

Metoda aktualizacji modelu podróży z wykorzystaniem macierzy przemieszczeń telefonów komórkowych¹

RAFAŁ KUCHARSKI

dr inż., PK, Katedra Systemów Transportowych, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, e-mail: rkucharski@pk.edu.pl

JUSTYNA MIELCZAREK

mgr inż., PK, Katedra Systemów Transportowych, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, e-mail: jmielczarek@pk.edu.pl

ARKADIUSZ DRABICKI

mgr inż., PK, Katedra Systemów Transportowych, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, e-mail: adrabicki@pk.edu.pl

ANDRZEJ SZARATA

dr hab. inż. prof. PK, Katedra Systemów Transportowych, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, e-mail: aszarata@pk.edu.pl

Streszczenie: W artykule prezentujemy metodę aktualizacji modelu podróży z użyciem macierzy przemieszczeń telefonów komórkowych. Proponujemy rozwiązanie dla sytuacji, gdy model popytu przestaje być aktualny, a jednocześnie dostępne są duże zbiory danych o faktycznych przemieszczeniach. Jako że budowa modelu popytu jest pracochłonna i kosztowna, a duże zbiory danych coraz bardziej dostępne, wskazane jest opracowanie metody aktualizacji. Jest to jednak problematyczne. Po pierwsze szczegółowość podziału obszaru na rejony jest zazwyczaj większa niż ta dostępna dla macierzy komórkowych, po drugie model popytu zawiera pełny opis mobilności (ruchliwość, motywacje, modele wyboru celu, środka podróży i trasy), a macierze komórkowe zawierają jedynie wielkości podróży. W niniejszym artykule proponujemy metodę wykorzystującą zalety obydwu źródeł danych. W szczególności korzystamy z formuł generacji ruchu, zmiennych objaśniających i struktury motywacji ujawnionych w badaniach, na podstawie których sformułowano model podróży. Dopełniamy te dane dwustopniowym modelem wyboru celu podróży opracowanym na podstawie struktury przemieszczeń telefonów komórkowych. Uzyskane wielkości podróży kalibrujemy do wielkości ujawnionych w macierzach, a następnie potoki pasażerów i pojazdów kalibrujemy do wyników uzyskanych w pomiarach. Propozycja ta nie eliminuje wszystkich problemów i niejasności, ale niewątpliwie pozwala na pełniejsze wykorzystanie tego cennego źródła danych. Metodę ilustrujemy wynikami aktualizacji małopolskiego modelu ruchu z użyciem macierzy przemieszczeń między powiatami całej Polski klientów jednego z operatorów. W efekcie model podróży oparty na zdezaktualizowanych wynikach badań został zaktualizowany do aktualnej struktury przemieszczeń i wielkości podróży, ale i sam opis mobilności stał się dokładniejszy. Dzięki wydzielaniu na etapie generacji ruchu liczby podróży: a) do Krakowa, b) do Tarnowa lub Nowego Sącza, c) międzypowiatowych d) wewnątrzpowiatowych e) zewnątrzwojewódzkich udało się uzyskać obraz podróży regionalnych zgodny z rzeczywistością.

Słowa kluczowe: więźba ruchu, model popytu, dane GSM, model podróży.

Wprowadzenie

Dla sprawnego zarządzania systemem transportowym i planowania jego rozwoju kluczowa jest wiedza o mobilności jego użytkowników. To z trafnej diagnozy mobilności wynikają trafne diagnozy potrzeb rozwoju systemu transportowego. Jednak diagnozowanie mobilności jest praco-

chłonne i kosztowne. Zazwyczaj sprowadza się do badania reprezentatywnej próby mieszkańców. Próba taka zazwyczaj jest stosunkowo niewielka, ale jej dobór pozwala na wnioskowanie statystyczne i ekstrapolację wyników na populację. Każdy z ankietowanych szczegółowo opisuje swoją mobilność dla wybranego dnia, raportując swój dobowy łańcuch podróży: źródła, cele, motywacje, godziny, środki transportu. Raport taki pozwala obrazować mobilność populacji i formułować modele podróży. Reprezentatywny model składa się z poprawnie oszacowanej ruchliwości w poszczególnych motywacjach, rozkładu dobowego podróży, rozkładu długości podróży, modelu wyboru środka transportu i wyboru trasy przejazdu. Taka reprezentacja pozwala na modelowanie zjawisk zachodzących w sieci transportowej oraz prognozowanie konsekwencji zmian demograficznych i infrastrukturalnych.

Wynikiem modelu popytu są więźby ruchu, a więc macierze przemieszczeń pomiędzy rejonami modelu (części miasta, miejscowości, gminy lub powiaty). Macierze te są następnie przypisywane do ścieżek w sieci, optymalnych tras przejazdu samochodem lub połączeń w komunikacji zbiorowej. Równolegle, macierze można pośrednio obserwować, analizując lokalizacje telefonów komórkowych i ich przemieszczenia. Jest to możliwe dzięki identyfikacji stacji BTS, z którą łączy się dany aparat oraz połączenia z nową stacją, gdy aparat się przemieszcza. Jeśli identyfikujemy aparat telefoniczny z podróżnym, a stację BTS z rejonem komunikacyjnym, uzyskamy więźbę podróży tożsamą z tą uzyskaną w modelu popytu. Dostępność dwóch alternatywnych źródeł daje szansę dobrania danych do potrzeb i możliwości.

Kompleksowe badania podróży i model popytu

Podstawowym źródłem informacji o mobilności jest badanie zachowań reprezentatywnej dla populacji grupy użytkowników systemu [1]. Próba dobrana jest tak, by reprezentować populację, w szczególności jej wiek, płeć, poziom dochodów i rozmieszczenie przestrzenne; z domyślnym założeniem, że reprezentatywność tych cech zagwarantuje reprezentatywność zachowań komunikacyjnych, które badamy. Każdy badany raportuje (w formie tzw. dzienniczka podróży) łańcuch podróży odbytych jednego dnia.

