ZESZYTY NAUKOWO-TECHNICZNE
STOWARZYSZENIA INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW KOMUNIKACJI
RZECZPOSPOLITEJ POLSKIEJ
ODDZIAŁ W KRAKOWIE
seria: MATERIAŁY KONFERENCYJNE
Nr 2(98)/2012

RESEARCH AND TECHNICAL PAPERS
OF POLISH ASSOCIATION FOR TRANSPORTATION ENGINEERS
IN CRACOW
series: PROCEEDINGS
No **2(98)/2012**

MODELOWANIE PODRÓŻY I PROGNOZOWANIE RUCHU

TRAVEL MODELLING AND TRAFFIC FORECASTING

Kraków 2012

Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej Oddział w Krakowie.
Seria: Materiały Konferencyjne
Czasopismo wydawane od 2002 roku jako kontynuacja tytułu Zeszyty Naukowo-Techniczne Oddziału Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie wydawanego od 1994 roku

Redaktor naczelny
dr inż. Jolanta Żurowska
(SITK RP Oddział w Krakowie)
jmzur@pk.edu.pl

Sekretarz redakcji
mgr inż. Danuta Schwertner
(Politechnika Krakowska)
dschwer@pk.edu.pl

Rada programowa
dr inż. Andrzej Gołaszewski
(niezależny konsultant)
mgr inż. Andrzej Kollbek
(GDDKiA Oddział w Krakowie)
prof. dr hab. inż. Stanisław Krawiec
(Politechnika Śląska)
mgr inż. Mariusz Szałkowski
(MPK S.A. w Krakowie)
prof. dr hab. inż. Antoni Szydło
(Politechnika Wrocławska)
dr inż. Andrzej Żurkowski
(Instytut Kolejnictwa)

Redaktorzy tematyczni
prof. PK dr hab. inż. Wiesław Starowicz
(Politechnika Krakowska - transport miejski)
prof. dr hab. inż. Włodzimierz Czyczuła
(Politechnika Krakowska - transport kolejowy)
prof. PK dr hab. inż. Janusz Chodur
(Politechnika Krakowska - transport drogowy)

Redaktor statystyczny
dr inż. Zofia Bryniarska
(Politechnika Krakowska)

Redaktor językowy
mgr Agata Mierzyńska
(Urząd Miasta Krakowa)

Streszczenia w języku angielskim
dr inż. Zofia Bryniarska
(Politechnika Krakowska)

Adres Redakcji
ul. Siostrzana 11, 30-804 Kraków
tel./fax 12 658 93 74

Wydawca
Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej Oddział w Krakowie
ul. Siostrzana 11, 30-804 Kraków

Deklaracja o wersji pierwotnej czasopisma
Główną wersją czasopisma jest wersja papierowa.

Tytuły i streszczenia artykułów w języku polskim i angielskim są dostępne w wersji elektronicznej na stronie: http://krakow.sitk.org.pl/Wydawnictwa/wydawnictwa.html

Bazy indeksujące artykuły
Baza BAZTECH – http://baztech.icm.edu.pl/
Baza Indem Copernicus – http//indexcopernicus.com/

Informacje dodatkowe
Za wydrukowane artykuły autorzy nie otrzymują honorarium.
Za treść i formę ogłoszeń i reklam redakcja nie odpowiada.

Nakład: 200 egz.

Skład: Piotr Drapa
Druk: Wydawnictwo PiT Kraków,
ul. Ułanów 54/51, 31-455 Kraków
tel. 12 290 32 10

SPIS TREŚCI

Marek Bauer
Wpływ jakości połączenia na wybór linii w podróżach miejskich 5
Krystian Birr, Marcin Zawisza, Tomasz Budziszewski, Kazimierz Jamroz
Wybrane problemy modelowania podróży transportem zbiorowym na przykładzie Gdańska 19
Daniel Błażków, Zygmunt Bobowski
Szacowanie utraconych wpływów z tytułu przejazdów ulgowych i bezpłatnych środkami komunikacji miejskiej - wnioski z badań 33
Ireneusz Celiński, Grzegorz Sierpiński
Opór przestrzeni dla alternatywnej realizacji podróży 49
Szymon Firek, Andrzej Szarata, Jacek Żak
Wykorzystanie symulacyjnych modeli podróży i wielokryterialnej metody rankingowej do projektowania rozbudowy sieci tramwajowej 87
Petro Horbachov, Vitalii Naumov, Olga Svichynska
Model wyboru przez pasażera trasy przemieszczenia się do miejsca pracy w warunkach dużego miasta 99
Kazimierz Jamroz
Modelowanie wskaźnika motoryzacji na poziomie krajowym 111
Łukasz Kowalski, Anna Łobodzińska, Gergő Szabó
Wykorzystanie funkcji oporu przestrzeni w programowaniu rozbudowy sieci dróg rowerowych w Krakowie 121
Rafał Kucharski
Tło teoretyczne dla adaptacyjnego, dynamicznego modelu wyboru ścieżki w modelu ruchu 133
Katarzyna Nosal
Zastosowanie modeli logitowych do oceny wpływu instrumentów zarządzania mobilnością na podział zadań przewozowych 151
Bartłomiej Piątkowski, Michał Maciejewski
Zastosowanie map OSM w budowie modelu sieci dla aglomeracji poznańskiej 163
Aleksandra Romanowska, Kazimierz Jamroz
Ruchotwórczość wielkopowierzchniowych obiektów handlowych trzeciej generacji na przykładzie Trójmiasta 179
Andrzej Rudnicki
Przyczynek do wartościowania atrybutów podróży w miejskim transporcie zbiorowym. . . . 195
Jacek Thiem
Zastosowanie teorii gier przy rozwiązywaniu konfliktów z wykorzystaniem modeli podróży 211
Andrzej Waltz
Wykorzystanie krajowych modeli sieci transportowych do prognozowania kolejowych przewozów pasażerskich 221
Andrzej Zalewski
Prognozowanie turystycznego ruchu rowerowego 239
Renata Żochowska, Grzegorz Karoń
Przegląd literatury na temat zjawiska kongestii i zakłóceń ruchu w systemie transportowym miasta w aspekcie modelowania podróży 251

Andrzej Żurkowski
Zastosowanie modelu „cena-czas" do szacowania podziału zadań przewozowych w podróżach międzyaglomeracyjnych. 277

STRESZCZENIA ANGIELSKIE ARTYKUŁÓW 287

INFORMACJE DLA AUTORÓW 297

SPONSORZY KONFERENCJI 299

INFORMACJE FIRM, PRZEDSIĘBIORSTW I ORGANIZACJI 301

WPŁYW SUBIEKTYWNEJ OCENY JAKOŚCI POŁĄCZEŃ NA WYBÓR LINII KOMUNIKACJI ZBIOROWEJ

Marek Bauer
dr inż., Katedra Systemów Komunikacyjnych, Politechnika Krakowska, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, tel. +48 12 628 2028, e-mail: mbauer@pk.edu.pl

Streszczenie. *W referacie omówiono proces decyzyjny pasażera oczekującego na pojazd komunikacji zbiorowej na przystanku. Określono zbiór czynników zakłócających, wpływających na zmiany w funkcjonowaniu systemu transportu zbiorowego, a tym samym mających wpływ na ocenę tego systemu przez pasażera. Omówiono uwarunkowania podejmowania decyzji w warunkach ryzyka i niepewności. Zaprezentowano wyniki własnych badań nad przyczynami wyboru połączeń w oparciu o subiektywną ocenę usług komunikacji zbiorowej, w szczególności ocenę punktualności kursowania pojazdów. Zaprezentowano także wstępne wyniki badań nad zmiennością decyzji w obliczu nagłych zmian stanu systemu komunikacji zbiorowej.*

Słowa kluczowe: *komunikacja zbiorowa, racjonalność decyzji, modelowanie linii komunikacji zbiorowej*

1. Wprowadzenie

Wejście do pojazdu komunikacji zbiorowej stanowi kulminacyjny moment podróży pasażera, poprzedzony całym łańcuchem wcześniejszych decyzji, podejmowanych od momentu zaplanowania podróży do momentu znalezienia się na przystanku. W tym momencie następuje wybór ścieżki podróży odbywanej z wykorzystaniem transportu zbiorowego. Aby jednak do niego doszło, wcześniej pasażer musi podjąć decyzję o celowości odbycia podróży oraz określić jej punkt docelowy. Decyzje te są szczególnie istotne, gdy rozważana podróż ma charakter fakultatywny. W przypadku podróży obligatoryjnych – zarówno sama celowość odbycia podróży, jak też miejsce jej zakończenia – są zazwyczaj oczywiste. W następnym kroku podejmowana jest decyzja o wyborze środka transportu, efektem wyboru transportu zbiorowego (lub podróży w systemie Parkuj i Jedź) – jest właśnie obecność pasażera na przystanku.

Nie każda sekwencja podejmowanych decyzji musi przebiegać według powyższego klucza. Łatwo sobie wyobrazić sytuację, w której motywem przewodnim podróży jest przejażdżka na rowerze, a wybór miejsca i celu podróży – jedynie pretekstem do jej odbycia. Podobnie, konsekwencją podjęcia decyzji o wyborze tramwaju jako środka transportu może być wybór tego, a nie innego centrum

handlowego. Często decyzje są łączone i podejmowane podświadomie – przykładowo, skoro za każdym razem przejazd do pracy odbywa się metrem – jeżeli tylko nie zaistnieją wyjątkowe okoliczności – także kolejna podróż do pracy zostanie wykonana za pomocą tego środka transportu. W takim przypadku, cała sekwencja decyzji podejmowana jest w zasadzie automatycznie.

Być może najtrudniejszą decyzję pasażer będzie musiał podjąć już na przystanku, zwłaszcza w sytuacji występowania wielu alternatywnych połączeń do zamierzonego celu podróży.

Skutkiem dziesiątek i setek tysięcy takich łańcuchów decyzyjnych są obciążenia sieci komunikacji zbiorowej. Obciążenia te zmieniają się nawet w krótkich odstępach czasu, dlatego znalezienie reprezentatywnego obrazu stanu systemu jest bardzo trudne.

O ile w wyniku zastosowania modelu cztero-stadiowego możliwe jest ustalenie wiarygodnych potoków pasażerskich na poszczególnych odcinkach sieci, to uzyskanie reprezentatywnych obciążeń poszczególnych linii jest zadaniem znacznie trudniejszym. W niniejszym referacie podjęto próbę częściowego wyjaśnienia mechanizmu wyboru konkretnych linii przez pasażerów oczekujących na przystankach. Pełne odwzorowanie ogółu zachowań pasażerów nie jest możliwe, jednak nawet częściowe rozpoznanie mechanizmów wyboru linii może być bardzo pomocne w planowaniu i modelowaniu systemu komunikacji zbiorowej, w szczególności w przypadku optymalizacji sieci.

2. Czynniki wpływające na skomplikowanie procesu wyboru linii

Precyzyjne odwzorowanie ogółu tak wielu różnorodnych jednostkowych procesów decyzyjnych byłoby możliwe jedynie w warunkach całkowitej przewidywalności systemu transportu zbiorowego, oraz nudnego społeczeństwa działającego według ściśle określonych szablonów. Na bieżący stan systemu komunikacji zbiorowej oddziałuje bardzo wiele czynników, w tym spora grupa o charakterze zakłócającym [1]:

- **czynniki infrastruktury ulic i torowisk tramwajowych**, o generalnie deterministycznym charakterze oddziaływania, mogące jednak pośrednio wpływać na wzrost zakłóceń poprzez oddziaływanie na sytuację ruchową na odcinkach sieci, przystankach i skrzyżowaniach, wymienić tutaj można: liczbę pasów ruchu, zakres i sposób oddzielenia torowiska lub pasa od ruchu innych pojazdów, zakres priorytetów w sygnalizacji świetlnej, występowanie przystanków „na żądanie", lokalizację przystanków względem najbliższego skrzyżowania, liczbę stanowisk przystankowych oraz inne,
- **czynniki taborowe**, bądź o charakterze losowym (takie jak: awaryjność pojazdów, liczba i dostępność pojazdów rezerwowych, dostępność wozów pogotowia technicznego), bądź sprzyjające losowości, oddziałujące szczegól-

nie w obrębie przystanków (pojemność taboru, liczba, szerokość i rozmieszczenie drzwi),
- **czynniki związane z ruchem pojazdów** – o charakterze głównie losowym i silnie zakłócającym, bezpośrednio związane z sytuację ruchową na odcinkach, przystankach oraz skrzyżowaniach zlokalizowanych na trasie linii, w tym: wielkość i zmienność natężeń ruchu pojazdów komunikacji zbiorowej i pozostałych pojazdów, wielkość i zmienność potoków pasażerów wsiadających i wysiadających na przystankach oraz napełnień, wielkość opóźnień i przyspieszeń nabytych na wcześniejszych fragmentach linii),
- **czynniki związane z zarządzaniem przewozami**, w tym: częstotliwości kursowania na poszczególnych liniach i wiązkach linii, poziom realistyczności obowiązującego rozkładu jazdy, zakres wdrażanych działań dyspozytorskich, zdolność do reagowania w sytuacjach kryzysowych, częstość kontroli jakości realizacji usług przewozowych,
- **czynniki środowiskowe**, obejmujące poziom kwalifikacji, cechy psychofizyczne i motoryczne oraz zdyscyplinowanie prowadzących pojazdy komunikacji zbiorowej i inne pojazdy, dyscyplina pasażerów, warunki atmosferyczne, rodzaj i pora dnia.

To właśnie zakłócenia w funkcjonowaniu linii są najczęściej przyczyną poszukiwania alternatywnych możliwości odbycia wcześniej zaplanowanej podróży. Wpływają na zmiany zachowań pasażerów, którzy bazując na wcześniejszych doświadczeniach, w mniej lub bardziej udany sposób starają się dopasowywać do otaczającej rzeczywistości i przewidywać zachowanie systemu. Zmiany te zdefiniowano jako **czynniki pasażerskie**. Należą do nich: punktualność pasażerów, zdolność do rozwiązywania problemowych sytuacji, rodzaj posiadanego biletu, motywacja odbywanej podróży i inne. Masowe zmiany zachowań pasażerów, na zasadzie sprzężenia zwrotnego wpływają na stan systemu komunikacji zbiorowej, głównie poprzez zmienność potoków na przystankach.

W wyniku działania wymienionych czynników bardzo często dochodzi do sytuacji, w której pasażer musi zrezygnować z wcześniej zaplanowanego sposobu odbycia podróży i zdecydować o wyborze alternatywnego połączenia.

3. Wybór linii w warunkach ryzyka i niepewności

Pasażer oczekujący na przystanku opiera swoje decyzje na podstawie pozyskanej informacji – w pierwszej kolejności o zgłoszeniu pojazdu danej linii na przystanek, w drugiej zaś – na podstawie przewidywanych skutków skorzystania z tej linii, związanych głównie z czasem i warunkami dojazdu do celu podróży. Decyzja musi zostać podjęta najpóźniej do momentu odjazdu pojazdu komunikacji zbiorowej z przystanku.

Rozważyć można dwie typowe sytuacje związane z wyborem decyzji na podstawie informacji o zgłoszeniu pojazdu komunikacji zbiorowej na przystanku:

- pasażer zgłasza się na przystanek bezpośrednio przed rzeczywistym zgłoszeniem się pojazdu komunikacji zbiorowej lub nawet w momencie, w którym pojazd już jest na przystanku – w tej sytuacji decyzja o skorzystaniu bądź nie skorzystaniu z połączenia jest podejmowana w zasadzie spontanicznie, wiąże się ze zwiększoną możliwością wyboru rozwiązania niekorzystnego,
- pasażer zgłasza się na przystanek z wyprzedzeniem w stosunku do rzeczywistego zgłoszenia się pojazdu komunikacji zbiorowej.

W tym drugim przypadku pasażer ma więcej czasu na podjęcie decyzji, może dokonać wyboru w oparciu o informacje na temat pojazdów poszczególnych linii:

- **informacje o charakterze statycznym**, zamieszczone w opublikowanym, obowiązującym rozkładzie jazdy, w tym przypadku pasażer zapoznaje się z rozkładem jazdy i zakładając, że zostanie on zrealizowany wybiera najbardziej dogodny sposób odbycia podróży,
- **informacje o charakterze dynamicznym**, bądź przekazywane na podstawie na bieżąco aktualizowanych informacji o położeniu i prędkości pojazdu w postaci komunikatów wyświetlanych na tablicach przystankowych, bądź informacje pozyskiwane na zasadzie bieżącej obserwacji otoczenia (np. numer zbliżającego się tramwaju jest widoczny ze znacznej odległości), w tej sytuacji pasażer ma więcej czasu na określenie strategii kontynuacji podróży, która dodatkowo może być na bieżąco weryfikowana, aż do momentu fizycznego zgłoszenia się pojazdu na przystanku.

Drugi etap podejmowania decyzji o wyborze połączenia (jeśli pasażer ma dość czasu aby go przeprowadzić) obejmuje analizę potencjalnych skutków skorzystania z dostępnego połączenia. Występowanie wymienionych w poprzednim rozdziale czynników zakłócających oraz złożoność procesu zgłoszeń pasażerów na przystanki – sprawiają, że czas przejazdu ma charakter mniej lub bardziej losowy. Właśnie dlatego, wiele decyzji o wyborze linii jest podejmowanych w warunkach niepewności lub co najmniej ryzyka.

Decyzja w warunkach ryzyka [2] polega na tym, że możliwe działania, pomiędzy którymi trzeba dokonać wyboru mogą prowadzić do rozmaitych konsekwencji, a osoba podejmująca decyzję potrafi ocenić prawdopodobieństwo wystąpienia różnych konsekwencji. W przypadku wyboru linii – pasażer próbuje ocenić potencjalne skutki wyboru danej linii, bazując na własnych doświadczeniach. W oparciu o przeszłe doświadczenia – szacuje, które połączenie będzie najbardziej atrakcyjne.

Jeżeli pasażer korzysta z linii rzadko (lub wcale), jego wybór odbywa się w warunkach niepewności [2], wówczas działania między którymi trzeba dokonać wyboru także mogą prowadzić do rozmaitych konsekwencji, ale osoba podejmująca decyzję nie jest w stanie przewidzieć co się wydarzy.

Skutkiem podjęcia niewłaściwej decyzji o wyborze linii może być dłuższy niż przewidywano czas dotarcia do celu podróży lub konieczność jej odbycia w niesprzyjających warunkach, na przykład w wyniku większego zatłoczenia lub konieczności dopłaty za przejazd.

W wyniku przeprowadzenia powyżej opisanego procesu decyzyjnego – pasażer może albo skorzystać z linii wstępnie uznawanej za najbardziej korzystne połączenie, albo zrezygnować z wyboru połączenia uznawanego za najbardziej korzystne i skorzystać z połączenia alternatywnego.

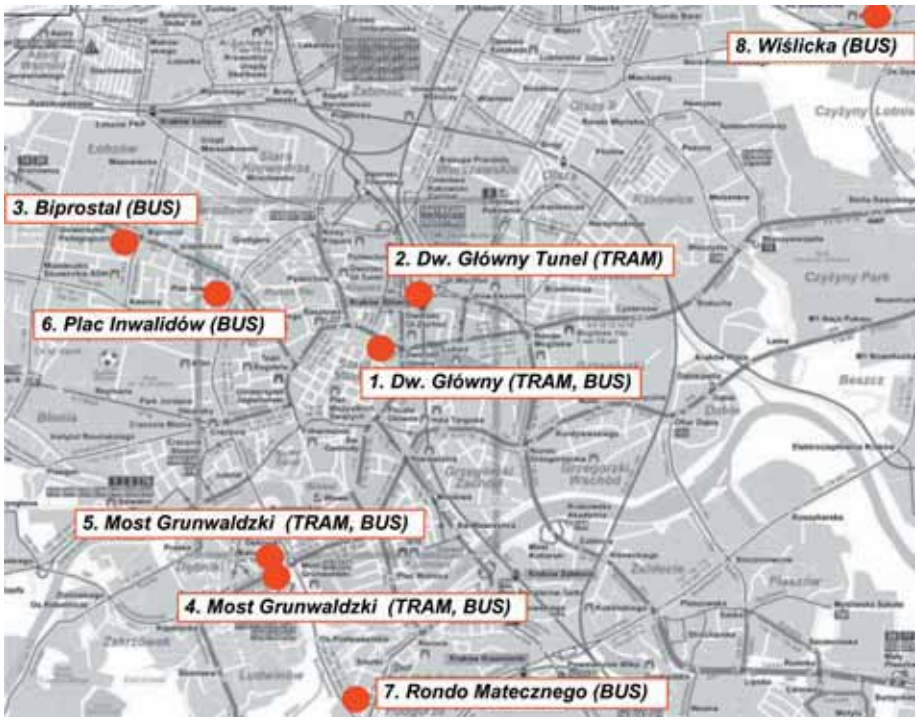
Bezpośrednim powodem poszukiwania przez pasażera alternatywnych rozwiązań jest bądź nie pojawienie się oczekiwanego pojazdu w odpowiednim momencie, wcześniejsze zgłoszenie się pojazdu innej linii, a także brak akceptacji warunków podróży w przypadku zbyt zatłoczonego pojazdu.

4. Badania ankietowe wśród pasażerów komunikacji zbiorowej w Krakowie

W celu określenia przyczyn wyboru poszczególnych linii przeprowadzono badania wśród pasażerów komunikacji zbiorowej.

4.1. Opis badań

Badania ankietowe przeprowadzono na 8 przystankach tramwajowych i autobusowych w Krakowie (Rysunek 1).



Rysunek 1. Lokalizacja przystanków objętych badaniami ankietowymi (oprac. własne).

Są to przystanki o istotnym znaczeniu dla całego systemu komunikacji miejskiej miasta, będące dodatkowo ważnymi punktami przesiadkowymi. Szczególnie w okresach szczytowych wsiada na nich wielu pasażerów, o bardzo zróżnicowanych preferencjach i zachowaniach komunikacyjnych. Z przystanków tych korzystają zarówno linie tramwajowe i/lub autobusowe o średniej (4-6 pojazdów/godz.) i niskiej (rzadziej niż 6 pojazdów/godz.) częstotliwości kursowania. Badania zostały wykonane w okresie porannym (6:00 – 10:00) oraz popołudniowym (14:00 – 18:00) w przeciętnych dniach roboczych w marcu 2012r.

Przeprowadzono łącznie 812 wywiadów ankietowych, w tym 529 w okresie porannym, w którym badania prowadzono na wszystkich przystankach oraz 283 w okresie popołudniowym, w którym badania prowadzono na 5 przystankach (Tabela 1).

Badania przeprowadzono metodą wywiadu bezpośredniego, z wykorzystaniem wolnego czasu pasażerów oczekujących na pojazdy komunikacji zbiorowej. Kwestionariusz ankiety składał się z 8 pytań merytorycznych, tak aby wywiad mógł trwać możliwie najkrócej i ryzyko przerwania wywiadu na skutek przyjazdu pojazdu oczekiwanej linii było jak najmniejsze.

Tabela 1. Liczba zrealizowanych wywiadów ankietowych na poszczególnych przystankach (oprac. własne).

Nr	Przystanek	Kierunek	Liczba wywiadów ankietowych		
			okres poranny (6:00-10:00)	okres popołudniowy (14:00-18:00)	razem (6:00-10:00 i 14:00-18:00)
1	Dworzec Główny (TRAM, BUS)	centrum	97	90	187
2	Dworzec Główny Tunel (TRAM)	oba kierunki	46	50	96
3	Biprostal (TRAM)	centrum	63	0	63
4	Most Grunwaldzki (TRAM, BUS)	centrum	40	40	80
5	Most Grunwaldzki (TRAM, BUS)	Ruczaj	32	30	62
6	Plac Inwalidów (BUS)	Ruczaj	100	73	173
7	Rondo Matecznego (BUS)	centrum	82	0	82
8	Wiślicka (BUS)	centrum	69	0	69
razem – wszystkie analizowane przystanki			529	283	812

Respondenci byli proszeni między innymi o określenie:

- numeru linii, którą zamierzają kontynuować podróż,
- powodu wyboru akurat tej linii (spośród 9 sugerowanych możliwości, z dopuszczeniem dowolnej liczby wskazań),
- częstości korzystania ze wskazanej linii w ciągu tygodnia (wybór spośród trzech możliwości: bardzo często: 4-7 razy w tygodniu, często: 2-3 razy w tygodniu lub rzadko: 1 raz w tygodniu lub rzadziej),
- subiektywnej oceny punktualności wskazanej linii (spośród możliwości: odjazdy zazwyczaj punktualne, zazwyczaj lekko opóźnione, zazwyczaj mocno opóźnione, zazwyczaj lekko przyspieszone oraz zazwyczaj mocno przyspieszone),
- numeru linii stanowiących alternatywę dla wskazanej linii,

– powodu ewentualnego skorzystania z połączenia alternatywnego (wybór spośród 4 sugerowanych możliwości, z dopuszczeniem dowolnej liczby wskazań).

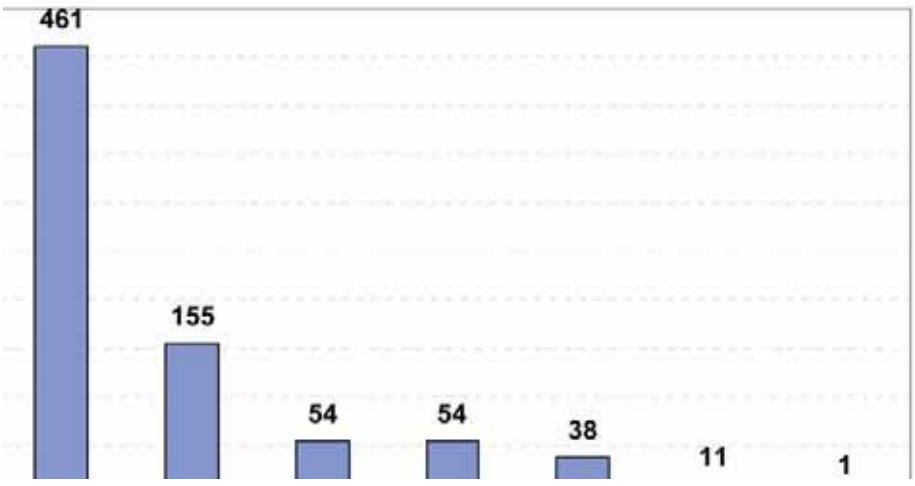
Dodatkowo, rejestrowany był moment rozpoczęcia wywiadu, wiek i płeć respondenta, oraz w miarę możliwości numer linii, z której respondent naprawdę skorzystał, wraz z momentem odjazdu z przystanku.

4.2. Zidentyfikowane powody deklarowanego wyboru linii

W ramach badania respondenci byli odpytywani na temat deklarowanego wyboru linii, którą zamierzali kontynuować podróż. Wywiady były rozpoczynane od 1 minuty do nawet kilkunastu minut do rozkładowego momentu odjazdu z przystanku. Pytaniu o numer linii, towarzyszyło pytanie o powód wyboru tej właśnie linii. Pod uwagę wzięto 9 możliwości odpowiedzi:

– nie mam innej możliwości dojazdu,
– najkrótszy czas przejazdu do celu,
– wysoki komfort podróżowania,
– bezpośredni dojazd do celu,
– uciekł mi pojazd innej linii,
– wysoka punktualność linii,
– wysoka częstotliwość linii,
– korzystna przesiadka na inną linię,
– inny powód, wskazany przez respondenta.

Respondenci mogli wskazać dowolną liczbę odpowiedzi. Najczęściej było to jedno lub dwa wskazania, rzadziej trzy lub cztery. Zanotowano jeden przypadek, gdy respondent wskazał aż 7 powodów wyboru linii. Z kolei 38 osób nie wskazało żadnego powodu wyboru. Rozkład liczby powodów wyboru linii zamieszczono na rysunku 2.



Rysunek 2. Rozkład liczby powodów deklarowanego wyboru linii (oprac. własne).

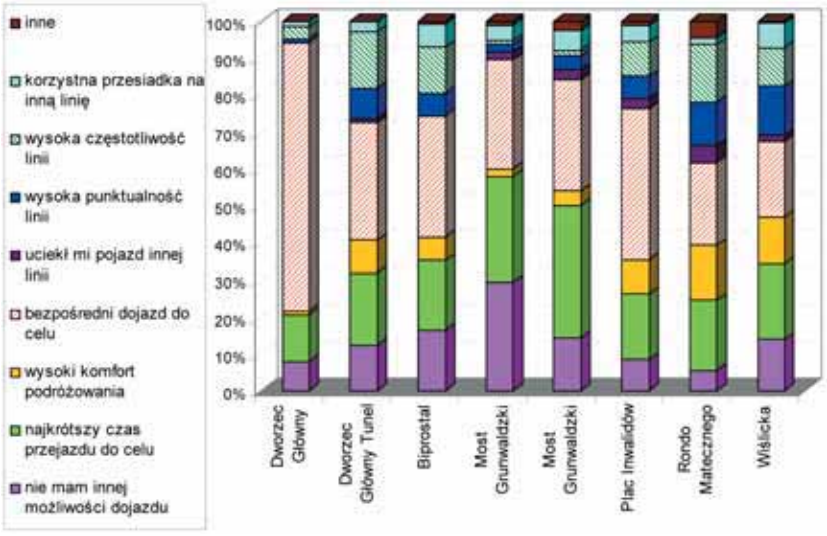
Tak znaczna liczba wielokrotnych wskazań (średnio dla próby: 1,7 powodu/osobę) sugeruje, że pasażerowie traktują kwestię wyboru optymalnego połączenia bardzo poważnie i starają się podejmować decyzję o wyborze linii w sposób świadomy.

Najwięcej wskazań dotyczyło bezpośredniego dojazdu do celu podróży oraz najkrótszego czasu przejazdu. Zaskakująca jest niewielka liczba wskazań na punktualność i częstotliwość kursowania (Tabela 2).

Tabela 2. Rozkład przyczyn deklarowanego wyboru najkorzystniejszego połączenia (oprac. własne).

Nr	Przystanek	Powód wyboru linii									
		nie mam innej możliwości dojazdu	najkrótszy czas przejazdu do elu	wysoki komfort podróżowania	bezpośredni dojazd do celu	uciekł mi pojazd innej linii	wysoka punktualność linii	wysoka częstotliwość linii	korzystna przesiadka na inną linię	Inne powody	razem
1	Dworzec Główny	15	24	2	138	0	2	6	3	0	190
2	Dw. Gł. Tunel	21	33	15	54	2	14	26	5	0	170
3	Biprostal	21	24	8	42	0	8	16	8	1	128
4	Most Grunw (cen)	28	27	2	28	2	2	1	4	1	95
5	Most Grunw (ru)	11	27	3	23	2	3	1	4	2	76
6	Plac Inwalidów	28	60	30	138	9	20	31	15	4	335
7	R. Matecznego	13	45	35	53	11	28	37	4	11	237
8	Wiślicka	25	37	23	37	3	24	19	12	1	181
razem		162	277	118	513	29	101	137	55	20	1412

Na rysunku 3 przedstawiono procentowe udziały wskazań powodów wyboru linii na poszczególnych przystankach.



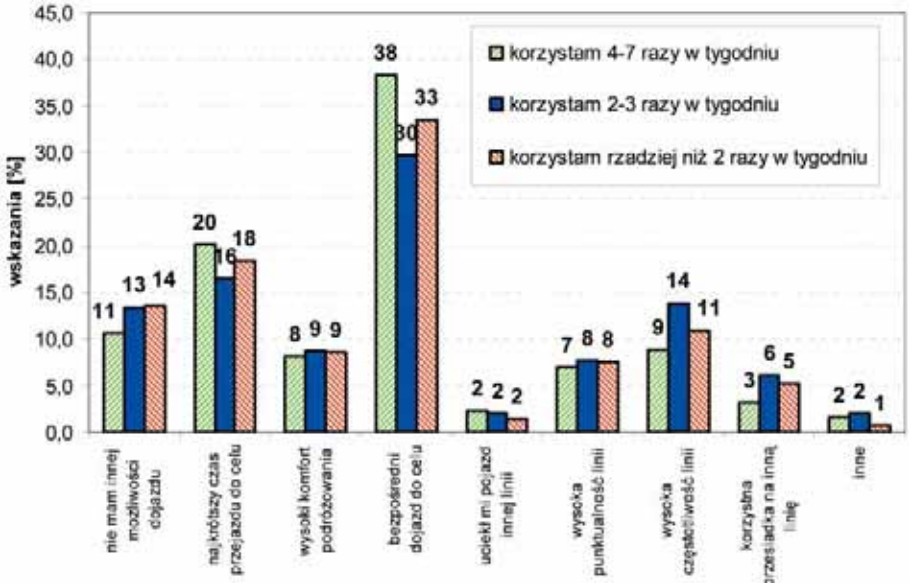
Rysunek 3. Udziały wskazań powodów deklarowanego wyboru linii (oprac. własne).

Zauważyć można istotne zróżnicowanie przyczyn wyboru linii na poszczególnych przystankach, wynikające z różnic w celach oraz charakterze odbywanych podróży, jednak przede wszystkim z różnorodności oferowanych połączeń. Przykładowo, w skali całej zgromadzonej próby badawczej, aż 36% wskazań dotyczy bezpośredniości połączenia, podczas gdy na przystanku Dworzec Główny jest to aż 73%, a na przystanku Rondo Matecznego – tylko 20%. Powyższe zestawienia ukazują, że proces wyboru połączenia ma bardzo zindywidualizowany charakter. Poza przystankiem Most Grunwaldzki (w kierunku Ruczaju), udział wskazań „nie mam innej możliwości dojazdu" jest raczej niewielki, co oznacza że pasażerowie rzeczywiście mają inne opcje do wyboru i starają się kierować subiektywnymi zasadami podczas wyboru połączenia (linii).

4.3. Zidentyfikowane powody deklarowanego wyboru linii w zależności od częstości korzystania z linii

W dalszej analizie podjęto próbę odpowiedzi na pytanie, czy częstość korzystania z danej linii (a tym samym znajomość skutków jej użycia) ma wpływ na podejmowane decyzje. Pod uwagę wzięto stałych użytkowników (korzystających z linii 4-7 razy w tygodniu), częstych użytkowników (2-3 razy w tygodniu) oraz korzystających rzadko. Wyniki porównań pomiędzy grupami pasażerów przedstawiono na rysunku 4.

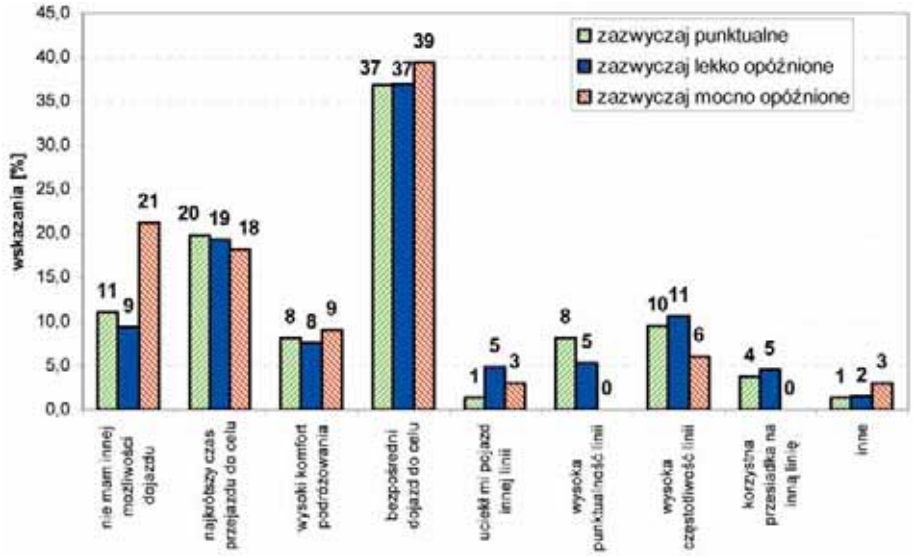
W wyniku przeprowadzenia testów istotności dla udziałów poszczególnych przyczyn w trzech grupach pasażerów ustalono, że różnice we wskazaniach generalnie nie są statystycznie istotne (na przyjętym poziomie istotności 0,05). Oznacza to, że niezależnie od poziomu znajomości połączenia – przyczyny jego wyboru są podobne: liczy się bezpośredni dojazd i jak najkrótszy czas przejazdu do celu.



Rysunek 4. Powody skorzystania z linii w zależności od częstości korzystania (oprac. własne).

4.4. Zidentyfikowane powody deklarowanego wyboru linii w zależności od subiektywnej oceny punktualności

Kolejny krok analizy dotyczył porównania wskazań przyczyn wyboru linii w zależności od subiektywnej oceny punktualności tej linii. Pod uwagę wzięto trzy przypadki ocen punktualności: pojazdy zazwyczaj punktualne, lekko opóźnione i mocno opóźnione. Pominięto wskazania dla oceny: pojazdy są zazwyczaj przyspieszone (lekko i mocno) – takich wskazań było tylko 7, trudno więc mówić o wiarygodności tej grupy wyników.



Rysunek 5. Powody wyboru linii w zależności od punktualności kursowania (oprac. własne).

Chociaż i tym razem można zauważyć pewną generalną zbieżność wyników, to jednak pasażerowie oceniający odjazdy wskazanej linii jako zazwyczaj mocno opóźnione – w większym stopniu wskazywali na konieczność odbycia podróży daną linią z powodu braku innej możliwości dojazdu do celu. Z kolei ponieważ znaczne opóźnienia dotyczyły linii rzadziej kursujących – mniejsza była liczba wskazań częstotliwości jako cechy zachęcającej do wyboru linii. Potwierdziły to również testy istotności dla wskaźnika struktury.

4.5. Identyfikacja przyczyn wyboru połączeń alternatywnych

Pasażerowie byli proszeni także o wskazanie maksymalnie trzech ewentualnych połączeń alternatywnych. Większość pasażerów wykazała, że mają i akceptują możliwość skorzystania z połączenia alternatywnego (Rysunek 6).

Rysunek 6. Rozkład liczby wskazań połączeń alternatywnych (oprac. własne).

W analizie przyczyn wyboru połączenia alternatywnego uwzględniono 4 możliwości wyboru takiego połączenia:

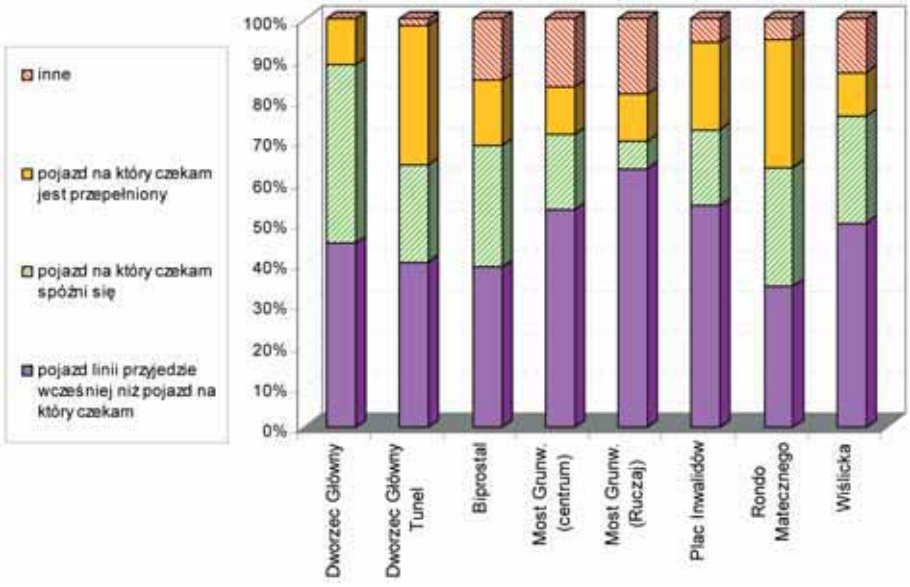
- pojazd linii przyjedzie wcześniej niż pojazd na który czekam,
- pojazd na który czekam spóźni się,
- pojazd na który czekam przepełniony,
- inny powód, określany przez respondenta, zazwyczaj były to powody o charakterze silnie subiektywnym, takie jak: „nie lubię tej linii", „czemu nie" i tym podobne.

W tabeli 3 zamieszczono wyniki wskazań przyczyn wyboru połączeń alternatywnych na poszczególnych przystankach. Większość wskazań dotyczyło momentu przyjazdu pojazdu oczekiwanej i alternatywnej linii – pasażerowie bardzo często są skłonni wybierać pojazd, który pojawi się wcześniej. Równie dobrze, może to być nawet bardzo opóźniony pojazd innej linii, zostanie on wybrany, jeśli pojawi się wcześniej niż pojazd linii wstępnie deklarowanej. Zarazem potwierdza to intuicyjnie oczekiwaną gotowość pasażera do podróżowania na zasadzie „byle wcześniej i byle dalej", z wykorzystaniem każdej nadarzającej się okazji do odbycia kolejnego etapu podróży. Jest to działanie obserwowane zwłaszcza w sytuacjach dużej presji czasu, gdy z winy bądź opóźnień pojazdów komunikacji zbiorowej, bądź spóźnienia samego pasażera – podejmowane jest coraz większe ryzyko odbycia podróży inną linią lub nawet całkowicie inną ścieżką. W ten sposób podróżują głównie osoby posiadające bilety okresowe na sieć. Oczywiście, w sytuacji gdy linia alternatywna w pełni pokrywa się z linią wstępnie wybraną – ryzyka takiego zazwyczaj nie ma. W zgromadzonej próbie badawczej ponad 90% deklarowanych połączeń alternatywnych odbywa się trasami takimi samymi lub bardzo zbliżonymi do trasy linii wstępnie deklarowanej. Połączenia wykorzystujące inne ścieżki były na ogół zgłaszane jako alternatywa nr 2 lub 3, czyli ze znacznie mniejszą szansą na faktyczne wykorzystanie.

Tabela 3. Rozkład przyczyn deklarowanego wyboru najkorzystniejszego połączenia (oprac. własne).

Nr	Przystanek	pojazd linii przyjedzie wcześniej niż pojazd na który czekam	pojazd na który czekam spóźni się	pojazd na który czekam będzie przepełniony	inne	razem
1	Dworzec Główny	77	75	19	0	171
2	Dworzec Główny Tunel	53	31	45	2	131
3	Biprostal	29	22	12	11	74
4	Most Grunwaldzki - centrum	32	11	7	10	60
5	Most Grunwaldzki - Ruczaj	38	4	7	11	60
6	Plac Inwalidów	76	26	30	8	140
7	Rondo Matecznego	34	29	31	5	99
8	Wiślicka	23	12	5	6	46
razem		362	210	156	53	781

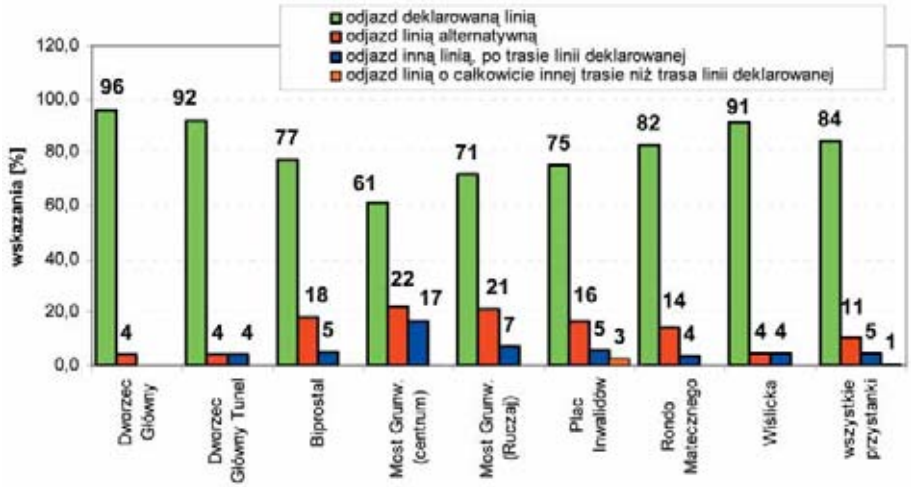
Na rysunku 7 przedstawiono procentowe udziały wskazań przyczyn wyboru linii na poszczególnych przystankach.



Rysunek 7. Udziały wskazań powodów deklarowanego wyboru linii (oprac. własne).

4.6. Zmiany decyzji

Wybrani respondenci byli kontrolowani pod kątem spełnienia deklaracji. Udało się zaobserwować odjazdy 393 osób spośród 812 uczestników badania. Okazało się, że 84% badanych rzeczywiście kontynuowało podróż linią wstępnie zadeklarowaną jako najkorzystniejsze połączenie. Dalsze 11% wykorzystało deklarowane połączenie alternatywne, a blisko 5% odjechało pojazdem innej linii, której przebieg jest bliski przebiegowi linii wstępnie wskazanej (Rysunek 8).



Rysunek 8. Udziały wskazań powodów deklarowanego wyboru linii (oprac. własne).

Po rozbiciu na poszczególne przystanki można zaobserwować różnorodność wyborów pasażerów. Linie alternatywne wybierało od 4 do aż 22% respondentów. Zaskakujące są na przykład wyniki z przystanku Dworzec Główny, z którego odjeżdża kilka wiązek linii, a jednak aż 96% osób nie zmieniło wcześniejszej decyzji o wyborze linii.

Powyższe wyniki świadczą o tym, że niewielka liczba pasażerów zdecydowała się na zmianę połączenia w ostatniej chwili. Oznacza to, że pasażerowie przywiązują się do połączeń, które znają najlepiej i z różnych przyczyn akceptują, nawet w obliczu pewnych niedostatków.

5. Wnioski

Proces decyzyjny związany z wyborem linii jest złożony. Pasażer uwzględnia przede wszystkim własne spostrzeżenia na temat połączeń wykonywanych w przeszłości, ustalając w ten sposób pewnego rodzaju hierarchię połączeń, z których może skorzystać. Generalnie, na podstawie badań przeprowadzonych w Krakowie można uznać, że pasażerowie znają możliwości połączeń alternatywnych i w razie potrzeby są w stanie z nich skorzystać. Można też przyjąć, że opóźnienia na liniach, subiektywnie oceniane jako niewielkie nie mają większego wpływu na proces decyzyjny, jednak przy znacznym rozregulowaniu sieci – coraz większa liczba pasażerów zaczyna poszukiwać połączeń alternatywnych.

Należy zwrócić na to uwagę na etapie modelowania układu linii komunikacji zbiorowej, gdyż w sieciach silnie narażonych na niepunktualności – modelowanie w oparciu o czasy rozkładowe może być niebezpieczne.

W dalszych badaniach przewidziano rozszerzenie badań ankietowych o pomiary procesu zgłoszeń na przystanki, tak aby móc uchwycić masowość procesów

decyzyjnych na przystankach, a także w pełniejszy sposób oszacować wpływ ewentualnych opóźnień i stanów przepełnienia pojazdów – na zmiany potoków pasażerskich na poszczególnych liniach komunikacji zbiorowej.

Bibliografia

[1] Bauer M.: Wpływ infrastruktury ulic na funkcjonowanie komunikacji autobusowej, Praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 2008.
[2] Tyszka T., Zaleśkiewicz T.: Racjonalność decyzji. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2001.
[3] Kozielecki J.: Psychologiczna teoria decyzji. PWN, Warszawa 1975.
[4] Rudnicki A.: Jakość komunikacji miejskiej; Zeszyty Naukowo-Techniczne Oddziału SITK w Krakowie, Monografie, Kraków 1999.
[5] Schoebel A.: Optimization in Public Transportation. Stop Location, Delay Management and Tariff Zone Design in a Public Transportation Network. Springer Science+Business Media, LLC, 2006.

WYBRANE PROBLEMY MODELOWANIA PODRÓŻY TRANSPORTEM ZBIOROWYM NA PRZYKŁADZIE GDAŃSKA[1]

Krystian Birr
mgr inż., asystent, Katedra Transportu Szynowego Politechniki Gdańskiej, e-mail: krystian.birr@pg.gda.pl

Tomasz Budziszewski
mgr, projektant, Zespół Komunikacji w Biurze Rozwoju Gdańska, e-mail: tomaszbudziszewski@o2.pl

Marcin Zawisza
mgr inż., absolwent Politechniki Gdańskiej, e-mail: m.zawisza26@gmail.com

Kazimierz Jamroz
dr hab. inż., adiunkt, Katedra Inżynierii Drogowej Politechniki Gdańskiej, e-mail: kjamroz@pg.gda.pl

Streszczenie. *Modelowanie podróży transportem zbiorowym jest elementarną częścią procesu budowy modelu podróży przede wszystkim obszarów miejskich. Obecnie w Gdańsku budowany jest nowy transportowy model symulacyjny miasta, oparty na oprogramowaniu VISUM. W artykule zostały poruszone problemy budowy i kalibracji modelu podziału zadań przewozowych począwszy od wydzielenia ruchu pieszego, do podziału podróży odbywanych transportem zbiorowym i transportem indywidualnym. Zostały także opisane możliwości zmiany parametrów modelu dla stanów prognostycznych w zależności od zakładanych zmian wartości współczynnika motoryzacji i zachowań transportowych na skutek przyjętej polityki transportowej oraz wartości paliwa. Ponadto zostały przedstawione problemy, rozwiązania i rezultaty kalibracji sieci transportu zbiorowego z wykorzystaniem oprogramowania VISUM.*

Słowa kluczowe: *modelowanie, transport zbiorowy, podział zadań przewozowych*

1. Wprowadzenie

Istotą procesu modelowania ruchu jest prawidłowe odzwierciedlenie podróży odbywanych poszczególnymi środkami transportu zarówno w stanie istniejącym, jak i prognostycznym. Szczególnie ważne jest to dla obszarów miejskich, w których występują dwa główne systemy transportowe: transport indywidualny oraz transport zbiorowy. Udziały podróży pomiędzy tymi środkami transportu są ze sobą ściśle powiązane i ulegają zmianie w zależności od analizowanych scenariuszy prognoz, dotyczących zarówno rozwoju sieci transportowej, zmian zagospodarowania przestrzennego, jak też czynników demograficznych i społeczno-ekonomicznych. Prognozowany podział zadań przewozowych jest szczególnie istotny z uwagi na widoczną ostatnimi czasy skłonność decydentów niektórych polskich

1 Wkład procentowy poszczególnych autorów: Birr K. 25%, Zawisza M. 25%, Budziszewski T. 25%, Jamroz K. 25%

miast do zmiany podejścia do strategii rozwoju transportu miejskiego i obranie kierunku zrównoważonego rozwoju. Modele transportowe stają się zatem pożądanym narzędziem pozwalającym na ocenę efektów przyjętej polityki transportowej miasta i strategii jego rozwoju.

Celem artykułu jest przedstawienie najważniejszych aspektów związanych z modelowaniem podróży transportem zbiorowym ze szczególną charakterystyką czynników pozwalających na wyznaczenie postrzeganego czasu podróży transportem zbiorowym, możliwości wykorzystania dodatkowych zmiennych w modelu podziału zadań przewozowych, a także metod budowy i kalibracji sieci transportu zbiorowego. Zaproponowane rozwiązania przedstawiono na przykładzie transportowego modelu podróży dla miasta Gdańska.

2. Budowa modelu sieci transportu zbiorowego

Procesy modelowania podróży transportem indywidualnym i zbiorowym są zbliżone i w praktyce realizowane są równolegle. Budując sieć transportową należy jednak mieć na uwadze, iż w przeciwieństwie do transportu indywidualnego, transport zbiorowy składa się z kilku rodzajów środków transportu różniących się od siebie typem wykorzystywanej infrastruktury, parametrami ruchu oraz pojemnością.

Spośród środków transportu zbiorowego wyróżnia się przede wszystkim:

- autobusy, w zdecydowanej większości przypadków współdzielące infrastrukturę ze środkami transportu indywidualnego, wraz ze związanym z tym faktem wszystkimi konsekwencjami. Autobusy, choć są najpopularniejszym środkiem transportu zbiorowego, to znajdują się na najniższym miejscu w hierarchii pojazdów tej gałęzi z uwagi na prędkość (ściśle zależną od warunków ruchu) oraz pojemność,
- trolejbusy, charakteryzują się cechami zbliżonymi do autobusowych, lecz różnią się prędkością z uwagi na parametry sieci jezdnej, wartość przyspieszenia oraz zdolność do pokonywania wzniesień,
- tramwaje, będące na drugim miejscu wspomnianej hierarchii, wyróżniają się większą pojemnością oraz w większości przypadków, wydzielonym od ruchu kołowego, torem jazdy, co jednak nie zawsze oznacza, iż średnia prędkość tego rodzaju pojazdów jest większa (tablica 1). Często zdarza się, że z uwagi na niedostosowane programy sygnalizacji świetlnej („faworyzujące" ruch kołowy), brak priorytetu, ograniczoną przepustowość, a nawet zły stan torowiska, średnia prędkość handlowa tramwajów jest niższa niż autobusów,
- kolej miejska, metro, korzystające z wydzielonych bezkolizyjnych tras, przez wysoką prędkość oraz dużą pojemność stanowią trzon miejskiego transportu zbiorowego.

Tablica 1. Szacowane średnie prędkości komunikacyjne poszczególnych rodzajów środków transportu zbiorowego wg {5}

Rodzaj środka transportu	Średnia prędkość komunikacyjna [km/h]
Autobus	22-25
Trolejbus	20-25
Tramwaj „klasyczny”	18-20
Tramwaj „szybki”	25-27
Metro	36
Kolej regionalna	40-50

Oprócz powyższych różnic ważnym aspektem jest również stopień integracji organizacyjno-taryfowej. Zróżnicowana taryfa oraz brak skoordynowania ze sobą poszczególnych systemów transportowych powoduje, że najszybsza możliwa trasa podróży nie zawsze będzie najbardziej popularna. Istotny z punktu widzenie rozkładu podróży jest także komfort przesiadki, na który wpływ ma wspomniana już koordynacja rozkładowa oraz infrastruktura.

Wszystkie te wymienione czynniki wymuszają bardziej szczegółowe podejście do modelowania podróży transportem zbiorowym. W zbudowanym poprzez Biuro Rozwoju Gdańska w współpracy z Fundacją Rozwoju Inżynierii Lądowej oraz Politechniki Gdańskiej transportowym modelu symulacyjnym miasta Gdańska [3] uwzględniono każdy z powyższych czynników.

Do budowy modelu wykorzystano oprogramowanie PTV VISUM, w którym zakodowano wszystkie trasy transportu zbiorowego, składającego się z linii kolei dalekobieżnej, kolei miejskiej, tramwajów, autobusów miejskich i regionalnych oraz skalibrowano czas przejazdu na odcinkach sieci względem rzeczywistego rozkładu jazdy w pewnym stopniu uwzględniającego przeciętne warunki ruchu w poszczególnych okresach doby. W tym celu dla każdego z typów odcinka, odpowiadającego klasie drogi przypisano średnią wartość prędkości technicznej. W przypadku sieci tras tramwajowych średnie prędkości przypisano dla trzech rodzajów odcinków:

- tras bezkolizyjnych lub z priorytetem bezwzględnym,
- typowych odcinkach sieci z punktami kolizyjnymi,
- gdzie torowisko zlokalizowano w jezdni lub na odcinkach o złym stanie technicznym torowiska.

Ograniczenie prędkości z powodu złego stanu torowiska zastosowano jedynie w modelu dla stanu istniejącego. W stanach prognostycznych uznano, iż stan torowiska ulegnie poprawie, przez co wykazano efekt jego naprawy w postaci skróconego czasu przejazdu. Czas obsługi przystanków przyjęto stały dla każdego z systemów transportu: 15 sekund – autobusy i tramwaje; 25 sekund - kolej.

Efektem powyższej kalibracji jest odzwierciedlenie czasu przejazdu całego półkursu (z punktu A do B) z dokładnością $\pm$ 3 minut na każdej z linii, co uznano za zadowalające. Ponadto dokonano zestawienia średnich prędkości otrzymanych z modelu z wartościami otrzymanymi od organizatorów i przewoźników (tablica 2).

Tablica 2. Porównanie otrzymanych z modelu wartości średnich prędkości komunikacyjnych do danych przewoźników i organizatorów transportu

Środek transportu	Dane organizatorów/ przewoźników	Model
Autobus	22,7	21,4
Tramwaj	18,1	18,9
Kolej miejska	35,8	35,3

Kolejnym elementem modelu podróży transportem zbiorowym jest rozkład jazdy. Program VISUM posiada dwie standardowe metody określenia rozkładu jazdy: szczegółowy oraz oparty na częstotliwości. Z uwagi na brak podstaw do określenia szczegółowego rozkładu jazdy dla stanów prognostycznych oraz przyjęty sposobu określania czasu przejazdu na odcinkach sieci, w modelu Gdańska oparto się na rozkładzie jazdy opartym na częstotliwości. W tym celu wprowadzono atrybuty opisujące częstotliwość obsługi linii z podziałem na cztery okresy doby:

- szczyt poranny (godz. 4:30 – 9:00),
- „międzyszczyt" (godz. 9:00 – 14:00),
- szczyt popołudniowy (godz. 14:00 – 18:30),
- okres wieczorny (godzi. 18:30 – 22:30).

Następnym z głównych elementów budowy sieci transportu zbiorowego jest utworzenie sieci połączeń dla stanów prognostycznych. Tworząc w modelu Gdańska układ połączeń transportu zbiorowego w stanach prognostycznych uwzględniono takie czynniki jak:

- planowana infrastruktura,
- wzajemne uzupełnianie się poszczególnych gałęzi systemu transportowego (hierarchizacja),
- komfort i ograniczona liczba przesiadek,
- skoordynowanie ze sobą częstotliwości linii,
- zmiany w strukturze przestrzennej w poszczególnych dzielnicach miasta,
- przepustowość odcinków i skrzyżowań,
- pojemności pętli tramwajowych,
- możliwą integrację taryfową.

Tak zbudowana sieć transportu zbiorowego skonsultowano z Zarządem Transportu Miejskiego w Gdańsku.

Bardzo istotnym w modelowaniu podróży transportem zbiorowym jest uwzględnienie integracji taryfowej pomiędzy organizatorami transportu, a szczególnie jej brak. W Gdańsku integracja taryfowa polega na wprowadzeniu przez Metropolitalny Związek Komunikacyjny Zatoki Gdańskiej dodatkowej oferty obejmującej wybrane systemy transportu. Jednak ich względnie wysoka cena oraz konkurencyjność środków transportu, przede wszystkich pomiędzy tramwajem, a koleją powodują, iż mieszkańcy korzystają z tańszej, nieraz wygodniejszej oferty i korzystają wyłącznie z połączeń organizowanych przez Zarząd Transportu Miejskiego. Taka sytuacja wymusza uwzględnienie w modelu podróży zróżnicowania taryfy i wprowadzenia dodatkowego oporu. Dlatego też zdecydowano się rozwiązać ten problem poprzez wprowadzenie dodatkowego atrybutu przypisanego do

linii nazwanego „oporem linii". Zadaniem atrybutu jest odzwierciedlenie dodatkowego kosztu, jaki pasażer musi ponieść poprzez zakup dodatkowego biletu, w postaci postrzeganego czasu oczekiwania na pojazd. Atrybut ten wykorzystano podczas wyznaczania postrzeganego czasu podróży transportem zbiorowym poprzez dodanie jego wartości. Wartości „oporu linii" dobrano poprzez kalibrację względem liczby podróżnych pomierzonych na wybranych odcinkach sieci w ramach Kompleksowych Badań Ruchu [4] przeprowadzonych w Gdańsku w 2009 roku (tablica 3).

Tablica 3. Przyjęte wartości oporu linii z podziałem na linie transportu zbiorowego

Linie	Opór linii [min]
Tramwajowe	0
Autobusowe	0
Kolejowe miejskie i regionalne	6
Kolejowe dalekobieżne	10

W przypadku założenia, iż w stanie prognozowanym będzie występowała pełna integracja taryfowa, przedstawiony atrybut można pominąć lub ograniczyć, przykładowo jedynie do linii kolejowych dalekobieżnych.

Dążąc do jak najdokładniejszego odzwierciedlenia rozkładu potoków pasażerskich na odcinkach sieci wprowadzono również atrybut „opór przystanku" przypisany do każdego przystanku i określający typu przystanku pod względem komfortu przesiadki. Wyróżniono zatem trzy podstawowe kategorie przystanków:

- przystanek zwykły (wartość 1),
- przystanek w węźle integracyjnym/przesiadkowym – najbardziej komfortowy z uwagi na przesiadki „drzwi w drzwi", oraz skomunikowanie linii (wartość 0,1),
- przystanek „niekomfortowy" – gdzie przesiadka jest dla pasażera niekomfortowa np. z powodu barier architektonicznych (schody, przejście podziemne, konieczność „nadrabiania drogi") (wartość 1,5).

Atrybut ten wykorzystano podczas obliczania postrzeganego czasu podróży jako współczynnik zmiennej czasu oczekiwania na przesiadkę.

3. Modelowanie udziału podróży transportem zbiorowym

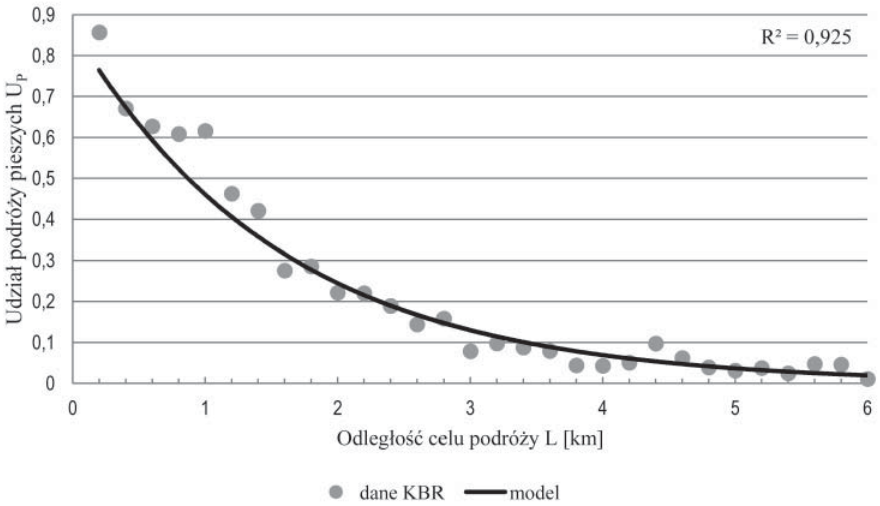
3.1. Podejście podstawowe

Pierwszym etapem budowy modelu podróży zarówno transportem zbiorowym, jak i indywidualnym, jest wydzielenie podróży nie pieszych spośród wszystkich generowanych podróży. Przystępując do modelowania podziału zadań przewozowych należy określić jakie zmienne mają wpływać na udział podróży poszczególnymi środkami transportu. Wybór ten można dokonać posiłkując się gotowymi modelami oraz dostępnymi danymi.

Funkcję wydzielenia podróży pieszych wyznaczono w oparciu o wyniki Kompleksowych Badań Ruchu 2009 korzystając z modelu opisanego wzorem (1):

$$U_p = 0{,}8675e^{-0{,}633L} \tag{1}$$

gdzie:
U_p – udział podróży odbywanych pieszo,
L – odległość do celu podróży.



Rys. 1. Funkcja udziału podróży transportem indywidualnym względem wskaźnika motoryzacji

W niniejszym artykule skoncentrowano się na przedstawieniu czynników pozwalających na wyznaczenie postrzeganego czasu podróży transportem zbiorowym, na który wpływ mają opisane w poprzednim rozdziale elementy sieci, przekładające się na wartości zmiennych ujętych we wzorze (6). Pominięto tym samym opis sposobu rozkładu podróży transportem indywidualnym, który to częściowo opisano w innym artykule prezentowanym na mniejszej konferencji [9].

Najpopularniejszym modelem podziału zadań przewozowych podróży nie pieszych wykorzystywanym w budowanych w ostatnich latach w Polsce modelach transportowych jest model logitowy opierający się na stosunku czasu podróży transportem indywidualnym do czasu podróży transportem zbiorowym [8],[10]. Model ten opisany wzorem (2) zastosowano również w Gdańsku:

$$U_{TI} = 1 - \frac{1}{1 + ae^{bx}} \tag{2}$$

$$x = \frac{T_{TI}}{T_{TZ}} \tag{3}$$

$$U_{TZ} = 1 - U_{TI} \tag{4}$$

gdzie:
U_{TI} – udział podróży wykonywanych transportem indywidualnym,
U_{TZ} – udział podróży wykonywanych transportem zbiorowym,
T_{TI} – czas podróży transportem indywidualnym,
T_{TZ} – postrzegany czas podróży transportem zbiorowym,
a, b – parametry modelu.

Wartości współczynników *a, b* dobrano poprzez dopasowanie kształtu funkcji i wartości wynikowej do danych uzyskanych w ramach Kompleksowych Badań Ruchu Gdańsk 2009 [4] otrzymując funkcję (5) dla której R^2 wynosi 0,81.

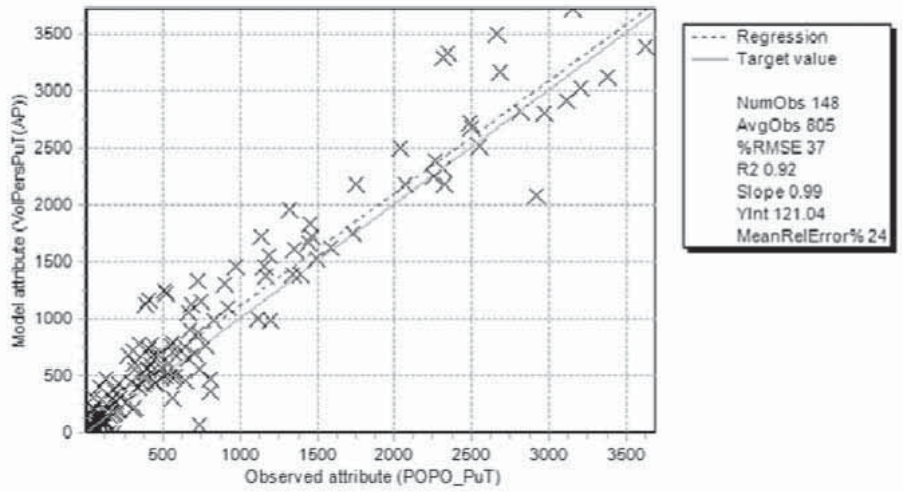
$$U_{TI} = 1 - \frac{1}{1 + 1{,}85e^{-0{,}73x}} \tag{5}$$

Do wyznaczenia postrzeganego czasu podróży transportem zbiorowym wykorzystano model opisany wzorem (6) zawierający standardowe czynniki zawarte w programie VISUM:

$$T_{TZ} = IVT + AT + ET + WT + OWT + TWT \cdot OP + 3 \cdot NT + OL \tag{6}$$

gdzie:
T_{TZ} – postrzegany czas podróży (w minutach),
IVT – czas podróży w pojazdach transportu zbiorowego,
AT – czas dojścia do przystanku,
ET – czas dojścia do celu podróży po opuszczeniu ostatniego pojazdu,
WT – czas podróży odbywanej pieszo (np. między przystankami),
OWT – czas oczekiwania na przyjazd pojazdu,
OP – opór przystanku,
TWT – czas przesiadki,
NT – liczba przesiadek,
OL – opór linii.

Poprzez przeprowadzenie kalibracji na każdym z etapów budowy czterostopniowego modelu podróży, w tym także modelu podziału zadań przewozowych, ostatecznie otrzymano zgodność wartości zamodelowanych potoków pasażerskich z danymi z KBR Gdańsk 2009 [4] na poziomie $R^2=0{,}92$ (rys. 2, tablica 4).



Rys. 2. Weryfikacja zgodności wartości otrzymanych z modelu z wartościami uzyskanymi z KBR2009

Tablica 4. Porównanie sumarycznych modelowych wielkości potoku pasażerskiego otrzymanych z wartościami otrzymanymi z pomiarów KBR2009

	Pomiar	**Model**
Sumaryczna liczba potoków TZ	117629	117204
Autobusy	35572	39169
Tramwaj	38716	36483
SKM	39822	38030
Kolej	3519	3522

Modelując podział zadań przewozowych dla stanów prognostycznych należy przyjąć właściwe założenia dotyczące wielkości i zależności prognozowanych zmian. W przypadku modelu transportowego Gdańska [3] wielkość udziału poszczególnych rodzajów środków transportu uzależniono od prognozowanego stopnia rozwoju ekonomicznego kraju, od którego zależny jest między innymi wskaźnik motoryzacji. Zdecydowano się na przyjęcie trzech scenariuszy poziomu rozwoju ekonomicznego:

- optymistyczny – wysoki poziom rozwoju ekonomicznego,
- umiarkowany – umiarkowany poziom rozwoju ekonomicznego,
- pesymistyczny – niski poziom rozwoju ekonomicznego.

Wartości wskaźnika motoryzacji dla poszczególnych scenariuszy stanu prognostycznego przyjęto w oparciu o prognozowaną charakterystykę zmienności wskaźnika motoryzacji oraz założenia jego zmian uzależnionych od rocznych zmian PKB (tablica 5) [2].

Tablica 5. Prognozowany wskaźnik motoryzacji w zależności od rozwoju ekonomicznego (so./1000 mieszkańców) (źródło:{2},{3})

Rozwój ekonomiczny	Wskaźnik motoryzacji – rok 2025 WMSO [so./1 tys. mk]
Optymistyczny	650
Umiarkowany	590
Pesymistyczny	530

W celu odniesienia podziału zadań przewozowych do wskaźnika motoryzacji, a jednocześnie poziomu rozwoju ekonomicznego kraju, skorzystano z modelu udziału podróży odbywanych transportem zbiorowym zależnego od wskaźnika motoryzacji [8]. Wartości progowe wskaźnika motoryzacji dla miasta Gdańska oszacowano dla trzech scenariuszy rozwoju poziomu społeczno gospodarczego miasta, korzystając z modelu zawartego w pracy [2].

$$U_{ti} = \frac{e^z}{1 + e^z} \tag{7}$$

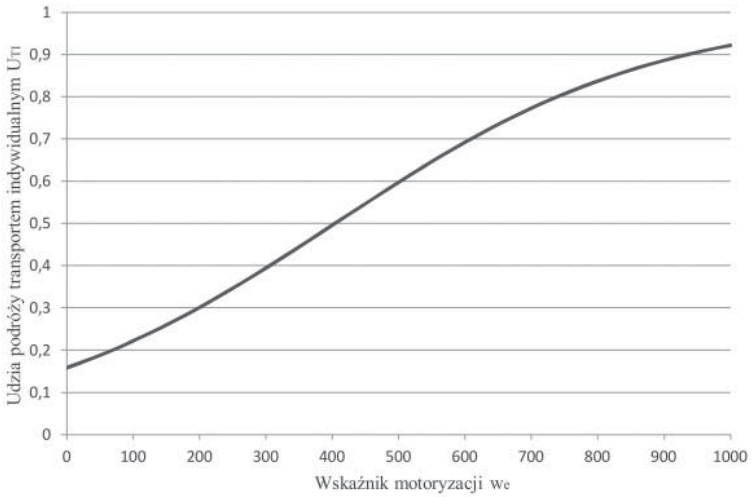
$$z = cw_m - d \tag{8}$$

gdzie:
U_{ti} – prawdopodobieństwo realizacji podróży transportem indywidualnym,
z – zmienna zależna od wartości wskaźnika motoryzacji w,
w_m – wskaźnik motoryzacji,
c, d – parametry równań.

Powyższy model skalibrowano poprzez dopasowanie parametrów c i d z uwzględnieniem wartości wskaźnika motoryzacji oraz udziału podróży realizowanych transportem indywidualnym uzyskanych z KBR Gdańsk 1998 oraz KBR Gdańsk 2009 [4]. Otrzymaną funkcję przedstawiono we wzorze (9) oraz na rys. 3:

$$U_{ti} = \frac{e^{0{,}00413w_m - 1{,}67}}{1 + e^{0{,}00413w_m - 1{,}67}} \tag{9}$$

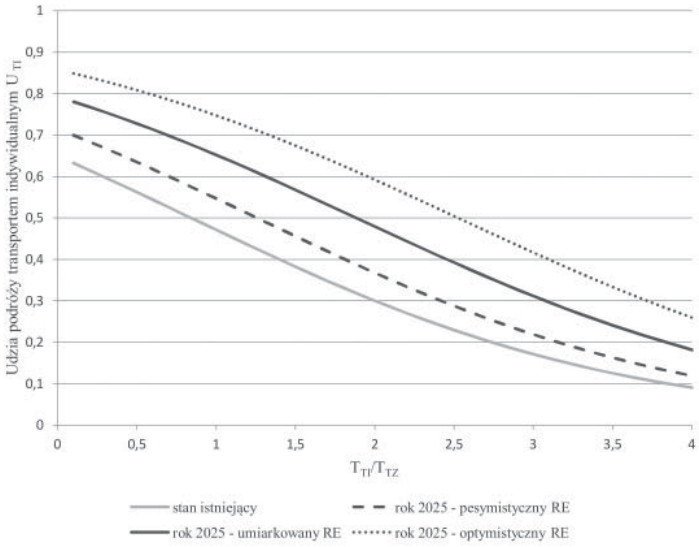
Uzyskując w ten sposób prognozowaną wartość udziału podróży odbywanych transportem indywidualnym, wyznaczono parametry a i b dla funkcji podziału zadań przewozowych dla stanów prognostycznych. Wartości parametrów modelu dla każdego ze scenariuszy przedstawiono w tablicy 5, zaś na rys. 4 przedstawiono wykresy każdej z funkcji w odniesieniu do stanu istniejącego.



Rys. 3. Funkcja udziału podróży transportem indywidualnym względem wskaźnika motoryzacji

Tablica 5. Parametry funkcji modelu podziału zadań przewozowych dla stanu prognostycznego (rok 2025)

Rozwój ekonomiczny	Współczynniki modelu podziału zadań przewozowych dla roku 2025	
	a	b
Optymistyczny	6,0	0,71
Umiarkowany	3,8	0,71
Pesymistyczny	2,5	0,73
Zachowanie istniejącej funkcji	1,85	0,73



Rys. 4. Modele podziału zadań przewozowych dla każdego ze scenariuszy rozwoju ekonomicznego

3.2. Uwzględnienie wybranych elementów polityki transportowej miasta

Choć na obecnym etapie zaawansowania gdańskiego modelu tego się nie podjęto, to jednak warto pamiętać, iż podział zadań przewozowych nie jest zależny wyłącznie od wskaźnika motoryzacji. Niezaprzeczalny wpływ na udział poszczególnych rodzajów środków transportu ma także polityka transportowa miasta, jak i względna wartość paliwa. W zakresie inwestycji infrastrukturalnych zastosowany model uwzględnia ten czynnik poprzez uwzględnienie czasu podróży (nowe drogi – krótszy czas przejazdu, większy udział transportu indywidualnego i analogicznie: nowe trasy transportu szynowego – większa dostępność, krótszy czas podróży, większy udziału transportu zbiorowego). Jednak polityka transportowa to nie tylko inwestycje w infrastrukturę, ale także działania promujące alternatywne sposoby przemieszczania się, liczne ograniczenia dla ruchu kołowego i inne [6].

Chcąc uwzględnić możliwy wpływ działań zgodnych z polityką transportową na prognozowane wartości udziału poszczególnych środków transportu w podróżach, zalecane jest uzupełnienie modelu podziału zadań przewozowych o zmienną *PT* odpowiadającą efektom prowadzonej polityki transportowej:

$$U_{ti} = f(x;\ PT) \tag{10}$$

gdzie:

x – stosunek czasu podróży transportem indywidualnym do czasu podróży transportem zbiorowym – wzór (3),

PT – zmienna uwzględniająca wybrane elementy polityki transportowej.

Jako, że polityka transportowa składa się z wielu założeń, które są osiągane poprzez realizację wielu zróżnicowanych działań, zalecane jest uzależnienie wartości zmiennej *PT* od wybranych elementów działań, mających największy wpływ na zamianę zachowań transportowych mieszkańców miast. W szczególności proponuje się uwzględnienie następujących działań:

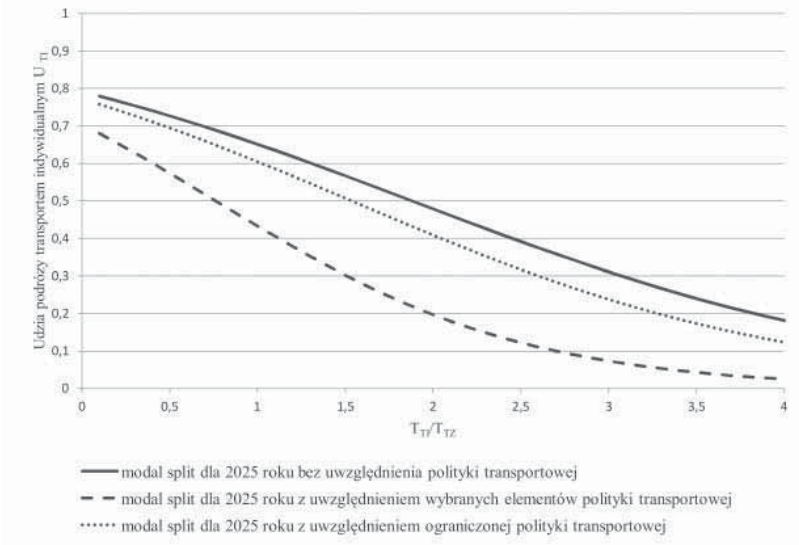
- efektywne zarządzanie parkowaniem: wysokie restrykcje dotyczące parkowania w centralnych częściach miasta,
- wprowadzenie wysokich ograniczeń wjazdu pojazdów transportu indywidualnego do centralnych części miasta (system opłat, zielone strefy itp.),
- uruchomienie systemu sterowania ruchem nadającym priorytet dla pojazdów transportu zbiorowego,
- inwestowanie w komfort podróży transportem zbiorowym: modernizacje i zakup taboru, utrzymanie wysokiego poziomu stanu torowisk, budowa węzłów przesiadkowych,
- promowanie transportu zbiorowego, wspieranie działań uświadamiająco-wychowawczych na rzecz transportu zbiorowego.

Dążąc do bardziej szczegółowego odzwierciedlenia siły wpływu poszczególnych działań na zachowania transportowe podróżnych, każdemu z elementów polityki transportowej zaleca się przypisanie wag odpowiadających efektom ich zastosowa-

nia. Choć do ich określenia niezbędne jest zebranie wystarczającej liczby danych, to jednak takie podejście umożliwiłoby proste przedstawienie zmian udziału podróży transportem indywidualnym dla danego zestawu działań polityki transportowej, co zobrazowano jako przykład na rys. 5:

$$PT = f(d_i) \tag{11}$$

gdzie:
PT – zmienna uwzględniająca wybrane elementy polityki transportowej,
d_i – wybrane elementy działań polityki transportowej wraz z przypisanymi do nich wagami.



