup>2</sup>] – przyspieszenie,

$c_0 - c_5$  – współczynniki zależne od pojazdu i obliczanej substancji szkodliwej [23].

Jak już wcześniej wspomniano, emisja jest związana ze zużyciem paliwa. Wiele modeli bazuje na wielkości zużycia paliwa, z których następnie wyliczane są ilości szkodliwych substancji dostarczanych do środowiska. Jeden z modeli służących do obliczenia zużycia paliwa został opracowany, bazując na pomiarach rzeczywistych wartości uzyskiwanych w zależności od prędkości i dynamiki ruchu [20] podczas przejazdu przez odcinek drogi ze skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną, gdzie można wydzielić: jazdę ze stałą prędkością, zwalnianie, postój, przyspieszanie. Warto zaznaczyć, że nawet w czasie jazdy ze stałą prędkością występują niewielkie wahania, w których kierowca na przemian nieznacznie zmniejsza i zwiększa swoją prędkość. Pewna wartość zużycia paliwa jest stała, nawet podczas zwalniania oraz postoju, większe prędkości przekładają się na jej wzrost, a największe wartości są osiągnięte w momentach,

w których dochodzi do przyspieszania. Na podstawie pomiarów i charakterystyki dynamicznej analizowanego pojazdu przygotowano funkcję, która umożliwi obliczenie zużycia paliwa [20]:

$$FC_t = \alpha + \beta_1 R_T v + [\beta_2 M a^2 v / 1000]_a \text{ dla } R_T > 0 \quad (5)$$

$$FC_t = \alpha \text{ dla } R_T \leq 0 \quad (6)$$

gdzie:

$\alpha, \beta_1, \beta_2, M, b_1, b_2$  – współczynniki związane z cechami pojazdu,

$v$  [m/s] – prędkość pojazdu,

$R_T$  [kN] – całkowita siła wymagana, aby pojazd się poruszał, wyrażona wzorem:

$$R_T = b_1 + b_2 v^2 + M a / 1000 + 9,81 M (G / 100) / 1000 \quad (7)$$

Istnieją inne matematyczne zależności wiążące wartość mocy ze zużyciem paliwa. Na podstawie pomiarów [17] osiągnięto korelację pomiędzy wartością zużycia paliwa a chwilową mocą silnika. Kolejnym podejściem do obliczenia zużycia paliwa jest obliczenie chwilowego zużycia paliwa, bazując na pokonanym dystansie, z uwzględnieniem takich parametrów jak prędkość, przyspieszenie oraz bieg, na którym znajduje się pojazd [22]. Analizując siły potrzebne do wprowadzenia pojazdu w ruch, można zastosować szereg równań odpowiedzialnych za opory, które pojazd musi pokonać, by zostać wprowadzony w ruch. Sumę tych oporów wyraża się równaniem [18]:

$$Z_t = Z_d + Z_r + Z_a + Z_e + Z_m \quad (8)$$

gdzie:

$Z_t$  [kN] – suma oporów,

$Z_d$  [kN] – opór układu napędowego,

$Z_r$  [kN] – opór toczenia,

$Z_a$  [kN] – opór powietrza,

$Z_e$  [kN] – opór wzniesienia,

$Z_m$  [kN] – opór od dodatkowego wyposażenia (zwykle pomijany).

Na podstawie uzyskanej wartości można obliczyć wartość zużycia paliwa, korzystając z zależności [18]:

$$F_c = \alpha + \beta Z_t = \gamma * EC + \beta Z_t \quad (9)$$

gdzie:

$F_c$  [ml/min] – zużycie paliwa,

$\gamma$  i  $\beta$  – współczynniki modelu (przyjmowane na poziomie 8,5 i 8,8),

$Z_t$  – opory z równania (8).

Dodatkowo uwzględniając fakt, że występuje duża korelacja pomiędzy zużyciem paliwa a emisjami, przyjmując odpowiednie współczynniki i możliwe jest obliczenie wartości emisji CO, HC, NO<sub>x</sub> bezpośrednio korzystając ze wzoru (9) [18].

## Badania emisji na skrzyżowaniach

Analizując literaturę w zakresie wykonanych badań mających na celu porównanie różnych rozwiązań, bardzo często można trafić na różnicę w emisjach osiągniętych pomiędzy skrzyżowaniami z sygnalizacją świetlną [30, 38, 39] lub z określonymi zasadami pierwszeństwa przejazdu [25], które następnie zostały przebudowane na skrzyżowania o ruchu okrężnym. W większości przypadków wyniki wskazywały na rondo jako bardziej ekologiczne. Czasem wyniki różniły się w zależności od rodzaju emisji [39], gdzie wartości NO<sub>x</sub> były niższe dla skrzyżowań z sygnalizacją, ale wartości CO<sub>2</sub> zawsze były niższe dla skrzyżowań o ruchu okrężnym. Należy zwrócić uwagę, że zależnie od analizowanego rozwiązania otrzymano różny rozkład prędkości przy porównywalnym obciążeniu ruchem [39], w przypadku sygnalizacji częściej występowały wartości niskie (około 10 km/h) i wyższe (około 40 km/h), podczas gdy w przypadku rond najczęściej osiągnięta prędkość wynosiła przez cały analizowany okres około 20 km/h. W kolejnym przypadku [38] stwierdzono, że wielkość emisji CO<sub>2</sub> różni się w zależności od strategii sterowania sygnalizacją. W przypadku koordynacji skrzyżowań z sygnalizacją emitowanych było mniej substancji szkodliwych niż w przypadku jej braku, niemniej najniższe wartości emisji wystąpiły dla skrzyżowań o ruchu okrężnym. Dodatkowo stwierdzono, że większe wartości emisji występują przy wyższym stopniu wykorzystania przepustowości. Różnice w emisjach pomiędzy rondem a pozostałymi typami skrzyżowań są zauważalne w szczególności przy bardzo wysokich natężeniach ruchu [38]. W kolejnej pracy [25] analizie poddano miejsca, gdzie skrzyżowania najpierw miały określone pierwszeństwo przejazdu ze znakami stop na wlotach dróg podporządkowanych lub zastosowano skrzyżowania równorzędne ze znakiem stop na każdym wlocie, a następnie zostały one przekształcone w skrzyżowania typu rondo. W każdym przypadku wyniki otrzymane z modelu wykazały, że rondo przyczyniają się do znacznego zmniejszenia emisji analizowanych substancji szkodliwych [25]. W opisanych przypadkach rondo okazały się lepsze pod kątem ekologii, ale zostały przeanalizowane tylko wybrane przypadki, co nie pozwala na jednoznaczne stwierdzenie, że w każdym przypadku skrzyżowanie o ruchu okrężnym będzie lepszym rozwiązaniem niż skrzyżowanie z pierwszeństwem przejazdu.

