

WYKORZYSTANIE KRAJOWYCH MODELI SIECI TRANSPORTOWYCH DO PROGNOZOWANIA KOLEJOWYCH PRZEWOZÓW PASAŻERSKICH

Andrzej Waltz

dr inż., 04-715 Warszawa, ul. Kożuchowska 2a, tel. 605 404 209, e-mail: awaltz@poczta.onet.pl

Streszczenie. *W artykule przedstawione zostały zasady budowy modelu pozwalającego na obliczanie prognozy ruchu dla pasażerskich przewozów kolejowych. Składa się on z modeli: sieci kolejowej, konkurencyjnych środków transportu oraz obszaru podzielonego na rejony komunikacyjne z danymi społeczno-ekonomicznymi. Modele sieciowe odwzorowują istniejące oraz przyszłe sieci transportowe. Opracowane modele ruchu oparte są analizie danych stanu istniejącego obejmujących pomiary ruchu, statystyki sprzedaży biletów itp. Wielkość ruchu kolejowego liczona jest na podstawie zmiennych opisujących od strony popytu charakterystykę społeczno-gospodarczą obszaru otaczającego stacje, a od strony podaży ofertę opisaną częstotliwością kursowania pociągów, ich prędkością, ceną biletu, itp. Możliwość prowadzenia równoległej analizy dla innych środków transportu pozwala na modelowanie podziału zadań przewozowych w zależności od różnych czynników, jak czas podróży, koszt podróży, itp. Obliczenia w modelu wykonywane są według klasycznego podziału na: generację ruchu, rozkład przestrzenny, podział zadań przewozowych, rozkład ruchu na sieć. Do budowy modelu i wykonywania obliczeń wykorzystany został program VISUM.*

Słowa kluczowe: *model sieci, prognoza, kolej*

1. Model obliczeniowy i zastosowana metoda

Do budowy modelu zastosowany został profesjonalny program VISUM pozwalający na wykonanie wszelkich obliczeń symulacyjnych potrzebnych do oceny przyszłych potrzeb transportowych. Opisany model zawiera cztery warstwy informacyjne:

- informacje o analizowanym obszarze, głównie z Banku Danych Regionalnych,
- informacje o sieci kolejowej opartą na bazach danych PLK oraz przewoźników kolejowych
- informacje o sieci drogowej, oparte na bazach danych GDDKiA oraz modelu sieciowym udostępnianym przez tę instytucję
- informacje o połączeniach lotniczych na podstawie danych przewoźników.

Informacje o obszarze są dostępne na różnych poziomach dokładności, w zależności od źródła i rodzaju danych, od gmin i miast do województw. Podstawowe analizy wykonywane są w podziale na rejony komunikacyjne odpowiadające podziałowi na powiaty.

Model sieci kolejowej obejmuje wszystkie odcinki sieci kolejowej i zawiera informacje o kategoriach technicznych, prędkościach, liczbie pociągów, pasażerów, itp. Oprócz tego model zawiera węzły odpowiadające stacjom, z informacją o wielkości i rodzaju ruchu podróźnych wsiadających i wysiadających.

Model sieci drogowej obejmuje wszystkie odcinki dróg krajowych i wojewódzkich i zawiera informacje o kategoriach dróg, prędkościach, potokach samochodowych, itp. Umożliwia uwzględnienie wpływu konkurencyjnych środków transportu.

Analiza połączeń lotniczych jest ograniczona do relacji krajowych określanych na podstawie dostępnych danych od przewoźników.

Wszystkie informacje o podróżach są zagregowane do poziomu rejonów komunikacyjnych. W takim układzie dostępne są zagregowane podróże z kolejowej statystyki biletowej, dane o podróżach samochodowych i autobusowych oparte na sieciowym modelu drogowym, jak również czasy, odległości i koszty przejazdu różnymi środkami komunikacji używane w modelowaniu. Dzięki temu jest możliwa analiza i prognoza podziału zadań przewozowych na relacjach pomiędzy rejonami.

Obliczenia są wykonywane według klasycznego podziału na etapy obliczeniowe określające:

- wielkość ruchu generowanego w rejonach komunikacyjnych,
- rozkład przestrzenny ruchu (prognozowane macierze ruchu pomiędzy rejonami),
- pooział zadań przewozowych pomiędzy środki transportu,
- obciążenie potokami ruchu modeli sieci komunikacyjnych.

Do obliczenia wielkości generowanego ruchu kolejowego wykorzystane zostały modele ekonometryczne opracowane na podstawie historycznych danych o sprzedaży biletów oraz danych o obszarze. Składają się one z równań regresyjnych określających zależność generowanego pasażerskiego ruchu kolejowego od czynników zewnętrznych, które w procesie analizy wykazały największy wpływ na wielkość ruchu. Przy wyborze tych czynników uwzględniony został również warunek, że ich wartości liczbowe muszą być dostępne dla okresów prognozowanych, a więc na następne 30 lat.

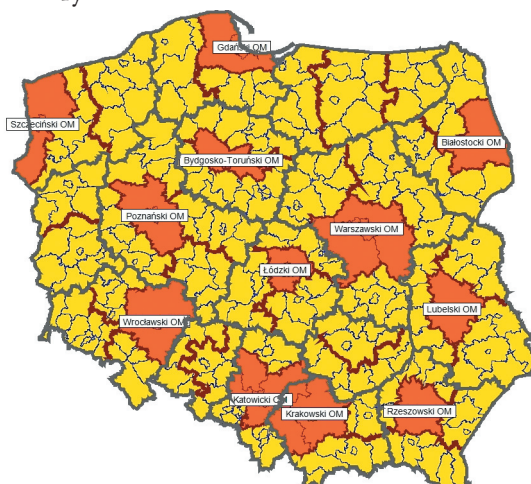
Rozkład przestrzenny ruchu (macierze podróży) liczony jest modelem grawitacyjnym, uwzględniającym z jednej strony wielkość potencjałów rejonów wyrażoną liczbą generowanych podróży, z drugiej strony koszt przejazdu pomiędzy rejonami. Koszt przejazdu koleją uwzględnia rzeczywisty koszt biletu oraz koszt czasu traconego na podróż. Model jest więc wrażliwy na zmiany w czasie podróży wywołane poprawą jakości infrastruktury oraz taboru, a także polityki cenowej.