Rys. 5. Model podziału zadań przewozowych z uwzględnieniem polityki transportowej

Można przypuszczać, iż poprzez uwzględnienie w modelu realizacji założeń polityki transportowej, w wynikach zaobserwuje się spadek udziału podróży transportem indywidualnym wraz ze wzrostem wartości stosunku czasu podróży względem transportu zbiorowego. W przypadku uwzględnienia tylko wybranych założeń, spadek ten będzie odpowiednio mniejszy.

3.3. Uwzględnienie wartości paliwa

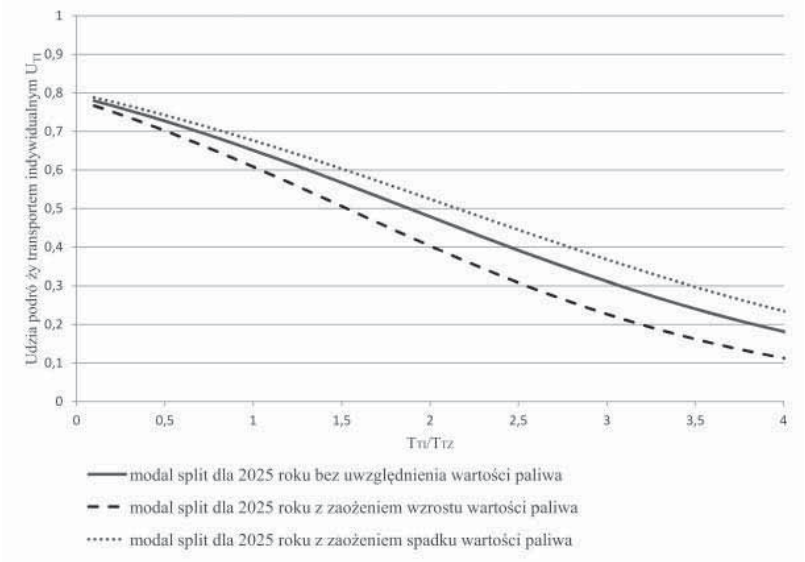
Dodatkowym czynnikiem wpływającym na podział zadań przewozowych, który może być wykorzystany do analizy zróżnicowanych scenariuszy dla stanów prognostycznych jest wartość paliwa, określona jako stosunek prognozowanej ceny paliwa do średnich zarobków [10].

$$U_{ti} = f(x; FV) \tag{12}$$

$$FV = \frac{FC}{AS} \tag{13}$$

gdzie:
FV – wskaźnik wartości paliwa,
x – stosunek czasu podróży transportem indywidualnym do czasu podróży transportem zbiorowym – wzór (3),
FC – średnia cena detaliczna paliwa,
AS – średnia wysokość zarobków.

Na rys. 6 przedstawiono możliwy wpływ uwzględnienia wartości paliwa na udział podróży transportem indywidualnym, zależnego od czasu podróży danymi środkami transportu. Wzrost wartości paliwa przyczynia się do spadku udziału podróży transportem indywidualnym, zaś w przypadku spadku wartości paliwa, odpowiednio wzrost udziału. Spowodowane jest to zmianą odczuwalnego kosztu paliwa w indywidualnym budżecie podróżnych – w przypadku niskiej wartości paliwa, jego koszt nie jest tak silnie odczuwalny w budżecie. Analogicznie wysoka wartość paliwa powoduje, że jego koszt jest bardziej odczuwalny w budżecie.



Rys. 6. Model podziału zadań przewozowych z uwzględnieniem wartości paliwa

4. Podsumowanie

Przedstawione w niniejszym opracowaniu zagadnienia ukazują, że modelowanie podróży realizowanych transportem zbiorowym wymaga uwzględnienia wielu czynników mających wpływ zarówno na rozkład podróży na sieć, jak również na prognozowany udział poszczególnych środków transportu w podróżach. Jednak prawidłowy dobór założeń pozwala na ocenę efektów zarówno planowanych in-

westycji w sieci transportowej, jak i przyjętej polityki transportowej. Zaprezentowane propozycje uwzględnienia dodatkowych zmiennych w modelu podziału zadań przewozowych mają na celu zwrócenie uwagi i poruszenie problemu, iż wykorzystywane obecnie modele podziału zadań przewozowych zależnych jedynie od stosunku czasu podróży poszczególnymi gałęziami transportu, nie uwzględniają kilku innych istotnych czynników. Skutkiem tego mogą być błędne wyniki prognoz podróży transportem zbiorowym mające znaczenie przy analizie zasadności wybranych inwestycji związanej z tą gałęzią transportu.

Literatura

[1] Birr K., Maciasz K., Romanowska A., Zawisza M., Metodyka budowy prognostycznego modelu transportowego na przykładzie Gdańska. Fundacja Rozwoju Inżynierii Lądowej, Biuro Rozwoju Gdańska.
[2] Jamroz K., Metoda zarządzania ryzykiem w inżynierii drogowej.Rozprawa habilitacyjna, Politechnika Gdańska, 2011.
[3] Jamroz K., Budziszewski T., Birr, K., Maciasz K., Romanowska, A., Zawisza M., Kustra W., Transportowy model symulacyjny Miasta Gdańska - etap I. Fundacja Rozwoju Inżynierii Lądowej, Biuro Rozwoju Gdańska.
[4] PBS, Biuro Rozwoju Gdańska: Kompleksowe Badania Ruchu na terenie Miasta Gdańska 2009. Raport V. Sopot-Warszawa 2009.
[5] Podoski J., Tramwaj szybki. Projektowanie i eksploatacja, WKiŁ, Warszawa 1983.
[6] Polityka transportowa państwa na lata 2006-2025, Ministerstwo Infrastruktury, Warszawa 2005.
[7] Ortúzar J.d.D., Willumsen, L.G., Modelling Transport.Wiley-Blackwell, 2011.
[8] Szarata A., Ocena efektywności funkcjonalnej systemu parkingów przesiadkowych (P+R). Rozprawa doktorska, Politechnika Krakowska, 2005.
[9] Zawisza M., Maciasz K., Birr K., Jamroz K., Budziszewski T., Wybrane problemy modelowania rozkładu przestrzennego i czasu podróży na przykładzie Gdańska. Referat zgłoszony na III Ogólnopolską Konferencję Naukowo-Techniczną „Modelling 2012".
[10] http://edroga.pl/nauka/badania/4443-podzial-zadan-przewozowych-i-przeglad-modeli.

SZACOWANIE UTRACONYCH WPŁYWÓW Z TYTUŁU PRZEJAZDÓW ULGOWYCH I BEZPŁATNYCH ŚRODKAMI KOMUNIKACJI MIEJSKIEJ. WNIOSKI Z BADAŃ[1]

Daniel Błażków
mgr, Wydział Gospodarki Komunalnej i Ochrony Środowiska, Urząd Miasta Jelenia Góra, 58-500 Jelenia Góra, ul. Sudecka 29, tel. +48 75 754 6293, e-mail: dblazkow@jeleniagora.pl

Zygmunt Bobowski
dr, Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu, Wydział Ekonomii, Zarządzania i Turystyki w Jeleniej Górze, 58-500 Jelenia Góra, ul. Nowowiejska 3, tel. +48 75 753 8220, e-mail: zbobowski@dami.pl

Streszczenie. *W artykule Autorzy prezentują metodologię szacowania utraconych wpływów z tytułu przejazdów ulgowych i bezpłatnych środkami komunikacji miejskiej wykorzystaną w trakcie badań przeprowadzonych na potrzeby Miejskiego Zakładu Komunikacyjnego w Jeleniej Górze, Miejskiego Zakładu Komunikacyjnego w Bolesławcu, Komunikacji Miejskiej w Głogowie oraz Miejskiego Zakładu Komunikacji w Nysie. Realizacja podstawowego celu badań wymagała m. in. oszacowania:*

- *wielkości i struktury przejazdów środkami komunikacji miejskiej, a w szczególności udziału i struktury przejazdów ulgowych i bezpłatnych na podstawie przeprowadzonych badań ankietowych,*
- *wielkości utraconych wpływów ogółem i według poszczególnych linii komunikacyjnych,*
- *wielkości rekompensaty w związku z utraconymi wpływami z tytułu przejazdów ulgowych i bezpłatnych (wielkość ta winna być zrekompensowana odpowiednią kwotą dotacji pochodzącej z budżetu miasta (gminy).*

Dokonane ustalenia pozwoliły na przeprowadzenie analizy rentowności poszczególnych linii komunikacyjnych i sformułowanie wniosków dotyczących m. in. zasadności funkcjonowania linii komunikacyjnych w dotychczasowym układzie ewentualnie korekty taryfy opłat za przejazdy środkami komunikacji miejskiej. Podstawą wykorzystanej metodologii były badania ankietowe pasażerów komunikacji miejskiej.

Słowa kluczowe: *komunikacja miejska, badania ankietowe, przejazdy ulgowe i bezpłatne, utracone wpływy*

Wprowadzenie

Zapoczątkowane pod koniec lat 90-tych ubiegłego stulecia badania dotyczące szacowania utraconych wpływów z tytułu przejazdów ulgowych i bezpłatnych środkami komunikacji miejskiej były reakcją na zapotrzebowanie zgłaszane przez podmioty obsługujące lokalny transport zbiorowy. Badania takie zostały zreali-

1 Wkład autorów w publikację: Błażków D.: 50%, Bobowski Z.: 50%

zowane na potrzeby zakładów komunikacji miejskiej: w Jeleniej Górze (w latach 1999[2] i 2004[3]), w Bolesławcu[4] (w 2003 r.), w Głogowie[5] (dwukrotnie w 2004 r.) i w Nysie[6] (w 2011 r.). W każdym przypadku w podstawowej części dotyczyły one szacowania utraconych wpływów z tytułu przejazdów ulgowych i bezpłatnych, a w niektórych przypadkach były uzupełniane m. in. o badania potoków pasażerskich, badania rentowności poszczególnych linii komunikacyjnych i in.

Usługi transportowe realizowane są przez badane podmioty na podstawie umowy zawartej z Zarządami gmin/miast, jako organizatorami publicznego transportu zbiorowego na swoim terenie[7].

Operator musi zagwarantować funkcjonowanie publicznego transportu zbiorowego zgodnie z zasadami określonymi w art. 46. cytowanej Ustawy, zaś podmiot zamawiający odpowiada m. in. za organizację i zarządzanie publicznym transportem zbiorowym. Do szczególnych zadań organizatora należy zaliczyć ustalanie opłat za przewóz oraz innych opłat, o których mowa w ustawie z dnia 15 listopada 1984 r.[8], za usługę świadczoną przez operatora w zakresie publicznego transportu zbiorowego. Ustanowiona taryfa opłat zawiera także ceny biletów ulgowych „ustawowych" i wynikających z uprawnień ustanowionych na obszarze właściwości danego organizatora. Dodatkowo uwzględnia ona uprawnienia „ustawowe" i „lokalne" do przejazdów bezpłatnych.

W tej sytuacji oczywistym jest fakt, że z tytułu funkcjonowania różnego rodzaju uprawnień do ulg (których przyznanie nie zależy od operatora), jak i przejazdów bezpłatnych traci on na wielkości wpływów z tytułu sprzedaży biletów.

Czy duża jest skala przejazdów ulgowych i bezpłatnych w całości przewozów realizowanych przez zakłady komunikacji miejskiej? Niech świadczą o tym poniższe liczby:

- na obszarze działania MZK w Jeleniej Górze w 1999 roku przejazdy ulgowe stanowiły około 47%, a przejazdy bezpłatne blisko 15% przejazdów ogółem, natomiast w roku 2004 przejazdy ulgowe stanowiły około 45%, a udział przejazdów bezpłatnych wzrósł do około 20% przejazdów ogółem,

2 Por. Bobowski Z. Szacowanie utraconych wpływów MZK w Jeleniej Górze z tytułu ulgowych i bezpłatnych przejazdów pasażerów środkami komunikacji miejskiej, Jelenia Góra 1999.

3 Por. Błażków D. Struktura przejazdów i jej wpływ na ekonomiczną efektywność funkcjonowania Miejskiego Zakładu Komunikacyjnego w Jeleniej Górze (na podstawie przeprowadzonych badań ankietowych w miesiącu czerwcu 2004 r.), Jelenia Góra 2005.

4 Por. Bobowski Z., Błażków D., Chmielewski L. Szacowanie utraconych wpływów z tytułu przejazdów ulgowych i bezpłatnych oraz rentowności linii Miejskiego Zakładu Komunikacji w Bolesławcu. Bolesławiec 2003.

5 Por. Bobowski Z., Błażków D., Kulczycka R. Struktura przejazdów i jej wpływ na ekonomiczną efektywność funkcjonowania Komunikacji Miejskiej sp. z o.o. w Głogowie. Głogów 2004.

6 Por. Bobowski Z., Błażków D., Błażków A. Struktura przejazdów i jej wpływ na ekonomiczną efektywność funkcjonowania Komunikacji Miejskiej w Nysie sp. z o.o., Nysa 2011.

7 Zgodnie z art. 4 p.1.9. Ustawy z dnia 16 grudnia 2010 r. o publicznym transporcie zbiorowym.(Dz. U. nr 5 z 2011 r.) „…organizator publicznego transportu zbiorowego to właściwa jednostka samorządu terytorialnego, zaś podmiot realizujący usługi publicznego transportu zbiorowego to „…operator publicznego transportu zbiorowego".

8 Ustawa z dnia 15 listopada 1984 r. – Prawo przewozowe. (Dz. U. z 2000 r. Nr 50, poz.601, z późn. zm.).

- w trakcie badań przeprowadzonych w 2003 roku na potrzeby MZK w Bolesławcu stwierdzono blisko 45% udział przejazdów ulgowych i około 27% udział przejazdów bezpłatnych w łącznej liczbie przejazdów,
- na terenie działania KM w Głogowie w 2004 roku udział przejazdów ulgowych wyniósł około 47%, a bezpłatnych 20%,
- podczas badań przeprowadzonych w 2011 roku w Nysie stwierdzono około 44% udział przejazdów ulgowych i blisko 31% udział przejazdów bezpłatnych.

Powyższe dane wskazują, iż przeciętnie tylko około 25 – 35% przejazdów jest pełnopłatna. Sytuacja taka powoduje konieczność dotowania działalności zakładów komunikacji miejskiej.

Zgodnie z Ustawą z dnia 16 grudnia 2010 roku z tytułu przyznanych uprawnień do przejazdów ulgowych operatorowi publicznego transportu zbiorowego w związku ze świadczeniem usług w zakresie publicznego transportu zbiorowego przyznawana jest rekompensata. Ma ona rekompensować operatorowi utracone przychody w związku ze stosowaniem ustawowych i lokalnych uprawnień do ulgowych przejazdów w publicznym transporcie zbiorowym oraz poniesionych kosztów w związku ze świadczeniem tych usług. Dodatkowo art. 52 cytowanej Ustawy stanowi, że „operatorowi przysługuje rekompensata, jeżeli wykaże, że podstawą poniesionej straty z tytułu realizacji usług w zakresie publicznego transportu zbiorowego są utracone przychody i poniesione koszty… proporcjonalnie do poniesionej straty". Kwota rekompensaty musi również uwzględniać rozsądny zysk. Należy tu zwrócić uwagę, iż Ustawa ta zupełnie pomija kwestię rekompensowania przez organizatora transportu publicznego operatorowi realizowanych przez niego przejazdów bezpłatnych, pomimo tego, że to właśnie on w większości przypadków nadaje uprawnienia do tych przejazdów.

Celem niniejszego opracowania jest wskazanie procedury umożliwiającej określenie wielkości tej rekompensaty. Proponuje się realizację tak założonego celu badania w kilku etapach:

1) badanie ankietowe reprezentacyjnej próby pasażerów korzystających z usług komunikacji miejskiej,
2) oszacowanie wielkości i struktury przejazdów środkami komunikacji miejskiej, a w szczególności udziału i struktury przejazdów ulgowych i bezpłatnych,
3) oszacowanie wielkości rekompensaty w związku z utraconymi wpływami z tytułu przejazdów ulgowych i bezpłatnych,
4) sformułowanie wniosków wynikających z przeprowadzonych badań.

Ustalenie globalnej kwoty utraconych wpływów z tytułu **przejazdów ulgowych** jest w zasadzie proste, bo można ją oszacować na podstawie wielkości sprzedaży ulgowych biletów jednorazowych i miesięcznych poszczególnych typów przy uwzględnieniu różnicy między ceną biletu normalnego i ulgowego. Jednak w celu ustalenia przejrzystej struktury przysługującej przewoźnikowi rekompensaty konieczne jest określenie struktury kwoty utraconych wpływów według poszczegól-

nych uprawnień do ulgowych przejazdów autobusami komunikacji miejskiej. Informacji w tym zakresie przewoźnik nie posiada.

W oparciu o aktualny zasób informacji nie jest możliwe oszacowanie skali **przejazdów bezpłatnych** na podstawie przyznanych uprawnień i związanych z tym faktem utraconych wpływów. Wydawanie przez niektórych operatorów uprawnionym kart wolnego przejazdu nie rozwiązuje problemu, ponieważ nie pozwala określić liczby odbywanych przejazdów. Przeprowadzone badanie ma za zadanie określić również wielkość przejazdów bez biletów (gapowicze).

Wskazanie procedury umożliwiającej określenie skali i struktury przejazdów ulgowych i bezpłatnych według rodzajów uprawnień, a w dalszej kolejności oszacowanie wielkości i struktury utraconych wpływów według „tytułów" upoważniających do przejazdów ulgowych i bezpłatnych stanowi zasadniczy cel tego opracowania.

Realizacja tak sformułowanego celu wymaga – w pierwszej kolejności – określenia struktury przejazdów środkami komunikacji miejskiej z uwzględnieniem takich aspektów jak:

a) przejazdy na podstawie biletów jednorazowych oraz miesięcznych,
b) przejazdy na podstawie biletów normalnych, ulgowych, bezpłatne oraz „gapowicze",
c) struktura przejazdów ulgowych według uprawnień,
d) struktura przejazdów bezpłatnych według uprawnień.

Dla potrzeb badania wyodrębniono dwie podstawowe grupy tytułów do przejazdów ulgowych lub bezpłatnych:

I. „ustawowe" wynikające z uprawnień przyznanych różnym grupom społecznym w drodze Ustaw sejmowych,

II. „lokalne" wynikające z uprawnień przyznanych w drodze Uchwał podejmowanych przez odpowiednie rady miast lub gmin.

Pierwsza z wymienionych grup uprawnień ma charakter powszechnie obowiązujący na obszarze całego kraju i obejmuje następujące osoby:

w zakresie przejazdów bezpłatnych:

- posłów i senatorów RP,
- inwalidów wojennych i wojskowych oraz ich opiekunów
- dzieci i młodzież uczęszczająca do szkół specjalnych, przedszkoli i ich opiekunowie

w zakresie przejazdów ulgowych:

- kombatantów i osoby represjonowane
- studentów szkół wyższych.

Druga grupa uprawnień ma charakter lokalny i wykazuje pewne zróżnicowanie na obszarach poszczególnych miast bądź gmin. Najczęściej jednak obejmują one:

w zakresie przejazdów bezpłatnych:

- dzieci do lat 4,
- osoby powyżej 70 roku życia,
- inwalidzi I grupy, osoby niezdolne do samodzielnej egzystencji i osoby o znacznym stopniu niepełnosprawności i ich opiekunowie,

- osoby niewidome i ociemniałe oraz ich przewodników,
- pracowników komunikacji miejskiej i ewentualnie członków ich rodzin pozostających we wspólnym gospodarstwie domowym,
- umundurowanych żołnierzy odbywających niezawodową służbę wojskową do stopnia starszego kaprala włącznie,
- umundurowanych funkcjonariuszy Policji;.

w zakresie przejazdów ulgowych:

- dzieci i młodzież w okresie nauki w szkole podstawowej, gimnazjalnej i ponadpodstawowej do ukończenia 22 roku życia,
- emerytów i rencistów oraz ich współmałżonków, na których pobierane są dodatki rodzinne.

Zgodnie z zaproponowaną procedurą badań poszczególne etapy były realizowane w sposób opisany poniżej.

Etap 1. Badanie ankietowe reprezentacyjnej próby pasażerów korzystających z usług komunikacji miejskiej

Dostępna statystyka przewozu osób środkami publicznego transportu zbiorowego nie pozwala precyzyjnie określić zarówno łącznej wielkości przejazdów, jak i jej struktury, a przede wszystkim wielkości i struktury przejazdów ulgowych i bezpłatnych. Wobec braku takich danych Autorzy proponują wykorzystać do tego celu badania ankietowe pasażerów, a ich wyniki wykorzystać do oszacowania wielkości i struktury przejazdów w skali miesiąca bądź innego okresu czasu.

Istotnym z punktu wiarygodności wyników przeprowadzonych badań było określenie wielkości populacji pasażerów (tj. próby reprezentacyjnej) objętych badaniem. Teoria wnioskowania statystycznego nakazuje by taka próba była dostatecznie liczna, a im jej liczebność jest większa, tym większa będzie trafność wnioskowania[9]. Z uwagi na zróżnicowaną na ogół skalę i strukturę przejazdów w dni robocze, soboty i niedziele[10] Autorzy założyli przeprowadzenie **pełnego badania wszystkich kursów realizowanych w dzień roboczy, sobotę i niedzielę na wszystkich liniach komunikacyjnych**. Dodatkowo założono, by badanie było realizowane w typowym dla komunikacji miejskiej okresie (poza okresem wakacyjnym).

Przyjęcie takich założeń spowodowało objęcie badaniami następującej liczby pasażerów:

- w Jeleniej Górze – 98 881 osób,
- w Bolesławcu – 14 999 osób,
- w Głogowie – 25 080 osób,
- w Nysie – 13 415 osób.

9 Por. Wawrzynek J.: Wybrane metody opisu i wnioskowania statystycznego w biznesie. Skrypty Akademii Ekonomicznej we Wrocławiu, Wrocław 1995.

10 Z przeprowadzonych badań wynika, że skala przejazdów w soboty stanowi ok. 50%, a w niedziele ok. 30 % przejazdów z dnia roboczego.

Tak liczne próby reprezentacyjne pozwoliły uzyskać dużą zbieżność uzyskanych oszacowań z faktycznie zrealizowaną liczbą przejazdów (np. w Jeleniej Górze w zakresie liczby przejazdów na podstawie biletów jednorazowych w stosunku do faktycznej sprzedaży tych biletów w miesiącu maju 1999 roku wynoszącej 119 755 biletów oszacowana liczba przejazdów wyniosła 120 866; podobnie w Bolesławcu w miesiącu wrześniu 2003 roku - oszacowana liczba przejazdów wyniosła 101 082, zaś liczba sprzedanych biletów 105 400 (różnicę mogą stanowić m. in. bilety zakupione w bieżącym miesiącu a wykorzystane w okresie późniejszym). W przypadku biletów miesięcznych trudno wnioskować o trafności oszacowań z uwagi na możliwość wielokrotnego przejazdu (nawet w ciągu jednego dnia) na podstawie takiego biletu.

Gromadzone w formie ankiety dane obejmowały:

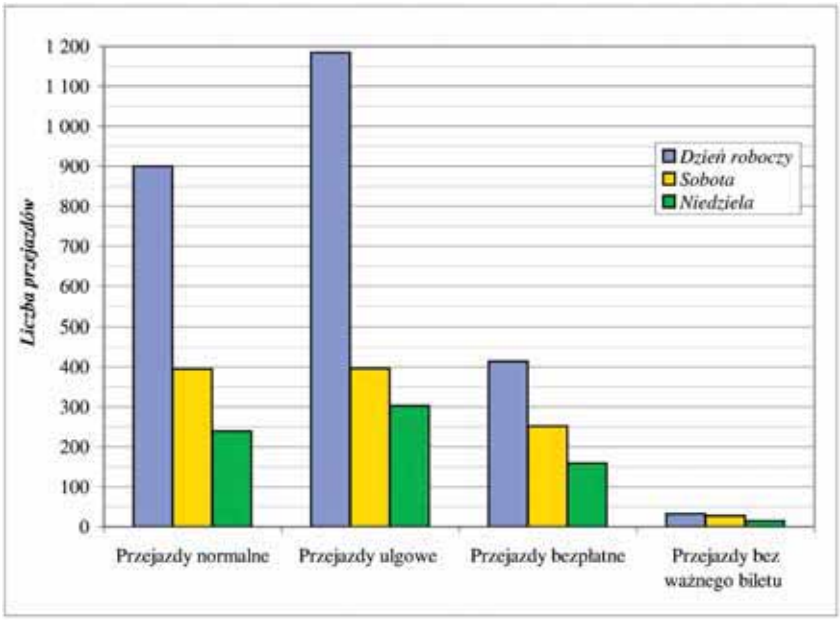
- rodzaj biletu: jednorazowy (w tym: normalny, ulgowy), miesięczny (w tym: normalny, ulgowy), przejazd bezpłatny,
- w przypadku przejazdów ulgowych i bezpłatnych – rodzaj uprawnienia do takiego przejazdu
- przejazd bez ważnego biletu(„gapowicz").

Dane te były gromadzone odrębnie dla wszystkich kursów realizowanych na wszystkich liniach komunikacyjnych w wyodrębnionych dniach. Uzyskane dane pozwoliły na określenie struktury przejazdów **osób ankietowanych** dla poszczególnych linii komunikacyjnych w układzie podanym w tabeli 1 i na wykresach 1 i 2, lub w układzie bardziej szczegółowym uwzględniającym rodzaje uprawnień do przejazdów ulgowych i bezpłatnych.

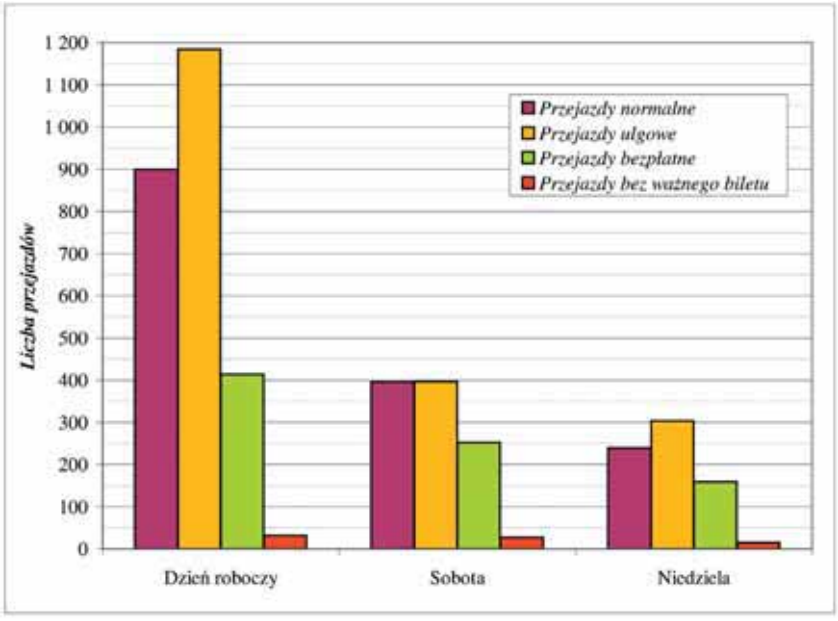
Tabela nr 1 – Struktura przejazdów ogółem linii komunikacyjnej X

Lp	Wyszczególnienie	**Dzień roboczy**		**Sobota**		**Niedziela**	
		Razem - A, B, C		Razem - A, B, C		Razem - A, B, C	
		Liczba przejazdów	Udział procentowy	Liczba przejazdów	Udział procentowy	Liczba przejazdów	Udział procentowy
I	***Przejazdy normalne***	900	35,57%	395	36,92%	239	33,38%
II	***Przejazdy ulgowe***	1 184	46,80%	396	37,01%	303	42,32%
III	***Przejazdy bezpłatne***	414	16,36%	252	23,55%	159	22,21%
IV	***Przejazdy bez ważnego biletu***	32	1,26%	27	2,52%	15	2,09%
Łączna liczba przejazdów na danej linii z podziałem na rodzaj dnia		**2 530**	**100,00%**	**1 070**	**100,00%**	**716**	**100,00%**

A - strefa miejska, B - strefa miejsko-gminna, C - strefa gminna



Wykres nr 1 – Struktura przejazdów ogółem linii komunikacyjnej X z podziałem na rodzaj uprawnień



Wykres nr 2 – Struktura przejazdów ogółem linii komunikacyjnej X z podziałem na rodzaj dnia tygodnia

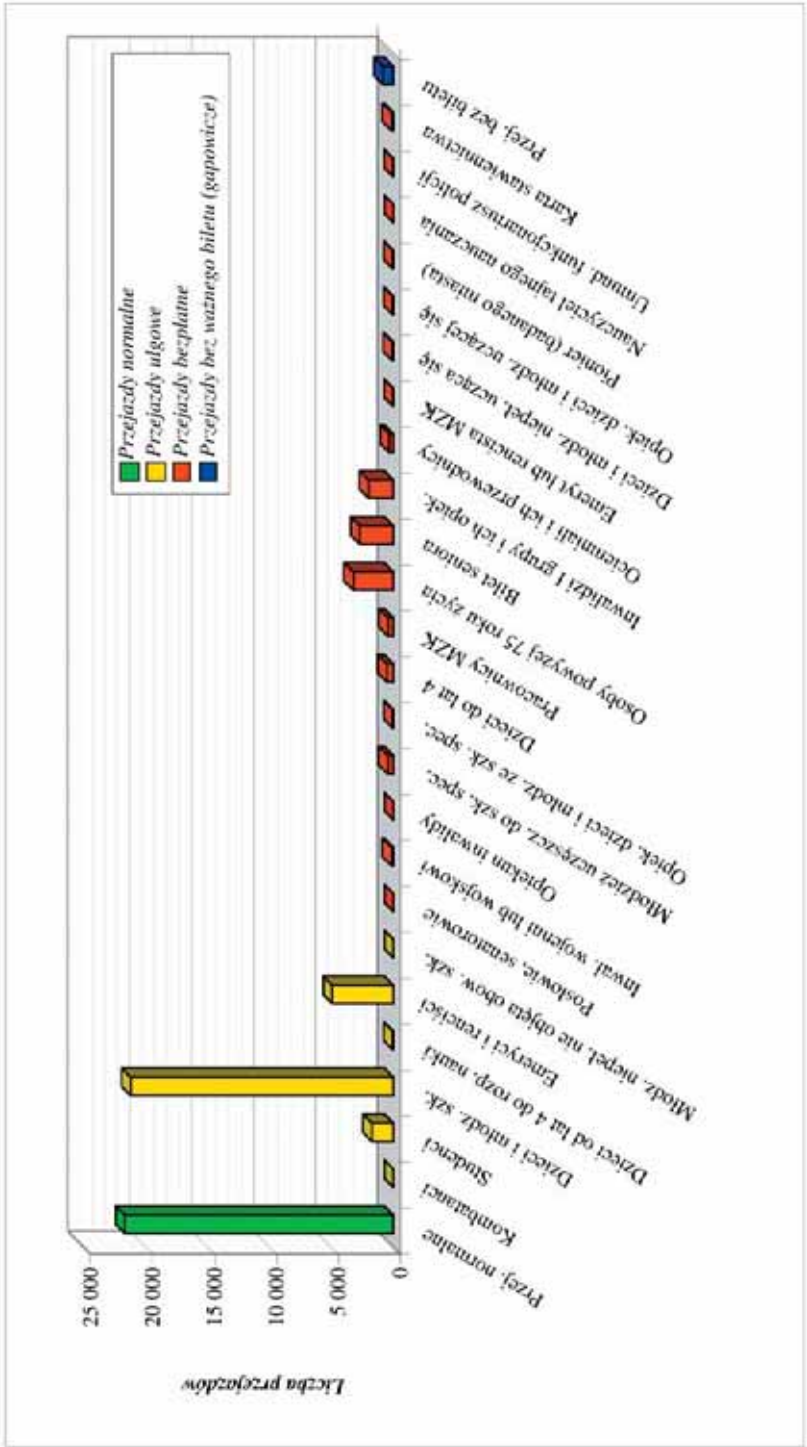
Etap 2. Oszacowanie wielkości i struktury przejazdów środkami komunikacji miejskiej

Na podstawie uzyskanych z badań danych dla poszczególnych linii komunikacyjnych dokonano oszacowania miesięcznej[11] wielkości przejazdów na tych liniach przy założeniu „typowego" okresu miesięcznego liczącego 21 dni roboczych, 4 soboty i 5 dni świątecznych. W efekcie uzyskano oszacowanie miesięcznej wielkości przejazdów według typów biletów (jednorazowy, miesięczny) rodzajów przejazdu (normalny, ulgowy, bezpłatny) i dodatkowo według uprawnień do przejazdów ulgowych i bezpłatnych dla poszczególnych linii komunikacyjnych. Wyniki takiego oszacowania zawiera tabela 2 i wykres 3.

Tabela nr 2 – Szacowana liczba przejazdów w ujęciu miesięcznym linii komunikacyjnej X

Wyszczególnienie	jednoraz.	autokomp.	miesięczne	okresowe	SMS	wieloprzej.	ilość przej.
Przejazdy normalne	**4 902**	**2 758**	**13 861**	**139**	**0**	**15**	**21 675**
Przejazdy ulgowe w tym	**8 567**	**2 658**	**16 611**	**81**	**0**	**46**	
Ustawowe w tym:	498	252	978	0	0	21	
Kombatanci	0	0	0	0	0	0	
Studenci szkół wyższych	498	252	978	0	0	21	
Lokalne w tym:	8 069	2 406	15 633	81	0	25	**27 963**
Dzieci i młodzież szkolna	5 671	1 943	13 515	60	0	4	
Dzieci od lat 4 do rozpoczęcia nauki	33	21	21	0	0	0	
Emeryci i renciści	2 365	442	2 097	21	0	21	
Dzieci i młodz. niepeł. nie objęta obowi. szk.	0	0	0	0	0	0	
Przejazdy bezpłatne	**10 497**						
Ustawowe w tym:	742						
Posłowie, senatorowie	0						
Inwalidzi wojenni lub wojskowi	164						
Opiek. towarz. inwal. wojenn. lub wojsk.	8						
Dzieci i młodz. uczęszcz. do szkół specj.	478						
Opiekunowie dzieci i młodz. ze szkół specj.	92						
Lokalne w tym:	9 755						
Dzieci do lat 4	554						
Pracownicy MZK	467						
Osoby powyżej 75 roku życia	3 260						**10 497**
Bilet seniora	2 723						
Inwalidzi I grupy	1 628						
Opiekunowie inwalidów I grupy	407						
Ociemniali	303						
Przewodnicy ociemiałych	62						
Emeryt lub rencista MZK	40						
Dzieci i młodzież niepeł. ucząca się	121						
Opiek. dzieci i młodzieży uczącej się	68						
Pionier (badanego miasta)	72						
Nauczyciel tajnego nauczania	0						
Umundurowany funkcjonariusz Policji	50						
Gapowicze	**855**						**855**
Razem przejazdy							**60 990**

11 Taki czasokres był sugerowany przez zleceniodawców badań z uwagi miesięczny cykl przekazywania rekompensaty (dotacji) przez samorządy.



Wykres nr 3 – Struktura przejazdów linii komunikacyjnej X wg rodzaju uprawnień w ujęciu miesięcznym

Sporządzone na tej podstawie zbiorcze zestawienie oszacowań wielkości przejazdów według:

a) linii komunikacyjnych,
b) rodzaju przejazdu (normalny, ulgowy, bezpłatny),
c) rodzaju dnia (roboczy, sobota, dzień świąteczny),
d) rodzaju uprawnień do przejazdów ulgowych i bezpłatnych,

pozwalają na określenie obciążenia zadaniami transportowymi tych linii oraz wstępną ocenę ich efektywności ekonomicznej. Analiza takiego ujęcia pozwala na:

a) ustalenie struktury wielkości przejazdów według linii komunikacyjnych,
b) wskazanie linii komunikacyjnych o szczególnie wysokim udziale przejazdów ulgowych i bezpłatnych (tj. linii wymagających wysokiego poziomu dotowania przejazdów),
c) określenie struktury przejazdów ulgowych i bezpłatnych według rodzajów uprawnień (analiza tej struktury może prowadzić do formułowania wniosków dotyczących ewentualnych zmian w zakresie tych uprawnień, np. podniesienie granicy wieku uprawniającego do przejazdów bezpłatnych).

Etap 3. Szacowanie wielkości rekompensaty w związku z utraconymi wpływami z tytułu przejazdów ulgowych i bezpłatnych na podstawie uprawnień lokalnych

Podstawę do ustalenia tych wielkości stanowią statystyki sprzedaży biletów jednorazowych bądź miesięcznych oraz oszacowania miesięcznej liczby przejazdów ulgowych i bezpłatnych na podstawie określonych uprawnień. W zestawieniach zawierających wyniki oszacowań utraconych wpływów akcentuje się głównie udział przejazdów ulgowych i bezpłatnych **na podstawie uprawnień lokalnych.** Przejazdy **na podstawie uprawnień ustawowych** stanowią bowiem niewielką część (w przeprowadzonych badaniach udział ten wynosił 2 - 9%) przejazdów ogółem.

Szacowanie utraconych wpływów z tytułu przejazdów na podstawie ulgowych biletów miesięcznych

Upraszczając można wyróżnić **dwa podstawowe rodzaje biletów miesięcznych ulgowych**: **bilety szkolne** (nabywane głównie przez dzieci i młodzież uczęszczającą do szkół podstawowych, gimnazjalnych i ponadgimnazjalnych dziennych i policealnych) **i socjalne** (nabywane głównie przez emerytów i rencistów). Z przeprowadzonych badań wynika wysoki ilościowy udział tego typu biletów miesięcznych w ich sprzedaży ogółem (wynosi przeciętnie około 75 – 80 %). Oznacza to, iż problem dopłaty do przejazdów na ich podstawie jak również struktura tej dopłaty według linii komunikacyjnych[12] i uprawnień to istotny element szacowania wielkości utraconych wpływów.

12 Jest to szczególnie istotne w przypadku linii komunikacyjnych obsługujących sąsiadujące gminy.

Ustalenie łącznej miesięcznej kwoty utraconych wpływów z tytułu przejazdów na podstawie ulgowych biletów miesięcznych nie stanowi większego problemu, bowiem statystyka sprzedaży tego typu biletów daje podstawę do określenia tej kwoty (jest ona równa iloczynowi liczby sprzedanych biletów i różnicy między ceną biletu normalnego i ulgowego). Problem stanowi jednak podział tej kwoty według linii komunikacyjnych (na ogół bilety te nie są „przypisane" do określonych linii) oraz uprawnień do przejazdów ulgowych.

Proponuje się wykorzystanie w tym celu uzyskanych w poprzednim etapie badań wyniki oszacowań w zakresie wielkości i struktury przejazdów na podstawie ulgowych biletów miesięcznych na poszczególnych liniach komunikacyjnych, a w szczególności ich uwzględniającej strukturę uprawnień. Oszacowane kwoty utraconych wpływów stanowić będą iloczyn oszacowanej liczby przejazdów ulgowych i ustalonej wielkości dopłaty do jednokrotnego przejazdu na podstawie ulgowego biletu miesięcznego[13]. Z uwagi na zróżnicowaną skalę przejazdów w poszczególnych dniach tygodnia dodatkowo ustalono strukturę tej kwoty w układzie: dzień roboczy, sobota, dzień świąteczny).

Szacowanie kwoty utraconych wpływów z tytułu przejazdów na podstawie jednorazowych biletów ulgowych

Z przeprowadzonych badań wynika, iż udział ilościowy jednorazowych biletów ulgowych w łącznej sprzedaży biletów jednorazowych wynosi ok. 60%, co oznacza, że również w tym przypadku problem utraconych wpływów z tytułu przejazdów na ich podstawie jest istotny. Zbiorcze zestawienia wielkości sprzedaży jednorazowych biletów ulgowych pozwalają jedynie na określenie **łącznej kwoty utraconych wpływów** jako iloczynu liczby sprzedanych biletów (np. w ciągu miesiąca) i różnicy w cenie biletu normalnego i ulgowego. Podobnie jak w przypadku biletów miesięcznych istotny jest podział tej kwoty według:

a) linii komunikacyjnych,
b) tytułów uprawniających do przejazdów ulgowych,
c) typu dnia tygodnia.

W celu dokonania podziału łącznej kwoty utraconych wpływów według powyższych kryteriów proponuje się wykorzystać wyniki oszacowań wielkości i struktury przejazdów z uwzględnieniem tych kryteriów.

Oszacowana **miesięczna** kwota utraconych wpływów z tytułu przejazdów na podstawie jednorazowych biletów ulgowych według linii komunikacyjnych i rodzaju uprawnień jak również dnia tygodnia ustalana jest jako iloczyn oszacowanej miesięcznej wielkości przejazdów i różnicy między ceną biletu normalnego i ulgowego.

13 przy szacowaniu utraconych wpływów z tytułu przejazdów na podstawie ulgowych biletów miesięcznych wzięto pod uwagę tylko różnicę między nominalną wartością miesięcznego biletu normalnego i odpowiedniego rodzaju miesięcznego biletu ulgowego. **Nie brano pod uwagę różnicy między łączną wartością przejazdów w okresie miesiąca na podstawie jednorazowych biletów normalnych a wartością miesięcznego biletu normalnego.** Jest to o tyle ważne, iż z samej istoty biletów miesięcznych są one w pewnym sensie biletami ulgowymi a przejazdy na ich podstawie są tańsze niż przejazdy na podstawie biletów jednorazowych, nie wspominając już o możliwości wielokrotnego korzystania z przejazdu w ciągu dnia.

Szacowanie kwoty utraconych wpływów z tytułu przejazdów bezpłatnych

Zasadniczy problem związany z oszacowaniem łącznej kwoty utraconych wpływów z tytułu przejazdów bezpłatnych jak również ich struktury według posiadanych uprawnień związany jest z brakiem podstawowych informacji. Przejazdy bezpłatne odbywają się zazwyczaj na podstawie wydawanych przez przewoźnika kart wolnego przejazdu. O ile znana jest liczba osób posiadających te karty, to niemożliwe jest ustalenie na tej podstawie liczby wykonywanych przejazdów (ta liczba jest w zasadzie nieograniczona). Badania ankietowe są więc w tym przypadku **jedynym** możliwym źródłem możliwości poznania skali tych przejazdów (przeprowadzone przez Autorów badania wskazywały na 20 – 30 % udział przejazdów bezpłatnych w łącznej ich liczbie).

Dokonane na podstawie badań ankietowych oszacowania wielkości i struktury przejazdów bezpłatnych według:

a) linii komunikacyjnych,
b) tytułów uprawnień do tego typu przejazdów,
c) rodzaju dnia tygodnia,

pozwalają na oszacowanie **kwoty (np. miesięcznej) utraconych wpływów** z tego tytułu jako iloczynu oszacowanej wielkości przejazdów i ceny biletu jednorazowego normalnego.

Na podstawie zaproponowanych procedur określania utraconych wpływów z tytułu przejazdów ulgowych i bezpłatnych dokonano oszacowania ich łącznej wielkości i struktury dla poszczególnych linii komunikacyjnych. Przykładowe zestawienie takich oszacowań zawierają tabele 3 i 4 oraz wykresy 4 i 5. Oszacowaną łączną kwotę utraconych wpływów można traktować jako wielkość przysługującej operatorowi rekompensaty z tytułu realizacji usług w zakresie publicznego transportu zbiorowego.

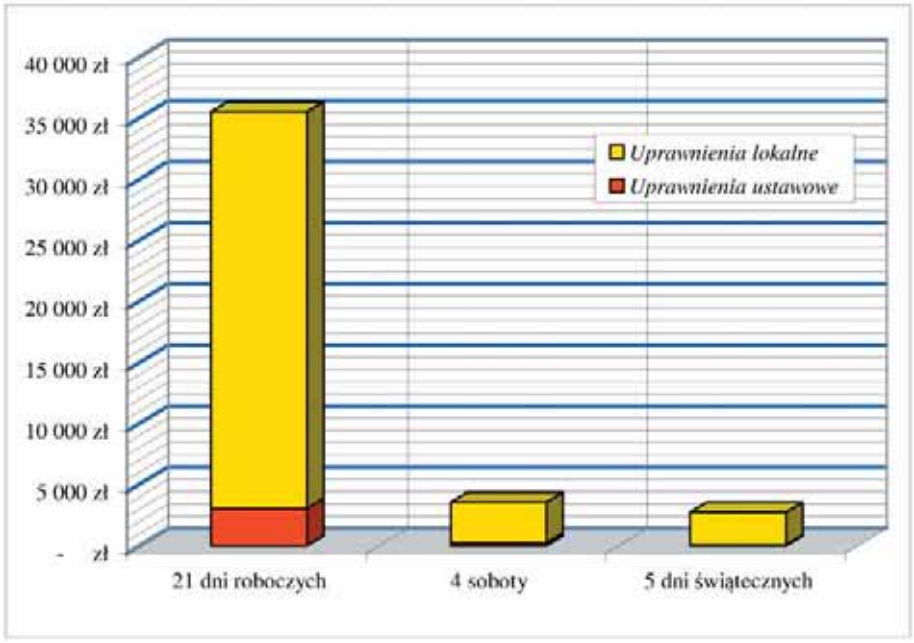
Tabela nr 3 – Utracone wpływy w rozbiciu na rodzaj dni tygodnia linii komunikacyjnej X

	Utracone wpływy z tytułu przejazdów bezpłatnych		*Utracone wpływy z tytułu przejazdów ulgowych*		*Wyszczególnienie*		*Razem ustawowe i lokalne*	*Udział %*
Rodzaj dni tygodnia	*Uprawnienia ustawowe*	*Uprawnienia lokalne*	*Uprawnienia ustawowe*	*Uprawnienia lokalne*	*Uprawnienia ustawowe*	*Uprawnienia lokalne*		
21 dni roboczych	1 774,50 zł	14 756,70 zł	1 294,93 zł	17 697,61 zł	3 069,43 zł	32 454,31 zł	**35 523,74 zł**	84,83
4 soboty	130,40 zł	2 180,80 zł	114,17 zł	1 156,75 zł	244,57 zł	3 337,55 zł	**3 582,12 zł**	8,55
5 dni świątecznych	10,50 zł	1 564,50 zł	65,50 zł	1 128,88 zł	76,00 zł	2 693,38 zł	**2 769,38 zł**	6,61

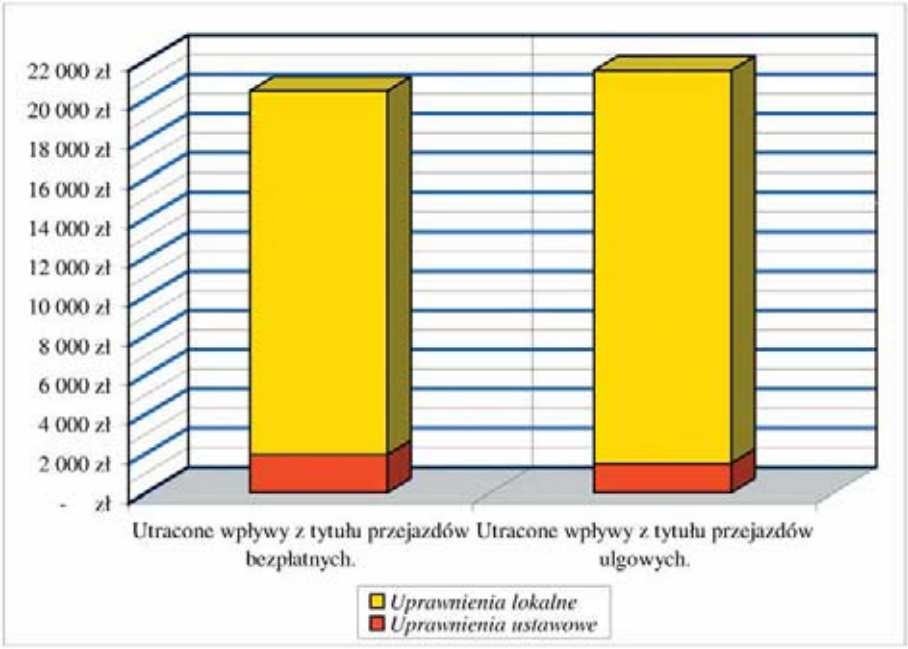
Tabela nr 4 – Utracone wpływy w skali miesiąca linii komunikacyjnej X

Zestawienie miesięczne
- 21 dni roboczych
- 4 soboty
- 5 dni świątecznych

Utracone wpływy z tytułu przejazdów bezpłatnych	*Uprawnienia ustawowe*	1 915,40 zł
	Uprawnienia lokalne	18 502,00 zł
Utracone wpływy z tytułu przejazdów ulgowych	*Uprawnienia ustawowe*	1 474,60 zł
	Uprawnienia lokalne	19 983,24 zł
Razem utracone wpływy z tytułu przejazdów ulgowych oraz bezpłatnych	*Uprawnienia ustawowe*	3 390,00 zł
	Uprawnienia lokalne	38 485,24 zł
	Razem ustawowe i lokalne	**41 875,24 zł**



Wykres nr 4 – Utracone wpływy linii komunikacyjnej X według dni tygodnia



Wykres nr 5 – Utracone upływy z tytułu przejazdów ulgowych oraz bezpłatnych linii komunikacyjnej X w ujęciu miesięcznym

Etap 4. Wnioski wynikające z przeprowadzonych badań

Z dotychczasowych doświadczeń wynika, że zaprezentowana procedura szacowania utraconych wpływów z tytułu przejazdów ulgowych i bezpłatnych pozwala z dużym przybliżeniem określać ich wielkość jak i strukturę. Wyniki wykonanych na zlecenie wielu przewoźników badań nie zostały w żadnym przypadku zakwestionowane i stanowiły doskonały materiał do negocjacji między organizatorami i operatorami publicznego transportu zbiorowego. Wyniki przeprowadzonych badań – poza podstawowym ich celem – umożliwiają również formułowanie wielu innych wniosków dotyczących funkcjonowania komunikacji zbiorowej. Na ich podstawie możliwe jest określenie poziomu „samofinansowania" (rentowności) poszczególnych linii komunikacyjnych i ewentualne formułowanie propozycji dotyczących zmian w funkcjonującej sieci połączeń komunikacyjnych. Uzyskane wyniki badań mogą także stanowić podstawę do korekty taryfy opłat za przejazdy środkami komunikacji miejskiej. Przeprowadzone badania dowodzą również, że funkcjonujące taryfy opłat jak sposoby dystrybucji biletów, a szczególnie wydawania uprawnień do przejazdów bezpłatnych nie dają podstaw do bieżącego śledzenia traconych wpływów z tytułu przejazdów ulgowych i bezpłatnych.

Bibliografia

[1] Błażków D., Struktura przejazdów i jej wpływ na ekonomiczną efektywność funkcjonowania Miejskiego Zakładu Komunikacyjnego w Jeleniej Górze (na podstawie przeprowadzonych badań ankietowych w miesiącu czerwcu 2004 r.), Jelenia Góra 2005.
[2] Bobowski Z., Błażków D., Błażków A., Struktura przejazdów i jej wpływ na ekonomiczną efektywność funkcjonowania Komunikacji Miejskiej w Nysie sp. z o.o., Nysa 2011.
[3] Bobowski Z., Błażków D., Chmielewski L., Szacowanie utraconych wpływów z tytułu przejazdów ulgowych i bezpłatnych oraz rentowności linii Miejskiego Zakładu Komunikacji w Bolesławcu. Bolesławiec 2003.
[4] Bobowski Z., Błażków D., Kulczycka R., Struktura przejazdów i jej wpływ na ekonomiczną efektywność funkcjonowania Komunikacji Miejskiej sp. z o.o. w Głogowie. Głogów 2004.
[5] Bobowski Z., Szacowanie utraconych wpływów MZK w Jeleniej Górze z tytułu ulgowych i bezpłatnych przejazdów pasażerów środkami komunikacji miejskiej. Jelenia Góra 1999.
[6] Ustawa z dnia 15 listopada 1984 r. – Prawo przewozowe. (Dz. U. z 2000 r. Nr 50, poz.601, z późn. zm.).
[7] Ustawa z dnia 16 grudnia 2010 r. o publicznym transporcie zbiorowym. (Dz. U. nr 5 z 2011 r.).
[8] Wawrzynek J., Wybrane metody opisu i wnioskowania statystycznego w biznesie. Skrypty Akademii Ekonomicznej we Wrocławiu. Wrocław 1995.

OPÓR PRZESTRZENI DLA ALTERNATYWNEJ REALIZACJI PODRÓŻY[1]

Ireneusz Celiński
mgr inż., Katedra Inżynierii Ruchu, Wydział Transportu, Politechnika Śląska, 40-019 Katowice, ul. Krasińskiego 8, tel. +48 32 603 4121, e-mail: ireneusz.celinski@polsl.pl

Grzegorz Sierpiński
dr inż., Katedra Inżynierii Ruchu, Wydział Transportu, Politechnika Śląska, 40-019 Katowice, ul. Krasińskiego 8, tel. (032) 603 4115, e-mail: grzegorz.sierpinski@polsl.pl

Streszczenie. *Artykuł prezentuje koncepcję opracowania funkcji oporu przestrzeni typu 3D dla potrzeb modelowania ruchu. W proponowanej metodyce uwzględniany jest wymiar pionowy przemieszczeń z jednoczesnym uwzględnieniem zmienności wartości tej funkcji w obszarze sieci drogowej. Prezentowany artykuł opracowano na podstawie kilkuletnich badań własnych autorów (w tym niepublikowanych głównie w przedmiocie przemieszczeń pionowych). Przedmiotem zainteresowania badań były preferencje mieszkańców w zakresie wariantów przemieszczania się w sieci miejskiej w stosunku do przemieszczeń wykonywanych w ramach podróży obligatoryjnych. W tym kontekście analizie poddane zostały opory przestrzeni dla zbadanych w ramach ankiet podróży rzeczywistych (obligatoryjnych) i ich odpowiedników substytucyjnych. Zamierzeniem wykonania ankiet było sprawdzenie jedynie pewnych ogólnych tendencji w poruszanych w artykule aspektach związanych z przemieszczeniami w sieci transportowej. Zdaniem autorów modelowanie procesów ruchu w gęstych sieciach transportowych wymaga stosowania innych niż dotychczas funkcji oporu, a przynajmniej modyfikacji oporów przestrzennych i wprowadzenia poprawek z uwagi na przemieszczenia wertykalne. Współcześnie w sieciach gęstych parametry przemieszczeń, możliwość wyboru substytucyjnych środków transportu, analiza przemieszczeń pionowych istotne różnią się, w tym statystycznie, od wykonywanych jeszcze dwie, trzy dekady wstecz. Zastosowanie właściwych funkcji oporu przestrzeni jest warunkiem konstrukcji zasadnych modeli ruchu. Ponadto istotne w modelowaniu procesów transportowych jest zestawianie konkurencyjnych modeli ruchu w oparciu o substytucyjne relacje podróży. Te relacje mogą znacząco różnić się w zakresie funkcji oporu przestrzeni. Prezentowana koncepcja została zilustrowana projekcjami funkcji oporu przestrzeni typu 3D (hipotetycznymi i rzeczywistymi). Jednym z efektów badań jest również opracowanie dotyczące sposobów postrzegania przestrzeni przez respondentów w kontekście realizowanych przez nich przemieszczeń rzeczywistych i substytucyjnych w sieci miejskiej. W podsumowaniu artykułu autorzy przedstawiają pewne kierunki rozwoju modeli ruchu, które implikowane są prezentowaną koncepcją.*

Słowa kluczowe*: modelowanie podróży, prognozowanie ruchu, opór 3D, wariancja funkcji oporu przestrzeni, przemieszczenia pionowe, postrzeganie czasu i odległości*

1 Wkład autorów w publikację: Celiński I, 50%, Sierpiński G. 50%

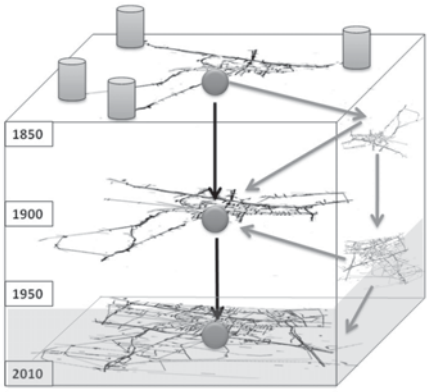
1. Wprowadzenie

Modele ruchu opisują przede wszystkim rozłożenie potoków ruchu w sieci transportowej przy określonym zapotrzebowaniu na podróże i przewozy [12]. Do słabych stron tych modeli można zaliczyć: statyczny opis stosowany do wyrażenia dynamicznych procesów, możliwość wystąpienia błędów statystycznych, możliwość założenia błędnych profil statystycznych stosowanych w trakcie gromadzenia danych, dyskretny opis stosowany dla ciągłych charakterystyk [6]. Niedostatki procesu modelowania ruchu należy eliminować w celu możliwie wiernego odwzorowania rzeczywistych procesów w ruchu. Stało się to możliwe wraz z rozwojem i upowszechnieniem nowoczesnych systemów telekomunikacyjnych i teleinformacyjnych.

W sieci transportowej wykonywane podróże można opisać z pomocą ustalenia parametrów rozkładu przestrzennego elementów generujących i absorbujących ruch. Współcześnie w sieciach transportowych obserwowane jest ponadto zwiększanie się mobilności i dynamiki ruchu, co ma istotny wpływ na rozkład generowanych podróży. Zdaniem autorów, ukonstytuowanym na podstawie badań własnych, prawdopodobnie bardziej istotne dla rozkładów potoków ruchu w sieci transportowej są parametry obszaru sieci transportowej w zakresie możliwości absorpcji ruchu [37]. Wynika to wprost z faktu, że rozkład absorbentów ruchu wykazuje większą dynamikę, aniżeli rozkład jego generatorów [16], [30]. Z technicznego punktu widzenia, elementy infrastruktury społecznej mają dłuższy cykl eksploatacji aniżeli elementy ekonomiczne. Zasadniczo, jeszcze do początku lat 90. XX wieku rozkład ten można było traktować jako statyczny w kilku, kilkunastoletnich horyzontach prognozy ruchu. Obecne procesy transformacji społeczno-gospodarczych, zmieniają w istotny sposób dynamikę rozkładu generatorów i absorbentów ruchu w przestrzeni fizycznej. Kwestia ta wymaga dodatkowych badań porównawczych z uwagi na rosnąca dynamikę tych zjawisk. Określenie parametrów generacji i absorpcji umożliwia zasadne „geograficzne rozłożenie" potoków ruchu w obszarze poddawanym analizie. Parametry generacji i absorpcji ruchu ustala się dla uprzednio wyłonionych, na drodze delimitacji obszaru analizy, reżimów przestrzennych tzw. rejonów komunikacyjnych. Nietrudno zauważyć, że w krótkim i średnim horyzoncie planowania dla modeli ruchu parametry te charakteryzują się niewielką wariancją. Generowany ruch rozkładany jest na sieć transportową, której elementy infrastruktury liniowej i punktowej są trwale zlokalizowane w przestrzeni. Zmienność w zakresie parametrów technicznych infrastruktury transportu jest znikoma w horyzoncie średnio- i krótkoterminowym. Dotyczy to nie tylko długości elementów liniowych infrastruktury, ale również sposobów organizacji i sterowania ruchem – głównie w jej elementach punktowych. Zmienność ta jest znikoma również w odniesieniu do ilostanu środków transportu zbiorowego, zwłaszcza wobec postępującej atrofii linii komunikacyjnych tych ostatnich (głównie połączeń kolejowych). Model ruchu budowany jest zwykle w oparciu o formy macierzowe opisujące charakterystyki ruchu w obszarze analizy. Macierze te buduje się dla różnych przekrojów analizy: sposobów prze-

mieszczania się, motywacji podróży, uczestników ruchu itp. Wymienione struktury określane są ponadto w układzie przestrzennym i czasowym. Warto zwrócić uwagę, że dane wejściowe dla modeli ruchu wyznaczane są dla stanu istniejącego lub dla zbioru stanów przyszłych – wartości prognozowane (uwzględniając możliwości rozbudowy i modernizacji sieci transportowej). Stan ten tylko pozornie jest rzeczywistym obrazem ruchu w zakresie zapotrzebowania na przemieszczenia w konkretnych relacjach dla określonej sieci transportowej. W praktyce jest on w pierwszym rzędzie wymuszony zdeterminowanym rozmieszczeniem infrastruktury społeczno-gospodarczej (ukształtowanym historycznie) oraz elementów infrastruktury liniowej i punktowej transportu (również ukształtowanym historycznie na bazie tej pierwszej). W sposób wtórny stan ten jest kształtowany poprzez ofertę transportu zbiorowego i okoliczności związane z realizacją przemieszczeń w transporcie indywidualnym (te z kolei wynikają w dużym stopniu z ograniczenia pierwszego – infrastrukturalnego). Do okoliczności tych należą również parametry makroekonomiczne takie jak ceny paliw, koniunktura na rynku itp. Punktem wyjścia dla modeli ruchu nie są zatem bezpośrednio rzeczywiste potrzeby transportowe, lecz pewne zachowania komunikacyjne, ukształtowane przez wszelkiego rodzaju zaszłości historyczne: pierwotne – infrastrukturalne i wtórne – organizacyjne oraz wiele innych czynników w tym głównie ekonomicznych. Kolejne warianty prognostyczne zestawianych modeli ruchu obejmujące plany inwestycyjne w zakresie infrastruktury transportu w oparciu o istniejącą bazę w tym zakresie są zatem w dużej mierze powtarzaniem (replikacją i multiplikacją) zaszłości historycznych, nie zaś dostosowaniem się do rzeczywistych potrzeb transportowych (choć z drugiej strony potrzeby te w pewnym stopniu pokrywają z istniejącym stanem sieci transportowej). Problemem jest odpowiedź na pytanie w jakim stopniu popyt jest równoważony z podażą w tym przedmiocie? odniesieniu do głównych elementów infrastruktury liniowej fakt tej niezgodności nie ma większego znaczenia w praktyce – istotne zmiany, możliwe do wykonania w tym zakresie są problematyczne z uwagi na niezbędne wysokie nakłady finansowe oraz inne, liczne ograniczenia związane z budową infrastruktury liniowej. Założyć należy, że bez względu na różnorodne czynniki w systemie transportowym, szkielet jego sieci musi pozostać bez większych zmian. Przy czym można wskazać pewne niereprezentatywne dla przedmiotu analizy przypadki (różna skala), w których takie zmiany, polegające na wyłączeniu dużych elementów liniowych infrastruktury ze szkieletu sieci transportowej zostały przeprowadzone (np. Route 66 w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej, program rozbudowy infrastruktury dla całego kraju) [20]. Nastąpiło w tym przypadku przeniesienie głównych w skali kraju potoków ruchu z jednego elementu infrastruktury liniowej na inny. Odniesione w tym przypadku korzyści nie są w żadnym wypadku jednoznaczne z punktu widzenia procesów i zjawisk społecznych. Dla przypadku zmian w organizacji ruchu i systemach sterowania na ograniczonym obszarze jest to możliwość o znaczeniu fundamentalnym (odtworzenie infrastruktury liniowej dla stanu potrzeb). Modele budowane w oparciu o stan istniejący historycznie posiadają ograniczenie w otwartości spojrzenia na problem, a modele, które mogłyby być budowane w oparciu o stan pożądany

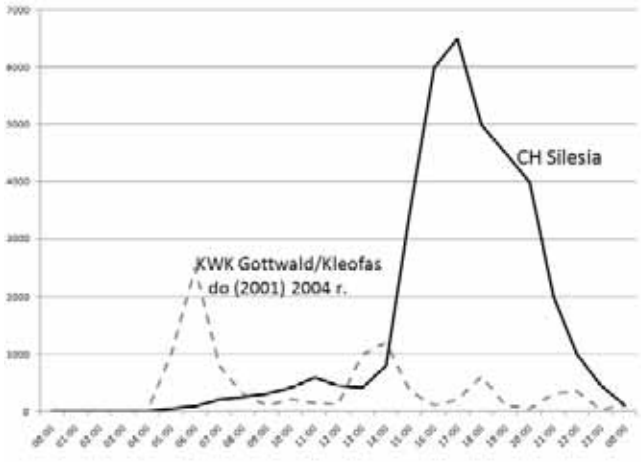
(dostosowujące się do postulowanych lub obserwowanych potrzeb użytkowników) mogą uzyskać większe ramy zastosowań. Ilustracje takiego podejścia do modelowania ruchu zaprezentowano na rysunku 1.



Rys. 1. Hipotetyczna historia modelu ruchu w oparciu o stan istniejący (rozwój klasyczny –linie w osi pionowej sześcianu) i pożądany (rozwój zgodny z potrzebami ludności – pozostałe linie)
Źródło: opracowanie własne

W przypadku prezentowanym na rys. 1 (sieć drogowa Katowic) głównym czynnikiem rozwoju sieci transportowej, determinującym jej kształt i strukturę, była lokalizacja miast sąsiednich (oznaczono je poprzez walce) oraz rozmieszczenie elementów infrastruktury społeczno-gospodarczej w połowie XIX wieku (głównie kilku kopalń i hut na terenie Katowic). Blisko punktów lokalizacji zakładów infrastruktury ekonomicznej powstawały węzły transportowe. W dalszym ciągu, mimo istotnej alokacji rozkładu przestrzennego generatorów i absorbentów ruchu na tym obszarze w ciągu blisko 200 lat, sieć transportowa Katowic działa w oparciu o wykształcony na początku XIX wieku podstawowy przestrzenny układ połączeń transportowych (określających główne kierunki jazdy). W okresie blisko 200 lat wielokrotnie zmieniła się więźba ruchu – w odniesieniu do szkieletu sieci, który nie uległ zasadniczym zmianom (poza wzrostem parametrów technicznych dróg) [16]. Barierą rozwoju przedmiotowego modelu jest struktura sieci drogowej wykształcona wg potrzeb historycznych XIX i XX wiecznych, a nie obecnych. Dotyczy to prawdopodobnie wszystkich sieci transportowych miast z tzw. dłuższą historią. Są tu wyjątki w odniesieniu do miast, gdzie całe założenie urbanistyczne było określane od podstaw (Tychy, Brasilia itp.). W przypadku rozwoju systemów transportowych w XIX i w pierwszych dekadach XX wieku rozwarstwienie modelu ruchu pomiędzy stanem istniejącym, a pożądanym było prawdopodobnie nieistotne (nie występowały w sieci drogowej istotne ograniczenia przepustowości, relacje charakteryzowały się krótszymi przemieszczeniami). Wiązało się to z licznym występowaniem osiedli przyzakładowych (zmniejszone potrzeby w zakresie przemieszczeń), braku odpowiednich środków transportu, mniejszą mobilnością itp. Ostatnie dekady XX wieku i początek XXI przyniosły jednak istotne zmiany.

Zmiany te wynikają głównie z przeobrażeń społeczno-gospodarczych, a związane są z istotną alokacją generatorów i absorbentów ruchu w przestrzeni miejskiej (sklep wielko powierzchniowy w inny sposób absorbuje ruch aniżeli zakład przemysłowy – wynika to chociażby z rozkładu potoków ruchu w czasie). Dla przykładu zlokalizowaną w centrum Katowic, zamkniętą już kopalnie węgla kamiennego zastąpiono jednym z większych w skali kraju centrów handlowych (86 000 m^2) [40]. Średnio na dobę centrum to odwiedza 36 000 klientów (zgodnie z informacjami właścicieli centrum [40]). Występują tu zasadniczo dwa problemy przy takiej zmianie zagospodarowania przedmiotowego terenu w odległości zaledwie 1,5 km od ścisłego centrum miasta. Zmianie ulega zarówno wolumen potoków ruchu w okolicy centrum, jak również ich rytm dobowy, tygodniowy, miesięczny i roczny. W stosunku do okresu, w którym funkcjonowała w tym miejscu kopalnia węgla kamiennego wolumen potoków ruchu wzrósł w ten sposób 5-6 krotnie (biorąc pod uwagę sam fakt zmiany, abstrahując od innych okoliczności: modernizacji dróg i węzłów w okolicy centrum). Zmianie uległ również rytm dobowy potoków ruchu związanych z tym miejscem w sieci drogowej. W przypadku kopalni były to w ciągu doby 4 okresy ruchu szczytowego skorelowane z dobowym i tygodniowym harmonogramem pracy kopalni (skorelowanym z 4 zmianowym systemem pracy). Co ciekawe szczyty te występowały albo przed albo w początkowym okresie typowych okresów szczytów komunikacyjnych. W przypadku centrum handlowego potoki ruchu, poza ich drastycznym wzrostem, zostały przeniesione zasadniczo na okres popołudniowy. Co więcej największe przyrosty przeniesione zostały na ruch weekendowy i przedświąteczny. Tego typu problemy wymagają prac badawczych związanych z wariacją oporów przestrzeni zarówno w czasie jak i w odniesieniu do obszaru. Na rys. 2 pokazano zasadniczą różnicę w analizowanym przypadku, inny absorbent umiejscowiony w tym samym punkcie sieci drogowej nie oznacza identycznego rozkładu potoków ruchu w czasie i przestrzeni.



Rys. 2. Wpływ zmiany absorbentu ruchu na jego wolumen.
Źródło: opracowanie własne

Na rysunku 2 przedstawiono ilustracje dla problemu lokalizacji absorbentów ruchu w przedmiotowej sieci drogowej. Istniejąca w latach do 2001 r. (2004 r.) kopalnia KWK Kleofas/Gottwald generowała zupełnie inny rozkład czasoprzestrzenny potoków ruchu. Wybudowane w tym miejscu CH Silesia (2005 r.) generuje zupełnie inne charakterystyki potoków ruchu. Na rysunku nie uwzględniono innych potoków ruchu związanych z CH Silesia (nowe osiedle mieszkaniowe, centrum biurowe itp.). Należy oczekiwać, że rozkład przestrzenny wolumenów ruchu generowanych w centrum handlowym, w odniesieniu do całej aglomeracji również daleko odbiega od tego generowanego w czasie funkcjonowania kopalni KWK Kleofas/Gottwald. Mówiąc kolokwialnie CH jest zupełnie inną „soczewką" skupiającą ruch aniżeli kopalnia węgla kamiennego.

W ostatnich latach ponadto systematycznie zmieniają się wartości wskaźników ruchliwości i motoryzacji. Alokacja atraktorów w sieci drogowej przy jednoczesnym zachowaniu szkieletu sieci transportowej wykształconego historycznie powoduje, że staje się on „sztywną ramą" kształtowania wymuszonych zachowań komunikacyjnych osób podróżujących, a więc zarazem tworzonych modeli ruchu. Zdaniem autorów, podstawowym problemem jest kwestia, w jaki sposób, przy możliwie najmniejszych nakładach skorelować stan pożądany sieci transportowej z istniejącą i nowo budowaną infrastrukturą transportu.

Nowoczesne technologie np. GPS (ang. Global Positioning System) czy GSM (ang. Global System for Mobile Communications) oraz powszechny dostęp do mediów elektronicznych wskazują na możliwość ustalenia pożądanych, a nie wymuszonych potrzeb w zakresie ruchu. Autorzy wielokrotnie omawiali zagadnienia zastosowania tych technologii, jako wsparcia dla celów optymalizacji pewnych zagadnień w systemach transportowych (np. [1], [10], [11], [32]).

Proponowana w artykule koncepcja umożliwia odmienne podejście do problematyki kształtowania systemów transportowych i zestawiania dla nich zasadnych modeli ruchu. W miejsce budowy modeli ruchu na tzw. stan istniejący – powinno dążyć się do zdefiniowania stanu pożądanego. Poprzez stan pożądany rozumieć należy rozkłady podróży, które realizowane byłyby, gdyby usunięto określone bariery: organizacyjne, techniczne, infrastrukturalne, ekonomiczne oraz inne w otoczeniu każdej osoby wykazującej potrzebę przemieszczania na wybranym obszarze. Zagadnienie to dotyczy problemu wykształcenia właściwego sprzężenia zwrotnego pomiędzy systemem transportowym, a społeczeństwem. Sprzężenie takie powinno być integralną częścią każdego rozbudowanego i zaawansowanego technicznie systemu ITS. Zdaniem autorów przedmiotowa koncepcja jest zasadna merytorycznie oraz może zostać zrealizowana w oparciu o powszechnie dostępne technologie istniejące i planowane w otoczeniu systemu transportowego.

W tej chwili zwraca uwagę brak postulowanego sprzężenia zwrotnego pomiędzy popytem społecznym w tym zakresie, a podażą w postaci sieci drogowej. W przypadku obserwowanych w ostatnich dwóch dekadach likwidacji linii transportu zbiorowego (nader częstych i dotyczących głownie transportu szynowego) mieszkańcy obszaru, który dotknięty zostaje takim działaniem przesiadają się na komunikację indywidualną. Jest to ekwiwalent ujemnego sprzężenia zwrotnego.

Proces przesiadania dotyczy na ogół zakupu starych i wyeksploatowanych technicznie pojazdów. Ponadto dalszemu zwiększeniu ulegają potoki ruchu obserwowane w sieci drogowej w i tak już nadmiernie obciążonych przekrojach. Jest tu wiele problemów, których poruszenie przekracza ramy tego artykułu. Zwrócić uwagę należy jeszcze na pełzający charakter likwidacji linii transportu zbiorowego, likwidacja w pierwszym etapie punktów obsługi podróżnych, zmniejszanie częstotliwości kursów, przenoszenie początkowych punktów obsługi w obszarze sieci (Katowice). Brak jest dodatniego sprzężenia z pomocą którego społeczeństwo mogło by wpływać na istniejący bieg rzeczy lub ludzie ci nie potrafią lub nie chcą wykorzystać potencjalne kanały oddziaływania na organy samorządowe i przewoźników działających w obszarze komunikacji zbiorowej. Jest to problem, który będzie z pewnością systematycznie narastał z uwagi na obserwowane tendencje w systemie transportowym Polski.

Różnica pomiędzy obrazem ruchu obserwowanym w praktyce (rzeczywistą więźbą ruchu), a ruchem, który mógłby być obserwowany w przypadku realizacji podaży w relacjach i na poziomie wolumenu zgłaszanym przez popyt jest z pewnością trudna do oszacowania. W aspekcie poruszanym w referacie dotyczy to tłumienia ruchu spowodowanego nie tylko zamknięciami i ograniczeniami ruchu w wyniku prac budowlanych i modernizacyjnych, czy inwestycyjnych, lecz przede wszystkim niedopasowaniem infrastruktury liniowej i punktowej do rzeczywistych potrzeb. W tym wypadku badania natężenia ruchu nie są w stanie określić nawet w przybliżeniu skali i poziomu problemu. Częściowe badania ankietowe również są w takim przypadku mocno przybliżone. Na różnice pomiędzy ruchem rzeczywistym, a pożądanym składają się zarówno wolumeny ruchu tłumionego jak również ruchu wzbudzanego [31]. Warto w tym kontekście zwrócić uwagę, że w większej skali modelowania np. regionalnego zachodzi zjawisko przenoszenia ruchu na inne sieci transportowe. Dobrym przykładem może być w tym aspekcie wzajemny układ lotnisk w Krakowie Balicach, Ostrawie i Pyrzowicach w korelacji z elementami istniejącej i planowanej sieci drogowej.

W artykule przedstawiono wątpliwości dotyczące konstruowanych modeli ruchu w aspekcie zachodzących zmian społeczno-gospodarczych. Szczególną uwagę zwrócono na sytuacje możliwych zmian w podziale modalnym ruchu poprzez zmiany zachowań komunikacyjnych poszczególnych osób podróżujących, które w danej chwili stanowiły próbę do budowy modelu. Następnie przedstawione zostały wyniki badań pilotażowych wykonanych w celu oceny zasadności stawianych w referacie tez. Artykuł zawiera także sugestie dotyczące istotności przemieszczeń wertykalnych w modelowaniu ruchu. Zaproponowano także wykorzystanie nowoczesnych technologii do badania potrzeb osób podróżujących. Wspólnym mianownikiem poszukiwań autorów w przedmiocie artykułu jest przestrzenny rozkład funkcji oporu, z uwzględnieniem przemieszczeń wertykalnych określony w tym kształcie jako opór typu 3D (trójwymiarowy). Problem poszukiwania optymalnych wariantów rozwiązań dla sieci transportowej (w różnych aspektach) z uwagi na zmiany popytu jest dostrzegany w środowisku. Budowane są modele kształtowania przedmiotowych zmian oraz definiowane są

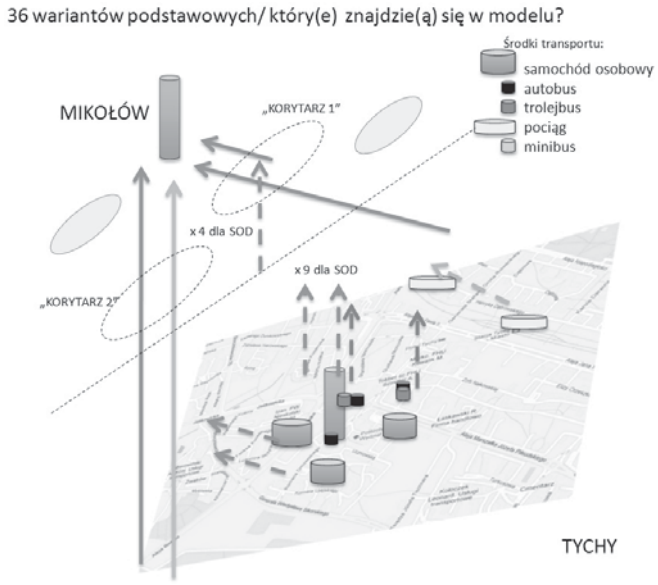
kryteria wyboru optymalnego wariantu sieci [2]. Prezentowany artykuł przedstawia zaledwie jeden aspekt takich analiz.