W celu przeprowadzenia analizy wpływu typu skrzyżowania oraz natężenia ruchu na emisję, autorzy niniejszego artykułu przygotowali model z wykorzystaniem modułu w oprogramowaniu PTV Vissim, pozwalającego na uwzględnienie zmiennych, takich jak prędkość, przyspieszenie, waga i klasa pojazdu oraz pochylenie jezdni [40]. Ze względu na przyjęcie metody mikroskopowej w badaniach został wykorzystany model chwilowy, ponieważ wybrane narzędzie pozwoliło na pozyskiwanie parametrów pojazdu w każdym kroku czasowym. Wykorzystano zależności ze wzoru (8). Poszczególne równania, odpowiadające za poszczególne opory ruchu, które pojazd pokonuje, wyrażono następująco [18]:

$$Z_d = 2,36 * 10^{-7} v^2 M \quad (10)$$

$$Z_r = (3,72 * 10^{-5} v + 3,09 * 10^{-8} v^2) M \quad (11)$$

$$Z_a = 1,29 * 10^{-5} C_d A v^3 \quad (12)$$

$$Z_e = 2,78 * 10^{-4} (a + g \sin \theta) M v \quad (13)$$

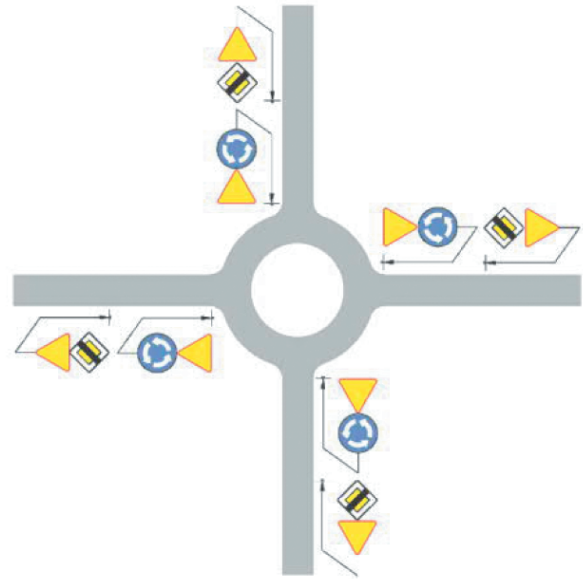
gdzie:

- $v$  [km/h] – prędkość,
- $a$  [m/s<sup>2</sup>] – przyspieszenie,
- $A$  [m<sup>2</sup>] – powierzchnia przednia pojazdu,
- $C_d$  – współczynnik oporu powietrza,
- $M$  [kg] – masa pojazdu,
- $\theta$  – kąt pochylenia drogi.

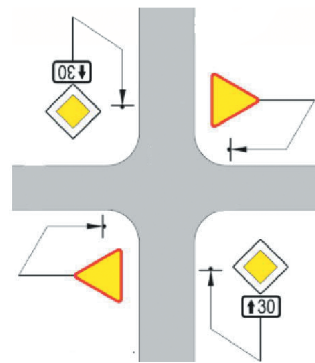
Zmienne wprowadzono do modelu ruchu, a potem, na etapie prowadzenia obliczeń w ciągu trwania symulacji, wyniki były odczytywane przez interfejs modułu służącego do obliczania wartości emisji. Po uzyskaniu sumy oporów ruchu zastosowano równanie (9) [18]. Uzyskana wartość wyrażona jest w ml/min, dokonano zatem odpowiednich przekształceń, by dostosować ją do przyjętego kroku czasowego. Można uznać, że zużycie paliwa jest głównym wyznacznikiem tego, jak bardzo emisje rosną lub maleją, aczkolwiek żeby poznać poszczególne wartości wybranych substancji szkodliwych, należy dokonać odpowiednich przeliczeń. Należy zwrócić uwagę, że z biegiem lat normy emisji uległy zmianie, tak więc poszczególne współczynniki również mogą przyjmować różne wartości w zależności od struktury wiekowej pojazdów występujących w obszarze analizy.

Zdecydowano się na przeanalizowanie wybranych przypadków, które były dotychczas badane w literaturze. Badanie miało na celu rozpoznanie, przynajmniej we wstępnym zakresie, jakie rozwiązanie będzie odpowiednie, jeśli jedynym rozpatrywanym kryterium są emisje substancji szkodliwych do środowiska. Najważniejsze czynniki wpływające na emisję to: sposób prowadzenia pojazdu przez kierowcę, rodzaj paliwa i napędu, rozmiar silnika, wiek pojazdu, masa własna i dodatkowe obciążenie pojazdu, warunki ruchu, struktura rodzajowa i kierunkowa ruchu, pochylenie drogi, typ skrzyżowania, pochylenie jezdni, warunki pogodowe. Na potrzeby tego artykułu uwzględniono zmienność tylko niektórych czynników (natężenie ruchu i typ skrzyżowania). Analizie poddano skrzyżowanie czterowlotowe z pierwszeństwem przejazdu oraz skrzyżowanie czterowlotowe o ruchu okrężnym. Schematyczne rysunki skrzyżowań przedstawiono na rysunkach 1 i 2.

W obu przypadkach dodatkowo przyjęto dwa możliwe warianty do analizy. Pierwszy obejmuje obszar skrzyżowania wraz odcinkiem o długości 1000 m przed nim, drugi obejmuje większy zakres z uwzględnieniem skrzyżowania oraz odcinka drogi o długości 1000 m przed i za skrzyżowaniem. Zabieg ten ma na celu zbadanie emisji powstałych przy rozpędzaniu pojazdów po zjechaniu ze skrzyżowania oraz redukcji prędkości i oczekiwania w kolejce podczas dojazdu. Na drogach miejskich skrzyżowania często są zlokalizowane częściej niż co 1 km, ale w przypadku niniejszej analizy zdecydowano się na taką długość odcin-



Rys. 1. Schemat skrzyżowania w ruchu okrężnym  
Źródło: opracowanie własne na podst. [41]



