

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-E¹

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

¹ 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 η_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 λ_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, $code_j \in \mathbb{N}^+$,

η_j^{out} oraz η_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 τ_{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 $\tau_{ij}^{(OD)}$ dla i -tej jednostki terytorialnej w j -tym kierunku proponuje się oszacowywać następująco:

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

gdzie:

- b_{ik} , m_{ik} oraz s_{ik} – liczba dużych, średnich oraz małych przedsiębiorstw k -tego rodzaju zarejestrowanych w i -tej jednostce terytorialnej,
- $\theta_{jk}^{(OD)}$ – empiryczna liczba podróży zagranicznych (na podstawie próbki TD-E) wykonanych przez przedsiębiorstwa k -tego rodzaju w j -tym kierunku,
- δ_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 Ω_{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 ζ_k na k -tym odcinku λ_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 Ω_{ij} oblicza się za pomocą wzoru

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

gdzie:

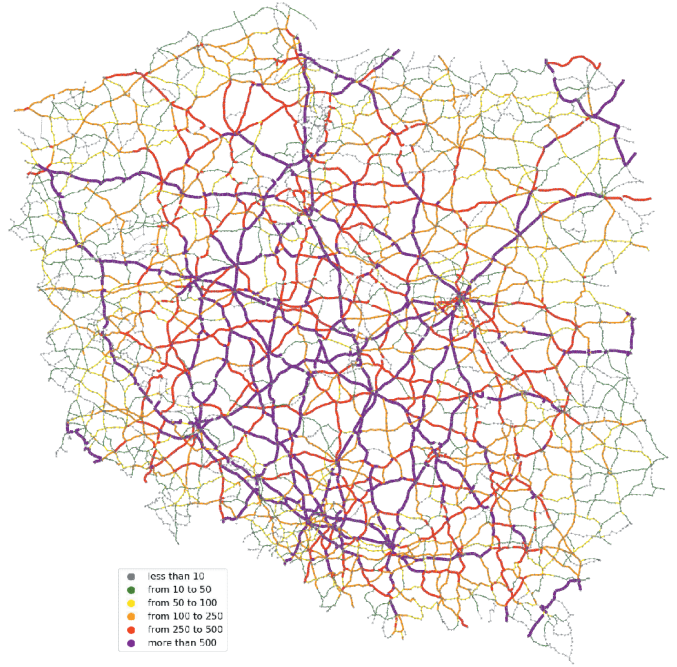
l_k – odległość k -tego odcinka sieci drogowej [km] (jest podawana w pliku 'links.csv' z danymi o parametrach odcinków sieci lub może być oszacowana na podstawie współrzędnych geograficznych źródłowego i docelowego wierzchołka krawędzi reprezentującej odcinek w modelu sieci transportowej).

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:

- ζ_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 ε_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.