Wspomniany program komputerowy umożliwia symulację rozkładu obecnego i przyszłego ruchu pasażerskiego na sieci kolejowej. W wyniku obliczeń uzyskuje się wielkość ruchu generowanego w węzłach stacyjnych i potoków na każdym odcinku sieci oraz wynikającą z nich pracę przewozową.

2. Model obszaru

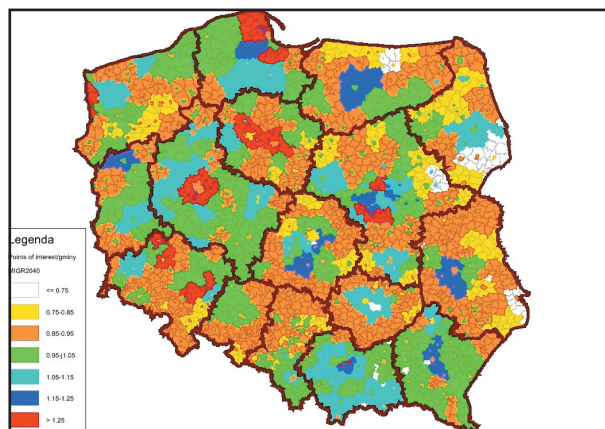
Ze względu na różne źródła danych statystycznych w modelu zapisane są podziały na województwa, podregiony, Obszary Metropolitalne, powiaty i gminy, co pozwala na agregację i dezagregację danych w zależności od potrzeb analizy, czy też prezentowania wyników.

Do analiz komunikacyjnych posłużono się podziałem na rejony komunikacyjne, których granice pokrywają się z powiatami (379 rejonów). Wszelkie dane statystyczne lub prognostyczne są sprowadzane do tego podziału. Do nich dodane zostały przejścia graniczne, jako punkty generujące ruch zagraniczny. Podział ten przedstawiony jest na rysunku 1.



Rys. 1. Podział na jednostki administracyjne, funkcjonalne i rejony komunikacyjne
Źródło: opracowanie własne

Przykładem wykorzystania modelu jest analiza zmian w liczbie ludności wg prognozy GUS (rys. 2).



Rys. 2. Prognoza GUS zmian w liczbie ludności do 2030 roku
Źródło: opracowanie własne

3. Modele sieciowe

3.1. Sieć drogowa

Podstawą opracowanego modelu sieci drogowej dla stanu istniejącego, były informacje zawarte w Banku Danych Drogowych (BDD). Sieć ta jest rozwinięciem modelu z roku 2006 udostępnianego przez GDDKiA wykonawcom projektów drogowych. Do budowy modelu wykorzystano następujące dane zawarte w BDD:

- długość odcinka, pikietaż, kategoria techniczna odcinka,
- liczbę jezdni, szerokość jezdni, dane z Generalnego Pomiaru Ruchu,
- przynależność administracyjna (droga krajowa, wojewódzka), numer drogi,
- współrzędne i nazwy węzłów drogowych.

Na podstawie tych danych zbudowany jest zaktualizowany model sieci drogowej dla roku 2011, który zawiera wszystkie odcinki dróg krajowych i wojewódzkich na odcinkach zamiejskich oraz w granicach administracyjnych miast. Model zawiera również odcinki projektowane w przyszłości.

3.2. Połączenia lotnicze

Analiza połączeń lotniczych została tutaj oparta na dostępnych danych zawierających dobową liczbę lotów rejsowych poszczególnych przewoźników, rodzaje samolotów i czas przelotu. Znając liczbę połączeń pomiędzy miastami, rodzaj samolotów oraz czas jazdy można stworzyć sieć bezpośrednich relacji pomiędzy parami miast służącą do analizy.

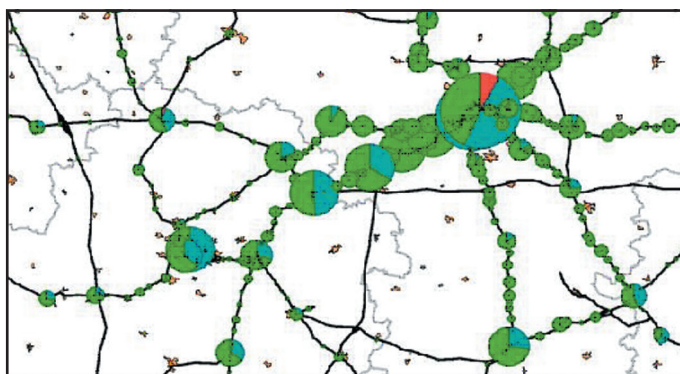
W porównaniu z siecią drogową i kolejową jest to więc sieć prosta, w której węzłami są porty lotnicze a odcinkami bezpośrednie połączenia pomiędzy nimi.

3.3. Sieć kolejowa

Model sieci kolejowej zbudowany został na podstawie informacji pobieranych z różnych dostępnych źródeł, głównie z baz danych PLK oraz od przewoźników. Sama baza danych zawiera węzły, linie i odcinki. Elementy te opisane są przez szereg atrybutów, wśród nich także te używane w statystyce, pozwalające na wprowadzenie do modelu aktualnych danych z różnych źródeł dotyczących np.: liczby sprzedanych biletów, liczby pociągów różnych typów, liczby pasażerów, ograniczeń prędkości, skrajni, itp. Zbiór tych atrybutów może być dowolny w zależności od potrzeb. Podstawowa baza danych z odcinkami sieci zawiera następujące atrybuty:

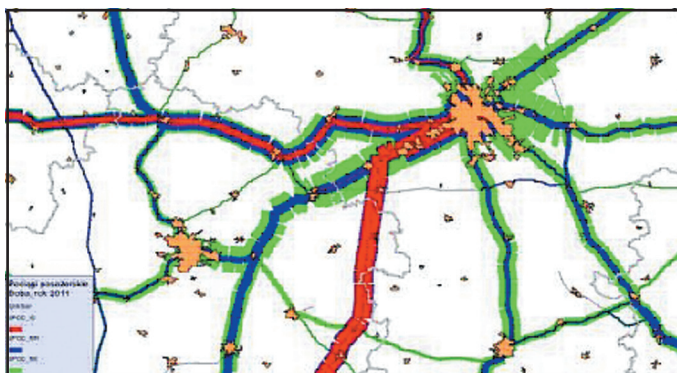
- numer linii, numer odcinka na linii, kilometry początku i końca odcinka,
- nazwy i numery węzłów początkowego i końcowego,
- prędkość aktualna i projektowana wg typów pociągów,
- liczba pociągów, pasażerów i ton na dobę według rodzaju pociągu.