2. Konkurencyjne modele ruchu

Model ruchu stanu istniejącego realizowany jest na bazie danych dotyczących n-podróży generowanych i absorbowanych w pewnym obszarze analizy w ściśle określonym czasie obserwacji (model dla stanu istniejącego). Technika pobierania próby dla potrzeb budowy takiego modelu ruchu jest opisana szeroko w literaturze (np. [13, 15] i wiele innych). Zazwyczaj, w zależności od rozmiaru populacji obszaru analizowanego pod kątem budowy modelu ruchu stanu istniejącego pobierana jest próba rzędu $1\% \div 10\%$ populacji, czasem dla małych miejscowości zwiększana jest do 20% (istnieje korelacja, im mniejsza populacja tym większa próba). Na podstawie analizy podróży wykonanych przez n-respondentów ankiety budowany jest model ruchu (techniki budowy modelu są różne – popularny jest model czterostopniowy (ang. 4SM Four Step Model) [8], [15], [25]. Należy zauważyć, że analizowane dla stanu istniejącego podróże wykonane zostały w zaobserwowany sposób z uwagi na: istniejące rozwiązania w zakresie infrastruktury liniowej i punktowej transportu, ścisłe ramy w zakresie zarządzania, organizacji i sterowania w danej sieci transportowej, aktualne uwarunkowania ekonomiczne, parametry czasoprzestrzenne związane z motywacją podróży, warunki atmosferyczne itp. Można przyjąć, że każda z wymienionych indywidualnych n-podróży została wykonana w przestrzeni charakteryzującej się najmniejszym oporem ruchu w aspekcie wyżej wymienionych czynników zewnętrznych i wewnętrznych w systemie transportowym. Szczegółowej analizy wymagają wszystkie wymienione czynniki pod kątem możliwości wykonania przemieszczeń substytucyjnych (ew. substytucyjno-komplementarnych) w stosunku do tego, które stanowi (spośród n-elementowej próby) podstawę wykonania modeli ruchu dla stanu istniejącego. W szczególności należy zwrócić uwagę na bariery, jakie istnieją w zakresie możliwości wykonania podróży substytucyjnym środkiem transportu (różne sposoby przemieszczania).

W celu zademonstrowania istoty problemu zaprezentowano substytucyjne formy przemieszczenia się z jednego punktu znajdującego się w aglomeracji górnośląskiej do innego, oddalonego o 9 km (relacja: Tychy – Mikołów – Tychy).

Na rys. 3 przedstawiono możliwe sposoby przemieszczenia osoby z budynku publicznego zlokalizowanego w pewnym mieście w aglomeracji górnośląską-zagłębiowskiej do innego budynku zlokalizowanego w innym mieście oddalonym o 9 km. Obszar metropolii górnośląskiej stanowi przykład gęstej sieci transportowej, wynika stąd duża liczba wariantów realizacji przedmiotowego przemieszczenia.



Rys. 3. Model ruchu w oparciu o stan istniejący i pożądany – różnice dla możliwych relacji przemieszczenia

Źródło: opracowanie własne

Sposób realizacji podróży samochodem osobowym zależy od: sytuacji ruchowej na drogach pomiędzy miastami, dostępności przestrzeni parkingowej i obowiązującej taryfy na komercyjnych parkingach w otoczeniu źródła podróży, okresu doby, w którym podróż jest wykonywana itp. Podobnie dla innych środków transportu dostępnych w tym miejscu sieci: autobusu i trolejbusu wyróżnić można conajmniej 5 zasadnych sposobów realizacji przedmiotowego przemieszczenia, które w różny sposób obciążają sieć transportową miasta (lub obu miast). Kryterium wyboru sposobu przemieszczenia, w tym aspekcie, jest istniejący rozkład jazdy poszczególnych linii transportu zbiorowego i/oraz ramy czasowe wykonywanego przemieszczenia, obowiązująca taryfa przewozowa. W analizowanym przypadku, poza obszarem sieci transportowej miasta Tychy zasadniczo istnieją dwa „korytarze" transportowe w kierunku Mikołowa, którymi mogą zostać zrealizowane wymienione wyżej przemieszczenia (poza siecią miejską następuje redukcja wariantów przemieszczenia). Tym niemniej w ramach tych dwóch korytarzy podróż pomiędzy wymienionym źródłem i celem, może zostać w zasadny sposób zmieniona kolejno na 4 różne sposoby (w zależności od celów pośrednich np. jazda w systemie car pooling, zakupy po drodze, inne (dowolne) cele pośrednie). Zatem w prezentowanym przykładzie w odniesieniu do sieci miejskiej miasta Tychy wykonać można przedmiotową podróż w zasadny sposób na conajmniej 14 wariantów (dla SOD, samochód osobowy i dostawczy). Poza siecią transportową miasta Tychy sposoby te redukują się do około 4 możliwości (wariantów) realizacji przemieszczenia w rozpatrywanej relacji źródło-cel. Ogółem w analizowanym przypadku istnieje 36 kombinacji podstawo-

wych (można jeszcze wariantować dojścia i odejścia, co zwiększa liczbę wariantów). W tym kontekście zauważyć należy, że obecnie stosowane podejście do modelowania ruchu dla przykładowej sieci transportowej miasta Tychy obejmie rejestrację n-pojedynczych podróży wykonanych w określony sposób. Autorzy zwracają jednak uwagę na fakt, że dla omawianego przypadku (relacji podróży) będzie to minimum 1 z 14 możliwych, różnych relacji – w zależności od wylosowanego respondenta i wielu innych czynników losowych. Mniejsza próba reprezentatywna oznacza w tym przypadku mniejszą zdolności do wykrywania rzeczywistych sposób przemieszczeń mieszkańców. To z kolei implikuje wzrost prawdopodobieństwa budowy modelu stanu istniejącego oderwanego od rzeczywistych potrzeb transportowych ludności w danym obszarze. Wylosowany respondent implikuje czynniki losowe dla danej podróży. Każde z tych przemieszczeń trafia do „bazy danych" jednego modelu, choć może należeć (być bardziej reprezentatywne) dla innego modelu lub zbioru hipotetycznych modeli ruchu (w istocie konkurencyjnych w wielu aspektach). W rzeczywistości sposób realizacji przemieszczenia jest określony pewnym prawdopodobieństwem uzależnionym od czynników losowych, które można uporządkować w zbiorze danych w formie (kradzież lub zniszczenie samochodu, warunki atmosferyczne, dostępność miejsc parkingowych, czas realizacji podróży, cele pośrednie itp.):

$$p_1 \leq p_2 \leq p_3 \leq .....p_i \leq ...p_n \qquad (1)$$

gdzie:

p_i - prawdopodobieństwo odbycia podróży i-tym sposobem

Prezentowane wyżej prawdopodobieństwa są niczym innym, jak wyrazem niejednorodności czasoprzestrzennej w ruchu związanej z jego stochastycznym charakterem. Prawdopodobieństwa te oznaczają, że podróż wskazana w ankiecie, która może odbyć się z jednym z tych prawdopodobieństw tworzy (ściślej zbiór takich podróży) różne – odmienne i konkurencyjne modele ruchu: M_1, M_2,....M_i. W tym sensie interesującym rozwiązaniem może być tworzenie zbioru wariantowych modeli ruchu na bazie preselekcji zbiorów dla próby reprezentatywnej. W dalszych etapach do budowy modelu stanu istniejącego wykorzystywany będzie ten, który kalibracja spełnia najbardziej rygorystyczne kryteria. Dla przykładu rozpatrzono przypadek osoby poruszającej się w tej relacji samochodem osobowym. Jeśli w roku kalendarzowym budowy modelu podróż taka posłużyła do konstrukcji modelu ruchu – to w innych latach – przy zmianie środka transportu na np. autobus – ten przypadek statystyczny jest poza „obowiązującym" modelem ruchu, jeśli był to jedyny przypadek dla tej relacji zarejestrowany w próbie reprezentatywnej. Problemem jest w tym wypadku określenie, na ile zestawiony model ruchu jest „średnim" i reprezentatywnym dla całej populacji. Czy w ogóle można konstruować jeden model „średni" dla całego obszaru? Czy reprezentatywnym modelem będzie ten uwzględniający najwięcej prawdopodobnych podróży? Jest to ciekawy i szeroki temat – dyskusja aspektów statystycznych z nim związanych przekracza ramy

tego artykułu. Warte odnotowania w aspekcie budowy modelu stanu istniejącego jest to, że wykonywany on jest z reguły w oparciu o próbę losową. Stąd model taki jest wiarygodny w stopniu wprost proporcjonalnym do prawdopodobieństwa zaliczenia do próby reprezentatywnej podróży (dla poszczególnych respondentów), których wykonanie charakteryzuje się największym prawdopodobieństwem tj.:

$$SWM = \frac{\sum_{1}^{n} p_i^r / n}{\sum_{1}^{n} \max p_i / n} \qquad (2)$$

gdzie:
SWM – stopień wiarygodności modelu [0...1],
p_i p_i^r - prawdopodobieństwo odbycia podróży wylosowanej do próby (r- podróż wylosowana, max- podróż najczęściej wykonywana obecnie).
n – liczba respondentów w próbie „reprezentatywnej".

Kwestie wyrażone w (1) i (2) rozwiązuje w pewnym zakresie metodyka doboru respondentów do próby reprezentatywnej i sposób akwizycji danych na drodze zbierania ankiet – np. dobór losowy. Zdaniem autorów powinno stosować się techniki łączone poprzez wprowadzenie dla części próby doboru celowego. Preselekcja próby reprezentatywnej dotyczyć musi możliwie rozległego zbioru parametrów: motywacji, zmotoryzowania, ruchliwości itp. Ma to na celu uwzględnienie w próbie osób cechujących się zwiększonym wskaźnikiem ruchliwości (wybór w odpowiednich grupach aktywności zawodowej). Z drugiej strony w próbie tej powinny znaleźć się również w odpowiedniej proporcji podróże „nietypowe". Tym niemniej, moim zastosowania preselekcji zawsze powstanie błąd wynikający z różnicy pomiędzy prawdopodobieństwem wykonania podróży, która zarejestrowana została w badaniu ankietowym, a częstością podróży, która wykonywana jest w rzeczywistości w chwili powstania i funkcjonowania danego modelu ruchu. Do próby mogą trafiać osoby odbywające podróże w nietypowy sposób, które zostaną zaklasyfikowane jako reprezentatywne. Ten „błąd" zwiększa się wraz z czasem, wzrostem wskaźnika motoryzacji, wzrostem ruchliwości, likwidacją linii transportu zbiorowego, zmianami zachowań komunikacyjnych itp.:

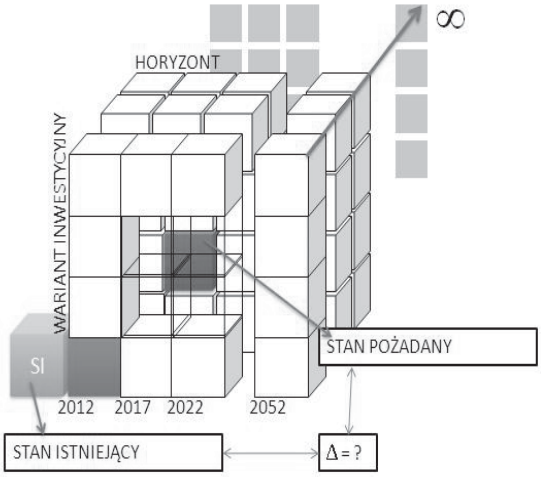
$$\delta = \sum_{1}^{n} (\max p_i - p_k) / n \qquad (3)$$

gdzie:
p_k - podróż wykonywana w rzeczywistości (częstość) w okresie w którym model „uruchomiono" i prawdopodobieństwo odpowiedniej podróży w próbie.

Problematyka ta jest znana konstruktorom modeli ruchu. Przyjęte w Niebieskiej Księdze tolerancje 10% i 20% umożliwiają zestawienie modeli ruchu zasad-

nych dla zebranych danych o przemieszczeniach. Każdy z wymienionych wyżej procentów dotyczy poziomu zaspokojenia popytu na przemieszczenie w danej sieci drogowej (szerzej transportowej) Błędów tej klasy jest kilka. Pierwszy jest różnicą pomiędzy prawdopodobieństwem podróży wykonanej a częstością podróży wykonywanej obligatoryjnie (wariantowanie podróży). Kolejny błąd wynika z różnicy pomiędzy charakterystyką podróży wykonywanych przez różnych respondentów. Błędy te można wyeliminować budując model stanu istniejącego poprzez doprecyzowanie parametrów podróży wykonywanych przez respondentów, jak również poprzez zadanie kilku pytań pomocniczych (prawdopodobnie najprostszy sposób), np. pytania typu "w jaki sposób zazwyczaj wykonuje Pan/Pani podróż". Ponadto błędy tego rodzaju można wyeliminować poprzez pytania o substytucyjne środki transportu i sposoby przemieszczanie się, które mogłyby być wykorzystane przy likwidacji określonych barier i ograniczeń w przyszłości (w otoczeniu respondenta – a ściślej miejsc, gdzie generowana jest i absorbowana jego podróż). Takie podróże substytucyjne są przedmiotem zainteresowania tego artykułu. Dotyczy to również podróży komplementarnych, gdzie do dotychczasowego łańcuch podróży dodawany jest nowy środek transportu. Problemem, który nie został poruszony w tym artykule, jest problem reprezentatywności respondentów dobieranych do próby. Problem ten bezpośrednio powiązany jest z prezentowanym przykładem dla miasta Tychy. Do próby mogą trafić podróże realizowane pomiędzy źródłem, a celem podróży w sposób specyficzny. Powoduje to, że w modelu ruchu eksponowane są relacje niereprezentatywne dla danego obrazu ruchu. W przypadku szkieletu sieci przy dużych próbach niewiele to zmienia, jednakże w pozostałych przypadkach może istotnie zniekształcać model ruchu. Problem ten jest i może być rozwiązywany na drodze zwiększania rozmiarów próby. Niestety z uwagi na ograniczenia finansowe i specyfikę badań ankietowych w praktyce takie zwiększanie rozmiarów próby jest mocno ograniczone. Dyskusja na ten temat przekracza ramy niniejszego artykułu [4, 5, 27].

Modele ruchu wykonywane są nie tylko dla stanu istniejącego (roku bazowego), lecz również dla określonych horyzontów prognozy. Horyzonty te zestawiane są dla określonych scenariuszy w zakresie trendów demograficznych, jak również w odniesieniu do realizowanych i planowanych inwestycji w infrastrukturze liniowej i punktowej transportu. W praktyce należy więc rozważyć nie tylko implikacje wynikające z modelu stanu istniejącego oraz jego horyzontów prognozy, lecz również pewną grupę modeli konkurencyjnych. Modele nazwane „konkurencyjnymi" uwzględniać powinny możliwości w zakresie przełamywania barier i ograniczeń pod kątem realizacji podróży źródło-cel z wykorzystaniem różnych sposobów realizacji podróży, zarówno substytucyjnych w odniesieniu do środka transportu jak również komplementarnych w odniesieniu do wprowadzenia do łańcucha przemieszczeń nowej mody. Przestrzeń rozwiązań modelowych sieci transportowych, w takim ujęciu, prezentuje rysunek 4.



Rys. 4. Przestrzeń modelowania ruchu w oparciu o stan istniejący, horyzonty prognozy i stany pożądane przez użytkowników systemu transportowego – różnice
Źródło: opracowanie własne

Na rysunku 4 przedstawiono stopnie swobody realizowane najczęściej dotychczas w modelowaniu ruchu. Dotyczy to wariantu inwestycyjnego oraz horyzontu prognozy, przy założeniu, ze stan istniejący jest jeden i jest to właściwa reprezentacja potrzeb przewozowych występujących w danej populacji. Jeśli przyjąć, że istnieje liczba k-możliwych odwzorowań stanu istniejącego (modeli konkurencyjnych, $k>>0$) to właściwą przestrzenią rozwiązań modeli ruchu nie jest graf płaski (węzły traktowane jako dopuszczalne realizacje modelu ruchu). Autorzy stawiają hipotezę, że aktualna dysfunkcjonalność w wielu płaszczyznach sieci transportowych jest wynikiem nie tylko ograniczenia przepustowości w stosunku do obserwowanych natężeń ruchu w wąskich gardłach. Sytuacja ta ma znacznie szerszy kontekst i dotyczy coraz większych i sukcesywnie zwiększających się różnic (paradoksalnie) pomiędzy stanem istniejącym sieci transportowej (w tym organizacji ruchu), a stanem pożądanym przez jej uczestników. Kolokwialnie można stwierdzić, że następuje sztuczne „nasycenie ruchem" tych odcinków, które uzyskują lepsze parametry ruchu. Dotyczy to również sztucznego nasycenia środków transportu określonego typu, zwłaszcza komunikacji indywidualnej. Działania w zakresie zrównoważenia rozwoju w odniesieniu do podziału modalnego są więc w tym przypadku nieadekwatne. Klient (sieci transportowej) korzysta z tego, co postrzega jako lepsze, a nie z tego, co lepszym jest w istocie (lub może być w przypadku zastosowania drobnych modyfikacji). Na rysunku 3 zwraca uwagę fakt, że przestrzeń, w której można konstruować modele ruchu, ograniczona jest do kilku wariantów w zakresie zmian inwestycyjnych w odniesieniu do sieci transportowej. Wynika to z faktu, że w modelowaniu ruchu uwzględnia się inwestycje o zasadniczym wpływie na sieć transportową. Zestawianie horyzontów w ten, czy w inny sposób, jest również ograniczone do kilku wariantów w zależności od interwału prognozy (często okres

ten wynosi 5 lat). Stan pożądany można wariantować w sposób „nieskończony", ponieważ możliwe jest wariantowanie dla każdego i-tego członka populacji (co oczywiście nie jest zasadne merytorycznie). Dla każdego członka populacji można wyróżnić kilka wariantów stanu pożądanego sieci transportowej w odróżnieniu do każdej motywacji podróży (np. relacja Tychy – 14 wariantów podróży, jeden realizowany, ale niekoniecznie pożądany). W praktycznej implementacji takiego podejścia wymagana będzie pewna agregacja charakterystyk oporu przestrzeni. Autorzy stawiają tezę, że istniejące technologie, takie jak GSM i GPS oraz szerzej rozwój systemów telekomunikacji i informatyki, umożliwiają w najbliższej przyszłości agregację możliwych wariantów prezentowanych na rysunku 3 w ramach jednego spójnego i zasadnego modelu ruchu. Z całą pewnością takie podejście umożliwi wprowadzenie rozwiązań legislacyjnych w przedmiocie obowiązku wyposażenia każdego pojazdu mechanicznego uczestniczącego w ruchu na drogach publicznych w jednostki typu OBU (ang. OnBoard Unit). Problem w tym, że nie nastąpi to wcześniej niż za kilkanaście lat, kiedy nowe pojazdy wyprą całkowicie z ruchu stare. Z punktu widzenia podejścia metodycznego działania w tym kierunku będą dotyczyć uśrednienia parametrów podróży na populacji (lub wartości zbliżonej do populacji), a nie na próbie losowej, jak ma to miejsce obecnie. Ponadto model taki może być prawdopodobnie najbliższy stanowi pożądanemu dla każdego mieszkańca (zawiera dane praktycznie wszystkich zachowań komunikacyjnych). Szersze omówienie tej problematyki przekracza ramy referatu.

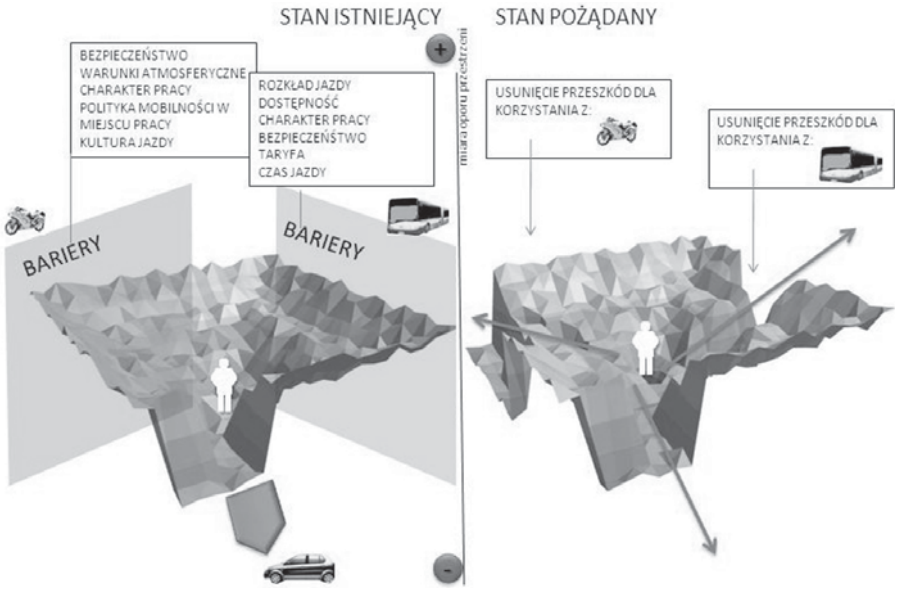
3. Opór przestrzeni typu 3D

W atrykule poruszany jest szeroki przekrój zagadnień stanowiących tło dla zasadniczego elementu, który spaja omawiane zagadnienia to jest funkcji oporu. Stosowane w praktyce techniki badań ruchu, czy też wyznaczania macierzy podróży, związane są częstokroć z koniecznością realizacji badań ankietowych. Niezależnie od tego profilowanie próby oraz dalsza budowa modeli ruchu wymagają znajomości wielu parametrów demograficznych, socjologicznych, a często nawet leżących na pograniczu psychologii zachowań społecznych w odniesieniu do populacji (czego dotychczas z reguły nie uwzględnia się, ankiety i badania ruchu stanowią i tak znaczący problem organizacyjny). Rozwój kognitywistyki w ostatnich latach winien mieć tu swoje zastosowanie. Dlaczego mówi się w przypadku wykonywania ankiet o badaniu zachowań komunikacyjnych? Wszak zbierane są konkretne, ścisłe informacje o przebiegach rzeczywistych podróży bez gruntownej analizy powodów wyboru dokonywanego przez osobę podróżującą. Już kilka dodatkowych pytań stosowanych w tych ankietach mogłoby uściślić ramy zachowań komunikacyjnych respondentów. W przedmiocie zagadnień poruszanych w referacie, autorzy przygotowali ankietę, która może być pomocna w szacowaniu zmienności funkcji oporu przestrzeni dla modeli ruchu stanu pożądanego. W ankiecie tej zadano respondentom pytanie nie tylko o podróż wykonaną w danym dniu, ale

również o jej alternatywne (jedna alternatywa wyłączająca dotychczasowy sposób realizacji podróży) akceptowane przez respondenta sposoby/możliwości (alternatywne w znaczeniu wyboru środka transportu, problem wyboru trasy podejmowany m. in. w [37, 38] nie był wyróżniony w ankiecie). Respondenci mieli za zadanie wskazać, co najwyżej dwa warianty realizacji wykonanej podróży. Pytano o podróże obligatoryjne – w motywacji dom-praca lub dom-nauka. Przeważająca większość przemieszczeń odbywających się w godzinach szczytu (zarówno porannego, jak i popołudniowego) to podróże związane z pracą i edukacją (wartość ta często przekracza 90% wszystkich przemieszczeń, np. w Warszawie 92,1% w szczycie porannym [3]). W przypadku, gdy respondenci nie byli skłonni do zmiany sposobu realizacji podróży podstawowej w ciągu doby, także zaznaczali ten fakt w ankiecie. Całość badania zrealizowana została przy założeniu, że w otoczeniu źródła podróży usunięte zostaną bariery w celu umożliwienia innego sposobu jej realizacji (1, 2 warianty podstawowe). W praktyce zdecydowana większość respondentów w próbie wybiera wyłącznie jeden wariant (85%) – badanie w tym aspekcie większej liczby wariantów jest zatem problematyczne. W tym aspekcie analizowana jest możliwość drobnych zmian w przestrzeni sieci transportowej w otoczeniu respondenta bez zmiany jej zasadniczego szkieletu (badana jest skłonność do zmiany środka transportu lub relacji podróży). W odróżnieniu od klasycznego podejścia w modelowaniu, gdzie zmienia się wariant w horyzontach prognozy na podstawie kluczowych inwestycji (kilku, kilkunastu, kilkudziesięciu, maksymalnie kilkuset), tu zakłada się „nieskończoną" liczbę drobnych zmian w otoczeniu generatorów i absorbentów ruchu (abstrahując od parametrów tej zmiany). Warto zauważyć, że zmiany takie przesuwają często nakłady finansowe poza bezpośrednie struktury systemu transportowego. W ankiecie tego typu uwzględnia się k-zmian (tu: 2), umożliwiających wykonanie podróży w inny sposób (wariant) dla n- członków analizowanej populacji. Zamiast modelować i konstruować nowe warianty modelu w oparciu o znaną liczbę przyszłych i obecnie realizowanych inwestycji zakłada się w prezentowanej koncepcji przejście do podejścia holistycznego (duża liczba drobnych zmian, ale dla wszystkich członków populacji). Zakłada się wystąpienie innych odmiennych efektów takiego podejścia rzutujących na parametry sieci transportowej. W tym ujęciu obszar sieci transportowej dla każdego respondenta modelowany jest za pomocą zmiennego w czasie rozkładu trójwymiarowej funkcji oporu (w formie trójwymiarowej funkcji gęstości), która uwzględnia możliwości wyboru różnych wariantów przemieszczania się jej użytkowników. Rozkład ten prezentuje funkcje oporu do najbliższego elementu sieci drogowej (szerzej transportowej). Jest to rozkład od punktu zakończenia/rozpoczęcia podróży. Złożenie tych funkcji cząstkowych stanowi obraz funkcji dla całej sieci. Zauważyć należy, że rozkład funkcji oporu na poszczególnych odcinkach drogi jest pochodną tego wyjściowego oporu przestrzeni. Praktycznie przy wykorzystaniu współczesnych środków technicznych, badanie takich alternatyw, jest możliwe dla każdego osobnika w populacji. Prawie każdy ma wszak aparat telefonii komórkowej lub jest w zasięgu systemu GPS (z wyłączeniem niektórych obszarów zabudowy) [22]. W Polsce w 2012 roku zanotowano około 47 mln czynnych kart SIM we wszystkich sieciach

GSM, przy populacji około 33-35 mln (kilka milionów stałych rezydentów przebywa permanentnie poza granicami kraju).

Funkcja oporu przestrzeni typu 3D wykazuje wartości malejące na drodze dojścia i odejścia do tych środków transportu, które są wykorzystywane obecnie lub mogą być stosowane w przypadku usunięcia drobnych barier. Hipotetyczny przykład takiej teoretycznej funkcji dla indywidualnego użytkownika sieci drogowej demonstruje rysunek 5. Funkcja ta jest oporem w kierunku elementów sieci drogowej w pobliżu miejsca zamieszkania/pracy/nauki respondenta.



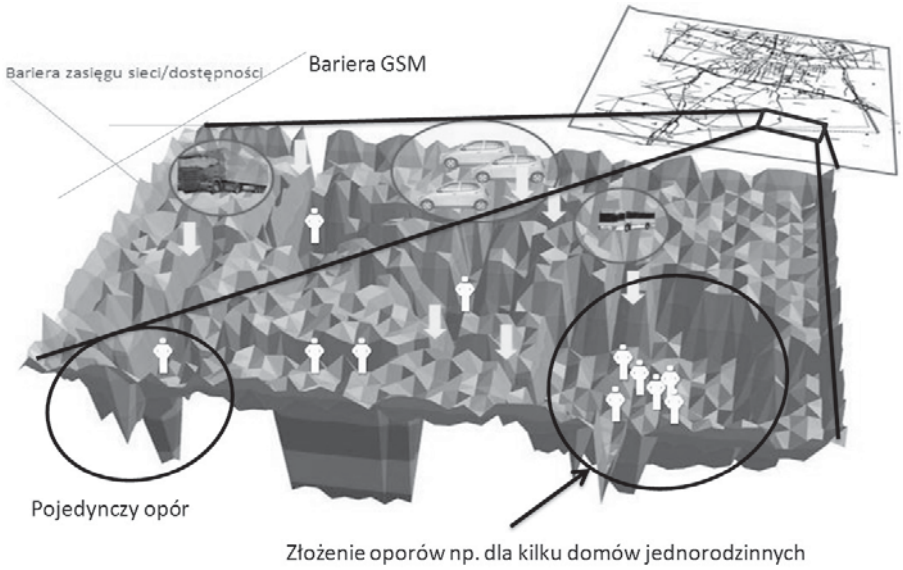
Rys. 5. Bariery na drodze osiągnięcia stanu pożądanego przez użytkowników systemu transportowego (rysunek po lewej) – drobne zmiany w otoczeniu generatorów jako droga w kierunku zrównoważenia transportu (rysunek po prawej)

Źródło: opracowanie własne

Rysunek 5 w tej formie uwzględnia fakt, że w najbliższym otoczeniu źródeł i celów podróży istnieją pewne korytarze charakteryzujące się mniejszym oporem przestrzeni w powiązaniu ze środkiem transportu, do którego „prowadzą". Zdaniem autorów profile prezentowanych funkcji oporu przestrzeni mogą być w pewnym zakresie kształtowane poprzez właściwą organizację ruchu oraz ingerencję w infrastrukturę społeczno-gospodarczej i techniczną transportu w ich otoczeniu.

Rysunek 5 prezentuje mały opór przestrzeni dla elementu badanej populacji w kierunku wybranych lokalizacji środków transportu. Mniejszy jest opór dojścia do parkingu pod domem do samochodu osobowego. Większy jest opór w kierunku dojścia do zlokalizowanego dalej przystanku komunikacji zbiorowej. Jeszcze większy dla dojścia odległej np. o 3 km stacji kolei. Takie wykresy konstruowane dla każdego członka populacji można następnie zagregować w postaci jednego wykresu wypadkowego dla określonego obszaru sieci drogowej (transportowej).

Mogą to być bardzo interesujące charakterystyki, które dotychczas nie były obiektem szczegółowych dociekań. Inny problem stanowi realizacja techniczna takich dociekań i realne korzyści, jakie można uzyskać na ich podstawie. Szeroko stosowane współcześnie technologie takie jak GSM czy GPS umożliwiają monitoring rejestracji przemieszczeń praktycznie w odniesieniu do całej populacji [26]. Jest to głównie kwestia organizacyjna i techniczna, jak zbudować system rejestrujący przemieszczenia poszczególnych (wszystkich posiadających telefon komórkowy) osobników w populacji. Stąd już tylko krok, po skorelowaniu tras podróży użytkowników sieci GSM, z siecią transportową, w kierunku wykreślenia rzeczywistej funkcji oporu przestrzeni 3D (z dokładnością do kilku, kilkunastu metrów, jako kombinacji osobniczych oporów przestrzeni w kierunku dojścia do środka transportu). Wykresy te mogą być rozszerzone poprzez uwzględnienie dodatkowych oporów przestrzeni związanych z wykorzystaniem określonego środka transportu i oporów odcinków sieci drogowej. Wykres taki może zostać sporządzony w odniesieniu do każdej koordynaty obszaru miejskiego, w której rejestrowane są terminale MS (telefony komórkowe), inaczej mówiąc dla każdego osobnika w populacji posługującego się terminalem komórkowym. Przykładowy hipotetyczny kształt funkcji oporu przestrzeni 3D dla większej liczby użytkowników sieci transportowej może wyglądać, tak jak przedstawiono to na rysunku 6.



Rys. 6. Obszarowy wykres funkcji oporu 3D – zbiorczo dla n-zlokaliowanych w danych koordynatach sieci terminali MS (wybrany moment czasowy)
Źródło: opracowanie własne

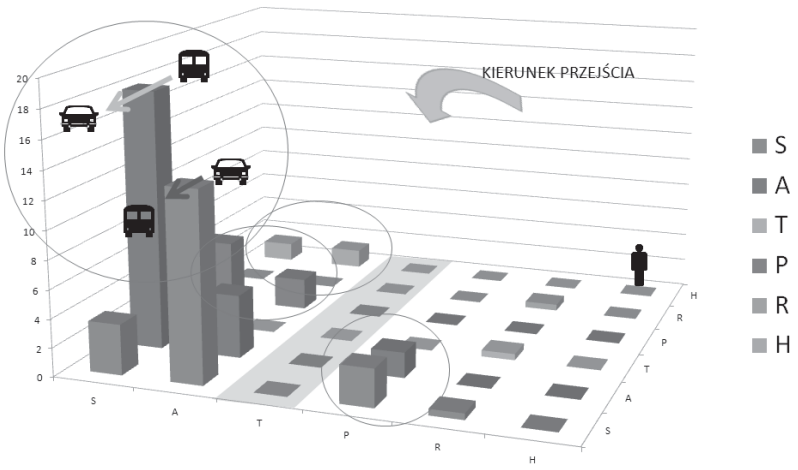
Na rysunku 6 przedstawiono płaszczyznę obszaru, którego mieszkańcy obsługiwani są przez pewną sieć transportową. Opór przestrzeni na rysunku 5 wyrażono wartością funkcji 3D w miejscu o określonych współrzędnych x, y (koordynata szerokości i długości). Należy oczekiwać, że prezentowany na rysunku 6 obraz trój-

wymiarowej funkcji oporu przestrzeni z uwzględnieniem wariantów przemieszczeń będzie formą wytłoczenia w płaszczyźnie obszaru analizy kombinacji charakterystyk danej sieci transportowej, sieci osadniczej, infrastruktury społecznej i ekonomicznej. Wysokość (wartość) funkcji 3D stanowi opór przestrzeni w każdym punkcie określony na bazie kombinacji danych (sieć infrastruktura, dane z sieci GSM, dane lokalizacji punktów obsługi komunikacji zbiorowej i inne). Podejście takie być może uniezależnia tworzenie modeli ruchu od delimitacji obszaru na rejony komunikacyjne. Skoro delimitacje sieci można wykonać dynamicznie z dokładnością do kilku metrów – to nie ma potrzeby tworzenia sztywnych rejonów komunikacyjnych w modelach ruchu (chyba, że dla celów statystycznych). W dalszej części artykułu pokazany zostanie schemat, jak w praktyce można, z technicznego punktu widzenia, uzyskać prezentowane na rysunku 6 wykresy. Ponadto w podejściu takim można korelować charakterystyki oporu przestrzeni z analogicznymi parametrami odcinków drogi, na które rozkładany jest ruch. Opory odcinków dróg są pewną wypadkową oporów przestrzeni, jakie notują w pobliżu miejsca swojego zamieszkania użytkownicy sieci drogowej. Odcinek obciążony zostaje w wyniku poruszania się osobników w populacji po zmniejszonych oporach w pobliżu swoich miejsc pracy zamieszkania. W praktyce prezentowany na rysunku 6 wykres oporu przestrzeni jest różny w odniesieniu do poszczególnych środków transportu.

W powyższym kontekście wykonano pilotażowe badania ankietowe, celem poznania zarysu preferencji osób przemieszczających się po wybranym terenie. Autorzy przebadali 250 respondentów w konurbacji górnośląsko-zagłębiowskiej pod kątem możliwości obserwacji zmian w charakterystykach funkcji oporu przestrzeni w zakresie odbywanych przez nich podróży obligatoryjnych. W próbie znalazły się osoby o różnej strukturze wiekowej, różnej strukturze osiedleńczej, różne grupy zawodowe itp. Wybrano podróże obligatoryjne jako te, które powinny podlegać/podlegają stosunkowo niewielkim fluktuacjom w przestrzeni i czasie. Należy oczekiwać, że w ramach podróży fakultatywnych zmienność funkcji oporu przestrzeni będzie znacząco większa. Mimo to, proponowana w artykule koncepcja ma znaczenie zarówno w przypadku podróży obligatoryjnych, jak i fakultatywnych. Na bazie ankiety pytano respondentów o możliwości i chęci wariantowania dotychczas realizowanych podróży obligatoryjnych w sieci transportowej analizowanego obszaru. Respondenci mogli wskazać maksymalnie dwa warianty realizacji dotychczas wykonywanego codziennego przemieszczenia obligatoryjnego. W trakcie przeprowadzania badań zwrócono respondentom uwagę, że zmiana sposobu podróży dotyczy „małych" z globalnego punktu widzenia inwestycji w sieci transportowej. Dotyczy to np. wybudowania parkingu bliżej domu, co oznacza skrócenie czasu dojścia do samochodu, zmiany lokalizacji przystanku autobusowego itd. Dotyczy to również planowanego zakupu samochodu przez respondenta, zapoczątkowanie „zdrowego trybu życia" (przejście na rower), skorzystanie z car-poolingu itp. W przypadku transportu zbiorowego przykładem może być ułatwienie dostępu do przystanku transportu zbiorowego (np. nowobudowana kładka dla pieszych) lub zwiększenie częstotliwości kursowania pojazdów transportu zbiorowego. Powód zmiany środka transportu nie był analizowany w ankiecie, a wyłącznie para-

metry czasoprzestrzenne takiego zachowania. Generalnie w ankiecie należało ująć wszystkie te zmiany, które w jakikolwiek sposób (losowy lub zdeterminowany) mogą skłonić respondentów (ich zdaniem) do zmiany dotychczasowych sposobów realizacji przemieszczań obligatoryjnych w sieci transportowej. Jeśli zmiany takie badać z pewną dokładnością wystarczy określać opory przestrzeni dla reprezentanta określonej grupy zamieszkującej określoną przestrzeń.

W pierwszym rzędzie należy określić, jaki procent respondentów jest w skłonny wariantować w ten sposób swoje podróże obligatoryjne. W tym celu w ankiecie jedną z możliwych opcji było zaznaczenie pola „nie zmienię w żadnym przypadku swojego dotychczasowego sposobu podróżowania". Liczba „konserwatywnych" respondentów wskazuje wprost jaka może być potencjalna wariancja funkcji oporu przestrzeni sieci transportowej w badanej próbie w aspekcie poruszanych problemów (tu podróże obligatoryjne). Konsekwentne korzystanie z tych samych środków transportu i dróg przemieszczenia bez chęci ich zmiany zadeklarowało 41,4% respondentów. Stwierdzenie „konserwatystów", miało charakter kategoryczny: „nigdy nie zmienię….". W badanej próbie istnieje więc 40% subpopulacja „konserwatystów" nie zainteresowana jakimikolwiek zmianami w dotychczasowych formach realizacji przemieszczeń obligatoryjnych. Jednakże blisko 60% respondentów zadeklarowało zainteresowanie i możliwość zmiany sposobu realizacji podróży obligatoryjnych. Co oznacza w praktyce podział populacji w stosunku 40/60 (konserwatyści/moderniści). Zdaniem autorów może to oznaczać, że różnice pomiędzy modelem stanu istniejącego i stanu pożądanego mogą dochodzić maksymalnie do 60% wolumenu w niektórych potokach ruchu. Trudno wyrokować na podstawie tak skromnej próby o szczegółowym rozkładzie cech w populacji, można mówić co najwyżej o pewnej tendencji. Warto również zaznaczyć, że konserwatyzm 40% populacji jest typowo koniunkturalny – zależny od wielu czynników niezależnych od nich samych (zatory drogowe, dostępność powierzchni parkingowej, ceny benzyny itp.). Trudno dywagować bez szczegółowych badań, w odniesieniu do każdego respondenta, jak ta różnica jest kształtowana w rzeczywistości. Każdy przypadek należałoby rozpatrywać indywidualnie (jest to możliwe z wykorzystaniem współczesnej techniki przy opracowaniu odpowiednich algorytmów). Osoby przywiązane do dotychczasowego sposobu realizacji podróży obligatoryjnej, a korzystające z samochodów osobowych stanowią 29,07% badanej próby, co stanowi 70,21% spośród „konserwatystów". „Konserwatywni" użytkownicy autobusów stanowią 7,48% w próbie, co przekłada się na 18,08% wśród konserwatystów. Na rysunku 7 przedstawiono wszystkie możliwości wariantowania „przejść" między środkami transportu w badanej próbie. Warto zauważyć, że wariantowanie to istotne jest w odniesieniu do parametrów sieci transportowej zwłaszcza w przypadkach krótkich przemieszczeń. W przypadku przemieszczeń na większe odległości warianty podróży sprowadzać się będą do pewnych ściśle określonych „korytarzy transportowych", co w pewien sposób ogranicza możliwości wyboru środka transportu. Tym samym przy małych możliwościach wyboru środka transportu maleje znaczenie tych lokalnych funkcji oporu przestrzeni typu 3D. Wzrasta rola oporów na odcinkach drogi.

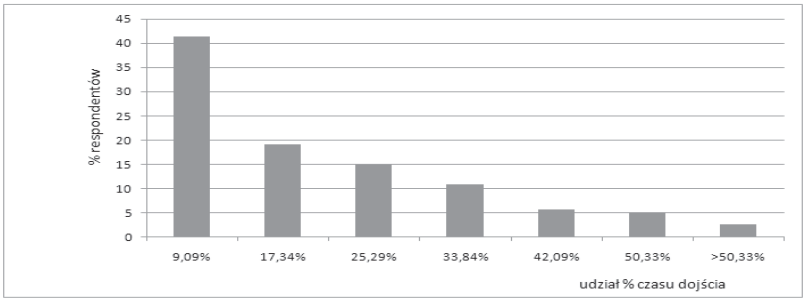


Rys. 7. Wariantowanie środków transportu – macierz przejść (S-samochód, A-autobus, T-tramwaj, P-pociąg, R-Rower, H-piesze)
Źródło: opracowanie własne

Rysunek 7 należy czytać w ten sposób, że wysokość słupka odpowiada deklarowanym zmianom [%] środka transportu (z jednego na drugi). Wybrane słupki opisano piktogramami reprezentującymi kierunek przejścia respondentów z jednego środka transportu na drugi (z prawej strony wykresu na lewo, tak jak pokazano to z pomocą strzałki na wykresie). Oś rzędnych wertykalnych odpowiada procentowi respondentów skłonnych do zmiany środka transportu przy wystąpieniu pewnych nowych okoliczności. Na rysunku 7 przedstawiono, jak rozkładają się możliwości przejścia pomiędzy poszczególnymi środkami transportu w badanej próbie. Rozkład ten nazwano macierzą przejść modalnych. Widać tu wyraźną dominację przejść z transportu zbiorowego do transportu indywidualnego nawet przy łamaniu barier (infrastrukturalnych i organizacyjnych) ograniczających dostęp do transportu zbiorowego. Każde przejście w takiej macierzy związane jest z pokonaniem określonej bariery w otoczeniu punktu generującego lub absorbującego ruch. Dla przykładu przejście S→S (z samochodu do samochodu (inny parking)) oznacza np. wybudowanie/udostępnienie parkingu bliżej celu lub źródła podróży (deklaracja 4% respondentów wśród badanej próby). Problemem na drodze zrównoważonego rozwoju transportu jest więc zasadne niwelowanie barier w dostępności do określonych środków transportu (zgodnie z wytycznymi Białej Księgi środków alternatywnych dla samochodu osobowego).

W artykule zwrócono szczególną uwagę na aspekt wymiaru pionowego przemieszczeń w sieci transportowej. Należy w tym kontekście spróbować określić, ile czasu zajmują przemieszczenia pionowe w odniesieniu do czasów związanych z jazdą w konkretnym środku transportu. W tym celu wykonano w oparciu o badania ankietowe analizy w odniesieniu do czasów dojścia do środka transportu. W przypadku zabudowy wysokościowej i wykreślaniu funkcji oporu przestrzeni

typu 3D dla grupy osób aspekt ten nabiera szczególnego znaczenia. Średni czas dojścia do wykorzystywanego w podróży obligatoryjnej środka transportu w analizowanej próbie wynoszący 5,29 minuty stanowi 20,2% średniego czasu podróży w analizowanej próbie w odniesieniu do czasu jazdy wybranym środkiem transportu. Uwzględniając łańcuchy łamane (z reguły na większe odległości) udział ten spada do 9,92%. Zarejestrowany najmniejszy udział czasu dojścia w analizowanej próbie do łącznego czasu podróży (bez przesiadek) wyniósł 0,85%. Największy udział czasu dojścia (pomijając podróże wyłącznie piesze) wyniósł 83,3% (kolejny 71,42%). Czasy te należy traktować z dużą ostrożnością z uwagi na powszechne błędy w szacowaniu czasu i odległości przez ludzi. Rozkład udziału czasu dojścia w analizowanej próbie przedstawiono na rysunku 8.



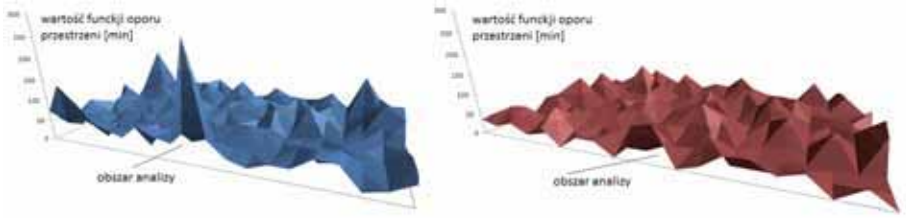
Rys. 8. Rozkład udziału czasu dojścia w czasie podróży
Źródło: opracowanie własne

Jeżeli za istotny udział czasu dojścia w czasie podróży uznać wartości przekraczające próg 33,84% to rysunek 8 wskazuje, że blisko 1/4 podróży w analizowanej próbie dotyczy takich zdarzeń (dokładnie: 24,35%). Czasy dojścia w tej właśnie grupie respondentów stanowić mogą o wyborze bądź nie alternatywnych środków transportu (kształcie wartości lokalnych wartości funkcji oporu przestrzeni typu 3D). Skrócenie czasu dojścia może być czynnikiem decydującym o zmianie środka transportu. W przypadku grupy użytkowników, dla których czasy dojścia są niskie, dotyczyło to transportu indywidualnego (którzy to użytkownicy, jak napisano wyżej, nie wykazują szczególnej skłonności do zmiany środka transportu). Kolejną kwestią do zbadania w przedmiocie analizy jest udział czasu przemieszczenia pionowego w czasie dojścia. Ten aspekt jest często pomijany przy modelowaniu ruchu. Wydaje się jednak, że może mieć istotne znaczenie zwłaszcza w obszarach wysokiej i średniej zabudowy miejskiej.

4. Opór przestrzeni w modelach substytucyjnych (konkurencyjnych)

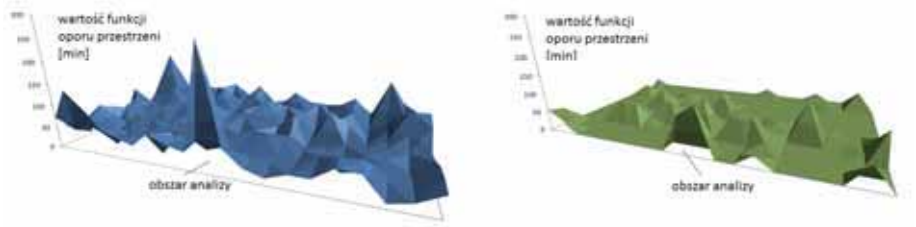
W przeprowadzonej ankiecie pytano respondentów o podróże substytucyjne (w przypadku realizacji innymi środkami transportu, inną drogą itp.) przy założeniu pokonania określonych barier w ich otoczeniu (w celu realizacji podróży

tym innym sposobem). Baza danych otrzymana na tej podstawie może stanowić w odniesieniu do populacji asumpt dla tworzenia tzw. modeli substytucyjnych ruchu. Jeżeli założyć, że model 4SM konstruowany jest na podstawie ostatnich podróży realizowanych w okresie poprzedzającym badanie można zdefiniować na bazie prowadzonej ankiety conajmniej trzy warianty modeli (podstawowy i dwa konkurencyjne). W przedmiotowej ankiecie pytano o conajmniej dwa warianty podróży, które mogłyby być zrealizowane w przypadku usunięcia obiektywnych i subiektywnych przeszkód w miejscu rozpoczęcia i zakończenia podróży. Pierwszą podróż innym środkiem transportu zadeklarowało 55,9% respondentów w próbie. Drugą zadeklarowało 14,97% respondentów w próbie. Sytuacja taka wynika z faktu, że realnie respondenci wybierają głównie pomiędzy podróżą samochodem osobowym, a autobusem. Rozkład wariantów podróży z analizowanej próby w stosunku do rzeczywiście odbywanych w pierwszym przypadku zaprezentowano na rysunku 9. W drugim przypadku (drugi wariant) rozkład wariantów podróży zaprezentowano na rysunku 10. Rysunki 9 i 10 skonstruowano w ten sposób, że skojarzono wariant podróży z odpowiadającym mu środkiem transportu i czasem dojścia w odniesieniu do „pierwotnego sposobu podróżowania". Respondentów rozmieszczono geograficznie w przestrzeni.



Rys. 9. Trójwymiarowy obraz oporu przestrzeni – pierwsza alternatywa podróży
Źródło: opracowanie własne

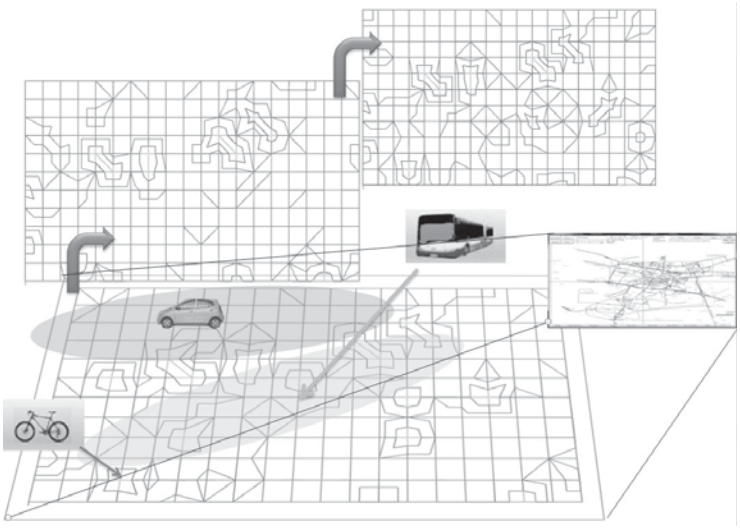
Na rysunku 9 zaprezentowano po lewej stronie opór przestrzeni wyrażony czasem podróży odniesionym do lokalizacji miejsca generacji podróży. Opór przestrzeni wyrażono czasem podróży (oś pionowa na rys. 9). Po prawej stronie zaprezentowano analogiczny wykres, ale wykreślony dla wariantu podróży z wykorzystaniem innego środka transportu. Podróż ta realizowana jest przy założeniu likwidacji pewnego ograniczenia w sieci transportowej w miejscu generacji lub absorpcji ruchu. Widoczne jest zdecydowanie spłaszczenie trójwymiarowej funkcji oporu przestrzeni, co odpowiada spadkom oporu przestrzeni w tym „modelu ruchu". Spłaszczenie to wynika czasami z rezygnacji z alternatywnego sposobu przemieszczenia się w zakresie podróży obligatoryjnej (zerowe wartości funkcji oporu na prawym rysunku).



Rys. 10. Trójwymiarowy obraz oporu przestrzeni – drugi wariant podróży
Źródło: opracowanie własne

Rysunek 10 przedstawia po prawej stronie wariant podróży z miejsca generacji z wykorzystaniem drugiego możliwego do wyboru środka transportu. Związane jest to z usunięciem kolejnej bariery stojącej na drodze realizacji podróży tym sposobem.

Na rysunku 11 zaprezentowano środki transportu, jakimi realizowano podróże z miejsc generacji ruchu w analizowanej próbie. Rysunek 11 przedstawia, w jaki sposób zmieniają się rozkłady przestrzenne wykorzystywanych środków transportu w obszarze pewnego układu miejskiego. Na rysunku 10 powierzchnie wielokątów o różnych obszarach i kształtach oznaczają dominujące wykorzystanie danego sposobu przemieszczania w określonej lokalizacji przestrzeni miejskiej. Rozkład prezentowany na rysunku 11 zależy od rozmiaru próby pobieranej z populacji. Na rysunku tym zaznaczono strzałkami (↱) przejścia do kolejnych rozkładów, które definiowane są poprzez wybór wariantów wykorzystywanych środków przemieszczenia.



Rys. 11. Sposoby przemieszczania dla analizowanych wariantów podróży
Źródło: opracowanie własne

Rysunek 11 ilustruje fakt, że w pierwszej wersji alternatywnej w przestrzeni miejskiej zaczyna dominować tendencja do korzystania z transportu indywidualnego. Dopiero wybór kolejnych wariantów przemieszczenia zdywersyfikuje rozkład modalny podróży w przestrzeni miejskiej (zwiększa się liczba możliwych wariantów podróży w przestrzeni miejskiej w odniesieniu do potencjalnych możliwości odbycia podróży). Wynika stąd, że dla zrównoważonego rozwoju transportu należy działać również lokalnie, poprzez drobne zmiany w przestrzeni miejskiej, a nie tylko globalnie.

Prezentowane na rysunku 11 mapy rozkładów przestrzennych wykorzystywanych środków transportu w powiązaniu z oporem przestrzeni mogą być asumptem dla celów realizacji zasadnej organizacji ruchu w transporcie zbiorowym i indywidualnym. Na rysunku 10 przedstawiono obszary (poprzez kontury), dla których opór przestrzeni jest mały w odniesieniu do konkretnego środka transportu (środek ten przedstawiono w postaci małego obrazu). Dotyczyć to może np. zmian w lokalizacji przystanków transportu zbiorowego, a zarazem przebiegu linii. Dotyczyć to może również drobnych udogodnień lokalnych w ruchu pieszym (nowe chodniki, kładki, lepsza informacja pasażerska). Szerzej problem dynamicznego korzystania z prezentowanych rozkładów poruszony zostanie przy omawianiu określania funkcji oporu z wykorzystaniem technologii GSM i GPS.

5. Wertykalna współrzędna funkcji oporu przestrzeni

Prezentowana w poprzednich podpunktach koncepcja tworzenia funkcji oporu przestrzeni typu 3D opierała się na założeniu możliwości wykreślenia jej wartości w dowolnym punkcie obszaru. Trudno oczekiwać budowy charakterystyk 3D dla pojedynczych osób, należy raczej myśleć o agregowaniu funkcjo oporu przestrzeni dla pewnych reżimów terytorialnych. W tym aspekcie szczególnego znaczenia nabiera identyfikacja rozkładu przemieszczeń wertykalnych w analizowanej próbie w odniesieniu do ich udziału w czasach dojścia i całkowitym czasie podróży. Jest to możliwe z wykorzystaniem zalet technologii GPS i GSM. Niezbędnym warunkiem jest objęcie analizowanego punktu zasięgiem tych technologii (w praktyce dla GSM i GPS dotyczy to obszaru wszystkich miast w Polsce). Wówczas w obszarze analizy muszą być rejestrowane relacje podróży abonentów wyposażonych w terminal MS, na bazie obserwacji których wykreślana jest funkcja oporu przestrzeni typu 3D. Omówienie szczegółowo metodyki wykreślenia funkcji oporu przekracza ramy tego artykułu. Zauważyć należy, że w najprostszej formie wymiarem *Z* (wertykalnym) tej funkcji jest bezpośrednio wartość funkcji oporu przestrzeni (czas przejazdu, odległość przejazdu). W praktyce jako wartość tą można uwzględnić również położenie respondenta (terminala MS) nad poziomem morza (lub gruntu) i w ten sposób zmodyfikować wartość funkcji oporu przestrzeni o kolejny parametr (doprecyzować). Czy takie działanie ma sens i jakiekolwiek znaczenie praktyczne? W miastach metropolii wschodniego wybrzeża Stanów

Zjednoczonych Ameryki Północnej (Waszyngton, Nowy Jork) były prowadzone badania na temat udziału przemieszczeń pionowych w funkcji oporu przestrzeni, głównie w zakresie dostępności do linii metra. W zabudowie śródmiejskiej (drapacze chmur) często wartość przemieszczenia pionowego jest istotnym składnikiem czasu przemieszczenia w sieci transportowej. Dotyczy to zejścia z określonej kondygnacji w budynku, często pokonania kilku dodatkowych kondygnacji do stacji metra itd. W praktyce w sieciach transportowych znajdujących się na obszarze niskiej i średniej zabudowy (przypadek rozpatrywany – metropolia górnośląska) czasy przemieszczenia pionowego prawdopodobnie nie powinny wpływać istotnie na wartości funkcji oporu przestrzeni. Tym niemniej taką tezę należy zweryfikować badaniami empirycznymi. Na rysunku 8 prezentowano udział czasu dojścia respondentów w analizowanej próbie w stosunku do całkowitego czasu przemieszczenia (tabela 1).

Tab. 1. Udział czasu dojścia w czasie podróży ogółem

Udział procentowy czasu przemieszczenia pionowego w ogólnym czasie dojścia Klasy	% respondentów w klasie
<0%÷9,09%)	41,45
<9,09%÷17,34%)	19,17
<17,34%÷25,29%)	15,02
<25,29%÷33,84%)	10,88
<33,84%÷42,09%)	5,69
<42,09%÷50,33%)	5,18
≥50,33%	2,59

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie danych zawartych w tablicy 1 zauważyć można, że czasy dojścia są istotnym składnikiem czasu podróży dla ok. 2,6% respondentów w badanej próbie (>50% czasu całkowitego podróży). Można postawić pytanie, jakie są w praktyce granice uciążliwości czasu dojścia pieszego do środka transportu? Czy wiązać je z wartościami bezwzględnymi czasu dojścia do parkingu lub przystanku transportu zbiorowego czy raczej z udziałem tego czasu w podróży ogółem? Czas ten dla 15% respondentów w próbie w dalszym ciągu stanowi ok. 25% całkowitego czasu podróży. Co więcej, zasadne może być pytanie, jak istotnym składnikiem czasu dojścia jest przemieszczenie pionowe. Autorzy zbadali w tym celu próbę respondentów zadając im pytanie o przemieszczenia pionowe związane z czasem dojścia do przystanku transportu zbiorowego lub parkingu. Ankieta zawierała następujące pytania:

1. Na którym piętrze budynku Pan/Pani mieszka?
2. Ile czasu zajmuje Panu/Pani opuszczenie budynku? [minuty]
3. Ile czasu zajmuje Panu/Pani dojście do najbliższego środka lokomocji? [minuty]

(bez czasu na opuszczenie budynku)
4. Ile czasu zajmuje Panu/Pani dojście do najczęściej wybieranego środka lokomocji? [min]
(bez czasu na opuszczenie budynku)
5. Czym Pan/Pani jedzie dalej?

Na podstawie wyników badanej próby można stwierdzić, że statystyczny mieszkaniec regionu przebywa w przemieszczeniu pionowym odległość z piętra 2 i 1 do poziomu gruntu (wysokość około: 7÷9 m.). Najczęściej respondenci zadeklarowali średni czas na wykonanie tego typu przemieszczenia (od drzwi mieszkania w poziomie korytarza i dalej w pionie klatką schodową do drzwi wyjściowych z budynku lub poza posesję) wynoszący 1,33 minuty. W próbie zarejestrowano najkrótszy czas przemieszczenia wynoszący 20 sekund i najdłuższy wynoszący 4 minuty. Czas skorelowany jest bezpośrednio z piętrem, z którego następuje wykonanie przemieszczenia oraz obecnością (lub brakiem) w średniej i wysokiej zabudowie windy (piętra 4-6, nie zarejestrowano przypadku respondenta mieszkającego powyżej 6 piętra). W badanej próbie udział czasu przemieszczenia pionowego w czasie dojścia do najbliższego środka lokomocji wynosi aż 45,68% i należy oczekiwać, że zależy głównie od charakteru zabudowy miejskiej w danej okolicy. Obserwowany jest więc w tym wypadku prawdopodobnie wpływ wysokiej i średniej zabudowy na opór przestrzeni. Udział czasu przemieszczenia pionowego waha się w granicach od 2 do 100% całego czasu dojścia do środka transportu. Dla najczęściej wybieranego środka transportu udział ten wynosi odpowiednio 49,43%. Zwrócić należy szczególną uwagę na fakt, że to właśnie dla komunikacji indywidualnej czas ten ma istotne znaczenie. Podsumowując dwa fakty: dla respondentów udział czasu dojścia jest istotny i wynosi 15% czasu podróży oraz fakt, że blisko połowa tego czasu to przemieszczenie pionowe – należy uznać, że czas ten powinien być analizowany w modelach ruchu na obszarach o dużej gęstości zabudowy i występującej w jej obszarze zabudowie średniej i wysokiej (tak jak rozpatrywany w tym przypadku obszar metropolii górnośląskiej- duże jego fragmenty). Dane powyższe w rozbiciu na różne sposoby przemieszczania wykorzystywane w trakcie realizacji dalszej podróży przedstawiają się następująco – dla samochodu osobowego udział przemieszczenia pionowego w czasie dojścia to 53,57%, dla autobusu 25,72%, dla tramwaju 26% i odpowiednio dla pociągu 30,25%. Oznacza to, że dla najpopularniejszego obecnie środka transportu udział czasu przemieszczeń pionowych jest istotny. Zwłaszcza w obliczu tendencji w kierunku zwiększania udziału w ruchu środków transportu indywidualnego. Jaka może być korzyść z uwzględniania w modelowaniu ruchu przemieszczeń pionowych – można zgrubnie oszacować w sposób następujący:

- 15% podróży charakteryzuje się istotnym czasem dojścia do środka transportu, którym realizowana jest podróż,
- z tego dla najpopularniejszego obecnie środka transportu ponad 50 % wartości czasu dojścia stanowią przemieszczenia pionowe,

– dla pozostałych sposobów przemieszczania od 30% do 25% czasu dojścia to przemieszczenia pionowe.

Zgrubnie można przypuszczać, że doprecyzowanie trójwymiarowej funkcji oporu przestrzeni o przemieszczenia pionowe (zwłaszcza przy wysokiej i średniej zabudowie) może zwiększać dokładność funkcji oporu przestrzeni o kilka procent. Być może te kilka procent wpływa w jakiejś mierze na spotykane w praktyce problemy z kalibracją modeli ruchu?

6. Wiarygodność danych uzyskanych z badań ankietowych zachowań komunikacyjnych

W ankiecie przygotowanej do przedmiotowego artykułu, podobnie jak w innych tego typu opracowaniach, miarami odniesienia w stosunku do wykonanej podróży jest droga i czas. Czas przemieszczenia wyrażono w przedmiotowej ankiecie w minutach natomiast odległość w metrach. W literaturze przedmiotu znane są problemy związane z postrzeganiem drogi i czasu przez ludzi [14, 33, 34]. Obydwie wielkości, a ściślej ich wartości są subiektywizowane przez uczestników wszelkiego rodzaju badań demoskopowych. Co więcej na odpowiedzi ma wpływ postać formułowanych pytań, np. inne odpowiedzi można uzyskać pytając respondenta o odległość w metrach, a inne gdy ma do wyboru konkretne obiekty [28].

W przedmiotowej ankiecie prowadzone badania nie dotyczyły postrzegania czasu ani odległości przemieszczenia, ponieważ nie obserwowano wspólnej odległości czy relacji przemieszczenia. Tym niemniej wyniki badań, w kontekście proponowanej koncepcji, skłaniają do przytoczenia kilku zasadniczych uwag w tej materii. Proponowana koncepcja w zamyśle ma na celu wprowadzenie badań przemieszczeń w oparciu o pomiar relacji podróży z wykorzystaniem technologii GSM i GPS. Technologie te obciążone są kilkoma mankamentami w tym zakresie. Pomiar przemieszczenia z wykorzystaniem GPS nie może być prowadzony wewnątrz zabudowy miejskiej – zanik sygnału poza otwartą przestrzenią. Z kolei pomiar z wykorzystaniem GSM, w tym wspomagany aGPS (ang. assisted GPS), obarczony jest pewną niedokładnością związaną z interpolacją danych pomiarowych i kalibracją sygnału. Tym niemniej metody te pozwalają na obiektywny pomiar czasu i odległości przemieszczenia ze stosunkowo stałym błędem adekwatnym do wybranej metody pomiaru. Niestety, jak wykazała przedmiotowa ankieta, nawet najgorsza metoda techniczna określania odległości i czasu przemieszczenia będzie zawsze lepsza od metody ankietowej.

Tab. 2. Czas dojścia

	Czas dojścia w minutach, klasy										
T[min]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Liczebność klasy n_i	5	67	26	24	2	45	0	7	4	0	23

Źródło: opracowanie własne.

Tablica 2 prezentuje dla przykładu czasy dojścia do miejsca lokalizacji środka transportu w rozbiciu na liczebności występujące w klasach 0, 1, 2 minut itd. Kilka wartości w tablicy 2 zwraca natychmiastową uwagę w zakresie wiarygodności przedmiotowych danych. Kilkakrotnie podano czas dojścia mniejszy niż 1 minuta, co natychmiast musi budzić sprzeciw (zwłaszcza w odniesieniu do zawartości ankiet dla czasów przemieszczeń pionowych). Kilka klas wartości czasów dojścia nie zostało obsadzonych lub charakteryzują się małą liczebnością – mimo, że sąsiadujące wartości zostały określone i mają stosunkowo dużą liczebność. Dotyczy to zwłaszcza czasu dojścia wynoszącego 4 minuty, gdzie sąsiednie przedziały są licznie reprezentowane w badanej próbie. Sytuacja taka może wynikać z przyczyn „poza transportowych" – pewne liczby są kojarzone przez respondentów szybciej od innych przy braku obiektywnego narzędzia pomiarowego. Jest to bardziej przyczynek do rozważań o charakterze kognitywistycznym niż modelowania w transporcie. Analogiczna sytuacja dotyczyła czasów dojścia wynoszących 6 i 9 minut. Jak zatem przedstawiała się sytuacja w stosunku do czasów dojścia w kierunku środków transportu wybieranych w dwóch wariantach?

Tablica 3. Czas dojścia (środki transportu dla dwóch wariantów)

	Czas dojścia w minutach- wariant 1 i 2/klasy minut										
Czas dojścia [min]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Liczebność w wariancie 1-szym $n_{i/1}$	8	43	19	8	4	10	0	4	1	1	10
Liczebność w wariancie 2-gim $n_{i/2}$	3	8	3	2	0	5	1	1	2	0	3

Źródło: opracowanie własne

Tablica 3 wskazuje na pewną prawidłowość albo w sposobie określania i postrzegania czasu przez respondentów albo podobieństwo w samej próbie + występowanie silnej autokorelacji danych wynikających ze wspólnych miejsc zamieszkania respondentów (choć to mniej prawdopodobne – przystanki różnych środków transportu nie zawsze zlokalizowane są w tym samym miejscu). Ponownie czasy dojścia wynoszące 4, 6 i 9 minut charakteryzują się zaniżoną reprezentatywnością w badanej próbie. Podobnie dziwi silna reprezentacja czasów dojścia poniżej jednej minuty. Problem ten, jak zaznaczono wcześniej, może istnieć wyłącznie w sferze postrzegania pewnych zjawisk i ich reprezentacji myślowej i werbalnej. Porównanie dla odległości dojścia zestawiono w tablicy 4.

Tablica 4. Odległość dojścia

	Odległość dojścia w metrach [m]														
S [m] / Liczebność w poszczególnych wariantach	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
n_0	107	26	22	14	17	4	4	9	6	11	1	1	1	0	8
$n_{i/1}$	76	11	10	4	6	3	2	3	2	5	1	2	0	0	3
$n_{i/2}$	33	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0

Źródło: opracowanie własne

W odniesieniu do zagadnienia określenia odległości przemieszczenia sytuacja jest tylko „nieco lepsza". Funkcja oporu przestrzeni jest w tym wypadku znacznie bardziej wygładzona, nie ma klas pustych i zdecydowanych maksimów w miejscach, gdzie funkcja powinna maleć. Tym niemniej i tu dostrzegane są pewne anomalie. Na przykład wartości odległości przemieszczenia w klasach o wartościach „okrągłych" (tu: dla 500 metrów, 1 km i 1,5 km) charakteryzują się zawyżoną liczebnością. Wynikać to może z naturalnej dla człowieka skłonności do zaokrąglania wartości przy braku precyzyjnego instrumentu dla pomiaru określonej wartości. Jednak i w tym przypadku (podobnie jak miało to miejsce dla czasów przemieszczeń) pewne klasy mają zaburzoną liczebność w stosunku do klas sąsiednich. Respondenci nie byli skłonni wskazywać liczb *4, 6, 7, 8, 9, 13, 14*. Widać w tych danych pewną prawidłowość. Kwestią wtórną pozostaje zbadanie tej prawidłowości w odniesieniu do rzeczywistych odległości i czasów realizowanych podróży. Odległości i czasy przemieszczenia respondentów środkami transportu nie były porównywane. Są to wartości związane z przemieszczaniem się, któremu towarzyszy utrudniony pomiar parametrów fizycznych ruchu. W związku z tym oczekiwać należy dalszego wzrostu procesu subiektywizowania parametrów podróży przez respondentów, abstrahując od wzrostu bądź nie błędu samego pomiaru danej wielkości. Generalnie jest to przyczynek dla realizacji badań na zupełnie innej płaszczyźnie.

Z uwagi na powyższe naturalnym w modelowaniu ruchu powinno być podejście proponowane w niniejszej koncepcji w oparciu o pomiar rzeczywistych parametrów przemieszczeń z wykorzystaniem technologii GSM i GPS. Poza znanym powszechnie faktem zaokrąglania przez respondentów wartości parametrów podróży autorzy zwracają uwagę na inne niekorzystne zjawisko. Polega ono na tendencji do wybierania pewnych charakterystycznych liczb i cyfr. Skłonność ta winna być przedmiotem odrębnych analiz o znacznie większym stopniu szczegółowości. Wybór ten bowiem ma podłoże nieobiektywne, związane z mentalnym (subiektywnym) postrzeganiem cyfr arabskich i skorelowanych z nimi liczb. Są tu pewne cyfry i liczby kulturowo postrzegane w konotacji negatywnej i z tego powodu niechętnie wskazywane przez respondentów. Jest to istotny czynnik podawania nieprawdziwych informacji występujący niezależnie od zaokrąglania rzeczywistych wartości parametrów przemieszczeń.

7. Określanie funkcji oporu z wykorzystaniem technologii GSM i GPS

W zagadnieniach modelowania ruchu funkcje oporu przestrzeni można odnosić albo w układzie między rejonowym (dla rejonów komunikacyjnych) albo w układzie odcinków sieci transportowych. Pierwszy przypadek można nazwać skojarzeniem oporu przestrzennie, drugi – relacyjnie. Pierwszy z nich można opisywać głównie na podstawie danych z badań ankietowych i innych realizacji technik statystycznych. Drugi przypadek można obliczać za pomocą różnorodnych metod

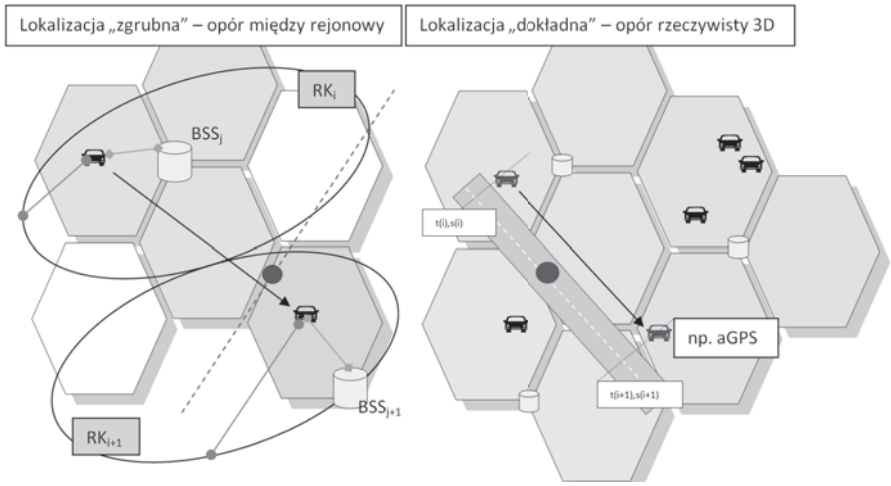
empirycznych (w tym również na podstawie badań ankietowych). Proponowana koncepcja jest pewną syntezą tych dwóch różnych metod. W proponowanym podejściu funkcja oporu przestrzeni jest bowiem zestawiana w dowolnym miejscu przestrzeni i w praktycznie dowolnym czasie (kwestia przepustowości systemów informacyjnych GSM). Badania funkcji oporu przestrzeni w doniesieniu do odcinków można realizować w sposób podobny, jednakże problematyczne jest w tym przypadku ujęcie dynamiczne tego problemu. Zastosowanie systemów GPS i GSM w tym celu jest więc nad wyraz zasadne. W systemach telekomunikacyjnych i nawigacyjnych: GPS i GSM istnieją różnorodne techniki obserwacji przemieszczania się abonentów wyposażonych w telefony komórkowe (terminale MS). Z uwagi na fakt, że elementy tej sieci skorelowane są z konkretnymi współrzędnymi geograficznymi można wiązać położenie elementów w zbiorach: sieć komórkowa – sieć transportowa. Dla celów wykreślania funkcji oporu przestrzeni w ujęciu odniesionym do parametrów rejonów komunikacyjnych wystarczy lokalizacja abonentów w sieci GSM wyłącznie z wykorzystaniem procedury lokalizacji zmiany stacji bazowej BSS przez abonenta. W przypadku konieczności dokładniejszego oszacowania funkcji oporu przestrzeni w wykorzystaniem sieci GSM konieczne będzie wykorzystanie dokładnych procedur lokalizacji udostępnianych w tej sieci (konieczność szybszego i precyzyjnego ustalania położenia terminala na krótkich odcinkach sieci drogowej w sieciach gęstych). Podstawowa metoda lokalizacji – aktualizacja położenia terminala MS (ang. Location Update Procedure) wynika wprost z zasady działania GSM. Po włączeniu, telefon komórkowy loguje się do stacji bazowej BSS (ang. Base Station System), która ma najsilniejszy sygnał radiowy w jego lokalizacji. Następnie, przy przemieszczaniu użytkownika (telefonu komórkowego) następuje także zmiana stacji bazowej, z którą w danym momencie MS jest połączony. W praktyce w zasięgu abonenta znajduje się 4 do 6 BSS (proces przełączania się ma charakter dynamiczny). Opisy wielu innych technik lokalizacji MS z dużą dokładnością (do kilku metrów) można znaleźć w literaturze (m .in. [18, 19, 21, 23, 24, 32, 35]). Metody wykorzystujące z systemu GPS (ang. Global Positioning System) umożliwiają lokalizację MS z dużą dokładnością (do kilku metrów). Przykłady takich technik to:

- metoda COO (ang. CELL of Origin), która umożliwia lokalizację MS z dokładnością do pojedynczej komórki (element struktury sieci GSM). Stąd precyzja wynika bezpośrednio z wielkości komórki, w której lokalizowany jest MS. Współcześnie obserwuje się tendencję do tworzenia coraz mniejszych komórek w sieciach metropolitalnych, co zwiększa dokładność tej metody;
- metoda COO CS (ang. COO with Cell Sector), wykorzystująca właściwość dzielenia komórek BTS na sektory. Zwykle każdy BTS obsługuje w ramach komórki trzy sektory. Zwiększa to dokładność metody;
- metoda COO CS RSS (ang. Cell of Origin with Cell Sector with Received Signal Strength), często nazywana metodą odcisków palców. Bazuje na zmienności mocy sygnału odbieranego w terminalu MS. Telefon komórkowy odbierając sygnał z kilku BTS realizuje połączenie z BTS o najsilniej-

szym w danej chwili sygnałem radiowym. Pomiar mocy tego sygnału (RSS) umożliwia dokładniejsze określenie lokalizacji terminala MS, ponieważ siła sygnału RSS ze stacji BTS zależy od odległości aparatu od nadajnika;
- metody triangulacyjne (korzystające z obecności kilku stacji BTS jednocześnie) lokalizują MS na podstawie odpowiedzi z trzech różnych BTS, np. metoda E-ODT (ang. enhanced observed time difference);
- metoda A-GPS (ang. Network Asisted GPS) jest wspomagana pozycjonowaniem sygnału MS również w technologii GPS. W takim wypadku ograniczeniem dokładności lokalizacji jest jedynie precyzja sygnału GPS dochodząca od kilku metrów do kilku centymetrów (w przypadku bliskości stacji naziemnej sygnału GPS tzw. stacji referencyjnej sygnału).

W teorii, zakładając wykorzystanie wszystkich możliwości technicznych systemów GSM i GPS można zlokalizować w przestrzeni obiekt o kubaturze 2 cm^3.

Ideę alternatywnych sposobów lokalizacji osoby w sieci transportowej, w oparciu o sieć telefonii komórkowej prezentuje rysunek 12.



Rys. 12. Graficzna ilustracja lokalizacji użytkowników MS siec GSM→sieć osadnicza w celu estymacji funkcji oporu rejonu/podróży
Źródło: opracowanie własne

Prezentowana na rysunku 12 po lewej stronie metoda umożliwia szybkie „kreślenie" funkcji oporu przestrzeni pomiędzy rejonami komunikacyjnymi w oparciu o zmiany stacji bazowych użytkowników poruszających się w sieci GSM. Jest to procedura stosunkowo mało precyzyjna. Istnieje tu problem korelacji istniejącej sieci komórkowej, jej delimitacji strukturalnej z odpowiednią delimitacją sieci transportowej na rejony komunikacyjne. Tym niemniej jest to metoda szybka (w sensie czasu trwania operacji przetwarzania danych) i dynamiczna. Praktycznie funkcja oporu przestrzeni może być w tym przypadku wykreślana co jedną sekundę. Dokładność metody będzie związana wprost z rozmiarami komórek sieci GSM

lub będzie wymagała delimitacji sieci transportowej bezpośrednio w oparciu o tą pierwszą. Na rysunku 11 po prawej stronie prezentowane jest podejście dokładne. W tym podejściu każdy użytkownik sieci GSM jest lokalizowany geograficznie z dokładnością do kilku, kilkunastu metrów. Niestety procedura ta wymaga zastosowania zaawansowanych procedur lokalizacyjnych. W przypadku dużej liczby pojazdów lokalizowanych jednocześnie (należy się z tym liczyć w sieciach gęstych) istniejąca infrastruktura sieci GSM nie zapewnia dostatecznej przepustowości łącz informacyjnych. Tym niemniej podejście takie umożliwia określenie w pewnym zakresie i z pewną dokładnością funkcji oporu przestrzeni dla każdego punktu x, y w przestrzeni fizycznej miasta (sieci transportowej). Można również próbować dobierać próby reprezentatywne w takiej sieci stosownie do przepustowości systemów informacyjnych w sieci GSM.