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2018. Wkład autorów w publikację: R. Kucharski 40%, J. Mielczarek 30%, A. Drabicki 20%, A. Szarata 10%.

Zazwyczaj raportowany jest dzień poprzedni i zapisywane są kolejne aktywności (dom, praca, szkoła, zakupy itp.) oraz podróże odbywane pomiędzy nimi. Dla podróży określana jest motywacja (para aktywności, które łączy podróż), miejsce i czas jej rozpoczęcia i zakończenia, odległość, środek transportu itp.

Zebrań wyników dla całej próby tworzy obraz dziennej mobilności, który (z pewną statystyczną ostrożnością) możemy traktować jako reprezentatywny i na jego podstawie wyciągać wnioski o mobilności. Popularną syntezą mobilności jest model podróży uzyskany na podstawie wyników kompleksowych badań ruchu. Taki stosowany był też w Małopolsce [2], który wykorzystamy przy prezentacji wyników proponowanej metody.

Najpopularniej używaną strukturą modelu podróży jest model czterostadiowy, w którym więźby podróży uzyskiwane są w procedurze składającej się z czterech kolejnych kroków, opisujących kolejne decyzje podejmowane przez pasażerów. W pierwszym etapie określone są potencjały ruchotwórcze, a więc liczba podróży generowanych i absorbowanych dla każdej z analizowanych motywacji i dla każdego z analizowanych rejonów komunikacyjnych. Następnie, na podstawie potencjałów źródeł i celów podróży, obliczane są więźby uzyskiwane najczęściej metodą grawitacyjną [3]. W metodzie tej kluczowe jest określenie oporu przestrzeni, a więc tego, jak silne będzie dążenie pasażerów do zaspokojenia popytu na podróże, jak najmniejszym kosztem (odległością lub czasem podróży). Otrzymane liczby podróży między rejonami dzieli się na środki transportu. Najczęściej stosuje się model wyboru dyskretnego, kalibrowany wyborami ujawnionymi w badaniu, np. model logitowy [4]. Ostatecznie uzyskiwane są macierze podróży pomiędzy rejonami modelu dla analizowanych środków transportu (co najmniej transport indywidualny i komunikacja zbiorowa). Macierze te obciążają sieć w procedurze poszukiwania połączeń subiektywnie optymalnych [5].

Macierze przemieszczeń telefonów komórkowych

Jednym z alternatywnych sposobów uzyskania macierzy przemieszczeń jest obserwowanie przemieszczeń urządzeń, które można lokalizować. Dotyczy to np. nadajników GPS, które przekazują informacje o swoim położeniu do serwerów centralnych [6;7]. Informacja taka jest cenna dla określania warunków ruchu (prędkości) w sytuacji, gdy liczba pojazdów rejestrowanych na danym odcinku drogi jest wystarczająca do oszacowania prędkości. Niestety dostępna flota pojazdów sondujących jest zazwyczaj niewystarczająca do reprezentatywnego szacowania liczby podróży. Wobec tego wykorzystywana jest możliwość lokalizacji telefonów komórkowych. Operator sieci wie, do jakiego nadajnika loguje się telefon i może rejestrować logowania do kolejnych nadajników oraz ich czas, interpretowany jako przemieszczenie. Zazwyczaj dokładność takiej lokalizacji jest niewielka, zbyt ogólna dla określenia rejonu komunikacyjnego [8].

Dokładność taka jest jednak wystarczająca do identyfikowania przemieszczeń pomiędzy powiatami, gminami czy dzielnicami. Po odpowiedniej agregacji, która zapewnia

anonimowość, dane takie mogą być wykorzystane na potrzeby analiz transportowych. Do podstawowych wątpliwości należy reprezentatywność danych uzyskanych z takiej próby. Po pierwsze dotyczy to udziału w rynku danego operatora. W Polsce rynek podzielony jest mniej więcej równo pomiędzy czterech głównych operatorów. Ich udziały różnią się jednak w grupach wiekowych, w zależności od lokalizacji (duże miasta/wieś, wschód/zachód) i od zamożności. Wiedza operatorów w tym zakresie jest jednak duża, są oni świadomi swoich udziałów w poszczególnych segmentach rynku. Wykorzystanie tych udziałów pozwala na wiarygodną ekstrapolację próby od jednego operatora na całą populację. Wielkość próby jest na tyle duża, że uzyskane wyniki w zupełności wystarczą do dalszych analiz (20 milionów podróży w Małopolsce uzyskanych w macierzach komórkowych wobec 30 tysięcy uzyskanych w badaniu podróży). Jednak reprezentatywność dotyczy również innego aspektu, mianowicie nie wszystkie karty SIM rejestrujące się do nadajników pochodzą z telefonów komórkowych. Karty SIM znajdują się w wielu innych urządzeniach, kluczowe jest filtrowanie lokalizacji tylko urządzeń jednoznacznie identyfikowanych z podróżnym, a więc telefonów komórkowych, i odrzucanie zapisów z urządzeń GPS, alarmów, komputerów przenośnych i telefonów z wieloma kartami SIM.

Dużym ryzykiem jest również kwestia prywatności i ochrony danych osobowych. Niestety inżynierowie systemów transportowych nie mają dostępu do pierwotnych danych i w przeciwieństwie do wyników badań ruchu otrzymują tylko przetworzone wyniki. W takim układzie to operator danych komórkowych jest jednocześnie sprzedawcą i jedynym, który może bezpośrednio weryfikować ich poprawność. W praktyce operator zasłania się nie tylko ochroną danych osobowych, ale również ochroną własności intelektualnej. Algorytm przetwarzania, filtrowania i agregacji danych jest niejawnym i inżynier otrzymuje jedynie wynikowe macierze, których nie ma możliwości zweryfikować.