Fragment modelu sieci zawierający te dane przedstawiony jest na rysunkach 3 i 4.



Rys. 3. Liczba pasażerów na stacjach według rodzaju pociągu

Źródło: statystyka biletowa, opracowanie własne



Rys. 4. Średnia liczba pociągów na dobę według rodzaju pociągu

Źródło: rozkłady jazdy PKP, opracowanie własne

Baza danych o odcinkach uzupełniona jest o informacje dotyczące węzłów sieciowych. W szczególności dla węzłów sieciowych reprezentujących kolejowe stacje pasażerskie wprowadzone zostały dane historyczne o sprzedanych biletach na tych stacjach oraz czasach postoju. Model sieci został zbudowany zarówno dla stanu istniejącego, jak i dla okresu prognozy, gdzie zostały uwzględnione wszystkie zmiany w infrastrukturze mające wpływ na poprawienie oferty przewozowej.

4. Model podróży kolejowych

4.1. Założenia ogólne

Do analizy stanu istniejącego oraz wyników prognozy niezbędne są informacje o wielkości potoków na odcinkach. Informacje te są zbierane przez przewoźników, ale często aktualne dane stanowią tajemnicę handlową i nie są udostępniane. Na podstawie danych historycznych oraz zagregowanych danych o przewozach dostępnych w statystyce, opracowany został model obliczeniowy pozwalający na

oszacowanie dla roku bazowego średniej dobowej wielkości potoków pasażerskich na sieci kolejowej, a po wprowadzeniu danych dla okresu prognozowanego uzyskanie prognozy wielkości tych potoków. Zastosowane do analizy modele ruchu oparte są na zależności pomiędzy wielkością ruchu generowanego w obszarze a:

- wielkością PKB,
- liczbą ludności,
- stopniem zmotoryzowania,
- podażą usług transportowych.

Zestaw takich danych wynika z jednej strony z dostępności takich informacji dla stanu istniejącego, ale również, co ważniejsze, z możliwości określenia ich wartości dla okresu prognozy.

4.2. Modele generacji ruchu

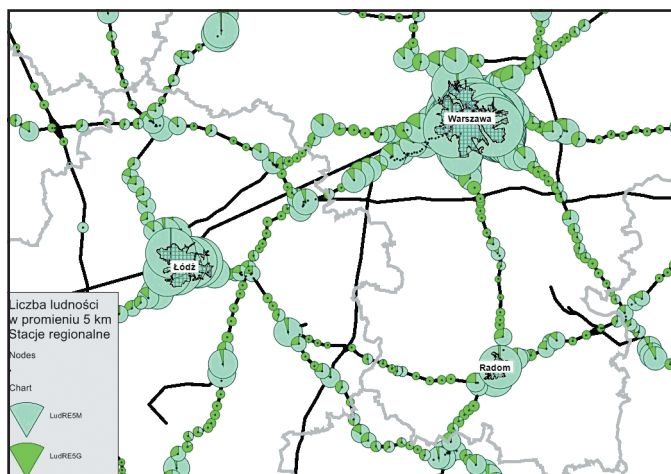
Dane historyczne określające liczbę sprzedanych biletów na stacjach pozwalają na określenie zależności pomiędzy tą liczbą a zmiennymi objaśniającymi charakteryzującymi otoczenie w jakim te stacje się znajdują. W modelu obszaru opisanym wcześniej, wszystkie te zmienne zostały zdezagregowane do poziomu gminy. Dzięki funkcjom programu VISUM, możliwe było policzenie sum tych zmiennych w otoczeniu każdej ze stacji w zadanym promieniu odległości. W procesie analizy stwierdzono, że najbardziej miarodajne są informacje o otoczeniu stacji w promieniu 2 i 5 kilometrów.

Zgodnie z oczekiwaniami podstawową zmienną, od strony popytu, okazała się liczba mieszkańców znajdujących się w otoczeniu stacji. Zmiennymi uzupełniającymi poprawiającymi jakość modelu są: poziom ekonomiczny wyrażony wielkością PKB i stopień zmotoryzowania tych mieszkańców określony przez liczbę samochodów. Od strony podaży najbardziej istotną zmienną objaśniającą jest liczba pociągów na dobę dostępna dla tych mieszkańców.

Kolejność obliczeń w procesie analizy była następująca:

- Dla każdego rejonu komunikacyjnego, na podstawie modelu sieci kolejowej, definiowane są stacje obsługujące pociągi poszczególnych kategorii.
- Dla każdej stacji liczona jest liczba mieszkańców w promieniu 2 i 5 kilometrów, w podziale na mieszkańców obszarów wiejskich i miejskich. Uwzględniana jest bliskość sąsiednich stacji tego samego typu. Następnie dla każdego rejonu liczone są sumy mieszkańców wokół stacji zdefiniowanych dla tego rejonu.
- Dla każdego rejonu liczony jest potencjał ekonomiczny będący iloczynem liczby mieszkańców wokół stacji i PKB per capita dla tego rejonu.
- Dla każdego rejonu liczona jest liczba samochodów będąca iloczynem liczby mieszkańców wokół stacji i wskaźnikiem motoryzacji dla tego rejonu.
- Dla każdego rejonu liczona była suma pociągów zatrzymujących się na stacjach zdefiniowanych w tym rejonie.

Na rysunku 5 pokazany jest przykładowy wynik analizy dotyczącej liczby mieszkańców w promieniu 5 km od stacji regionalnych.



Rys. 5. Ludność wiejska i miejska wokół stacji regionalnych

Źródło: opracowanie własne

W wyniku analiz otrzymano równania regresyjne określające liczbę podróży generowanych w poszczególnych rejonach dla trzech typów podróży: regionalne, międzyregionalne i międzyaglomeracyjne.