Kwestia poszukiwania z wykorzystaniem technologii GSM jakiegoś ekwiwalentu funkcji oporu przestrzeni typu 3D powinna być w kolejnym kroku skojarzona z postulowanym dążeniem do kształtowania sieci transportowej w postaci jak najbardziej zbliżonej do stanu pożądanego. Podstawą opracowania metodyki w tym przypadku jest więc porównanie dwóch trójwymiarowych funkcji gęstości. Warto podkreślić, że z zastosowaniem wykorzystania systemu GSM będzie wiązało się obserwowanie wartości funkcji oporu dla użytkowników również poza elementami infrastruktury liniowej i punktowej transportu. W dalszej kolejności procedura korygowania sieci transportowej na stan pożądany może dotyczyć np. budowania infrastruktury w miejscach o dużym oporze (=0), w których dotychczas ona nie występowała. Szersze omówienie problemu przekracza ramy tego referatu. Możliwości korelowania obrazów trójwymiarowych funkcji obrazujących infrastrukturę transportu i analogicznych funkcji obrazujących opór przestrzeni jest wiele. Kryterium może być różnica pomiędzy obserwowanymi wartościami:

$$\Delta^{bud} = f^{\inf}_{xyz} - f^{r}{}_{xyz} \quad dla \quad f^{r}_{xyz} \,/_{f^{\inf}_{xyz}=0} \neq 0 \tag{4}$$

$$\Delta^{\mathrm{mod}} = f^{\inf}_{xyz} - f^{r}{}_{xyz} \quad dla \quad f^{r}_{xyz} \,/_{f^{\inf}_{xyz}>0} \neq 0 \tag{5}$$

Równanie (4) określa kryteria budowy nowych elementów infrastruktury liniowej i punktowej transportu, z kolei równanie (5) określa warunki modernizacji istniejących elementów infrastruktury. W praktyce uśredniając wartości funkcji oporu w koordynatach *x,y,z,* należy oczekiwać, że wartości równe zero będą niezmiernie rzadkie (miejsca, w których absolutnie nikt nie bywa). Problem jest szeroki i wymaga określenia szeregu procedur szczegółowych, jak chociażby nadawania wag odpowiednim elementom infrastruktury w powiązaniu z istniejącą organizacja i sterowaniem w ruchu drogowym. Schemat postępowania może polegać na budowie w pierwszym rzędzie kilku trójwymiarowych funkcji oporu (warstw) opisujących infrastrukturę sieci transportowej. Wynika to chociażby z faktu, że w sieci mogą występować drogi dwupoziomowe. Może również wystę-

pować zmienna organizacja ruchu bądź sterowanie dla tych samych elementów infrastruktury transportu. Podobnie dla obszaru analizy zestawianych powinno być kilka warstw oporu na bazie pomiarów pojedynczych charakterystyk dla członków populacji bądź próby reprezentatywnej. Istota sprowadza się zawsze do korelacji mniejszej lub większej liczby takich warstw w zależności od rozwiązywanego problemu. Można oczekiwać, że proponowana koncepcja spowoduje „dryf" sieci infrastruktury w kierunku stanu pożądanego przez jej użytkowników.

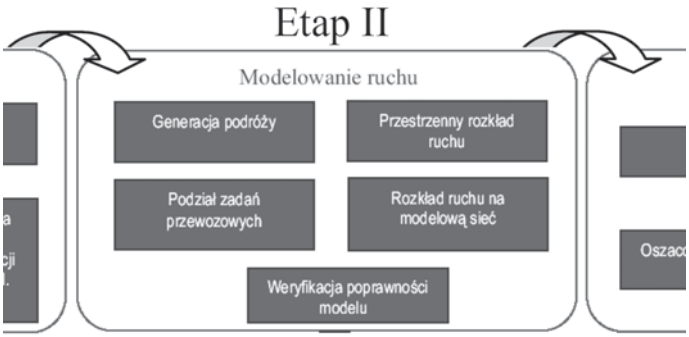
8. Wnioski i uwagi końcowe

W artykule zaprezentowana została wyłącznie pewna koncepcja opracowania funkcji oporu przestrzeni typu 3D z uwzględnieniem wymiaru pionowego przemieszczeń z jednoczesnym uwzględnieniem wariancji jej wartości w płaszczyźnie sieci drogowej (stan pożądany modelu ruchu). Przedstawione dane nie roszczą sobie charakteru badań statystycznych (próba z przyczyn obiektywnych jest bardzo mała). Zamiarem autorów było zweryfikowanie pewnych możliwych kierunków eksploracji obszarów badawczych w celu poszukiwania zasadnych modeli ruchu. Dotychczas poszukiwanie optymalnego modelu ruchu nie było możliwe z powodu braku technologii zdolnej do poszukiwania takiego rozwiązania w przestrzeni możliwych realizacji. Pojawienie się na rynku i upowszechnienie takich technologii, jak GSM i GPS, stwarza realne podstawy dla urzeczywistnienia tej koncepcji. Możliwość zbadania przemieszczeń praktycznie w odniesieniu do pojedynczych osobników całych populacji powoduje, że możliwe staje się wyznaczanie oporów przestrzeni trójwymiarowych z dokładnością do pojedynczych punktów obszaru analizy. Problemem jest wdrożenie techniczne takiej koncepcji w praktyce z uwagi na uwarunkowania infrastrukturalne sieci GSM. W przypadku pomyślnego wdrożenia takich metod badań funkcji oporu przestrzeni otwierają się nowe horyzonty w przedmiocie modelowania ruchu w sieciach transportowych. Wynika to z faktu, że metody te ze swej natury stanowią asumpt do konstrukcji dynamicznych modeli ruchu. Tylko takie modele mogą sprostać wzrastającej dynamice zmian w zakresie czynników społeczno-gospodarczych współczesnych społeczeństw.

Proponowana koncepcja sprowadza się do próby niwelowania różnic pomiędzy stanem pożądanym systemu transportowego, a jego stanem istniejącym. Z oczywistych względów granicą tych zmian jest podstawowy układ infrastruktury liniowej transportu. Czy jednak nie należy dokonywać również zmian w zakresie podstawowych liniowych elementów infrastruktury transportu? Tu być może ujawni swoje zalety podejście holistyczne proponowanej koncepcji. Oznacza to, że duża liczba drobnych zmian pozwoli uniknąć realizacji kosztownych inwestycji w podstawowe elementy infrastruktury liniowej. Jeśli tak się nie stanie, należy rozważyć na gruncie analiz ekonomicznych zasadność stosownych inwestycji liniowych. Dotychczasowe praktyki modelowania ruchu, mimo ich solidnych podstaw metodo-

logicznych, sprowadzać się będą do powstawania dalszego rozdźwięku pomiędzy tym, co jest, a tym, co mogłoby być nazywane dobrą infrastrukturą transportu.

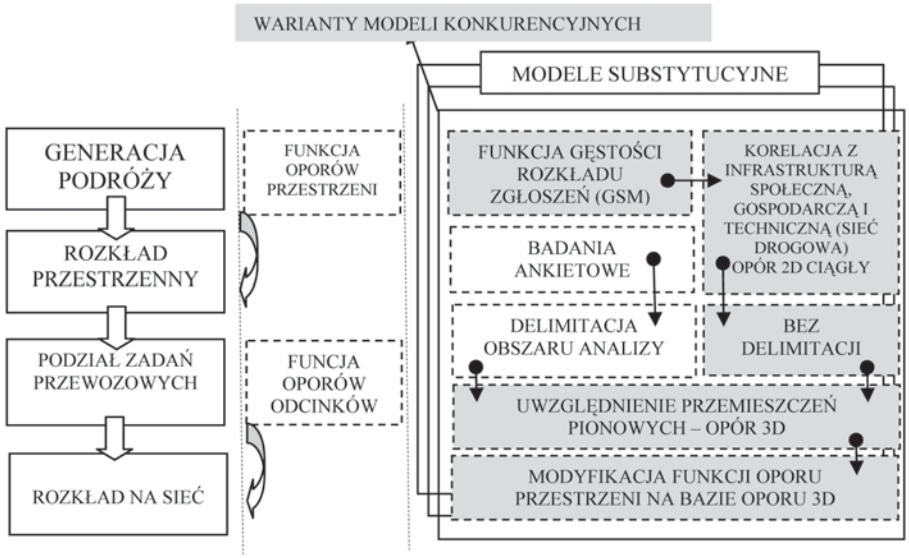
Jak proponowana metodyka, a w zasadzie pewne zmiany do już istniejącej wpływa na tok budowy modeli ruchu? Dotychczas stosowana metodyka zaprezentowana została za pracą [9] na rysunku 12 (przykład skonstruowany na bazie wytycznych Niebieskiej Księgi). Wyraźnie zwracają uwagę dwa bloki procesu modelowania ruchu: rozkład przestrzenny ruchu oraz rozkład ruchu na modelowaną sieć drogową (transportową). W rozkładach używa się odpowiednio funkcji oporów międzyrejonowych (przestrzenny rozkład ruchu na rys. 13) oraz oporów dla odcinków drogowych analizowanej sieci (rozkład ruchu na modelowaną sieć rys. 13). W aspekcie problemów omawianych w artykule należy proces ten zmodyfikować o elementy związane z określeniem funkcji oporu typu 3D (wariantowanej z uwagi na dobór do próby reprezentatywnej) oraz zmodyfikowane zgodnie z wartościami przemieszczeń wertykalnych w próbie.



Rys. 13. Proces modelowania ruchu
Źródło: Karoń G., Łazarz B. [9]

Omawiane w artykule zmiany dotyczą przestrzennego rozkładu ruchu. Na rysunku 14 przedstawiono schemat blokowy budowy modelu ruchu zmodyfikowany o postulowane elementy. Wprowadzono na etapie przestrzennego rozkładu ruchu wartości funkcji oporu 3D.

Postulowane zmiany umożliwiają uwzględnienie w modelowaniu ruchu rzeczywistej zmienności obszarowej w zakresie oporu przestrzennego. Uwzględniane dotychczas opory międzyrejonowe, zwłaszcza dla dużych powierzchni takich jednostek, nie oddają dobrze charakterystyk przemieszczeń w całej sieci drogowej (transportowej). W jednym rejonie komunikacyjnym mogą występować skrajnie odmienne charakterystyki oporów międzyrejonowych (rzeczywistych odniesionych do fizycznych punktów lokalizacji w sieci) dla tego samego rejonu docelowego podróży (mimo to charakteryzowane jedną wielkością). Dotychczasowa specyfika modelowania pomija przemieszczenia wertykalne, które jak pokazano, zwłaszcza dla gęstej sieci transportowej i dla transportu indywidualnego, mogą mieć istotne znaczenie.



Rys. 14. Postulowane zmiany w procesie modelowania ruchu
Źródło: opracowanie własne.

Kolejną kwestią jest podział zadań przewozowych, który może być uwzględniony na etapie budowy funkcji oporu 3D, a więc wprowadzony do rozkładu przestrzennego. Na wartości tego oporu w proponowanej metodyce wpływają wszak czasy dojścia i odejścia do konkretnych środków transportu. Jest to głównie problem techniczny dekompozycji przedmiotowych danych w oparciu o funkcjonalności sieci GSM. Z drugiej strony sama możliwość technicznej realizacji pozyskiwania dynamicznie danych ruchowych w sieci GSM sprawić może, że znane będą w czasie zbliżonym do rzeczywistego charakterystyki międzywęzłowe każdego odcinka w sieci, co sprawia, że jakiekolwiek modelowanie statyczne stanie się nieatrakcyjne z punktu widzenia jakości uzyskiwanych danych.

Zarządzanie mobilnością definiowane w ramach projektu konsorcjum EPOMM nakierowane jest głównie na wskazywanie środków zarządzania mobilnością (moduł Max Explorer) [7]. Działania takie sprowadzają się głównie do pragmatycznych aspektów realizacji stawianych w tym zakresie celów ogólnych i szczegółowych w odniesieniu do istniejącej podaży w sieci transportowej (głównie w bezpośrednim otoczeniu beneficjenta). Ewentualnie rozpatrywane są środki, których wdrożenie jest stosunkowo proste z punktu widzenia beneficjenta. W aspekcie artykułu w planach zarządzania mobilnością wskazać należy skuteczne środki tych działań przy jednoczesnym przekroczeniu horyzontów potrzeb i możliwości beneficjentów odpowiednich projektów celowych. W tym aspekcie zarządzanie mobilnością powinno dotyczyć sieci transportowej pojmowanej holistycznie nie tylko z punktu widzenia poszczególnych interesariuszy.

Bibliografia

[1] Bauer M., Klimontowska N., Wykorzystanie techniki GPS w badaniu zachowań pasażerów komunikacji zbiorowej. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji, zeszyt 153, Modelowanie podróży i prognozowanie ruchu, Kraków 2010, s. 9-22.
[2] Bauer M., Szałkowski M., Propozycje zmian układu linii transportu zbiorowego w Krakowie. Transport Miejski i Regionalny 9/2012.
[3] Brzeziński A., Zrównoważony rozwój systemów transportowych miast i aglomeracji w kontekście rosnącej mobilności. Transport Miejski i Regionalny 1/2011, s. 9-12.
[4] Celiński I, Sierpiński G., Absorpcyjno-desorpcyjny model ruchu w logistyce miejskiej. Logistyka – Nauka nr 3/2012, s. 267-275.
[5] Celiński I, Sierpiński G., Możliwości wykorzystania architektury systemów GSM w modelowaniu, planowaniu i obsłudze transportu publicznego i prywatnego w obszarach zurbanizowanych. Logistyka – Nauka nr 6/2011, s. 401-408.
[6] Celiński I., The use of travel impedance function in traffic flow modelling. [in:] Janecki R., Krawiec S., Sierpiński G. (Ed.): Contemporary transportation systems. Selected theoretical and practical problems. The transportation as the factor of the socio-economic development of the regions. Publishing House of Silesian University of Technology, Gliwice 2012, pp. 173-185.
[7] Faron A., Rudnicki A., Idea i narzędzia unijnego projektu MAX mającego na celu podniesienie świadomości potrzeby zarządzania mobilnością. TMiR 1/2010.
[8] Jastrzębski W. P., Funkcje oporu odcinka. V Konferencja Naukowo–Techniczna: Transport a rozwój zrównoważony. Poznań 17-19 maja 2005.
[9] Jastrzębski W., Marganiec M., Suchorzewski W., Modelowanie ruchu w wycinku sieci ulic przy zastosowaniu pakietu programów QRS, [w:] Tracz M. (red.): Modelowanie procesów ruchu. Zeszyt Naukowy Politechniki Krakowskiej, Kraków 1990.
[10] Karoń G., Łazarz B., Wybrane zagadnienia budowy modelu ruchu. Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Transport XXI wieku", Białowieża 21-24 września 2010.
[11] Kmieć B., Mokrzański M., GPS jako narzędzie monitorowania podróży w miastach. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji, zeszyt 153, Modelowanie podróży i prognozowanie ruchu, Kraków 2010, s. 129-146.
[12] Kucharski R., Metoda detekcji cellular floating data – możliwości i perspektywy. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji, zeszyt 148, Modelowanie podróży i prognozowanie ruchu, Kraków 2009, s. 143-153.

[13] Leszczyński J., Modelowanie systemów i procesów transportowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1994.
[14] Metoda budowy baz danych o drogowym ruchu miejskim. Poradnik metodyczny. Zeszyty Naukowo-Techniczne Oddziału Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie, seria: Monografie, nr 7 (zeszyt 80), Kraków 2000.
[15] National Household Travel Survey User's Guide. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, February 2011.
[16] Niebieska Księga. Sektor transportu publicznego. JASPERS. Nowe Wydanie, Wersja 1.0, wrzesień 2008.
[17] Praca naukowo-badawcza NB-67/RT5/2009: Karoń G., Janecki R., Sobota A., Celiński I., Krawiec S., Macioszek E., Pawlicki J., Sierpiński G., Zientara T., Żochowska R., Program inwestycyjny rozwoju trakcji szynowej na lata 2008÷2011. Analiza ruchu.
[18] Puławska S., Starowicz W., The estimation of the accessibility of public transportation systems of selected cities [in:] Janecki R., Krawiec S., Sierpiński G. (Ed.): Contemporary transportation systems. Selected theoretical and practical problems. The transportation as the factor of the socio-economic development of the regions. Publishing House of Silesian University of Technology, Gliwice 2012, pp. 115-130.
[19] Rashid O., Coulton P., Edwards R., Implementing Location Based Information/Advertising for Existing Mobile Phone Users in Indoor/Urban Environments. IEEE Proceedings of the 4th International Conference on Mobile Business (ICMB'05), Sydney, Australia, 2005, pp. 377-383.
[20] Richter U. et al., Location-based Services: Konkurrenz durch lizenzfreie Alternativen. VDE Kongress 2004, Berlin, Germany, 2004, pp. 65-70.
[21] Route 66 Dining & Lodging Guide – 15th Edition. National Historic Route 66 Federation 2011.
[22] Rutten B., van der Vlist M., de Wolff P., GSM as the source for traffic information. European Transport Conference 2004.
[23] Rynek komórkowy po II kw. 2010. www.telix.pl (odsłona 18.05.2012).
[24] Samsioe J.; Samsioe A., Competitor Analysis in the Location Based Service Industra. IEEE-Proceedings of First International Conference on Mobile Business (ICMB'02), Athens, Greece, 2002.
[25] Schiller J.; Voisard A., Location-based services. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, USA, 2004.
[26] Shvetsov V.I., Mathematical Modeling of Traffic Flow; Automation and Remote Control, Vol.64, No.11, 2003.
[27] Sierpiński G., Celiński I., Use of GSM Technology as the Support to Manage the Modal Distribution in the Cities. In: Subic A., Wellnitz J., Leary M., Koopmans L. (Eds.): Sustainable Automotive Technologies 2012. Springer, Heidelberg 2012, pp. 235-244.

[28] Sierpiński G., Celiński I, Koncepcja użycia technologii sieci GSM do identyfikacji przemieszczeń w miastach. Logistyka – Nauka nr 6/2011, s. 2663-2669.
[29] Sierpiński G., Zachowania komunikacyjne osób podróżujących a wybór środka transportu w mieście. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, seria Transport z. 84, Analiza i badania systemów transportowych i ich elementów, Warszawa 2012, s. 93-106.
[30] Starowicz W., Rudnicki A., Janecki R. (red.), Kompleksowe Badania Ruchu w Katowicach i Siemianowicach Śląskich. Zeszyty Naukowo-Techniczne Oddziału Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie. z. 73, Kraków 1999.
[31] Szarata A., Modelowanie symulacyjne ruchu wzbudzonego i tłumionego, Transport Miejski i Regionalny, 3/2010.
[32] Szarata A., O celowości zastosowania wnioskowania rozmytego w modelowaniu zachowań komunikacyjnych. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji, zeszyt 148, Modelowanie podróży i prognozowanie ruchu, Kraków 2009, s. 235-249.
[33] Tarumi H.; Matsubara K.; Yano M., Implementations and Evaluations of Location-Based Virtual City System for Mobile Phones. Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference Workshops. Dallas, USA, 2004, pp. 544-547.
[34] Travel Survey Manual, Travel Model Improvement Program, Prepared by Cambridge Systematic, Inc., for U. S. Department of Transportation and U.S. Environmental Protection Agency, July 1996.
[35] Ule A., Boucherie R.J., Adaptive dynamic channel borrowing in road-covering mobile networks. Faculty of Mathematical Sciences, University of Twente, University for Technical and Social Sciences, October 2001.
[36] Valerio D., Road Traffic Monitoring from Cellular Network Signaling. FTW-TR-2009-003, No. of Pages: 48. March 2009.
[37] Żochowska R., Karoń G., Macioszek E., Wyznaczanie macierzy podróży w sieciach miejskich – klasyfikacja i przegląd metod. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji, zeszyt 153, Modelowanie podróży i prognozowanie ruchu, Kraków 2010, s. 327-349.
[38] Żochowska R., Modele wyboru drogi wykorzystywane w budowie dynamicznych macierzy podróży. Logistyka – Nauka nr 4/2011, s. 1026-1036.
[39] Żochowska R., Modelowanie wyboru trasy w gęstych sieciach miejskich. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Nr kol. 1836, seria Transport, z. 71, Gliwice 2011, s.97-109.
[40] Źródło internetowe: http://www.silesiacitycenter.com.pl/2037.html

WYKORZYSTANIE SYMULACYJNYCH MODELI PODRÓŻY I WIELOKRYTERIALNEJ METODY RANKINGOWEJ DO PROJEKTOWANIA ROZBUDOWY SIECI TRAMWAJOWEJ[1]

Szymon Fierek
mgr inż., Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, Politechnika Poznańska, tel. +48 61 665 2716, e-mail: szymon.fierek@put.poznan.pl

Andrzej Szarata
dr inż., Katedra Systemów Komunikacyjnych, Politechnika Krakowska, tel. +48 12 628 2533, e-mail: aszarata@pk.edu.pl

Jacek Żak
dr hab. inż., prof. PP, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, Politechnika Poznańska, tel. +48 61 665 2230, e-mail: jacek.zak@put.poznan.pl

Streszczenie. *W artykule zaprezentowano metodykę modelowania i oceny różnego przebiegu linii tramwajowych w aglomeracji miejskiej. Wykorzystując pakiet symulacyjny VISUM skonstruowano różne warianty linii tramwajowej przebiegającej przez całe miasto w relacji wschód - zachód, rozważając zarówno różną długość linii jak i jej różny przebieg. Następnie opracowane warianty poddano ocenie wielokryterialnej z wykorzystaniem spójnej rodziny kryteriów. Przedstawiono również modelowanie preferencji decydenta. Eksperymenty obliczeniowe prowadzące do uszeregowania (rankingu) wariantów oraz wyboru najkorzystniejszego rozwiązania przeprowadzono z wykorzystaniem wielokryterialnej metody rankingowej AHP.*

Słowa kluczowe*: modelowanie podróży, model czterostadiowy, wielokryterialne wspomaganie decyzji*

1. Wprowadzenie

Ciągły spadek liczby podróży wykonywanych transportem zbiorowym na rzecz transportu indywidualnego wymusza konieczność podejmowania pilnych działań inwestycyjnych dążących do poprawy konkurencyjności tego pierwszego. Jednocześnie możliwość wykorzystania funduszy europejskich przeznaczonych na ten cel powoduje konieczność analizy i oceny różnych wariantów inwestycyjnych.

W ramach niniejszego artykułu przedstawiono wielokryterialną ocenę wariantów rozbudowy i modernizacji trasy tramwajowej relacji Wschód – Zachód w Łodzi. Inwestycja realizowana była przez Miasto Łódź w celu przywrócenia wysokiej zdolności eksploatacyjnej istniejącej trasy, jej przedłużenia na nowe tereny (mieszkaniowe i przemysłowe) oraz podniesienia standardu usług przewozowych

1 Wkład procentowy poszczególnych autorów: Fierek S. 33%, Szarata A. 33%, Żak J. 33%

[2]. Projekt wspierał także poprawę atrakcyjności inwestycyjnej terenów wzdłuż linii tramwajowej oraz poprawę dostępności miejsc pracy, nauki i usług. Obszar przylegający bezpośrednio do trasy jest silnie zurbanizowany. W pobliżu zachodniego krańca trasy istnieje osiedle domów jednorodzinnych oraz część „Łódzkiej Specjalnej Strefy Ekonomicznej", w rejonie pętli tramwajowej w tej części miasta znajdują się osiedla typu blokowego starej zabudowy. Przy trasie znajduje się dworzec kolejowy Łódź-Kaliska, który stanowi istotny węzeł przesiadkowy dla miasta i regionu. Linia jest prowadzona przez ścisłe centrum miasta oraz intensywnie rozwijające się osiedla mieszkaniowe. W części wschodniej, po minięciu zespołu osiedli starszej zabudowy blokowej dzielnicy Widzew, linia odbija w kierunku południowym i przez nowszą zabudowę wielorodzinną dochodzi do nowej dzielnicy przemysłowej. Celem niniejszego artykułu jest stworzenie rankingu wariantów rozbudowy tej linii tramwajowej w oparciu o narzędzia analizy wielokryterialnej.

2. Metodyka

2.1. Symulacja

Analizy symulacyjne mające na celu wyznaczenie efektywności funkcjonalnej tej inwestycji [9] zostały opracowane z uwzględnieniem pełnego modelu czterostadiowego, w którym popyt jest funkcją liczby ludności, jej struktury wiekowej i społecznej oraz aktywności gospodarczej w dzielnicach, miastach, gminach i powiatach (model uwzględnia nie tylko miasto, ale również otaczające miejscowości). Model symulacyjny odzwierciedla układ geometrii, węzły sieci, oraz cechy trakcyjne poszczególnych odcinków i przebiegi linii transportu zbiorowego. Badaniu poddano warianty sieci odpowiadające stanowi istniejącemu (przyjęto tutaj stan sieci z 2011 roku) oraz wariantowi bazowemu (bezinwestycyjnemu, dla odniesienia do lat 2014 i 2037) oraz 4 warianty rozwoju systemu transportu.

Zastosowany w niniejszej pracy model ruchu to model 4-etapowy z wtórnym podziałem zadań przewozowych. Zostały w nim uwzględnione wszystkie linie tramwajowe i autobusowe transportu publicznego zarządzane przez MPK Łódź jak również trasy kolejowe oraz główne trasy komunikacji autobusowej PKS. W związku ze strukturą modelu istnieje możliwość określenia częstotliwości dla linii komunikacyjnych w różnych środkach transportu publicznego.

W rezultacie model i prognozy ruchu wykorzystują dokładne częstotliwości, które są określone na podstawie danych rzeczywistych (rozkładów jazdy). Prognozy demograficzne i socjoekonomiczne oparte były na danych regionalnych miasta oraz związane z ogólnymi danymi prognoz GUS, w szczególności demograficznymi i dotyczącymi zatrudnienia. Podstawą analizy modelowej jest oszacowanie prognozowanej ruchliwości mieszkańców oraz wynikających z tego liczebności podróży w poszczególnych grupach motywacji i środkach przewozowych. Model ruchu dla stanu istniejącego został skalibrowany w oparciu o bilans pomiarów ekranowych oraz przekrojowych na etapie tworzenia macierzy, natomiast modele

prognostyczne zbudowano bazując na bilansie demograficznym w obrębie miasta i strefy podmiejskiej oraz przyjętych hipotez zmian ruchliwości uwzględniającej podział na grupy motywacji podróży oraz zmiany demograficzne.

2.2. Wielokryterialne wspomaganie decyzji

Wielokryterialne wspomaganie decyzji (WWD) jest dziedziną wiedzy wywodzącą się z badań operacyjnych. Dziedzina ta zwana też analizą wielokryterialną (franc. *analyse multicritere*) lub wielokryterialnym podejmowaniem decyzji (ang. *multiple criteria decision making*), zmierza do wyposażenia decydenta w procedury, narzędzia i metody matematyczno – informatyczne umożliwiające rozwiązywanie złożonych problemów decyzyjnych, przy analizie których konieczne jest uwzględnienie wielu, często przeciwstawnych punktów widzenia. Według B.Roy [6] wielokryterialne wspomaganie decyzji jest działalnością analityka, który w procesie decyzyjnym pomaga decydentowi znaleźć odpowiedzi na pytania związane z poszukiwaniem najbardziej pożądanych rozwiązań przy uwzględnieniu wielości celów (kryteriów) jakie stawia sobie decydent.

Metodyka WWD służy do rozwiązywania wielokryterialnych problemów decyzyjnych czyli sytuacji, w której, mając zdefiniowany zbiór działań (decyzji, wariantów) i spójną rodzinę kryteriów, decydent dąży do [[6]]:

- określenia podzbioru działań (decyzji, wariantów) uważanych za najlepsze względem rozważanej rodziny kryteriów (problem wyboru),
- podziału zbioru działań (decyzji, wariantów) na podzbiory zgodnie z pewnymi normami (problem klasyfikacji albo sortowania),
- uszeregowania zbioru działań (decyzji, wariantów) od najlepszych do najgorszych (problem szeregowania albo rankingu.

Podstawowymi atrybutami wielokryterialnych problemów decyzyjnych są zbiór rozwiązań (wariantów) oraz spójna rodzina kryteriów oceny F. Zbiór rozwiązań A to zbiór obiektów, decyzji, kandydatów, wariantów lub czynności, które mają być poddane analizie i ocenie w trakcie procedury decyzyjnej. Zbiór rozwiązań A może być zdefiniowany w sposób bezpośredni (przez wymienienie wszystkich jego elementów) lub pośredni (przez określenie właściwości charakteryzujących elementy zbioru lub warunków go ograniczających). Zbiór A może być stały, tzn. zdefiniowany z góry (a priori) i niepodlegający zmianom w toku procedury decyzyjnej lub ewoluujący (zmienny), czyli podlegający modyfikacjom w trakcie procedury decyzyjnej. Przez spójną rodzinę kryteriów F rozumie się taki zbiór kryteriów, który wg B. Roya [6], powinien spełniać wymagania:

- wyczerpywalności oceny, polegającej na uwzględnieniu wszystkich możliwych aspektów rozważanego problemu,
- spójności oceny, polegającej na właściwym kształtowaniu przez każde kryterium globalnych preferencji decydenta,
- nieredundancji kryteriów, czyli niepowtarzalności zakresów znaczeniowych kryteriów.

Każde kryterium występujące w zbiorze F jest funkcją f_j zdefiniowaną na zbiorze A, służącą do oceny zbioru A i reprezentującą preferencje decydenta w odnie-

sieniu do określonego aspektu (wymiaru) problemu decyzyjnego. Wielokryterialne problemy decyzyjne należą do tzw. problemów matematycznie źle zdefiniowanych, ponieważ przy ich rozwiązywaniu dąży się do wyznaczenia takich rozwiązań *x,* które maksymalizują wielokryterialną funkcję celu $F(x)$.

$$F(x) = max\langle f_1(x), f_2(x), ..., f_J(x)\rangle \quad (1)$$

przy ograniczeniach: $x \in A$

gdzie:

A – zbiór rozwiązań dopuszczalnych,

$f_j(x)$ – poszczególne cząstkowe funkcje kryterialne dla $j = 1, 2, \ldots, J$.

W takiej sytuacji koncepcja rozwiązania globalnie optymalnego nie ma uzasadnienia, gdyż w praktyce nie istnieje rozwiązanie, które byłoby najlepsze ze względu na wszystkie kryteria oceny. Zamiast tego wprowadza się pojęcie rozwiązania niezdominowanego lub sprawnego, zwanego również rozwiązaniem paretooptymalnym [10]. Rozwiązanie a jest sprawne $\Leftrightarrow$ gdy w zbiorze rozwiązań dopuszczalnych A nie istnieje żadne inne rozwiązanie b, które dominuje nad a. Istotne jest przy tym pojęcie relacji dominacji. Rozwiązanie a dominuje nad b (aDb) $\Leftrightarrow$ gdy dla każdego kryterium j $(j=1, 2, \ldots J)$ oceny rozwiązań a i b, odpowiednio $f_j(a)$ i $f_j(b)$, zachowują zależność $f_j(a) \geq f_j(b)$ i przynajmniej jedna z nierówności jest ostra, tj. dla wybranego j $f_j(a) > f_j(b)$. Jeżeli natomiast żadna z nierówności nie jest ostra, to mówimy o tzw. dominacji słabej, a uzyskane rozwiązanie a jest słabo niezdominowane. Najczęściej uzyskiwany zbiór rozwiązań niezdominowanych jest dość liczny ze względu na znaczną liczbę rozważanych kryteriów. Z tego zbioru rozwiązań decydent wybiera rozwiązanie najbardziej satysfakcjonujące, czyli kompromisowe [10].

Do rozwiązywania wielokryterialnych problemów decyzyjnych stosuje się różnorodne narzędzia i metody WWD. Metody te można w ogólności podzielić na trzy grupy [10]:

- metody wieloatrybutowej teorii użyteczności, zwane przez B. Roya metodami syntezy do pojedynczego kryterium, pomijającymi nieporównywalność np. UTA, AHP [8],
- metody oparte na relacji przewyższania, które B. Roy nazywa metodami syntezy przewyższającej z uwzględnieniem nieporównywalności np. ELECTRE I–IV, Promethee [1] oraz Oreste [5],
- metody interaktywne, wg B. Roya nazywane metodami dialogowej oceny lokalnej, opartej na podejściu prób i błędów w poszczególnych iteracjach np. LBS [3].

W niniejszej pracy wykorzystano metodę AHP należącą do wielokryterialnych metod szeregowania wariantów.

3. Modelowanie i ocena wariantów

3.1. Opis wariantów

Projekt rozbudowy linii tramwajowej zakłada powstanie czterech wariantów przebiegu linii tramwajowej [9]. Poniżej przedstawiono te warianty oraz opisano stan obecny.

Wariant 0 – wariant bezinwestycyjny, reprezentujący stan obecny – linia tramwajowa o długości ok. 12 km łącząca łódzkie osiedle Retkinia (pętla na al. ks. kard. S. Wyszyńskiego), zlokalizowane po zachodniej stronie miasta z osiedlami im. Mieszka I, i Bolesława Chrobrego (pętla Augustów) zlokalizowanymi po stronie wschodniej. Przebieg linii zaznaczono na rys.1 czarną przerywaną linią.

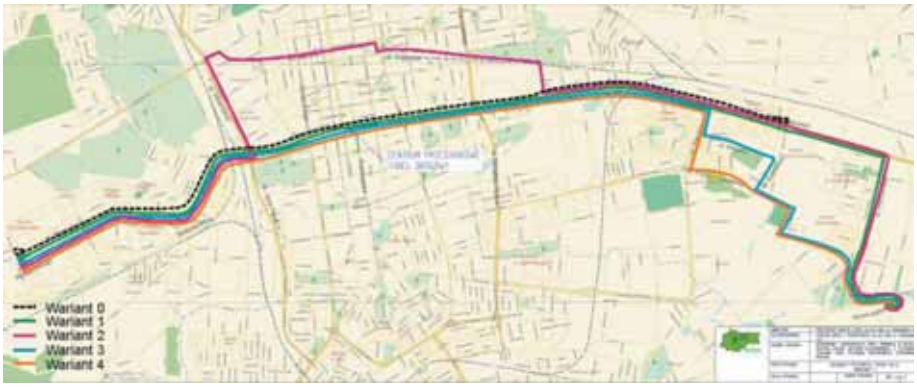
Wariant 1 – wariant inwestycyjny, zakładający wykorzystanie istniejącego przebiegu linii oraz wydłużenie jej o ok. 5 km do osiedla Widzew – Wschód (łączna długość ok. 17 km) wzdłuż ul. Rokietnickiej, al. Hetmańskiej, ul. Kazimierza Odnowiciela oraz al. Ofiar Terroryzmu 11 września. Ponadto założono, że na całej długości trasy torowisko przebiegać będzie na poziomie terenu jako torowisko wydzielone. Przebieg linii zaznaczono na rys.1 zieloną linią.

Wariant 2 – wariant inwestycyjny, zakładający przesunięcie fragmentu istniejącej linii (odcinek między al. Włókniarzy a ul. Konstytucyjną) na północ i jej równoległe poprowadzenie (wzdłuż ulic Legionów, Zielonej, Narutowicza, torów kolejowych) oraz wydłużenie istniejącej linii do osiedla Widzew – Wschód (wzdłuż ul. Rokietnickiej, al. Hetmańskiej, ul. Kazimierza Odnowiciela oraz al. Ofiar Terroryzmu 11 września). Łączna długość linii w tym wariancie wynosi 20 km i zaznaczono ją na rys. 1 kolorem różowym.

Wariant 3 – wariant inwestycyjny, zakładający zmianę przebiegu istniejącej linii na końcowym jej odcinku (od ul. Puszkina) i wydłużenie jej do osiedla Widzew – Wchód (wzdłuż ul. Puszkina, ul. Wujka, ul. Augustów, ul. Przybyszewskiego, al. Hetmańskiej, ul. Kazimierza Odnowiciela oraz al. Ofiar Terroryzmu 11 września). Łączą długość linii w tym wariancie wynosi ok. 17 km i zaznaczono ją na rys. 1 kolorem niebieskim.

Wariant 4 – wariant inwestycyjny, zakładający zmianę przebiegu istniejącej linii na końcowym jej odcinku (od ul. Puszkina) i wydłużenie jej do osiedla Widzew – Wchód (wzdłuż ul. Puszkina, ul. Przybyszewskiego, al. Hetmańskiej, ul. Kazimierza Odnowiciela oraz al. Ofiar Terroryzmu 11 września). Łączą długość linii w tym wariancie wynosi ok. 17 km i zaznaczono ją na rys. 1 kolorem pomarańczowym.

W wyniku rozkładu otrzymanych więźb ruchu wyznaczono potoki pasażerskie i potoki pojazdów komunikacji zbiorowej oraz samochodów osobowych w godzinie szczytu popołudniowego dla każdego z powyższych wariantów, uwzględniając prognozę dla lat: 2014 i 2037.



Rys. 1. Przebieg różnych wariantów rozważanej linii tramwajowej, wg {9}

3.2. Wielokryterialna ocena wariantów

Na podstawie przeglądu literatury stwierdzono, że istnieje szereg kryteriów służących do oceny projektów transportowych w tym transportu miejskiego [{4],[7]}. Do najczęściej używanych należą: czas podróży, bezpieczeństwo, niezawodność, punktualność, komfort podróży, czas tracony na przesiadkę, czas oczekiwania, bezpośredniość podróży, częstotliwość, przyjazność dla środowiska i inne. Na tej podstawie oraz biorąc pod uwagę specyfikę wariantów jak również dostępność danych, autorzy artykułu zaproponowali spójną rodzinę kryteriów oceniających analizowane warianty, wśród których znajdują się kryteria oceniające zarówno samą linię jak i jej wpływ na cały system transportu miejskiego.

Zmiana średniego czasu podróży transportem zbiorowym (K1) – kryterium oceniające wpływ nowego przebiegu linii tramwajowej na standard podróży pasażera w poszczególnych wariantach. Kryterium to zostało zdefiniowane jako różnica średniego czasu podróży wszystkich pasażerów systemu transportu zbiorowego, miedzy wariantem bezinwestycyjnym W0, a wariantami inwestycyjnymi (W1-W4). Kryterium wyrażono w godzinach i jest ono maksymalizowane.

Koszty inwestycji (K2) – kryterium o charakterze ekonomicznym oceniające wielkość nakładów finansowych niezbędnych dla zrealizowania zaplanowanych wariantów inwestycyjnych. Kryterium wyrażono w milionach złotych i jest ono minimalizowane.

Wewnętrzna stopa zwrotu (ang. *internal return rate – IRR*) (K3) – kryterium o charakterze ekonomicznym oceniające efektywność poszczególnych wariantów inwestycyjnych. W wyznaczeniu wartości tego kryterium uwzględniono przychody z działalności transportowej, w horyzoncie czasowym 25 lat. Dla tego samego okresu obliczono koszty wynikające z utrzymania i remontowania infrastruktury transportowej. Kryterium to wyrażono w procentach i jest ono maksymalizowane.

Stopień przyjazności dla środowiska (K4) – kryterium o charakterze środowiskowym odnoszące się do całego systemu transportowego oceniające wpływ proponowanych przebiegów linii tramwajowej na stopień przyjazności dla środo-

wiska. Kryterium wyrażono jako funkcję liczby podróży komunikacji indywidualnej (KI), średniego dystansu podróży KI oraz średniej prędkości podróży KI. Ograniczenie liczby podróży i ich dystansu przy jednoczesnym zwiększeniu średniej prędkości ogranicza negatywny wpływ na środowisko. Kryterium wyrażono w skali punkowej (od 0 do 10) i jest ono maksymalizowane.

Współczynnik przesiadkowości (K5) – kryterium oceniające wygodę pasażera związane z możliwością wykonywania bezpośrednich podróży komunikacją zbiorową (KZ). Kryterium wyrażono jako liczba jazd w ramach podróży KZ przypadająca na całkowitą liczbę podróży. Kryterium to wyrażono w średniej liczbie przesiadek przypadających na podróże KZ a jego wartość jest minimalizowana.

Stopień wykorzystania taboru (K6) – kryterium o charakterze techniczno-ekonomicznym oceniające efektywność wykorzystania środków transportu zbiorowego w poszczególnych wariantach. Wyrażono je jako stosunek liczby pasażerokilometrów do liczby wozo-kilometrów analizowanej linii tramwajowej. Kryterium to jest maksymalizowane.

Dopasowanie przebiegu linii do potrzeb transportowych (K7) – kryterium oceniające zasadność przebiegu linii tramwajowej. W wyznaczeniu wartości tego kryterium posłużono się liczbą podroży obsługiwanych przez linie tramwajowe. Im dłuższe linie, przebiegające przez obszary o dużym popycie, tym więcej pasażerów korzysta z systemu transportu zbiorowego. Kryterium to jest maksymalizowane

Bezpieczeństwo (K8) – kryterium oceniające poziom bezpieczeństwa związanego z przebiegiem linii w poszczególnych wariantach. Uwzględniono w nim bezpieczeństwo drogowe oraz bezpieczeństwo sytuacyjne. W wyznaczeniu wartości tego kryterium uwzględniono takie charakterystyki, jak np. liczba możliwych punktów kolizyjnych czy długość wydzielonego torowiska. Kryterium wyrażone punktowo w skali od 0 do 10, a jego wartość jest maksymalizowana

Komfort podróży (K9) – kryterium oceniające standard podróżowania środkami transportu zbiorowego. Kryterium zdefiniowano jako procentową liczbę pasażerów mogących zająć miejsce siedzące w środkach transportu zbiorowego na rozważanej linii w godzinie szczytu. Kryterium to jest maksymalizowane.

Niezawodność (K10) – kryterium oceniające punktowo zagrożenie niezrealizowania kursów bądź ich opóźnienia wynikające z przebiegu linii i stopnia zatłoczenia. Kryterium maksymalizowane.

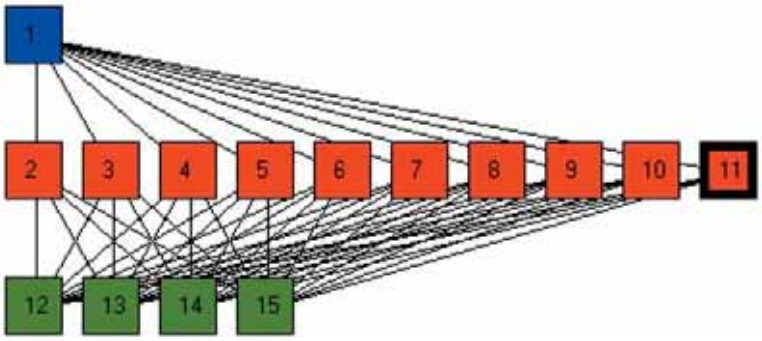
Każdy z wariantów (W1-W4) został oceniony za pomocą wyżej wymienionej spójnej rodziny kryteriów. Część z kryteriów, jak np. czas jazdy otrzymano bezpośrednio z symulacji przeprowadzonych za pomocą programu VISUM, inne, jak np. IRR uzyskano za pomocą dodatkowych obliczeń [9]. W rezultacie skonstruowano macierz ocen przedstawioną w tabeli 1, uwzględniającą prognozę na rok 2014 oraz 2037.

Tabela 1. Macierz ocen charakteryzująca poszczególne warianty zintegrowanego systemu transportu miejskiego

Kierunek preferencji	K1 [h]	K2 [mln zł]	K3 [%]	K4 [poj./h]	K5 [przesiadki]	K6 [pas./poj.]	K7 [pas]	K8 [pkt]	K9 [%]	K10 [pkt]
	max	min	max	max	min	max	max	max	max	max
2014										
W1	-5,12	623	10,11	0,92	1,57	36,55	41509	9	13,9	9,92
W2	-361,68	811	7,63	10,00	1,60	39,62	45678	4	13,4	0,00
W3	-6,45	633	6,29	0,54	1,57	39,04	41495	5	13,5	9,97
W4	-453,80	628	6,94	0,00	1,57	39,21	42104	7	13,5	8,51
2037										
W1	-2 480,72	623	10,11	1,95	1,56	32,57	36908	9	14,6	4,99
W2	-2 727,80	811	7,63	10,00	1,59	32,96	40643	4	14,6	0,00
W3	-2 492,58	633	6,29	2,04	1,56	32,55	36888	5	14,6	5,02
W4	-2 891,21	628	6,94	1,66	1,56	32,71	37444	7	14,6	4,27

W rozważanej sytuacji decyzyjnej decydentem jest miasto Łódź, które w trakcie procesu decyzyjnego pragnie uwzględnić zarówno interes przewoźnika (MPK w Łodzi), jak i pasażera. W modelu preferencji wyrażono dwa główne aspekty: ważność kryteriów oraz wrażliwość decydenta na zmiany wartości kryteriów. W efekcie uzyskano charakterystyczny dla metody AHP model preferencji (względne współczynniki ważności dla kryteriów i wariantów). Do przeprowadzenia eksperymentu obliczeniowego użyto komputerowej aplikacji metody AHP. Kolejne kroki procedury obliczeniowej opisano poniżej.

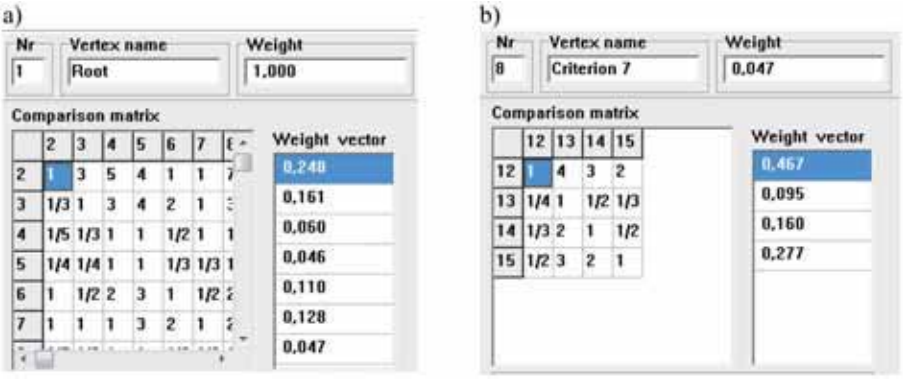
Krok 1 – utworzenie hierarchicznej struktury procesu decyzyjnego (cel procesu oznaczony jest niebieskim blokiem z numerem 1, kryteria kolejno oznaczono czerwonymi blokami z liczbami 2-11 natomiast warianty poddawane ocenie oznaczone są zielonymi blokami z liczbami 12-15).



Rys. 2. Schemat hierarchicznej struktury procesu decyzyjnego

Krok 2 – określenie preferencji decydenta w postaci względnych ocen ważności dokonywanych odpowiednio dla par kryteriów i wariantów decyzyjnych w skali od jednego do dziewięciu punktów. Na rys. 3a przedstawiono porównanie parami

kryteriów, natomiast na rys. 3b wariantów względem jednego z kryteriów (dla przykładu wybrano kryterium przestrzenne – K7).



Rys. 3. Model preferencji decydenta charakterystyczny dla metody AHP – względne współczynniki ważności dla kryteriów a) i wariantów b)

Z porównania wariantów względem kryterium K7 (rys. 3b) wynika, że Wariant 1 (wiersz nr 12) jest najlepszy, natomiast Wariant 2 (wiersz 13) jest gorszy od wszystkich pozostałych. Analizując porównanie parami poszczególnych kryteriów (rys. 3a), można stwierdzić, że kryterium zmiany średniego czasu podróży (K1, wiersz nr 2) charakteryzuje się większą ważnością niż wewnętrzna stopa zwrotu (K3, kolumna nr 4) – współczynnik ważności równy 5 (wiersz nr 2, kolumna nr 4). Z kolei kryterium określające stopień wykorzystania taboru (K6 – wiersz nr 7) jest równo ważne jak kryterium oceniające koszty inwestycji (K2 – kolumna nr3) współczynnik ważności wynosi 1 (wiersz nr 7, kolumna nr 2). Relacje te przekładają się na ostateczną ważność poszczególnych kryteriów i wariantów – np. dla kryterium zmiany średniego czasu podróży (K1) wartość wektora wagowego wynosi 0,248 natomiast dla Wariantu 1 wynosi 0,467

Krok 3 – badanie poziomu globalnej spójności macierzy na każdym poziomie hierarchii, czyli sprawdzanie, jak dalece spójna jest informacja preferencyjna podana przez decydentów w kroku 2 w odniesieniu do kryteriów i wariantów. Oceny ważności elementów hierarchii są tym bardziej spójne, im mniejsza jest wartość obliczonego indeksu spójności (ang. *consistency index CI*). Jeżeli wartości *CI* na poszczególnych poziomach hierarchii są równe 0, to informacja preferencyjna podana przez decydentów na tych poziomach jest idealnie spójna. Oznacza to, że względne oceny ważności kryteriów, podkryteriów i wariantów zostały zdefiniowane w sposób perfekcyjny. W przypadku, gdy wartość *CI* przyjmuje wartość większą od dopuszczalnej, odpowiadającej 0,1 wówczas konieczna jest weryfikacja informacji preferencyjnej podanej przez decydentów, gdyż charakteryzuje się ona zbyt dużą niespójnością. W takiej sytuacji następuje powrót do fazy II algorytmu metody AHP. W przedstawionym eksperymencie indeks ten nie przekroczył w żadnym przypadku tej wartości. W prezentowanym eksperymencie obliczenio-

wym maksymalna wartość indeksu spójności wynosi 0,089 co potwierdza spójność wyrażonych preferencji.

Krok 4 – agregacja znormalizowanych bezwzględnych oceny ważności elementów hierarchii za pomocą addytywnej funkcji użyteczności (5).

$$U_i = \sum_{s(t-2)=1}^{S(t-2)} w_{s(t-2)}^{\mathrm{b/ns(t-3)}} \cdot \sum_{s(t-1)=1}^{S(t-2)} w_{s(t)}^{\mathrm{b/ns(t-1)}} \cdot w_{s(t-1)}^{\mathrm{b/ns(t-2)}} \tag{5}$$

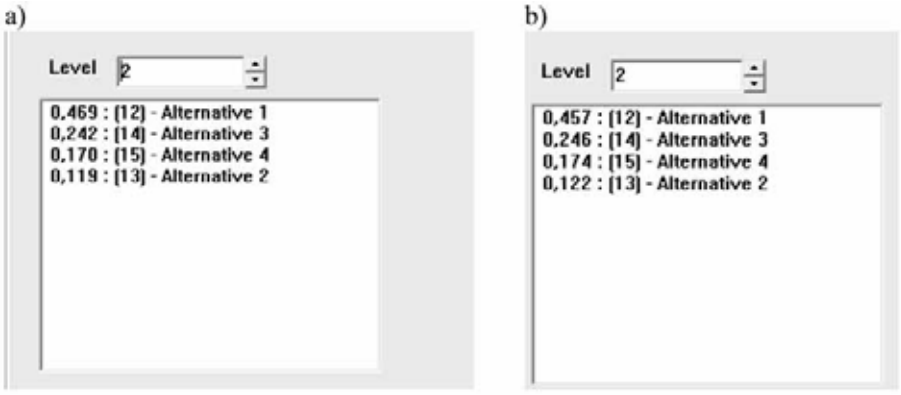
gdzie:

$w_{s(t)}^{\mathrm{b/ns(t-1)}}$ – znormalizowana bezwzględna ocena ważności (waga) elementu hierarchii s na poziomie t – wariantu ($s = i$) względem elementu hierarchii s na poziomie t – 1 – podkryterium ($s = j'$),

$w_{s(t-1)}^{\mathrm{b/ns(t-2)}}$ – znormalizowana bezwzględna ocena ważności (waga) elementu hierarchii s na poziomie t – 1 – podkryterium ($s = j'$), względem elementu hierarchii s na poziomie t – 2 – kryterium ($s = j$),

$w_{s(t-2)}^{\mathrm{b/ns(t-3)}}$ – znormalizowana bezwzględna ocena ważności (waga) elementu hierarchii s na poziomie t – 2 – kryterium ($s = j$) względem elementu hierarchii s na poziomie t – 3 – celu nadrzędnego.

Rezultatem końcowym algorytmu metody AHP jest ranking, czyli uszeregowanie wariantów od najlepszego do najgorszego zgodnie z obliczonymi wartościami ich użyteczności od największej do najmniejszej. Na rys. 4 przedstawiono końcowe uszeregowanie wariantów uzyskane w wyniku przeprowadzonego eksperymentu obliczeniowego z wykorzystaniem metody AHP.



Rys. 4. Ranking finalny wariantów dla horyzontu czasowego a) 2014 oraz b) 2037

Jak wynika z rys. 4 pierwsze miejsce w obu rankingach zajął wariant 1, zaś ostatnie wariant 2. Zwycięzca rankingu charakteryzuje się najlepszą oceną kryteriów K1, K2, K3, K5, K8, K9 (odpowiednio: zmiana średniego czasu podróży transportem zbiorowym, koszty inwestycji, wewnętrzna stopa zwrotu, współczynnik przesiadkowości, bezpieczeństwo oraz komfort podróży) i bardzo dobrymi

ocenami pozostałych. Zdecydowanie najsłabiej został oceniony wariant 2. Poważną wadą w przypadku tego wariantu są kryteria wysokiej koszty inwesty i dużej ujemnej zmiany średniego czasu podróży (straty czasu) względem stanu obecnego. Warto ponadto zwrócić uwagę na fakt, że wariant ten cechują najlepsze wartości dla kryteriów K4, K6 i K7 (odpowiednio stopień przyjazności dla środowiska, stopień wykorzystania taboru, kryterium przestrzenne) jednak kryteria te były mniej ważne dla decydenta. Ponadto w obu horyzontach czasowych przebieg rankingu jest taki sam, różnice występują jedynie w wartościach funkcji użyteczności, jednak są one niewielkie.

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono zastosowanie narzędzi symulacji ruchu i wielokryterialnego wspomagania decyzji do konstruowania i oceny wariantów przebiegu linii tramwajowej w Łodzi. Wykorzystując narzędzia makrosymulacji, wygenerowano cztery alternatywne warianty.

Zdefiniowano spójną rodzinę kryteriów, która z uwagi na specyfikę projektu obejmowała kryteria oceniające zarówno przebieg samej linii tramwajowej, jak róznież jej wpływ na system transportowy miasta. Jako dane wejściowe do wyznaczenia wartości zdefiniowanego zbioru kryteriów wykorzystano wyniki pochodzące z modelu symulacyjnego odwzorowującego system transportowy miasta wraz z interakcjami zachodzącymi między poszczególnymi gałęziami transportu. Pozwoliło to precyzyjnie sparametryzować badane warianty. Warianty te poddano ocenie za pomocą spójnej rodziny kryteriów przy wykorzystaniu modelu preferencji decydenta. Eksperymenty obliczeniowe prowadzące do uszeregowania wariantów przeprowadzono metodą AHP – metodą wielokryterialnego szeregowania wariantów. Dzięki zastosowaniu tej metody, w otrzymanym uszeregowaniu widać odległośći pomiędzy poszczególnymi wariantami: najbardziej pożądany wariant 1 w obu rankingach (na rok 2014 i na 2037) uzyskał wyraźną przewagę na pozostałymi - niemalże dwukrotnie wyższa wartość funkcji użyteczności.

W przypadku rozbudowy linii tramwajowej w Łodzi, uwzględnienie spójnej rodziny dziesięciu kryteriów pozwoliło na wskazanie wariantu najbardziej pożądanego - kompromisowego (wariant 1), spełniającego postawione wymagania. W rozważanym przypadku autorzy artykułu rekomendują decydentowi wybór tego wariantu.

Bibliografia

[1] Brans J., Mareschal B., Vincke P., PROMETHEE: A New Family of Outranking Methods in Multicriteria Analysis. W: Brans J. (red.): Operational Research'84. North-Holland Publishing, Amsterdam, pp. 408-421, 1984.

[2] Friedberg J., Szubra M., Studium wykonalności projektu pn. Rozbudowa i modernizacja trasy tramwaju w relacji Wschód – Zachód (Retkinia– Olechów) wraz z systemem zasilania oraz systemem obszarowego sterowania ruchem. Materiały niepublikowane, Kraków, 2010.
[3] Jaszkiewicz A., Słowiński R., The Light Beam Search Approach – an Overview of Methodology and Applications. European Journal of Operational Research, Vol. 113, No. 2, pp. 300–314, 1999.
[4] Quattro– Project of European Union (Working Papers). D2: Definition and Evaluation of Quality in Urban Passenger Transportation. D3: Tendering and Contracting of Urban Passenger Transportation Services. D4: Link between Customer Satisfaction and Quality Indices, Brussels, 1997.
[5] Roubens M., Preference Relations on Actions and Criteria in Multicriteria Decision Making. European Journal of Operational Research, Vol. 10, pp. 51-55, 1982.
[6] Roy B., Wielokryterialne wspomaganie decyzji. WNT, Warszawa, 1990.
[7] Rudnicki A., Jakość Komunikacji Miejskiej. Kraków, 1999.
[8] Saaty T., The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill, New York, 1980.
[9] Studium Wykonalności projektu pn. Rozbudowa i modernizacja trasy tramwaju w relacji Wschód – Zachód (Retkinia– Olechów) wraz z systemem zasilania oraz systemem obszarowego sterowania ruchem. Materiały niepublikowane, Łódź, grudzień 2011.
[10] Żak J.: Wielokryterialne wspomaganie decyzji transporcie drogowym. Politechnika Poznańska, Poznań, 2005.

MODEL WYBORU PRZEZ PASAŻERA WARIANTU PRZEMIESZCZENIA DO MIEJSCA PRACY W WARUNKACH DUŻEGO MIASTA[1]

Petro Horbachov
dr inż. hab., Katedra Systemów Transportowych, Charkowski Narodowy Samochodowo-Drogowy Uniwersytet, 61002 Charków, ul. Pstrowskiego 25, Ukraina, tel. +38 0577073783, e-mail: gaf@khadi.kharkow.ua

Vitalii Naumov
dr inż., Katedra Systemów Transportowych, Charkowski Narodowy Samochodowo-Drogowy Uniwersytet, 61002 Charków, ul. Pstrowskiego 25, Ukraina, tel. +38 0577073720, e-mail: naumov.vs@gmail.com

Olga Svichynska
Katedra Systemów Transportowych, Charkowski Narodowy Samochodowo-Drogowy Uniwersytet, 61002 Charków, ul. Pstrowskiego 25, Ukraina, tel. +38 0577073783, e-mail: ktt@khadi.kharkow.ua

Streszczenie. *W artykule przedstawiono podejście do formułowania modelu zachowania pasażera w systemie komunikacji miejskiej, zgodne z zasadami świadomego podejmowania przez osobę decyzji oraz opracowane modele dyskretnego wyboru. Zaproponowane są teoretyczne podstawy modelowania, zgodnie z którymi wartości atrakcyjności trasy przemieszczenia oblicza się za pomocą systemu całkowych równań Fredholma na podstawie statystycznych prawdopodobieństw wykorzystania alternatywnych tras dla każdego respondenta. Dla obliczania współczynników znaczenia parametrów w funkcji atrakcyjności wykorzystano analizę regresyjną oraz przedstawiono ocenę dokładności prognozy dla prawdopodobieństwa wyboru alternatyw. Przedstawiono funkcję atrakcyjności, która została opracowana w wyniku badań przemieszczeń do miejsc pracy dla miasta Charkowa.*

Słowa kluczowe: *modelowanie podróży, transport zbiorowy, wybór linii*

Wprowadzenie

Dla systemów komunikacji zbiorowej miast Ukrainy charakterystycznym jest obecność dość rozwiniętych sieci transportowych miejskiego transportu, które obsługują więcej od 70% przemieszczeń mieszkańców i gości miast. Dlatego szczególnie ważnym jest skuteczne planowanie procesu transportu publicznego w obecnych warunkach funkcjonowania zasobów przewozowych na Ukrainie, które tak istotnie różnią się od przyjętego w cywilizowanym świecie poziomu obsługi transportowej: informacyjna obsługa pasażerów znajduje się na bardzo niskim poziomie, rozkłady ruchu na najbardziej używanych liniach komunikacji miejskiej

1 Wkład autorów w publikację: Horbachow P. 60%, Naumov V. 30%, Svichynska O. 10%

są ciągle łamane, istnieją odmowy przyjęcia przy wejściu do pojazdu wskutek jego maksymalnego obciążenia. Tę sytuację pogarsza brak regularnych badań procesu transportowego i w konsekwencji niedostateczna ilość danych wejściowych, potrzebnych dla podejmowania uzasadnionych decyzji. To czyni obługę pasażerów „za interwałem ruchu" faktycznie jedynym sposobem funkcjonowania transportu publicznego i wymaga szczególnej uwagi do problemu podziału potoków pasażerów między liniami autobusowymi, ponieważ przewozy miejskie są dość atrakcyjnym biznesem, w którym nie tylko wielkość zysku firmy transportowej, ale i zarobki kierowców pojazdów zależą od liczby przewiezionych pasażerów.

Koniecznością dla ukraińskich naukowców stało się stworzenie metody podziału potoków pasażerów między liniami komunikacji miejskiej, która jest oparta na faktycznej informacji co do zachowania pasażerów w miejskim systemie transportowym oraz odpowiednie opisuje kompleksowy, względny charakter procedury wyboru pasażerem trasy przemieszczenia w systemie transportowym.

Analiza źródeł literaturowych

Najbardziej niezawodną, współczesną, jak teoretycznie uzasadnioną podstawą dla opracowania metody modelowania zachowania pasażerów są modele oparte o makroekonomiczną teorię, która określa tak zachowanie osoby, że ona zawsze wybiera ze zbioru alternatyw tę, która tworzy maksymalną użyteczność. Dla odzwierciedlenia atrakcyjności alternatywy wykorzystuje się pojęcie użyteczności, które uważa się za wygodny konstrukt teoretyczny, zdefiniowany jako to, co osoba chce zmaksymalizować [1]. Przy tym zakłada się brak błędów osoby podejmującej decyzję, a ponieważ badacz nie może mieć pełnej informacji o wszystkich elementach, które wpływają na wybór osoby, użyteczność rozdzielania jest na dwa składniki [1, 2]. Pierwszy składnik jest mierzony obserwowaną częścią V_{ij}:

$$V_{ij} = \sum_k \beta_k \cdot x_{ijk} = \beta \cdot x_{ij} \ , \qquad (1)$$

gdzie:
β – wektor parametrów;
x_{ij} – wektor charakterystyk i-tej osoby, właściwości alternatywy j;
$i = 1,\ldots, n, j = 1,\ldots, J$ (n – liczba osób, J – liczba alternatyw ponumerowanych dowolnie).

Drugi składnik mierzony jest losową częścią ε_{ij}, co odzwierciedla wszystkie czynniki, które zapewniają mało zauważalny wpływ na wybór osoby i również uwzględniają ewentualne błędy popełnione podczas obserwacji lub w trakcie tworzenia matematycznego modelu [1, 2]. Biorąc pod uwagę (1), funkcja użyteczności przyjmuje następującą postać:

$$U_{ij} = x_j \cdot \beta + \varepsilon_j \tag{2}$$

Obecność zmiennej losowej w (2) stwarza możliwości dla wyjaśnienia przyczyn wykorzystania różnych alternatyw, ponieważ prawdopodobieństwo wyboru przez osobę i alternatywy j jest prawdobodobieństwem tego, że jej użyteczność będzie największą w porównaniu z innymi alternatywnymi.

Po dokonywaniu matematycznych przekształceń standardowy logit-model otrzymuje następującą formę [1-5]:

$$P_{ij} = \frac{l^{x_{ij}\beta}}{\sum_{r=1}^{J} l^{x_i \beta}} \tag{3}$$

Do określenia parametrów tego modelu wykorzystywana jest metoda maksymalnej wiarogodności, dla której danymi wejściowymi są binarne prawdopodobieństwa każdej alternatywy i parametry, które je charakteryzują. To czyni modele dyskretnego wyboru bardzo wszechstronnymi narzędziami modelowania, ale ostateczne wyniki opracowania jakich bądź modeli dyskretnego wyboru osiągnięte są przez zbyt śmiałe założenia o jednakowym rozkładzie losowych elementów wszystkich czynników wyboru trasy przemieszczenia, pomimo faktu, że czynniki te mają różne znaczenie fizyczne. Poza tym modele te nie pozwalają na szczegółowy przegląd procedury wyboru trasy przemieszczania, która zawsze realizuje się dla określonego zbioru alternatyw. Ocena parametrów każdej alternatywy ma względny charakter i to wyraźnie widać z wyników badań [6], w których dla oceny procedury wyboru respondentom zaproponowano do rozważenia dwa alternatywne warianty trasy przemieszczenia pomiędzy ustalonymi dzielnicami miasta.

Przy rozwiązaniu stosunkowo prostego zagadnienia wyboru przez pasażerów trasy przemieszczenia za pomocą transportu miejskiego istnieje możliwość uproszczenia sformułowania problemu i opracowania specjalnej metody obliczania prawdopodobieństwa wyboru alternatyw, opartej na osobliwościach interwałowego podejścia do obsługi pasażerów transportem publicznym, dla którego charakterystycznym jest to, że pasażer podejmuje decyzję bezpośrednio na przystanku, w zależności od konkretnej sytuacji transportowej.

Teoretyczne podstawy wyboru wariantu przemieszczenia

Przy opracowaniu metody wykorzystuje się tę samą zasadę świadomego zachowania pasażerów transportu publicznego, która jest podstawą dla modeli dyskretnego wyboru. Jednak stosowane jest przy tym bardziej ogólne twierdzenie o tym, że pasażer maksymalizuje efektywność przemieszczenia, która odzwierciedla jakość tego przemieszczenia. Jako jakość rozumie się zestaw właściwości obiektu, które określają jego zdolność do zaspokojenia pewnych potrzeb w odpowiedności

do przeznaczenia obiektu. W takim przypadku wynik wyboru, czyli jego efektywność, musi w pełnej mierze odzwierciedlać cel stworzenia i funkcjonowania badanego obiektu i może być zdefiniowany jako różnica między wynikiem przemieszczenia i jego kosztem. Z uwzględnieniem zasady maksymalizacji, efektywność przemieszczania *k*-tym wariantem trasy między rejonami transportowymi *d* i *e*, E_{kde} określa się zgodnie z formułą:

$$E_{kde} = \max_{l} \left\{ R_{lde} - C_{lde} \right\}, d, e \in \left[1, N_{TP}\right],\ k, l \in \left[1, z_{de}\right], \tag{4}$$

gdzie:

k – indeks wybranego wariantu trasy przemieszczenia między rejonami odjazdu d i przybycia e, $k \in \left[1, z_{de}\right]$;

d, e – indeksy dzielnic transportowych miasta, $d, e \in \left[1, N_{TP}\right]$;

l – indeks jednego z alternatywnych wariantów trasy przemieszczenia między rejonami d i e, $l \in \left[1, z_{de}\right]$;

z_{de} – liczba alternatywnych wariantów trasy przemieszczenia między dwójką rejonów transportowych d i e, $z_{de} \geq 2$;

E_{kde} – efektywność przemieszczenia *k*-tym wariantem trasy między rejonami d i e;

C_{lde} – koszty wszystkich rodzajów na przemieszczenie *l*-tym wariantem trasy między rejonami d i e;

R_{lde} – wynik wykorzystania *l*-tego wariantu trasy, albo użyteczność zmiany lokalizacji (przemieszczenia) między rejonami d i e.

Użyteczność przemieszczania jest określana przez jej konieczność, pilność, czyli stosunkiem pasażerów do celu podroży. Czynniki te nie są bezpośrednio związane z procesem transportowym i wiarygodnie mogą znacznie się różnić.

Dla prawidłowego zastosowania zasady maksymalizacji efektywności podroży dalej koniecznym jest jej uzupełnienie założeniem, że pasażer ma jasne widzenie, co do konsekwencji wyboru trasy. To założenie wydaje się dość prawidłowym podczas wprowadzania ograniczeń dla modelowania zachowania pasażerów w sieci transportowej tylko w stosunku do podroży do miejsca pracy. Ograniczenie to pozwala również znacznie zmniejszyć zakres możliwych wartości wskaźnika R_{lde} ze względu na podobny charakter podroży dla każdego pasażera, ponieważ w takim przypadku wynik przemieszczenia dla każdej osoby jest ten sam – być w pracy bez opóźnienia. Dlatego dla rozpatrywanych podróży można stwierdzać, że

$$R_{lde} = const = R \text{ , dla } \forall l; c; d \text{ .} \tag{5}$$

Mimo (5), uwzględnienie wyników przemieszczenia w (4) jest bardzo ważnym krokiem nie tylko z metodologicznego punktu widzenia, ale również pod względem szukanego modelu, ponieważ to wyjaśnia prawdziwy sens wolnego członka w tym wyrazie.

Sytuacja dla badania zachowania pasażera jest bardzo odmienna od ogólnej sytuacji wyboru losowego, która jest rozpatrywana w modelach dyskretnego wyboru. Kluczowym elementem ogólnej sytuacji jest podróż samochodem osobowym, a warianty korzystania się z komunikacji miejskiej rozpatrywane są jako możliwe alternatywy podróży samochodem. Jeśli dla podróży do miejsca pracy pasażer zawsze używa środków komunikacji miejskiej, przy interwałowej metodzie obsługi pasażerów podejmowanie decyzji co do wariantu trasy przemieszczenia odbywa się na przystanku i to prowadzi do formowania specyficznego zestawu wydatków pasażera, innego niż ilościowe parametry podroży, charakterystyczne dla modeli dyskretnego wyboru. Po pierwsze, nie wszystkie parametry ilościowe trasy transportu mogą być uznane za deterministyczne, a przede wszystkim odnosi się to do czasu podróży. Po drugie, przy podejmowaniu decyzji o wyborze tego albo innego wariantu trasy przemieszczenia, pasażer jeszcze nie zna wyników swojego przemieszczenia. Dlatego koniecznym jest wprowadzenie w modelu jasnego pojęcia deterministycznych czynników trasy przemieszczenia. Jako deterministyczne uważane są te czynniki, które w momencie wyboru mają stałą i znaną pasażerowi wartość. Wśród podstawowych czynników, które pasażer bierze pod uwagę przy wyborze wariantu trasy przemieszczenia, można wyodrębnić dwie grupy:

- deterministyczne (wartość podróży, liczba przesiadek, czas dojścia, niezawodność wariantu i poziom komfortu, który charakteryzuje się średnim współczynnikiem napełnienia pojazdu podczas podróży, czas podróży, czas przesiadki);
- stochastyczne (czas oczekiwania na przystanku).

Inne czynniki, w tym i jakościowe wskaźniki funkcjonowania transportu, niemające ilościowej oceny, rozpatrywane są jako niezdefiniowane, których stopień wpływu jest szacowany przy statystycznej obróbce danych eksperymentalnych. Wynik analizy kosztów podróży jest przedstawiony następującą zależnością:

$$C_l = \sum_{i=1}^{n_g} c_i \cdot g_{il} + c_t \cdot t_l \qquad (6)$$

gdzie:

n_g – liczba istotnych deterministycznych czynników, które są używane przez pasażerów w trakcie wyboru trasy przemieszczenia między dwoma rejonami transportowymi;

c_i – współczynnik istotności i-tego deterministycznego czynnika;

g_{il} – wartość i-tego deterministycznego czynnika dla l-tego wariantu trasy przemieszczenia;

t_l – czas oczekiwania pojazdu dla l-tej trasy (zmienna losowa);

c_t – współczynnik istotności czasu oczekiwania.

W (6) i dalej nie używano indeksów d i e, które określają zgodność przemieszczenia parze rejonów transportowych (początkowemu i końcowemu punktowi

przemieszczenia), dla tych wypadków, kiedy one nie wpływają na treść wyrazu, czyli kiedy rozpatrywana jest jedna para rejonów.

Biorąc pod uwagę stałość użyteczności przemieszczenia, wynikiem modelowania jest uzyskanie obiektywnych wartości współczynników istotności deterministycznych parametrów trasy podróży c_i, $i \in [1, n]$, które pozwalają opisać nastawienie pasażera do odpowiednich czynników transportowych. Dla odzwierciedlenia zależności efektywności l-tego wariantu trasy przemieszczenia w (4) wprowadza się zmienną y_l za pomocą dzielenia deterministycznej części zależności kosztów (6) przez współczynnik c_t przy losowej części czasu oczekiwania t_l:

$$y_l = \frac{R}{c_t} - \sum_{i=1}^{n} \frac{c_i}{c_t} \cdot g_{il} \tag{7}$$

Po czym, uwzględniając (4), dostaje się:

$$\frac{E_l}{c_t} = y_l - t_l \tag{8}$$

Aby uprościć wyrażenie, lewą część (8) można zamienić specjalnym symbolem X_l:

$$X_l = \frac{E_l}{c_t} \tag{9}$$

wówczas otrzymuje się wyrażenie:

$$X_l = y_l - t_l \tag{10}$$

w którym zmienni X_l i y_l mają odpowiedni sens:

- X_l jest sprowadzona do czasu oczekiwania efektywność przemieszczenia, albo innymi słowy, efektywność przemieszczenia w wymiarze czasu; w rozpatrywanym modelu ta wielkość jest pozytywną zmienną losową, ze względu na wpływ czasu oczekiwania;
- y_l jest efektywnością przemieszczenia w jednostkach czasu bez uwzględnienia czasu oczekiwania; to jest deterministyczna pozytywna wielkość, dla której dalej wykorzystamy określenie "deterministyczna atrakcyjność trasy przemieszczenia".

Według formuły całkowitego prawdopodobieństwa dla ciągłej zmiennej losowej, prawdopodobieństwo wyboru k-tego wariantu trasy przemieszczenia określane jest przez całkowy wyraz [7]:

$$p_k = \int_{\alpha_k}^{\beta_k} P\{X_k = \max\{X_l\}\} \cdot f(x_k) dx_k, \; x_k \in [a_k, b_k] \tag{11}$$

gdzie α_k, β_k – odpowiednio dolna i górna granica interwału wartości zmiennej losowej X_k; $f(x_k)$ – gęstość rozkładu zmiennej losowej – czasu oczekiwania przez pasażera pojazdu dla k-tego wariantu trasy przemieszczenia.

Za pomocą równania (11) można opisać prawdopodobieństwa wyboru wszystkich alternatywnych wariantów tras przemieszczania. W ogólnym przypadku, kiedy między parą rejonów transportowych istnieje z realnych alternatyw w sieci transportowej komunikacji miejskiej, dla których określone są niezerowe wartości prawdopodobieństwa wyboru można zaproponować układ z równań:

$$\begin{cases} p_1 = \int\limits_{\alpha_1}^{\beta_1} \prod\limits_{l=2}^{z} P\{y_l - t_l < y_1 - t_1\} \cdot f(y_1 - t_1) dt_1 \\ \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ p_k = \int\limits_{\alpha_k}^{\beta_k} \prod\limits_{l=1;l\neq k}^{z} P\{y_l - t_l < y_k - t_k\} \cdot f(y_k - t_k) dt_k \\ \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ p_z = \int\limits_{\alpha_z}^{\beta_z} \prod\limits_{l=1}^{z-1} P\{y_l - t_l < y_z - t_z\} \cdot f(y_z - t_z) dt_z \end{cases} \tag{12}$$

Na podstawie układu (12) wyznaczane są wielkości zmiennych y_l, $l \in [1, z]$, do tego koniecznym jest określenie statystycznych prawdobodobieństw wyboru alternatyw, a również funkcji rozkładu $f(t)$ rzeczewistego czasu oczekiwania pierwszej podróży dla wariantu trasy.

Układ (12) jest układem równań całkowych [7] z multiplikatywną podcałkową funkcją, dla której liczba niewiadomych y_l równa się liczbie równań z. Można udowodnić, że układ ten ma jedno rozwiązanie. Warunek porównania zmiennych losowych w każdym równaniu układu (12) wygląda następująco:

$$y_l - t_l < y_k - t_k;\ k \neq l;\ k,l \in [1, z] \tag{13}$$

$$\Delta y_l = y_1 - y_l,\ \ l \in [2, z], \tag{14}$$

gdzie: Δy_l – deterministyczna atrakcyjność pierwszego wariantu trasy w stosunku do l-tego.

Odpowiednia liczba nowych stałych rowna się $z-1$. Ze względu na (14), układ (12) przekształca się następująco:

$$\begin{cases} p_1 = \int\limits_{\alpha_1}^{\beta_1} \prod\limits_{l=2}^{z} P\{t_1 < t_l + \Delta y_l\} \cdot f(t_1) dt_1 \\ . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \\ p_k = \int\limits_{\alpha_k^{'}}^{\beta_k^{'}} P\{t_k + \Delta y_k < t_1\} \cdot \prod\limits_{l=1; l \neq k}^{z} P\{t_k + \Delta y_k < t_l + \Delta y_l\} \cdot f(t_k + \Delta y_k) dt_k \\ . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \\ p_z = \int\limits_{\alpha_z^{'}}^{\beta_z^{'}} P\{t_z + \Delta y_z < t_1\} \cdot \prod\limits_{l=1}^{z-1} P\{t_z + \Delta y_z < t_l + \Delta y_l\} \cdot f(t_z + \Delta y_z) dt_z \end{cases} \quad (15)$$

gdzie: $\alpha_l^{'} = \alpha_l + \Delta y_l;\ \beta_l^{'} = \beta_l + \Delta y_l;\ \ l = k \cup z$.

W ogólnym przypadku technologiczny sens Δy_l polega na tym, że zmienna ta wskazuje na względne przesunięcie rozkładu czasu oczekiwania $f(t_l)$, wynikiem którego jest zmiana prawdopodobieństwa $P[t_k < t_l + \Delta Y_l]$.

Tak więc proces modelowania zachowania pasażerów w systemie komunikacji miejskiej, czyli formowanie modelu określenia prawdopodobieństwa wyboru przez pasażera trasy przemieszczenia dla konkretnego obiektu, można przedstawić w postaci kilku etapów.

W pierwszym etapie równolegle prowadzi się badania podróży pasażerów do miejsc pracy w celu określenia statystycznego prawdopodobieństwa wykorzystania różnych wariantów trasy przemieszczenia i również zbieranie technicznych, eksploatacyjnych i statystycznych charakterystyk linii komunikacji miejskiej.

Drugi etap, to opracowanie statystycznych charakterystyk funkcjonowania linii komunikacji miejskiej, określenie wartości deterministycznych czynników i parametrów rozkładu czasu oczekiwania na liniach w szczytowych godzinach.

W trzecim etapie prowadzi się opracowanie przydatnych do wykorzystania ankiet, zgodnie z którymi pasażerowie korzystają z kilku wariantów trasy przemieszczenia. Przy opracowaniu dla każdej ankiety na podstawie parametrów oddzielnych linii kształtowane są parametry konkurencyjnych tras przemieszczenia.

W czwartym etapie poprzez rozwiązanie układu równań (15) wykonuje się obliczenie ($z-1$)-tej wartości odchylenia zadanej efektywności tras ΔY_s od bazowej (pierwszej) trasy dla każdej odebranej ankiety.