Doświadczenie z pracy z wynikami kompleksowych badań ruchu uczy, że wyniki analiz są bardzo wrażliwe na precyzyjne zdefiniowanie pewnych założeń modelu. W szczególności ważna jest definicja podróży i graniczne wartości, jakie są wykorzystywane w obliczeniu ruchliwości. Podobnie w przypadku macierzy komórkowych, gdzie kluczowe jest odpowiednie zidentyfikowanie podróży, a w szczególności jej zakończenia. Błędy na tym etapie mogą spowodować że np. wszystkie podróże w korytarzu autostrady A4 będą przemieszczeniami pomiędzy kolejnymi sąsiednimi rejonami komunikacyjnymi, a żadne nie będzie podróżą z Krakowa do Wrocławia. Innym aspektem tego problemu jest precyzyjna identyfikacja krótkich podróży. Tutaj występuje ryzyko nieprawidłowej klasyfikacji przepięć (łączenie się urządzenia z sąsiednimi nadajnikami). Telefon jest w jednym miejscu, a cyklicznie przepina się do nadajnika o lepszym zasięgu. Wówczas liczba podróży może zostać wielokrotnie zawyżona. Przy modelowaniu podróży dłuższych (aglomeracyjnych, regionalnych i o zasięgu krajowym), gdzie rejon komunikacyjny są duże, istotna jest identyfikacja i interpretacja podróży wewnątrzrejonowych.

Większość podróży realizowana jest na krótkich odległościach, wiele z nich na odległości mniejsze niż dokładność rejestracji przemieszczenia karty SIM. Operatorzy, w sytuacji gdy rejon komunikacyjny zawiera kilka nadajników, podają informacje o liczbie podróży wewnętrznych. W przypadku powiatów są to duże wartości, jednak ich interpretacja jest ściśle zależna od przyjętych definicji.

Niestety w praktyce, zarówno definicja podróży, algorytm filtrowania przepięć pomiędzy nadajnikami oraz interpretacja liczby podróży wewnątrz rejonu są niejawne i ukrywane przez dostawcę danych (operatora). Jest to z jednej strony zrozumiałe, z drugiej wprowadza element czarnej skrzynki do przejrzystej do tej pory procedury modelowania. Rodzi to duże wątpliwości, co do bezpośredniego zastosowania tych danych w modelowaniu.

Porównanie źródeł danych o mobilności

Obecnie kluczową informację o mobilności – a więc więźbę podróży – można uzyskać z dwóch różnych źródeł:

- z modelu podróży budowanego na podstawie kompleksowych badań podróży;
- z informacji o przemieszczeniach telefonów komórkowych, tzw. macierze komórkowe.

W tabeli 1 zebrano wady i zalety każdego ze źródeł danych. W skrócie, model popytu dostarcza pełnej wiedzy o mobilności niewielkiej próby podróżnych, podczas gdy

Tabela 1

Charakterystyka	Źródło danych	
	Model popytu i kompleksowe badanie podróży	Macierz przemieszczeń telefonów komórkowych
próba	niewielka, ale reprezentatywna, wraz z informacją socjodemograficzną	pełna (dla wybranego operatora), ekstrapolowana na podstawie udziałów w rynku, brak informacji socjodemograficznych
opis mobilności	pełny opis łańcucha podróży i decyzji podejmowanych przez podróżnego, wraz z informacją o motywacji, długości i czasie podróży, środka transportu i trasie	jedynie wynikowe przemieszczenia (ujawnione), brak dodatkowych informacji
więźba ruchu	uzyskana w uproszczonym modelu grawitacyjnym	pokazująca faktyczne powiązania między rejonami (często niemożliwe do uzyskania w matematycznym modelu grawitacyjnym)
dokładność	dowolny podział na rejon komunikacyjne	podział na rejon ograniczony nadajnikami BTS i możliwościami technicznymi
prognozowanie	na podstawie ekstrapolacji założeń modelu podróży	możliwość jedynie ekstrapolacji liczby podróży
koszt	duży koszt jednostkowy przeprowadzenia badania, ustalone, przewidywalna i stabilna cena rynkowa	koszt po stronie operatora, cena uzależniona od strategii biznesowej operatora, brak ustalonej ceny rynkowej
przejrzystość procedur	pełna przejrzystość, wgląd w surowe dane, pewne uproszczenia wynikające z formuł matematycznych (np. regresja liniowa w formułach generacji, funkcja oporu w modelu grawitacyjnym)	brak przejrzystości, brak wglądu w surowe dane, niejawni algorytm przetwarzania i jego założenia
inne wady	duża część pracy wykonywana ręcznie, co może powodować błędy	brak informacji o czasie podróży i bardzo uproszczona informacja o długości podróży
inne zalety	dodatkowe dane jakościowe	możliwość cyklicznych powtórzeń, monitorowania faktyczna struktura przemieszczeń między rejonami

macierze komórkowe dają liczbę przemieszczeń ogromnej liczby osób, ale bez wiedzy o mobilności. Kompleksowe badania podróży są kosztowne, podczas gdy operatorzy automatycznie zbierają dane i są skłonni je przekazać w (teoretycznie) konkurencyjnej cenie.

Analiza ta pokazuje, że obydwa źródła danych mają niewątpliwie zalety, które warto wykorzystać. Są one jednak związane z poważnymi wadami, których należałoby się pozbyć. Poniżej proponujemy metodę integracji dwóch zbiorów danych, która wykorzystuje ich zalety i pozwala uniknąć pewnych błędów.

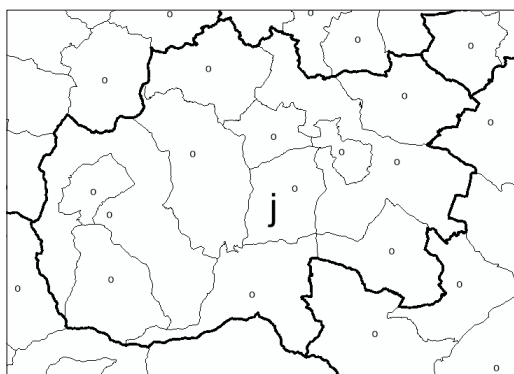
Metoda aktualizacji modelu popytu

Wynikiem obliczeń modelu podróży jest więźba ruchu mówiąca o oczekiwanej liczbie podróży pomiędzy rejonami modelowanego obszaru. Równoważne liczby podróży możemy uzyskać korzystając z macierzy przemieszczeń telefonów komórkowych. Warto czerpać z obydwu metod, wykorzystując ich zalety i unikając wad. Poniżej prezentujemy metodę, w której do aktualizacji modelu popytu o dużej dokładności wykorzystane są macierze komórkowe o niższej dokładności.