Podróże regionalne

$$LP_{reg} = a * POC_{reg} + b * LUD2w + c * SO2m - d * SO5w + e * K * PKB5m \quad (1)$$

gdzie:

LP_{reg} - liczba podróży regionalnych generowanych na stacjach regionalnych w rejonie,

POC_{reg} - liczba pociągów regionalnych zatrzymujących się na stacjach regionalnych w rejonie,

$LUD2w$ - liczba mieszkańców wiejskich w promieniu 2 km od stacji regionalnych w rejonie,

$SO2m$ - liczba samochodów mieszkańców miejskich w promieniu 2 km od stacji regionalnych w rejonie,

$SO5w$ - liczba samochodów mieszkańców wiejskich w promieniu 5 km od stacji regionalnych w rejonie,

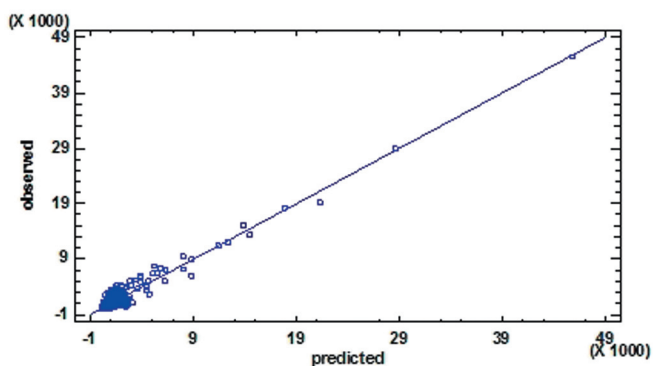
$PKB5m$ - wielkość PKB dla mieszkańców miejskich w promieniu 5 km od stacji regionalnych w rejonie,

a, b, c, d, e - współczynniki regresji,

K - współczynnik korekty.

Współczynnik $R^2 = 0.961$.

Należy zwrócić uwagę, że liczba samochodów w obszarach wiejskich ma znak „minus”, czyli wpływa na zmniejszenie liczby podróży, a dla obszarów miejskich ma znak „plus”, czyli wpływa na ich zwiększenie. Wynika to pośrednio z powiększającego się zatłoczenia ulic w miastach w miarę przybywania samochodów i przenoszenia się podróży do komunikacji zbiorowej.



Rys. 6. Korelacja dla generowanych podróży regionalnych

Źródło: opracowanie własne

Podróże międzyregionalne

$$LPmreg = a*POCmreg + b*LUD5m - c*SO2m + e*K*PKB2m \quad (2)$$

gdzie:

LPmreg - liczba podróży międzyregionalnych generowanych na stacjach międzyregionalnych w rejonie,

POCmreg - liczba pociągów międzyregionalnych zatrzymujących się na stacjach międzyregionalnych w rejonie,

LUD5m - liczba mieszkańców wiejskich w promieniu 2 km od stacji międzyregionalnych w rejonie,

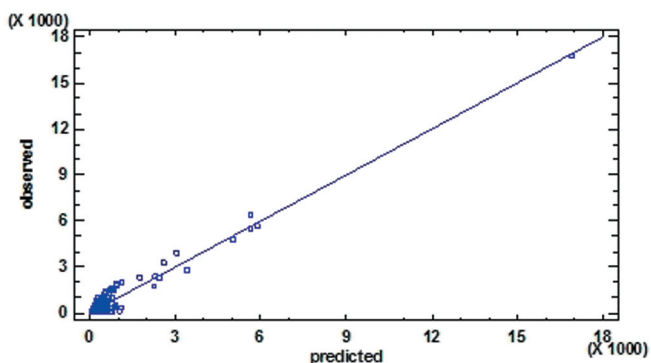
SO2m - liczba samochodów mieszkańców miejskich w promieniu 2 km od stacji międzyregionalnych w rejonie,

PKB2m - wielkość PKB dla mieszkańców miejskich w promieniu 5 km od stacji międzyregionalnych w rejonie,

a, b, c, e – współczynniki regresji,

K - współczynnik korekty.

Współczynnik $R^2 = 0.965$.



Rys. 7. Korelacja dla generowanych podróży międzyregionalnych

Źródło: opracowanie własne

Podróże międzyaglomeracyjne

$$LP_{mag} = a * POC_{mag} - c * SO_{5m} + e * K * PKB_{5m} \quad (3)$$

gdzie:

LP_{mag} - liczba podróży międzyaglomeracyjnych generowanych na stacjach międzyaglomeracyjnych w rejonie,

POC_{mag} - liczba pociągów międzyaglomeracyjnych zatrzymujących się na stacjach międzyaglomeracyjnych w rejonie,

SO_{5m} - liczba samochodów mieszkańców miejskich w promieniu 5 km od stacji międzyaglomeracyjnych w rejonie,

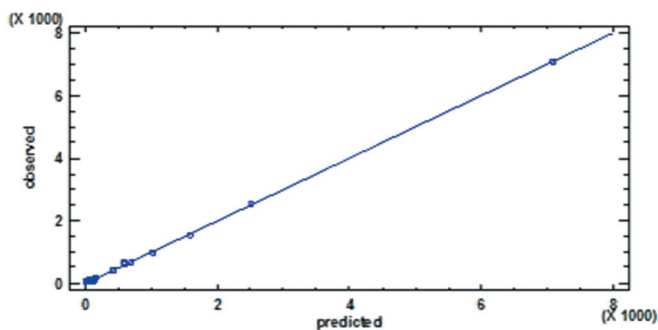
PKB_{5m} - wielkość PKB dla mieszkańców miejskich w promieniu 5 km od stacji międzyaglomeracyjnych w rejonie,

a, c, e - współczynniki regresji,

K - współczynnik korekty.

Współczynnik $R^2 = 0.999$.

Dla podróży międzyaglomeracyjnych R^2 jest najwyższy, ponieważ dane biletowe są tutaj najbardziej wiarygodne.



Rys. 8. Korelacja dla generowanych podróży międzyaglomeracyjnych

Źródło: opracowanie własne

PKB jest tutaj główną zmienną decydującą o wzroście ruchu. Wynika to ze struktury podróży międzyaglomeracyjnych, gdzie dużą część stanowią podróże służbowe. Współczynnik korekty K pojawiający się w równaniach stosowany jest do wielkości PKB w miastach, ze względu na to, że w niektórych z nich wielkość PKB per capita jest istotnie większa niż używana do obliczeń wartość średnia w podregionie, w którym te miasta są położone.

Wprowadzając do równań regresyjnych dane wpływające na popyt i podaż dla kolejnych lat prognozy otrzymujemy prognozowane liczby podróży w rejonach komunikacyjnych dla analizowanych typów podróży.