W piątym etapie dla N_c ankiet formowany jest układ równań (15). Ze względu na pozytywną wartość wyniku przemieszczenia ustala się bazową wartość deterministycznej atrakcyjności dla pierwszej ankiety i dokonuje się analizy regresyjnej, wynikiem której są współczynniki określające nastawienie pasażerów do czynników transportowych.

W końcowym szóstym etapie prowadzi się analizę statystyczną uzyskanego modelu, określa się konieczność poprawy jego dokładności i podejmuje się szereg działań w tym kierunku.

Badania eksperymentalne

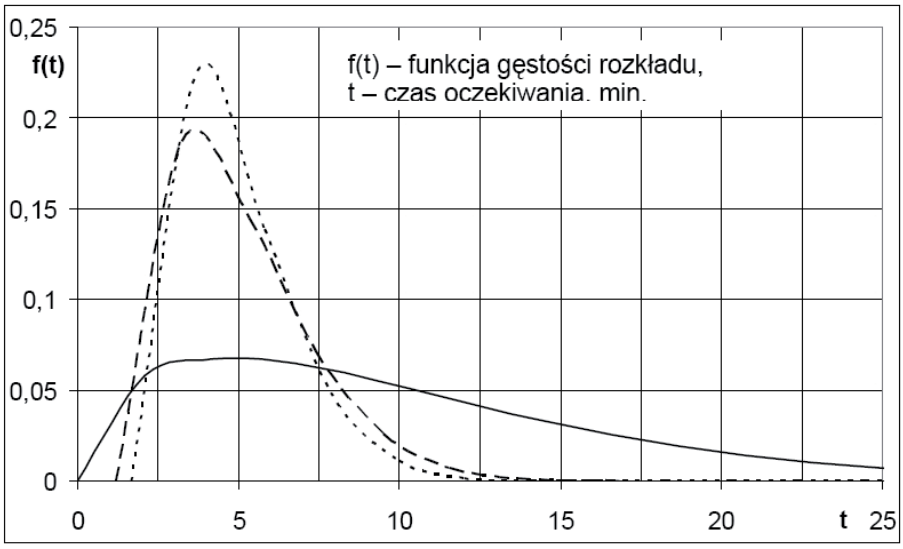
Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone w drugim co wielkości mieście Ukrainy – Charkowie, z liczbą ludności około 1,5 mln osób. W pierwszym etapie za pomocą symulacyjnego eksperymentu stwierdzono, że przy interwałowym sposobie obsługi czas oczekiwania pasażerów pojazdu pojedynczej linii rozłożony jest za Gamma-rozkładem z parametrami skali, które liniowo zależą od planowanego interwału ruchu na linii.

Dalej zostało przeprowadzono 5-dniowe badanie rzeczywistych przemieszczeń 866 mieszkańców miasta, wśród których przydatnymi dla dalszego opracowania okazało się 307 ankiet. Za przydatne uważano wszystkie ankiety, w których były poprawnie wypełnione pola dla wszystkich 5 przemieszczeń, w których wskazano 2 albo więcej wykorzystanych wariantów przemieszczenia. Badanie to w dużej mierze zbiega się z opisanym w [8] badaniem sposobów przemieszczenia ale w przeciwieństwie do niego dla każdego respondenta określono nie 5 binarnych prawdopodobieństw, a mniej, zgodnie z ilością wykorzystanych przez pasażerów wariantów przemieszczenia i na podstawie częstotliwości ich wykorzystania.

Równoległe określono główne charakterystyki procesu transportowego obsługi pasażerów: deterministyczne koszty pasażerów i zaplanowane interwały ruchu na liniach.

W następnym etapie wyznaczono wielkości deterministycznej atrakcyjności tras przemieszczenia na podstawie formuły numerycznego całkowania Gaussa. Rozkład czasu oczekiwania przyjęto zgodnie z rozkładem Weibulla z parametrami, które określa się na podstawie interwału ruchu na linii. Nieuwzgłędniony odsetek rozkładu, który określa dokładność obliczeń, przyjęto na poziome ósmej cyfry znaczącej. Przykład obliczeń przedstawiono dla pojedynczej ankiety, w której znajdują się trzy alternatywne warianty trasy przemieszczenia z prawdopodobieństwami wykorzystania $P_1 = 0{,}2$, $P_2 = P_3 = 0{,}4$ i interwałem ruchu $J_1 = 0{,}2$, $J_2 = J_3 = 0{,}4$.

Dla osiągnięcia wartości prawdopodobieństwa uzyskanych w wyniku badania poszukuje się odpowiedniego rozmieszczenia rozkładów czasu oczekiwania za pomocą uwzględnienia w czasie oczekiwania atrakcyjności tras Δy_2 i Δy_3. Funkcją celu jest minimum długości wektora niedopasowania empirycznych i wyliczonych wartości prawdopodobieństwa. Wyniki rozwiązania nadają następujące wartości atrakcyjności: dla drugiej trasy $\Delta y_2 = 1{,}186$ i dla trzeciej trasy $\Delta y_3 = 1{,}668$. Odpowiedne rozmieszczenie rozkładów czasu oczekiwania z uwzględnieniem atrakcyjności tras przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Rozkład czasu oczekiwania dla alternatywnych wariantów z uwzględnieniem atrakcyjności tras:

—— $f(t_1)$ – – – $f(t_2+\Delta y_2)$ ····· $f(t_3+\Delta y_3)$

Obliczone wartości prawdopodobieństwa wyboru trasy, które odpowiadają temu rozkładowi, wynoszą $P_1^0 = 0{,}207$, $P_2^0 = 0{,}407$, $P_3^0 = 0{,}406$.

Na podstawie tych obliczeń został utworzony zestaw danych dla analizy regresyjnej funkcji atrakcyjności tras przemieszczenia z domu do miejsca pracy, przetwarzanie którego pozwoliło uzyskać następujący model atrakcyjności (tab. 1):

$$y = 43{,}25 - 1{,}029 \cdot t_n - 9{,}227 \cdot \gamma_n - 10{,}443 \cdot C_n - 11{,}430 \cdot P \qquad (16)$$

Gdzie:

t_n – czas transportowy przemieszczenia komunikacją zbiorową z domu do miejsca pracy [min];

γ_n – współczynnik wypełnienia wnętrza przy wejściu do pojazdu;

C_n – cena (wartość) podróży z domu do miejscz pracy, hrn.;

P – liczba przesiadek dla wariantu trasy przemieszczenia.

Tabela 1. Charakterystyki współczynników regresji

Czynnik modelu regresyjnego	Współczynniki	Błąd standardowy	t-kryterium	P-wartość
Y-przecięcie	43,25	4,47	9,68	7,44E-21
Czas podróży	-1,03	0,09	-12,71	2,16E-33
Współczynnik napełnienia pojazdu	-9,23	3,07	-3,01	0,002706
Wartość podróży	-10,44	2,20	-4,75	2,47E-06
Liczba przesiadek	-11,43	2,33	-4,91	1,14E-06

Wymienione w tab. 1 współczynniki regresji okazały się istotnymi dla modelu. Jest to wystarczającą podstawą dla wykorzystania modelu atrakcyjności tras przemieszczenia (16), przy prognozowaniu prawdopodobieństwa wyboru przez pasażerów tras przemieszczenia w ramach modelu systemu komunikacji miejskiej za pomocą nowoczesnych narzędzi planowania transportu.

Podsumowanie i wnioski

Modele, opracowane na podstawie dyskretnego podejścia, potrzebują dla określenia wartości współczynników istotności czynników takiej metody obliczenia maksymalnej dokładności za pomocą binarnych wartości prawdopodobieństw wykorzystania alternatywnych tras podróży, która pozwala uzyskać pożądane rezultaty bez dokładnego badania procedury wyboru alternatyw, ponieważ zbiory tych alternatyw w procesie transportu mogą mieć bardzo znaczącą różnicę, wynikającą z różnych lokalizacji miejsc źródła i celu podróży. Wyniki wyboru przez pasażera alternatywy oparte są na uwzględnieniu właściwości rzeczywistych sposobów realizacji potrzeb przemieszczania, więc określa się względne wskaźniki atrakcyjności każdej alternatywy w celu oceny istotności czynników wyboru. Ostateczne wyniki opracowania modelu dyskretnego wyboru osiągnięto pod warunkiem bardzo rygorystycznych założeń o jednakowym rozkładzie składników losowych wszystkich czynników wyboru trasy przemieszczenia, a binarny charakter prawdopodobieństwa wejściowego dla modelu, utrudnia oszacowanie dokładności prognozowania prawdopodobieństw.

Zidentyfikowane prawidłowości zmiany czasu oczekiwania pojazdów na przystanku przy interwałowej metodzie obsługi pasażerów z losowym czasem odjazdu pozwoliły na zdefiniowanie konkretnego sensu składnika losowego efektywności przemieszczenia i również na analityczne rozwiązanie problemu określenia względnej atrakcyjności wariantów podróży za pomocą układu równań całkowych.

Zaproponowany model opisuje specyficzny obiekt transportowy z osobliwą metodą obsługi pasażerów, ale właśnie ten model pozwala uzyskać obiektywną charakterystykę nastawienia pasażerów do czynników przemieszczenia za pomocą określenia względnego charakteru alternatyw i obecności mechanizmu łączenia różnych pod względem kierunków i długości przemieszczeń w jeden zbiór dla analizy regresyjnej. W przedstawionym przypadku znaczącymi czynnikami wyboru przez pasażera wariantu trasy przemieszczenia do miejsca pracy okazały się: czas podróży komunikacją miejską, współczynnik napełnienia pojazdu w momencie wejścia do niego pasażera, cena (wartość) podróży z domu do miejsca pracy oraz liczba przesiadek dla wariantu trasy przemieszczenia.

Literatura

[1] Ortúzar J. de D., and L. G. Willumsen, Modelling Transport. John Wiley and Sons, Chichester, England, 2001.
[2] Ben-Akiva M., Discrete choice models with applications to departure time and route choice / M. Ben-Akiva, M. Bierlaire. – C.: Handbook of Transportation Science, 2003. – 32 p.
[3] Kjær T., A review of the discrete choice experiment / Kjær Trine. – D.: University Of Southern Denmark, 2005. – 143p.
[4] Ben-Akiva M., Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand (Transporta-tion Studies) / M. Ben-Akiva, S. Lerman. – Massachusetts: MIT Press. – 1985. – 10 p.
[5] McFadden D., Modeling the choice of residential location / McFadden Daniel. – Amsterdam: Uni-versity of California, Berkeley and Yale University, 1977.–34 p.
[6] Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2156, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2010, pp. 56 – 63.
[7] Вентцель Е. С., Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М. : Наука, 1988. – 480 с.
[8] Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2156, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2010, pp. 131 – 139.

MODELOWANIE WSKAŹNIKA MOTORYZACJI NA POZIOMIE KRAJOWYM

Kazimierz Jamroz
dr hab. inż., adiunkt, Katedra Inżynierii Drogowej, Politechnika Gdańska, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdansk, tel. +48 58 347 1147, e-mail: kjamroz@pg.gda.pl

Streszczenie. *Wskaźnik motoryzacji jest jedną z najczęściej używanych miar rozwoju motoryzacji w analizowanym kraju. Poziom motoryzacji zależy od wielu czynników: ekonomicznych, społecznych, przestrzennych, transportowych. W artykule przedstawiona będzie procedura modelowania zmian wskaźnika motoryzacji w zależności od wybranych czynników na poziomie makro. Przedstawiono także prognozę wskaźnika motoryzacji dla Polski do roku 2050.*

Słowa kluczowe: *rozwój motoryzacji, wskaźnik motoryzacji, modelowanie*

1. Wprowadzenie

System transportu wpływa na sposób funkcjonowania analizowanego obszaru (kraju, regionu, miasta), a także na wiele aspektów codziennego życia jego mieszkańców. Istotnym elementem systemu transportowego są pojazdy. Wiedza o liczbie pojazdów występujących obecnie lub przewidywanych w okresach prognostycznych jest przedmiotem klasycznego podejścia do analiz transportowych, tj. przy ustalaniu polityki transportowej, w systemie planowania i projektowania sieci drogowej. Informacja o przewidywanej liczbie pojazdów w nadchodzących horyzontach czasowych (na następne 10 – 30 lat) potrzebna jest organizacjom międzynarodowym (ONZ, Bank Światowy), rządom poszczególnych krajów, firmom produkującym samochody, firmom produkującym paliwa itp.

Modelowanie liczby pojazdów prowadzi się od wielu lat. Prace nad przygotowaniem modeli prognozowania liczby pojazdów rozpoczęły się w latach 50. ubiegłego wieku, ich prekursorami byli Rudd [14] i Chandler [2] oraz Tanner [15] bazując na danych brytyjskich. Następna seria prowadzona była w latach 70., kiedy to zaczęto wykorzystywać dane z wielu krajów. Na wyróżnienie, aż do obecnego okresu zasługują prace Tannera [15], Buttona [1], Dragay'a [3], Koornstra'y [7], [8], Oppe [10], [11], Medlock [9], Fosgerau [4], Hirota [5]. Opracowane modele dotyczyły: liczby właścicieli samochodów osobowych [12], [5], właścicieli pojazdów [3], liczby samochodów osobowych i liczby wszystkich pojazdów.

W krajach rozwiniętych studia dotyczące prognozowanej liczby pojazdów są dość dobrze rozwinięte i prognozy zmian poziomu motoryzacji są modelowane szczegółowymi modelami bazującymi na danych zdezagregowanych. Natomiast

w krajach rozwijających się bazuje się na danych makro ze względu na brak danych szczegółowych, zatem stosuje się makro modele liczby pojazdów [6].

W wielu krajach opracowano narodowe modele prognozowania liczby pojazdów wykorzystując modele zmian wskaźnika motoryzacji [3], [12]. W Polsce brakuje tego typu modelu, który mógłby być stosowany powszechnie do prognozowania liczby pojazdów zarówno w krótkich, jak i długich okresach czasu. Niestety nieliczne modele opracowane na początku obecnego wieku [11], [13] dają rozbieżne wyniki prognostyczne.

Celem niniejszego artykułu jest rozpoznanie istotnych czynników wpływających na poziom motoryzacji na obszarze kraju oraz propozycja makro modelu prognostycznego liczby pojazdów w Polsce, bazującego na zbiorze danych z wielu krajów świata.

2. Koncepcja modelu

Wykorzystując wyniki studiów literatury i badań własnych [6], opracowano koncepcję budowy makro modelu liczby pojazdów na poziomie krajowym. Ogólny model prognostyczny liczby pojazdów LP_{rp} (ogółem lub osobowych) opisano wzorem (1).

$$LP_{k,j,i} = LM_{j,i} \cdot WM_{k,j,i} \tag{1}$$

gdzie:

$LP_{k,j,i}$ – prognozowana liczba pojazdów k – tego rodzaju w kraju j, w roku i [mln poj./rok],

$LM_{j,i}$ – liczba mieszkańców w kraju j, w roku i [mln mk/rok],

$WM_{k,j,i}$ – prognozowany wskaźnik motoryzacji k – tego rodzaju pojazdów, w kraju j, w roku i [poj./1 tys. mk/rok].

Wskaźnik motoryzacji WM liczony jako stosunek liczby pojazdów do liczby mieszkańców jest miarą poziomu motoryzacji występującego na analizowanym obszarze. W roku 2008 wskaźnik motoryzacji pojazdów ogółem wynosił przykładowo (liczony w pojazdach/1 tys. mieszkańców): od 6 w Bangladeszu, poprzez 70 w Indiach i Chinach do 546 w Polsce, 852 w USA i 1006 w Nowej Zelandii. Świadczy to o dużym zróżnicowaniu poziomu motoryzacji w poszczególnych krajach.

Koncepcję budowy modelu wskaźników motoryzacji oparto na koncepcji zachowania systemów samoregulujących się z nasyceniem [8]. Ogólny model wskaźnika motoryzacji ma postać:

$$WM_{k,j,i} = WM_{max,k,j} \cdot f\left(ZN_{k,j,i}\right) \tag{2}$$

gdzie:

$WM_{k,j,i}$ – prognozowany wskaźnik motoryzacji k-tego rodzaju pojazdów w j-tym kraju, i-tym roku [poj/1 tys. mk/rok],

$WM_{max,k,j}$ – wskaźnik nasycenia pojazdami k-tego rodzaju pojazdów w j-tym kraju, i-tym roku [poj/1 tys mk/rok],

$ZN_{k,j,i}$ – zbiór zmiennych niezależnych, wpływających istotnie na wielkość wskaźnika motoryzacji k-tego rodzaju pojazdów w j-tym kraju, i-tym roku.

3. Modele wskaźnika motoryzacji

W modelowaniu wskaźnika motoryzacji występują trzy istotne problemy naukowe, dotyczące doboru:

- parametru skali,
- poziomu nasycenia pojazdami,
- kształtu funkcji aproksymującej.

3.1. Dobór parametru skali modelu

Najczęściej zmiany liczby pojazdów i wskaźnika motoryzacji przedstawiane są w skali czasu, ale zmienność ich jest bardzo powolna i modelowanie wymaga zebrania danych z bardzo szerokiego przedziału czasu. Dane w szerokim, wystarczającym do modelowania przedziale dostępne są tylko dla niektórych krajów [165]. Autor dysponował ograniczonym zakresem danych, ale dla wielu krajów o zróżnicowanym poziomie ryzyka. Na podstawie analizy literatury i prac własnych wytypowano trzy parametry skali: wskaźnik czasu T, jednostkowy parytet siły nabywczej JPSN i wskaźnik rozwoju społeczno – gospodarczego HDI, które charakteryzują się następującymi zaletami:

- wskaźnik czasu T umożliwia analizę zamian: jednostkowego produktu brutto JPSN i wskaźnika motoryzacji WMP w poszczególnych latach; wadą tego wskaźnika jest jego mała zmienność w okresie analizy,
- wskaźnik JPSN umożliwia prognozowanie (niezależnie od czasu) wskaźnika rozwoju społeczno - gospodarczego HDI, a także dokładne obrazowanie zmian dla stanu prognozowanego mierzonego innymi wskaźnikami, także wskaźnika motoryzacji WM; wadą wskaźnika JPSN jest skracanie skali wraz ze zmniejszaniem wartości liczbowej wskaźnika,
- wskaźnik HDI umożliwia symulację i analizę zmian stanu motoryzacji w poszczególnych stanach rozwoju społeczno – ekonomicznego kraju (niezależnie od czasu); wadą tego wskaźnika jest mocne skrócenie skali wraz ze wzrostem wartości tego wskaźnika (w przedziale HDI $>$ 0,9 znajduje się bardzo duża liczba krajów).

Na podstawie przeprowadzonych analiz przyjęto JPSN jako parametr skali (oś x).

3.2. Dobór poziomu nasycenia pojazdami

Analiza przebiegu zmian wskaźnika motoryzacji WM wskazuje, że wartości liczbowe tego wskaźnika zmierzają stycznie do prostej (asymptoty lub stycznej) równoległej do osi skali (wskaźnika JPSN) co wskazuje, że zależność ta należy do rodziny systemów z nasyceniem charakterystyk. Jednakże poszczególne kraje osiągną różne poziomy nasycenia pojazdami. Bardzo istotnym problemem badawczym do rozwiązania jest zatem określenie wielkości maksymalnej wskaźnika motoryzacji $WM_{max.}$

W dotychczasowej praktyce najczęściej przyjmowano maksymalny poziom nasycenia pojazdami ogółem $WMPO_{max}$ w wysokości 1000 poj/1 tys. mk/rok [13], a samochodami osobowymi $WMSO_{max}$ na poziomie 500 do 650 so/1 tys. mk/rok [4], [11]. Natomiast Dragay [3] poziom nasycenia pojazdami w danym kraju uzależnił od poziomu nasycenia pojazdami w USA ($WMP_{max,USA} = 850$ poj/1 tys. mk/rok oraz $WMSO_{max,USA} = 620$ poj./1 tys. mk/rok), który to poziom modyfikował współczynnikami zależnymi od gęstości ludności oraz stopnia urbanizacji, uzyskując maksymalne wielkości WMP_{max}: 850 w USA, ok. 800 we Francji, Indonezji i w Chinach oraz prawie 700 poj/1 tys. mk/rok w Indiach [3].

Autor zaproponował własną metodę szacowania poziomu nasycenia pojazdami w poszczególnych krajach. Strukturę opracowanego przez autora modelu wykładniczego, maksymalnego nasycenia pojazdami opisano wzorem (3).

$$WM_{max,k,j} = \frac{WMbaz_k \cdot WRM_{k,j}}{\exp(\beta_1 \cdot \ln(GLM_{max,j})^{\beta_2} + \beta_3 \cdot \ln(PO_j) + \beta_4 * \ln(ULM_{max,j}))} \qquad (3)$$

gdzie:

$WM_{max,k,j}$ – prognozowany wskaźnik nasycenia motoryzacją k-tego rodzaju pojazdów w j-tym kraju [poj./1tys. mk],

$WM_{baz,k}$ – bazowy wskaźnik nasycenia motoryzacją pojazdów k-tego rodzaju pojazdów [poj./1tys. mk],

$WRM_{k,j}$ – wskaźnik warunków rozwoju motoryzacji k-tego rodzaju pojazdów, w j-tym kraju,

GLM_{baz} – maksymalna gęstość zaludnienia w j-tym kraju (do roku 2050) [mk/100 km^2],

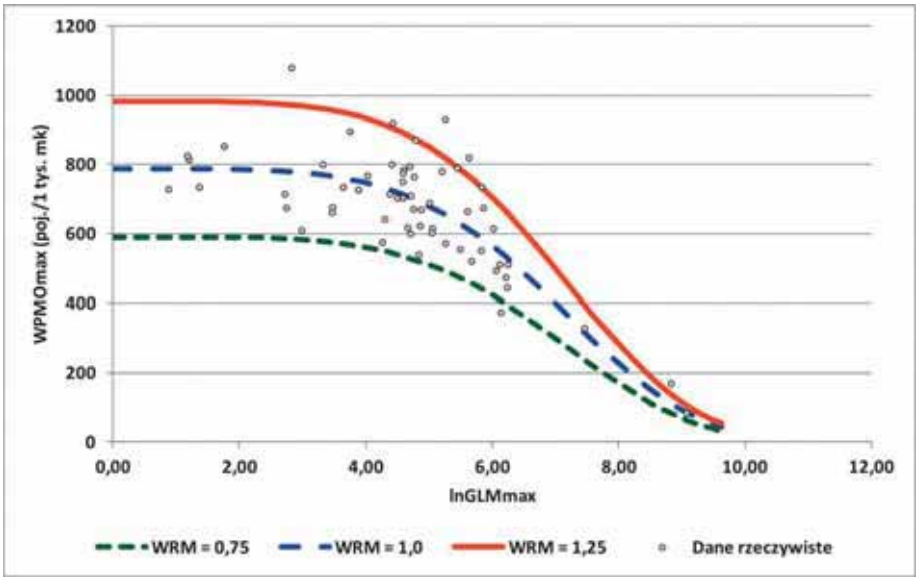
ULM_{max} – maksymalny stopień urbanizacji, wyrażony liczbą mieszkańców mieszkających w miastach w j-tym kraju (do roku 2050) [%],

PO_j – powierzchnia kraju j, [km^2],

$\beta_0, \beta_1, \ldots \beta_n$ - współczynniki równania.

Współczynniki równania dobrano za pomocą programu STATISTICA [16], uzyskując dla danych istniejących z kilkudziesięciu krajów świata, $R^2_{sk} = 0{,}58 - 0{,}99$ w zależności od liczby zmiennych niezależnych użytych w modelu. Najbardziej istotnymi zmiennymi niezależnymi wpływającymi na poziom nasycenia motoryzacją w danym kraju i jego zmiany są zmienne ilościowe: maksymalna gęstości zaludnienia $GLM_{max.}$, powierzchnia kraju PO, maksymalny stopnień urbanizacji

kraju ULM_{max}, a także zbiór indywidualnych czynników sprzyjających rozwojowi motoryzacji w danym kraju, wyrażonym jakościowo za pomocą tzw. wskaźnika rozwoju motoryzacji WRM jako zmiennej jakościowej reprezentującej strategię funkcjonowania systemu transportowego kraju. Przykład przebiegu otrzymanych funkcji przedstawiony na rys. 1.



Rys. 1. Wykres zależności wartości liczbowych maksymalnego wskaźnika motoryzacji pojazdów ogółem $WMPO_{max}$ w zależności od gęstości maksymalnej mieszkańców GLM_{max} i wskaźnika rozwoju motoryzacji WRM

Zasadniczy wpływ na poziom nasycenia motoryzacją ma przede wszystkim gęstość zaludnienia, wraz z jej wzrostem zmniejsza się wskaźnik motoryzacji. Duży wpływ na poziom wskaźnika motoryzacji ma także powierzchnia kraju, im większa powierzchnia kraju tym niższy wskaźnik motoryzacji w szczególności samochodów osobowych. Można to wytłumaczyć faktem, że w przypadku rozległych krajów wzrasta wykorzystanie innych środków transportu (kolej, transport powietrzny). Mniejszy wpływ na poziom wskaźnika motoryzacji ma stopień urbanizacji kraju, jednak można stwierdzić, że wraz ze wzrostem poziomu urbanizacji rośnie nieznacznie wskaźnik motoryzacji szczególnie samochodów osobowych. Istotnym jest także zbiór czynników reprezentujących politykę transportową kraju, poziom rozwoju innych systemów transportu, zachowania transportowe mieszkańców itp. wyrażony wskaźnikiem rozwoju motoryzacji WRM (rys.1).

3.3. Dobór kształtu funkcji aproksymującej wskaźnik WM

Przebiegi rzeczywistych zmienności wskaźnika motoryzacji WM wskazują na essowy przebieg funkcji aproksymującej dane rzeczywiste, tzn. po początkowym okresie wzrostu krzywej zależności następuje jej przegięcie, a potem następuje pro-

ces stopniowego wygaszania przyrostu. Z analizy literatury [8, 11], Ogut [12] wynika, że dobrze tę zależność modelują: funkcja potęgowa, funkcja logistyczna i funkcja Gompertza. Zatem do dalszych analiz przyjęto te funkcje. Różnią się one kształtem (np. wypukłość, punkty przegięcia, krzywizna), dlatego można te charakterystyki wykorzystać do doboru funkcji.

Model potęgowy (WM-1). Struktura uzyskanego modelu (dla dostępnych danych reprezentujących zmienne niezależne) opisana jest wzorem (4).

$$WM_{k,j,i} = WM_{max,k,j} \cdot (1 + JPSN_{j,i}^{\beta_2} \cdot HDI_{j,i}^{\beta_3} \cdot (\ln GLM_{j,i})^{\beta_4} \cdot (lnULM_{j,i})^{\beta_5} \cdot UGR_{j,i}^{\beta_6} \cdot WB_{j,i}^{\beta_7})^{\beta_0} \quad (4)$$

Model logistyczny (WM-2). Struktura uzyskanego modelu (dla dostępnych danych reprezentujących zmienne niezależne) opisana jest wzorem (5).

$$WM_{k,j,i} = \frac{WM_{max,k,j}}{(1 + \beta_0 \cdot \exp(\beta_2 \cdot JPSN_{j,i} + \beta_3 \cdot HDI_{j,i} + \beta_4 \cdot \ln(GLM_{j,i}) + \beta_5 \cdot \ln(ULM_{j,i}) + \beta_6 \cdot UGR_{j,i}))} \quad (5)$$

Model Gompertza (WM-3). Struktura uzyskanego modelu (dla dostępnych danych reprezentujących zmienne niezależne) opisana jest wzorem (6).

$$WM_{k,j,i} = WM_{max,k,j} \cdot exp(\beta_0 \cdot exp(\beta_2 \cdot JPSN_{j,i} + \beta_3 \cdot HDI_{j,i} + \beta_4 \cdot \ln(GLM_{j,i}) + \beta_5 \cdot \ln(ULM_{j,i}) + \beta_6 \cdot UGR_{j,i})) \quad (6)$$

gdzie:

$WM_{k,j,i}$ – prognozowany wskaźnik motoryzacji k-tego rodzaju pojazdów w j-tym kraju, i-tym roku [poj/1 tys. mk/rok],

$WM_{max,k,j}$ – prognozowany wskaźnik nasycenia motoryzacją k-tego rodzaju pojazdów w j-tym kraju [poj./1tys. mk],

$JPSN_{max,k,j}$ – jednostkowy produkt narodowy brutto w j-tym kraju [tys ID/ mk/ rok],

$HDI_{j,i}$ – wskaźnik rozwoju społeczno – ekonomicznego w j-tym kraju, i-tym roku,

$GLM_{j,i}$ – gęstość zaludnienia w j-tym kraju, i-tym roku [mk/100 km^2],

$ULM_{j,i}$ – stopień urbanizacji, wyrażony liczbą mieszkańców mieszkających w miastach w j-tym kraju, i-tym roku [%],

$UGR_{j,i}$ – udział gruntów ornych w j-tym kraju, i-tym roku [%],

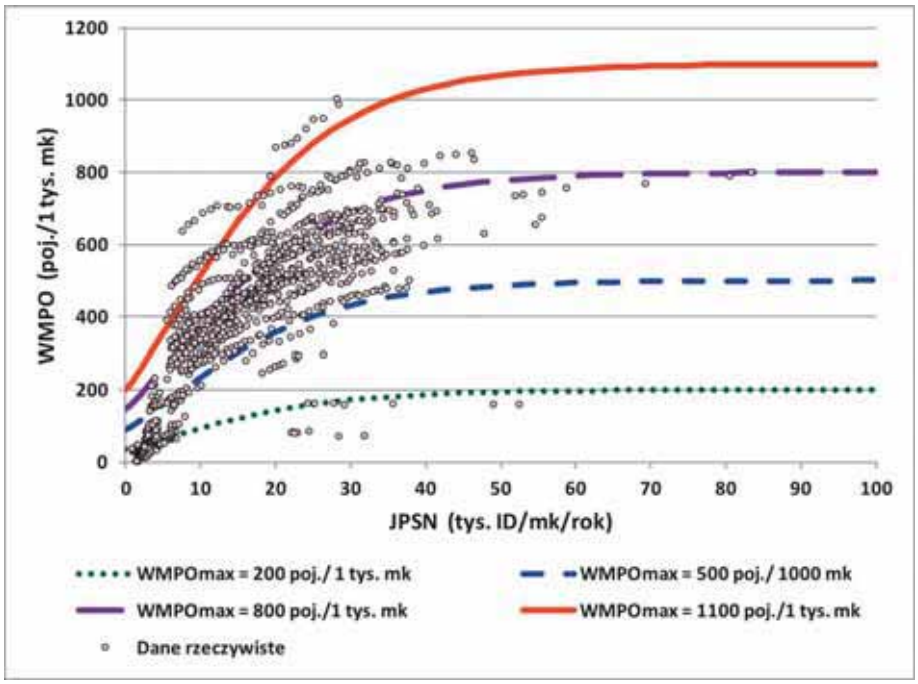
$WB_{j,i}$ – wskaźnik bezrobocia w j-tym kraju, i-tym roku [%],

$\beta_{0,k}, \beta_{1,k}, \ldots \beta_{n,k}$ – współczynniki równania.

Współczynniki równania dobrano za pomocą programu STATISTICA [16], uzyskując dla danych istniejących $R^2_{sk} = 0{,}83 – 0{,}94$ w zależności od rodzaju modelu i liczby zmiennych niezależnych użytych w modelu. Najbardziej istotnymi zmiennymi niezależnymi wpływającymi na poziom wskaźnika motoryzacji w danym kraju i jego zmiany są: poziom nasycenia pojazdami WM_{max} i jednostkowy

produkt narodowy brutto mieszkańców JPSN. Istotnymi czynnikami wpływającymi na poziom wskaźnika motoryzacji są także: wskaźnik rozwoju społeczno – motoryzacyjnego HDI, gęstość zaludnienia GLM, udział ludności mieszkającej w miastach ULM, udział gruntów rolnych UGR i wskaźnik bezrobocia WB. Ponadto stwierdzono, że przebieg zmian wskaźnika motoryzacji dla samochodów osobowych jest podobny do przebiegu zmian wskaźnika motoryzacji pojazdów ogółem. Przedstawione modele umożliwiają prognozowanie wskaźnika motoryzacji dla różnych poziomów nasycenia pojazdami (od bardzo małego np. Hong Kong do bardzo dużego np. Nowa Zelandia) i różnych strategii transportowych.

Przykład przebiegu otrzymanych funkcji modelujących wskaźnik motoryzacji pojazdów ogółem WMPO przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Wykres zależności wartości wskaźnika motoryzacji ogółem WMPO obliczonego za pomocą modelu z funkcją Gompertza

Każdy z opracowanych modeli umożliwia opis zmian wskaźnika motoryzacji wybranej grupy krajów, a ponadto modele te charakteryzują się tym że:

- dla JPSN < 5 tys. ID, następuje dość wolny przyrost wskaźnika motoryzacji, w tym zakresie dobrze dane rzeczywiste opisują modele potęgowe,
- dla JPSN 5 – 20 tys. ID, następuje bardzo szybki przyrost wskaźnika motoryzacji, w tym zakresie dobrze dane rzeczywiste opisują wszystkie analizowane modele,
- dla JPSN > 20 tys. ID, następuje coraz wolniejszy przyrost wskaźnika motoryzacji, w tym zakresie model Gompertza bardzo szybko, a model logi-

styczny nieco wolniej osiągają asymptotę (WM_{max}), natomiast model potęgowy powoli zmierza do wartości maksymalnej (WM_{max}).

4. Prognoza wskaźnika motoryzacji dla Polski

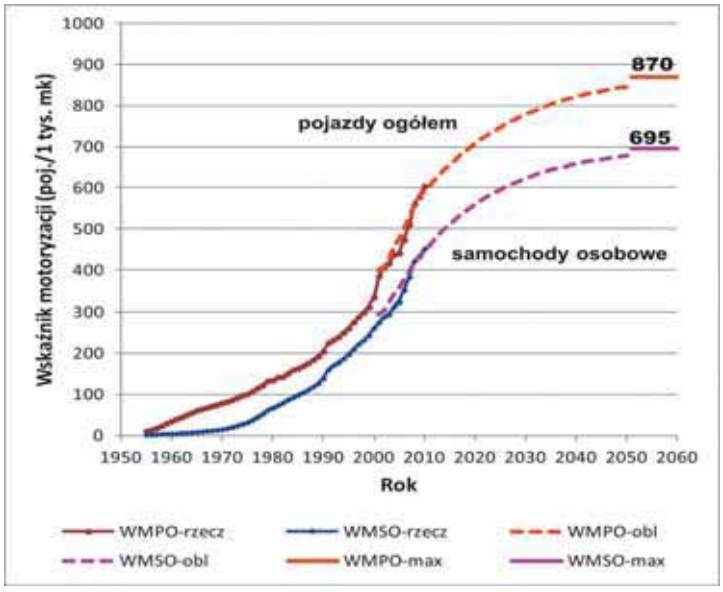
Przyjmując model WM-3 opisany funkcją Gompertza, opracowano prognozę wskaźnika motoryzacji dla Polski do roku 2050. Do budowy tego modelu przyjęto scenariusz minimalnego rozwoju społeczno - ekonomicznego. Prognozę liczby ludności LM i udziału ludności mieszkającej w miastach ULM przyjęto na bazie prognoz ONZ i WHO. Prognozę JPSN, HDI i UGR przyjęto na bazie własnych modeli [6].

Na podstawie przeprowadzonych analiz oszacowano stopień nasycenia pojazdami, który może wynieść w przypadku:

- pojazdów ogółem – 870 poj/1 tys. mk,
- samochodów osobowych – 695 poj/1 tys. mk.

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki uzyskanej prognozy. Analizując otrzymane wyniki, można stwierdzić, że:

- Polska należy do grupy krajów o bardzo wysokim stopniu rozwoju motoryzacji, czego wynikiem są spodziewane bardzo duże wskaźniki motoryzacji,
- model Gompertza dobrze odwzorowuje zmiany przebiegu wskaźnika motoryzacji, zatem najbliższe lata powinny przynieść przyhamowanie wzrostu wskaźnika motoryzacji, a w następnych kilkudziesięciu latach ustabilizowanie jego wielkości.



Rys. 3. Prognoza wskaźnika motoryzacji pojazdów ogółem i samochodów osobowych dla Polski do roku 2050

5. Wnioski

Przedstawione w artykule wyniki studiów literatury i prac własnych wskazują, że:

1. Poziom motoryzacji wzrasta gwałtownie w początkowym okresie wzrostu gospodarczego analizowanego kraju (JPSN < 20 tys. ID/mk) i zależy od wielkości produktu narodowego brutto przypadającego na jednego mieszkańca.
2. Po przekroczeniu średniej wartości JPSN, wskaźnik motoryzacji wzrasta coraz wolniej i zmierza do poziomu nasycenia, który zależy od gęstości zaludnienia GLM, powierzchni kraju PO i stopnia urbanizacji mierzonej udziałem liczby mieszkańców mieszkających w miastach ULM.
3. Zmiany wskaźnika motoryzacji dobrze modelują: funkcja potęgowa, funkcja logistyczna i funkcja Gompertza, które uzależniają jego wielkości od poziomu nasycenia motoryzacją w danym kraju WRM, jednostkowego produktu narodowego brutto JPSN, wskaźnika rozwoju społeczno – ekonomicznego HDI, gęstości zaludnienia GLM, udziału ludności mieszkającej w miastach ULM, udział gruntów rolnych UGR i wskaźnika bezrobocia WB.
4. Zaproponowany model umożliwia oszacowanie docelowego wskaźnika motoryzacji dla Polski. W przypadku minimalnego scenariusza rozwoju społeczno – gospodarczego ekonomicznego kraju można się spodziewać bardzo wysokiego poziomu nasycenia pojazdami: 870 poj. ogółem /1 tys. mk i 695 sam. os. na 1 tys. mk.
5. Spodziewane w Polsce znacznie wyższe wskaźniki motoryzacji, niż w wielu krajach europejskich, a także dobre warunki sprzyjające rozwojowi motoryzacji, powinny skłonić decydentów zarządzających systemem transportowym kraju do zwrócenia większej uwagi na rozwój innych alternatywnych gałęzi transportu.

Biorąc to pod uwagę, należy prowadzić dalsze prace badawcze, w celu uszczegółowienia zaproponowanych modeli wskaźników motoryzacji dla Polski, a także przeprowadzić ich implementacje dla obszarów województw, powiatów i miast.

Literatura

[1] Button K.J., Ngoe N., Hine J., Modelling Vehicle Ownership and Use Low Income Countries. Journal of Transport, Economic and Policy, No XXVII, 1993.
[2] Chandler K.N., Traffic Trends. Road Research Laboratory RN 3174, 1958.
[3] Dargay J., Gately D., Sommer M.,Vehicle Ownership and Income Growth, Worldwide: 1960-2030. Institute for Transport Studies, University of Leeds 2007, Leeds, England
[4] Fosgerau M., Dynamic time series models for Danisch car ownership and use. Danish Transport Research Institute 2008.

[5] Hirota K., Passenger Car Ownership Estimation toward 2030 in Japan -BAU Scenario with Socio-Economic Factors. Studies in Regional Science, Vol.37, No.1, 2007, 25-39.
[6] Jamroz K., Metoda zarządzania ryzykiem w inżynierii drogowej. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2011.
[7] Koornstra M.J., Changing Choices. Psychological Relativity Theory. Leiden University Press, 2007.
[8] Koornstra M., Prediction of traffic fatalities and prospects for mobility becoming sustainable - safe. Sadhana Vol. 32, Part 4, August 2007, pp. 365 -395, Prinred in India.
[9] Medlock K.B., Soligo R., Car Ownership and Economic Development with Foresacts to the Year 2015. Journal of Transport Economisc and Policy, Voluem36, Part 2, pp. 163 - 188.
[10] Oppe S., Koornstra M.,Traffic and traffic safety in Central Europiean Countries. 17th International Study Week on Traffic Engineering and Safety, Warsaw 1992.
[11] Oppe S.,Traffic safety developments in Poland. SWOV Institute for Road Safety Research, Leidschendam, The Netherland 2001.
[12] Ogut K.S., S-Curve Models to Determine the Car Ownership in Turkey. ARI The Bulletin of the Istanbul Technical University Vol. 54, No 2, 2004.
[13] Radkowski S., Podstawy bezpiecznej techniki. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.
[14] Rudd E., The Relationship between the National Income and Vehicle Registrations. Road Research Laboratory, RN 1518, 1951.
[15] Tanner J.C., An Analysis of Increase in Motor vehicles in Great Britain and the United State. Road Research Laboratory, Department of the Environement RN 3340, 1958.
[16] StatSoft, Statistica - przewodnik. StatSoft Inc. Kraków 2008.

WYKORZYSTANIE FUNKCJI OPORU PRZESTRZENI W PROGRAMOWANIU ROZBUDOWY SIECI DRÓG ROWEROWYCH W KRAKOWIE[1]

Łukasz Kowalski
mgr, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ, Zakład GLOiR, ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków, tel. +48 12 664 5259, e-mail: lukasz.kowalski@uj.edu.pl

Anna Łobodzińska
Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ, Zakład GLOiR, ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków, tel. +48 12 664 5259, e-mail: e-mail: anna.lobodzinska@uj.edu.pl

Gergő Szabó
mgr, Instytut Geografii, Szkoła Doktorska Nauk o Ziemi, Uniwersytet w Pécs, 7624 Pécs, Ifjúságútja 6. Węgry, e-mail: szabogeo@gamma.ttk.pte.hu

Streszczenie. *Celem artykułu jest ustalenie, w jakiej kolejności powinny powstawać odcinki tras rowerowych w Krakowie. W oparciu o model grawitacji autorzy skonstruowali model lokalizacji nowych odcinków w sieci uwzględniający potencjalne przepływy między miejscami zamieszkania a: centrum, miejscami pracy, liceami ogólnokształcącymi i uczelniami. Jako funkcję oporu odległości zastosowano funkcję eksponencjalną. Za podstawowe zasady, które powinna spełniać prawidłowo zaprojektowana sieć dróg rowerowych, uznano spójność i bezpośredniość.*

Poszczególne cechy użyte w konstrukcji modelu sprowadzono do centroidów lub ich rzeczywistych lokalizacji punktowych. Pomierzone wartości oddziaływań pomiędzy nimi poddano standaryzacji, a następnie zsumowano, uzyskując sumaryczny wskaźnik określający znaczenie danego odcinka w sieci dla wszystkich badanych typów przemieszczeń.

Na podstawie wartości wskaźnika sumarycznego oraz położenia odcinka w sieci dróg rowerowych zaproponowano kolejność, w jakiej powinny powstawać nowe fragmenty sieci. Priorytet nadano odcinkom, których wartości wskaźnika sumarycznego są wysokie i które przyczynią się do zwiększenia spójności i bezpośredniości sieci oraz stosunkowo krótkim trasom o niższych wartościach, które uzupełniają istniejącą sieć.

Skonstruowany przez autorów model jest narzędziem umożliwiającym podejmowanie decyzji dotyczących kolejności lokalizacji nowych odcinków sieci dróg rowerowych oraz modernizacji istniejących. Uwzględnienie przepływów potencjalnych zamiast rzeczywistych pozwala uniknąć faworyzowania ciągów, w których istnieją już odcinki sieci. Ponadto model z jednej strony zakłada jednakowe traktowanie wszystkich mieszkańców, z drugiej jednak - umożliwia nadanie priorytetu konkretnej grupie przez zmianę wag przy wskaźniku sumarycznym.

Słowa kluczowe: *model lokalizacji, model grawitacji, sieć ścieżek rowerowych, ruch rowerowy, funkcja oporu odległości*

1 Wkład procentowy poszczególnych autorów: Kowalski Ł.: 40%, Łobodzińska A.: 30%, Szabó G.: 30%. Artykuł został w całości opublikowany pn. *Metoda oceny kolejności realizacji tras rowerowych*, w czasopiśmie naukowo-technicznym pt. Transport Miejski i Regionalny, w nr 9/2012. W tej wersji autorzy uwypuklili zagadnienia związane z funkcją oporu odległości.

1. Wprowadzenie

W 2011 roku długość krakowskiej sieci tras rowerowych wynosiła 108 km (ZIKiT). Wg Mapy Tras rowerowych 2009/2010 [1], w 2015 roku w Krakowie będzie 250 km ścieżek rowerowych, docelowo miasto będzie dysponować siecią o łącznej długości 600 km. Tak duże inwestycje w infrastrukturę rowerową powinny być starannie zaplanowane i zorganizowane. Wg standardów holenderskiej organizacji technicznej CROW, sieć dróg rowerowych powinna być spójna, bezpośrednia, atrakcyjna, bezpieczna, wygodna i komfortowa [2]. Istotną kwestią pozostaje również zaplanowanie, w jakiej kolejności powinny powstawać planowane odcinki - te najbardziej potrzebne powinny być zbudowane jako pierwsze. Przykładowo, budowa dłuższego odcinka na peryferiach sieci lub oderwanego od niej, daje znacznie mniejsze korzyści niż wybudowanie odcinka krótkiego, ale pełniącego funkcję „łącznika" w istniejącym systemie i na obszarze o dużym zapotrzebowaniu (np. w centrum miasta).

Celem artykułu jest ustalenie, w jakiej kolejności powinny w Krakowie powstawać planowane odcinki sieci dróg rowerowych. Autorzy stworzyli teoretyczny model przemieszczeń rowerzystów i wykorzystali go do wskazania w jakiej kolejności powinny powstawać trasy rowerowe. Badania mają charakter aplikacyjny do planowania rozwoju sieci, które są jeszcze niekompletne i tak jak w przypadku sieci ścieżek rowerowych, oderwane od siebie.

2. Metoda

Autorzy stworzyli model wyznaczania kolejności budowy nowych odcinków bazujący na modelu grawitacji i specjalnie do tego celu dobranych funkcjach oporu odległości. Założyli, że cała planowana sieć rowerowa już istnieje i korzystając z modelu grawitacji oszacowali potencjalne przepływy rowerzystów pomiędzy: miejscami zamieszkania a centrum miasta (reprezentowanym przez Rynek Główny), miejscami zamieszkania ludności w wieku produkcyjnym a miejscami pracy[2], miejscami zamieszkania ludności w wieku 16-18 lat a liceami ogólnokształcącymi oraz pomiędzy domami studenckimi a budynkami wybranych uczelni. Przyjęli, że liczba oddziaływań między dwoma badanymi punktami spada wraz ze wzrostem odległości między nimi. Do obliczenia siły tych oddziaływań wykorzystali model grawitacji o wzorze:

$$G = M_1 M_2 P \qquad (1)$$

gdzie:

M - masa punktów 1 i2, pomiędzy którymi mierzone jest oddziaływanie,

P - funkcja oporu odległości.

2 Miejsca pracy rozumiane są jako liczba zatrudnionych w danej jednostce urbanistycznej. Zmierzono oddziaływania potencjalne, a zatem między mieszkańcami wszystkich jednostek urbanistycznych i wszystkimi miejscami pracy.

Jako funkcję oporu odległości autorzy wykorzystali ujemną funkcję eksponencjalną. Inspiracją był dla nich wzór wyznaczony przez J. Larsen i in. [4] oparty o badania prowadzone w Montrealu.Badania z Montrealu [4], jak również inne przeprowadzone przez M. Iacono i in. [5] dla Minneapolis–Saint Paul pokazały, że liczba podróży rowerowych spada wraz ze wzrostem odległości, rowerzyści są skłonni do przemierzania większych odległości w przypadku dojazdów do pracy, niż do szkół czy placówek usługowych.

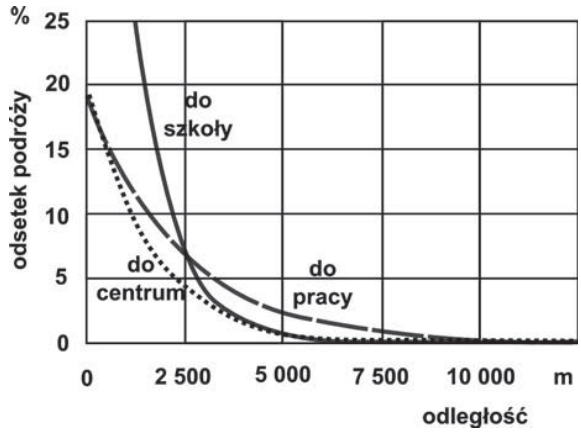
Na potrzeby badań krakowskiej sieci rowerowej przyjęto, że funkcja oporu odległości w zależności od celu podróży przyjmuje postać:

a) do centrum: $P_c = 19.877 \exp(-0.0006\, x)$,
b) do pracy: $P_p = 18.641 \exp(-0.0004\, x)$,
c) do szkół: $P_s = 87.983 \exp(-0.001\, x)$,

gdzie:

P - odsetek dojazdów do celu w zależności od odległości x.

W przypadku dojazdów do centrum posłużono się wzorem funkcji dojazdu do obiektów czasu wolnego [4].



Rys. 1. Funkcja oporu odległości w zależności od celu podróży rowerzystów
Źródło: Opracowanie własne na podstawie Larsen i in. 2010 [4]

Zgodnie z przyjętą funkcją oporu odległości, przeważająca większość podróży do pracy odbywa się na odległość mniejszą niż 5 km, natomiast do centrum i do szkół - mniejszą niż 3,5 km (rys. 1). Niewielu rowerzystów odbywa podróże dłuższe niż 10 km. Podobne wyniki i krzywe oporu odległości uzyskali M. Iacono i in. (dla Minneapolis–Saint Paul) [5] oraz E. Adjei [6] (dla miasta Pune w Indiach).

J. Larsen i in. [4] oszacowali, że średni dystans dojazdu do pracy wynosi 3,9 km, do centrum miasta – 3,4 km, a do szkoły – 2,3 km. Zbliżone wyniki otrzymano w badaniach prowadzonych w Polsce [7], [8], [9], dlatego też autorzy zadecydowali o wykorzystaniu zaproponowanej przez J. Larsen i in. [4] funkcji oporu odległości jako wiernie odzwierciedlającej rzeczywiste zachowania. Zgodnie z ra-

portem z badań przeprowadzonych przez firmę Obserwator [7] na 1048 rowerzystach w miastach powyżej 400 tysięcy mieszkańców, 38 % ankietowanych dojazd do pracy zajmuje mniej niż 15 minut, 82 % mniej niż 30 minut, a 98 % mniej niż godzinę. Przyjmując, że średnia prędkość rowerzysty to 19,19 km/h[3] , 38 % ankietowanych dojeżdżałoby więc na odległość mniejszą niż 4,8 km, 82 % mniejszą niż 9,6 km, a 98 % - 19,2 km. Z kolei warszawskie badania ruchu [8] wskazują, że średni czas podróży rowerowej wynosi 24 minuty. W tym przypadku próba była jednak zdecydowanie mniejsza i tu wyniki należy traktować jako przybliżone.

Zaprezentowane wyniki badań nie odbiegają znacząco od przyjętej oszacowanej dla Montrealu funkcji oporu odległości, dlatego zdecydowano się na przyjęcie jej do zaprezentowanego dalej modelu lokalizacji nowych odcinków w sieci rowerowej.

Funkcje oporu odległości dla rowerzystów, uwzględniające różne cele podróży, występują w literaturze stosunkowo rzadko [4]. Wyjątkiem są zacytowane badania [4], [5]. Funkcja ta jest natomiast bardzo przydatna z punktu widzenia prognozowania ruchu, planowania obszarów obsługi placówek usługowych i innych punktów w przestrzeni miasta, w tym przystanków, jako elementów multimodalnego systemu transportowego [4], [5], [6]. Funkcja ta jest prosta i łatwa w interpretacji. Analizując wyniki pamiętać trzeba, że o jej różnym kształcie decydować mogą różne cechy przestrzeni wpływające na długość podróży i prędkość przemieszczania się rowerzysty, takie jak: struktura i morfologia miasta, znaczenie punktów docelowych, ich rzadkość w przestrzeni, rodzaj i jakość drogi – rowerzyści są skłonni podróżować na dalsze dystanse, jeśli mają do dyspozycji ścieżkę rowerową, jak również percepcja przestrzeni i poczucie odległości do celu.

3. Model

W celu ustalenia kolejności powstawania odcinków tras rowerowych w Krakowie, autorzy stworzyli model określający znaczenie poszczególnych odcinków w sieci. Oparli się oni na następujących danych:

- Mapa Tras Rowerowych 2009/2010 [1] - dane dotyczące planowanych odcinków dróg rowerowych. Na potrzeby konstrukcji modelu wszystkie odcinki uznano za istniejące.
- Eko EduBike Map z 2012r. [10] - sieć istniejących tras rowerowych. Nie wszystkie jednak odcinki przedstawione na tej mapie faktycznie istniały. Przeprowadzono dodatkowo badania terenowe, w celu weryfikacji danych z tej mapy.
- Baza internetowa StatKrak [11] - dane dotyczące liczby miejsc pracy - liczby zatrudnionych i demografii, wg jednostek urbanistycznych.
- Kuratorium Oświaty w Krakowie [12] - rozmieszczenie i liczba uczniów w publicznych liceach ogólnokształcących.

3 Średnia prędkość chwilowa rowerzystów w Krakowie wg Wolek [9]

– Informacji od jednostek zarządzających domami studenckimi - liczba miejsc w akademikach. W analizie dojazdów do uczelni uwzględniono cztery uniwersytety: Jagielloński, Ekonomiczny, Pedagogiczny i Rolniczy oraz Politechnikę Krakowską.

Postępowanie badawcze przeprowadzono według następujących etapów:

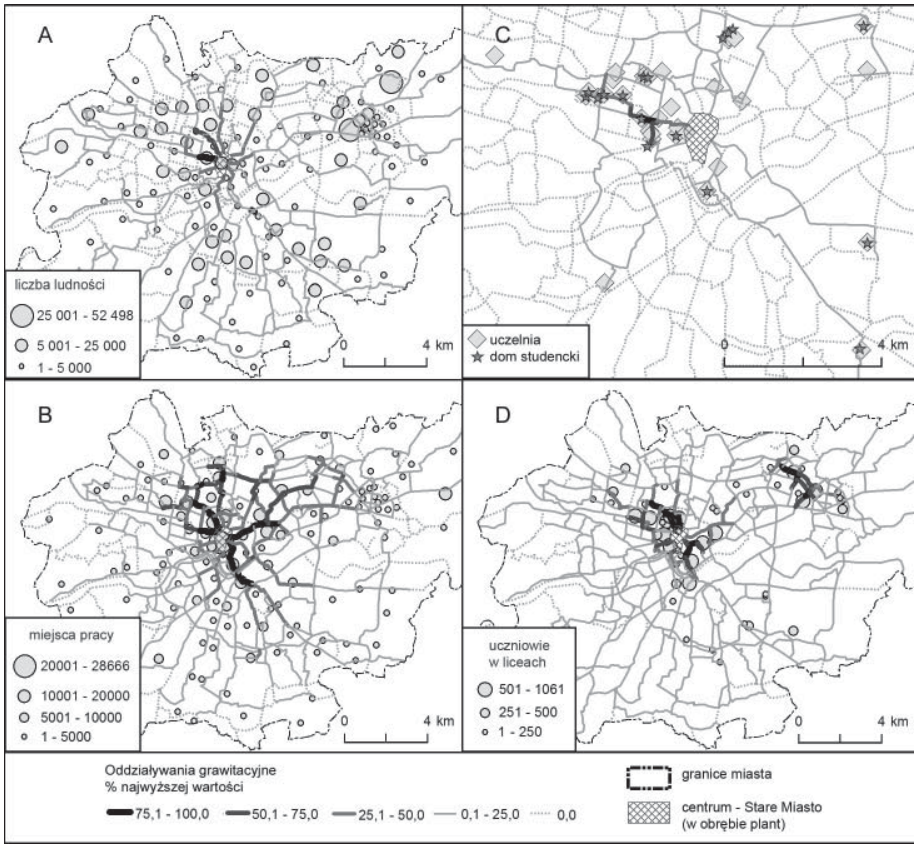
1) dokonano wyboru cech, w oparciu o które skonstruowano model: ogólna liczba ludności, liczba ludności w wieku produkcyjnym, liczba ludności w wieku 16-18 lat, liczba miejsc pracy, liczba miejsc w domach studenckich, liczba uczniów w publicznych liceach ogólnokształcących, rozmieszczenie domów studenckich, budynków uczelni, liceów ogólnokształcących,
2) wartości cech dla poszczególnych jednostek urbanistycznych sprowadzono do centroidów. Centroidy dotyczące liczby mieszkańców wyznaczano na podstawie zabudowy mieszkaniowej, a odnośnie miejsc pracy – na podstawie terenów przemysłowo-handlowo-usługowych. Pozostałe wartości przypisano do rzeczywistych lokalizacji obiektów (liceów ogólnokształcących, uczelni, domów studenckich),
3) w podróżach źródło – cel we wszystkich uwzględnionych typach przepływów brano pod uwagę najkrótszą możliwą ścieżkę. W pomiarach oddziaływań pomiędzy poszczególnymi punktami (np. centroidem miejsca zamieszkania i centroidem miejsca pracy) pominięto oddziaływania w ramach tej samej jednostki urbanistycznej,
4) wszystkim odcinkom „najkrótszych ścieżek" przypisano wynikające z modelu grawitacji wartości oddziaływania między dwoma punktami (jednakową wartość dla całej długości ścieżki),
5) dla każdego z typów przepływów zsumowano wartości poszczególnych ścieżek w taki sposób, że odcinek, przez który przechodziło *n* ścieżek otrzymał wartość sumy *n* oddziaływań między centroidami. Każdemu odcinkowi przypisano więc wartość liczbową określająca jego znaczenie w sieci w kontekście danego typu dojazdów,
6) wartości dla każdego rodzaju przepływów poddano standaryzacji, przyjmując wartość 100 dla wartości maksymalnej i 0 dla minimalnej,
7) zestandaryzowane wartości zsumowano, uzyskując sumaryczny wskaźnik, określający znaczenie danego odcinka w sieci dla wszystkich badanych typów przemieszczeń.

Mapy wynikowe przeanalizowano pod kątem spójności sieci rowerowej oraz z uwzględnieniem istniejących ścieżek, w wyniku czego wskazano odcinki, które powinny zostać wybudowane w pierwszej kolejności.

4. Wyniki

Analiza oddziaływań pomiędzy miejscami zamieszkania ludności Krakowa, a centrum (Rynkiem Głównym) wykazała, że najważniejsze z punktu widzenia

przemieszczeń rowerzystów na tej trasie są odcinki prowadzące z wielkich osiedli mieszkaniowych północnej części miasta (m.in. Krowodrza[4], Prądnik Biały i Czerwony, Górka Narodowa), odcinek A[5] (łączący z centrum m.in. Miasteczko Studenckie), a także fragmenty tras biegnących w stronę Łagiewnik i Woli Duchackiej oraz Nowej Huty (rys. 2A).



Rys. 2 Oddziaływania grawitacyjne
Źródło: opracowanie własne

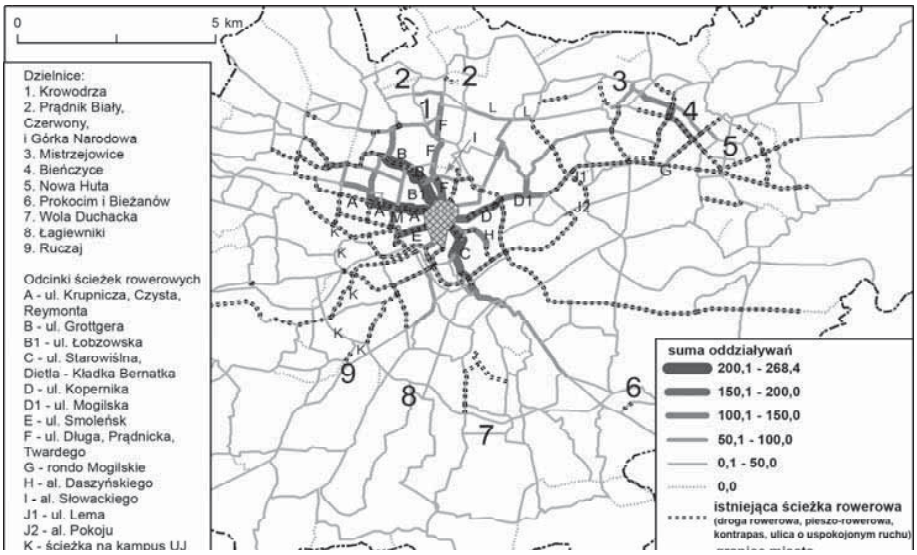
W przypadku dojazdów do centrum miasta, szczególnie wyraźny jest wpływ funkcji oporu odległości, która determinuje, jaka część mieszkańców będzie skłonna dotrzeć do tego celu na rowerze. Przykładem mogą być niskie wartości tras prowadzących w stronę centrum z Prokocimia, Bieżanowa czy Nowej Huty – jednostek urbanistycznych mających znaczne masy (liczby mieszkańców), ale położonych daleko od centrum Krakowa. Trasa Nowa Huta-centrum miasta (D) nabiera większego znaczenia przy oddziaływaniach miejsce zamieszkania – miejsce pra-

4 Dzielnice i osiedla przywoływane w artykule oznaczono na rysunku 3.
5 Wszystkie oznaczenia tras wyjaśnione zostały na rysunku 3.

cy (rys. 2B). Rozkład częstości w przypadku wartości dotyczących dojazdów do pracy jest bardziej wyrównany niż dla dojazdów do centrum, więcej jest też odcinków o wysokich wartościach standaryzowanych. System ścieżek, które w tym typie przemieszczeń otrzymały najwyższy priorytet, nawiązuje do koncentracji miejsc pracy w okolicach rond Mogilskiego i Grzegórzeckiego oraz przy ul. Armii Krajowej, jak również na Starym Mieście. Ponownie wyższe wartości uzyskały odcinki sieci w północnej części Krakowa ze względu na skupienie tam większej liczby mieszkańców i miejsc pracy. Ponadto istotne okazały się także trasy o przebiegu równoleżnikowym (L).

W dojazdach między domami studenckimi, a budynkami uczelni ponownie jako główna zarysowuje się ścieżka z Miasteczka Studenckiego do centrum Krakowa (w analizie tej pominięto domy studenckie i budynki AGH ze względu na niewielką odległość między nimi) (rys. 2C). Na uwagę zasługuje również przebieg wyznaczonej przez program najkrótszej ścieżki łączącej akademiki UJ na Miasteczku Studenckim z rozbudowywanym III Kampusem UJ (K). Trasa ta będzie miała coraz większe znaczenie.

Koncentracja liceów publicznych w centrum miasta oraz znaczna liczba uczniów tych szkół w Nowej Hucie (a w szczególności w dzielnicach Bieńczyce i Mistrzejowice) przekłada się na wysokie wartości ścieżek w tych rejonach Krakowa (rys. 2D).



Rys. 3 Sumaryczny wskaźnik oddziaływań grawitacyjnych
Źródło: opracowanie własne

Najwyższe wartości sumarycznego wskaźnika osiągnęły trasy oznaczone na rysunku 3 literami A–F. Należy zauważyć, że część z nich jest nieciągła – na ścieżce B brakuje odcinka B1 – ul. Łobzowska. Trasy C i F jeszcze nie istnieją. Trasy D i E to na niektórych odcinkach kontrapasy, a fragmenty tras A, D i M wymagają

modernizacji – ich aktualny stan zagraża bezpieczeństwu rowerzystów. Odcinki na przedłużeniach tych tras również osiągają wysokie wartości, przy czym niewiele z nich istnieje. Wysokie wartości na tych odcinkach podkreślają znaczenie centrum Krakowa, gdzie koncentrują się miejsca pracy, licea i uczelnie. Ciekawym przykładem jest ważny odcinek łącznikowy na ul. Oleandry (M). Istniejąca tam kiedyś ścieżka została zlikwidowana i przeznaczona na parking.

Wysokie wartości dla ścieżek w sąsiedztwie centrum wynikają z nakładania się wszystkich analizowanych oddziaływań. W Nowej Hucie jedynie dojazdy do centrum i uczelni nie wpływają znacząco na wartości ścieżek. Ścieżki w północnej części miasta (koncentrującej 2/3 mieszkańców Krakowa) charakteryzują wyższe wartości wskaźnika sumarycznego, niż odcinki usytuowane w słabiej zaludnionej południowej części (poza fragmentami tras prowadzących w stronę osiedli Ruczaj, Łagiewniki, Prokocim i Bieżanów). Wynika to z właściwości modelu – wartość oddziaływania źródło - cel podróży sumuje się na poszczególnych odcinkach i jest tym wyższa, im bliżej miejsca docelowego.

5. Model a rzeczywistość, czyli gdzie budować ścieżki rowerowe?

Na podstawie zaproponowanego modelu, z uwzględnieniem już istniejących tras rowerowych, autorzy proponują następujący tok podejmowania decyzji dotyczących budowy nowych odcinków sieci dróg rowerowych w Krakowie. Jako pierwsze wybudowane powinny być odcinki, których wartości wskaźnika sumarycznego są wysokie i które przyczynią się do zwiększenia spójności i bezpośredniości sieci. Przykładem są: ul. Mogilska (D1), przejazd przez Rondo Czyżyńskie (G) i fragment ul. Kopernika. Wybudowanie tych odcinków (o długości 1,2 km) pozwoli na przyłączenie do kompletnej sieci i do centrum około 115 tys. mieszkańców i 30 km tras rowerowych. Do tej kategorii należy również zaliczyć takie inwestycje, jak ścieżki B1, C i H.

W drugiej kolejności należy zwrócić uwagę na odcinki o niższych wartościach, ale bardzo krótkie, uzupełniające istniejącą sieć (np. I, J1 i J2). Następny priorytet powinien zostać przyznany długim odcinkom o wysokich wartościach, m.in. ścieżkom łączącym północną część Krakowa z centrum (F), trasom w dzielnicach Krowodrza i Bieńczyce oraz trasie C z Kazimierza do Starego Podgórza. W ostatniej kolejności powstawać powinny inne ścieżki o wartościach najwyższych z pozostałych, rozbudowujące istniejącą sieć dróg rowerowych.

Konfrontacja modelu z rzeczywistością wymaga jednak nie tylko zidentyfikowania „brakujących" odcinków, lecz również oceny stanu tras istniejących. Dużym problemem jest istnienie fragmentów „tras rowerowych" oznaczonych odpowiednimi znakami, a prowadzących wzdłuż chodników, ulic, ścieżek o zniszczonych nawierzchniach (np. odcinek D), co zagraża bezpieczeństwu ruchu. Typ budowanej infrastruktury powinien również uwzględniać potencjalne natężenie ruchu rowerowego, samochodowego i pieszych. W przypadku odcinków o intensywnym ruchu rowerowym (centrum, Nowa Huta) priorytetem powinna być budowa ścieżek rowero-

wych, na peryferiach Krakowa być może bardziej uzasadnione byłoby tworzenie ciągów pieszo – rowerowych. Na ulicach w strefach ruchu uspokojonego i o małym natężeniu ruchu samochodowego, w tym w centrum, często wystarczającym rozwiązaniem jest ułatwienie rowerzystom poruszania się po jezdni poprzez poprawę jej jakości, przesunięcie studzienek kanalizacyjnych, budowę kontrapasów lub wygodnych łączników. Tam, gdzie ruch samochodowy jest bardziej intensywny, zasadnym może być stosowanie śluz rowerowych i pasów ruchu dla rowerów. Rozwiązania powinny być dostosowane do lokalnej sytuacji.

6. Dyskusja metodyczna

Uwzględnienie w konstrukcji modelu przemieszczeń potencjalnych zamiast faktycznych może się wydawać dyskusyjne. Autorzy kierowali się zasadą zapewnienia wszystkim mieszkańcom równego dostępu do sieci dróg rowerowych, podczas gdy w rzeczywistości nie wszyscy będą z nich równie chętnie korzystać. Jednakże założono, że istnienie oraz jakość ścieżek rowerowych zachęcają do korzystania z nich, a także do podróżowania na dalsze dystanse [13, 14]. Ponadto model skonstruowany w oparciu o przepływy faktyczne faworyzowałby te ciągi, w których istnieją już odcinki sieci.

Wykorzystana przez autorów eksponencjalna funkcja oporu odległości ma tę przewagę nad klasycznie wykorzystywaną funkcją potęgową, że przy odległości między dwoma punktami równej 0, funkcja przyjmuje wartość 1. W przypadku funkcji potęgowej, gdy odległość dąży do 0, wartość funkcji dąży do nieskończoności. W tym drugim przypadku uzyskano by zbyt wysokie wartości, a wyniki oddawałyby w dużo mniejszym stopniu sytuację rzeczywistą.

Trzeba również zauważyć, że dokonując standaryzacji wartości autorzy niejako nadali wagi poszczególnym oddziaływaniom. Przed standaryzacją wartość oddziaływania zależała od odległości i masy centroidów, a zatem osiągała niższe wartości, gdy dotyczyła tylko części populacji (np. grupy studentów). Standaryzacja zwiększyła znaczenie uczniów, studentów i osób dojeżdżających do pracy, zmniejszając jednocześnie znaczenie dojazdów do centrum, zgodnie z założeniem autorów, że dojazd do szkół średnich, na uczelnię i do pracy jest równie ważny, co dojazd do centrum.

Model traktuje ścieżkę jak zbiór odcinków, co sprawia, że dostrzeżone mogą zostać tylko odcinki o najwyższych wartościach, a nie potrzeba budowania całych ścieżek (wysokie wartości tych odcinków zależą od tego, czy istnieją odcinki prowadzące do nich). Należy również pamiętać, że budowa ścieżek rowerowych w lokalizacjach ustalonych przy użyciu modelu nierzadko wiązać się będzie z wyższymi kosztami, konfliktami interesów grup użytkujących jezdnie i chodniki, a także trudnościami technicznymi i brakiem miejsca na dobudowanie nowej infrastruktury.

7. Podsumowanie

Skonstruowany przez autorów model pozwala na wskazanie, które ścieżki w systemie dróg rowerowych Krakowa pełnią najważniejszą rolę z punktu widzenia dojazdów do pracy, do centrum, do liceów i uczelni. Przedstawia on potencjalne natężenia przepływów przy założeniu, że sieć dróg rowerowych jest kompletna. Ponadto model zakłada, że wszystkie grupy mieszkańców traktowane są jednakowo, umożliwiając jednocześnie uwzględnienie priorytetu konkretnej grupy przez zmianę wag przy wskaźniku sumarycznym. Zaproponowana przez autorów metoda jest prosta w interpretacji i pozwala na podejmowanie decyzji dotyczących kolejności lokalizacji nowych odcinków oraz modernizacji istniejących. Należy jednak zawsze pamiętać o uwzględnieniu warunków bezpośredniości i spójności sieci oraz o sytuacji lokalnej.

Bibliografia

[1] Mapa Tras Rowerowych 2009/2010, dostępna pod adresem: http://www.bip.krakow.pl/?mmi=11716.

[2] Postaw na rower. Podręcznik projektowania przyjaznej dla rowerów infrastruktury, 1999, CROW/Polski Klub Ekologiczny, Kraków, fragmenty dostępne pod adresem: http://www.rowery.org.pl/projekto.htm, data dostępu: 13.05.2012r.

[3] Polityka transportowa dla miasta Krakowa na lata 2007-2015, 2007, Załącznik do uchwały Nr XVIII/225/07 Rady Miasta Krakowa z dnia 4 lipca 2007r., dostępny pod adresem: http://www.bip.krakow.pl/_inc/rada/uchwaly/show_pdf.php?id=35185, data dostępu: 13.05.2012r.

[4] Larsen J., El-Geneidy A., Yasmin F., 2010, Beyond the quarter mile: Re-examining travel distances by active transportation, *Canadian Journal of Urban Research:Canadian Planning and Policy (supplement),* 19(1), s. 3–4, 9–11, dostępny pod adresem: http://tram.mcgill.ca/Research/Publications/Travel_distances_CJUR.pdf, data dostępu: 13.05.2012r.

[5] Iacono M., Krizek K., El-Geneidy A. M., 2008, Access to Destinations: How Close is Close Enough? Estimating Accurate Distance Decay Functions for Different Purposes and Multiple Modes, raport z badań nr Mn/DOT 2008-11, Serias: Access to Destinations Study,_s. 13–14, 21–22, dostępny pod adresem: http://www.cts.umn.edu, data dostępu: 13.05.2012r.

[6] Adjei E., 2010, Multimodal urban transport: integrating non-motorised and bus transport, s. 34–37, dostępny pod adresem: www.itc.nl/library, data dostępu: 13.05.2012.

[7] Raport z badań ilościowych odnośnie rowerzystów wykonany dla Polskiego Klubu Ekologicznego przez BBS Obserwator, 2003, s. 26, dostępny

pod adresem: http://www.rowery.org.pl/rowery2002.pdf, data dostępu: 13.05.2012r.

[8] Program rozwoju ruchu rowerowego w Warszawie, 2009, Stowarzyszenie Integracji Stołecznej Komunikacji, dostępny pod adresem: http://siskom.waw.pl, data dostępu: 13.05.2012r.

[9] Wolek Cz., 2010, Kształtowanie systemu ruchu rowerowego na przykładzie Wrocławia, Transport miejski i regionalny, nr 11, Kraków, s. 38.

[10] Eko EduBike Map. Mapa ścieżek rowerowych. Kraków 2012.

[11] StatKrak, http://msip2.um.krakow.pl/statkrak/view/show/start.asp?tab=n_info&id=1

[12] Baza szkół i placówek, 2011, Kuratorium Oświaty w Krakowie, dostępna pod adresem: http://kuratorium.krakow.pl/index?ac=112&id=35, data dostępu: 13.05.2012r.

[13] McNeil N., 2010, Bikeability and the Twenty-Minute Neighborhood. How Infrastructure and Destinations Influence Bicycle Accessibility, Portland State University, s. 15–16, dostępnypod adresem: www.ibpi.usp.pdx.edu/media/McNeil_Bikeability_June2010.pdf., data dostępu: 13.05.2012r.

[14] Larsen J., El-Geneidy A., 2011, A travel behavior analysis of urban cycling facilities in Montréal Canada, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 16 (2), s. 172–177, dostępny pod adresem:http://tram.mcgill.ca/Research/Publications/Who_will_use_it.pdf, data dostępu: 13.05.2012r.

TŁO TEORETYCZNE DLA ADAPTACYJNEGO, DYNAMICZNEGO MODELU WYBORU ŚCIEŻKI W MODELU RUCHU

Rafał Kucharski
doktorant, Katedra Systemów Komunikacyjnych, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 01-155 Kraków, e-mail: rafalkucharski@gazeta.pl

Streszczenie: *Niniejszy artykuł stanowi podstawę teoretyczną dla zagadnienia adaptacyjnego wyboru ścieżki w sieci transportowej. Na jego podstawie możliwe będzie sformułowanie adaptacyjnego modelu wyboru ścieżki na potrzeby makroskopowego modelowania ruchu, co jest przedmiotem pracy doktorskiej autora. W artykule autor omawia w szczególności podstawy i najnowsze teorie dla następujących trzech obszarów modelowania:*

1) wyszukiwania najkrótszej ścieżki w sieci transportowej (ang. shortest path search*),*

2) próbkowania ścieżek (ang. path sampling*),*

3) wyboru ścieżki (ang. route choice*).*

W części pierwszej opisano podstawowe i bardziej zaawansowane algorytmy wyszukiwania najkrótszej ścieżki w sieci transportowej. Pokazano zarówno klasyczne algorytmy, ich modyfikacje, jak i najnowsze propozycje. Omówiono przypadki dla sieci statycznej, dynamicznej i stochastycznej. Część ta jest podstawą dla dalszych części, w których omawiane są modele zawierające implicite algorytmy wyszukiwania najkrótszej ścieżki. Część druga to omówienie metod próbkowania ścieżek, czyli określania zbioru potencjalnie efektywnych ścieżek łączących źródło z celem. Pokazano próby rozwiązania tego problemu, który (jak argumentuje wielu badaczy) jest dotąd nierozwiązany w praktyce, a istniejące metody dostarczają jedynie heurystycznych przybliżeń. Pokazano tu w szczególności autorską propozycje rozszerzenia istniejącej metody próbkowania Łańcuchem Markowa Metropolisa-Hastingsa na przypadek zmiennej w czasie sieci stochastycznej. Część trzecia to omówienie modeli wyboru ścieżki spośród możliwych. Pokazano tu zarówno klasyczne modele logitowe, ich modyfikacje, jak i nieliczne alternatywne metody wyboru ścieżki. W końcowej części omówiono podejście do adaptacyjności w każdej z metod omawianych wcześniej. Wiele użytych w artykule nazw jest własną próbą tłumaczenia nazw angielskich, jako że autor zdaje sobie sprawę z ułomności własnych tłumaczeń, w nawiasach przy każdym pierwszym użyciu podano odpowiednik angielski.

Słowa kluczowe*: najkrótsza ścieżka, dynamiczny problem najkrótszej ścieżki, próbowanie ścieżek, wybór ścieżki w sieci transportowej, adaptacja modeli ruchu*

1. Wprowadzenie

W artykule opisane zostały trzy elementarne części teorii modelownia ruchu: wyszukiwanie najkrótszej ścieżki, próbkowanie ścieżek oraz modelowanie wyboru ścieżki. Zależności między nimi nie są oczywiste, na pozór mogą wydawać się one

niepowiązane i niezależne, jednak rozwiązanie każdego z tych problemów konieczne jest do zamodelowania rozkładu ruchu na sieć.

Problemy omówiono w takiej kolejności, w jakiej należy je rozważać próbując w pełni zrozumieć złożoną procedurę rozkładu ruchu na sieć. Aby możliwa była modyfikacja w tej procedurze (np. uwzględnienie adaptacji) należy rozważyć modyfikacje w każdym z problemów. Zależność tę można opisać następująco: żeby adaptować ścieżkę, musi ona być uprzednio wybrana jako efekt rozkładu ruchu (ang.: *traffic assignment*). Rozkład ruchu w większości wypadków to iteracyjna procedura wielokrotnego wyboru ścieżek (ang.: *route choice*) spośród dostępnych. W zaawansowanych procedurach rozkładu ruchu ścieżki są wybierane ze zbioru dopuszczalnych ścieżek, obliczonych w ramach osobnej procedury. Wykorzystuje się tu zazwyczaj metody próbkowania ścieżek (ang.: *route sampling*), które są heurystycznymi przybliżeniami faktycznego zbioru decyzyjnego. Całość struktury wiąże ze sobą model wyboru najkrótszej ścieżki (ang.: *shortest path search*), o który oparte są wszystkie wymienione wyżej metody.