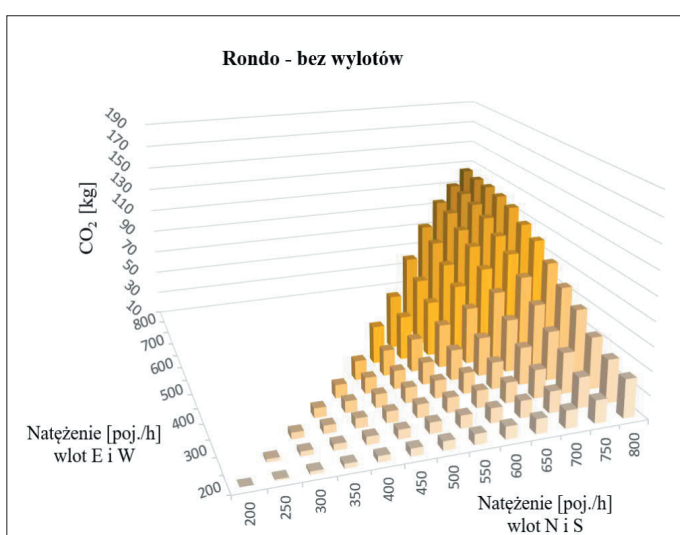
Rys. 2. Schemat skrzyżowania z pierwszeństwem przejazdu  
Źródło: opracowanie własne na podst. [41]

ków, by umożliwić w symulacji wjazd do sieci jak największej liczbie pojazdów. Prędkość dopuszczalna w sieci dróg miejskich to 50 km/h, przy czym w celu lepszego odwzorowania rzeczywistości przyjęto, że kierowcy, zgodnie z domyślnym rozkładem prędkości w oprogramowaniu PTV Vissim, wybierają wartości z przedziału od 48 do 58 km/h [42]. Na potrzeby analizy założono, że wszystkie pojazdy to samochody osobowe z silnikiem benzynowym. Ich waga zawiera się w przedziale od 900 do 2000 kg. Przyjęto, że pierwszeństwo przejazdu występuje na wlocie północnym i południowym. W każdym z przypadków założono taką samą strukturę kierunkową, tzn. na wlocie północnym i południowym 70% kierowców jedzie na wprost, 20% skręca w prawo, 10% skręca w lewo. Na wlocie wschodnim 70% kierowców skręca w prawo, 20% jedzie prosto, 10% skręca w lewo. Na wlocie zachodnim 50% skręca w lewo, 30% skręca w prawo, 20% jedzie na wprost. Symulacja dla każdego wariantu została przeprowadzona ze stopniowym wzrostem natężenia co 50 pojazdów (w przedziale od 200 do 800 P/h). Przyjęto, że natężenie na drogach podporządkowanych nie przekracza natężenia na drogach głównych. Takie założenia pozwoliły na porównanie 396 modeli symulacyjnych.

## Wyniki badań

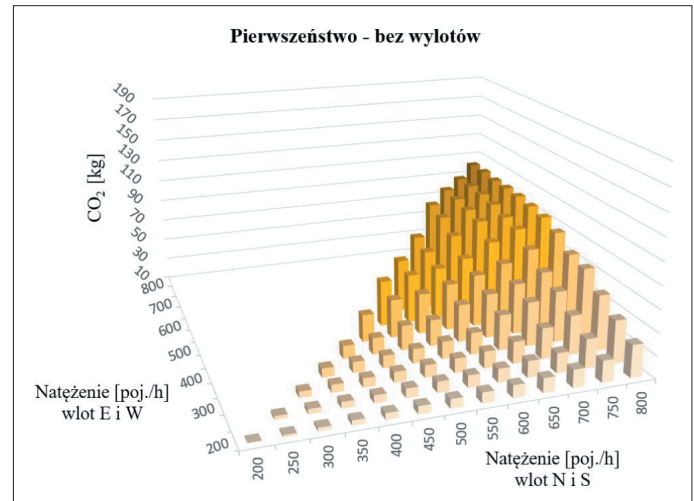
Emisja CO<sub>2</sub> wynika wprost ze zużycia paliwa [43] w stosunku 2,3 kg CO<sub>2</sub> na 1l benzyny, wobec tego model obliczający zużycie paliwa był też odpowiednim narzędziem do obliczenia emitowanego przez pojazdy dwutlenku węgla. Na rysunkach 3–6 przedstawiono wykresy dla każdego z rozpatrywanych wariantów typu skrzyżowania i zakresu obszarowego analizy. Dla dużych wartości natężeń ruchu pojazdy, w szczególności na wlotach podporządkowanych, oczekiwały na wjazd na skrzyżowanie przez długi czas, wypełniając cały model sieci, dlatego przy dalszym zwiększaniu obciążenia, nowe pojazdy nie były w stanie wjechać nawet na odcinek o długości 1 km. Przy przyjętej strukturze kierunkowej, gdzie z wlotu północnego i południowego większość pojazdów jechała na wprost, nawet na skrzyżowaniu typu rondo dochodziło chwilami do sytuacji, gdzie nieprzerwany strumień pojazdów blokował możliwość wjazdu na skrzyżowanie z wlotu wschodniego i zachodniego.

Analizując osiągnięte wartości emisji CO<sub>2</sub> dla wycinka sieci, bez uwzględnienia wartości emisji za skrzyżowaniem, otrzymano różne wyniki zależnie od natężenia. Do wielkości natężenia wynoszącej około 600 P/h, skrzyżowanie typu rondo (rys. 3) było zwykle bardziej ekologiczne – różnice w wartościach emisji CO<sub>2</sub> wynosiły od kilkuset gramów do 12 kilogramów. Dla natężenia przekraczającego 600 P/h, na skrzyżowaniach o ruchu okrężnym, zostało wyemitowane więcej spalin, a różnica ta wynosiła od kilkuset gramów do 23 kilogramów. Wartości emisji dla skrzyżowania z pierwszeństwem przejazdu (rys. 4) szybciej rosły do momentu, kiedy krytyczna wartość natężenia dla skrzyżowania została przekroczona. Pojazdy na wlotach głównych dalej były w stanie przejechać przez skrzyżowanie, podczas gdy na wlotach podporządkowanych kolejka sięgała granicy sieci. Dla skrzyżowania o ruchu okrężnym, po osiągnięciu krytycznej wartości natężenia, dochodziło do tworzenia się kolejek na wszystkich wlotach.



Rys. 3. Emisje CO<sub>2</sub> zależne od natężenia ruchu na skrzyżowaniu typu rondo bez uwzględnienia wylotów

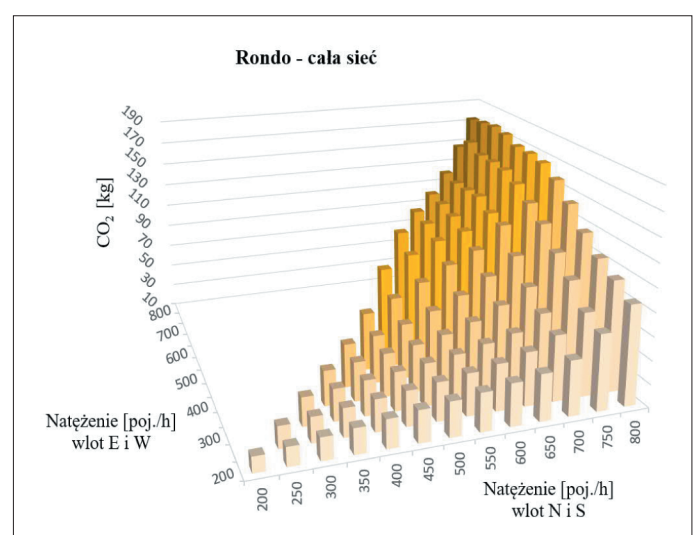
Źródło: opracowanie własne



Rys. 4. Emisje CO<sub>2</sub> zależne od natężenia ruchu na skrzyżowaniu z pierwszeństwem przejazdu bez uwzględnienia wylotów