4.3. Modele rozkładu przestrzennego

4.3.1. Zasady obliczania macierzy podróży

Macierze podróży liczone są przy pomocy ogólnie znanego modelu grawitacyjnego, w którym uwzględniana jest liczba podróży generowana w rejonach oraz koszt podróży pomiędzy rejonami. Model opisany jest wzorem:

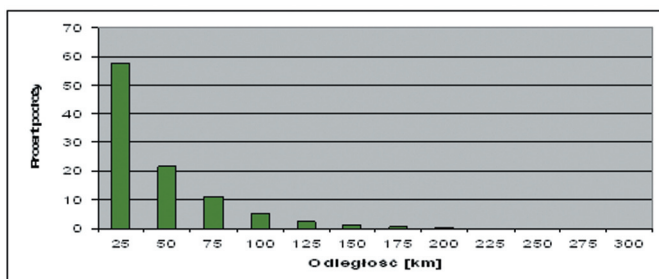
$$P_{ij} = S * \frac{P_i * A_j}{f(C_{ij})} \quad (4)$$

gdzie:

- P_{ij} - liczba podróży na relacji pomiędzy rejonami „i-j”,
- P_i - potencjał podróży generowanych w rejonie i,
- A_j - potencjał podróży generowanych w rejonie j,
- C_{ij} - uogólniony koszt podróży dla relacji pomiędzy rejonami „i-j”,
- S - stała korygująca.

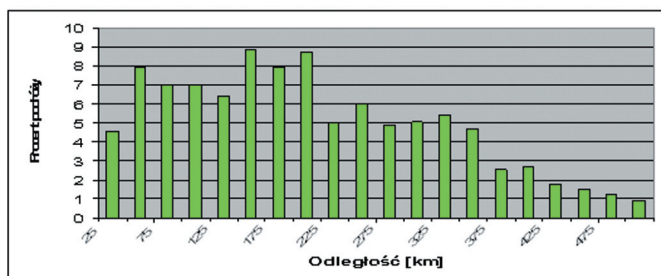
Potencjały podróży liczone są dla wszystkich rejonów komunikacyjnych na podstawie równań regresyjnych opisanych w poprzednim punkcie. Istotnym elementem tego modelu jest kształt krzywej $f(C_{ij})$ uzależniającej liczbę podróży pomiędzy parą rejonów a kosztem podróży pomiędzy nimi. Krzywe te są kalibrowane na podstawie histogramów otrzymanych z danych o rzeczywistej liczbie podróży pomiędzy rejonami na podstawie statystyki sprzedanych biletów. Określają one liczbę podróży w przedziałach odległości.

Prezentowane poniżej histogramy zostały opracowane przy wykorzystaniu historycznych macierzy przejazdów według sprzedanych biletów oraz odległości z modelu sieciowego.

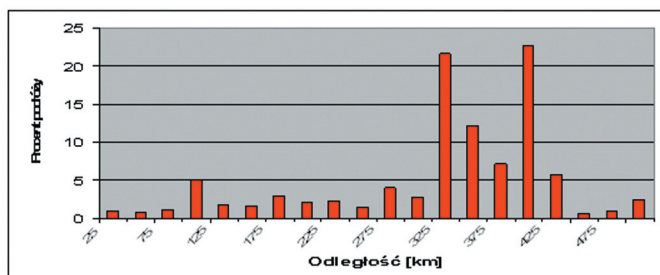


Rys. 9. Rozkład długości podróży regionalnych

Źródło: statystyki biletowe, opracowanie własne



Rys. 10. Rozkład długości podróży międzyregionalnych
Źródło: statystyki biletowe, opracowanie własne



Rys. 11. Rozkład długości podróży międzyaglomeracyjnych
Źródło: statystyki biletowe, opracowanie własne

Średnie długości podróży w 2011 roku to dla przejazdów: regionalnych – 43 km, międzyregionalnych – 208 km i międzyaglomeracyjnych – 338 km.

W wyniku kalibracji modelu grawitacyjnego otrzymano parametry funkcji dla tych trzech rodzajów podróży. Ogólna postać funkcji to:

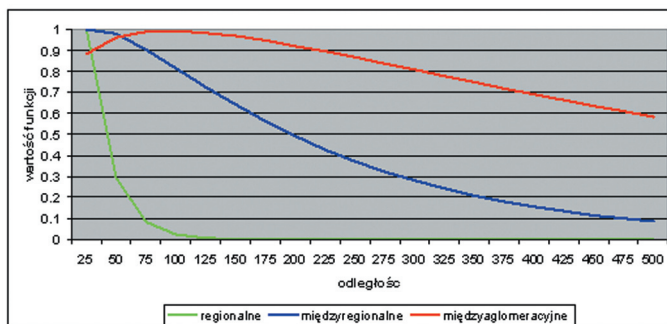
$$f(C_{ij}) = A * C_{ij}^B * \exp(C_{ij})^C \quad (5)$$

gdzie:

C_{ij} - uogólniony koszt podróży dla relacji „i - j”,

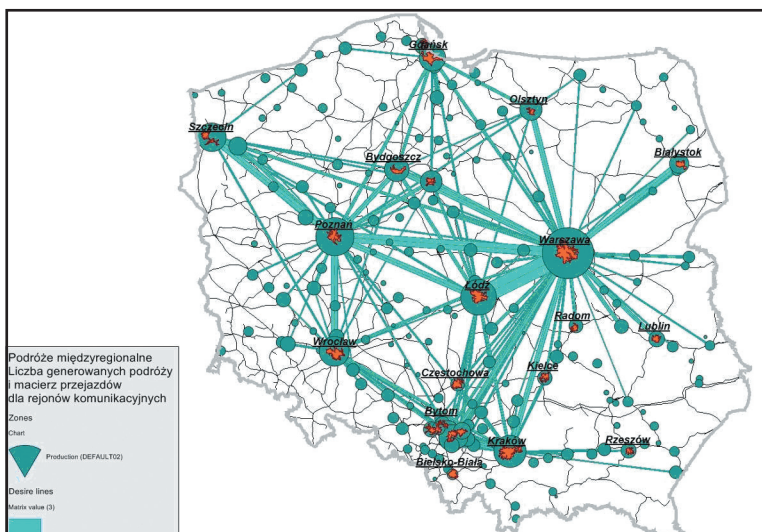
A, B, C - parametry funkcji, różne dla każdego rodzaju podróży.

Na rysunku 12 przedstawione są kształty tych funkcji, dla większej przejrzystości odniesione do długości podróży wyrażonej w kilometrach.