2. Poszukiwanie najkrótszej ścieżki w sieci transportowej

Problem znalezienia najkrótszej ścieżki (PNS) w sieci transportowej (ang.: *shortest path problem*) to fundamentalny problem dla modelowania ruchu (Zhan i Noon, 1998) (Gentile, Meschini, Papola, 2004). Rozwiązuje się go implicite w kluczowych elementach modelowania ruchu (rozkład ruchu, funkcja grawitacyjna, próbkowanie ścieżek, podział zadań przewozowych, itp.) i od jego efektywności w dużej mierze zależy efektywność całego procesu modelowania. Fakt, że najbardziej rozpowszechnione i najpopularniejsze algorytmy PNS powstały w obszarze teorii grafów zadecydował o tym, że sieć transportowa w ujęciu formalnym niemal zawsze opisywana jest jako graf $\boldsymbol{G(N, A)}$, gdzie N to zbiór wierzchołków, a A to zbiór łuków grafu. W związku z tym problem znalezienia najkrótszej ścieżki w sieci transportowej jest równoważny z problemem poszukiwania najkrótszej ścieżki w grafie.

Pojęcie ścieżki **najkrótszej** w PNS jest jedynie umowne, a teoria obejmuje również algorytmy obliczające ścieżki najtańsze, najszybsze, najbardziej niezawodne, itd. Bez utraty precyzji można powiedzieć, że przedmiotem PNS jest minimalizacja sumy wag łuków składających się na ścieżkę w grafie. Wagi te mogą być określone dowolną wielkością skalarną. Może to być: odległość, czas, koszt, lub jakikolwiek wielomian reprezentujący odczuwalną uciążliwość podróżnego, która jest minimalizowaną funkcją celu problemu optymalizacyjnego (Frejinger, 2008). Należy jednak zauważyć, że równoważność PNS dla ścieżki najkrótszej i dla ścieżki najszybszej nie jest oczywista dla przypadków dynamicznych, co opisano poniżej.

W niniejszym rozdziale omówiono w szczególności: metodę klasyczną – dla grafu statycznego, o kosztach niezmiennych w czasie, metodę dynamiczną – dla grafu o znanych kosztach zmiennych w czasie oraz metodę stochastyczną – dla

grafu o nieznanych kosztach zmiennych w czasie. Rzetelny, szeroki przegląd dostępnych algorytmów szukania najkrótszej ścieżki można znaleźć w (Segedwick, 2011).

Klasyczna postać problemu

PNS znalazł się w centrum zainteresowań matematyków w połowie lat 50. XX wieku, kiedy, niezależnie od siebie, Ford (1956) i Dantzig (1957) stworzyli algorytm programowania liniowego rozwiązujący omawiany problem. Algorytm ten w ciągu kilku kolejnych lat były wielokrotnie modyfikowany, powstało co najmniej kilka jego wersji. Ostateczną formę znalazł w postaci zaproponowanej przez Leyzorek, Gray, Johnson, Ladew, Meaker, Petri i Seitz (1957). Zwyczajowo przyjęła się jednak niepoprawna chronologicznie, ale krótsza nazwa tego algorytmu od nazwiska Edgara Dijkstry, który w 1959 roku niezależnie opracował tę najbardziej czytelną, szybką i prostą wersję algorytmu, który stał się elementarnym algorytmem teorii grafów (Dijkstry, 1959). Od momentu powstania był on przedmiotem nieustannych modyfikacji i rozważań teoretycznych, które trwają do dziś. Większość z propozycji dotyczy nie tyle modyfikacji samego algorytmu, co struktury obliczeniowej [m.in. zamiana kolejki na stos wewnątrz algorytmu (Dijkstra 1959), zastosowanie „kopca a-arnego" (Johnson 1975), użycie stosu Fibonacciego (Tarjan, 1983)].

We współczesnych postaciach uzyskano niemal liniowy wzrost czasu obliczeń wraz ze wzrostem rozmiaru grafu (w porównaniu z kwadratowym przyrostem w wersji z 1959 roku). Rozważania teoretyczne dotyczące klasycznej postaci algorytmu jedynie w niewielkiej części dotyczą problemu transportowego, gdyż najwięcej uwagi w pracach teoretycznych przywiązuje się do przypadku ujemnych kosztów odcinków, co nie ma miejsca w sieci transportowej.

Wśród popularnych alternatyw dla algorytmu Dijkstry najpopularniejszy pozostaje algorytm A* (ang.: *A-star*) opracowany w 1968 roku przez (Hart, P. E., Nilsson, N. J., Raphael, B. 1972), który zakłada użycie heurystyki dla przyśpieszenia obliczeń. Heurystyka wyrażona jest w potencjale określanym dla każdego węzła, który jest proporcjonalny do odległości od celu, zazwyczaj jest to odległość kartezjańska. W algorytmie tym pojawia się bardzo przydatne w wielu metodach adaptacyjnych pojęcie efektywnych następników i efektywnych poprzedników (ang.: *efficient forward/backward star*), zdefiniowanych dla każdego węzła. Efektywni następnicy węzła bazowego, to zbiór takich węzłów z których odległość do celu jest mniejsza, niż z węzła bazowego, stanowi to podstawę istotnej teorii Hyperpath (Bell, Trozzi, Hosseinloo, Gentile, & Fonzone, 2012) opisanej poniżej. Algorytm A* może, ale nie musi dać oszczędności w czasie w porównaniu z algorytmem Dijkstry.

Nie ma powszechnej zgody, co do najlepszego rozwiązania klasycznej postaci problemu. Stosunkowo aktualnym przeglądem modyfikacji algorytmu Dijkstry jest badanie przeprowadzone przez (Zhan i Noon, 1998), jednak nie dostarcza ono jednoznacznych odpowiedzi.

Najszybsze dostępne rozwiązanie problemu klasycznego

Dla klasycznej postaci problemu najefektywniejszym wydaje się być w miarę aktualny algorytm Oznaczonych Hubów (Hub-based Labeling), opracowany w centrach Microsoft w 2010 roku (Abraham, Delling, Goldberg, Werneck, 2010). Uzyskano tutaj znaczne zmniejszenie czasu obliczeń w stosunku do algorytmu Dijkstry (nawet o 6 rzędów wielkości dla złożonych grafów). Opiera się on na odpowiednim przygotowaniu sieci, skracającym czas obliczeń, które można opisać jako zapis topologii sieci w postaci użytecznej dla metody obliczeniowej. W etapie przygotowawczym w sieci ustawia się „drogowskazy", które mają pomagać algorytmowi dojść do celu. Metod ich przygotowania jest wiele, a najefektywniejsze z nich to:

a) metoda oznaczania i zapamiętywania uprzednio wybranych ścieżek (ang.: *labeling method*),
b) pojęcie „skrótu" (ang.: *shortcut*), czyli kolejnego poziomu grafu wielopoziomowego, w którym zapisywane są obliczone wcześniej najkrótsze ścieżki,
c) zbiór uprzednio „zakontraktowanych" połączeń wynikających z hierarchii (ang.: *contraction hierarchy*),
d) pojęcie „punktów dostępu" (ang.: *transit node routing*) – dla sieci drogowej Europy jest około 10 tysięcy takich punktów dla sieci o 18 milionach węzłów (Bast, Funke, Sanders, Schultes, 2007).

W algorytmie Oznaczonych Hubów korzysta się głównie z metod zakontraktowanych połączeń, oraz z metody oznaczania ścieżek w połączeniu z wybranymi zaletami innych metod. Algorytm zakłada uprzednie zapisanie informacji o strukturze sieci w pamięci lokalnej, pozwala to na przyśpieszenie realizacji zapytań, samo w sobie wymaga jednak kilkudziesięciu minut obliczeń. Czas obliczenia ścieżki w sieci składającej się z kilkudziesięciu milionów węzłów nie przekracza kilku milisekund.

Najkrótsza ścieżka w sieci dynamicznej

W tej sekcji opisano PNS dla grafu dynamicznego, czyli takiego, w którym co najmniej jeden z parametrów (węzeł, łuk, waga/koszt łuku) jest zmienny w czasie. W odniesieniu do sieci transportowej oznacza to zazwyczaj, że czas/koszt przejazdu odcinka jest zmienną funkcją czasu. Problem taki jest znacznie trudniejszy i bardziej złożony niż klasyczny PNS, spotkał się więc z mniejszym zainteresowania u badaczy. Jest on jednak trzonem problemu dynamicznego rozkładu ruchu na sieć, w którym popyt, a wraz z nim warunki ruchu (koszty) są zmienne w czasie.

O ile w klasycznym PNS kłopotem algorytmicznym były ujemne koszty, które nie dotyczą przypadku transportowego, o tyle w przypadku dynamicznym problemem staje się monotoniczność wyrażona w warunku FIFO (ang.: *First In-First Out*), który gwarantuje, że czas dotarcia do celu jest ściśle rosnącą funkcją czasu rozpoczęcia podróży. Można udowodnić, że jeśli w sieci zachowana jest reguła FIFO, to najkrótsza ścieżka nie zawiera cykli, obserwacja ta znacznie zmniejsza trudność algorytmu. Innymi słowy graf zmienny w czasie, spełniający warunek FIFO, jest grafem acyklicznym.

Zasadniczo można wyróżnić dwa sposoby rozwiązania problemu: dyskretny, gdzie koszty są stałe w obrębie interwałów czasowych oraz ciągły, gdzie koszty są ciągłą funkcją czasu.

Historycznie pierwszą próbą ujęcia dynamiki w PNS była praca (Cooke i Halsey 1966), gdzie podstawowy algorytm Dijkstry został zaadoptowany do grafu diachronicznego – zmiennego w czasie. Okazało się, że odpowiednia konstrukcja danych wejściowych algorytmu Dijkstry wystarczy, by obliczyć PNS dla grafu diachronicznego. Algorytm nie zachowywał jednak reguły FIFO i okazał się zbyt obliczeniochłonny. Zoptymalizowaną, ale wciąż nie zachowującą reguły FIFO metodę podają (De Palma, Hansen i Labbé, 1993). Główną przeszkodą w zastosowaniu jej w praktyce modelowania ruchu jest konieczność wprowadzenia dużej liczby dyskretnych przedziałów czasu (przyjmuje się, że odpowiednim przedziałem dla odzwierciedlenia dynamiki sieci transportowej jest jedna sekunda).

Inne próby dotyczyły aktualizacji obliczonej uprzednio macierzy czasów przejazdu przy założeniu zmiany kosztu jedynie kilku elementów sieci. Polegało to na „re-optymalizacji" rozwiązania obliczonego dla stałych kosztów. Dobrą metodę wydaje się tu podawać (Dionne 1978), która została poszerzona do metody pozwalającej na zmianę wszystkich kosztów w (Pallottino i Scutella 1997). Jednak metody te nie gwarantują, że czas re-optymalizacji będzie mniejszy niż czas potrzebny do ponownego przeprowadzenia optymalizacji.

Rozwiązania dla przypadków ciągłych podają m.in. (Henzinger., Klein, Rao i Subramanian 1997) oraz (Fakcharoemphol i Rao, 2001). Natomiast wciąż nie ma zgody wśród badaczy na to, która metoda jest najlepsza.

W opinii autora na największą uwagę zasługuje heurystyka zaproponowana przez (Gentile, Meschini, Papola, 2004) z uwagi na praktyczne zastosowanie w dynamicznych modelach ruchu dla dużych sieci. Metoda ta oparta jest o asocjacyjną własność najkrótszej ścieżki w grafie dynamicznym, czyli podział problemu wyboru ścieżki na zbiór problemów wyboru kierunku na kolejnych skrzyżowaniach (ang. *turning rate)*. Pozwala to na dekompozycje problemu najkrótszej ścieżki na układ prostych równań liniowych (nazywanych w tym kontekście równaniami Bellmana). Autorzy udowadniają, że dekompozycja taka jest poprawna pod pewnymi warunkami, które musi spełnić sieć. Dotyczy to reguły FIFO dla odcinków (warunek taki musi spełniać model przepływu ruchu – ang.: *traffic flow model*), co eliminuje to możliwość wystąpienia cykli. Reguła FIFO musi dotyczyć zarówno czasów przejazdu, jak i kosztów. Dzięki takiej dekompozycji problemu możliwe jest stworzenie szybko rozwiązywalnego układu elementarnych równań liniowych. Ze względu na strukturę algorytmu jest to algorytm typu: „wiele do jednego" (ang.: *many-to-one*) – w którym poszukujemy rozwiązania cofając się od celu aż znajdziemy źródło, w przeciwieństwie do algorytmu „jeden do wielu" (ang.: *one-to-many*) – w którym wychodząc od źródła szukamy celu. W kontekście dekompozycji podejście „wiele do jednego" okazuje się bardziej użyteczne. Z tego powodu algorytm ten dedykowany jest do rozwiązania problemu poszukiwania najpóźniejszej godziny wyjazdu, by o określonym czasie dotrzeć do celu. Rozwiązanie problemu najszybszego dotarcia do celu wyjeżdżając o określonym czasie wymaga

pewnych modyfikacji (inną, skuteczną metodę „jeden-do-wielu" kolejności podaje (Bell et al., 2012)).

Zastosowana w omawianym algorytmie heurystyka dotyczy liniowej aproksymacji funkcji oporu w modelu przepływu ruchu, co pozwala znacznie skrócić czas obliczeń bez utraty dokładności. Zaletą algorytmu jest również to, że problem rozwiązuje się wspólnie z innymi problemami dynamicznego rozkładu ruchu: modelem przepływu ruchu (ang.: *traffic flow model*), dynamicznego obciążania sieci (ang.: *dynamic network loading problem*) oraz wyboru ścieżki (ang.: *route choice model*).

Jak udowadnia autor omawianej metody, w algorytmach dynamicznych rozwiązuje się problem minimalizacji czasu przejazdu w układzie zmiennym w czasie. Jeśli jednak koszty są proporcjonalne do czasu, wówczas rozwiązanie problemu najkrótszego czasu jest jednocześnie rozwiązaniem problemu najmniejszego kosztu. W przeciwnym wypadku procedury stają się znacznie bardziej skomplikowane.

Najkrótsza ścieżka w sieci stochastycznej

Problem ten pojawia się przy konstatacji, że koszty w sieci są nie tylko zmienne, ale że zmienność jest procesem losowym o nieznanej realizacji. Koszty łuków w grafie są w tym wypadku zmienną losową, a więc koszt ścieżki (czyli suma kosztów łuków) również będzie losowy.

Od lat późnych lat 60. XX wieku (Frank, 1969) pojawiały się próby ujęcia losowości w PNS przy użyciu teorii prawdopodobieństwa, w latach 80. powstała próba rozwiązania problemu na gruncie teorii zbiorów rozmytych (Dubois, Prade, 1980). W 2007 roku Liu opisał podstawę teorii nieoznaczoności (ang.: *uncertainty theory*), na gruncie której w 2010 roku zaproponował PNS wprowadzając pojęcie α-najkrótszej ścieżki (gdzie α to poziom niepewności) i dualne do niego pojęcie „najbardziej najkrótszej ścieżki" („most shortest path") (Liu 2010).

Obecnie środowiska naukowe skłaniają się ku przyjęciu teorii nieoznaczoności do rozwiązania PNS dla sieci stochastycznej. Na jej gruncie zdefiniowano pojęcia potrzebne do opisu sieci stochastycznej, oraz udowodniono że stochastyczny PNS można sprowadzić do problemu deterministycznego i rozwiązać klasycznym algorytmem Dijksrty (Gao, 2011). Podejście to wydaje się być skutecznym rozwiązaniem.

3. Próbkowanie ścieżek

Omawiany problem próbkowania ścieżek (PPS) (ang.: *route sampling, path enumeration*), określa podzbiór efektywnych możliwych ścieżek łączących źródło i cel. Jego istotność bierze się m.in. z tego, że problem znalezienia wszystkich możliwych ścieżek w sieci jest problemem NP trudnym, czyli problemem obliczeniowym, dla którego znalezienie rozwiązania problemu nie jest możliwe ze złożonością obliczeniową wielomianową (Menghini, Carrasco, Schüssler i Axhausen, 2010). Pozostaje więc wybór odpowiedniej wielkości podzbioru, wewnątrz którego znajdzie się rozwiązanie sub-optymalne. Modele PPS są konieczne do efektywnego modelowania podróży.

W rozdziale pierwszym omówiono problemy optymalizacyjne zupełne, w których stosowane heurystyki doprowadzały zawsze do optimum globalnego. Jednak w sieciach drogowych użytkownicy wybierają ścieżki, które nie zawsze są optymalne - nasze wybory są dalekie od optimum. Po pierwsze każdy użytkownik ma inne kryteria optymalizacyjne, inne wagi w wielokryterialnej funkcji celu. Po drugie nie rozwiązuje on problemu optymalizacyjnego matematycznie, tylko kognitywistycznie, szukając rozwiązania procesami wyboru decyzji, a nie algorytmami. Póki co nie potrafimy modelować takich procesów, pozostaje więc naśladowanie ich. Najpopularniejszą metodą naśladowania nie do końca racjonalnych procesów wyboru jest model logitowy, który operuje na skończonej liczbie możliwych decyzji. Aby mógł on działać sprawnie, zgodnie ze sztuką, należy określić zależności pomiędzy możliwościami (*C-Logit, Path-Size Logit*, itp.). Dlatego w praktycznych problemach rozkładu ruchu konieczne jest zdefiniowanie podzbioru rozwiązań możliwych.

O podzbiorze tym zakłada się, że zawiera w sobie wszystkie potencjalnie wybierane w sieci ścieżki. To założenie jest głównym probierzem poprawności metod próbkowania – czy próbka zawiera po pierwsze: wszystkie wybierane przez użytkowników ścieżki miedzy źródłem, a celem i po drugie: wszystkie ścieżki rozpatrywane w procesie wyboru przez użytkownika. Sprawdzenie tego warunku jest trudne, mało jest badań dotyczących wyboru ścieżki w sieci (Papinski, Scott, i Doherty, 2009), zazwyczaj dotyczą one małych próbek. (Prato, 2009) pokazuje, że dostępne metody próbkowania nie pokrywają więcej niż 90% obserwowanych ścieżek, a więc realizacji procesów decyzyjnych. Określenie stopnia odwzorowania dla ścieżek rozpatrywanych (a nie wybieranych) jest jeszcze trudniejsze.

Metody próbkowania ścieżek można podzielić na dwa zasadnicze typy: deterministyczne i stochastyczne. W pierwszej kolejności omówione zostaną metody deterministyczne, które dają stały wynik, następnie omówione będą metody stochastyczne, w których wynik zależy od przeprowadzonej symulacji.

Większość z metod w praktycznym zastosowaniu to iteracyjne modyfikacje algorytmów PNS. Poniżej przedstawiono najistotniejsze metody próbkowania:

a) Algorytm k-najkrótszych ścieżek

Algorytm ten wybiera k-kolejnych, najkrótszych ścieżek w sieci. Pierwsze podejścia polegały na próbie wybrania spośród wszystkich ścieżek, tych najkrótszych, co okazało się niewykonalne dla dużych sieci. Bardziej odpowiednie metody opierały się o metodę kar – zwiększającą koszty kolejnych odcinków znajdujących się na najkrótszej ścieżce (De La Barra 1993) lub eliminację kolejnych odcinków najkrótszej ścieżki (Prato, 2009). Obydwie działają iteracyjnie startując z rozwiązania problemu NSP. (van der Zijpp i Fiorenzo Catalano, 2005) podają rozwiązanie analityczne, o znacznie krótszym czasie obliczeń. W proponowanej przez nich formie udało się uwzględnić w problemie istotne ograniczenia na nakładanie się ścieżek, jak np. maksymalne wydłużenie, które nie były uwzględnione wcześniej. Jednak dla dużych sieci czas obliczeń jest wciąż zbyt duży i głównie z tego powodu algorytmy te praktycznie nie są używane w praktyce modelowania ruchu.

b) Metoda ścieżek subiektywnie optymalnych

Metoda ta została zaproponowana przez (Ben-Akiva 1984) (ang.: *labeling approach*). Polega ona na przyjmowaniu zmiennych wag w ważonej funkcji kosztu minimalizowanego w PNS. Sytuacja taka dotyczy wielomianowych reprezentacji kosztu przy wyborze ścieżki, gdzie czynnikami składowymi są np. odległość, koszt, czas, bezpieczeństwo, lub inne subiektywne kryteria. Rozwiązanie PNS jest funkcją przyjętych wag, wobec tego wybór kilku strategii o różnych wielkościach poszczególnych wag, pozwoli wygenerować zbiór ścieżek, z których każda jest optymalna w świetle określonych wag kryteriów cząstkowych. Ścieżki te nazywa się zgodnie z ich strategiami: „najszybsze", „najkrótsze", „najtańsze", „preferujące autostrady" itp. (Bekhor, Ben-Akiva, & Ramming, 2006).

Metoda ta może być metodą symulacyjną, gdy wagi będą dobierane na podstawie określonych rozkładów prawdopodobieństw w ramach symulacji (np. monte carlo). Gdy wagi będą znormalizowane, wówczas symulacja będzie stabilizowała się w zbiorze rozwiązań dopuszczalnych.

c) Stochastyczne rozwiązania NSP

Metody te opierają się o zmienność parametrów sieci wyrażoną w procesie stochastycznym. (Sheffi i Powell 1982) zaproponowali procedurę, która w każdej iteracji losuje koszt odcinka na podstawie probitowego rozkładu prawdopodobieństwa ze średnią wokół czasu przejazdu po obciążonej sieci. (Fiorenzo-Catalano i Van der Zijpp 2005) modyfikują tę metodę tak, by ścieżki krótsze były wybierane z większym prawdopodobieństwem.

d) Podwójnie stochastyczna zmienność sieci

Metoda ta jest połączeniem dwu poprzednich. Zakłada się tu dwuwymiarową zmienność sieci. Pierwszy wymiar jest subiektywny i dotyczy różnego postrzegania warunków ruchu przez podróżnych, drugi wymiar jest obiektywny i dotyczy zmienności stanu sieci. Założenie zmienności w dwu wymiarach i przeprowadzenie procedury symulacyjnej doprowadzi do poszerzenia przestrzeni decyzyjnej.

Badania w tym zakresie prowadzili (Bovy i Fiorenzo-Catalano 2007) na danych z korytarza Rotterdam-Dodrecht. Algorytm ten jest iteracyjnie przeprowadzaną procedurą wyszukiwania najkrótszej ścieżki dla różnych parametrów kosztów zarówno po stronie sieci, jak i po stronie użytkownika.

e) Metoda podziałów i ograniczeń (branch&bound)

Zaproponowana przez (Prato, 2006) metoda odzwierciedla behawioralne spostrzeżenia o wyborze trasy. Podjęto tutaj próbę stopniowego odrzucania ścieżek „jawnie nie prowadzących do celu", czyli np. zawierających pętle, oddalających się od celu, o dużym wydłużeniu, itp. Kolejne zastosowanie kilku heurystyk prowadzi do stworzenia zbioru ścieżek, które nie są „jawnie nieoptymalne". Algorytmicznie efektem jest zbiór wszystkich tych ścieżek, które nie są eliminowane przez którąś z heurystyk. Algorytm przetestowano na zbiorze danych z Bostonu (dla pracowników MIT), uzyskując znacznie lepsze pokrycie ścieżek niż uzyskał Ben-Akiva

z metodą oznaczania ścieżek. (Hoogendorn-Lanser 2005) z powodzeniem zastosował ten algorytm do sieci multi-modalnych.

f) Symulacja algorytmem Metropolisa-Hastingsa

Zaproponowana przez (Flötteröd i Bierlaire, 2011) metoda wykorzystania łańcuchów Markowa w algorytmie Metrpolisa-Hastingsa (MH) jest obiecującą metodą próbkowania ścieżek. Tak jak większość zaczyna ona od ścieżki minimalnej, która jest stanem początkowym łańcucha Markowa. Kolejny stan jest losowany jako modyfikacja stanu poprzedniego polegająca na dodaniu losowo wybranego węzła do najkrótszej ścieżki. Węzły losowane są z prawdopodobieństwem równym odległości od ścieżki pierwotnej tak, że odcinki bliższe są losowane z większym prawdopodobieństwem. Prawdopodobieństwo akceptacji kolejnego kroku łańcucha jest wyrażone w formie modelu logitowego analogicznego do tego jaki używany jest w modelu wyboru ścieżki. Udowadnia się, że algorytm ten ustabilizuje się w skończonym zbiorze ścieżek w skończonym czasie. Algorytm ten jako jedyny z przedstawionych generuje zbiór wszystkich ścieżek, które spełniają warunki prawdopodobieństwa w modelu logitowym, tzn. działa dopóki nie przestaną być generowane nowe ścieżki o dodatnim prawdopodobieństwie wyboru. Otóż udowadnia się, że zbiór będący wynikiem algorytmu zawiera wszystkie ścieżki, których prawdopodobieństwo wyboru w modelu logitowym jest większe niż α.

Algorytm został przetestowany na sieci dla Tel-Aviv dając zadowalające wyniki w niezadowalającym czasie (Flötteröd i Bierlaire, 2011). Głównym czynnikiem, który wpływał na czas, była konieczność wielokrotnego rozwiązywania problemu NSP w każdej iteracji. Jeśli jednak uda się uchylić to założenie, to algorytm może z powodzeniem być używany w praktyce.

g) Symulacja algorytmem Metropolisa-Hastingsa dla przypadku dynamicznego

Opisany wyżej algorytm pozwala wygenerować zbiór w oparciu o stałe koszty, tzn. taki o którym prawdziwe jest twierdzenie, że wszystkie ścieżki efektywne w świetle modelu logitowego dla określonych stałych kosztów znajdą się w wynikowym zbiorze algorytmu. Natomiast na potrzeby adaptacyjnego modelu wyboru ścieżki znacznie cenniejsze byłoby stwierdzenie, że zbiór zawiera ścieżki optymalne dla każdej prawdopodobnej realizacji stanu sieci stochastycznej. Wówczas procedura nawet gdyby była bardzo obliczeniochłonna, to zapisanie ścieżek w pamięci znacznie zwiększyłoby stabilność rozwiązań dynamicznych rozkładów ruchu na sytuacje nieprzewidziane. Wzrośnie jego możliwość do adaptacji.

Autor niniejszego artykułu prowadzi badania nad dostosowaniem algorytmu do sieci zmiennej w czasie. Próby polegają na poszerzeniu warunków akceptacji modelu logitowego. Heurystyką pomocniczą jest tu konstatacja, analogiczna do algorytmu podziałów i ograniczeń, że jeśli ścieżka jest odrzucona w najgorszym scenariuszu, to będzie odrzucona w każdym scenariuszu. Testowe wyniki, jak i analiza teoretyczna są obiecujące.

h) Hyperpath

Istotną teorią w rozwiązywaniu jednocześnie PNS, jak i PPS jest hyperstar (Bell i in., 2012) - algorytm dostarczający całego zbioru ścieżek w jednej procedurze rozwiązywania PNS. Algorytm rozwiązuje problem w „hiper-grafie" (ang.: *hypergraph*), czyli grafie określonym przez węzły i „hiper-odcinki" (ang.: *hyperlinks*), które mogą być określone za pomocą więcej niż jednego węzła początkowego i końcowego. W takiej strukturze (Bell et al., 2012) proponują rozwiązanie dla sieci stochastycznej. Wymaganymi danymi wejściowymi algorytmu są minimalny i maksymalny czas przejazdu odcinka. Rozszerzając powszechnie używane do przyśpieszania PNS pojęcie potencjału węzła (z metody A*), określa się prawdopodobieństwo wyboru odcinka. Hyperpath, czyli hiper-ścieżka jest zbiorem wszystkich efektywnych odcinków, czyli tych odcinków których prawdopodobieństwo wyboru jest dodatnie. Strategia wyboru prawdopodobieństwa proponowana przez Bella z zespołem minimalizuje ryzyko opóźnień. Algorytm jednak działa tylko dla ściśle zachowanej reguły FIFO, ponadto wynikiem jest zbiór subiektywnie optymalnych, a nie wszystkich potencjalnych ścieżek.

4. Problem wyboru ścieżki

Dwa poprzednio omawiane problem PNS i PPS są zazwyczaj konieczne do rozwiązania problemu wyboru ścieżki (PWS, ang.: *route choice problem, path choice problem*). W swojej najbardziej teoretycznej formie problem ten dotyczy wyboru ścieżki w sieci spośród wszystkich możliwych. Po pierwsze jednak, jak pokazano w poprzedniej sekcji, wygenerowanie wszystkich możliwych ścieżek nie jest możliwe, po drugie zaś modele podejmowania decyzji operują zazwyczaj na stosunkowo małym zbiorze alternatyw. Problem ten operuje więc na podzbiorze ścieżek wygenerowanym przez procedurę PPS. Dlatego dodatkowym warunkiem dla procedury PPS jest odpowiednia liczba alternatyw dostarczanych PWS.

(Prato, 2009) argumentuje, że ścieżek do kalibracji najpopularniejszych PWS wygenerowanych przez PPS powinno być 70-100 dla każdej pary źródło cel, nie podaje on jednak informacji co należy zrobić, gdy w sieci nie ma aż tylu ścieżek. (Bliemer i Bovy 2008) zauważają z kolei, że zbyt duża liczba alternatyw i uwzględnienie w zbiorze choćby kilku zupełnie nieatrakcyjnych ścieżek istotnie zaburza wyniki PWS. Z drugiej strony jednak ten sam autor (Bovy, 2009) dodaje, że dla zapewnienia robasności procedury (czyli odporności na błędy estymacji), jej kalibracja powinna uwzględniać obszerny zbiór ścieżek, również tych nieatrakcyjnych – co stanowi pewną sprzeczność. Autorzy (Frejinger, 2008) (Bekhor i in., 2006) i inni postulują, że estymacja parametrów PWS powinna być robasna i nieczuła na zbiór wejściowy z PPS, co jest postulatem karkołomnym po pierwsze w definicji, a po drugie w weryfikacji.

Najpopularniejsze modele wyboru stosowane w modelowaniu ruchu, czyli wielomianowy model logitowy (ang.: *multinomial logit*) i zagnieżdżony model logitowy

(ang.: *nested logit model*), nie nadają się wprost do zastosowania w modelowaniu wyboru ścieżki. Wynika to z faktu, że modele te stawiają rozważanym alternatywom warunek „iid" (ang.: *independent, identically distributed*), a więc muszą one być o identycznych, niezależnych rozkładach. Co nie ma miejsca w sieci transportowej, gdzie ścieżki pokrywają się, przecinają i są od siebie zależne. Jak pokazują m.in. (Bliemer i Bovy 2008), gdy korelacja między ścieżkami nie jest dobrze reprezentowana, wówczas ścieżki o identycznym koszcie mogą mieć różne prawdopodobieństwa wyboru.

Niestety większość literatury dotyczącej PWS skupia się na odpowiednim obliczeniu korelacji pomiędzy parametrami modelu logitowego. Jest to istotne w kontekście poprawności algorytmicznej, natomiast z perspektywy istoty modelu PWS nie ma znaczenia i jest technicznym szczegółem. Problemy odpowiedniej kalibracji logitowych PWS, np. C-Logit (Cascetta i in. 1996), Path-Size (Ben-Akiva i Ramming 1998) i inne omówiono szczegółowo m.in. w (E. Frejinger, Bierlaire, & Ben-Akiva, 2009), tutaj nie będą omawiane.

Model logitowy, pomimo opisanych wyżej kłopotów teoretycznych jest najczęściej używany w praktyce, głównie ze względu na jego prostotę i łatwość interpretacji. W literaturze nie znajduje się istotnych alternatywnych metod modelowania. Podstawowy model logitowy oraz niemal wszystkie jego popularne wariacje zostały przetestowane w PWS za każdym razem rozbijając się o ten sam problem – opisu korelacji tak, by utrzymać założenie „iid".

Dobre podsumowanie tego szeroko poruszanego problemu daje (Hoogendoorn-Lanser, 2005), gdzie zauważa się, że metody deterministyczne metody PPS (np. zawężeń i ograniczeń) dają wyniki bardziej użyteczne dla PWS, niż wyniki symulacyjnych modeli PPS. Ponadto krzyżowo-zagnieżdżony model logitowy (ang: *Cross Nested Logit*) wydaje się być najbardziej odpowiednią postacią modelu logitowego dla PWS.

(Nielsen, 2004) proponuje uwzględnić heterogeniczność populacji wybierających poprzez używanie w modelach logitowych rozkładu statystycznego dla wagi czasu i kosztu. Jest to jednak bardziej postulat (skądinąd słuszny), natomiast bez praktycznego rozwiązania.

Ciekawe rozwiązanie daje (Cascetta i Papola 2001), którzy jako jedni z niewielu wyłamują się poza tradycyjne ramy modeli logitowych. Zakładają oni, że alternatywy są rozróżnialne i wybierane są nie tylko ze względu na parametry ilościowe (czas, koszt, itp.), ale także jakościowe (czytelność, przyzwyczajenie, estetyka, itp.), zakłada się tam również, że użytkownik nie zdaje sobie sprawy ze wszystkich alternatyw, a ich znajomość jest zależna od charakterystyki użytkownika.

Pojawiają się rozwinięcia modeli logitowych, które zakładają uwzględnienie wskaźników jakościowych i subiektywnych (przyzwyczajenia, znajomość sieci, odczuwanie czasu podróży, itp.) (Cantillo i in., 2006). Przeszkodą w ich zastosowaniu w PWS jest konieczność znajomości pełnego zbioru alternatyw, co jest możliwe w kontekście wyboru środka transportu, wyborze godziny rozpoczynania podróży, ale niemożliwe w przypadku PWS.

(Ben-Elia & Shiftan, 2010) badają relacje pomiędzy informacją o stanie sieci w wypadku gdy informacja jest dostarczana w czasie rzeczywistym. Przeprowadzono tam eksperyment, w którym badani mieli wybierać ścieżki na podstawie doświadczenia i informacji. Na podstawie wyników tego eksperymentu skalibrowano mieszany model logitowy (Mixed Logit Model). Kalibrowano tam parametry dotyczące szybkości uczenia się, wpływu informacji, itp.

5. Adaptacyjność opisywanych modeli

Adaptacyjność rozumiana jest tutaj jako możliwość uwzględnienia zmian w sieci w trakcie przejazdu przez nią. W odróżnieniu od metod biernych (zarówno statycznych, jak i dynamicznych) decyzja co do wyboru trasy podejmowana jest nie tylko w momencie rozpoczęcia podróży, ale również weryfikowana w jej trakcie. Dynamizm klasycznie poruszany w kontekście omawianych wyżej problemów dotyczy zmienności stanu sieci, rozwiązanie pozostaje stałe. Dynamizm w kontekście adaptacji polega na tym, że warunki w sieci są jedynie przewidywane w momencie podejmowania decyzji, a ścieżka jest modyfikowana na podstawie a) informacji b) obserwacji. Efektywność rozwiązania jest oceniana w kontekście dostępu do informacji o stanie sieci, a nie w odniesieniu do fatycznego stanu sieci.

Zjawisko adaptacji może być uwzględnione w każdym z omawianych modeli (PNS, PPS, PWS). Poniżej pokazano możliwe sposoby uwzględnienia adaptacji w kolejnych problemach:

Adaptacyjne w wyborze najkrótszej ścieżki

Adaptacyjny PNS można zdefniować jako określenie najkrótszej ścieżki weryfikowanej w trakcie wykonywania podróży na podstawie zmiennych warunków ruchu. Jeśli warunki ruchu zmienią się na tyle, by inna ścieżka okazała się być optymalna, adaptacyjny model poda aktualne rozwiązanie optymalne

Pojęcia adaptacyjnego algorytmu PNS i PNS dla sieci stochastycznej są ze sobą powiązane. Adaptacyjny model najkrótszej ścieżki, to model uwzględniający zmienność sieci w czasie podróży, a wiedza o zmianach jest nieznana w momencie rozpoczynania podróży. Podejście adaptacyjne, w przeciwieństwie do modelu stochastycznego, daje jednak możliwość zmiany trasy w trakcie podróży.

Dla sieci zmiennej w czasie można wyróżnić dwa podejścia do adaptacji – bierne i czynne. Czynne polega na rozwiązaniu PNS w każdym węźle wybranej ścieżki w momencie dotarcia do niego na podstawie aktualnej wiedzy o sieci. Bierne polega na podjęciu „najbezpieczniejszej" ścieżki uwzględniając na etapie rozpoczynania podróży możliwość zmian w sieci. Podejście bierne jest bliskie rozwiązaniu stochastycznemu, uwzględnia jednak adaptacje w sensie procesu uczenia się (Snowdon i Fangohr, 2012). Dla podejścia czynnego PNS jest rozwiązywany na podstawie aktualnych warunków w sieci zazwyczaj jedną z klasycznych metod, ze zmiennym punktem rozpoczęcia poszukiwania.

Jedną z metod rozwijaną w tej dziedzinie przez badaczy (Gao, Frejinger, Ben-Akiva, 2010) jest uwzględnienie korelacji pomiędzy czasami przejazdu poszczególnych odcinków. Wiąże się to z faktem, że punktowe utrudnienia w sieci propagują na pozostałą część sieci, wobec czego można z dużym prawdopodobieństwem określić prawdopodobieństwo warunkowe pogorszenia warunków ruchu na odcinku x pod warunkiem pogorszenia ich na odcinku y. Tworzy się wówczas macierz korelacji która używana jest do zaktualizowania oczekiwanych wartości czasów przejazdu. Rozwinięcie to może prowadzić do dwu algorytmów: czynnego, gdzie w każdym kolejnym węźle ścieżki sprawdzamy, czy wybrana trasa nadal jest optymalna (z uwzględnieniem korelacji między utrudnieniami) lub do biernego wyboru strategii minimalizującej ryzyko wystąpienia utrudnień. Podstawowym mankamentem tego podejścia jest konieczność obliczenia macierzy korelacji dla każdej pary odcinków. Autorzy podają rozwiązanie dla sieci o pięciu odcinkach i rozważając jedynie korelacje każdej pary odcinków. Dla sieci o znacznie większej liczbie odcinków, oraz przy uwzględnieniu więcej niż dwu członów prawdopodobieństwa warunkowego byłoby to niemal niewykonalne.

Innym ciekawym podejściem jest algorytm uczący się z wykorzystaniem programowania agentowego (ang.: *agent-based modeling*). (Snowdon & Fangohr, 2012) pokazują przykład z prostą siecią na której symulują wielokrotny przejazdu przez sieć wielu „agentów" wyciągających wnioski z doświadczanych warunków ruchu. W zależności od doboru parametru współczynnika uczenia się każdy „agent" aktualizuje swoją macierz korelacji pomiędzy warunkami ruchu na poszczególnych odcinkach. Ciekawe spostrzeżenia tej pracy obejmują m.in. uwzględnienie zależności procesu uczenia się od wyborów innych agentów. Tzn. na skutek zróżnicowania sposobu uczenia się „agentów" podejmują oni decyzje rodem z teorii gier: *„Jeśli zatłoczony jest odcinek A, to powinienem wybrać odcinek B, jednak pod warunkiem że nie wybiorą go inni. Najprawdopodobniej jednak wybierze go na tyle dużo osób, że warto pozostać na odcinku A."* Innym cennym spostrzeżeniem jest fakt, że ustabilizowany stan sieci po przeprowadzeniu odpowiedniej liczby symulacji różni się od wyniku klasycznego algorytmu równoważącego (ang.: *equilibrium assignment*), który jest fundamentalnym algorytmem w modelowaniu ruchu.

Adaptacja w próbkowaniu ścieżek

Adaptacyjne rozwiązanie PPS, można zdefiniować jako określenie zbioru ścieżek obejmującego rozwiązania adptacyjnego PNS dla każdej kombinacji zmiany warunków ruchu w czasie. Byłoby to próbkowanie opisane jako funkcja zarówno zmian warunków ruchu w czasie, jak i momentu otrzymania informacji o tej zmianie. Algorytm taki posiadałby dwa stopnie swobody więcej w stosunku do klasycznego PPS i byłby bardzo obliczeniochłonny. Powstałaby wówczas iteracyjna procedura próbkująca ścieżki dla każdego węzła w którym może zostać podjęta decyzja o wyborze trasy. Proponowana wyżej metoda MH dla przypadku dynamicznego nie generuje wszystkich ścieżek efektywnych w przypadku adaptacyjnym. Istnieje również teoretyczna możliwość połączenia adaptacyjnych PNS z modelami próbkowania. Próbkowanie z definicji jest wykonywane przed procedurami symula-

cyjnymi (off-line), wobec tego adaptacja w próbkowaniu może być uwzględniona jedynie biernie – jako uwzględnienie możliwości zmiany w sieci z uwzględnieniem jego prawdopodobieństwa. Nie są znane autorowi przykłady modeli PPS, które uwzględniałyby możliwość adaptacji.

Adaptacja w wyborze ścieżki

Adaptacyjny algorytm wyboru ścieżki odpowiada jak ścieżki wybrane w klasycznym PWS zostaną zaadoptowane do aktualnych warunków ruchu.

Istnieją skuteczne metody adaptacyjnego PWS na potrzeby chociażby nawigacji (Bell et al., 2012). W metodach takich optymalna ścieżka jest weryfikowana w czasie rzeczywistym na podstawie docierających informacji. Korzystający z takiej nawigacji dostaje informacje o proponowanej zmianie ścieżki i adaptacji jej do faktycznych warunków. Większość literatury w tej kwestii podaje rozwiązania dla pojedynczego użytkownika, bez informacji o wpływie adaptacji na całą sieć (Gao, 2012). Są to skuteczne rozwiązania działające w czasie rzeczywistym i uwzględniające zmiany w sieci. Nie pojawiają się jednak opisy metod pozwalających na uwzględnienie tego zjawiska w modelowaniu ruchu. Interesujące wyniki na temat adaptacji trasy na postawie informacji ze znaków zmiennej treści pokazuje (Schlaich, 2010). Badania takie mogą być podstawą do weryfikacji propozycji adaptacyjnego modelu wyboru ścieżki. Póki co brak znanych autorowi opisów adaptacyjnego modelu wyboru ścieżki na potrzeby modelowania ruchu.

6. Podsumowanie

W artykule omówiono obszerny zbiór teorii, który pozwala uzyskać w zwięzłej formie wiedzę o technicznej stronie modelowania ruchu. Pokazano tu elementarne teorie, powszechnie używane w modelowaniu. Pokazano także ich rozwinięcia i udoskonalenia, zarówno udoskonalenia w obrębie samych algorytmów, jak i użyteczne heurystyki przyśpieszające obliczenia. Jak pokazuje niniejszy przegląd wiele problemów jest nierozwiązanych, a wiele rozwiązań jest jedynie teoretycznymi propozycjami bez możliwości zastosowania w praktyce. Interesujący kazus przyśpieszenia rozwiązania PNS (Abraham i in., 2010) nawet o sześć rzędów wielkości w stosunku do klasycznego algorytmu Dijkstry pokazuje, jak bardzo można przyśpieszyć cały proces rozkładu ruchu na sieć. Metody takie wciąż nie są w pełni wykorzystywane w praktyce.

Równie interesujące jest stopniowe rozszerzanie definicji sieci transportowej – od najprostszego, statycznego grafu o obiektywnych, stałych kosztach przejazdu, przez odczuwalne wielomianowe koszty podróży, zmienne w czasie koszty i czasy przejazdu, stochastyczną niepewność, aż do subiektywnych map kognitywistycznych, którymi można opisać jak użytkownik dokonuje wyboru. Takie zwiększenie dokładności daje duże możliwości, potrzebne są jednak zwięzłe i użyteczne teorie, weryfikowane badaniami.

Jak jednak pokazuje przykład modeli wyboru ścieżki, gdzie od kilkunastu lat badacze roztrząsają poboczny problem współczynnika normalizującego z modelu logitowym, jeszcze daleka droga do wiernego odwzorowania zachowania użytkowników w sieci transportowej. Jednak raptowny wzrost dostępności danych oraz zdolności obliczeniowych pozwala mieć nadzieję na rozwój opisanych metod.

Bibliografia

[1] Abraham I., Delling D., Goldberg A. V., Werneck R., 2010. A Hub-Based Labeling Algorithm for Shortest Paths on Road Networks, Microsoft Research Silicon Valley.

[2] Bast H., S. Funke S., Sanders P., Schultes D., 2007, Fast Routing in Road Networks with Transit Nodes, Science, Vol. 316. no. 5824, p. 566, 27. April 2007.

[3] Bekhor, S., Ben-Akiva, M. E., & Ramming, M. S., 2006. Evaluation of choice set generation algorithms for route choice models. Annals of Operations Research, 144(1), 235–247. doi:10.1007/s10479-006-0009-8

[4] Bell, M. G. H., Trozzi, V., Hosseinloo, S. H., Gentile, G., & Fonzone, A., 2012. Time-dependent Hyperstar algorithm for robust vehicle navigation. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 46(5), 790–800. doi:10.1016/j.tra.2012.02.002

[5] Ben-Akiva, M., Bergman, M.J., Daly, A.J., Ramaswamy, R., 1984. Modeling inter-urban route choice behaviour. Proceedings of the Ninth International Symposium on Transportation and Traffic Theory. VNU Science Press, Utrecht. pp. 299–330.

[6] Ben-Akiva, M. and Ramming, S., 1998. Lecture notes: Discrete choice models of traveler behavior in networks. Prepared for Advanced Methods for Planning and Management of Transportation Networks. Capri, Italy

[7] Ben-Elia, E., & Shiftan, Y., 2010. Which road do I take? A learning-based model of route-choice behavior with real-time information. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 44(4), 249–264. doi:10.1016/j.tra. 2010.01.007

[8] Bliemer, M.C.J., Bovy, P.H.L., 2008. Impact of route choice set on route choice probabilities. Transportation Research Record, 2076, 10-19.

[9] Bovy, P.H.L., Bekhor, S., Prato, C.G., 2009. Route sampling correction for stochastic route choice set generation. Proceedings of the 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.

[10] Bovy, P.H.L., Fiorenzo-Catalano, S., 2007. Stochastic route choice set generation: behavioral and probabilistic foundations. Transportmetrica, 3(3), 173-189.

[11] Cantillo, V., Heydecker, B., Ortuzar, J.d.D., 2006. A discrete choice model incorporating thresholds for perception in attribute values. Transportation Research Part B, 40(9), 807-825.

[12] Cascetta, E., Nuzzolo, A., Russo, F. and Vitetta, A., 1996. A modified logit route choice model overcoming path overlapping problems. Specification and some calibration results for interurban networks, in J. B. Lesort (ed.), Proceedings of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Lyon, France.
[13] Cascetta, E., Papola, A., 2001. Random utility models with implicit availability perception of choice travel for the simulation of travel demand. Transportation Research Part C, 9(4), 249-263.
[14] Cooke, K., Halsey, E., 1966. The shortest route through a network with time-dependent internodal transit times. Journal of Mathematical Analysis and Applications 14, 493–498.
[15] De la Barra, T., B. Perez, and J. Anez., 1993. Multidimensional Path Search and Assignment. In Proceedings of the 21st PTRC Summer Meeting, pp. 307–319.
[16] De Palma A., Hansen P. And Labbé M., 1993. Commuters' paths with penalties for early or late arrival times, Transportation Science 24, 276-286
[17] Dijkstra, E. W., 1959. A note on two problems in connexion with graphs
[18] Dionne, R., 1978. E´ tude et extension d'un algorithme de Murchland. INFOR 16, 132–146.
[19] Dubois D., Prade H., 1980, Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications, Academic Press, New York, 1980.
[20] Fakcharoemphol J. and Rao S. Planar graphs, negative weight edges, shortest paths, and near linear time. In Proc. of the 42nd IEEE Annual Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS'01), Las Vegas, Nevada, pages 232–241, 2001.
[21] Flötteröd, G., & Bierlaire, M., 2011. Metropolis-Hastings sampling of paths.
[22] Frank H., 1969, Shortest paths in probability graphs, Operations Research 17 (4) (1969) 583–599.
[23] Frejinger, E., Bierlaire, M., & Ben-Akiva, M., 2009. Sampling of alternatives for route choice modeling. Transportation Research Part B: Methodological, 43(10), 984–994. doi:10.1016/j.trb.2009.03.001
[24] Frejinger, Emma., 2008. Route choice analysis: data, models, algorithms and applications, 4009. Retrieved from http://biblion.epfl.ch/EPFL/theses/2008/4009/EPFL_TH4009.pdf
[25] Frejinger, Emma., 2009. Route choice modeling without route choice, 1–14.
[26] Gao, S., Frejinger, E., & Ben-Akiva, M., 2010. Adaptive route choices in risky traffic networks: A prospect theory approach. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 18(5), 727–740. doi:10.1016/j.trc.2009.08.001

[27] Gao, Y., 2011. Shortest path problem with uncertain arc lengths. Computers & Mathematics with Applications, 62(6), 2591–2600. doi:10.1016/j.camwa.2011.07.058
[28] Gao, S, Huang, H., 2012. Real-time traveler information for optimal adaptive routing in stochastic time-dependent networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *21*(1), 196–213. doi:10.1016/j.trc.2011.09.007
[29] Gentile, G., Meschini, L., Papola, N., 2004. Fast heuristics for continuous dynamic shortest paths and all-or-nothing assignment.
[30] Hart, P. E., Nilsson, N. J., Raphael, B., 1972. „Correction to „A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths"". SIGART Newsletter 37: 28–29.
[31] Henzinger M.R., Klein P., Rao S., and Subramanian S. Faster shortest-path algorithms for planar graphs. Journal of Computer and System Sciences, 55(1):3–23, August 1997
[32] Hoogendoorn-Lanser, S., 2005. Modelling Travel Behaviour in Multimodal Networks, PhD thesis, Delft University of Technology.
[33] Johnson, D. B., 1975. Priority queues with update and finding minimum spanning trees, Information Processing Letters 4 (3): 53–57.
[34] Leyzorek, M., Gray, R. S., Johnson, A. A., Ladew, W. C., Meaker, Jr., S. R., Petry, R. M., Seitz, R. N., 1957. Investigation of Model Techniques — First Annual Report — 6 June 1956 — 1 July 1957 — A Study of Model Techniques for Communication Systems. Cleveland, Ohio: Case Institute of Technology.
[35] Liu B., 2007, Uncertainty Theory, 2nd ed., Springer-Verlag, Berlin, 2007.
[36] Liu W., 2010, Uncertain programming models for shortest path problem with uncertain arc lengths, in: Proceedings of the First International Conference on Uncertainty Theory, Urumchi, China, August 11–19, 2010, pp. 148–153.
[37] Menghini, G., Carrasco, N., Schüssler, N., & Axhausen, K. W., 2010. Route choice of cyclists in Zurich. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 44(9), 754–765. doi:10.1016/j.tra.2010.07.008
[38] Nielsen, O.A., 2004. Behavioral responses to road pricing schemes: description of the Danish AKTA experiment. Journal of Intelligent Transportation Systems 8 (4), 233–251.
[39] Pallottino, S., Scutella`, M., 1997. Dual algorithms for the shortest path tree problem. Networks 29, 125–133.
[40] Papinski, D., Scott, D. M., & Doherty, S. T., 2009. Exploring the route choice decision-making process: A comparison of planned and observed routes obtained using person-based GPS. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 12(4), 347–358. doi:10.1016/j.trf.2009.04.001

[41] Prato, C. G. 2009). Route choice modeling: past, present and future research directions, 2(1), 65–100.
[42] Prato, C.G., Bekhor, S., 2006. Applying branch & bound technique to route choice set generation. Transportation Research Record, 1985, 19-28.
[43] Ravindra K. Ahuja, Thomas L. Magnanti, and James B. Orlin, 1993. Network Flows: Theory, Algorithms and Applications.
[44] Sedgewick R., Wayne K., 2011. Algorithms (4th Edition) Addison-Wesley Professional.
[45] Sheffi, Y., Powell, W.B., 1982. An algorithm for the equilibrium assignment problem with random link times. Networks, 12, 191-207.
[46] Snowdon, J., & Fangohr, P. H., 2012. Evolution of adaptive route choice behaviour in drivers, (January), 1–12.
[47] Tarjan, R. E., 1983. Data structures and network algorithms. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics.
[48] van der Zijpp, N. J., & Fiorenzo Catalano, S., 2005. Path enumeration by finding the constrained K-shortest paths. Transportation Research Part B: Methodological, 39(6), 545–563. doi:10.1016/j.trb.2004.07.004
[49] Zhan, F. B., & Noon, C. E., 1998. Shortest Path Algorithms: An Evaluation using Real Road Networks, 10, 65–73.

ZASTOSOWANIE MODELI LOGITOWYCH DO OCENY SKUTECZNOŚCI INSTRUMENTÓW ZARZĄDZANIA MOBILNOŚCIĄ

Katarzyna Nosal
Katedra Systemów Komunikacyjnych, Politechnika Krakowska, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, tel. +48 12 628 2178, e-mail: knosal@pk.edu.pl

Streszczenie. *Niniejszy artykuł posiada charakter przeglądowy. W celu przypomnienia procesu modelowania wyborów dyskretnych, zaprezentowano ich ramy teoretyczne oraz konstrukcję funkcji użyteczności w oparciu o przykładowe parametry związane z procesem wyboru środka transportu. Następnie, opierając się na przykładach odnalezionych w literaturze zagranicznej, przedstawiono zastosowania modeli logitowych wielomianowych i zagnieżdżonych do oceny efektywności instrumentów zarządzania mobilnością.*

Słowa kluczowe*: zarządzanie mobilnością, ocena instrumentów zarządzania mobilnością, modele logitowe*

1. Wprowadzenie

Wiele procesów i zjawisk społecznych posiada charakter jakościowy – zmienne opisujące je, zarówno te zależne, jak i niezależne, przyjmują skończoną liczbę wartości. Zjawiska tego typu najczęściej dotyczą pewnych jednostek ekonomicznych, np. gospodarstw domowych, ale i pojedynczych jednostek, które dokonują codziennych wyborów spośród zbioru skończonych możliwości, przy czym zbiór ów składa się z conajmniej dwóch alternatyw. Przykładem takiego zjawiska może być proces podejmowania decyzji związanej z wyborem środka transportu – jednostka zastanawiając się nad środkiem lokomocji, którym odbędzie podróż, ma zazwyczaj do wyboru kilka opcji: samochód osobowy, środki transportu publicznego, niekiedy podróż pieszą lub rowerową, etc. Przedłożenie jednej z dostępnych alternatyw nad pozostałe uzależnione jest od różnorodnych czynników opisujących każdą z możliwości, dostępną dla osoby podejmującej decyzję. W przypadku rozważań dotyczących środka transportu takimi zmiennymi mogą być: czas, koszt, czy komfort podróży, natomiast modele wykorzystujące te zmienne i pozwalające określić prawdopodobieństwo podjęcia przez jednostkę określonej decyzji to modele logitowe i probitowe, zwane również modelami wyboru dyskretnego.

Mając na uwadze problemy dotykające współczesne miasta, takie jak: kongestia komunikacyjna, problemy z parkowaniem, zanieczyszczenie powietrza, wypadki, etc., będące skutkiem wzrastającej motoryzacji, dąży się do ograniczania ruchu

samochodowego, m.in. poprzez wpływanie na wybory dotyczące wyboru środka lokomocji. Służy temu m.in. koncepcja zarządzania mobilnością. Zarządzanie mobilnością to ogół działań związanych z planowaniem, organizowaniem, koordynowaniem i kontrolowaniem przemieszczania się ludzi, mających na celu wpływanie na postawy, wybory i zachowania komunikacyjne, a tym samym kształtowanie popytu na alternatywne, w stosunku do samochodów osobowych, środki transportu (transport publiczny, komunikacja piesza i rowerowa, czy podróżowanie w tzw. systemach carpooling i carsharing). Zmianie postaw i zachowań komunikacyjnych służy szereg instrumentów zarządzania mobilnością, m.in. instrumenty związane z koordynacją i organizacją usług transportowych, polityką parkingową, wdrażaniem rozwiązań fiskalnych oraz z działaniami informacyjnymi, edukacyjnymi i marketingowymi. Środki przeznaczane na realizacje działań zarządzania mobilnością pochodzą zarówno z funduszy publicznych, jak i prywatnych, a w obydwu przypadkach pożądanym efektem jest uzyskanie jak najkorzystniejszego bilansu korzyści, wynikających z zastosowania instrumentów, do poniesionych kosztów ich realizacji. Dlatego tak ważną kwestią jest ocena pozwalająca odpowiedzieć na pytanie, które ze stosowanych instrumentów zarządzania mogą okazać się najskuteczniejsze i zapewnić najlepsze efekty. Literatura zagraniczna wskazuje, jako jedno z narzędzi wspomagających ocenę skuteczności tego typu instrumentów, metodykę modeli logitowych. Za ich pomocą pokazać można, jakie jest prawdopodobieństwo wyboru konkretnego środka transportu, spośród zbioru dostępnych alternatyw, jeśli na poprawę funkcjonowania oraz sposób podróżowania tym środkiem lokomocji wpływamy wybranymi instrumentami zarządzania mobilnością, co wiąże się z ingerencją w wartości zmiennych określających alternatywę [1, 2, 3, 6, 7].

Niniejszy artykuł posiada charakter przeglądowy – w celu przypomnienia procesu modelowania wyborów dyskretnych, zaprezentowano ich ramy teoretyczne, a następnie przedstawiono przykłady zastosowania modeli logitowych do oceny efektywności instrumentów zarządzania mobilnością, odnalezione w literaturze zagranicznej.

2. Ramy teoretyczne modelowania wyborów dyskretnych

Modelowanie wyborów dyskretnych wymaga odniesienia się do następujących kwestii [4,5]:

- Decydent i jego charakterystyka – modelowanie wyborów dyskretnych dotyczy decyzji podejmowanych przez indywidualne podmioty, rozumiane jako: gospodarstwo domowe, rodzina, firma, stowarzyszenie, bądź pojedyncza osoba (np. osoba realizująca podróż). Istotną częścią procesu budowy modelu jest określenie charakterystyk socjoekonomicznych badanych decydentów (jednostek), a co za tym idzie populacji. Najczęściej są to informacje o wieku, płci, dochodzie, posiadaniu samochodu, etc.

- Zbiór dostępnych alternatyw – w celu dokonania wyboru decydent określa zbiór dostępnych alternatyw, zwany zwyczajowo zbiorem możliwych wyborów. Zbiór ten musi posiadać conajmniej dwie alternatywy, które wzajemnie się wykluczają. Jednostka wybiera zawsze tylko jedną alternatywę ze zbioru wszystkich dostępnych opcji. W procesie modelowania zagadnień transportowych problem decyzyjny może dotyczyć wyboru środka transportu – w tym przypadku zbiór dostępnych alternatyw zawiera wszystkie dostępne formy lokomocji, którymi decydenci mogą odbywać podróże realizowane w analizowanym obszarze: samochód osobowy, autobus, tramwaj, metro, rower, podróże piesze, etc.
- Zmienne określające dostępne alternatywy – alternatywom składającym się na zbiór możliwych wyborów przypisuje się atrybuty charakteryzujące je i rzutujące na proces podejmowania decyzji. Przykładowo, w odniesieniu do wyborów dotyczących środka transportu atrybutami mogą być: czas, koszt, komfort poroży, etc.
- Zasada wyboru – w procesie dokonywania wyboru, decydent porównuje wszystkie dostępne alternatywy (np. dostępne środki transportu) i wybiera najlepszą, przynoszącą najwyższy poziom satysfakcji, to znaczy tę, która charakteryzuje się największą tzw. funkcją użyteczności, uwzględniająca m.in. charakterystyki socjoekonomiczne decydenta oraz atrybuty dostępnych alternatyw. Tym samym, zasada wyboru związana jest z maksymalizacją funkcji użyteczności. Problemem badawczy w modelowaniu wyborów dyskretnych jest budowa funkcji użyteczności dla rozpatrywanych alternatyw, natomiast celem analizy jest wyjaśnienie zachowania populacji (grupy jednostek), na które składa suma wyborów poszczególnych jednostek.

3. Konstruowanie funkcji użyteczności w oparciu o przykładowe parametry oraz zastosowanie modeli logitowych do pokazania prawdopodobieństwa wyboru środka transportu

Mając na uwadze wspomniane powyżej ramy teoretyczne modelowania wyborów dyskretnych, badając przykładowo kwestię wyboru środka transportu w drodze do pracy, przez decydentów – pracowników przedsiębiorstwa, w pierwszej kolejności zdefiniować należy zbiór dostępnych dwóch alternatyw, np. autobus i samochód osobowy, a więc zbiór $C = \{autobus, samochód\}$ [4]. Następnym etapem jest identyfikacja czynników odpowiedzialnych za dokonywane wybory. W analizowanym przykładzie, decydent podejmując decyzję rozpatrywać może następujące cechy dostępnych środków lokomocji: czas i koszt podróży. Proces modelowania wymaga pomiaru preferencji, czyli określenia wpływu czasu i kosztu podróży danym środkiem transportu na wybór decydenta. Określenie preferencji odbywa się za pomocą badań ankietowych preferencji ujawnionych, bądź stwierdzonych. Na tym etapie analizy należy mieć na uwadze również następującą kwe-

stię: w modelu obserwowane są wybory jednostek (suma wyborów to popyt), przy czym można mówić o wyborze:

- bezwarunkowym – nie uzależnionym od innych czynników, czy wcześniejszych wyborów i nie wymagającym założeń wstępnych,
- warunkowym – uwarunkowanym innym czynnikiem, np. koniecznością realizacji innych celów podróży; w przypadku tego rodzaju wyborów istotne jest zbadanie zależności o charakterze przyczynowo-skutkowym.

Podejmując próbę budowy funkcji użyteczności *U* dla zdefiniowanych wcześniej alternatyw (autobus czy samochód), przyjmujemy atrybuty dostępnych alternatyw związane z czasem oraz kosztem podróży [4]. Dla autobusu będą to przykładowo: czas dojścia do przystanku, czas podróży autobusem, koszt podróży, natomiast dla samochodu: czas podróży samochodem oraz koszt parkingu. Przy początkowym założeniu, że funkcja posiada charakter liniowy, funkcję użyteczności dla autobusu można zapisać w następujący sposób:

$$U(\text{autobus}) = \alpha_1 * (\text{czas dojścia do przystanku}) + \alpha_2 * (\text{czas podróży autobusem}) \quad (1)$$

Analogicznie, buduje się funkcję użyteczności dla samochodu.

Przy uwzględnieniu parametrów socjoekonomicznych decydentów, które mogą różnicować wybory (np. wiek, płeć, dochód, etc.), funkcja użyteczności dla autobusu przyjmuje postać:

$$U(\text{autobus}) = \alpha_1 * (\text{czas dojścia do przystanku}) + \alpha_2 * (\text{czas podróży autobusem}) + \alpha_3 * (\text{koszt podróży/dochód}) + \ldots \quad (2)$$

Wybór deterministyczny dla rozpatrywanego problemu badawczego wyglądałby następująco:

$$\begin{aligned} &\text{Jeśli } U(\text{autobus}) - U(\text{samochód}) > 0, && \text{prawdopodobieństwo (autobus)} = 1 \\ &\text{Jeśli } U(\text{autobus}) - U(\text{samochód}) < 0, && \text{prawdopodobieństwo (autobus)} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Jednak konstruując funkcję użyteczności badacz musi być świadomym kilku faktów. Po pierwsze, różne jednostki charakteryzują różne preferencje, a więc różni decydenci mogą inaczej oceniać te same alternatywy. Analiza wyborów dyskretnych ma na celu wyjaśnienie różnicowania podejmowanych decyzji w populacji oraz identyfikację czynników, które determinują zarówno to zróżnicowanie, jak i same wybory. Należy pamiętać również o tym, że decydent jest świadomy, na jakiej podstawie dokonuje wyboru, natomiast badacz zna jedynie efekt końcowy. Dodatkowo, zazwyczaj nie bada się całej populacji, a tylko reprezentatywną próbę, co, pomimo faktu reprezentatywności, wiąże się z ryzykiem pewnej niedokładności i przekłada się na dodatkową wariancję błędu. Mając na uwadze powyższe, badacz musi się zmierzyć z problemem występowania nieobserwowanych czynników, które mają wpływ na wybór decydenta. Ze względu na ów komponent nieobserwowany β nie można opisywać funkcji użyteczności równaniem regresji

liniowej. Wybór decydenta ma charakter probabilistyczny, a funkcję użyteczności przedstawić można w następujący sposób:

$$U_i = V_i + B_i \tag{4}$$

gdzie:
U_i - całkowita funkcja użyteczności związana z wyborem alternatywy i,
V_i - część obserwowana funkcji użyteczności (atrybuty alternatywy i, parametry socjoekonomiczne),
β_i – komponent nieobserwowany

Przykładowo dla autobusu:

$$U \text{ (autobus)} = \alpha_1 * \text{(czas dojścia do przystanku)} + \alpha_2 * \text{(czas podróży autobusem)} + \beta \tag{5}$$

Zakłada się, że obie składowe funkcji użyteczności V_i i β_i są niezależne i addytywne. Osoba budująca model wyboru posiada mniej informacji niż decydenci. Obserwując zrealizowane wybory i cechy alternatyw oraz charakterystyki decydentów może pomijać pewne istotne czynniki, a więc w rezultacie może ona posługiwać się jedynie prawdopodobieństwem wyboru. Prawdopodobieństwo, że jednostka *n* wybierze alternatywę *i* jest niemniejsze niż prawdopodobieństwo tego, że użyteczność przypisana tej alternatywie jest wyższa od użyteczności przypisanych pozostałym alternatywom:

$$P(Y= i) = Pr(U_{ni} > U_{nj} \ \forall \ i \neq j) \tag{6}$$

W rzeczywistości nie obserwuje się jednak użyteczności, ale atrybuty alternatyw i decydenta.

$$\begin{aligned} P(Y = i) &= Pr(V_{ni} + \beta_{ni} > V_{nj} + \beta_{nj} \qquad \forall \ i \neq j) \\ P(Y = i) &= Pr(V_{ni} - V_{nj} > \beta_{nj} - \beta_{ni} \qquad \forall \ i \neq j) \end{aligned} \tag{7}$$

Po powyższych przekształceniach, prawdopodobieństwo wyboru przez jednostkę alternatywy *i* jest równe prawdopodobieństwu, że różnica pomiędzy relatywną użytecznością z części nieobserwowanej jest nie większa niż różnica w obserwowanej części użyteczności. W zastosowaniach przyjmuje się rozkład logistyczny, ponieważ daje się on wyrazić za pomocą wzoru analitycznego:

$$P(\beta j - \beta i < \beta) = exp\ (-\ exp(-\ \beta\ )) \tag{8}$$

Przyjęcie rozkładu logistycznego dla nieobserwowanej części użyteczności oraz założenie o niezależności niezwiązanych alternatyw prowadzi do najczęściej stosowanego, modelu logitowego wielomianowego [4,5]:

$$P(Y = i) = \frac{eV_{in}}{\sum_{i=1}^{J} eV_{jn}} \tag{9}$$

Jeśli pomiędzy dostępnymi alternatywami zachodzi korelacja, korzysta się z modeli logitowych zagnieżdżonych. Grupa podobnych alternatyw, np. autobus czerwony i autobus niebieski, tworzą tzw. gniazdo, a każda z dostępnych alternatyw należeć może tylko do jednego gniazda. Natomiast w przypadku modelowania wyborów dotyczących alternatyw, które mogą należeć do więcej niż jednego gniazda (np. autobusu, który jest jednocześnie środkiem transportu publicznego oraz środkiem transportu drogowego), stosuje się modele logitowe zagnieżdżone krzyżowe.

4. Zastosowanie modeli logitowych do oceny skuteczności instrumentów zarządzania mobilnością

Literatura zagraniczna podaje przykłady zastosowania modeli logitowych (wielomianowych, zagnieżdżonych) do pokazania wpływu instrumentów zarządzania mobilnością na wybór środka transportu. Oceniając skuteczność instrumentu zarządzania mobilnością w tym kontekście, bada się, czy zastosowanie instrumentu prowadzi do zmniejszenia prawdopodobieństwa wyboru samochodu w podróżach (oraz o ile?) lub zwiększenia prawdopodobieństwa wyboru środków alternatywnych w stosunku do samochodu [1, 2, 3, 6, 7].

Autorzy publikacji „Wybór oraz ocena instrumentów zarządzania mobilnością" [7] wykorzystują model logitowy przyrostowy (stopniowy, narastający) dla oceny korzyści z zastosowana instrumentów zarządzania mobilnością. W swoich badaniach podkreślają ważność pozyskania danych dotyczących charakterystyki osób podróżujących w rozpatrywanym w obszarze oraz informacje o istniejącym podziale zadań przewozowych i obecnym poziomie usług transportu publicznego. Dane wyjściowe zastosowanego modelu mówią o spodziewanym podziale zadań przewozowych oraz redukcji pojazdo-km, uzyskanych w skutek zastosowania konkretnych instrumentów zarządzania mobilnością.

Wykorzystany w badaniach model logitowy pokazujący prawdopodobieństwo wyboru alternatywnego w stosunku do samochodu osobowego, środka transportu, miał następującą postać:

$$P_n^{'}(i) = \frac{P_n(i)e^{\Delta U_{in}}}{\sum_{j \in C_n} P_n(j)e^{\Delta U_{jn}}} \tag{10}$$

gdzie:

$P_n^{'}(i)$ – prawdopodobieństwo wyboru przez jednostkę n środka transportu i po zastosowaniu instrumentów zarządzania mobilnością,

$P_n(i)$ – prawdopodobieństwo wyboru przez jednostkę n środka transportu i przed zastosowaniem instrumentów zarządzania mobilnością,

ΔU_{in} – zmiana w funkcji użyteczności dla alternatywy i,

C_n – zbiór środków transportu, z których jednostka n może dokonać wyboru.

Co ważne, jeśli wcześniej, w odniesieniu do któregokolwiek środka transportu, prawdopodobieństwo jego wyboru w podróżach było równe 0, to dla wyboru tego środka transportu po wprowadzeniu zmian (zastosowaniu instrumentu zarządzania mobilnością), nowe prawdopodobieństwo jego wyboru również będzie równe 0.

Badania przeprowadzono w mieście Syracuse w stanie Nowy York, posiadającym ok. 470.000 mieszkańców, z czego 163.000 mieszka w mieście Syracuse. Istnieje tam dobrze rozbudowana sieć połączeń autostradowych oraz lotnisko. Przez miasto przebiega także główny korytarz kolejowy łączący miejscowości Bufallo i Albany. Miasto obsługiwane jest przez komunikację autobusową, jednakże udział transportu autobusowego w podróżach, w ostatnich latach wyraźnie się obniżył, a podróże w większości realizowane były przy użyciu samochodu prywatnego. Na potrzeby badań wyodrębniono mniejszy, przemysłowo-biznesowy obszar, mając na uwadze następujące czynniki:

- percepcję publiczną dotyczącą postrzegania problemów z zatłoczeniem komunikacyjnym, parkingami i innymi trudnościami w ruchu,
- dostępność alternatywy dla jednoosobowych podróży realizowanych samochodem lub możliwość dostarczenia (stworzenia) takich alternatyw,
- duże potoki ruchu, duża liczba podróży realizowanych w badanym obszarze.

Obszar składający się 338 rejonów komunikacyjnych zagregowano do 116, dla uniknięcia problemu występowania zerowych podróży realizowanych którymkolwiek ze środków lokomocji oraz zapewnienia dostępności każdego z rejonów komunikacyjnych do sieci ulic głównych i usług transportowych. Badano podróże o motywacjach: dom-praca, praca-dom (godziny szczytu), poddając analizie decyzję wyboru środka transportu spośród następujących dostępnych alternatyw:

- samochód osobowy – podróże jednoosobowe,
- samochód osobowy – podróże 2 lub więcej osobowe (2, 3, 4 i 5 – osób w pojeździe),
- środki transportu publicznego (komunikacja autobusowa).

Jako, że starano się pokazać wpływ instrumentów zarządzania mobilnością na redukcję przejechanych pojazdo-km, czynnikiem ważnym z tego punktu widzenia był dystans podróży (oszacowany, jako najkrótsza ścieżka pomiędzy poszczególnymi rejonami komunikacyjnymi) oraz czas podróży, wyznaczony wskutek podzielenia dystansu przez prędkość podróży. Obserwowano zmiany w czasie oraz koszcie podróży, natomiast funkcja użyteczności U_k opisana została w następujący sposób:

$$U_k = A_k + 0.02\ (\text{IVTT}) + 0.05\ (\text{AOVTT}) + 0.05\ (\text{TOVTT}) + 0.004\ (\text{TCOST}) + 0.02\ (\text{PKCOST}) + 0.1\ (\text{HOVTT}) \quad (10)$$

gdzie:

U_k – funkcja użyteczności dla środka transportu k,

AK – współczynnik skali dla środka transportu k,

IVTT – czas podróży w pojeździe (min) ,

AOVTT – czas dojścia do samochodu (parkingu) dla użytkowników samochodu (min),
TOVTT – czas podroży poza środkiem transportu zbiorowego – dojścia do przystanku, etc., (min) ,
TOST – koszt biletu transportu publicznego,
PKCOST – koszt parkingu,
HOVTT – oszczędność czasu podróży wskutek użycia pasów HOV (pasów ruchu na których dowolny jest ruch pojazdów w więcej niż dwoma pasażerami na pokładzie).

Ocenie poddano instrumenty zarządzania mobilnością związane z wpływaniem na czas lub koszt podróży i rezultaty tego zabiegu związane ze zmianą zachowań komunikacyjnych. Badano efekty zastosowania następujących instrumentów:

- zmniejszenie opłat (zmian taryfy) za korzystanie z transportu zbiorowego,
- skrócenie czasu przejazdu środkami transportu publicznego,
- skrócenie czasu dojścia do przystanków transportu publicznego,
- skrócenie czasu podróży realizowanej w systemie carpooling wskutek możliwości skorzystania z pasów HOV,
- skrócenie czasu podróży realizowanej w systemie carpooling wskutek możliwości skorzystania z preferencyjnego miejsca parkingowego,
- zmiany dotyczące kosztu miejsca parkingowego (zależne od liczby osób w samochodzie).

Badania wykazały, że najbardziej wyraźne zmiany w podziale zadań przewozowych można uzyskać wprowadzając instrumenty zarządzania mobilnością mające na celu zwiększanie kosztów miejsca parkingowego, szczególnie w przypadku osób realizujących jednoosobowe podróże samochodem. Analiza wrażliwości pozwoliła na pokazanie, jakiego rzędu zmian w prawdopodobieństwie wyboru środka transportu można się spodziewać, zmieniając wartości odpowiednich zmiennych: czasu i kosztów podróży wykonywanych poszczególnymi środkami lokomocji.

Model logitowy zbudowany przez Berkowitz'a [3], który badał wpływ różnych instrumentów zarządzania mobilnością na zmianę w zachowaniu komunikacyjnym i wybór środka lokomocji, uwzględniał następujące alternatywy: środek transportu wodnego (prom pasażerski), samochód osobowy oraz komunikację autobusową przyspieszoną. Badacz położył duży nacisk na najważniejsze elementy czasu, kosztu, komfortu podróży oraz przekonania i upodobania użytkowników. Zauważył, że zmiana środka transportu z promu pasażerskiego na autobus przyspieszony jest wynikiem zastosowania instrumentów zarządzania mobilnością związanych ze skróceniem czasu podróży komunikacją autobusową, zwiększeniem poziomu komfortu oraz zmianą struktury cenowej. Natomiast spadek użytkowników autobusu na rzecz promu uwarunkowany jest zwiększeniem kosztu podróży autobusem, ograniczaniem pojemności pojazdu, oraz spadkiem ogólnie pojętej jakości usługi komunikacji autobusowej. Z kolei Alijarad i Black [1], analizując wpływ różnych strategii na wybór środka transportu spośród następujących form lokomocji: środki transportu wodnego, środki transportu drogowego oraz lotniczego

wykorzystywali jako zmienne: częstotliwość kursowania oraz moment podejmowania decyzji.

Nam i Park [6] w swoich badaniach dotyczących wytypowania najbardziej efektywnych instrumentów zarządzania mobilnością, mających na celu zmianę zachowań komunikacyjnych podróżnych w kierunku wyboru promu pasażerskiego, zamiast środków transportu drogowego, wykorzystali modele logitowe wielomianowe oraz zagnieżdżone. Zbiór alternatyw służących budowie modelu stanowiły: prom pasażerski, autobus, samochód osobowy typu van, samochód osobowy o małej pojemności. Zmienne wykorzystane w procesie budowy modelu dotyczyły atrybutów dostępnych alternatyw oraz charakterystyk socjoekonomicznych, takich, jak: czas podróży (oraz poszczególne jego składowe: czas dojścia do przystanku, czas jazdy w pojeździe, etc.), koszt podróży, strefa dostępu (w przypadku promu), komfort podróży, liczba właścicieli samochodu, liczba osób podróżujących w podjeździe (w przypadku samochodów), poziom dochodu, płeć, wiek. Dane do budowy modelu pozyskano z badań prowadzonych w oparciu o preferencje ujawnione. Badano wpływ rożnych instrumentów zarządzania mobilnością mając na uwadze podróże dom – praca, ale również i te niezwiązane z domem. Dla pokazania preferencji dotyczących komfortu podróży, użyto skali składającej się z poziomów komfortu: bardzo ubogi, ubogi, przyzwoity, dobry i bardzo dobry, a następnie, dla pokazania komfortu podróży w ujęciu ilościowym, każdemu z poziomów przyporządkowano odpowiednia liczbę od 1 do 5. Podejmując próbę wytypowania najefektywniejszych instrumentów zarządzania mobilnością, badano wpływ stosowania takich, które powodują zmiany w czasie, koszcie lub komforcie podróży, a następnie korzystając z analiz elastyczności, szacowano prawdopodobieństwo wyboru uprzywilejowanego środka transportu w zależności od skali zmian.

Wykazano, że najbardziej skutecznym zabiegiem zachęcającym do podróżowania środkami transportu wodnego jest stosowanie instrumentów mających na celu zmniejszanie czasu podróży promem (czas jazdy w podjeździe), redukcję kosztów podróży oraz czasu oczekiwania na przystankach obsługujących prom. Na tej podstawie wytypowano kilka strategii pozwalających zmniejszyć wskazane, czas i koszt podróży:

- poprawa parametrów związanych z prędkością podróży,
- lepsza koordynacja usług transportu wodnego i autobusowego w celu zmniejszenia czasu oczekiwania,
- zapewnienie informacji o funkcjonowaniu usługi transportu wodnego oraz dostępnej infrastrukturze przystankowej,
- zapewnienie informacji o możliwości realizowania podróży intermodalnych różnymi środkami transportu,
- wprowadzenie specjalnych tygodniowych taryf na przejazdy środkami transportu wodnego,
- stworzenie darmowej usługi autobusów wahadłowych kursujących pomiędzy najbliższym węzłem przesiadkowym, a przystankami obsługującymi prom,
- zwiększenie częstotliwości kursowania.