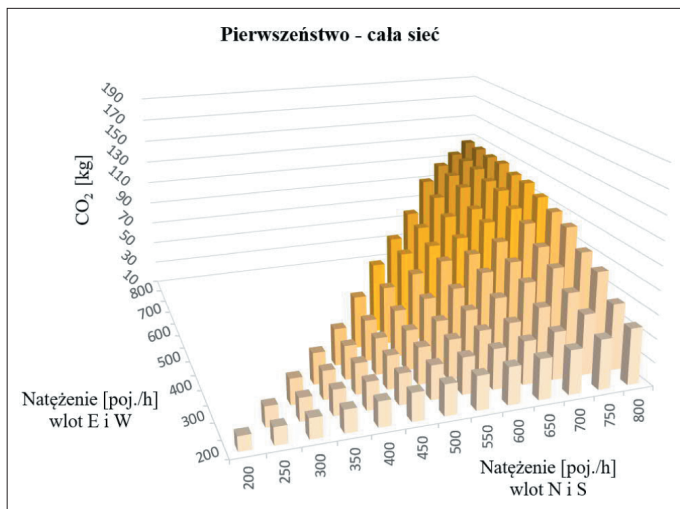
Źródło: opracowanie własne

Analizując warianty uwzględniające całą sieć (dojazd do skrzyżowania, skrzyżowanie i odcinek za skrzyżowaniem) dla wszystkich wartości analizowanego natężenia, skrzyżowanie z pierwszeństwem przejazdu (rys. 5) było bardziej ekologiczne. Emisja dwutlenku węgla na skrzyżowaniu o ruchu okrężnym (rys. 6) była większa od kilkuset gramów do 52 kilogramów. Poza sytuacją związaną z osiągnięciem krytycznego natężenia, tak jak w przypadku analizy jedynie wycinka sieci, dochodzi tutaj do rozpędzania się kierowców do prędkości 50 km/h po zjechaniu ze skrzyżowania. W przypadku pierwszeństwa przejazdu rozpędzają się kierowcy oczekujący na wlotach podporządkowanych oraz wszyscy, którzy wykonują manewr skrętu, jednakże jadący na wprost, szczególnie w relacji nadrzędnej, często mogą przejechać przez skrzyżowanie bez zmniejszania prędkości. W przypadku ronda, niezależnie od kierunku jazdy, zawsze dochodzi do ponownego rozpędzania się po zjechaniu ze skrzyżowania.



Rys. 5. Emisje CO<sub>2</sub> zależne od natężenia ruchu na skrzyżowaniu typu rondo z uwzględnieniem wylotów

Źródło: opracowanie własne



Rys. 6. Emisje CO<sub>2</sub> zależnie od natężenia ruchu na skrzyżowaniu z pierwszeństwem przejazdu z uwzględnieniem wlotów  
Źródło: opracowanie własne

## Podsumowanie

W artykule scharakteryzowano czynniki wpływające na emisje spalin w ruchu drogowym, przedstawiono wybrane modele matematyczne służące obliczaniu zużycia paliwa i emisji substancji szkodliwych oraz zaimplementowano wybrany model w oprogramowaniu PTV Vissim. Przeanalizowano wartości emisji dwutlenku węgla w zależności od natężenia ruchu typu skrzyżowania oraz zakresu obszarowego analizy. Uzyskane wyniki wskazują, że dla natężeń do około 600 P/h dla każdego z wlotów ronda są bardziej ekologiczne, jeśli nie uwzględnia się ponownego rozpędzania pojazdów po zjechaniu ze skrzyżowania. Większe wartości natężenia oraz większy zakres obszarowy analizy, uwzględniający ponowne rozpędzanie pojazdów za skrzyżowaniem, wskazują, że skrzyżowania z pierwszeństwem przejazdu są bardziej ekologiczne pod kątem wartości emisji dwutlenku węgla.

Osiągnięte wyniki pokazują pewne zależności, ale nie są uniwersalne. Została zbadana tylko przykładowa struktura kierunkowa dla założonej organizacji ruchu. Inny rozkład relacji skrętnych może mieć wpływ na wyniki badań. Kolejny aspekt to sama geometria skrzyżowania, dodatkowe pasy, inna organizacja ruchu, które będą wpływać na osiągnięte wyniki. Założona długość odcinka 1 km przed i za skrzyżowaniem jest znaczna. W rzeczywistych miejskich sieciach drogowych skrzyżowania często są zlokalizowane relatywnie blisko siebie, a na drogach występują dodatkowe ograniczenia prędkości, przejścia dla pieszych, przystanki dla pojazdów transportu zbiorowego, które mogą wpływać na wyniki badań. Dalsze elementy istotne dla wartości zużycia paliwa to struktura rodzajowa pojazdów oraz rodzaj i rozmiar silnika, które będą uwzględnione w dalszych badaniach.

Kolejnym aspektem, który ograniczał dokładność uzyskanych wyników, jest struktura zastosowanego modelu. Zależności pozwalające na obliczenie zużycia paliwa, które zostały wykorzystane w modelu, zostały przygotowane dla wartości ml/min. Model mikroskopowy oblicza wartości

w kroku czasowym, który może wynosić sekundę lub jej część. W ciągu minuty możliwe jest wielokrotne zatrzymanie, zmiana biegu, przejechanie przez skrzyżowanie. W przeszłych badaniach wskazane jest poszukiwanie możliwości zwiększenia szczegółowości modelu, na przykład poprzez uwzględnienie w algorytmie obliczeniowym biegu, na którym pojazd się porusza. Ponadto zależnie od regionu oraz roku, w którym przeprowadzane są badania, mogą obowiązywać różne normy, różny wiek pojazdów w sieci. Nawet w przypadku stosowania zależności fizycznych, które się nie zmieniają, wskazanym będzie sprawdzenie poprawności pod kątem użytych współczynników.

Pomimo wskazanych ograniczeń przeprowadzone analizy pozwoliły na pokazanie wątpliwości w odniesieniu do dotychczasowych wyników badań, które wskazywały jednoznacznie skrzyżowania typu rondo, jako rozwiązania przyczyniające się do redukcji emisji substancji szkodliwych.