Rys. 12. Funkcje modelu grawitacyjnego dla poszczególnych rodzajów podróży
Źródło: opracowanie własne

Funkcje te zastosowane w modelu grawitacyjnym, zapewniają otrzymanie wynikowych macierzy podróży, dla których histogramy są zgodne z histogramami otrzymanymi z rzeczywistymi macierzami biletowymi. Graficzny obraz przykładowej macierzy podróży przedstawia rysunek poniżej.



Rys. 13. Macierz podróży międzyregionalnych

Źródło: opracowanie własne

4.3.2. Zasady obliczania macierzy czasów, odległości i kosztów

Macierz czasów liczona jest na podstawie informacji o czasach przejazdu po odcinkach i traconego w węzłach stacyjnych. W kolejnych krokach wykonuje się obliczenie:

- średniej liczby pociągów na odcinkach dochodzących do węzła i wynikających z tego czasów oczekiwania w tym węźle,
- czasów przejazdu po odcinkach z uwzględnieniem prędkości czasu postoju,
- ścieżek przejazdu oraz macierzy czasów przejazdu,
- macierzy odległości po ścieżkach przejazdu.

Obliczenia te są wykonywane niezależnie dla każdego typu pociągu.

Koszt uogólniony oblicza się według wzoru:

$$C_{ij} = \sum_{m=1}^M C_m + \left(\sum_{n=1}^N T_n \right) * KJ \quad (6)$$

gdzie:

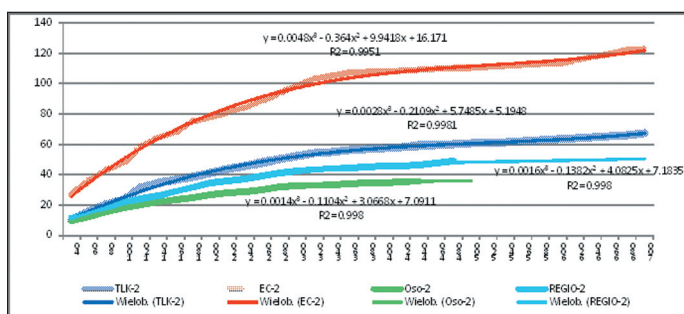
- C_{ij} - uogólniony koszt przejazdu między rejonami i-j,
- C_m - składniki kosztu podróży (bilet, koszt paliwa, opłata autostradowa),
- T_n - składniki czasu podróży,
- KJ - koszt jednostkowy czasu podróży.

Macierze kosztów dla podróży koleją obliczane są niezależnie dla każdego typu podróży przez sumowanie dwóch macierzy kosztów podróży w kolejnych krokach:

- macierz sumarycznych czasów przejazdu dla danego typu podróży, która jest zapisana w minutach, mnożona jest przez koszt jednej minuty,
- macierz odległości, która jest zapisana w kilometrach, przeliczana jest na koszt przejazdu wynikający z ceny biletu dla danego typu podróży.

4.3.3. Analiza cen biletów

Bezpośredni koszt przejazdu zależy od ceny biletu. Zależność ceny od odległości daje się w prosty sposób opisać przez funkcję, które mogą być następnie zastosowane w procesie obliczania kosztów podróży. Analiza przeprowadzona została dla cen biletów, w oparciu o dane udostępniane przez przewoźników. Na rysunku 14 pokazane są wyniki analizy dla biletów drugiej klasy w przedziale odległości do 700 km. Współczynniki korelacji dla wszystkich funkcji są na poziomie ponad 0.99.



Rys. 14. Ceny biletów w funkcji odległości wg danych przewoźników

Źródło: cenniki biletów, opracowanie własne

Wyprowadzone w ten sposób wzory są stosowane przy obliczaniu ceny biletu w funkcji odległości policzonej w modelu sieci.

4.4. Rozkład ruchu na sieć

4.4.1. Dezagregacja macierzy w procesie rozkładu ruchu

Dla dobrego odwzorowania potoków ruchu na sieci powinny one rozpoczynać się i kończyć na węzłach, które są stacjami kolejowymi. W przypadku, np. ruchu regionalnego węzłów tych jest ponad 2 tys., a macierze podróży liczone są dla 379 rejonów komunikacyjnych. Dla uzyskania efektu dezagregacji macierzy do poziomu stacji wykorzystano specjalną funkcję dostępną w programie VISUM. Każdy węzeł generujący (środek ciężkości rejonu komunikacyjnego) połączony został konektorami ze wszystkimi stacjami znajdującymi się w tym rejonie. Dla każdej stacji liczona jest jej umowna waga, przy wykorzystaniu modeli regresyjnych używanych w liczeniu generacji ruchu. W ten sposób stacje leżące, np. w obszarach

gęsto zaludnionych (gminach miejskich), uzyskują większą wagę, niż te w obszarach wiejskich. Przy rozkładzie ruchu na sieć, do węzłów stacyjnych kierowana jest część ruchu generowanego w rejonie proporcjonalnie do wagi tych węzłów. W ten sposób dla każdego rodzaju ruchu macierz międzyrejonowa była dezagregowana do poziomu liczby węzłów stacyjnych obsługujących dany rodzaj ruchu. Metoda ta pozwala uzyskiwać bardziej realistyczne potoki ruchu na sieci.

4.4.2. Zasady rozkładu ruchu na sieć

Rozkład ruchu na sieć wykonywany jest niezależnie dla trzech rozpatrywanych rodzajów podróży, a więc:

- macierz podróży regionalnych rozkładana jest na sieć połączeń regionalnych,
- macierz podróży międzyregionalnych rozkładana jest na sieć połączeń międzyregionalnych,
- macierz podróży międzyaglomeracyjnych rozkładana jest na sieć połączeń międzyaglomeracyjnych.

W procesie obliczeniowym rozkładu ruchu na relacje w sieci, uwzględniane były parametry odcinków używane w procesie liczenia macierzy kosztów i dodatkowo stopień zatłoczenia pociągów. Wszystkie wartości parametrów przeliczane są na jednostki oporu wyrażone jako koszt, w groszach.

Koszt czasu oczekiwania wynikający z częstotliwości kursowania pociągów, uwzględnia dodatkowy czas oczekiwania i niedogodności wynikające z konieczności dostosowania czasu podróży do rozkładu jazdy.

Koszt czasu przejazdu liczony jest odrębnie dla każdego typu pociągu ze względu na ich różne prędkości handlowe. Prędkości handlowe liczone są na podstawie dopuszczalnych prędkości maksymalnych na odcinkach oraz czasu traconego na zatrzymanie w węzłach sieciowych zakodowanych jako stacje.