5. Podsumowanie

Mając na uwadze wskazane powyżej przykłady, zasadnym wydaje się podjęcie próby wykorzystania modeli logitowych dla potrzeb badania skuteczności instrumentów zarządzania mobilnością w warunkach polskich. Do pokazania prawdopodobieństwa wyboru alternatywnych do samochodu form lokomocji, w przypadku zastosowania instrumentów zarządzania mobilnością, można by było wykorzystać model logitowy zagnieżdżony, jak i zagnieżdżony krzyżowy dla następujących alternatyw: samochód osobowy (zarówno w odniesieniu do podróży realizowanych pojedynczo, jak i w systemie carpooling), środki transportu publicznego (autobus, tramwaj) oraz komunikacja piesza i rowerowa. Badania wymagałyby danych o decydentach (grupie adresatów projektów zarządzania mobilnością, np. pracowników lub mieszkańców miasta, bądź wyodrębnionego obszaru w mieście) oraz ich charakterystyki socjoekonomicznej, pozyskanych w badaniach ankietowych preferencji deklarowanych oraz ujawnionych.

Jako charakterystyki dostępnych alternatyw proponuje się przyjąć: czas podróży oraz koszt podróży (wszystkie ich składowe, w zależności od rozpatrywanego środka transportu), a także komfort podróży. Następnym etapem jest poszukiwanie związku pomiędzy zastosowaniem konkretnego instrumentu zarządzania mobilnością, jego wpływem na zmianę wartości charakterystyk, a co za tym idzie zmianę dotyczącą prawdopodobieństwa wyboru środka lokomocji. Przykładowo, można by badać, jakie rezultaty przynosi wprowadzenie nowej polityki parkingowej, np. redukcji części miejsc parkingowych, rzutującej na zwiększenie czasu oraz kosztu podróży, lub, jaki jest efekt zamontowania wyświetlaczy z informacją o rzeczywistym czasie przyjazdu pojazdu na przystanek, w jaki sposób zmniejszany tym samym postrzegany czas oczekiwania na przystanku wpływa na prawdopodobieństwo wyboru środków transportu publicznego w podróżach.

Zastosowanie modeli logitowych wydaje się być zasadne z uwagi na jeszcze jeden fakt – za ich pomocą można badać efekt synergii, czyli skutki zestawiania kilku różnych instrumentów zarządzania mobilnością i ich wpływ na proces podejmowania decyzji dotyczącej środka lokomocji. Analiza wrażliwości pozwoli pokazać, jaki pakiet instrumentów może okazać się najbardziej skuteczny.

Literatura

[1] Alijarad S.N., Black W.R., Modeling Saudi Arabia-Bahrain Corridor Mode Choice. Journal of Transportation Geography, No.3, pp.257-268, 1995.
[2] Beaton P., Chen C., Meghdir H., Stated Choice for Transportation Demand Management, Models Using a Disaggregate Truth Set To Study Predictive Validity. Transportation Research Record 1598, Paper No. 970431.
[3] Berkowitz B., Modeling Waterborne Passenger Transportation User Characteristics. Transportation Research Record 1263, pp.68-76, 1990

[4] Ben-Akiva M., Lerman S., Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand. The MIT Press, 1977.
[5] Chow G.C., Ekonometria. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1995.
[6] Nam D., Park D., Strategies enhancing water transportation using econometric model approach. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 6, pp. 825 - 837, 2005
[7] Taylor Ch.J., Nozick L.H., Meyburg A.H., Selection and Evaluation of Travel Demand Management Measures, Transportation Research Record 1598, Paper No. 971114 49.

ZASTOSOWANIE MAP OSM W BUDOWIE MODELU SIECI AGLOMERACJI POZNAŃSKIEJ DLA SYMULACJI W MATSIM[1]

Bartłomiej Piątkowski
mgr inż., Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, e-mail: bartlomiej.piatkowski@doctorate.put.poznan.pl

Michał Maciejewski
dr inż., Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, e-mail: Poznań michal.maciejewski@put.poznan.pl

Streszczenie. *W artykule przedstawiono procedurę tworzenia modelu sieci drogowej z wykorzystaniem danych GIS OpenStreetMap, a także wstępne wyniki symulacji ruchu dla aglomeracji poznańskiej w systemie MATSim. W tym celu zaprezentowano proces budowy modelu dla aglomeracji poznańskiej i jego wykorzystanie do symulacji wieloagentowej w środowisku MATSim. Następnie dokonano oceny wpływu poziomu szczegółowości modelu sieci na wyniki symulacji. W tym celu stworzono cztery modele sieci drogowej aglomeracji poznańskiej. W kolejnym kroku, na podstawie macierzy OD z modelu aglomeracji otrzymanego z Urzędu Miasta Poznania, stworzono syntetyczną populację agentów reprezentujących stronę popytową. Po przeprowadzeniu symulacji dokonano porównania wyników na podstawie takich wskaźników jak średni czas przejazdu, średnia prędkość itp. Prezentowane prace stanowią pierwszy etap przygotowywania nowego modelu ruchu dla aglomeracji poznańskiej. Planowane jest przeprowadzenie wieloagentowej symulacji w systemie MATSim dla pełnej doby i w oparciu o całodniowe łańcuchy aktywności.*

Słowa kluczowe: *symulacja wieloagentowa, kolejkowe modele przepływu ruchu, MATSim, OpenStreetMap*

1. Wprowadzenie

Budowa modelu sieci drogowej jest jednym z etapów tworzenia modeli ruchu. Zazwyczaj sieć reprezentowana jest przez graf skierowany składający się z węzłów reprezentujących skrzyżowania i łączących je odcinków, które odzwierciedlają drogi. Każdy odcinek posiada odpowiednie atrybuty takie jak: liczba pasów, przepustowość dozwolona prędkość, długość [1,2,3]. Z kolei węzły mogą dodatkowo zawierać opis dopuszczalnych manewrów czy informacje o sygnalizacji świetlnej bądź podporządkowaniu dróg.

Model sieci drogowej powinien być zaprojektowany w ten sposób, aby odzwierciedlał istniejącą sieć drogową zgodnie ze stanem rzeczywistym, z zachowaniem topologii oraz wszystkich informacji niezbędnych do przeprowadzenia badań i symulacji oraz optymalnie spełniać stawiane dodatkowo wymagania [2]. Dlatego

1 Wkład procentowy poszczególnych autorów: Piątkowski B. 50%, Maciejewski M. 50%

bardzo ważnym aspektem podczas budowy modelu jest wybór odpowiedniego poziomu szczegółowości odwzorowania. W tym miejscu pojawia się jednak dylemat ekonomia a realizm, przed którym staje osoba tworząca model [1]. Z jednej strony bardzo wysoki poziom szczegółowości gwarantuje dużą dokładność modelu, jednak wiąże się z bardzo długim czasem tworzenia samego modelu, a także utrudnia jego późniejszą aktualizację [2]. Z drugiej jednak strony, zbyt uproszczony model może prowadzić m.in. do błędnych wyników symulacji ruchu. Mało dokładny model sieci drogowej, składający się tylko z dróg głównych, może być powodem znacznego przeszacowania natężeń na poszczególnych odcinkach. Co więcej, może nie wykazać pewnych zdarzeń np. zwiększonego ruchu na drogach niższego rzędu (ponieważ nie zostaną one w ogóle uwzględnione w modelu) spowodowanego zamknięciem okolicznej głównej drogi. W modelu ruch zostanie rozłożony po głównych drogach, a w rzeczywistości kierowcy będą używać odcinków o niższej randze.

Jansen and Bovy [4] sprawdzili w jaki sposób odwzorowanie i poziom szczegółów sieci wpływa na wyniki rozkładu ruchu. Po przeprowadzeniu badań postawili tezę, że modelowana sieć drogowa powinna zawierać o jeden poziom niższy w hierarchii typów dróg od tego, który jest badany, np. badając drogi szybkiego ruchu w modelu powinny znaleźć się także drogi krajowe czy też wojewódzkie [1].

Niestety, nie istnieje jedna reguła, według której tworzy się modele sieci drogowych. Osoba budująca model musi w sposób ekspercki określić, które odcinki muszą zostać uwzględnione, a które mogą zostać pominięte bez negatywnego wpływu na jakość wyników badań.

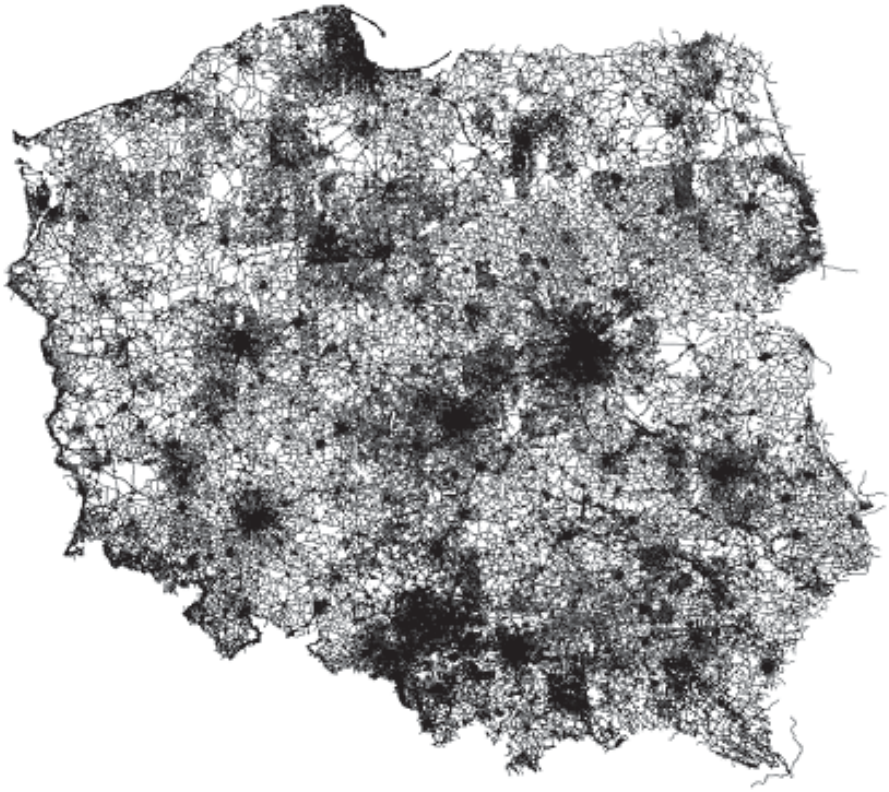
2. Automatyzacja tworzenia sieci drogowej

W przypadku małych miejscowości, gdzie w obszarze analizy występuje rzadka i nieskomplikowana sieć drogowa, proces budowy modelu sieci jest relatywnie szybki. Zazwyczaj polega na wykorzystaniu zdigitalizowanej mapy jako tła projektu i ręcznym wstawianiu odcinków pokrywających się z występującymi drogami [5]. Jednak w przypadku większych obszarów analizy zawierających kilka- lub kilkanaście miejscowości lub modelując duże miasto bądź aglomerację, proces ręcznego tworzenia sieci drogowej znacznie wydłuża się w czasie. Na obszarze analizy występuje nie tylko większa liczba typów dróg (autostrady, drogi szybkiego ruchu, drogi krajowe, wojewódzkie itp.), ale także odcinki posiadają bardziej zróżnicowane atrybuty jak liczba pasów, prędkość w ruch swobodnym, przepustowość itp.

W celu zminimalizowania czasu budowy modelu sieci drogowej z zachowaniem wysokiego poziomu szczegółowości wskazane jest wykorzystanie map i danych zapisanych w postaci GIS [6, 7]. Posiadają one nie tylko informacje dotyczące sieci drogowej, ale także o sieci kolejowej, zbiornikach oraz szlakach wodnych, obrysach budynków, czy zagospodarowaniu przestrzennym itp. [6, 7]. Jednym z darmowych zasobów takich danych jest globalny projekt OpenStreetMap (OSM) [8],

w którym każdy użytkownik może współtworzyć elementy cyfrowej mapy całego świata. Dzięki temu zasoby OpenStreetMap w porównaniu do komercyjnych map są na bieżąco aktualizowane. Wszelkie dane udostępniane są na otwartej licencji, co umożliwia ich swobodne wykorzystanie.

Pierwszym krokiem procedury tworzenia sieci drogowej z wykorzystaniem dostępnych baz danych OSM jest pozyskanie najnowszych map. W ramach artykułu na potrzeby stworzenia modelu sieci drogowej dla aglomeracji poznańskiej punktem wyjścia była szczegółowa mapa OSM Polski (rys.1), aktualizowana na stronach geofabrik.de [9].

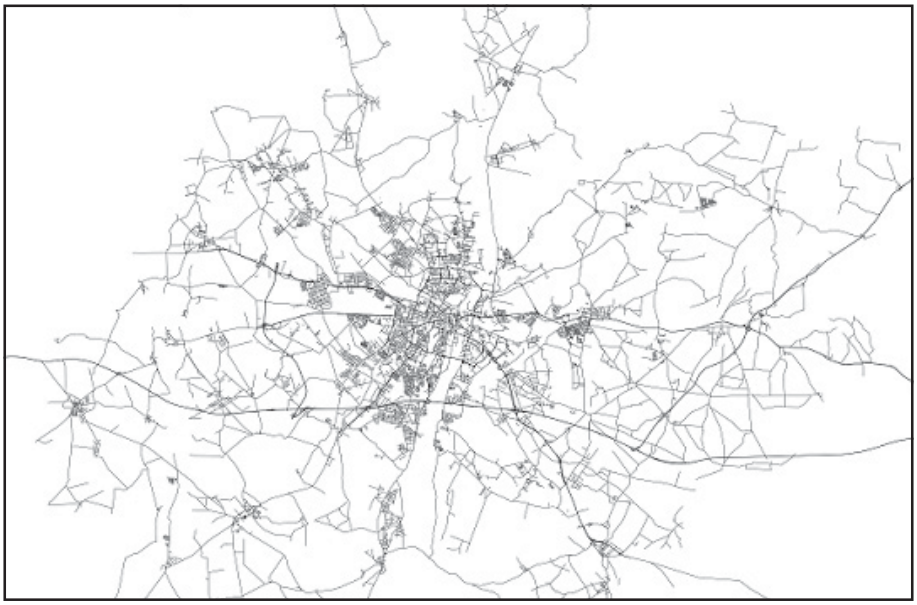


Rys. 1. Przygotowana do obróbki, aktualna drogowa mapa Polski

Drugim krokiem jest ograniczenie obszaru analizy z zaznaczeniem niezbędnych danych, które powinny być zawarte w modelu. Najlepszym rozwiązaniem jest zdefiniowanie wielokąta określając współrzędne geograficzne każdego jego wierzchołka na podstawie np. granic administracyjnych miasta czy aglomeracji, a następnie określenie jakiego typu dane powinny zostać odfiltrowane w stworzonych obszarach, aby pozostawić tylko te, które są istotne z punktu widzenia przeprowadzanych badań. Przygotowując model aglomeracji poznańskiej obszar podzielono na dwa podobszary:

- aglomeracja poznańska, w którym znalazły się autostrady, drogi ekspresowe, drogi krajowe, drogi wojewódzkie, drogi powiatowe, drogi gminne, drogi miejskie i osiedlowe,
- otoczenie aglomeracji, w którym pozostawiono autostrady, drogi szybkiego ruchu i drogi krajowe.

Kategoryzację typów dróg występujących w modelu wykonano przypisując poszczególnym odcinkom w systemie OSM – kategorie dróg wyróżniane w Polsce (tab.1). Następnie połączono oba podobszary i stworzono model sieci drogowej aglomeracji poznańskiej wraz z jej najbliższym sąsiedztwem (rys. 2). Ekstrakcja obu obszarów z mapy Polski i ich późniejsza integracja zostały zautomatyzowane w oparciu o oprogramowanie osmosis [10].



Rys. 2. Wygenerowana sieć aglomeracji poznańskiej

Ostatnim etapem budowy modelu sieci jest ekstrakcja wybranych danych z formatu OSM i zbudowanie w sposób automatyczny modelu sieci drogowej na potrzeby symulacji w systemie MATSim [11,12]. Jako że w MATSim zastosowano mezoskopowy kolejkowy model przepływu ruchu, niezbędne były informacje o liczbie pasów, prędkości ruchu swobodnego oraz przepustowości dla każdego z odcinków.

Niestety w danych z sytemu OSM, jak również w innych mapach cyfrowych, tylko część odcinków ma wyspecyfikowany pełen zestaw atrybutów. Dlatego, aby w sposób automatyczny dokonać ustalenia wartości brakujących atrybutów odcinków, przyjęto wartości domyślne dla każdego typu dróg (tab. 1). W wyniku analizy odcinków o niesklasyfikowanym typie przyjęto, że w większości przypadków odpowiadają one drogom miejskim. Na podstawie map i zdjęć satelitarnych obszaru

stwierdzono, że odcinki dróg ekspresowych jednojezdniowych, dwukierunkowych posiadają po jednym pasie w każdym kierunku. Dodatkowo w przypadku braku informacji o liczbie pasów dla jednokierunkowych odcinków dróg ekspresowych, krajowych, wojewódzkich i powiatowych przyjmowano liczbę pasów równą 2, zakładając, że odcinek ten reprezentuje jezdnię drogi dwujezdniowej.

Tablica1. Podział na typy odcinków wraz z domyślnymi wartościami ich atrybutów

Lp.	Typ drogi w OSM	Typ odcinka zgodnie z kategoryzacją dróg w Polsce	Liczba pasów	Prędkość dopuszczalna	Przepustowość
1	motorway	autostrady	2	140	2000
2	motorway_link	wjazdy i zjazdy z autostrad	1	70	1500
3	trunk	drogi ekspresowe	1	120	2000
4	trunk_link	wjazdy i zjazdy z dróg ekspresowych	1	70	1500
5	primary	drogi krajowe	1	90	1500
6	primary_link	wjazdy i zjazdy z dróg krajowych	1	60	1500
7	secondary	drogi wojewódzkie	1	50	1000
8	secondary_link	wjazdy i zjazdy z dróg wojewódzkich	1	40	1000
9	tertiary	drogi powiatowe	1	50	800
10	tertiary_link	wjazdy i zjazdy z dróg powiatowych	1	50	600
11	unclassified	drogi gminne	1	40	600
12	residential	drogi miejskie + drogi niesklasyfikowane	1	30	600
13	living_street	drogi osiedlowe	1	20	300

Przy konwersji danych zawartych w mapach OSM należy zwrócić szczególnie uwagę na ich jakość. Zdarzają się przypadki niepoprawnie zamodelowanych elementów sieci (np. błędnie określone kierunki ruchu na drogach jednokierunkowych) lub wręcz ich braku. Identyfikacja tego typu problemów polega na weryfikacji stworzonego modelu sieci, a także na analizie przebiegu i wyników symulacji. W trakcie prac niejednokrotnie znajdowano błędy w modelu sieci, których przyczyną były błędy w mapie OSM. W takich przypadkach, nanoszono poprawki w mapie OSM, a następnie generowano ponownie model sieli drogowej. Proces ten powtarzano iteracyjnie, aż otrzymany model wedle wiedzy autorów pozbawiony był błędów.

Autorzy mają świadomość, że zastosowanie domyślnych wartości w przypadku braku wartości dla atrybutów odcinków (tab.1) może prowadzić do niepoprawnych wartości atrybutów odcinków. W przypadku zauważenia występowania tego typu błędów dla istotnych odcinków wprowadzano poprawne wartości atrybutów bezpośrednio w mapach OSM. Należy podkreślić, że w trakcie prac nie stwierdzono żadnych dodatkowych błędów wynikających bezpośrednio z procesu konwersji danych z formatu OSM do MATSim.

3. Model ruchu

3.1. Sieć drogowa

W celu analizy wpływu poziomu szczegółowości modelu sieci drogowej na wyniki symulacji ruchu drogowego przygotowano cztery modele sieci, każdy o innym poziomie szczegółowości. W poszczególnych wariantach ujęto następujące typy dróg:

1) odcinki typów od 1 do 13 z tab. 1 (najbardziej szczegółowy wariant, zawierający drogi wszystkich typów),
2) odcinki typów od 1 do 12 z tab.1,
3) odcinki typów od 1 do 11 z tab.1,
4) odcinki typów od 1 do 10 z tab.1 (najmniej szczegółowy wariant, od autostrad po drogi powiatowe).

W wariancie 1 model aglomeracji poznańskiej składał się z 13009 węzłów i 30496 odcinków (rys. 2). Dla porównania, sieć z najmniejszą liczbą odwzorowanych typów dróg (wariant 4) składała się z 3239 węzłów i 5883 odcinków (rys. 3).

Rys. 3. Wygenerowana sieć aglomeracji poznańskiej z najmniejszym stopniem szczegółowości

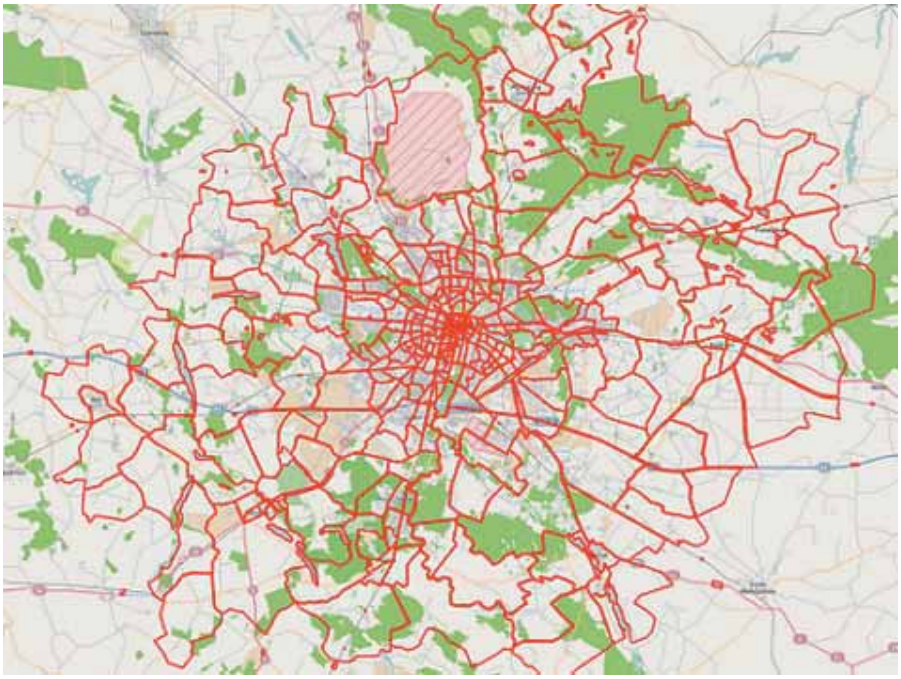
3.2. Popyt

Do odwzorowania popytu na transport wykorzystano dane na temat podróży w modelu aglomeracji poznańskiej otrzymanym z Urzędu Miasta Poznania, który został wykonany w systemie VISUM (w 2008 roku model ten przeszedł aktualizację). Wymagało to odpowiedniej obróbki danych, aby były kompatybilne z systemem MATSim i stworzonym modelem sieci drogowej.

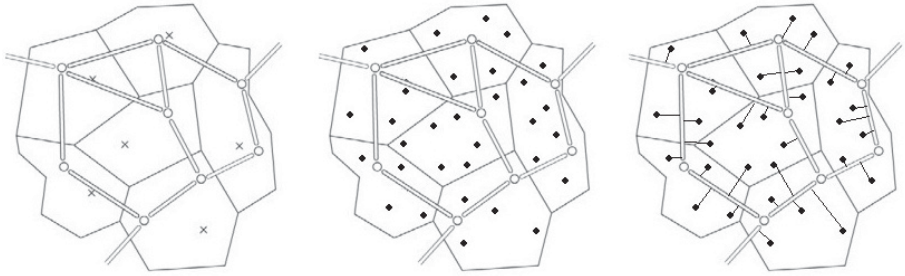
W pierwszej kolejności przeniesiono zony z oryginalnego modelu poznańskiego, a następnie dostosowano ich geometrię i położenie do układu współrzędnych WGS84 UTM 33N. Granice rejonów komunikacyjnych (rys. 4), zgodnie z [13] poprowadzono po naturalnych przeszkodach (np. rzekach, jeziorach), granicach podziału administracyjnego (gminy ościenne), liniowych elementach infrastruktury oraz przez tereny niezabudowane. Łącznie zamodelowano 26 rejonów zewnętrznych doprowadzający ruch spoza aglomeracji oraz ruch tranzytowy, 131 rejonów gmin ościennych należących do aglomeracji poznańskiej, 199 rejonów wewnątrz miasta Poznań i 61 rejonów punktowych, nie posiadających obrysu, a będące jedynie centroidami.

Do zamodelowania popytu wykorzystano macierz OD dla komunikacji indywidualnej z oryginalnego modelu aglomeracji poznańskiej. Macierz zawierała 62764 podróży (na godzinę) pomiędzy rejonami komunikacyjnymi. W celu odwzorowania dynamiki porannego szczytu ruchowego, a więc wraz z narastaniem i opadaniem krzywych ruchu, przyjęto na potrzeby eksperymentów symulacyjnych 7-godzinny czas symulacji, podzielony na 7 godzinnych okresów. Założono, że w każdej godzinie popyt na ruch jest ułamkiem popytu z godziny szczytowej zgodnie z następującym schematem: 20%, 40%, 80%, 100%, 60%, 40% i 20%. Dzięki temu uzyskano przebieg rozpoczynających się podróży w czasie pokazanym na rys. 3.

W systemie MATSim do modelowania popytu nie wykorzystuje się macierzy OD – jest on reprezentowany przez agentów posiadających plany aktywności wraz z podróżami pomiędzy nimi [11,12]. Dlatego każdą podróż z macierzy OD zamodelowano jako plan zawierający jedną podróż pomiędzy dwoma aktywnościami zlokalizowanymi w konkretnych rejonach komunikacyjnych. Współrzędne określające szczegółową lokalizację aktywności generowane są losowo respektując granice zony źródłowej i docelowej, a agenci trafiają do sieci i opuszczają sieć poprzez odcinek zlokalizowany najbliżej miejsca odbywania kolejnych czynności [14]. Algorytm generacji agentów w systemie MATSim przedstawiono na rys. 5. Należy zauważyć, że im wyższy poziom szczegółowości sieci drogowej, tym bardziej precyzyjnie są wyznaczane odcinki początkowe i końcowe podróży.



Rys. 4. Granice stworzonych rejonów komunikacyjnych na tle mapy aglomeracji poznańskiej



Rys. 5. Algorytm lokalizowania agentów [14]: a) dostępna sieć drogowa zawierająca odcinki i węzły oraz zdefiniowane rejony komunikacyjne, b) losowo wygenerowani agenci, c) przypisanie agentom najbliższych odcinków

4. Symulacja ruchu

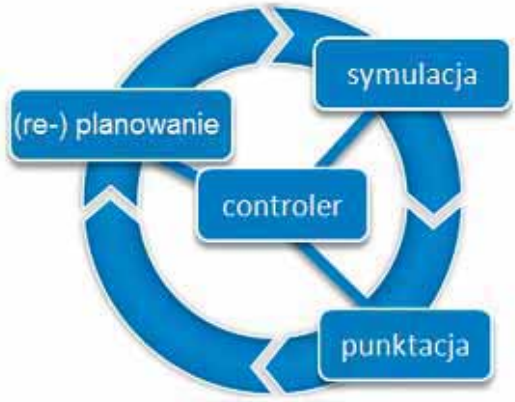
4.1. Symulacja w systemie MATSim

MATSim jest systemem wieloagentowej mikrosymulacji transportu, w tym przepływu ruchu drogowego. System ten jest oparty na modelach aktywności syntetycznych mieszkańców zwanych agentami [15]. Agenci posiadają dzienne plany zawierające aktywności, w których uczestniczy dana osoba. Działanie systemu

MATSim polega na iteracyjnym wykonywaniu następujących trzech podstawowych kroków (rys. 6): planowanie (tworzenie nowych lub modyfikacja istniejących planów), symulacja (wykonanie planów) oraz ocena (ewaluacja planów) [16]. Dzięki iteracyjnemu powtarzaniu symulacji agenci uczą się (faza oceny) i na podstawie zdobytych doświadczeń próbują poprawiać swoje plany (faza planowania). Przy dostatecznie dużej liczbie iteracji oraz odpowiednio dostrojonych parametrach systemu (w szczególności definiujących możliwości adaptacyjne agentów), przebieg kolejnych symulacji stabilizuje się (osiągany jest stan relaksacji, odpowiednik stanu równowagi w systemie transportowym).

Sama symulacja przepływu ruchu drogowego opiera się na teorii kolejek, a ruch odbywa się w sieci, której odcinki zamodelowane są jako kolejki FIFO (*First In, First Out*) opisane parametrami: długość, liczba pasów, prędkość w ruchu swobodnym oraz przepustowość. Podczas symulacji agenci przemieszczają się po sieci respektując jej ograniczenia [17], a także wykonują zaplanowane aktywności.

W fazie oceny następuje ewaluacja wykonania każdego planu na podstawie zdarzeń takich jak udział w zaplanowanej aktywności, czas spędzony w podróży, spóźnienie lub pominięcie aktywności [14]. Po dokonaniu oceny system uruchamia ponownie proces planowania, w którym na podstawie uzyskanych ocen z poprzedniej iteracji, wybierany jest nowy lub modyfikowany poprzedni plan dla każdego agenta.



Rys. 6. Fazy działania systemu MATSim [12]

Z uwagi, że plany agentów zostały bezpośrednio zaczerpnięte z godzinnej macierzy OD, początki podróży (tzn. moment w którym agent opuszcza lokalizację aktywności i próbuje dostać się do sieci) zostały równomiernie rozłożone w ramach całej godziny. Dlatego w ramach fazy planowania zrezygnowano z operacji modyfikacji chwili rozpoczęcia podróży, a pozostawiono agentom możliwość modyfikacji przebiegu trasy.

4.2. Wyniki symulacji

Badania symulacyjne przeprowadzono dla 4 wariantów sieci drogowych. Następnie opracowano i dokonano porównania następujących statystyk: średni czas przejazdu, średnia przejechana odległość, średnia prędkość w sieci, praca przewozowa oraz wykresy dojazdów do celu w czasie.

4.2.1. Średni czas podróży

Rys. 7 przedstawia czasy podróży w kolejnych iteracjach dla poszczególnych wariantów sieci drogowej. Z wykresu można wywnioskować, że o ile w dwóch pierwszych wariantach stan relaksacji zostaje szybko osiągnięty (po około 10–15 iteracjach) i średnie czasy podróży w późniejszych iteracjach stabilizują się, to w pozostałych dwóch wariantach (mniej szczegółowych) po przeprowadzeniu 40 iteracji średnie czasy podróży nadal oscylują. Spowodowane jest to znacznym przesyceniem sieci, a to skutkuje powstawaniem kongestii. Stan całego systemu jest wtedy bardzo czuły na najmniejsze zmiany (takie jak modyfikacje tras przejazdów w części planów, co jest wykonywane w każdej iteracji), które powodują znaczące zmiany dla całego systemu.

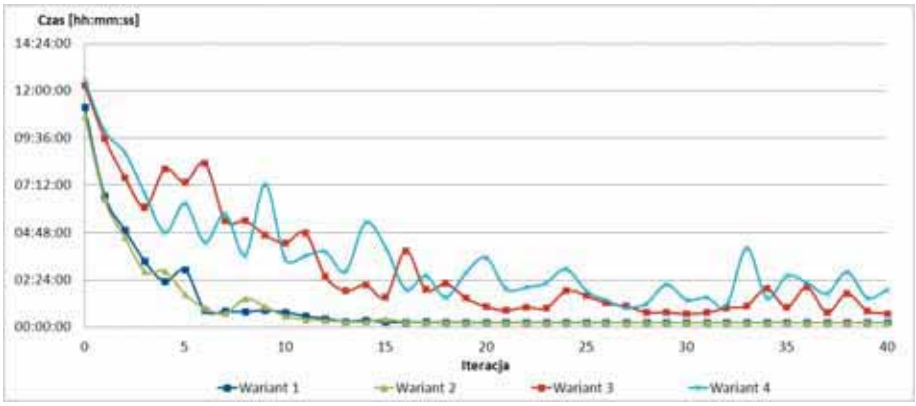
4.2.2. Średni dystans podróży

Drugim wskaźnikiem wykorzystanym do porównania wariantów jest średni dystans podróży (rys. 8). We wszystkich wariantach na początku symulacji (pierwsza iteracja) system wygenerował dla każdego z agentów najkrótszą czasowo trasę w sieci przy niskim natężeniu ruchu – wykorzystane do tego były dane wejściowe o prędkości ruchu swobodnego na wszystkich odcinkach. Dlatego średnia przejechana odległość w każdym z modeli jest najkrótsza w porównaniu do późniejszych iteracji. Niestety spowodowało to znaczne kongestie w sieci, na co wskazuje średni czas podróży w pierwszej iteracji dla każdego z modeli na rys. 7. Dlatego w celu ich uniknięcia w kolejnych iteracjach system stopniowo modyfikuje trasy używając bieżących (tj. pochodzących z poprzedniej iteracji) statystyk czasów przejazdu na poszczególnych odcinkach, co odzwierciedla dalsza część wykresu (iteracje od 1 do około 10). W przypadku dwóch pierwszych modeli średni przejechany dystans narasta wolniej – agenci mają do wyboru większą liczbę odcinków oraz gęstszą sieć. Po 10 iteracjach średni przejechany dystans zaczyna się zmniejszać, większa liczba agentów używa alternatywnych dróg, a wcześniej przesycone odcinki zaczynają być ponownie przejezdne. W przypadku dwóch pozostałych modeli (model 3 i 4) sieć jest rzadsza, więc do wyboru jest znacznie mniej alternatywnych tras, przez co agenci chcąc ominąć kongestię zmuszeni są znacznie wydłużyć podróż. Jak zostało wspomniane wcześniej, wrażliwość przesyconego systemu transportowego na drobne zmiany w planach powoduje występowanie oscylacji (naprzemienne poprawy i pogorszenia sytuacji z iteracji na iterację), przez co proces zbieżności przebiega znacznie dłużej, a stan równowagi nie zostaje w pełni osiągnięty. Z uwagi na kongestie również czas przeprowadzenia pojedynczej symulacji (tzn. czas wykonywania obliczeń komputerowych) jest znacznie dłuższy w wariantach 3–4,

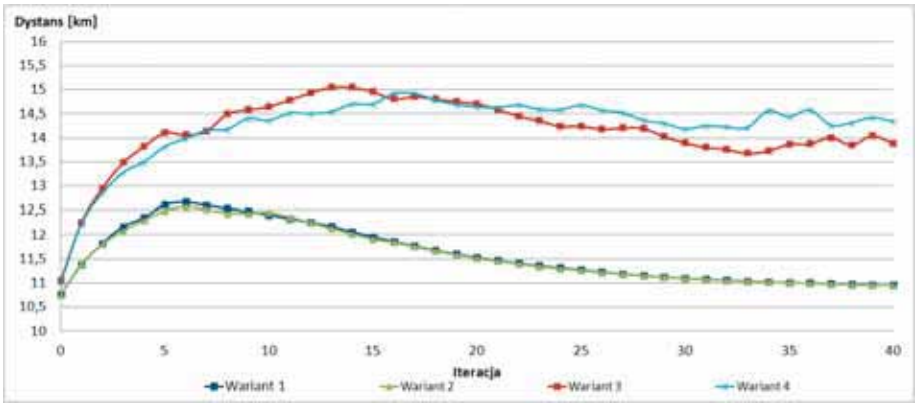
choć z pozoru wydawałoby się, że symulacja dla mniejszej sieci (zatem dla mniejszej liczby kolejek FIFO) powinna być przeprowadzana szybciej.

4.2.3. Średnia prędkość w sieci

Wykres średniej prędkości osiąganej w całej sieci, w poszczególnych modelach w kolejnych iteracjach (rys. 9) potwierdza wcześniejsze tezy. W pierwszych dwóch modelach, w których sieć jest gęsta i posiada większą liczbę odcinków, agenci poruszają się swobodniej dzięki rozłożeniu ruchu na większą liczbę niezapełnionych odcinków. Z każdą iteracją dla tych modeli średnia prędkość rośnie, co pokazuje efekty procesu nauki agentów. W przypadku pozostałych dwóch modeli z rzadszą siecią, pomimo procesu optymalizacji, niektórym agentom nie udaje się uniknąć kongestii ze względu na małą liczbę alternatywnych odcinków, a ponieważ poruszają się po zatłoczonych odcinkach, ich średnia prędkość podróży utrzymuje się na niskim poziomie.

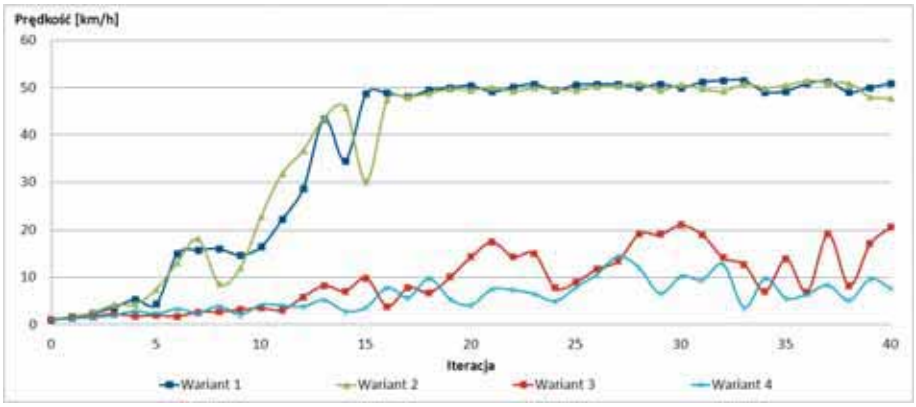


Rys. 7. Porównanie średnich czasów podróży w poszczególnych modelach w kolejnych iteracjach

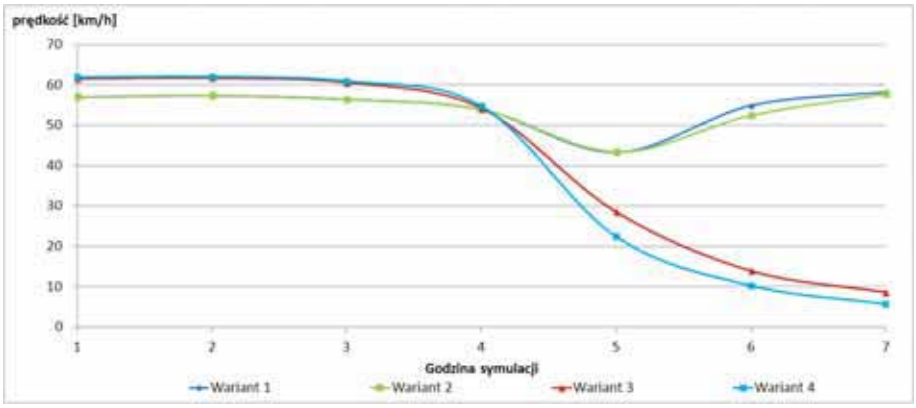


Rys. 8. Porównanie średnich odległości podróży w poszczególnych modelach w kolejnych iteracjach

Dodatkowo porównano wielkości średnich prędkości w sieci dla ostatniej iteracji (rys.10) w poszczególnych jednogodzinnych przedziałach czasu symulacji. W tym wypadku dwa pierwsze warianty cechują się początkowo niższą średnią prędkością (od 1 do 4 godziny symulacji). Spowodowane jest to dodaniem odcinków o niskich prędkościach ruchu (drogi osiedlowe i drogi miejskie), których nie było w wariantach 3–4, zatem bezpośredni dojazd do czy wyjazd z miejsca aktywności prowadzony jest drogami o gorszych parametrach, podczas gdy w wariantach 3–4 agenci korzystają tylko z dróg cechujących się stosunkowo wyższą szybkością. Dopiero gdy sieć ulegnie napełnieniu, sytuacja się odmienia. W wariantach 1–2 kongestie są mniejsze i krótsze czasowo, zatem po chwilowym spadku wartości omawianego wskaźnika, wraca on do wysokiego poziomu. W wariantach 3–4 kongestia przyjmuje większe rozmiary i trwa znacznie dłużej (sięga ona poza pierwsze 7 godzin, podczas których generowany jest ruch). Spowodowane jest to małą liczbę odcinków, co w konsekwencji prowadzi do znaczącego spadku średniej prędkości w sieci.



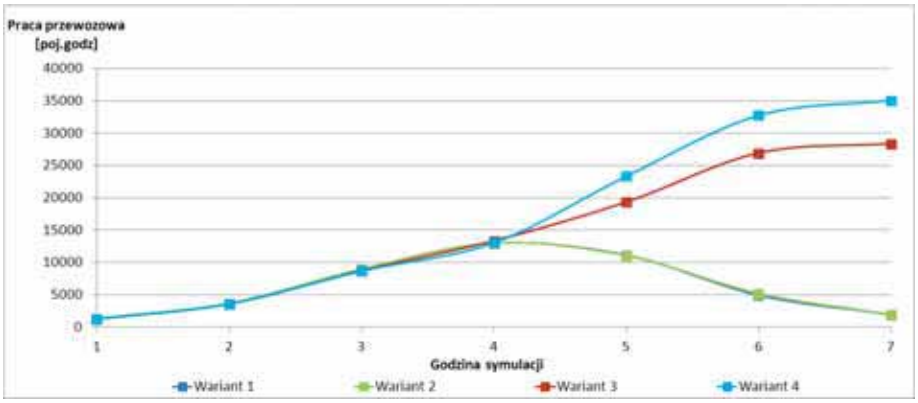
Rys. 9. Porównanie średnich prędkości w sieci w poszczególnych modelach w kolejnych iteracjach



Rys. 10. Porównanie średnich prędkości w sieci w poszczególnych modelach w ostatniej iteracji symulacji z podziałem na godziny symulacji

4.2.4. Praca przewozowa

W celu zobrazowania łącznego czasu spędzonego w sieci przez agentów w pierwszych siedmiu godzinach symulacji porównano pracę przewozową wyrażoną w pojazdogodzinach (rys. 11). W początkowych okresach symulacji – napełnianie sieci agentami – we wszystkich wariantach liczba pojazdogodzin jest niemal identyczna (niższa prędkość w wariantach 1–2 jest rekompensowana krótszymi trasami). Dopiero po zapełnieniu sieci widać, jak w wariantach 3–4 na skutek spadku prędkości (i jednocześnie przy dłuższych trasach) agenci utykają w kongestiach i w efekcie trasy wykonują zdecydowanie wyższą pracę przewozową. Sumarycznie w pierwszych 7 godzinach symulacji łączna praca przewozowa w wariantach 1–4 wynosi odpowiednio: 44.786, 44.954, 101.666 i 117.986 pojazdogodzin.

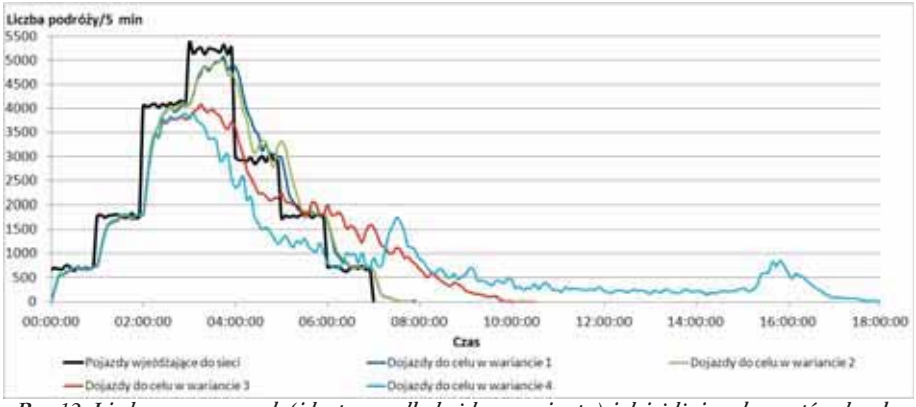


Rys. 11. Porównanie pracy przewozowej w poszczególnych modelach w ostatniej iteracji symulacji z podziałem na godziny symulacji

4.2.5. Generacja i dojazdy agentów w sieci

Ostatnim porównanym wskaźnikiem jest tempo dojeżdżania do celu (tj. kończenia podróży) jakie ma miejsce przy identycznym dla każdego wariantu tempie rozpoczynania podróży przez agentów w trakcie pierwszych 7 godzin symulacji (kolor czarny, rys. 12). Wszystkie wskaźniki liczone są jako liczba podróży rozpoczętych/zakończonych w okresie 5 minut.

Początkowo we wszystkich wariantach warunki ruchowe są zbliżone, więc tempo ubywania agentów (tj. kończenia podróży) jest zbliżone. Dopiero po upływie około 2,5 godziny (sieć napełniła się) zaczynają uwidaczniać się rozbieżności pomiędzy wariantami. Ponownie w dwóch pierwszych, najbardziej szczegółowych wariantach, agenci bez problemu dojeżdżają do celu, a wykresy liczby dojazdów do celu są bardzo zbliżone. Natomiast przy mniej szczegółowych modelach sieci, na odcinkach tworzą się kongestie, a agenci często dopiero po wielu godzinach osiągają cel podróży.



Rys. 12. Liczba generowanych (identyczna dla każdego wariantu) i dojeżdżających agentów do celu w czasie dla ostatniej iteracji.

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono procedurę wykorzystania map systemu OpenStreetMap oraz odpowiednich narzędzi do ich obróbki, w celu stworzenia modelu sieci drogowej. Pozwala ona na znacznie skrócenie czasu spędzonego na przygotowywaniu danych wejściowych do modelu. Proponowane podejście wykorzystuje darmowe, ogólnodostępne dane oraz aplikacje. Podczas tworzenia modelu przy użyciu proponowanej procedury należy zwrócić uwagę, czy elementy występujące w badanym obszarze posiadają odpowiednie i wymagane charakterystyki. Należy także zwrócić uwagę na jakość danych zawartych w mapach cyfrowych. Mając to na uwadze, należy weryfikować poprawność wygenerowanego modelu sieci. Brak weryfikacji może przyczynić się do błędnych wyników całej analizy układu transportowego. Alternatywą dla darmowych map jest wykorzystanie komercyjnych (płatnych) map GIS, niestety wiąże się to z kosztami zakupu samych map, przedłużenia okresu licencjonowania oraz zakresu aktualizacji.

W ramach pracy przeprowadzono eksperymenty obliczeniowe mające na celu wykazanie wpływu poziomu szczegółowości wykorzystywanego modelu sieci na wyniki symulacji.

Udowodniono, że zbyt ogólna i mało szczegółowa sieć (warianty 3–4) może być niewystarczająca do przeprowadzenia badań symulacyjnych. W przypadku aglomeracji poznańskiej pominięcie dróg osiedlowych nie miało wpływu na jakość symulacji, jednak brak dróg miejskich czy gminnych prowadził do nieprawidłowych wyników symulacji. Prezentowane prace stanowią pierwszy etap przygotowywania nowego modelu ruchu dla aglomeracji poznańskiej. Planowane jest przeprowadzenie wieloagentowej symulacji w systemie MATSim dla pełnej doby i w oparciu o całodniowe łańcuchy aktywności.

Bibliografia

[1] Dios Ortuzar J., Willumsen L., Modelling Transport. Wiley, 2011.
[2] Kutz M.: Handbook of Transportation Engineering. McGraw-Hill, 2004.
[3] Hensher D., Button K., Handbook of Transport Modelling. Emerald Group Publishing Limited, 2007.
[4] Jansen G.R.M., Bovy P.H.L., The effect of zone size and network detail on all-or-nothing and equilibrium assignment outcomes. Traffic Engineering and Control, 23, 1982, s. 311–317.
[5] Szarata A., Estymacja Więźby ruchu metodą makrosymulacji z wykorzystaniem pomiarów przekrojowych na przykładzie Nowego Sącza. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej. Budownictwo Lądowe, 603, 2006, s. 275–282.
[6] Fischer M., GIS and Network Analysis. In: Handbook 5 Transport Geography and Spatial Systems, 5, Pergamon, 2003, s.391–408.
[7] Longley P., Goodchild M., Magurie D., Rhind D., GIS Teoria I praktyka, PWN, Warszawa, 2006.
[8] http://ww.openstreetmap.org.pl.
[9] http://download.geofabrik.de/osm/europe/.
[10] http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Osmosis.
[11] Balmer M., Rieser M., Meister K., Charypar D., Lefebvre N., Nagel K., MATSim-T: Architecture and Simulation Times. Multi-Agent Systems for Traffic and Transportation Engineering, Hershey, 2008, s. 57-78.
[12] http://ww.matsim.org.
[13] Podoski J., Transport w miastach. Warszawa, 1977.
[14] Rieser M., Nagel K., Beuck U., Balmer M., Rümenapp J., Truly agent-oriented coupling of an activity-based demand generation with a multi-agent traffic simulation. 11th WCTR, Berkeley, 2007.
[15] Maciejewski M., Parametric Calibration of the Queue-Based Traffic Flow Model in MATSim. W: Janecki R., Krawiec S. (red.): Contemporary Transportation Systems. Selected Theoretical And Practical Problems. Models of Change in Transportation Subsystems, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2011, s. 217–226.
[16] Piątkowski B., Maciejewski M., Comparsion of traffic assignment in VISUM and transport simulation in MATSim. Transport Problems, Katowice, 2012.
[17] Rieser, M., Adding Transit to an Agent- Based Transportation Simulation: Concepts and Implementation. Praca doktorska, TU Berlin, 2010.

RUCHOTWÓRCZOŚĆ WIELKOPOWIERZCHNIOWYCH OBIEKTÓW HANDLOWYCH TRZECIEJ GENERACJI NA PRZYKŁADZIE TRÓJMIASTA[1]

Aleksandra Romanowska
mgr inż., Katedra Inżynierii Drogowej, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, 80-233 Gdańsk, ul. Narutowicza 11/12

Kazimierz Jamroz
dr hab. inż., Katedra Inżynierii Drogowej, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, 80-233 Gdańsk, ul. Narutowicza 11/12, tel. +48 58 347 1147, e-mail: kjamroz@pg.gda.pl

Streszczenie. *Wielkopowierzchniowe obiekty (handlowe, usługowe itp.) generują ruch o dużych natężeniach, które często przekraczają możliwości przepustowe przyległego układu ulicznego. Wpływają w ten sposób na znaczne pogorszenie się warunków ruchu w najbliższym otoczeniu obiektu i zakłócenia w prawidłowym funkcjonowaniu systemu transportowego miasta. Wobec braku polskich doświadczeń konieczne jest badanie wpływu wybranych czynników demograficznych, ekonomicznych, przestrzennych, infrastrukturalnych, organizacyjnych na wielkość ruchu generowanego przez te obiekty. Na tej podstawie możliwe jest utworzenie narzędzi pozwalających na prognozowanie wielkości ruchu generowanego przez tego typu obiekty i wpływu tego ruchu na funkcjonowanie sieci transportowej miasta. Celem referatu jest przedstawienie wyników badań i analiz ruchu generowanego przez obiekty handlowe trzeciej generacji na przykładzie Trójmiasta oraz identyfikacja najistotniejszych czynników wpływających na wielkość generowanego ruchu. W referacie przedstawiono wstępne wyniki modelowania ruchu w wielkopowierzchniowych obiektach handlowych, jak również przykłady wykorzystania wyników badań i zbudowanych modeli do prognozowania wielkości ruchu generowanego przez tego typu obiekty.*

Słowa kluczowe*: wielkopowierzchniowe obiekty handlowe, badania i analizy ruchu, modelowanie ruchu*

1. Wprowadzenie

Stosując wzory zachodnie w Polsce w przeciągu kilkunastu lat doprowadzono do dynamicznego rozwoju centrów handlowych. Od początku lat dziewięćdziesiątych, kiedy to zaczęły powstawać pierwsze takie obiekty, do chwili obecnej powstało niespełna 400 dużych centrów handlowych, zróżnicowanych pod kątem lokalizacji, powierzchni i różnorodności jej wykorzystania, formy architektonicznej, oferty handlowej, gastronomicznej czy rozrywkowej.

1 Wkład autorów w publikację: Romanowska A. 70%, Jamroz K. 30%

Centrum handlowe definiowane jest przez Międzynarodową Radę Centrów Handlowych (ICSC) jako „obiekt handlowy zaplanowany, wybudowany i zarządzany jako odrębna całość, łączący lokale handlowe, usługowe i część wspólną, o minimalnej powierzchni wynajmu brutto (GLA) 5 000 m^2" [1]. Spośród wielu podziałów, istotny dla celów artykułu jest podział centrów handlowych na generacje, wyróżniające się między sobą przede wszystkim powierzchnią sprzedaży i wykorzystaniem tej powierzchni, tj. ilości i udziału głównych najemców, czy udziału i ilości sklepów w galerii handlowej, formą architektoniczną, rodzajem i pojemnością parkingu oraz liczbą i rodzajem funkcji pełnionych przez poszczególne obiekty. Podczas, gdy pierwsza i druga generacja to przede wszystkim obiekty o dużym udziale głównego najemcy, zlokalizowane poza obszarami centralnymi miasta, trzecia i wyższe generacje, to duże galerie handlowe funkcjonujące przeważnie w śródmieściach, dzielnicach handlowych o dużym natężeniu ruchu pieszego czy przy głównych ciągach ulic.

W tabeli 1 przedstawiono charakterystyki trzech wielkopowierzchniowych obiektów handlowych różnej generacji zlokalizowanych w Gdańsku. W zależności od generacji centra handlowe przyciągają różnych klientów, generują ruch o różnej wielkości i różnym udziale podróży samochodami osobowymi czy transportem zbiorowym, a także przyciągają różną liczbę odwiedzających, korzystających z oferty niehandlowej obiektów.

Tab. 1. Porównanie obiektów handlowych w zależności od ich generacji i odległości od centrum miasta {2}

Generacja		I	II	III	
Parametr		Auchan	Morena	Madison	jednostka
Odległość od śródmieścia		8,2	3,7	0	km
Powierzchnia	Działki	150	58	6,9	tys. m^2
	Zabudowy	45,9	33,5	5,9	tys. m^2
	Sprzedaży (GLA)	41,8	23,9	18,0	tys. m^2
	Głównych najemców	31,5	10,2	1,8	tys. m^2
Liczba	Sklepów	42	60	100	-
	Miejsc parkingowych ogółem	Ok. 2500	1574	114	-
Udział głównego najemcy		75	43	10	%
Średnia wielkość sklepu ogółem		995	398	180	m^2
Średnia wielkość sklepu w galerii		251	232	164	m^2
Intensywność funkcji handlowej[1]		0,28	0,41	2,61	-
Procent zabudowy działki		31%	58%	86%	
Wskaźnik miejsc parkingowych[2]		60	66	6	na 1000 m^2

[1] Intensywność funkcji handlowej – iloraz powierzchni sprzedaży GLA i powierzchni działki.
[2] Wskaźnik miejsc parkingowych – liczba miejsc parkingowych przypadających na 1000 m2 GLA.

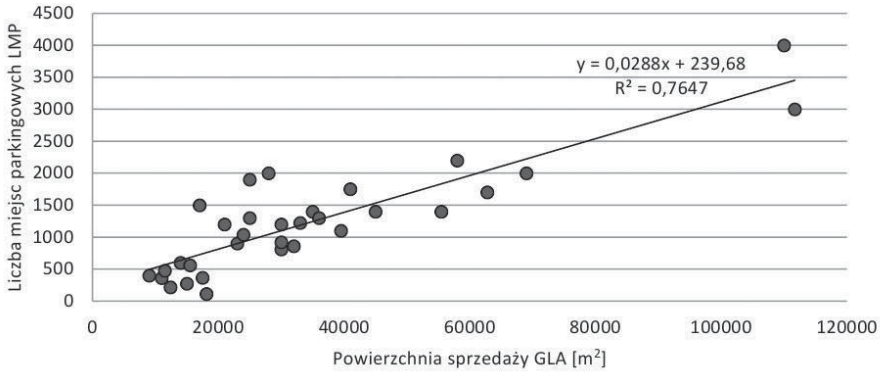
W niniejszej pracy skoncentrowano się przede wszystkim na wielkopowierzchniowych obiektach handlowych trzeciej i wyższych generacji ze względu na ich charakterystykę, lokalizację w obszarach o dużych natężeniach ruchu drogowego, a przez to stosunkowo dużym wpływie na funkcjonowanie przyległego układu transportowego. Na podstawie studiów literatury oraz badań własnych, przeprowadzonych w centrach handlowych w Trójmieście [3], scharakteryzowano tego rodzaju obiekty. W szczególności skoncentrowano się na analizie obsługi transportowej, wielkości generowanego ruchu, oddziaływaniu na przyległy układ transportowy oraz analizie problemów parkingowych. W artykule podjęto również próby

wyznaczenia zależności występujących pomiędzy różnymi parametrami centrów handlowych oraz określono możliwości modelowania wybranych charakterystyk i wykorzystania zbudowanych modeli.

2. Problemy obsługi transportowej centrów handlowych trzeciej generacji

Przykład w tabeli 1 pokazuje, że centra handlowe trzeciej generacji zlokalizowane są najczęściej w obszarach śródmiejskich czy w handlowych dzielnicach miast, charakteryzują się małą powierzchnią działki w porównaniu do obiektów niższych generacji, za to o wiele intensywniej wykorzystaną (wyższa jest intensywność funkcji handlowej). W obiektach tych supermarket stanowi niewielki udział wykorzystywanej powierzchni handlowej obiektów, uwaga koncentrowana jest natomiast na zapewnieniu rozbudowanej, różnorodnej galerii handlowej, wraz z punktami usługowymi, gastronomicznymi czy rozrywkowymi.

Ze względu na lokalizację obiekty trzeciej generacji koncentrują się na zapewnieniu dobrej dostępności dla klientów korzystających ze środków transportu zbiorowego i pieszych. Często wraz z budową centrum handlowego powstaje odpowiednia infrastruktura dla klientów niezmotoryzowanych – przejścia dla pieszych, chodniki, przystanki. Z drugiej strony obiekty handlowe muszą również zapewnić możliwość korzystania z obiektu klientom zmotoryzowanym, oferując parking o określonej pojemności, którą zdefiniować można jako podaż miejsc parkingowych danego centrum handlowego. Na rysunku 1 przedstawiono wykres opisujący zależność zachodzącą pomiędzy liczbą oferowanych miejsc parkingowych a powierzchnią handlową wybranych polskich centrów handlowych różnych generacji. Zauważyć można, że im większa powierzchnia sprzedaży centrum handlowego, tym większa podaż miejsc parkingowych.



Rys. 1. Podaż miejsc parkingowych w polskich centrach handlowych {3}

Podaż miejsc parkingowych w poszczególnych obiektach handlowych powinna odpowiadać potrzebom zmotoryzowanych klientów centrów, tzn. spełniać zapo-

trzebowanie klientów na miejsca postojowe w dni typowe oraz w okresach zwiększonego ruchu o charakterze handlowym. Istnieją różne podejścia do projektowania liczby miejsc parkingowych w wielkopowierzchniowych obiektach handlowych. Przede wszystkim planiści korzystają z minimalnych wymagań parkingowych (jedynie w przypadku obszarów śródmiejskich określa się wskaźniki maksymalne, ze względu na politykę parkingową i celowe ograniczanie ruchu kołowego), określanych przez urbanistów w studiach uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego miast (tabela 2). Określone wskaźniki parkingowe przyjmuje się wyjściowo, dodatkowo konieczne są indywidualne studia uwzględniające warunki ruchu, zapotrzebowanie na miejsca parkingowe, politykę parkingową oraz podział zadań przewozowych [3].

Tab. 2. Wskaźniki parkingowe dla obiektów handlowych o powierzchni sprzedaży pow. 2000 m² {3}

L.p.	Rodzaj obiektu	jednostka	Strefa A			Strefa B	Strefa C
			A1	A2	A3		
Gdańsk	Obiekty handlowe o pow. sprzedaży do 2000 m²	1000 m² powierzchni sprzedaży	MAX 19			MAX 32	MIN. 32
	Obiekty handlowe o pow. sprzedaży powyżej 2000 m² w budynkach wielokondygnacyjnych		MAX 12			MAX 25	MIN. 25
	Obiekty handlowe, supermarkety, hale targowe, hurtownie typu *cash and carry* o powierzchni sprzedaży powyżej 2000 m²		0			0	MIN. 30
Warszawa	Obiekty handlu i usług		MAX 10	MAX 15	15-25	25-38	30-60
Szczecin	Sklepy o powierzchni sprzedaży do 2000 m²		MAX 20			MIN 1 MAX 25	MIN 25
Gdynia	Obiekty handlowe o powierzchni sprzedażowej pow. 2000 m²		MAX 20			MAX 40	MIN 40
Kraków	Obiekty handlowe o powierzchni sprzedażowej pow. 2000 m²		MAX 12			MAX 30	MIN 30

W tabeli 3 przedstawiono rozkłady sezonowej zmienności wielkości sprzedaży i wielkości generowanego ruchu przez centra handlowe w ciągu roku na podstawie badań amerykańskich [5]. Z przedstawionych wyników badań wynika, że analizowane centra handlowe są znacznie obciążone w miesiącach listopad i grudzień. Zalecaną w źródłach amerykańskich (Urban Land Institute) metodą określania liczby miejsc parkingowych odpowiadającej zapotrzebowaniu na nie jest bazowanie na pomiarach z *„dwudziestej godziny"*, czyli dwudziestej najbardziej obciążonej godziny w ciągu roku, dla której powinno się określać wymagania dotyczące parkingów przy centrach handlowych. Zgodnie z amerykańskimi badaniami określenie takiej godziny jako podstawy dla projektowania pozwala w rezultacie na stworzenie odpowiedniej ilości miejsc dla bywalców i pracowników obiektu handlowego podczas conajmniej 3000 godzin w ciągu roku, kiedy centrum jest otwarte. Podczas ok. 40% tych godzin ponad połowa miejsc parkingowych będzie wolna. Jednak podczas 19 godzin w ciągu roku (przypadających na ok. 10 dni w roku) bywalcy mogą nie znaleźć zbyt szybko miejsca parkingowego [4]. *„Dwudziesta godzina"*

w większości badanych amerykańskich centrów handlowych przypada na połowę grudnia.

Tab. 3. Sezonowa zmienność wielkości sprzedaży i wielkości generowanego ruchu przez centra handlowe na podstawie badań amerykańskich [5]

Miesiąc	Procent średniej miesięcznej wielkości sprzedaży centrów handlowych [%]	Procent średniej miesięcznej wielkości generowanego ruchu przez centra handlowe [%]
Styczeń	78	85
Luty	80	78
Marzec	93	92
Kwiecień	93	93
Maj	99	105
Czerwiec	94	106
Lipiec	90	101
Sierpień	99	102
Wrzesień	88	95
Październik	95	99
Listopad	118	102
Grudzień	**174**	**142**

Zapewnienie kierowcom możliwości parkowania w centrach handlowych zlokalizowanych w obszarach centralnych miast wiąże się ze znacznym zwiększeniem liczby podróży samochodowych. Wzrost natężenia ruchu powiązany z zakupami zwykle obserwuje się w weekendy, dni wolne od pracy lub w godzinach po pracy. W typowych dniach tygodnia szczyt handlowy często w znacznej części pokrywa się z popołudniowym szczytem transportowym. Jedną z konsekwencji zwiększonego ruchu samochodowego jest dodatkowe obciążenie systemu transportowego miasta, a przez to wydłużenie czasu wszystkich podróży na jego obszarze. Generowanie ruchu o natężeniach, które mogą zagrażać sprawnemu funkcjonowaniu przyległego układu transportowego, w szczególności, gdy cechuje się on małymi rezerwami przepustowości może natomiast doprowadzać do konfliktu ruchu lokalnego z ruchem dojazdowym do centrów handlowych [6] i przeciążenie sąsiednich skrzyżowań w szczególności w godzinach szczytu transportowego i handlowego.

Do określenia wielkości ruchu generowanego przez wielkopowierzchniowe obiekty handlowe i określenia związku pomiędzy ich powierzchnią, typem czy lokalizacją a generowanym ruchem służą m.in. metody prognozowania oparte na powierzchni obiektu i odpowiadającej mu ilości miejsc postojowych czy metody szacowania biorące pod uwagę prognozowaną liczbę klientów wraz z preferowanym przez nich środkiem transportu. Posłużyć do nich mogą dane takie jak: liczba samochodów dojeżdżających na parkingi centrów handlowych, napełnienie tych pojazdów, liczba osób podróżujących transportem zbiorowym oraz pieszo do centrów handlowych czy cechy charakterystyczne podróży związanych z centrami handlowymi. Możliwe jest również określenie tzw. *wskaźnika generowania podróży*, który ITE[2] definiuje jako *„liczbę podróży zmotoryzowanych, które zaczynają lub kończą się w danym obiekcie podczas określonego okresu czasu"* [7]. Metody i modele gene-

2 Institute of Transport Engineers

rowania podróży przez wielkopowierzchniowe obiekty handlowe mogą posłużyć do różnorodnych analiz i prognoz ruchu w mieście, oceny oddziaływania obiektu handlowego na system transportowy miasta, na środowisko oraz badań wpływu centrów handlowych na zagospodarowanie przestrzenne miast.

3. Badania obsługi transportowej wybranych centrów handlowych w Trójmieście

W listopadzie 2009 roku przeprowadzono badania ruchu w wybranych centrach handlowych trzeciej generacji w Trójmieście, obejmujące obiekty: Centrum Handlowe Madison, Centrum Handlowe Manhattan, Galerię Bałtycką, Alfa Centrum i Galerię Przymorze w Gdańsku oraz Galerię Handlową Klif i Centrum Handlowe Batory w Gdyni. Lokalizacja tych obiektów przedstawiona została na rysunku 2. Charakterystyka badanych centrów handlowych oraz zestawienie danych dotyczących dostępności środków transportu zbiorowego zostały przedstawione w tabelach 4-5.

Rys. 2. Lokalizacja badanych centrów handlowych w Trójmieście (źródło: Google Earth)

Tab. 4. Zestawienie parametrów charakteryzujących badane centra handlowe {3}

Miasto	Centrum handlowe	Odległość od centrum miasta	Powierzchnia handlowa	Liczba sklepów	Liczba punktów usługowych	Liczba punktów gastronomicznych	Ilość sal kinowych	Liczba miejsc parkingowych	Opłata za parkowanie
GDAŃSK	Madison	0	18 100	100	7	5	0	114	Tak
	Manhattan	3,7	17 500	125	11	8	0	365	Tak
	Galeria Bałtycka	4,4	39 500	200	b.d.	b.d.	0	1100	Tak
	Alfa Centrum	8,8	15 500	80	b.d.	b.d.	8	560	Nie
	Galeria Przymorze	7,7	21 000	100	9	12	0	1200	Nie
GDYNIA	Klif	5,2	30 000	160	11	6	0	1200	Nie
	Batory	0	9 000	70	13	4	0	600	Nie

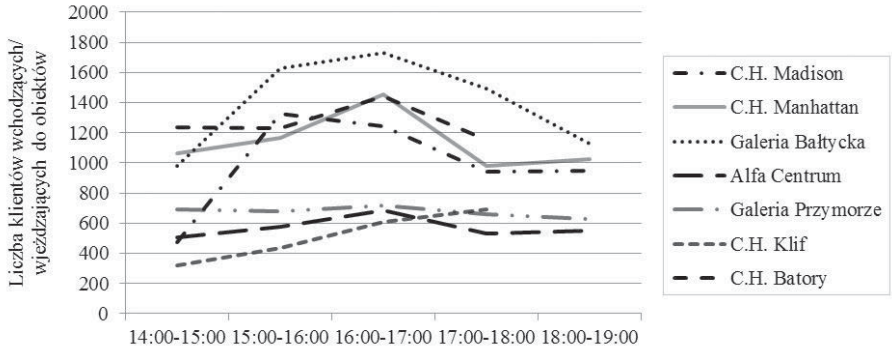
Tab. 5. Zestawienie danych dotyczących dostępności badanych centrów handlowych dla klientów niezmotoryzowanych {3}

Centrum handlowe	Lokalizacja	Połączenia tramwajowe	Połączenia autobusowe/ trolejbusowe	Szybka Kolej Miejska	Dworzec autobusowy	Dworzec PKP
Madison	Gdańsk Śródmieście	7 linii	40 linii	200 m	200 m	Gdańsk Główny 200 m
Manhattan	Gdańsk Wrzeszcz ul. Grunwaldzka	4 linie	13 linii	500 m	nie	Gdańsk Wrzeszcz 500 m
Galeria Bałtycka	Gdańsk Wrzeszcz ul. Grunwaldzka	4 linie	16 linii	250 m	nie	Gdańsk Wrzeszcz 250 m
Alfa Centrum	Gdańsk Przymorze ul. Kołobrzeska	3 linie	6 linii	800 m	nie	Gdańsk Oliwa 1,5 km
Galeria Przymorze	Gdańsk Przymorze ul. Chłopska	4 linie	4 linie	ok. 2000 m	nie	nie
Klif	Gdynia Orłowo al. Zwycięstwa	-	4 linie	100 m	nie	nie
Batory	Gdynia Śródmieście	-	41 linii	700 m	750 m	Gdynia Główna 700 m

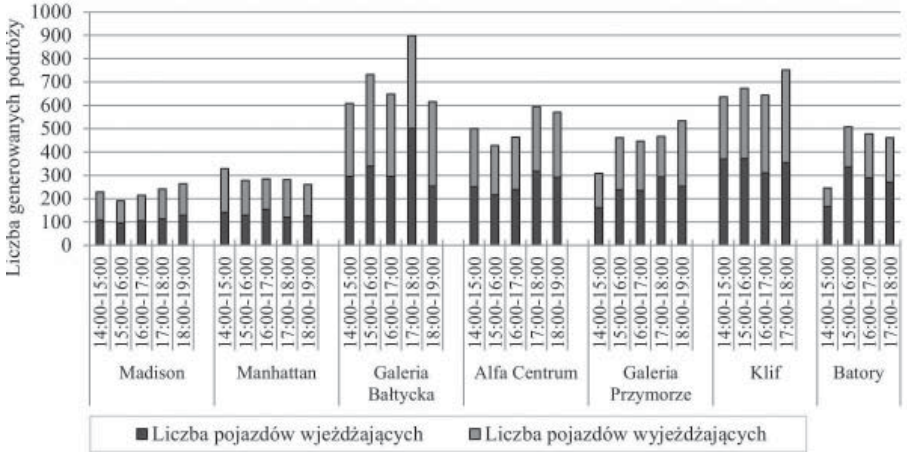
Przeprowadzone badania obejmowały: pomiar natężenia ruchu osób wchodzących i wychodzących z obiektów, pomiar natężenia ruchu pojazdów wjeżdżających i wyjeżdżających z parkingów badanych obiektów, pomiar napełnienia w pojazdach wjeżdżających i wyjeżdżających z parkingów badanych obiektów oraz pomiar wykorzystania pojemności parkingów. Badania natężeń i pomiary parkingowe w powyższych obiektach przeprowadzone zostały w typowym dniu tygodnia (czwartek), w godzinach 14:00-19:00, przypadających na godziny szczytu handlowego w badanych centrach handlowych.

Wyniki pomiarów pozwoliły na dokonanie analizy obsługi transportowej badanych obiektów oraz porównanie wskaźników funkcjonowania poszczególnych obiektów w zależności od powierzchni sprzedaży, liczby miejsc parkingowych czy odległości od centrum miasta. W analizie porównano liczbę klientów w poszczególnych obiektach oraz czas występowania szczytu handlowego (rys. 3). Ponadto zestawiono ze sobą natężenia ruchu pojazdów wjeżdżających na parking i z niego

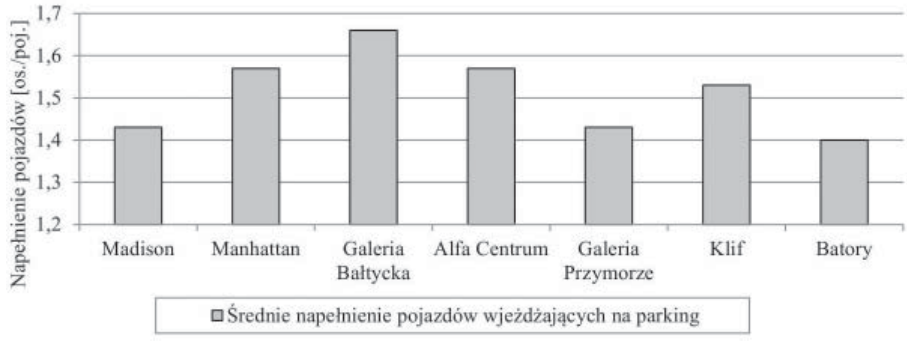
wyjeżdżających (rys. 4), napełnienia pojazdów w poszczególnych obiektach (rys. 5) czy udział podróży zmotoryzowanych (rys. 6).



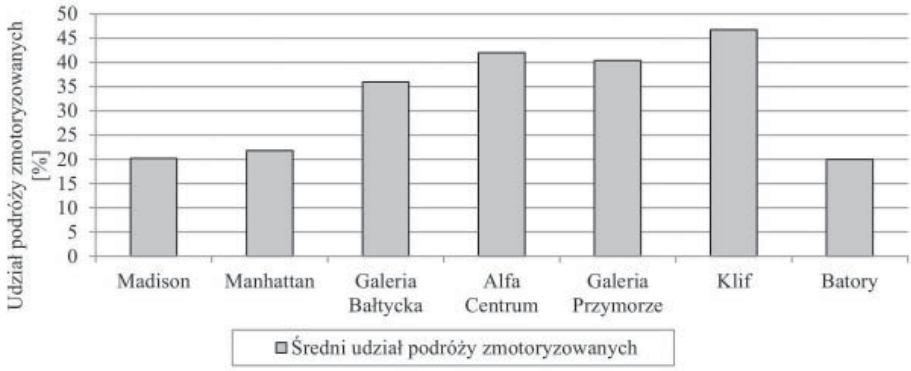
Rys. 3. Porównanie czasu występowania szczytu handlowego w obiektach na podstawie liczby klientów wchodzących do badanych centrach handlowych w typowym dniu tygodnia {3}



Rys. 4. Zestawienie natężeń ruchu pojazdów wjeżdżających na parkingi i z nich wyjeżdżających w poszczególnych centrach handlowych {3}



Rys. 5. Średnie napełnienia pojazdów wjeżdżających na parkingi centrów handlowych {3}



Rys. 6. Średni udział podróży zmotoryzowanych do poszczególnych centrów handlowych {3}

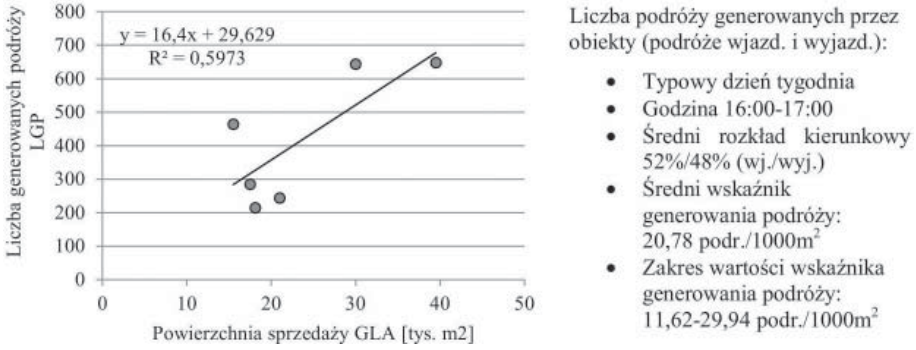
Uzyskane wyniki badań pozwoliły na następujące stwierdzenia. Szczyt handlowy w większości badanych obiektów przypada na godziny popołudniowe 16:00-17:00. Średni rozkład kierunkowy podróży pojazdów w tej godzinie wynosi 52% pojazdów wjeżdżających i 48% pojazdów wyjeżdżających. Najwięcej podróży generowanych jest przez dobrze zlokalizowane, o dużej dostępności centra handlowe Galeria Bałtycka w Gdańsku i Klif w Gdyni, które posiadają bardzo dużą powierzchnię handlową oraz atrakcyjną ofertę handlową i parkingową. Największy udział podróży zmotoryzowanych (powyżej 40%) obserwuje się w obiektach najbardziej oddalonych od centrum miasta, a więc o mniejszej dostępności transportu zbiorowego. Średnie napełnienie wjeżdżających pojazdów w analizowanych centrach handlowych zawiera się w przedziale 1,4-1,66 osób na pojazd, przy czym najwyższe napełnienia zaobserwowano w Galerii Bałtyckiej (średnie napełnienie w godz. 14:00-19:00 wyniosło powyżej 1,65 osoby na pojazd).

4. Badanie zależności pomiędzy charakterystykami centrów handlowych i wielkością ruchu

Zebrane dane pozwoliły na zbadanie zależności występujących pomiędzy parametrami wielkopowierzchniowych obiektów handlowych trzeciej generacji a pomierzonymi wartościami charakterystyk transportowych. Zależności badano dla danych pomierzonych w okresie godzinnym (dla potrzeb analizy przyjęto godzinę szczytu handlowego 16:00-17:00 i dla takiego przedziału czasu badano analizowane zależności).