W dalszych pracach badawczych przewidziano analizę kolejnych rozwiązań drogowych w zakresie wpływu typu, organizacji ruchu i geometrii skrzyżowań na wartość emisji. Zbadane zostaną wartości emisji na rzeczywistych skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną. Rozwinięcie modelu będzie obejmować wykorzystanie dodatkowych dostępnych wzorów i zależności wraz z kalibracją współczynników w celu bardziej wiernego odwzorowania rzeczywistości na przyjętym stopniu szczegółowości.

## Literatura

1. Ferenchak N.N., Katirai M., *Pedestrian Crossing Behavior in Relation to Grouping and Gender in a Developing Country Context*. *Journal of Global Epidemiology and Environmental Health*, 2017, <https://doi.org/10.29199/geeh.101018>.
2. Lloyd L., Wallbank C., Broughton J., Cuerden R., *Estimating the potential impact of vehicle secondary safety regulations and consumer testing programs on road casualties in emerging markets*, *Journal of Transportation Safety and Security*, 2017, 9(1), <https://doi.org/10.1080/19439962.2016.1228091>.
3. Eurostat Passenger Cars, by Size and Type of Fuel Engine, 2021, Retrieved from <http://ec.europa.eu/eurostat/data/database>.
4. Machado C. A. S., Hue N. P. M. de S., Berssaneti F. T., Quintanilha J. A., *An overview of shared mobility*, *Sustainability (Switzerland)*, 2018, 10(12), <https://doi.org/10.3390/su10124342>.
5. Lerner W., *The Future of Urban Mobility. Towards Networked, Multimodal Cities of 2050*, 2011, <https://robertoigarza.files.wordpress.com/2009/07/rep-the-future-of-urban-mobility-2050-little-2011.pdf> [dostęp: 7.08.2019], *Arthur D. Little*, (October), 28.
6. Schäfer A. W., *Long-Term Trends in Domestic US Passenger Travel: The Past 110 Years and the Next 90*, *Transportation (amst)*, 2017, (44).
7. European Commission, *Transport in the European Union Current Trends and Issues*, March 2019.
8. Oskarbski J., Birr K., Żarski K., *Bicycle traffic model for sustainable urban mobility planning*, *Energies*, 2021, 14(18), <https://doi.org/10.3390/en14185970>.
9. Oecd & International Transport Forum, *Reducing transport greenhouse gas emissions*, *Trends & Data*, 2010. Oecd, 1–94.



10. Parlament Europejski, *Emisje CO<sub>2</sub> z samochodów fakty i liczby*, 2019, <https://www.europarl.europa.eu/news/pl/headlines/society/20190313STO31218/emisje-co2-z-samochodow-fakty-i-liczby-infografika>.
11. EEA & DG-CLIMA, 2022, *Average CO<sub>2</sub> emissions per km from new passenger cars*, [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/t2020\\_rk330/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/t2020_rk330/default/table?lang=en).
12. Roselló X., Langeland A., Viti F., *Public Transport in the Era of ITS: The Role of Public Transport in Sustainable Cities and Regions*, Springer Tracts on Transportation and Traffic, 2016, Vol. 1004, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-25082-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-25082-3_4).
13. Nouri P., Morency C., *Untangling the Impacts of Various Factors on Emission Levels of Light Duty Gasoline Vehicles*, 2015, (October), <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11428.48008>.
14. Sullivan J. L., Baker R.E., *Policy Analysis CO<sub>2</sub> Emission Benefit of Diesel (versus Gasoline)*, "Powered Vehicles", 2004, 38(12).
15. Kan Z., Tang L., Kwan M.P., Zhang X., *Estimating vehicle fuel consumption and emissions using GPS big data*, International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(4), <https://doi.org/10.3390/ijerph15040566>.
16. Chen C., Zhao X., Liu H., Ren G., Zhang Y., Liu X., *Assessing the influence of adverse weather on traffic flow characteristics using a driving simulator and VISSIM*, Sustainability (Switzerland), 2019, 11(3), 1–16, <https://doi.org/10.3390/su11030830>.
17. Edwardes W., Rakha H., *Virginia tech comprehensive power-based fuel consumption model*, Transportation Research Record, 2014, 2428(312), <https://doi.org/10.3141/2428-01>.
18. Leung D. Y. C., Williams D. J., *Modelling of motor vehicle fuel consumption and emissions using a power-based model*, Environmental Monitoring and Assessment, 2000, 65(1–2), [https://doi.org/10.1007/978-94-010-0932-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-94-010-0932-4_3).
19. Bengler K., Drüke J., Hoffmann S., Manstetten D., Neukum A., *{UR:BAN} Human Factors in Traffic: Approaches for Safe, Efficient and Stress-free Urban Traffic*, 2017, <https://market.android.com/details?id=book-S2gpDwAAQBAJ>.
20. Biggs D.C., Akcelik R., *Models for Estimation of Car Fuel Consumption in Urban Traffic*, "ITE Journal" (Institute of Transportation Engineers), 1986, 56(7).
21. Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M., *Inżynieria ruchu drogowego*, 2014.
22. Treiber M., Kesting A., Thiemann C., *How Much does Traffic Congestion Increase Fuel Consumption and Emissions? Applying a Fuel Consumption Model to the NGSIM Trajectory Data*, Transportation Research Board, August 2018.
23. Krajzewicz D., Behrisch M., Wagner P., Luz R., Krumnow M., *Second generation of pollutant emission models for SUMO*, Lecture Notes in Control and Information Sciences, 2015, 13, 203–221, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-15024-6\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-15024-6_12).
24. Kun C., Lei Y. U., *Microscopic Traffic-Emission Simulation and Case Study for Evaluation of Traffic Control Strategies*, "Journal of transportation systems engineering and information technology", 2007, Vol. 7.
25. Mandavilli S., Russell E., Rys M., *Impact of Modern Roundabouts on Vehicular Emissions*, Proceedings of the 2003 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, IA, USA, August 2003.
26. Bie Y., Qiu T. Z., Zhang C., Zhang C., *Introducing weather factor modelling into macro traffic state prediction*, Journal of Advanced Transportation, 2017, <https://doi.org/10.1155/2017/4879170>.
27. Jonkers E., Klunder G., Mahmud M., Benz T., *Methodology and framework architecture for the evaluation of effects of ICT measures on CO<sub>2</sub> emissions*, 20th ITS World Congress Tokyo, 2013, 1–9.
28. Higgs B., Abbas M., Medina A., *Analysis of the Wiedemann Car Following Model over Different Speeds using Naturalistic Data*, 3rd International Conference on ..., 2011, <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/conferences/2011/RSS/3/Higgs,B.pdf>.
29. Pourabdollah M., Bjarkvik E., Furer F., Lindenberg B., Burgdorf K., *Calibration and evaluation of car following models using real-world driving data*, IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC, 2018-March(October), <https://doi.org/10.1109/ITSC.2017.8317836>.
30. Gastaldi M., Meneguzzer C., Rossi R., Lucia L. Della, Gecchele G., *Evaluation of air pollution impacts of a signal control to roundabout conversion using microsimulation*, Transportation Research Procedia, 3, July 2014, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.10.083>.
31. Oskarski J., Gumińska L., Żarski K., *Influence of toll collection method on motorways on traffic safety and efficiency*, Communications in Computer and Information Science, 2018, Vol. 897, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-97955-7\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-97955-7_10).
32. Oskarski J., Kaszubowski D., *Applying a mesoscopic transport model to analyse the effects of urban freight regulatory measures on transport emissions—an assessment*, Sustainability (Switzerland), 2018, 10(7), <https://doi.org/10.3390/su10072515>.
33. Oskarski J., Żarski K., *Methodology of research on the impact of ramp metering on the safety and efficiency of road traffic using transport models*, 6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS), 2019, Cracow, Poland: IEEE. <https://doi.org/10.1109/MTITS.2019.8883355>.
34. Oskarski J., Kamiński T., Kyamakya K., Chedjou J.C., Żarski K., Pędzierska M., *Assessment of the speed management impact on road traffic safety on the sections of motorways and expressways using simulation methods*, Sensors (Switzerland), 2020, 20(18), <https://doi.org/10.3390/s20185057>.
35. Toledo T., Koutsopoulos H.N., Davol A., Ben-Akiva M.E., Burghout W., Andréasson, I., ... Andréasson, I. (n.d.). *Calibration and Validation of Microscopic Traffic Simulation Tools Stockholm Case Study*.
36. Oskarski J., Żarski K., *Uwarunkowania realizacji kontrapasa autobusowego w zmiennokierunkowej organizacji ruchu*, "Transport Miejski i Regionalny", 2020, nr 5.
37. HBEFA Handbook emission factors for road transport, 2010, <https://www.hbefa.net/e/index.html>.
38. Salamati K., Roupail N.M., Frey H.C., Liu B., Schroeder B.J., *Simplified method for comparing emissions in roundabouts and at signalized intersections*, Transportation Research Record, 2015, 2517(2517), <https://doi.org/10.3141/2517-06>.
39. Meneguzzer C., Gastaldi M., Rossi R., Gecchele G., Prati M.V., *Comparison of exhaust emissions at intersections under traffic signal versus roundabout control using an instrumented vehicle*, Transportation Research Procedia, 2017, 25, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.204>.
40. PTV Vissim Emission model DLL interface documentation, PTV AG, 2017, [http://cgi.ptvgroup.com/download/ptv\\_vision/VISSIM/downloads/API/API\\_VISSIM\\_DriverModel\\_DLL.zip](http://cgi.ptvgroup.com/download/ptv_vision/VISSIM/downloads/API/API_VISSIM_DriverModel_DLL.zip).
41. *Szczegółowe warunki techniczne dla znaków drogowych pionowych i warunki ich umieszczania na drogach*, Załącznik nr 1, 2019.
42. PTV Vissim. User Manual, PTV Group, 2022.
43. Natural Resources Canada, *Learn the facts: Fuel consumption and CO<sub>2</sub>*, 2016, Autosmart, 2, 1–2, [http://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/oeo/pdf/transportation/fuel-efficient-technologies/autosmart\\_factsheet\\_6\\_e.pdf](http://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/oeo/pdf/transportation/fuel-efficient-technologies/autosmart_factsheet_6_e.pdf).