Proponowana metoda jest daleka od docelowej i należy ją rozumieć jako możliwie najpełniej wykorzystanie dostępnych danych dla zrozumienia mobilności. Wiele proponowanych założeń metody jest arbitralnych i może rodzić kolejne problemy w innych miejscach. Niemniej w obecnej sytuacji pozwala ona na uzyskanie pełniejszego obrazu mobilności na podstawie dostępnych danych.

Więźba przemieszczeń q_{od} określa liczbę podróży dla każdej pary rejonu początku o i końca d . Więźba komórkowa \hat{q}_{ij} również określa oczekiwaną liczbę podróży, ale pomiędzy makrorejonami początku i oraz końca j . Większe makro-rejony są dzielone na mniejsze rejon. W kontekście modelu regionalnego rejonu modelu popytu to gminy, a macierz komórkowa określa przemieszczenia pomiędzy powiatami – makrorejonami.

Więźba komórkowa \hat{q}_{ij} zawiera jedynie zaobserwowane liczby przemieszczeń, ekstrapolowane z użyciem udziałów w rynku na populację. Więźba podróży z kolei q_{od} jest efektem obliczenia modelu popytu i może być wyrażona jako funkcja zmiennych objaśniających rejonów komunikacyjnych oraz struktury modelu: postaci funkcyjnych oraz parametrów.



Rys. 1. Powiat, jak makrorejon macierzy komórkowej (j) i jego podział na gminy jako rejon model popytu (o)

Interpretacja macierzy komórkowej na podstawie modelu popytu

W prezentowanej metodzie z jednej strony proponujemy interpretację wyników uzyskanych z macierzy komórkowych. Na podstawie analogii pomiędzy modelem podróży proponujemy interpretację danych zawartych w macierzy przemieszczeń, która pozwala na uzyskanie bardziej szczegółowego opisu mobilności.

Po pierwsze, wobec braku informacji o strukturze motywacji podróży i wyborze środka transportu w macierzy komórkowej możemy zakładać, że udział poszczególnych motywacji i środków transportu dla komórek macierzy komórkowej jest taki sam jak dla wyników modelu popytu. Dla makroregionu i będącego zbiorem rejonów o liczba podróży generowanych w motywacji m jest dana jako liczba podróży generowanych ogółem \hat{q}_i mnożona przez średni udział motywacji m w podróżach z rejonów o makroregionu i :

$$\hat{q}_i^m = \hat{q}_i \cdot \frac{\sum_{o \in i} q_o^m}{\sum_{o \in i} q_o} \quad (1)$$

Podobnie udział danego środka transportu może być oszacowany jako średnia z udziałów tego środka w podróży pomiędzy makroregionami:

$$\hat{q}_{ij}^c = \hat{q}_{ij} \cdot \frac{\sum_{o \in i} \sum_{d \in j} q_{od}^c}{\sum_{o \in i} \sum_{d \in j} q_{od}} \quad (2)$$

Formuły te pozwalają na uzupełnienie wyników macierzy komórkowej informacjami o motywacjach podróży i wyborze środka transportu. Zawierają one pewne uśrednienie i agregują zjawiska do makroregionów, co może być obciążone błędem uśrednienia. W efekcie otrzymujemy macierz o liczbie podróży i strukturze celów podróży zgodnej z faktyczną (obserwowaną w dużej próbie z macierzy komórkowej). Dodatkowo, na podstawie wyników modelu podróży, możemy szacować strukturę motywacji i udziału środków transportu. Należy pamiętać, że powyższe metody są bardzo wrażliwe na poprawną interpretację wartości na przekątnej macierzy, czyli liczby podróży wewnątrzrejonowych – w macierzy komórkowej to podróże między powiatowe, a w modelu podróży to podróże międzygminne.

Wykorzystanie macierzy komórkowych do dodatkowej interpretacji modelu popytu

Powyższe metody interpretacji macierzy komórkowych tworzą pełniejszy obraz mobilności, ale uzyskiwana wciąż jest określona pomiędzy makroregionami. Wobec tego poniżej proponujemy kierunek odwrotny, a więc wykorzystanie macierzy komórkowej przy aktualizacji modelu podróży.

Generacja ruchu może być aktualizowana zgodnie z wynikami z macierzy komórkowych. Proponujemy tutaj dwie metody. Po pierwsze aktualizacja modelu generacji, a więc użycie wyników macierzy komórkowej do korekty współczynników modelu popytu. Możemy wykorzystać sumę wiersza w macierzy komórkowej (\hat{q}_i) i użyć jej do aktualizacji modelu generacji ruchu. Wówczas aktualizujemy parametry modelu generacji α tak, żeby suma podróży genero-

wanych we wszystkich rejonach o makroregionu i we wszystkich motywacjach m była możliwie zgodna z generacją uzyskaną w macierzy komórkowej:

$$\arg \min_{\alpha} \left(\left| \hat{q}_i; \sum_{m \in M, o \in i} q_i^m = f(\alpha, \mathbf{x}_i) \right| \right) \quad (3)$$

W efekcie uzyskujemy jednocześnie zgodność z wynikami macierzy komórkowej i spójność z modelem popytu. W procedurze optymalizacyjnej powinniśmy użyć dwóch kryteriów zgodności: maksymalnej zgodności liczby podróży i minimalnej korekty wyjściowego modelu generacji podróży.