Koszt przejazdu (biletu) liczony jest z długości odcinka i uśrednionej ceny biletu.

Koszt niewygody, wynikający z zatłoczenia, jest dodatkowym parametrem umożliwiającym zastosowanie metody ograniczonej przepustowości. Liczony jest na podstawie stosunku liczby pasażerów w pociągu do pojemności pociągu.

Obciążenie sieci potokami ruchu odbywa się w sposób iteracyjny, przy uwzględnieniu stopnia napełnienia pociągów.

4.5. Podział zadań przewozowych

Podział zadań przewozowych może być modelowany zarówno na etapie generacji ruchu, jak i podczas liczenia wynikowych macierzy podróży. Opisane wcześniej modele generacji ruchu odnoszą się do określonych warunków zewnętrznych. Jednym z podstawowych jest poziom kosztów podróży, czyli w przypadku podróży kolejowych cena biletu. Wzrost ceny powoduje oczywiście spadek liczby podróży. Zależność tą określa cenowa elastyczność popytu. Na podstawie publikowanych wyników badań można stwierdzić, że elastyczność ta waha się w granicach od -0.3 dla podróży krótkich do -1.3 dla podróży długich. Różnica ta tłumaczona jest tym,

że podróże krótkie są w większości podróżami obligatoryjnymi (praca, nauka), z których nie bardzo można zrezygnować, a również cena biletu nie jest relatywnie wysoka, więc jej podwyżka nie jest aż tak uciążliwa. W podróżach długich więcej jest podróży fakultatywnych, a relatywnie wysoka cena powoduje, że podwyżka może być już istotnie odczuwalna. Z drugiej strony w podróżach międzyaglomeracyjnych znaczną część podróży stanowią podróże służbowe, dla których cenowa elastyczność jest mniejsza.

Podobne wyniki dają badania dla rynku autobusowego.

Nieco inaczej jest w przypadku podróży lotniczych. Tutaj odwrotnie, elastyczność dla podróży krótkich jest większa, ze względu na możliwość przejścia na inny środek transportu. Dla podróży długich taka alternatywa nie istnieje. W materiałach źródłowych podawana jest elastyczność dla rynków krajowych na poziomie -0.8 do -0.9, dla rynków międzynarodowych na poziomie -0.6.

Elastyczność jest również zróżnicowana w stosunku do zasięgu podwyżek. Jeżeli podwyżki dotyczą całego rynku, to reakcja jest słabsza. Jeżeli podwyżka dotyczy połączeń jednego przewoźnika, to reakcja jest silniejsza, bo istnieje możliwość przejścia na połączenia innych przewoźników.

W przypadku podróży samochodem o koszcie podróży decyduje koszt paliwa. Tu cenowa elastyczność do liczby podróży samochodem jest na poziomie od -0.03 (podróże biznesowe) do -0.26 (podróże inne), średnio jest to poziom -0.18.

Stosując modele elastyczności na poziomie liczenia generacji podróży, można określić zmiany podziału zadań przewozowych na tym etapie, licząc liczbę generowanych podróży dla każdego środka przewozowego (przewoźnika) według wzoru:

$$LP_{el} = E * LP \quad (7)$$

gdzie:

LP - liczba generowanych podróży policzona wg równania regresyjnego,

LP_{el} - liczba podróży uwzględniająca przyszłe zmiany cen,

E - cenowa elastyczność do liczby podróży.

Przy stosowaniu tej metody trudność stanowi prawidłowa prognoza zmian cen paliw czy też biletów. Mogą one wynikać nie tylko z przyczyn ekonomicznych, ale również być wynikiem prowadzenia określonej polityki transportowej związanej, np. z cenami dostępu do infrastruktury. W analizach uproszczonych można przyjąć, że zmiany te są w pewnej proporcji do prognozowanej inflacji.

Cenowa elastyczność popytu może również służyć do określenia, jaka część potoków pasażerskich może przechodzić z jednego środka komunikacji na drugi na poziomie macierzy podróży. Ponieważ w opisywanej metodzie model drogowy również opiera się na podziale na rejony komunikacyjne będące powiatami, możliwe jest przeprowadzenie analiz porównawczych, polegających na porównaniu zmian w koszcie przejazdu dla połączeń kolejowych i drogowych, dla relacji ruchu pomiędzy każdą parą rejonów.

Wynikiem prognoz kolejowych i drogowych są macierze ruchu, łatwo więc określić wielkość ruchu przenoszonego dla każdej relacji. Zastosować można ela-

styczności krzyżowe, określające jak zmiany kosztów jednego środka wpływają na zmianę liczby podróży drugiego środka. Na przykład cenowa elastyczność krzyżowa cen paliwa, określająca wielkości ruchu przenoszonego z samochodu na środki komunikacji zbiorowej, jest szacowana na poziomie 0.07. Z kolei cenowa elastyczność krzyżowa cen biletów kolejowych określająca wielkości ruchu przenoszonego na samochody jest szacowana na poziomie 0.09.

Oczywiście możliwe jest również zastosowanie funkcji „logitowych” wykorzystujących złożone zależności pomiędzy użytecznością analizowanych środków przewozowych, czy też połączeń realizowanych przez różnych przewoźników. Modele takie wymagają jednak przeprowadzenia odpowiednich badań marketingowych.

4.6. Weryfikacja modelu

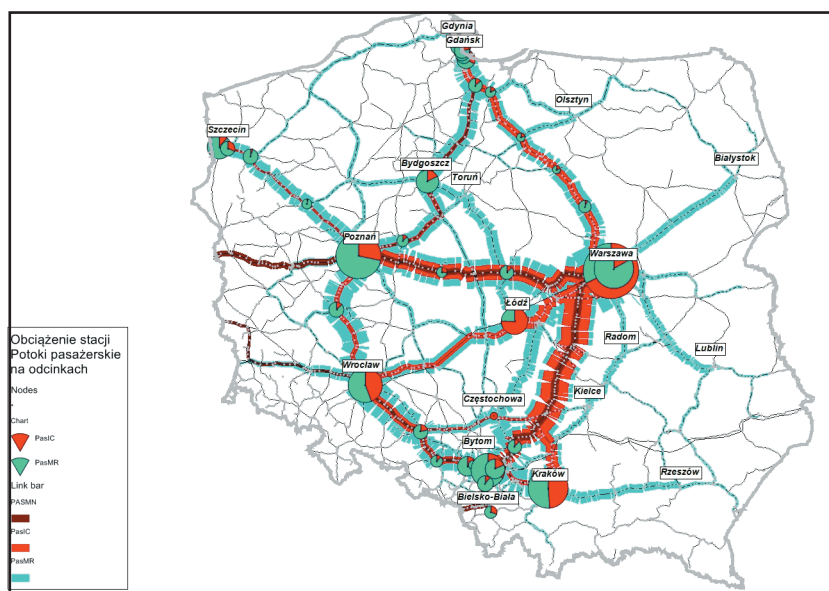
Weryfikacja modelu polegała na wykonaniu obliczeń według danych stanu istniejącego i porównaniu wyników obliczeń z danymi statystycznymi i pomiarami. Jako bazowy przyjęto rok 2011, ponieważ dostępna była dość duża liczba danych statystycznych i pomiarowych, łącznie z aktualnymi wynikami pomiaru ruchu na drogach. Wyniki obliczeń dla modelu kolejowego były sprawdzane na następujących poziomach dokładności:

- na poziomie kraju: liczba pasażerów i wielkość pracy przewozowej sumarycznie, według rodzajów pociągów, według przewoźników,
- na poziomie województw: liczby pasażerów wyjeżdżających, przyjeżdżających, pozostających w województwach,
- na poziomie rejonów komunikacyjnych: liczby pasażerów według typów pociągów i przewoźników (w miarę dostępnych danych biletowych),
- na poziomie stacji: liczby pasażerów według typów pociągów (w miarę dostępnych danych biletowych),
- na poziomie odcinków: wielkość potoku ruchu i napełnienie pociągów według typów (w miarę dostępnych danych pomiarowych).

Wyniki weryfikacji potwierdziły przydatność modelu do prognozowania kolejowych przewozów pasażerskich.

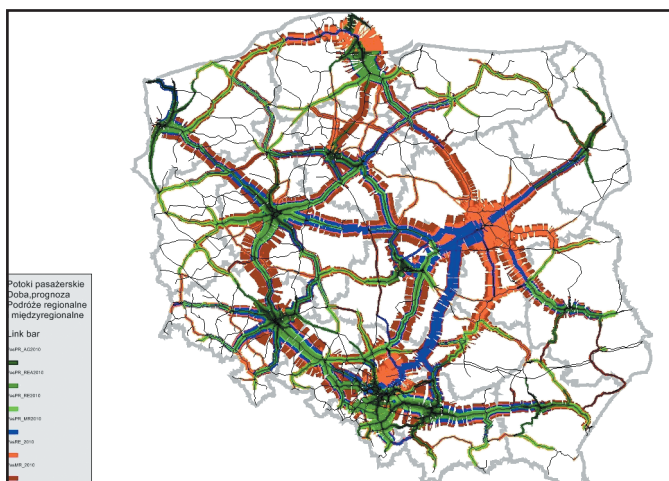
5. Przykłady zastosowań

Poniżej pokazane są praktyczne wyniki zastosowania modelu. Rysunek 15 pokazuje wynik analizy z opracowania [7]. Pokazane są wielkości generowanego ruchu i potoki pasażerskie dla podróży międzyregionalnych i międzyaglomeracyjnych.



Rys. 15. Potoki ruchu dla nowego połączenia Wrocław-Łódź-Warszawa
 Źródło: „Koncepcja nowego połączenia kolejowego...”, opracowanie własne

Rysunek 16 pokazuje wynik analizy z opracowania [8].



Rys. 16. Potoki ruchu rok 2020 przewozy regionalne
 Źródło: „Strategia zarządzania aktywami spółki ...”, opracowanie własne

Pokazane są na nim wielkości potoków pasażerskich w ruchu regionalnym i międzyregionalnym, w podziale na przewoźników (Przewozy Regionalne, pozostali przewoźnicy) oraz rodzaje ruchu (aglomeracyjny, dojazdy do aglomeracji, regionalny, itp.).

6. Wnioski

Zastosowanie spójnego modelu transportowego w skali kraju, o strukturze przedstawionej w artykule, pozwala na przeprowadzenie analiz ruchu uwzględniających zmiany w zagospodarowaniu przestrzennym kraju, rozbudowę infrastruktury transportowej, a także wzajemne oddziaływanie zarówno różnych środków transportu jak i różnych przewoźników.

Literatura

- [1] Estimating Air Travel Demand Elasticities. InterVISTAS Consulting Inc. for IATA, 2007.
- [2] Econometric Models for the Forecast of Passenger Demand. Journal of Statistics & Management Systems, 2006.
- [3] TRACE (1999), Elasticity Handbook: Elasticities for Prototypical Contexts. European Commission, Directorate-General for Transport, 1999.
- [4] Understanding Transport Demands and Elasticities How Prices and Other Factors Affect Travel Behavior. Victoria Transport Policy Institute, 2012.
- [5] Transit Price Elasticities and Cross-Elasticities. Victoria Transport Policy Institute, 2012.
- [6] Koncepcja nowego połączenia kolejowego na linii Wrocław-Warszawa wraz z analizą potencjalnych potoków ruchu pasażerskiego. Waltz A., Kiełbowicz P., Biuro Rozwoju Wrocławia, 2012.
- [7] Strategia zarządzania aktywami spółki w zakresie taboru i jego utrzymania. Halcrow, Przewozy Regionalne, 2011.
- [8] Waltz A., Analiza prognozy wzrostu PKB do 2040 dla potrzeb prognozy wzrostu ruchu. 2012.
- [9] Żurkowski A., Wybór metody prognozowania przewozów na linii szybkiego ruchu. CNTK
- [10] Jacyna M., Wybrane aspekty koncepcji modelu systemu logistycznego Polski ze względu na komodalność transportu. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Prace Naukowe „Transport”, 2010.
- [11] Plan zrównoważonego rozwoju publicznego transportu zbiorowego - międzywojewódzkie i międzynarodowe przewozy pasażerskie w transporcie kolejowym. MTPiGM, 2012.
- [12] Biała Księga - Mapa problemów polskiego kolejnictwa. Forum Kolejowe - Railway Business Forum, 2009.
- [13] Master Plan dla transportu kolejowego w Polsce. MTPiGM, 2008.
- [14] Wstępne studium wykonalności budowy linii dużych prędkości Wrocław/Poznań – Łódź – Warszawa. CNTK, 2005.
- [15] Studium układu dróg szybkiego ruchu w Polsce. Politechnika Warszawska, 2006.