# Wartości dodane gałęzi gospodarki jako czynniki determinujące zmiany w przewozach poszczególnych grup ładunków<sup>1</sup>

**ROBERT KRUK**

mgr inż., Instytut Kolejnictwa,  
ul. Chłopickiego 50, 04-275  
Warszawa, tel. 22 47 31 321,  
email: rkruk@ikolej.pl

**PRZEMYSŁAW BRONA**

mgr inż., Instytut Kolejnictwa,  
ul. Chłopickiego 50, 04-275  
Warszawa, tel. 22 47 31 343,  
email: pbrona@ikolej.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono metodykę prognozowania przewozów towarowych kolejowych i drogowych w oparciu o wskaźniki makroekonomiczne, jakimi są wartości dodane poszczególnych gałęzi gospodarki. Wielkości wartości dodanych określają rolę danej gałęzi gospodarki w tworzeniu PKB. W przypadku gałęzi gospodarki uznanych za transportochłonne mogą określać również zapotrzebowanie na przewozy poszczególnych grup ładunków. Istnieje możliwość prognozowania rocznych przewozów towarowych w rozpatrywanym horyzoncie czasowym w oparciu o szacunkowe wskaźniki zmian przewozów, w zależności od oszacowanych zmian wielkości wartości dodanej poszczególnych gałęzi transportu określonych jako transportochłonne, przy czym zmiany przewozów transportem lądowym są określane oddzielnie dla zdefiniowanych grup ładunków w zależności od przyporządkowanych im gałęzi gospodarki. Przewozy towarowe transportem kolejowym w danym roku, w poszczególnych grupach ładunków, zostały określone jako udział transportu kolejowego w przewozach towarowych transportem lądowym. Wskaźniki udziału transportu kolejowego są również funkcją zmian wielkości wartości dodanych poszczególnych gałęzi gospodarki. W artykule przedstawiono także metodykę określania funkcji elastyczności, zarówno dla zmian przewozów w poszczególnych grupach ładunków, jak również udziału transportu kolejowego w przewozach towarowych transportem lądowym. Metoda może być wykorzystana przy opracowaniu prognoz na cele dokumentacji studialnej dotyczącej infrastruktury transportowej.

**Słowa kluczowe:** transport, transport kolejowy, przewozy ładunków, prognozy przewozowe.

## Wprowadzenie

Prognozy przewozów ładunków są istotnym elementem dokumentów strategicznych lub dokumentacji aplikacyjnej i przedprojektowej. Pozwalają między innymi na uzasadnienie celowości realizacji różnego rodzaju projektów inwestycyjnych, w tym przede wszystkim zakupu środków transportu czy budowy lub modernizacji infrastruktury transportowej. Kluczową kwestią są czynniki, od których uzależnione są wielkości potoków ładunków przewożonych poszczególnymi gałęziami transportu.

Przewozy ładunków można prognozować różnymi metodami. Jedną z nich jest metoda szeregów czasowych [1]. Określa ona prognozowane wielkości przewozu ładunków w rozpatrywanym horyzoncie czasowym w jedynie oparciu o dane dotyczące zmian wielkości tych przewozów zaobserwowane w latach poprzedzających okres prognozy.