Alternatywnie, uzyskując większą zgodność, znacznie zwiększając jednak liczbę stopni swobody, możemy na poziomie każdego makroregionu korygować wartości uzyskane w modelu popytu o współczynnik zmiany uzyskany z macierzy komórkowej:

$$q_o' = q_o \cdot \frac{\hat{q}_i}{\sum_{o \in i} q_o} \quad \text{dla } i: o \in i \quad (4)$$

Poza aktualizacją generacji macierzy komórkowa może służyć do aktualizacji poprawy zgodności wyboru celów podróży (w tzw. modelu grawitacji czy dystrybucji ruchu generowanego do rejonów docelowych). Podobnie jak w wypadku generacji może się to odbywać na różnych poziomach.

Po pierwsze możliwe jest całkowite zastąpienie modelu grawitacyjnego rozkładem ruchu uzyskanym bezpośrednio z macierzy komórkowej. Wówczas liczba podróży pomiędzy rejonami q_{od} jest uzyskiwana jako iloczyn trzech czynników: generacji rejonu źródłowego (pierwszy człon), udziału makroregionu docelowego uzyskanego w macierzy komórkowej (drugi człon) oraz udziału rejonu w makroregionie uzyskanym w modelu podróży (trzeci człon):

$$q_{od}' = q_o \cdot \frac{\hat{q}_{ij}}{\hat{q}_i} \cdot \frac{q_{od}}{\sum_{d \in j} q_{od}} \quad \text{dla } i: o \in i, j: d \in j \quad (5)$$

Wówczas uzyskujemy macierz przemieszczeń między rejonami o strukturze zgodnej z tą zaobserwowaną w macierzy komórkowej. Jest to sposób, w którym uzyskujemy dokładne odwzorowanie, tracąc opis zjawiska w modelu grawitacyjnym i jednocześnie możliwość prognozowania i szacowania wpływu zmian.

Warto pamiętać, że zarówno formuła (4), jak i (5) w dużym stopniu ingerują w wyniki modelu popytu i ewentualne błędy w macierzy komórkowej przeniesione będą na wyniki modelu popytu. Należy ich używać z ostrożnością, będąc świadomym możliwości popełnienia błędów.

Alternatywnie proponujemy wykorzystanie struktury przemieszczeń poprzez identyfikację głównych kierunków podróży. Proponujemy podział rejonów (i makroregionów) na podgrupy. W modelu regionalnym te podgrupy to podróże do i z 1) Krakowa, 2) Tarnowa i Nowego Sącza, 3) sąsiednich powiatów, 4) wewnątrz powiatu, 5) poza Małopolskę. Na etapie generacji podróży proponujemy podział pomiędzy te podgrupy zgodnie ze strukturą odczytaną z macierzy komórkowych:

$$q_{og} = q_o \cdot \frac{\hat{q}_{ig}}{\hat{q}_i} \quad (6)$$

gdzie g to rejony związane z daną podgrupą.

W sytuacji, gdy podgrupa to jeden rejon, powyższa formuła zastępuje model grawitacyjny. Na przykład wydzielanie podróży do Krakowa na etapie generacji jest równoważne z odtworzeniem więźby podróży do Krakowa. W sytuacjach, gdy rejonów w podgrupie jest więcej, aby uzyskać więźbę, konieczne jest użycie modelu grawitacyjnego jednak jedynie pomiędzy rejonami danej grupy. Na przykład po określeniu liczby podróży wewnątrzpowiatowych z danej gminy określamy udziały gmin wewnątrz powiatu na podstawie odpowiedniego modelu grawitacyjnego.

Powyższy podział popytu na podgrupy, proponowany w [9], pozwala na znaczne zwiększenie dokładności i elastyczności w modelowaniu podróży, w szczególności:

- Liczba podróży generowanych może być zaktualizowana zgodnie z formułami.
- Po identyfikacji głównych kierunków podróży i wydzieleniu podgrup określamy udziały podróży w każdej z podgrup. Każda z nich stanowi osobny model popytu, który może być niezależnie parametryzowany tak, by uzyskać zgodność z faktyczną mobilnością.
- Dla każdej z grup możemy stosować udział motywacji zgodny z tym uzyskiwanym z modelu podróży, albo zaktualizować go zgodnie z wynikami innych badań, lub wiedzy eksperckiej (np. więcej podróży biznesowych w podróżach zewnętrznych, więcej podróży do pracy w podróżach wewnątrzpowiatowych itp.).
- Dla każdej z grup możemy stosować udział środków transportu zgodny z tym uzyskiwanym z modelu podróży albo zaktualizować go zgodnie z wynikami innych badań, lub wiedzy eksperckiej (np. większy udział komunikacji zbiorowej w podróżach do Krakowa, pomiędzy powiatami ziemskimi). Możliwe jest również zastosowanie osobnych modeli wyboru dyskretnego o innych funkcjach użyteczności [4].
- Dla każdej z grup możemy stosować inne kryteria wyboru ścieżki w sieci drogowej (np. różnicowany wpływ opłat) i w komunikacji zbiorowej (np. wybór kolei w dojazdach codziennych i okazjonalnych).

Taka struktura pozwala na wykorzystanie macierzy komórkowych, zachowanie struktury mobilności odczytanej z modelu podróży oraz elastyczne podejście do ulepszania modelu i jego reprezentatywności. W kolejnym rozdziale prezentujemy wyniki jej stosowania przy aktualizacji małopolskiego modelu ruchu.

Wyniki aktualizacji małopolskiego modelu podróży

Przy użyciu powyższej metody małopolski model podróży [10] opracowany na podstawie kompleksowego badania ruchu [11] został zaktualizowany z użyciem bazy danych o prawie 20 milionach przemieszczeń telefonów komórkowych pomiędzy powiatami Małopolski. W ramach pro-

jektu RID-62A od jednego z operatorów komórkowych zebrano macierz przemieszczeń pomiędzy powiatami całej Polski; do niniejszej analizy wykorzystano wycinek zawierający podróże rozpoczynane lub kończone w Małopolsce.

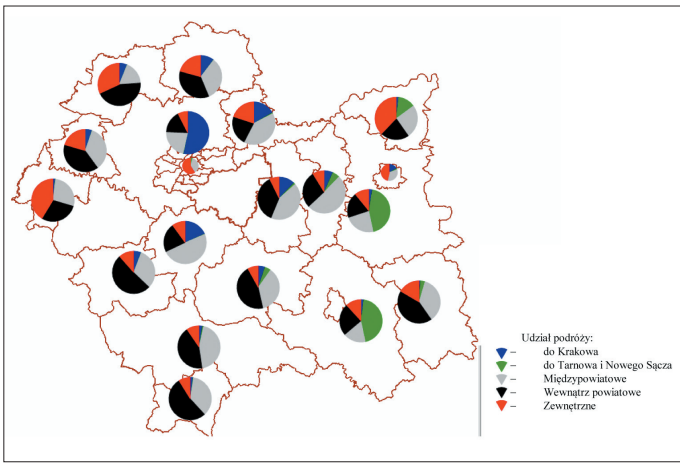
Na podstawie analizy mobilności regionalnej i wyników kompleksowych badań ruchu zaproponowano hierarchiczny podział podróży na kategorie w zależności od celu podróży. Strukturę podróży wewnątrz województwa prezentuje rysunek 2, opis kategorii zastosowanych w modelu podany został w tabeli 2. Udziały poszczególnych podgrup uzyskane z macierzy komórkowych zaprezentowano na rysunku 3, skąd odczytać można obszar wpływu Krakowa (niebieski), Tarnowa i Nowego Sącza (zielony) oraz podróży zewnętrznych – głównie Śląska (czerwony). Rysunek 4 prezentuje obszary oddziaływania Krakowa oraz dwóch pozostałych dużych miast (Tarnowa i Nowego Sącza). Dzięki zastosowaniu proponowanej metody obszary odczytane z macierzy komórkowych zostały bezpośrednio zachowane w modelu. Rysunek 5 przedstawia faktyczne powiązania powiatów Małopolski z zewnętrznymi województwami. Widać silne powiązania Zachodniej Małopolski ze Śląskiem oraz większy udział podróży zewnętrznych dla powiatów przygranicznych (Dąbrowa Tarnowska) niż wewnętrznych (Bochnia, Limanowa). Rysunek 6 pokazuje więźbę dojazdów do pracy do Krakowa. Podróże międzypowiatowe z macierzy komórkowych zostały użyte do aktualizacji modelu podróży dla gmin z wykorzystaniem założeń o strukturze motywacji. Dodatkowo wykorzystano podział na rejony Krakowa w krakowskim modelu ruchu i założono rozkład pomiędzy rejonami zgodnie z liczbą miejsc pracy w poszczególnych rejonach i oporem przestrzeni w modelu grawitacyjnym. Rysunek 7 przedstawia dojazdy do pracy do Tarnowa i Nowego Sącza. Uzyskano zgodne z rzeczywistością dużeciążenie pomiędzy Krakowem a Tarnowem (nie reprezentowane przy użyciu jednej funkcji grawitacyjnej) oraz podział pomiędzy obszarami oddziaływania Nowego



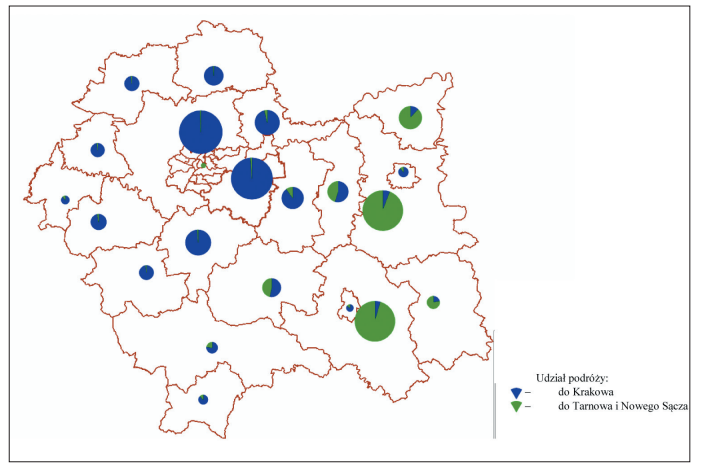
Rys. 2 Hierarchiczna struktura kategorii podróży wyodrębnionych w modelu popytu

Tabela 2

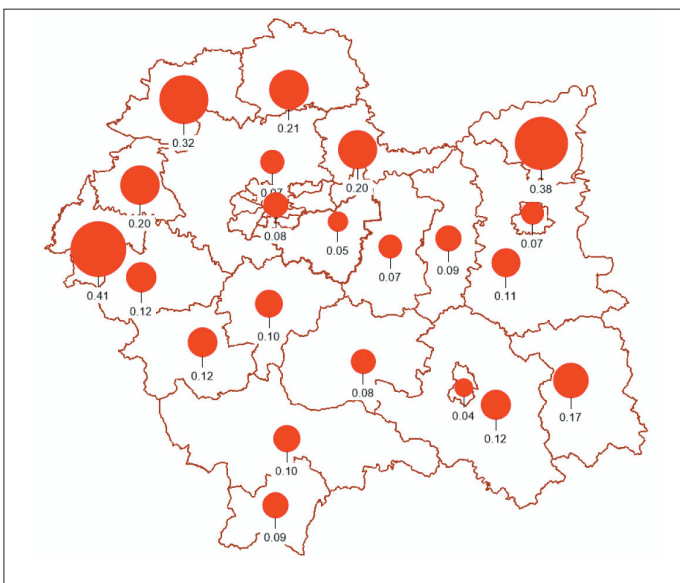
Podział na podgrupy modelu popytu, zgodnie z najważniejszymi kierunkami podróży		
Podgrupa	Nazwa	Opis
M10	Do/z Krakowa	podróże związane ze stolicą województwa
M20	Do/z Tarnowa, Nowego Sącza	podróże związane z dwoma dużymi miastami
M30	Międzypowiatowe	pozostałe podróże wewnątrz województwa, przekraczające granice powiatu
M40	Wewnątrzpowiatowe	podróże pomiędzy rejonami (gminami) odbywane w granicach tego samego powiatu
M50	Zewnętrzny	model opisujący ruch zewnętrzny względem województwa