Transport ładunków uzależniony jest od stanu gospodarki zarówno w wymiarze regionalnym, krajowym, jak i międzynarodowym. Jednak rozwój gospodarczy, mierzony wzro-

stem PKB, nie przekłada się jednakowo na wzrost przewozów ładunków. W rozwoju gospodarczym istotną rolę zaczynają pełnić różnego rodzaju usługi. Ten sektor gospodarki jest znacznie mniej transportochłonny niż produkcja. Dlatego istotne jest pytanie, jak zmiany PKB wpływają na wielkości poszczególnych grup ładunków przewożonych różnymi gałęziami transportu. Zmiany przewozów danej grupy ładunków nie zawsze są jednak odzwierciedleniem zmian PKB. Dlatego w prognozowaniu zmian wielkości przewozów niektórych grup ładunków należy brać pod uwagę zmiany czynników, na podstawie których oblicza się wielkość PKB.

W przewozie ładunków w Polsce największe znaczenie odgrywiają transport kolejowy oraz drogowy, które łącznie można określić jako transport lądowy. Gałęzie te wzajemnie konkurują ze sobą. Prognozując przewozy ładunków transportem kolejowym oraz drogowym w Polsce, należy wziąć pod uwagę uwarunkowania funkcjonowania całego rynku przewozów transportem lądowym.

## Metody obliczania wartości PKB

Według [2] można wyróżnić trzy zasadnicze metody obliczania wartości PKB:

- metoda wydatkowa, która opiera się na założeniu, że PKB jest w przybliżeniu równy wydatkom wszystkich nabywców dóbr finalnych wytworzonych w ciągu roku:

$$PKB = \text{konsumpcja} + \text{inwestycje} + \text{wydatki rządowe (bez transferów)} + \text{zmiana stanu zapasów}$$

- metoda dochodowa, w której zakłada się, że wielkość PKB jest równa sumie dochodów wszystkich właścicieli czynników produkcji:

$$PKB = \text{suma dochodów czynników produkcji}$$

- metoda produkcyjna, w której wartość wytworzonych usług i dóbr finalnych oblicza się, odejmując od produkcji całkowitej wartość dóbr i usług zużytych do tej produkcji:

$$PKB = \text{suma wartości dodanej ze wszystkich gałęzi gospodarki krajowej}$$

Z wyżej wymienionych metod obliczania PKB najbardziej znana jest metoda wydatkowa. Jednak z punktu widzenia popytu na przewozy ładunków istotniejsza

<sup>1</sup> ©Transport Miejski i Regionalny, 2022. Wkład autorów w publikację R. Kruk 80%, P. Brona 20%.

jest metoda produkcyjna, oparta na sumowaniu wartości dodanej wszystkich gałęzi gospodarki danego kraju.

Wartość dodana jest to przyrost wartości produktów będących rezultatem danego procesu produkcji (danej gałęzi gospodarki) pomniejszona o koszty związane z ich wytworzeniem. Wartość dodana jest miernikiem efektu ekonomicznego danej gałęzi gospodarki.

Analizując dane dotyczące wielkości wartości dodanych dla poszczególnych gałęzi gospodarki, można określić wpływ danej gałęzi na wielkość PKB.

GUS w publikowanych statystykach [6] podaje dane dotyczące wartości dodanej dla następujących gałęzi gospodarki:

- rolnictwo, leśnictwo, łowiectwo i rybactwo;
- przemysł:
  - górnictwo i wydobywanie,
  - przetwórstwo przemysłowe,
  - wytwarzanie i zaopatrywanie w energię elektryczną, gaz, parę wodną i gorącą wodę,
  - dostawa wody, gospodarowanie ściekami i odpadami, rekultywacja;
- budownictwo;
- handel, naprawa pojazdów samochodowych;
- transport i gospodarka magazynowa;
- zakwaterowanie i gastronomia;
- informacja i komunikacja;
- działalność finansowa i ubezpieczeniowa;
- obsługa rynku nieruchomości;
- działalność profesjonalna, naukowa i techniczna;
- administrowanie i działalność wspierająca;
- administracja publiczna i obrona narodowa, obowiązkowe zabezpieczenia społeczne;
- edukacja;
- opieka zdrowotna i pomoc społeczna;
- działalność związana z kulturą, rozrywką i rekreacją;
- pozostała działalność usługowa;
- gospodarstwa domowe zatrudniające pracowników oraz wytwarzające produkty na własne potrzeby.

Wśród wyżej wymienionych zostały wyróżnione pogrubieniem te gałęzie gospodarki, które są najbardziej transportochłonne i mają bezpośredni wpływ na popyt na usługi transportowe. Pozostałe gałęzie gospodarki mają zdecydowanie mniejsze lub pomijalne znaczenie dla popytu na usługi transportowe.

Tym samym można stwierdzić, że wyróżnione gałęzie gospodarki można brać pod uwagę przy analizach przewozowych w transporcie towarowym.

### **Metoda wskaźnikowa prognozowania przewozów grup ładunkowych w oparciu o zmiany wielkości wartości dodanej**

Jak już wspomniano w punkcie 2, tylko niektóre gałęzie gospodarki publikowane w statystykach GUS mają istotne znaczenie przy prognozowaniu przewozów poszczególnych grup ładunków.

Istotne znaczenie ma określenie, które gałęzie gospodarki mają wpływ na przewozy danej grupy ładunków.

GUS publikuje [4] dane dotyczące przewozu ładunków dla 20 grup ładunków (klasyfikacja NST 2007). Ponadto w odrębnych statystykach prezentowane są dane dotyczące wielkości przewozów intermodalnych. Tak duża liczba grup ładunków może bardzo skomplikować prognozy przewozowe. Dane te można zagregować do mniejszej liczby grup, co zaproponowano w [3]. Takie pogrupowanie ładunków powinno być związane między innymi ze stanem skupienia ładunków (ładunki stałe, płynne), masą pojedynczej przesyłki (ładunki masowe tj. węgiel, rudy, kruszywa, paliwa płynne oraz ładunki niemasywne – pozostałe grupy).

Każdej grupie ładunków można przyporządkować gałąź lub gałęzie gospodarki, dla których przewozy tych ładunków będą miały istotne znaczenie. Przewozy danej grupy ładunków będą zależały od efektów ekonomicznych przyporządkowanej lub przyporządkowanych im gałęzi gospodarki, których miernikiem jest wartość dodana. Dla grup ładunków „masowych” może to być pojedyncza gałąź gospodarki, na przykład za przewozy węgla odpowiada przede wszystkim górnictwo. Natomiast w przypadku grup ładunków „niemasowych”, na przykład ładunki intermodalne, można brać pod uwagę sumę wartości dodanych gałęzi gospodarki uznanych za transportochłonne. W grupach ładunków „niemasowych” znajdują się artykuły konsumpcyjne oraz komponenty do produkcji tych artykułów, co sprawia, że przewozy tych grup ładunków są zależne od efektów ekonomicznych większej liczby gałęzi gospodarki.

Można stwierdzić, że zmiany przewozów danej grupy ładunków będą zależne od zmian wielkości wartości dodanej przyporządkowanej im gałęzi gospodarki.