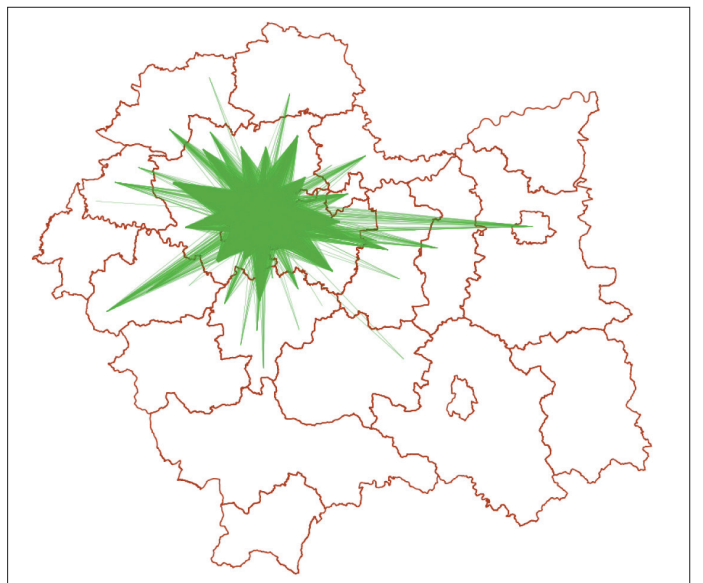
Rys. 3. Udziały podróży w poszczególnych podgrupach popytu w powiatach Małopolski



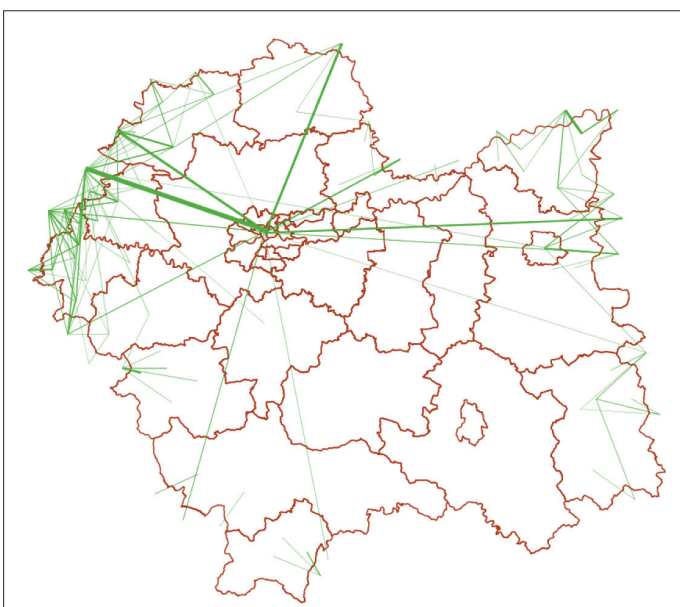
Rys. 4. Liczby podróży do Krakowa (niebieski) i do Tarnowa/Nowego Sącza z powiatów Małopolski



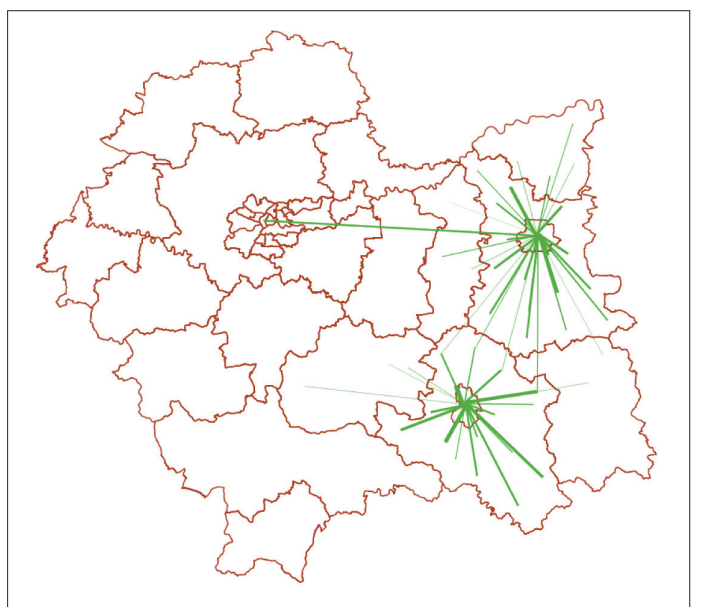
Rys. 5. Udział podróży zewnętrznych (poza Małopolskę) z/do poszczególnych powiatów Małopolski



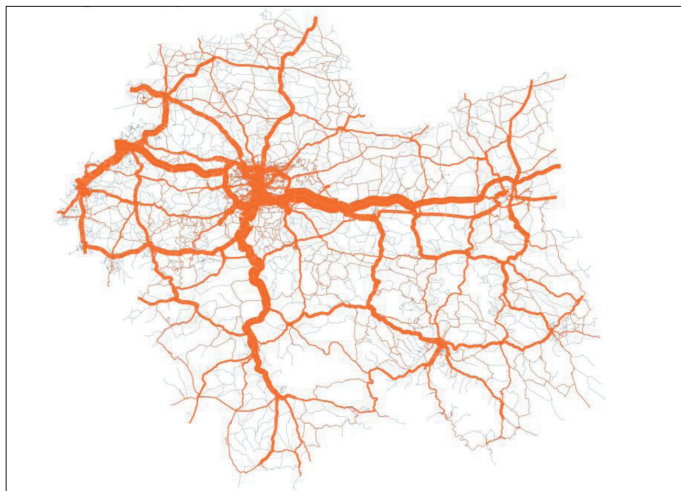
Rys. 6. Więźba ruchu – dojazdy do pracy z gmin Małopolski do 363 rejonów Krakowa