W [3] przedstawiono metodą wskaźnikową prognozowania przewozów grup ładunkowych w oparciu o zmiany PKB. Polega ona na oszacowaniu prognozowanych zmian przewozów grup ładunków w oparciu o wyznaczoną funkcję elastyczności w zależności od zmian PKB. Funkcję tę można wyznaczyć w oparciu o dane historyczne dotyczące przewozów ładunków oraz dane dotyczące PKB. Dysponując prognozą wzrostu PKB, można z kolei określić prognozowane zmiany przewozów w rozpatrywanym horyzoncie czasowym, a tym samym oszacować wielkość przewozów ładunków.

Taką samą metodykę można zastosować w przypadku zastąpienia zmian wielkości PKB zmianą wielkości wartości dodanej, określonej dla danej grupy ładunków.

W statystykach GUS [4] dane dotyczące wielkości wartości dodanych są prezentowane według gałęzi gospodarki zaprezentowanych w punkcie 2 od roku 1995 do roku 2021. Dane dotyczące przewozów ładunków [4] są obecnie dostępne za lata 2002–2020. Mając na uwadze uśrednienie okresów danych, funkcje elastyczności można wyznaczyć w oparciu o dane za lata 2002–2020. W następnych latach po opublikowaniu przez GUS nowych danych funkcje można modyfikować w zależności od aktualnych wskaźników makroekonomicznych i danych przewozowych.

### Wyznaczenie funkcji elastyczności zmian przewozów poszczególnych grup ładunków względem zmian wielkości wartości dodanych

Na podstawie danych dotyczących zmian rok do roku przewozów danej grupy ładunków i odpowiadającym im zmianom wielkości wartości dodanej określonej dla tej grupy ładunków można wyznaczyć funkcję elastyczności w postaci funkcji logarytmicznej:

$$ZP_i = Azp_i \ln(ZWd_i) + Bzp_i \quad (1)$$

gdzie:

$ZP_i$  – zmiana przewozów rok do roku i-tej grupy ładunkowej,

$ZWd_i$  – zmiana wartości dodanej określona dla i-tej grupy ładunków gałęzi gospodarki,

$Azp_i, Bzp_i$  – stałe określone dla każdej grupy ładunkowej.

Istotnym zagadnieniem jest wyznaczenie dla każdej z grup ładunków stałych  $Az$  i  $Bz$ . Określić je można na podstawie danych statystycznych, jednak istotna jest również wiedza ekspercka dotycząca trendów w przewozach poszczególnych grup ładunków.

Mając wyznaczone funkcje elastyczności dla poszczególnych grup ładunków, można dla nich opracować prognozę zmian przewozów. W tym celu istotne znaczenie mają prognozy zmian wielkości wartości dodanej poszczególnych gałęzi gospodarki.

Zmiany przewozów dla wszystkich grup można określić:

$$ZP_j = \sum_{i=1}^n (U_{i,j-1} * ZP_{i,j}) \quad (2)$$

gdzie:

$ZP_{i,j}$  – zmiana przewozów rok do roku w j-tym roku prognozy,

$n$  – liczba grup ładunkowych,

$U_{i,j-1}$  – udział i-tej grupy ładunkowej w przewozach ogółem w roku poprzednim,

$ZP_{i,j}$  – zmiana przewozów i-tej grupy ładunkowej w j-tym roku prognozy.

W różnego rodzaju dokumentach planistycznych lub aplikacyjnych stosuje się prognozę zmian PKB opracowaną przez Ministerstwo Finansów na potrzeby przygotowania projektów inwestycyjnych [5]. Istotnym zagadnieniem jest przejście z prognozy zmian PKB do prognozy zmian wielkości wartości dodanych. Zmiany te można oszacować w oparciu o analizę wpływu wartości dodanej poszczególnych gałęzi gospodarki na wielkość PKB i wyznaczyć funkcję w postaci funkcji logarytmicznej:

$$ZWd_{i,j} = f(PKB_j) \quad (3)$$

gdzie:

$ZWd_{i,j}$  – zmiana wartości dodanej określonej dla i-tej gałęzi gospodarki w j-tym roku prognozy,

$PKB_j$  – prognozowana zmiana PKB w j-tym roku prognozy.

Mając oszacowane prognozowane zmiany przewozów rok do roku dla poszczególnych grup ładunków oraz przewozów ogółem, można oszacować prognozowane przewozy poszczególnych grup ładunków:

$$P_{i,j} = Zp_{i,j} * P_{i,j-1} \quad (4)$$

gdzie:

$P_{i,j}$  – przewozy i-tej grupy ładunków w j-tym roku prognozy,

$Zp_{i,j}$  – zmiana przewozów rok do roku i-tej grupy ładunkowej w j-tym roku prognozy,

przewozy i-tej grupy ładunków w poprzednim

$P_{i,j-1}$  – do bieżącego roku prognozy,

oraz przewozy ogółem łącznie:

$$P_j = \sum_{i=1}^n P_{i,j} \quad (5)$$

gdzie:

$P_j$  – przewozy ładunków ogółem w j-tym roku prognozy,

$n$  – liczba grup ładunkowych,

$P_{i,j}$  – przewozy i-tej grupy ładunków w j-tym roku prognozy.

Przewozy ogółem zależą od wielkości przewozów poszczególnych grup ładunków, zatem uwzględniają one strukturę tych przewozów, która również zmienia się w zależności od PKB.

### Prognozowanie zmian przewozów ładunków transportem kolejowym

Metoda wskaźnikowa może służyć do prognozowania przewozu ładunków różnymi gałęziami transportu, w tym transportem kolejowym i drogowym. Obie gałęzie transportu wzajemnie ze sobą konkurują i określono je w punkcie 1 łącznie jako transport lądowy. Dlatego też dla przewozów ładunków transportem kolejowym istotne znaczenie ma popyt na przewozy danej grupy ładunków również transportem drogowym.

Mając oszacowane prognozowane przewozy ładunków łącznie transportem kolejowym i drogowym, zarówno w poszczególnych grupach ładunków, jak również w przewozach ogółem, można na tej podstawie oszacować prognozowane przewozy ładunków transportem kolejowym lub drogowym, wykorzystując udział danej gałęzi transportu w przewozach ładunków łącznie transportem lądowym.

Dla zwiększenia dokładności szacowania prognozy przewozów ładunków transportem kolejowym należałoby określić funkcje elastyczności udziału transportu kolejowego w przewozach poszczególnych grup ładunków w zależności od prognozowanych zmian wartości dodanej przyporządkowanej danej grupie ładunków. Takie podejście uzależnia udział transportu kolejowego w przewozach danej grupy ładunków transportem lądowym od efektów ekonomicznych tych gałęzi gospodarki, które mają wpływ na popyt na przewozy danej grupy ładunków.