Rys. 7. Więźba ruchu – dojazdy do pracy do Tarnowa i Nowego Sącza



Rys. 8. Więźba ruchu – podróże poza granice województwa



Rys. 9. Dobowy rozkład ruchu w sieci uzyskany w zaktualizowanym modelu podróży

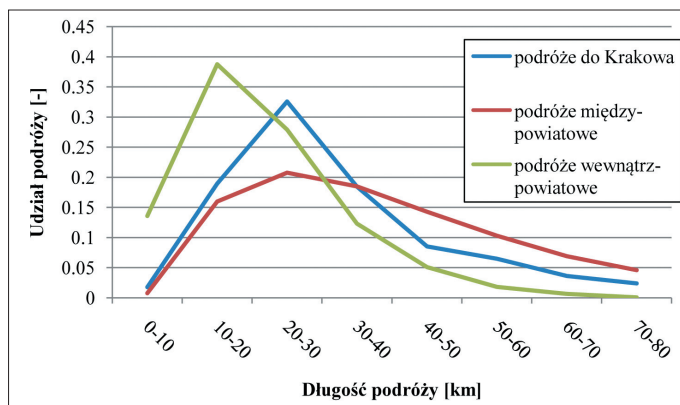
Sącza i Tarnowa. Rysunek 8 prezentuje połączenia zewnętrzne. Podobnie jak na rysunku 5 widać związki ze Śląskiem, ale tutaj ujawniają się również duże potoki do Krakowa z wlotów A4, DK7 DK79 i DK94. W efekcie zastosowania metody uzyskano inny niż przy podejściu klasycznym rozkład długości podróży. Podróże wewnątrzpowiatowe są znacznie krótsze niż międzypowiatowe. W podróży do Krakowa uzyskano dokładne odwzorowanie obszaru oddziaływania i faktyczną liczbę podróży z każdego powiatu (co jest trudne do osiągnięcia przy użyciu modelu grawitacyjnego). Rysunek 9 pokazuje różnice pomiędzy podgrupami w rozkładzie długości podróży do pracy. Widoczne są różne zasięgi podróży (krótsze wewnątrz powiatów i dłuższe pomiędzy powiatami), ale również inne kształty rozkładów.

Podsumowanie

W wyniku zastosowania metody uzyskano aktualizację obciążenia sieci drogowej w Małopolsce (rysunek 10).

Wyniki uzyskano na podstawie modelu podróży, zaktualizowanego wynikami z macierzy przemieszczeń telefonów komórkowych. Zastosowano podział popytu na podgrupy celów podróży. Osobno modelowano podróże do Krakowa, do dwóch pozostałych dużych miast (Tarnów i Nowy Sącz), pozostałe międzypowiatowe, wewnątrzpowiatowe i zewnętrzne. Wykorzystano strukturę motywacji i modele wyboru środka transportu z modelu podróży. Dzięki temu uzyskano model lepiej odzwierciedlający podróże długie, zachowujący obszary oddziaływania dużych miast oraz związki z województwami sąsiednimi. Dzięki większej liczbie parametrów możliwa była dokładniejsza kalibracja modelu do wyników pomiarów i uzyskanie większej zgodności bez używania inwazyjnych macierzy korekcji. Wykorzystanie z jednej strony zweryfikowanych i skalibrowanych wyników modelu podróży, a z drugiej dużej zbioru danych o faktycznych przemieszczeniach pozwoliło uzyskać dużą zgodność modelu ze stanem faktycznym.

Proponowana metoda może być stosowana w innych regionach (województwach) oraz w aglomeracjach, gdzie regionalizacja stacjami BTS jest mniej dokładna niż podział na rejony komunikacyjne. Metoda ta jest propozycją pozwalającą na poszerzenie interpretacji macierzy komórkowej,



Rys. 10. Rozkład długości podróży do pracy do Krakowa międzypowiatowych i wewnątrzpowiatowych.

jednak przy jej używaniu należy być świadomym uproszczeń, ekstrapolacji i przyjętych założeń, które mogą generować błędy modelowe.

Praca powstała w ramach projektu badawczego RID-62A o nr DZP/RID-I-62/11/NCBR/2016 finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz Generalną Dyrekcję Dróg Krajowych i Autostrad w ramach wspólnego przedsięwzięcia polegającego na wsparciu badań naukowych lub prac rozwojowych w obszarze drogownictwa.

Literatura

1. Szarata A., *Kompleksowe badania ruchu w Krakowie w 2013 r.: wybrane wyniki*, „Logistyka”, 2014, nr 6.
2. Kulpa T., Kucharski R., Szarata A., *Budowa regionalnych modeli transportowych – założenia i dylematy*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport, 2016.
3. Gągorowska M., Kojalowicz P.J., Kucharski R., *Macierz kosztów uwzględniająca czasy podróży różnymi środkami transportu*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2016, nr 7.
4. Kucharski R., Kulpa T., Szarata A., *Model wyboru środka transportu w dojazdach do i z pracy w Warszawie*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2016, nr 8.
5. Paszkowski J., Kucharski R., *Paradoksy przepustowości miejskiej sieci drogowej i sposoby ich odwzorowania w modelu czterostadionowym*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2017, nr 5.
6. Kucharski R., *Metoda detekcji: Cellular Floating Data. Możliwości i perspektywy*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie. Seria: Materiały Konferencyjne, 2009, z.148.
7. Dybicz T. J., Wojciechowski R., *Wykorzystywanie danych z systemów sondowania pojazdów w budowie krzywych oporu*, Materiały X Konferencji Naukowo-Technicznej Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego. Celowość, efektywność i skuteczność projektu transportowego „Logika interwencji”, Rosnówek 2015.
8. 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.
9. Kucharski R., Mielczarek J., Kulpa T., Drabicki A., *Method to decompose regional travel demand model – case study of Małopolska region* European Transport Conference, Barcelona 2017.
10. Szarata A., *Budowa modelu symulacyjnego województwa małopolskiego – model popytu*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2013, nr 10.
11. Dziedzic T., Szarata A., *Wybrane wyniki kompleksowych badań ruchu w województwie małopolskim*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2014, nr 1.