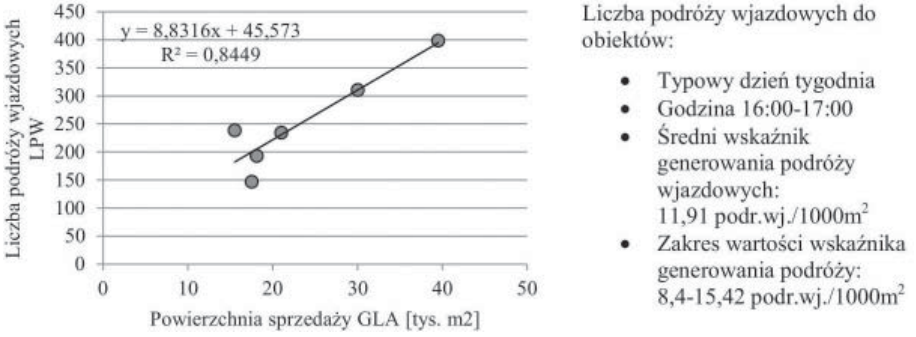
Wzorując się na badaniach prowadzonych przez ITE, dla centrów handlowych trzeciej generacji w Trójmieście sprawdzono przede wszystkim zależności występujące pomiędzy powierzchnią sprzedaży analizowanych centrów handlowych, a liczbą generowanych podróży samochodowych i liczbą zaparkowanych pojazdów. Otrzymane wyniki przedstawiono w postaci wykresów rozrzutu. W analizach pominięto centrum handlowe Batory ze względu na trudność w ocenie, jaki ruch

jest w rzeczywistości generowany przez obiekt (Batory posiada bezpłatny parking bez ograniczeń dostępu dla pojazdów nie będących klientami obiektu). Na rysunkach 7 - 9 przedstawiono wykresy zależności pomiędzy powierzchnią sprzedaży w analizowanych centrach, a analizowanymi parametrami transportowymi. Jak można zauważyć łączna liczba podróży generowanych przez trójmiejskie centra handlowe trzeciej generacji waha się w granicach ok. 12-30 podróży na każde 1000 m^2 powierzchni sprzedaży. Spośród tych podróży ok. 52% stanowią pojazdy wjeżdżające, a 48% wyjeżdżające z centrum handlowego. W przypadku wyłącznie podróży wjazdowych w trójmiejskich obiektach zakres wskaźników generowania podróży wjazdowych wynosi ok. 8-15 podróży na 1000 m^2 GLA. Na rys. 9 zestawiono liczbę pojazdów zaparkowanych na parkingu w zależności od powierzchni sprzedaży – liczba ta waha się w granicach 6-25 zaparkowanych pojazdów na każde 1000 m^2.



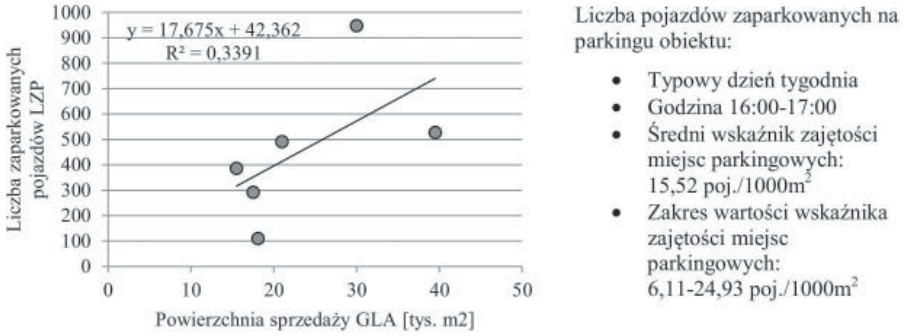
Rys. 7. Wykres zależności liczby podróży generowanych przez centra handlowe trzeciej generacji w Trójmieście od ich powierzchni sprzedaży w 1000 m^2

Źródło: opracowanie własne



Rys. 8. Wykres zależności liczby podróży wjazdowych generowanych przez centra handlowe trzeciej generacji w Trójmieście od ich powierzchni sprzedaży w 1000 m^2

Źródło: opracowanie własne



Rys. 9. Wykres zależności zajętości miejsc parkingowych w centrach handlowych trzeciej generacji w Trójmieście od ich powierzchni sprzedaży w 1000 m²

Źródło: opracowanie własne

Analizowano także siłę zależności występujących pomiędzy parametrami centrów handlowych trzeciej generacji w Trójmieście (powierzchnia sprzedaży GLA, liczba miejsc parkingowych LMP, odległość od centrum miasta ODL, dostępność dla transportu zbiorowego oraz atrakcyjność handlowa obiektów) a liczbą podróży generowanych LPG przez obiekty, udziałem podróży zmotoryzowanych UPZ (podróży samochodem osobowym), wskaźnikiem generowania podróży WGP czy napełnieniem pojazdów NP. Uzyskane wyniki (w postaci macierzy korelacji) pozwoliły na podjęcie prób modelowania ruchu w centrach handlowych trzeciej generacji, bazując na danych z trójmiejskich centrów handlowych. Wykorzystując wyniki badań, podjęto próbę opracowania modeli udziału podróży zmotoryzowanych UPZ do obiektów handlowych, zajętości parkingu ZAJ czy atrakcyjności ATR (liczonej jako stosunek liczby klientów do powierzchni sprzedaży) w zależności od czynników takich jak: powierzchnia sprzedaży GLA, liczba miejsc parkingowych LMP i odległość od centrum miasta ODL.

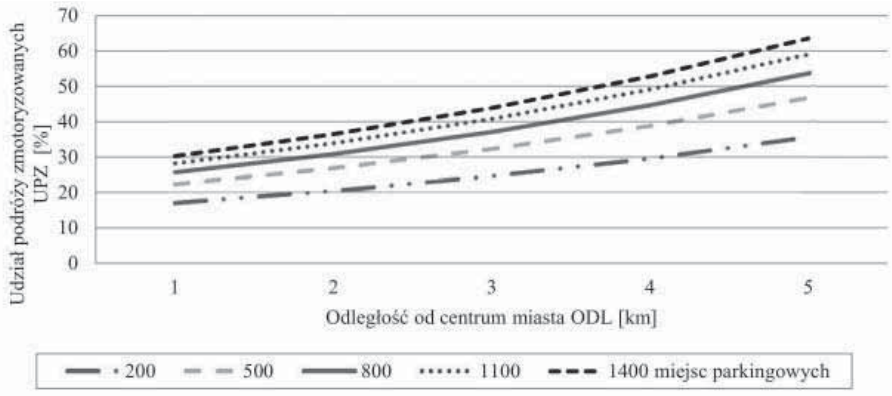
W związku z występowaniem bardzo silnej zależności pomiędzy udziałem podróży zmotoryzowanych do obiektów i liczbą miejsc parkingowych, a odległością od centrum miasta stworzono model pozwalający na wyznaczenie udziału podróży zmotoryzowanych do tych obiektów, opisany wzorem (1).

$$UPZ = a * LMP^{b} * exp(c * ODL) \quad (1)$$

gdzie:
UPZ - udział podróży zmotoryzowanych do centrum handlowego,
ODL - odległość obiektu od centrum miasta [km],
LMP - liczba miejsc parkingowych należących do obiektu.

Uzyskany model pozwala na oszacowanie udziału klientów podróżujących samochodami osobowymi wśród wszystkich klientów obiektu. Na jego podstawie, znając natężenie ruchu wjazdowego i wyjazdowego z centrum handlowego, można oszacować liczbę klientów odwiedzających obiekt. Dla powyższej zależności uzy-

skano dopasowanie niespełna 80% (współczynnik determinacji $R^2=0,78$), przy błędzie wynoszącym ok. 13% (współczynnik zmienności losowej $V_\varepsilon=0,134$). Na rys. 10 pokazano jak zmienia się udział podróży zmotoryzowanych w obiektach handlowych trzeciej generacji w zależności od odległości od centrum miasta i przy różnej ofercie parkingowej. Jak można zaobserwować czym wyższa liczba miejsc parkingowych i czym większa odległość od centrum miasta tym udział podróży zmotoryzowanych w podróżach do obiektów jest wyższy. Wyniki modelowania można tłumaczyć faktem, że w miastach wraz z odległością od centrum miasta maleje dostępność transportu zbiorowego, więc klienci częściej korzystają z samochodu.



Rys. 10. Udział podróży zmotoryzowanych w zależności od odległości od centrum miasta oraz liczby miejsc parkingowych – model 2
Źródło: opracowanie własne

Kolejna z analizowanych zależności pozwala na oszacowanie zajętości parkingu ZAJ w zależności od liczby miejsc parkingowych LMP i odległości obiektu od centrum miasta. W modelu (wzór 2) uzyskano dość wysokie dopasowanie rzędu 72% przy błędzie prognozy wynoszącym ok. 15%. Wyniki modelowania wskazują, że zajętość parkingu rośnie wraz ze spadkiem liczby miejsc parkingowych i wraz ze zbliżaniem się do centrum miasta. Takie wyniki można wytłumaczyć faktem, że w strefach centralnych miast polityka parkingowa oraz intensywna zabudowa miejska powodują, że oferta parkingowa wielkopowierzchniowych obiektów handlowych w centrach miast jest często gorsza niż w bardziej oddalonych obiektach. Ponadto z parkingów przy centrach handlowych ze względu na trudności z parkowaniem w centrum miasta, mogą korzystać również kierowcy i pasażerowie samochodów, którzy nie są klientami obiektów, nawet pomimo opłat (niekiedy opłaty za parkowanie na parkingu obiektu niewiele różnią się od opłat za parkowanie w strefie płatnego parkowania – np. w galerii handlowej Madison w centrum Gdańska pierwsze pół godziny jest za darmo, a następna rozpoczęta godzina kosztuje 3 zł; opłata w parkometrze kosztuje 3 zł za pierwszą godzinę).

$$ZAJ = a * ODL + b * LMP + c \quad (2)$$

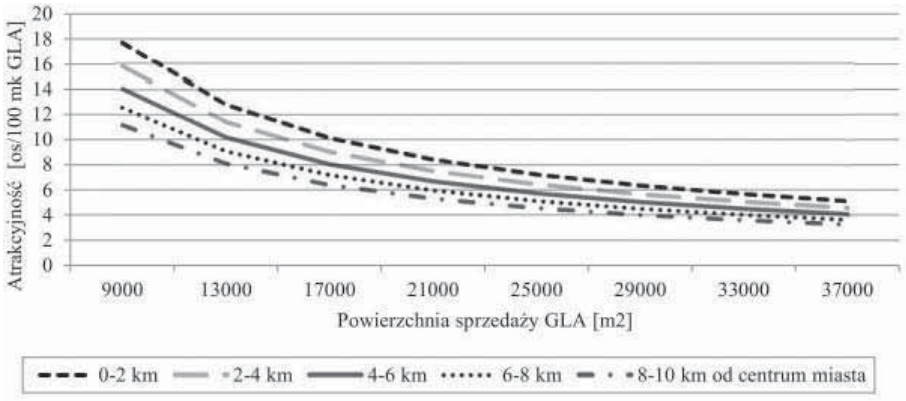
gdzie:
ZAJ – zajętość parkingu [%].

Występowanie silnych zależności zaobserwowano również pomiędzy atrakcyjnością centrum handlowego ATR (liczba osób wchodzących w ciągu godziny) w zależności od ich powierzchni sprzedaży GLA a odległością od centrum miasta ODL (wzór 3):

$$ATR = a * GLA^b * exp(c * ODL) \quad (3)$$

gdzie:
ATR - atrakcyjność centrum handlowego [os./100m^2 GLA],
GLA - powierzchnia sprzedaży [m^2].

W modelu uzyskano średnie dopasowanie rzędu ok. 60% (R^2=0,59) przy czym błąd prognozy wynosi niewiele ponad 21% (V_ε=0,213). Dla sprawdzenia poprawności modelu utworzono wykres przedstawiający zmienną gęstości liczby klientów w zależności od danych odległości od centrum miasta i określonych powierzchni sprzedaży (rys. 11).



Rys. 11. Atrakcyjność centrum handlowego w zależności od powierzchni sprzedaży i odległości od centrum miasta
Źródło: opracowanie własne

Na podstawie powyższego wykresu można zauważyć, że im większa powierzchnia handlowa obiektu i im dalej od centrum miasta obiekt się znajduje, tym liczba klientów przypadających na 100 m^2 powierzchni sprzedaży jest mniejsza. Z reguły im bliżej centrów miast zlokalizowane są obiekty tym charakteryzują się większą intensywnością funkcji handlowej, usługowej i gastronomicznej (iloraz powierzchni usługowych/ sprzedażowych i powierzchni działki, na której obiekt się znajduje), ale też większym natężeniem ruchu pieszego w okolicach obiektu, co w rezultacie

powoduje, że liczba osób wchodzących do obiektu jest większa im bliżej centrum miasta, pomimo że powierzchnia GLA jest mniejsza.

Przedstawione modele pozwalają na obliczenie poszczególnych charakterystyk centrów handlowych trzeciej generacji posiadając dane o powierzchni sprzedaży, liczbie miejsc parkingowych czy lokalizacji tych obiektów. Zaprezentowane modele opracowano na podstawie danych z siedmiu trójmiejskich centrów handlowych, w związku z czym nie mogą być wykorzystywane jako narzędzie do obliczania wybranych charakterystyk w innych miastach, a pokazują tylko jakie są możliwości modelowania ruchu generowanego przez centra handlowe. W przypadku Trójmiasta (o pasmowym układzie sieci ulicznej) przeprowadzone analizy i próby modelowania pokazały, że bardzo istotnym czynnikiem determinującym wielkość ruchu pojazdów i jego udział jest odległość od centrum miasta, jednak w przypadku miast o innym układzie zależność ta może okazać się inna. Stąd też w celu określenia przydatności modeli wymagane byłoby sprawdzenie ich dla większej liczby obiektów również w innych polskich miastach.

5. Wnioski

Nieustanny rozwój i ciągłe powstawanie coraz to większych obiektów handlowych w centrach miast wskazuje na konieczność skoncentrowania większej uwagi na problemie funkcjonowania takich obiektów, prowadzenia kolejnych badań i tworzenia nowych modeli służących do tworzenia prognoz i planowania centrów handlowych. W przypadku zbyt krótkowzrocznej polityki dotyczącej obsługi transportowej obiektów handlowych i wydawania zgody na ich lokalizacje bez odpowiednich analiz ruchu i oszacowania ich wpływu na sąsiedni system transportu, może doprowadzić do zatłoczenia ulic, utrudnień dla użytkowników ruchu (nie tylko tych korzystających z usług centrów handlowych) oraz utrudnień przy wyjeździe z parkingu przy obiekcie handlowym. Konieczna jest więc szczegółowa analiza każdego planowanego obiektu, a w szczególności prognoza wpływu obiektu handlowego na zazwyczaj mocno obciążoną już przyległą sieć transportową.

Przeprowadzone na przykładzie Trójmiasta analizy pokazały, że istnieje możliwość określenia na ile obiekty handlowe mogą wpływać na funkcjonowanie przyległego układu ulicznego poprzez wyznaczenie wielkości ruchu generowanego przez te obiekty oraz zapotrzebowania na miejsca parkingowe oraz opisanie tych zależności za pomocą prostych modeli matematycznych. Modele te mogą być przydatne np. podczas badania wpływu funkcjonowania centrów handlowych na przyległą sieć uliczną czy prognozowania ruchu w planowanych lub modernizowanych obiektach. Uzyskane zależności jednak powinny zostać sprawdzone dla większej próby, co pozwoliłoby na określenie ich prawidłowości i istotności.

Literatura

[1] International Council of Shopping Centers: www.icsc.org.
[2] Ledwoń S., Wpływ współczesnych obiektów handlowych na strukturę śródmieść. Rozprawa Doktorska. Politechnika Gdańska. Gdańsk, 2008.
[3] Czapiewska A., Analiza funkcjonowania wielkopowierzchniowych obiektów handlowych. Praca dyplomowa inżynierska. Politechnika Gdańska. Gdańsk, 2010.
[4] Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego Gdyni: www.gdynia.pl.
[5] Urban Land Institute. Parking requirements for shopping centers. Summary recommendations and research study report. Washington, 2003.
[6] Institute of Transportation Engineers. Parking Generation, 3rd Edition. Washington, 2004.
[7]] Tracz M., Gaca S., Wpływ supermarketów na funkcjonowanie przyległej sieci ulic. Transport Miejski 1-2/2001. Warszawa, 2001.
[8] Institute of Transportation Engineers. Trip Generation, 8th Edition. Washington, 2008.
[9] Albricht S., Górnikiewicz M., Ciepiela P., Problemy parkingowe i komunikacyjne w rejonach wielkopowierzchniowych obiektów handlowych. Transport Miejski. 10/2000. Warszawa, 2000.

PRZYCZYNEK DO WARTOŚCIOWANIA ATRYBUTÓW PODRÓŻY W MIEJSKIM TRANSPORCIE ZBIOROWYM

Andrzej Rudnicki
prof. dr hab. inż., Instytut Inżynierii Drogowej i Kolejowej, Politechnika Krakowska, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, tel. +48 12 628 2178, e-mail: ar@transys.wil.pk.edu.pl

Streszczenie. *W artykule podjęto próbę dokonano identyfikacji i klasyfikacji atrybutów dotyczących pojedynczej podróży osób w transporcie miejskim. Klasyfikacja obejmuje grupy atrybutów dotyczących aspektów przestrzeni i czasu oraz uwarunkowań odbywanej podróży, jej struktury oraz warunków w jakich dokonuje się podróż. Kolejne grupy atrybutów dotyczą aspektów ekonomicznych i środowiskowych oraz wynikających z charakterystyki podróżnego. Zestawienie kończą atrybuty o charakterze syntetyzującym wcześniej podane. Kilka z atrybutów jest specyficzna dla transportu zbiorowego. Wskazano na atrybuty wykorzystywane w modelach do prognozowania ruchu. Wartościowanie atrybutów podroży dotyczyło trzech przypadków: a) losowej zmienności czasu podróży dla podróży powtarzalnych, b) komfortu podróży w odniesieniu do warunków jazdy, c) efektów obniżenia uciążliwości podróży, w tym zmniejszania czasu składników podróży. Wartości wyrażano w ekwiwalentnych jednostkach czasu lub w utylach, w nawiązaniu do pojęć teorii użyteczności. W oparciu o zwartościowane komponenty podróży można skonstruować uogólniony koszt podróży, który precyzyjniej ujmuje w modelach wpływ wielu czynników na rzeczywiste zachowania komunikacyjne, w szczególności w stadium podziału zadań przewozowych.*

Słowa kluczowe: *atrybuty podroży, miejski transport zbiorowy, identyfikacja i klasyfikacja, wartościowanie atrybutów*

1. Identyfikacja i klasyfikacja atrybutów podróży

Zgodnie ze słownikiem języka polskiego PWN[1] atrybut to:

1. «cecha jakiejś rzeczy, osoby lub zjawiska wyróżniająca je spośród innych»,
2. «przedmiot o charakterze symbolicznym, ściśle związany z życiem lub działalnością jakiejś postaci»,
3. *filoz.* «podstawowa cecha przedmiotu, bez której nie mógłby on istnieć lub byłby nie do pomyślenia».

W odniesieniu do pojęcia podróży właściwe jest znaczenie pierwsze, a nawet dodatkowo - trzecie, gdyż warunkiem koniecznym pełnego określenia podróży jest dokonanie jej opisu przez zbiór atrybutów identyfikujących podróż.

Atrybuty podróży, w szczególności w transporcie zbiorowym pojawiają się w procedurach związanych z modelowaniem zachowań komunikacyjnych dla potrzeb sporządzania prognoz ruchu i są dla tych celów niezbędne. Ponadto wynikają

1 http://netsprint.sjp.pwn.pl/slownik/2551137/atrybut

z kryteriów oceny oferty przewozowej oraz funkcjonowania komunikacji miejskiej[2]. W znacznym zakresie atrybuty pojedynczej podróży pokrywają się z atrybutami (kryteriami oceny) systemu transportowego, jednak nie są z nimi tożsame. Z natury rzeczy atrybuty podróży mają zarówno charakter ilościowy jak i jakościowy.

Na podstawie przeglądu ankiet do wywiadów domowych przeprowadzanych w ramach tzw. kompleksowych badań ruchu i przeglądu literatury, w tym instrukcji dotyczącej modelowania podróży, a zwłaszcza ocen i wskaźników jakości transportu zbiorowego (np. [1, 2, 5, 9, 19, 11, 12, 13]) podjęto próbę zidentyfikowania i uporządkowania atrybutów podróży w transporcie miejskim.

A1. Atrybuty związane z przestrzenią:

A1.1. Miejsce źródła i celu podroży opisane danymi adresowymi (ulica, nr domu) lub współrzędnymi geograficznymi, geodezyjnymi, GPS, GIS, Google lub innymi. W przypadku bardzo odległych celów podróży, poprzestaje się na określeniu nazwy miejscowości, a nawet tylko kraju.

A1.2. Lokalizacja źródła i celu podróży w odniesieniu do obszaru analizy:

- Podróż wewnętrzna: źródło i cel znajdują się w obszarze.
- Podróż zewnętrzna: źródło lub cel znajdują się poza obszarem, w tym:
  - podróż źródłowa: źródło znajduje się w obszarze, natomiast cel - poza,
  - podróż docelowa: źródło znajduje się poza obszarem, natomiast źródło - poza,
  - podróż tranzytowa: źródło i cel znajduje się poza obszarem, lecz podróż realizowana jest przez obszar.

A1.3. Trasa podróży opisana jest sekwencją odcinków i węzłów sieci transportowej, po której realizowane są poszczególne przemieszczenia formujące podróż, w tym numer wykorzystanej linii komunikacji zbiorowej.

A1.4. Miejsce przesiadki określone połączeniami węzłów ramach multimodalnej sieci transportowej, w której dokonywana jest zmiana środka lokomocji w podróży.

A1.5. Długość podróży jest konwencją określenia sekwencji powyższych odcinków; ponadto może być uszczegółowiona w podziale na długości przemieszczeń realizowanych poszczególnymi środkami lokomocji.

A2. Atrybuty związane z czasem:

A2.1. Czas rozpoczęcia i zakończenia podróży (jako chwila w zapisie zegarowym).

A2.2.Usytuowanie momentów rozpoczęcia i zakończenia podróży w stosunku do charakterystycznych okresów czasu. Okresy te mogą odnosić się do:

- pory dnia lub roku (podróże dzienne, podróże nocne, podróże wakacyjne),
- dnia tygodnia (podróże w dni robocze podróże weekendowe),
- okresów nasilenia ruchu (np. podróże w szczycie porannym, podróże w szczycie popołudniowym).

2 termin „komunikacja miejska" będzie stosowany jako zwyczajowy zamiennik terminu „miejski transport zbiorowy"

A2.3. Czas trwania podróży będący konwencją zarejestrowania powyższych czasów; ponadto może być uszczegółowiony w podziale na czas trwania poszczególnych składników podróży.

A2.4. Stabilność (niezmienność) czasu podróży. W rzeczywistości występuje rozrzut czasu podróży. Atrybut ten odnosi się do podróży powtarzalnych.

A2.5. Stopień pilności (terminowości) podróży:

- Podróż ściśle terminowa, do której można zaliczyć: podróż do pracy przy sztywnych godzinach rozpoczynania pracy, dojazd do dworców celem odbycia podróży zamiejskiej, podróż na zebrania, wykłady, imprezy oraz w innych celach o ustalonym czasie rozpoczynania danej aktywności.
- Podróż nie ściśle terminowa, do której można zaliczyć: podróż do pracy przy ruchomych godzinach rozpoczynania pracy, podróże powrotne do domu, podróże na zakupy oraz w innych celach nie wymagających osiągania tych celów w ściśle ustalonych momentach czasu.

A2.6. Punktualność podróży (stopień zgodności z rozkładem jazdy) na początku i końcu podróży.

A3. Atrybuty wynikające z uwarunkowań wykonania podróży:

A3.1. Motywacja podróży określona jest parą rodzajów aktywności realizowanych u źródła oraz u celu podroży (zmienna lingwistyczna). W procedurach modelowaniu podróży zwykle ustala się następujące pary o symetrycznych motywacjach:

- dom – praca; praca – dom,
- dom – nauka; nauka – dom,
- dom - inne cele; inne cele – dom (występuje wielka różnorodność celów innych niż dom i praca: np. zakupy, rekreacja, odwiedziny, urząd, obiekt kultury, obiekt gastronomiczny, obiekt kultu religijnego, itp.),
- nie związane z domem (są to podróże między różnymi aktywnościami, z których żadna nie jest domem).

A3.2. Stopień obowiązkowości podjęcia określonej aktywności u celu podróży:

- podróż obligatoryjna,
- podróż fakultatywna.

A4. Atrybuty wynikające ze struktury podróży:

A4.1. Składniki podróży - sekwencja kolejnych przemieszczeń, która obejmuje:

- w podróżach samochodem osobowym: dojście do miejsca postoju samochodu, przejazd, jazda w poszukiwaniu miejsca do parkowania, odejście od miejsca postoju samochodu do celu podróży, przesiadka z samochodu na środek komunikacji zbiorowej lub rower lub odwrotnie,
- w podróżach środkami komunikacji zbiorowej: dojście do stacji lub przystanku, oczekiwanie na pojazd, przejazd, przesiadka, odejście od przystanku.

A4.2. Liczba przemieszczeń tworzących daną podróż.

A4.3. Liczba rodzajów użytych środków komunikacji zbiorowej w podróży.

W zależności od środka lokomocji występującego w dominującym przemieszczeniu, rozróżnia się następujące rodzaje podróży:

- podróż piesza,
- podróż rowerowa,
- podróż motocyklowa,
- podróż samochodem,
- podróż komunikacją zbiorową (autobusem, tramwajem, metrem, koleją. itp.,
- podróż multimodalna (np. w systemie Park and Ride).

W procedurach prognozowania pierwsze dwie rodzaje podróży określa się mianem podróży niezmotoryzowanych, pozostałe cztery – podróżami zmotoryzowanymi. Podróże zmotoryzowane dzieli się na „komunikację indywidualną" (samochód, motocykl) i „komunikację zbiorową".

A5. Atrybuty będące konsekwencją warunków w jakich dokonuje się podróż:

A5.1. Warunki dojścia do i odejścia z przystanku (w tym jakość otaczającej przestrzeni publicznej, kolizyjność z ruchem pojazdów).

A5.2. Warunki oczekiwania na stacjach i przystankach, w tym: ochrona przed deszczem, zimnem, wiatrem, dostępność miejsca do siedzenia.

A.5.3. Warunki jazdy, w tym: dostępność miejsca siedzącego, stopień zapełnienia miejsc do stania w pojeździe, płynność jazdy, czystość we wnętrzu pojazdu.

A5.4. Liczba przesiadek (zmian środka lokomocji) i warunki przesiadania się, w tym kolizyjność z ruchem pojazdów.

A5.5. Obecność osoby (osób) towarzyszących w danej podróży (m.in. użyczenie miejsca w samochodzie obcej osobie - tzw. carpooling).

A5.6. Dostępność i jakość informacji o podróży, w tym podawanej w czasie rzeczywistym.

A5.7. Bezpieczeństwo podróży: osobiste i wypadkowe w tym obiektywne i subiektywne (postrzegane przez pasażera).

A5.8. Warunki atmosferyczne.

A6. Atrybuty ekonomiczne:

A6.1. Koszt zmienny (np. koszt zużycia paliwa w samochodzie osobowym, koszt zakupu biletu jednorazowego).

A6.2. Koszt stały (np. amortyzacja samochodu osobowego, koszty napraw i ubezpieczeń, koszt nabycia biletu okresowego).

A6.3. Koszt średni.

A6.4. Koszt krańcowy (np. w przypadku posługiwania się biletem okresowym sieciowym można uważać, że koszt kolejnej podróży, czyli jej koszt krańcowy wynosi 0).

A6.5. Koszt uogólniony jest w istocie atrybutem syntetyzującym wiele atrybutów cząstkowych.

A7. Atrybuty środowiskowe:
- emisja szkodliwych składników spalin,
- emisja CO_2 dwutlenku węgla, tzw. ślad węglowy podróży,
- emisja hałasu,
- emisja drgań,
- zajęcie przestrzeni,
- zużycie materiałów,
- zużycie energii,
- intruzje wizualne,
- rozcinanie więzi sąsiedzkich.

Każda zrealizowana podróż w mniejszym lub większym stopniu ma swój udział w zużywaniu zasobów i w zagrożeniach dla środowiska naturalnego oraz cywilizacyjnego, w tym kulturowego.

A8. Atrybuty wynikające z charakterystyki podróżnego są w istocie uwarunkowaniami formującymi zasadnicze atrybuty podróży:
- płeć, wiek, zawód, poziom dochodów,
- styl życia (np. preferujący zamieszkiwanie w mieście lub poza),
- rola w systemie transportowym (kierowca, pasażer, pieszy, rowerzysta),
- status społeczny (pracownik najemny, pracujący na własny rachunek, bezrobotny, emeryt/rencista, uczeń, student),
- poosiadanie prawa jazdy, dostępność do samochodu i roweru (pełna, częściowa, brak),
- posiadanie biletu okresowego komunikacji miejskiej,
- kondycja fizyczna, stan zdrowia, w tym sprawność narządów ruchu, wzroku i słuchu,
- rodzaj i zakres obowiązków zawodowych i rodzinnych,
- postrzeganie komfortu,
- poziom skłonności do ryzyka,
- poziom satysfakcji z odbytej podróży.

A9. Atrybuty integrujące bądź syntetyzujące atrybuty cząstkowe:

A9.1. Prędkość podróży (z uwzględnieniem czasu dostępu do środka transportu).

A9.2. Powtarzalność podróży. Podróże powtarzalne, to podróże odbywane regularnie, np. codziennie z domu do tego samego miejsca pracy, w tej samej porze dnia, tym samym środkiem lokomocji i tą samą lub zbliżoną trasą. Atrybut powtarzalności dotyczy tej samej osoby.

A9.3. Niezawodność podróży (gwarancja przewozu) dla pojedynczej podróży jest to zmienna zero-jedynkowa: równa 1 gdy podróż się odbyła; równa 0, gdy podróż nie mogła zostać zrealizowana (np. z powodu: odjazdu przyspieszonego w stosunku do rozkładu jazdy, awarii technicznej pojazdu, dużego zatłoczenia jezdni). Dla podróży powtarzalnych miarą niezawodności może być prawdopodobieństwo obsługi.

A9.4. Uogólniony koszt podróży uwzględnia skumulowaną wartość komponentów podróży. Jest to[3] suma monetarnych i niemonetarnych kosztów podróży. Koszt monetarny w transporcie zbiorowym obejmuje cenę biletu, a w transporcie indywidualnym: koszt zużycia paliwa i innych materiałów eksploatacyjnych, opłaty parkingowe i inne drogowe (np. myto) oraz koszty kongestii. Niemonetarne koszty wyrażają wartość czasu spędzonego w podróży. Wartość ta jest różnicowana w odniesieniu do poszczególnych składników podróży, z uwzględnieniem dochodu podróżnego i celu podróży. Koszt uogólniony może brać także pod uwagę oceny subiektywne wynikające z uwarunkowań zewnętrznych oraz warunków wewnętrznych realizacji podróży. Uogólniony koszt podróży jest równoważny cenie dóbr materialnych w ekonomicznej teorii podaży popytu.

A9.5. Formą kosztu uogólnionego jest tzw. **użyteczności podróży**, która jednak w dosłownej interpretacji wiąże się z korzyścią wyniesioną z realizacji aktywności, do której możliwe było dotarcie w wyniku realizacji podróży. Oznaczałoby to, że użyteczność podróży nie zależałaby od czasu trwania i warunków, w jakich się odbywa. Tak rozumiana korzyść z udostępnienia aktywności mogłaby po skwantyfikowaniu być komponentem uogólnionego kosztu podróży. Użyteczność podróży byłaby tym wyższa im niższy byłby jej koszt. W uproszczeniu można by użyteczność podróży utożsamiać z niskim poziomem jej uciążliwości oraz odwrotnie – uciążliwość określać jako niedogodność spowodowaną tym, że atrybuty w mniejszym lub większym stopniu odbiegają od oczekiwań pasażera.

A9.6. Syntetycznym atrybutem podróży jest też **subiektywne odczucie uciążliwości podróży** przez pasażera, obejmujące i wartościujące czas i warunki, w jakich realizują się poszczególne komponenty podróży. Jedną z prób jego oszacowania zarysowano w p. 2.3. Wartość czasu podróży wyrażana jest głównie w jednostkach monetarnych, niekiedy umownych jednostkach fizycznych (tzw. minuta ekwiwalentna).

Atrybuty odnoszą się przede wszystkim do podróży zrealizowanej, dla której są w pełni określone, ale także można jej formułować w odniesieniu do podróży planowanej, zamierzonej w bliżej, a nawet w dalszej perspektywie czasowej. Atrybuty dotyczące transportu zbiorowego mają swoją specyfikę, jednakże obejmują zaledwie kilka przypadków.

Modele podróży tworzone dla celów prognostycznych obejmują całą zbiorowość użytkowników systemu transportowego. Dlatego atrybuty pojedynczych podróży są upraszczane, uśredniane i generalizowane, a przez to większość z tych atrybutów jest pomijana w sieciowych modelach podróży. W modelach tych liczba uwzględnianych atrybutów podróży sprowadzana jest – nie zawsze słusznie – tylko do kilku: położenie źródła i celu podróży, motywacje podróży, użyty środek lokomocji.

Położenie źródła i celu pojedynczej podróży przypisywane jest do tzw. centroidy jako wypośrodkowanego punktu określonego rejonu komunikacyjnego. Momenty rozpoczęcia i zakończenia podróży są generalizowane przez przypisanie ich do okresu analizowanej godziny szczytu. Trasa przemieszczeń między źródłem i ce-

3 http://en.wikipedia.org/wiki/Generalised_cost

lem, a w konsekwencji długość i czas podróży są wynikiem stosowania modelu, określającym ich wartości średnie, ewentualnie także wartości kwantyli.

Zwiększenie liczby atrybutów podróży uwzględnianych w modelach prognostycznych zapewne zwiększałoby dokładność odwzorowania rzeczywistych zachowań komunikacyjnych. Najprościej można to dokonać ujmując zwartościowany wpływ atrybutów w uogólnionym koszcie podróży. Sprawa otwartą jest w jakim stopniu będzie to skutkować ulepszeniem modeli prognostycznych oraz które atrybuty podróży są istotne z tego punktu widzenia.

2. Wartościowanie wybranych atrybutów miejskiego transportu zbiorowego

Wiele publikacji raportuje badania w zakresie parametryzacji kryteriów jakościowych w funkcjonowaniu miejskiego transportu zbiorowego. Część z nich podejmuje wartościowanie atrybutów podróży w skwantyfikowanej monetarnej formie w odniesieniu do tego transportu. W syntezie tych wyników zawartej w [7] znajdują się poniższe generalne tendencje i stwierdzenia:

- Koszt jednostkowy czasu (np. godziny) w podróżach niezarobkowych szacuje się na poziomie 25-50 % aktualnego wynagrodzenia za pracę, jakie otrzymuje podróżny.
- Koszt czasu podróży jest wyższy w przypadku niekomfortowych, niebezpiecznych i stresujących warunków jej realizacji.
- Koszt czasu podróży wrasta wraz ze wzrostem dochodów podróżnego; jest na ogół niższy dla dzieci i młodzieży oraz dla emerytów i bezrobotnych.
- Jednostkowy koszt podróży wrasta, jeśli podróż trwa ponad 20 minut lub jeśli suma wszystkich podróży odbywanych w ciągu doby przez daną osobę przekracza 90 minut.
- Koszt czasu podróży rośnie ze wzrostem rozrzutu czasu podróży oraz niepewności co do czasu osiągania celu podróży i jest szczególnie wysoki w przypadku niespodziewanych opóźnień.
- Jednostkowy czas dojścia do przystanku oraz oczekiwania na pojazd jest dwa do pięciu większy niż czas przejazdu. Przesiadka – ze względu na dodatkowy wysiłek podróżnego obłożona jest dodatkowym kosztem (tzw. karą za przesiadanie się) równoważnym 5 do 15 minutom czasu jazdy.
- W nieprzyjemnych warunkach odbywania przemieszczenia pieszego, rowerowego bądź oczekiwania (np. przejście wzdłuż ruchliwej ulicy bądź oczekiwania na autobus w otoczeniu, które wydaje się pasażerowi brudne i niebezpieczne, koszt czasu tych komponentów podróży jest istotnie wyższy od kosztu czasu przejazdu autobusem.
- Niektóre badania (np. [6]) wskazują na nieliniowy charakter wpływu warunków, w jakich realizowane są komponenty podróży na wartościowanie czasu podróży.

Te z natury rzeczy ogólne stwierdzenia dotyczą warunków zachodnioeuropejskich. Warto je odnieść do warunków polskich i doprecyzować. W dalszej części artykułu przytoczone zostaną wybrane wyniki badań własnych dotyczących niedogodności wywołanych rozrzutem czasu w przypadku powtarzalnych podróży. Pokazana zostanie subiektywna niejednorodność czasu poszczególnych komponentów podróży i nieliniowy wpływ warunków w jakich się realizują. Szczególnie ważne w warunkach polskich jest zwartościowanie czasu jazdy w warunkach zatłoczenia pojazdów komunikacji zbiorowej, co nie stanowi problemu w Europie Zachodniej.

2.1. Wartościowanie uciążliwości losowej zmienności czasu w podróży powtarzalnej

2.1.1. Rozrzut czasu podróży w podróżach powtarzalnych

Wariancja czasu podróży wynika z losowej zmienności czasu oczekiwania i czasu jazdy. Założono, że czasy dojścia do i odejścia od przystanku jako kontrolowane przez pasażera nie wpływają na zwiększenie rozrzutu czasu podróży.

Dla przypadku losowych przebyć pasażerów na przystanek, co ma miejsce przy częstotliwościach obsługi 6 i więcej kursów na godzinę, wariancja czasu oczekiwania wyraża się wzorem:

$$s_w^2 = \frac{m_3}{3m_1} - \frac{m_2^2}{4m_1^2} \tag{1}$$

gdzie m_i ($i = 1, 2, 3$) oznacza moment zwykły i-tego rzędu rozkładu odstępów czasu między kolejnymi pojazdami komunikacji zbiorowej (tzw. interwał obsługi). W większości przypadków rozkład ten jest zgodny z rozkładem Gamma i wówczas wariancja czasu oczekiwania opisana jest wzorem:

$$s_w^2 = \frac{\bar{h}^2}{12}\left(1+\frac{1}{k}\right)\left(1+\frac{5}{k}\right) \tag{2}$$

w którym:

$\bar{h}$ – średni interwał obsługi,

k – parametr charakterystyczny rozkładu Gamma.

Rozkład Gamma w dogodny sposób ujmuje ścieranie się wpływów czynnika deterministycznego (rozkład jazdy) i losowego (zakłócenia w kursowaniu pojazdów) w funkcjonowaniu miejskiego transportu zbiorowego. Wartość parametru k tego rozkładu można uznać za miarę stopnia determinizmu: wartości $k = 1$ (jest to przypadek rozkładu wykładniczego) odpowiada pełna losowość kursowania pojazdów, natomiast wartościom $k \to \infty$ odpowiada ścisła regularność ruchu, czyli przypadek stanowiący proces deterministyczny. Zmianie wartości parametru k w przedziale $[1 ; \infty]$ odpowiada zmiana wartości wariancji czasu oczekiwania w zakresie od $\frac{1}{2}\bar{h}^2$ do $0{,}08\,\bar{h}^2$, czyli bardzo znaczna. W większości przypadków

parametr k przyjmuje wartości rzędu kilku jednostek, co wskazuje na dość silny wpływ czynnika losowego na funkcjonowanie komunikacji miejskiej.

Dla przypadków, gdy średnie napełnienie pojazdu transportu zbiorowego zbliża się do jego pojemności mogą wystąpić przypadki niezabrania pasażera w wyniku braku miejsca w pojeździe. Wówczas rozkład czasu oczekiwania jest jeszcze bardziej złożony i dla jego wyznaczeniu trzeba się posłużyć transformatą Laplace'a splotu rozkładów prawdopodobieństwa: 1) przy założeniu nieprzekraczania maksymalnej pojemności pojazdu oraz 2) braku wolnego miejsca w pojazdach kursujących z interwałami o rozkładzie Gamma i na tej podstawie wyznaczyć wariancje czasu oczekiwania, co przedstawiono w [8].

W przypadku średniej i niskiej częstotliwości kursowania pojazdów transportu zbiorowego (6 i mniej na godzinę) część pasażerów orientuje swoje przybycia na przystanek w dostosowaniu do rozkładu jazdy. W tym przypadku komplikuje się wyznaczenie wariancji czasu przejazdu, gdyż wymaga to znajomości funkcji intensywności przybyć na przystanek, (zindywidualizowanej dla poszczególnego pasażera) oraz znajomości rozkładu wielkości występujących odchyłek od rozkładu jazdy.

Czas przejazdu w podróżach powtarzalnych zmienia się losowo w wyniku zmienności warunków ruchu panujących na trasie przejazdu, w tym w wyniku wpływu działania sygnalizacji świetlnej oraz stanów kongestii ruchu. Także jest skutkiem zróżnicowania indywidualnych cech kierowców i motorniczych pojazdów komunikacji miejskiej. Własne badania rozkładu czasu przejazdu pozwoliły oszacować jego wariancję:

$$s_j^2 = z\,\bar{t}_j \tag{3}$$

gdzie:

z – współczynnik zakłóceń (z zawiera się w zakresie od 0,05 do 0,2 w zależności od linii oraz odcinka pokrywającego trasę przejazdu; przeciętnie $z = 0{,}1$).

Przy założeniu, że rozkłady czasu oczekiwania oraz czasu przejazdu są wzajemnie niezależne, wariancja czasu podróży s_p^2 (przy pominięciu niewielkiej wariancji czasu dojścia do i odejścia od przystanku) jest sumą wariancji s_w^2 czasu oczekiwania oraz wariancji s_j^2 czasu przejazdu.

$$s_p^2 = s_w^2 + s_j^2 \tag{4}$$

Czas podróży opisany jest rozkładem zbliżonym do normalnego, jednakże uciętego z lewej strony. W pewnych przypadkach, tj. występowania dużych przyspieszeń lub opóźnień w stosunku do rozkładu jazdy i/lub pojawienia się długich interwałów w potoku pojazdów komunikacji zbiorowej, czas przejazdu będzie zależał od czasu oczekiwania, czyli te zmienne losowe nie można wtedy uznać za

wzajemnie niezależne. Wówczas wariancję czasu podróży należałoby wyznaczyć dla splotu tych rozkładów.

2.1.2. Badania nad predykcją czasu przeznaczanego przez pasażera na podróż

Rozrzut czasu podróży komunikacji zbiorowej – i to nawet przy ustalonym jej źródle i celu powoduje trudności w prawidłowym przewidywaniu, ile konkretna podróż zajmie czasu. Stanowi to dodatkową niedogodność zależną od stopnia pilności podróży. Każda decyzja pasażera przeznaczająca na podróż o wiadomym źródle i celu określoną ilość czasu powoduje określone skutki, wyrażające się we wcześniejszym lub późniejszym - niż było to zamierzone - przybyciu do celu podróży. Mniej lub bardziej dotkliwe konsekwencje spóźnienia (zależy to od celu, a zwłaszcza stopnia terminowości podróży) powodują, że pasażerowie przeznaczają na podróż zwykle większą ilość czasu, niż wynosi średni czas podróży, po to aby sprowadzić prawdopodobieństwo spóźnienia - zwłaszcza spóźnienia dużego - do niewielkiej, możliwej jeszcze do zaakceptowania wartości. Ten naddatek rezerwy czasu podróży wartościuje się zwiększeniem wskaźnika uciążliwości podróży.

Na podstawie przeprowadzonego ankietowania pasażerów i ekspertów szerzej opisanego w [9], posługując się zasadami psychologii matematycznej [4] skonstruowano następujące modele czasu t_{pp} przeznaczanego przez pasażera na podróż:

- podróże ściśle terminowe:

$$t_{pp} = t_{sp} + 1{,}63\ s_p \tag{5}$$

- podróże nie ściśle terminowe:

$$t_{pp} = t_{sp} + 0{,}36\ s_p \tag{6}$$

gdzie:

t_{sp} - średni czas podróży,

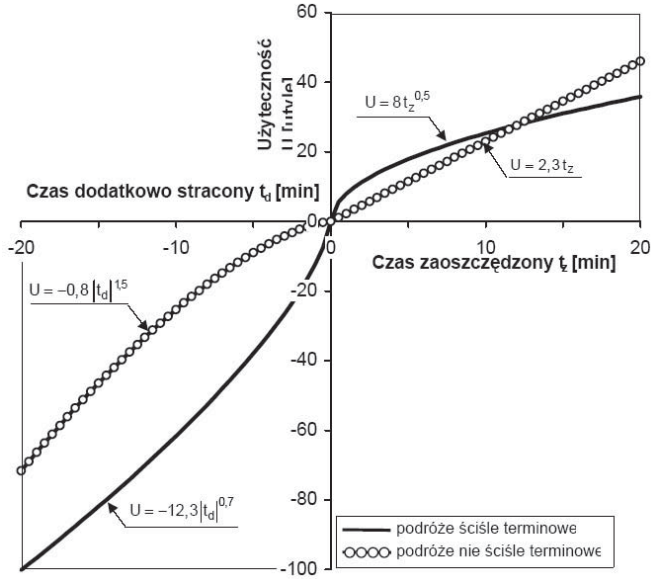
s_p - odchylenie standardowe czasu podróży.

Powyższym wartościom t_{pp} czasu podróży można przypisać wartości dystrybuanty rozkładu - odpowiednio 0,95 i 0,63. Oznacza to, że w odniesieniu do powtarzalnych podróży ściśle terminowych rzeczywisty czas podróży będzie dłuższy od czasu przeznaczanego na podróż w 5 % przypadków, a dla podroży nie ściśle terminowych - w 37 % przypadków

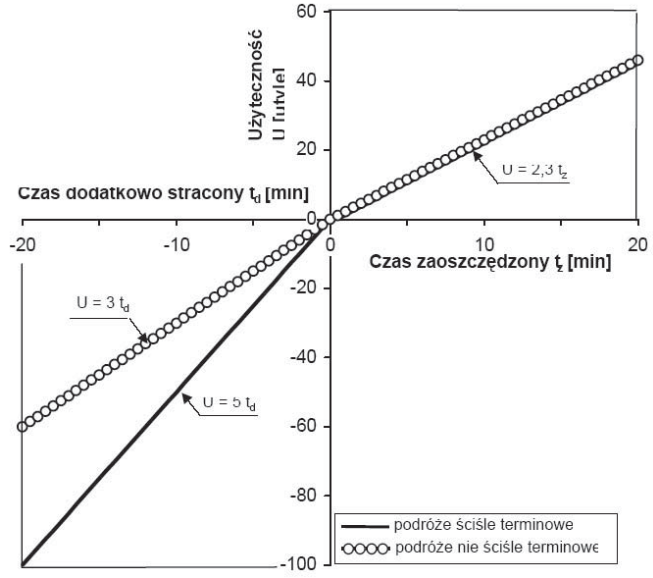
2.1.3. Użyteczność czasu zaoszczędzonego oraz dodatkowo straconego w podróży

Różnica między średnim czasem podróży, a czasem trwania konkretnej podróży o tej samej relacji (np. konkretny dom i konkretne miejsce pracy) będzie nazywana: ***czasem zaoszczędzonym*** t_z - jeśli ma znak dodatni względnie ***czasem dodatkowo straconym*** t_d - jeśli jest ujemna. Użyteczność odchyleń czasu podróży od wartości spodziewanej (średniej) wyrażana będzie w jednostkach umownych tzw. ***utylach*** U (punktach użyteczności). Podziałową skalę użyteczności unormowano przyjmując, że użyteczność każdej podróży o czasie trwania równym wartości średniej wynosi 0 utyli, natomiast użyteczność 20-minutowego czasu dodatkowo straconego wynosi - 100 utyli. Zatem przez te dwa punkty powinna przechodzić każda krzywa użyteczności. Na podstawie ankietowania 127 osób, w ramach którego każdy

z respondentów wkreślał swoją indywidualną krzywą użyteczności (jej usystematyzowane typy zestawiono w [9]). Zbiór tych krzywych po obróbce, uśrednianiu i wygładzeniu poddawano pod dyskusję i akceptację kilkuosobowej grupie ekspertów. W wyniku krzywoliniowej aproksymacji uzyskano funkcje i wykresy jak na rys. 1, natomiast dla aproksymacji prostoliniowej - jak na rys. 2.



Rys. 1. Krzywoliniowa estymacja użyteczności czasu zaoszczędzonego oraz dodatkowo straconego w podróży



Rys. 2. Prostoliniowa estymacja użyteczności czasu zaoszczędzonego oraz dodatkowo straconego w podróży

W aproksymacji krzywoliniowej w zakresie do ok. 12 min czasu zaoszczędzonego, jego użyteczność jest większa dla przypadku podróży ściśle terminowych, niż dla podróży nie ściśle terminowych; dla większych wartości tego czasu jest na odwrót. Dla zakresu czasu dodatkowo straconego, uciążliwość (użyteczność ujemna) dla podróży ściśle terminowych jest od 25 do 35 utyli większa niż dla podróży nie ściśle terminowych.

W aproksymacji liniowej dla zakresu czasu zaoszczędzonego, funkcja użyteczności jest identyczna jak w przypadku podróży ściśle terminowych jak i podróży nie ściśle terminowych. Uciążliwość czasu dodatkowo straconego dla podróży ściśle terminowych jest o 2/3 większa, niż dla nie ściśle terminowych. Czas zaoszczędzony rekompensuje czas dodatkowo stracony o tej samej wartości bezwzględnej:

- w 76 % dla podróży nie ściśle terminowych,
- tylko w 46 % dla podróży ściśle terminowych.

Dla określonej powtarzalnej relacji „źródło – cel", całkując numerycznie iloczyn funkcji użyteczności czasu zaoszczędzonego oraz dodatkowo straconego w podróży i funkcji gęstości prawdopodobieństwa rozkładu czasu podróży wyznacza się przeciętną użyteczność odchyłek czasu podróży od wartości średniej. Można przy korzystać z empirycznego rozkładu częstości tych odchyłek lub rozkładu z wygenerowanymi częstościami jak dla rozkładu normalnego o wariancji wyznaczonej wzorami (2), (3) i (4). Warto zauważyć, że średnia wartość analizowanego wskaźnika dla powtarzalnej relacji podróży jest ujemna; może być równa zeru tylko dla podróży o zdeterminowanej stałej wartości czasu trwania podróży.

2.2. Wartościowanie warunków podróży w odniesieniu do przejazdu środkami transportu zbiorowego

Największe zróżnicowanie warunków odbywania podróży ma miejsce w jej komponencie jakim jest przejazd. Może wystąpić przepadek, w którym pasażer ma dostępne miejsce siedzące bez narzuconego sąsiedztwa, bądź przypadek jazdy na stojąco w dużym tłoku. Zatem warunki przejazdu mają istotny wpływ na poziom uciążliwości podróży, w tym poprzez subiektywne postrzeganie czasu trwania przejazdu.

Na podstawie ankietowania pasażerów i ekspertów wyznaczono wartości współczynnika ekwiwalentnego uciążliwości czasu przejazdu zależnego od stopnia zapełnienia powierzchni miejsc do stania w pojeździe komunikacji miejskiej. Standaryzującą wartość (1,0) współczynnika przyjęto dla przypadku, gdy pasażer siedzi w warunkach nie narzucającego się sąsiedztwa (tj. bezpośrednio przylegające siedzenie jest wolne). Uznano to za najwyższy poziom komfortu jazdy. W odniesieniu do tych warunków szacowana była względna uciążliwość jazdy w pozostałych, objętych ankietowaniem przypadkach. W efekcie uśrednienia ocen z ankiet oraz przeprowadzenia drugiej, „negocjacyjnej" fazy ankietowania - uzyskano wyniki jak w tabl. 1.

Tablica 1. Względna uciążliwość jazdy pasażera w określonych warunkach w pojeździe komunikacji miejskiej

Stan zapełnienia pojazdu	Pasażer siedzi	Pasażer stoi
Pojazd wyludniony	1,3	-
Połowa miejsc siedzących zajęta	1,0	-
Niewielkie zapełnienie powierzchni do stania: od 0 do 1 [os./m^2]	1,1	1,5
Średnie zapełnienie powierzchni do stania: od 2 do 3 [os./m^2]	1,5	2,3
Duże zapełnienie powierzchni do stania: od 5 do 7 [os./m^2]	2,2	4,3

Powyższe wartości stanowiły podstawę do wyznaczenia przeciętnej wartości współczynnika ekwiwalentnego przy jeździe w warunkach określonego napełnienia, wyrażonego w mierze względnej (stosunek liczby pasażerów do pojemności nominalnej określonej normami fabrycznymi). Badaną zależność aproksymowano parabolą drugiego stopnia:

$$\mu_j = 0{,}8 + 3{,}6\,(q - 0{,}15)^2 \tag{7}$$

gdzie:

μ_j - współczynnik uciążliwości czasu jazdy,

q - napełnienie względne; $0 \le q \le 1{,}3$.

przy czym:

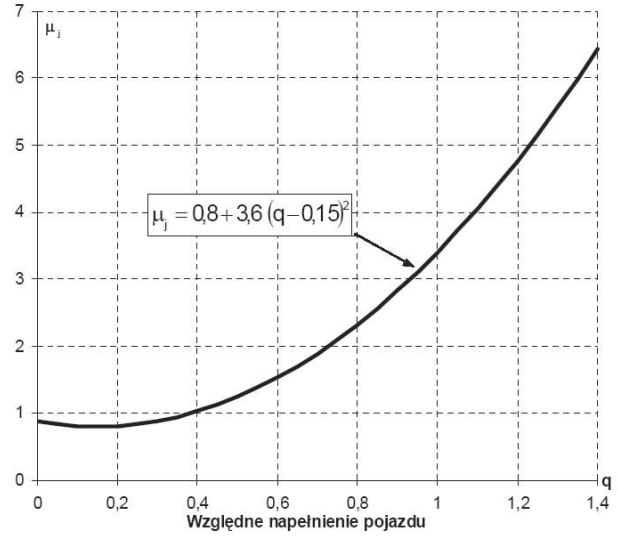
$$q = \frac{N}{C_n} \tag{8}$$

gdzie:

N - napełnienie bezwzględne (liczba pasażerów w pojeździe),

C_n - pojemność nominalna pojazdu (przy wykorzystaniu powierzchni miejsc do stania 0,15 m^2/os.).

Rys. 3 przedstawia wykres zależności (8)



Rys. 3. Zależność współczynnika ekwiwalentnego czasu jazdy μj od napełnienia pojazdu

Wartość współczynnika uciążliwości jazdy oznacza, ile razy jazda w konkretnych warunkach jest przeciętnie bardziej uciążliwa, w porównaniu z jazdą, gdy pasażer siedzi a zapełnienie miejsc stojących jest niewielkie (0,5 os./m^2), co określa umowny poziom odniesienia, tzn. że wówczas $\mu_j = 1$. Zakres stosowalności formuły (8) rozciąga się do napełnień maksymalnych C_{max} odpowiadających zapełnieniu powierzchni miejsc do stania ok. 0,10 m^2/os.

$$C_{max} \cong 1{,}3\, C_n \tag{9}$$

gdzie:
C_n - napełnienie nominalne pojazdu przy wskaźniku 0,15 m^2/os.

Ponieważ wartość wskaźnika rośnie w miarę wzrostu napełnień, to jest to w istocie wskaźnik dyskomfortu. Interpretacja wartości współczynnika uciążliwości jazdy jest np. następująca: podróżny uważa jazdę w warunkach napełnień zbliżonych do norm fabrycznych (0,15 m^2/osobę tj. ok. 6,7 os./m^2) za 3,4 razy bardziej uciążliwą, niż w przypadku niewielkiego zapełnienia miejsc do stania (0,5 os./m^2).

Współczynnik ekwiwalentny jest narzędziem względnego zwartościowania uciążliwości przejazdu w podróży. Poszczególnym przedziałom wartości współczynnika można przypisać poziomy komfortu jazdy co przedstawiono w [9].

Na próbie 32 specjalistów przeprowadzono dodatkowe ankietowania, celem oszacowania współczynnika uciążliwości czasu jazdy w funkcji dwóch zmiennych: czasu jazdy oraz zapełnienia powierzchni miejsc do stania. Z estymowanych zależności przedstawionych w [9] wynika, że współczynnik uciążliwości nie jest wartością stałą lecz funkcją liniową czasu jazdy, zatem szybkość zmian jego wartości jest funkcją kwadratową stopnia zapełnienia powierzchni miejsc do stania. Oznacza to, że podróżowanie w bardzo zatłoczonych pojazdach może być tolerowane jeszcze przez pasażera tylko w przypadku podróży o krótkim czasie przejazdu.

2.3. Wartościowanie efektów obniżenia uciążliwości podróży, w tym zmniejszania czasu trwania jej komponentów

Uzyskane z badań własnych oszacowania ekwiwalentów, sprowadzających rzeczywiste czasy trwania poszczególnych komponentów podróży do ich subiektywnego odczuwania zostały wykorzystane do uformowania tabl. 2. W przypadku występowania w źródłowej postaci zależności krzywoliniowych, dla potrzeb opisywanego tu ujęcia dokonano przedziałowej ich linearyzacji. Tablica 2 ustala równoważność zmniejszenia o jednostkę wartości parametru opisującego każdy rozważany przejaw uciążliwości podróży, tj.: średni czas dojścia, oczekiwania i jazdy; średnie napełnienia pojazdu; średnia liczba przesiadek oraz odchylenia standardowe: czasu oczekiwania, czasu jazdy i napełnienia pojazdu. Skutek określonego działania będzie wyrażany w tzw. minutach ekwiwalentnych, ujmujących jego względne znaczenie.

Tablica 2. Efekty działań obniżających subiektywną uciążliwość podróży w miejskiej komunikacji zbiorowej

Lp.	Działanie i jego bezpośredni efekt	Jednostka odniesienia	Przypadki	Skutek działania = obniżenie ekwiwalentnego czasu podróży [w minutach]
1.	Zmniejszenie średniego czasu dojścia o 1 minutę		przy odległości dojścia: - do 200 m - od 200 do 600 m - od 600 do 1000 m - powyżej 1000 m	 1,0 1,5 2,5 3,5
2.	Zmniejszenie średniego czasu oczekiwania o 1 minutę		przy czasie oczekiwania: - do 2 min - od 2 do 5 min - od 5 do 10 min - powyżej 10 min	 1,0 1,5 2,5 3,5
3.	Zmniejszenie odchylenia standardowego czasu oczekiwania o 1 minutę		- podróże nie ściśle terminowe - podróże ściśle terminowe	0,8 3,2
4.	Zmniejszenie średniego czasu jazdy o 1 minutę		przy napełnieniu pojazdu: - 0 os/m^2 - od 0 do 3 os/m^2 - od 3 do 6 os./m^2 - od 6 do 10 os./m^2	 1,0 1,3 2,4 4,5
5.	Zmniejszenie odchylenia standardowego czasu jazdy o 1 minutę		- podróże nie ściśle terminowe - podróże ściśle terminowe	0,4 1,6
6.	Zmniejszenie średniego zapełnienia powierzchni miejsc stojących o 1 os./m^2	na każdą minutę rzeczywistego czasu jazdy	przy napełnieniu pojazdu: - od 0 do 3 os./m^2 - od 3 do 6 os./m^2 - od 6 do 10 os./m^2	 0,2 0,4 0,8
7.	Zmniejszenie odchylenia standardowego zapełnienia powierzchni miejsc stojących o 1 os./m^2	na każdą minutę rzeczywis-tego czasu jazdy		0,05
8.	Zmniejszenie liczby przesiadek o 1 przesiadkę		- podróże nie ściśle terminowe - podróże ściśle terminowe	4,2/6,1 * 8,0/10,8 *

*) *pierwsza wartość dotyczy przypadku, gdy przesiadka nie wymaga ponownego płacenia za bilet, druga - gdy przesiadka wymaga ponownej opłaty.*

W oparciu o zwartościowane komponenty podróży można skonstruować uogólniony koszt podróży, który precyzyjniej ujmuje wpływ wielu czynników na rzeczywiste zachowania odwzorowywane w modelach, w szczególności w stadium podziału zadań przewozowych.

Literatura

[1] Braun K. M., Every day mode choice and its determinants: trip attributes versus lifestyle. Charles University in Prague, 2008. http://www.feem-web.it/ess/files/braunkohlova.pdf.
[2] Eboli L., Mazzula G., Performance indicators for an objective measure of public transport service. European Transport, issue 51, paper no 3, 2012.
[3] Handbook of Transportation Engineering (editor Myer Kutz) 2nd edition the McGraw-Hill Companies, Inc, Volume I - Systems and Operation, 2011.
[4] Kozielecki J., Problemy psychologii matematycznej. PWN, Warszawa 1971.
[5] Krygsman S., Dijst M., Multimodal trips in the Netherlands: Conceptual clarification, micro-level individual attributes and residential context. Transportation Research Record, Vol. 1753, 2001.
[6] Lapparent M., Palma A., Fontan C., Nonlinearities in the Valuation of Travel Attributes. Publication AJD-69. Paris, 2002.
[7] Liman T., Valuing Transit Service Quality Improvements. Journal of Public Transportation, Vol. 11, No. 2, 2008.
[8] Rudnicki A., Charakterystyka probabilistyczna czasu oczekiwania pasażerów z uwzględnieniem ograniczonej pojemności pojazdów miejskiej komunikacji zbiorowej. "Inżynieria Lądowa", PAN, Oddział w Krakowie, Komisja Budownictwa. Ossolineum 1990.
[9] Rudnicki A., Jakość komunikacji miejskiej. Seria: Monografie, Nr 5. Wyd. SITK Kraków, 1999.
[10] Starowicz W., Jakość przewozów w miejskim transporcie zbiorowym. Wydawnictwa Politechniki Krakowskiej, 2007.
[11] Transportation Research Board: A guide book for developing a transit performance- measurement system. TCRP Report 88. National Academy Press. Washington DC, 2003.
[12] Vuchic V.R., Urban transit systems and technology. John Wiley @ Sons Inc. Hoboken, New Jersey 2007.
[13] Yatskiv I., Pticina I., The urban public transport system quality indicator for European cities. Proceedings of the 10th International Conference "Reliability and Statistics in Transportation and Communication". Transport and Telecommunication Institute, Riga. 20–23 October 2010.

ZASTOSOWANIE TEORII GIER PRZY ROZWIĄZYWANIU KONFLIKTÓW W ANALIZACH TRANSPORTOWYCH

Jacek Thiem
mgr inż., Biuro Inżynierii Transportu, ul. Wrocławska 10, 61-838 Poznań, tel. +48 61 835 1973, e-mail: thiem@bit-poznan.com.pl

Streszczenie. *Teoria gier pomimo wielu przykładów zastosowania w modelowaniu ruchu i analizach transportowych jest narzędziem, po które w Polsce sięga się rzadko. Jest to błędem, zwłaszcza w przypadkach, gdy analizy transportowe dotyczą sytuacji konfliktowych. W artykule zaprezentowano przykład zastosowania teorii gier dla zaprojektowania sieci transportu autobusowego w Poznaniu i sąsiednich gminach w ramach koncepcji integracji transportu publicznego.*

Słowa kluczowe: *analizy transportowe, teoria gier, integracja transportu, sieć transportu autobusowego*

Projektowanie jako rozwiązywanie konfliktów

Przed projektantami stale stawia się za zadanie rozwiązywanie konfliktów, jakie powstają wokół ich prac. Projektowanie to w większym stopniu godzenie różnych interesów niż twórcza praca nad nowymi rozwiązaniami. Zresztą trudno jest rozdzielić te zadania, przykładowo trasowanie nowej drogi wykonywane jest na zasadzie minimalizowania konfliktów, jest więc pewną formą ich rozwiązywania. Występowanie konfliktów nie jest jedynie cechą projektów technicznych. Konflikty towarzyszą pracom projektowym na każdym etapie. Spotkamy je zarówno w studiach komunikacyjnych, programach transportowych, koncepcjach, jak i projektach wykonawczych. Stronami konfliktu mogą być pojedyncze osoby, grupy społeczne, urzędy, firmy, instytucje, a konflikt może być na tyle głęboki, że trudne lub wręcz niemożliwe okaże się znalezienie rozwiązania zadawalającego wszystkie strony. W takim przypadku veto jednej ze stron może zablokować cały projekt.

We wczesnych fazach projektowania na etapie studiów komunikacyjnych, planów transportowych, programów inwestycyjnych – gdy częściej mówimy o planowaniu niż o projektowaniu – konflikty nie są tak wyraźne i głębokie jak w etapach późniejszych. Częściej są to naciski grup interesów pragnących umieścić w projektach korzystne dla siebie rozwiązania. Nie mniej projektant stoi przed dylematem – jakie rozwiązanie przyjąć aby nie budziło sprzeciwu którejkolwiek ze stron?

Na szczęście projektant ma do swojej dyspozycji nie tylko wiedzę, ale również zaawansowane narzędzia matematyczne wspomagające wybór najkorzystniejszych rozwiązań.

W wielu przypadkach studiów, analiz, planów komunikacyjnych, dobrze postawione cele projektu wraz z opisującymi ich spełnienie parametrami, wystarczają dla znalezienia rozwiązania, które będzie zaakceptowane przez wszystkie strony. Komputerowe modele ruchu pozwalają na dostarczenie unikalnych parametrów, jednak doskonale odwzorowujących wpływ projektu na interes poszczególnych grup. Przykładowo interes właścicieli centrum handlowego może być wyrażony poprzez skrócenie czasu dojazdu klientów do tego centrum. Taką informację można otrzymać z modelu ruchu i będzie ona wiarygodna.

Gorzej, gdy interesy poszczególnych grup są wzajemnie sprzeczne.

Teoria gier - teorią konfliktów

Teoria gier to nauka stosunkowo młoda, za datę jej powstania uznaje się wydanie w 1944 roku monografii Theory of Games and Economic Behavior (Teoria gier i postępowanie ekonomiczne) przez Johna von Neumanna i Oskara Morgensterna. Początkowo traktowana była jedynie jako zbiór ciekawych rozważań bez praktycznego zastosowania. Dopiero otrzymanie nagrody Nobla przez Johna Nasch'a, Johna Harsányi'ego i Reinharda Selten'a za określenie równowagi w grach niekooperacyjnych, skierowało tę naukę na nowe tory. Teoria gier znalazła szerokie zastosowanie [1] w naukach:

- ekonomicznych,
- biologicznych,
- politycznych,
- społecznych czy filozoficznych.

Idee i metody teorii gier stały się narzędziem przy badaniu procesów ewolucyjnych w biologii [2]. W artykule Yarona Hollander'a i Josepha N. Prashker'a [3] znajdziemy wiele przykładów zastosowania teorii gier w analizach transportowych. Autorzy podzielili te przykłady w zależności od charakteru analizowanego konfliktu:

- konflikt między podróżującymi – przykłady zastosowania teorii gier dotyczą modelowania wyboru trasy, wyboru środka transportu czy podjęcia decyzji bądź rezygnacji z podróży,
- konflikt między decydentami (organizatorami transportu) – przykład zastosowania teorii gier do rozwiązania konfliktu o zakres obsługi portów lotniczych przez lotnicze firmy transportowe,
- konflikt między decydentami a podróżującymi – przedstawiono przykłady zastosowania teorii gier do rozwiązania konfliktów związanych m.in. z poborem opłat, wprowadzeniem zmian w organizacji ruchu czy wyboru wariantów rozwiązań drogowych.

W teorii gier za grę uważa się sformalizowany model sytuacji konfliktowej w którym:

- Graczami są strony konfliktu, nieistotne czy są to pojedyncze osoby, grupy osób czy instytucje. Z uwagi na skomplikowanie obliczeń istotne jest aby liczba graczy nie była wysoka, najczęściej przedstawiane przykłady dotyczą gier o dwóch graczach nie mniej teoria gier opisuje również gry z dowolną liczbą graczy.
- Strategie gry to uporządkowane zbiory decyzji podejmowanych przez poszczególnych graczy, których przyjęcie przez gracza ma wpływ na osiągany przez niego i przez pozostałych graczy wynik. Każdy gracz musi mieć możliwość wyboru strategii (czyli posiadać minimum dwie strategie).
- Tabela wypłat to zbiór elementów n- wymiarowych (gdzie n jest liczbą graczy) będących uzyskanymi przez graczy wynikami gry, obliczonymi zgodnie z jej zasadami i zależnymi od strategii przyjętych przez poszczególnych graczy. Wielkość zbioru zależy od liczby graczy i liczby strategii z których mogą skorzystać. Tabelę wypłat najczęściej zapisuje się w formie macierzy n-wymiarowych.

Dla praktycznego zastosowania teorii gier kluczową rolę ma twierdzenie o równowadze Nasha. Równowaga Nasha jest podstawowym pojęciem w teorii gier. Opisuje ona racjonalne zachowania graczy, których strategia gry (każdego z nich) jest optymalna uwzględniając określone ustalone wybory jego oponentów. Innymi słowy określa taki plan postępowania uzależniony od wszystkich możliwych sytuacji, gdy żaden gracz działając samodzielnie, nie może – niezależnie od innych – polepszyć swojej sytuacji. W takim przypadku osiągnięta dla graczy równowaga staje się stabilna i żaden z nich nie ma powodów od niej odstępować. Każda niekooperacyjna gra skończona ma przynajmniej jeden stan równowagi Nasha. Za rozwiązanie gry można uznać znalezienie takiego stanu lub stanów.

Odzwierciedleniem równowagi Nasha jest tak zwany punkt siodłowy. W najprostszych grach z dwoma graczami, znajduje się go poprzez znalezienie największej spośród najmniejszych wartości w wierszach tabeli wypłat (tzw. minimaks) oraz najmniejszej spośród największych wartości w kolumnach tabeli wypłat (tzw. maksmin). W bardziej skomplikowanych grach poszukujemy tzw. strategii dominującej, to jest strategii, która daje graczowi najlepszy wynik nie zależnie od tego, jakie strategie zastosują pozostali gracze. Znalezienie strategii dominującej pozwala uprościć grę gdyż zmniejsza liczba wymiarów tabeli wypłat a to z reguły pozwala na znalezienie punktu siodłowego.

Przykład zastosowania teorii gier w koncepcji integracji transportu

Przykładem zastosowania teorii gier do analiz transportowych jest projekt sieci komunikacji autobusowej wykonany w Biurze Inżynierii Transportu w ramach Koncepcji zintegrowanego systemu publicznego transportu zbiorowego w osi ko-

munikacyjnej Poznań – Murowana Goślina – Wągrowiec – Gołańcz [4]. W wyniku modernizacji linii kolejowej nr 356 na odcinku Poznań Wschód – Wągrowiec, władze położonych przy tej linii jednostek samorządowych (por. rys 1) zauważyły pilną potrzebę integracji systemów transportowych w celu lepszej partycypacji w korzyściach z modernizacji. Zlecono więc wykonanie koncepcji integracji transportu z uwzględnieniem bardzo szerokiego wachlarza działań. Duża liczba podmiotów projektu oraz dziedzin nim objętych, gwarantowała wystąpienie szeregu konfliktów. Autorzy koncepcji szczególną uwagę zwrócili na konflikt powstały między potencjalnymi inwestorami.

Rys.1. Obszar objęty Koncepcją integracji [4]

Zarówno gminy leżące w osi komunikacyjnej Poznań – Wągrowiec – Gołańcz, jak i marszałek województwa partycypują w różnym wymiarze w kosztach wprowadzenia i utrzymania rozwiązań integracji transportu. Różny jest także udział poszczególnych beneficjentów w korzyściach, jakie taka integracja przynosi. Dysproporcja między udziałem w kosztach a udziałem w korzyściach powoduje konflikt. Przy zastosowaniu tradycyjnych metod, autorzy określiliby najlepsze rozwiązanie przy zastosowaniu wybranych kryteriów, a następnie strony przystąpiłyby do negocjacji co do partycypacji w kosztach i korzyściach. Każda gmina, jak i marszałek próbowaliby zapewnić sobie największe korzyści przy minimalizacji kosztów. Takie działanie mogłoby oznaczać fiasko projektu integracji transportu. Można również wyobrazić sobie sytuację, w której każda strona przyjmuje najlepsze dla siebie rozwiązania, nie przejmując się tym, co zrobią inni. W takim przypadku może okazać się, że korzyści z integracji będą zaniżone lub nie wystąpią wcale. Dlatego autorzy zdecydowali się na inną metodę – znalezienie za pomocą teorii gier, takiego rozwiązania, w którym każda ze stron uzyska dla siebie najlepsze korzyści z uwzględnieniem jednak interesów pozostałych stron konfliktu.

Nakreślenie zasad gry i podstawowych założeń

Koncepcja integracji [4] obejmuje różne zagadnienia związane z organizacją i zarządzaniem transportem. Teorię gier zastosowano do konfliktu związanego z kształtowaniem sieci transportu autobusowego.

Korytarz transportowy Poznań – Wągrowiec –Gołańcz obejmuje:

- linię kolejową której dysponentem jest marszałek województwa,
- sieć linii autobusowych nie organizowanych przez samorządy (w tym PKS),
- sieć linii autobusowych, których dysponentem jest miasto Wągrowiec,
- sieć linii autobusowych, których dysponentem jest gmina Murowana Goślina,
- sieć linii autobusowych, których dysponentem jest gmina Czerwonak,
- sieć linii autobusowych i tramwajowych, których dysponentem jest miasto Poznań.

W uproszczeniu każdy z dysponentów ponosi koszty utrzymania linii transportowych, czerpiąc jednocześnie zyski ze sprzedaży biletów. W sieci zbiorowego transportu publicznego przepływy pasażerskie nie są ograniczone, przykładowo mieszkańcy gminy Czerwonak w swoich podróżach korzystają zarówno z „własnej" komunikacji autobusowej, jak i ze środków transportu publicznego, których gmina nie jest dysponentem, takich jak kolej czy autobusy będące w dyspozycji Poznania i Murowanej Gośliny. Sytuacja taka może mieć dwojaki wpływ na dochody gminy ze sprzedaży biletów:

- niekorzystny w przypadku, gdy mieszkańcy gminy zamiast wybierać „własne" wybierają „obce" linie komunikacyjne,

- korzystny, gdy zwiększona przez innych dysponentów oferta przewozowa powoduje indukowanie dodatkowego ruchu pasażerskiego mieszkańców gminy – ruchu, który częściowo realizowany będzie własną komunikacją.

Łatwo zauważyć, że zmniejszenie wpływu ze sprzedaży biletów jednego dysponenta często oznacza zwiększenie tych wpływów u innego. Jest to więc swoista gra, w której dysponenci zagrywają kwotami przeznaczonymi na koszty utrzymania linii transportowych tak, aby uzyskać jak najlepszy bilans w wyniku sprzedaży biletów i przy uwzględnieniu działań innych dysponentów.

Aby móc przeprowadzić analizę konfliktu za pomocą teorii gier należy ustalić podstawowe parametry gry, czyli liczbę graczy, strategii i sposób generacji tabeli wypłat.

Pierwsze spojrzenie na opisany powyżej konflikt może sugerować, że graczami są wszyscy dysponenci. Jednak po uwzględnieniu poniższych zależności liczbę graczy można zredukować do trzech.

Rozkład jazdy przewozów kolejowych będzie miał zasadniczy wpływ na zmiany w potokach pasażerskich. W tym Koncepcji [4] jest on jednak ustalony a priori – jest więc jedynie daną wejściową w rozpatrywanym konflikcie i eliminuje jako gracza urząd marszałkowski.

Wpływ zmian w wągrowieckiej komunikacji autobusowej na dochody z biletów innych dysponentów jest znikomy, gmina Wągrowiec nie jest więc graczem.

W projekcie sieci autobusowej rozkład jazdy autobusów PKS jest daną wejściową, co podobnie jak w przypadku kolei eliminuje tego przewoźnika jako gracza.

Pozostają więc: gmina Czerwonak, gmina Murowana Goślina, miasto Poznań (gminy Skoki i Gołańcz nie dysponują transportem publicznym).

Kolejną informacją potrzebną z punktu widzenia teorii gier jest - jakie i ile strategii może zastosować każdy z graczy? Słowo „strategia" ma w teorii gier znaczenie nieco odmienne od potocznego. W codziennym życiu słowo to oznacza specjalnie chytry i pomysłowy plan, podczas gdy w teorii gier oznacza dowolny pełny plan. Strategia jest planem na tyle pełnym, że nie może go zmienić działanie przeciwnika lub natury…".[5] Z uwagi na zakres i charakter podejmowanych zmian w sieciach publicznego transportu zbiorowego strategie, jakie będą rozważali gracze można pogrupować następująco:

- Strategie degresywne – w których po przyspieszeniu kolei gminy zmniejszą zamówienia na przewozy autobusowe (zmniejszą pracę transportową poj. km) do poziomu, który zapewni, że czas podróży publicznym transportem zbiorowym nie wzrośnie. Stosowanie takiej strategii oznacza zmniejszenie nakładów na utrzymanie publicznego transportu zbiorowego w gminie lecz może również oznaczać zmniejszenie przychodów ze sprzedaży biletów.
- Strategie constans – w których gminy pozostawiają zamówienia na przewozy na dzisiejszym poziomie zmieniając jednak rozkład jazdy i marszruty tak, aby bardziej zintegrować własną komunikację autobusową (i/lub tramwajową) z transportem kolejowym. Przy przyjęciu takiej strategii nakłady na utrzymanie publicznego transportu zbiorowego pozostaną takie same, wzrosną natomiast wpływy ze sprzedaży biletów.

- Strategie progresywne – w których gminy zwiększają przewozy, w szczególności wprowadzając nowe połączenia zintegrowane z transportem kolejowym. Stosowanie tej strategii oznacza wzrost nakładów na utrzymanie publicznego transportu zbiorowego.

Ostatnią potrzebną informacją jest tak zwana tabela wypłat. Jest to tabelaryczne zestawienie wyników gry uzyskanych dla każdego w zależności od kombinacji zastosowanych strategii. Możemy rozważyć dwie rozgrywki:

- rozgrywka oparta na bilansie finansowym, w której wynikiem jest bilans kosztów utrzymania komunikacji autobusowej i wpływy z biletów,
- rozgrywka oparta na kosztach społecznych, w której do powyższego bilansu dodaje się koszty czasu użytkowników transportu zbiorowego.

Rozwiązanie konfliktu

Istotą znalezienia właściwych rozwiązań jest nie tyle odszukanie punktu siodłowego, co właściwe wypełnienie tabeli wypłat. W prezentowanym przykładzie mamy zdefiniowane dwie rozgrywki a więc tworzymy dwie tabele wypłat. Każda z tabel jest trzywymiarowa, co odpowiada trzem graczom. Jako, że każdy gracz ma do dyspozycji 3 strategie, ostatecznie więc tabela ma wielkość 3x3x3. Przy czym komórka tabeli zawiera trzy wartości uzyskiwane przez każdego z graczy.

Wynikiem gry w prezentowanym przykładzie jest wartość pieniężna wynikająca z bilansu finansowego w grze pierwszej i ekonomicznego w drugiej. W celu uzyskania tej wartości konieczne było przeprowadzenie szeregu obliczeń modelowych:

- Pierwszym działaniem było przypisanie poszczególnym strategiom graczy konkretnego kształtu sieci transportu autobusowego. W tym celu dla każdego gracza i każdej strategii zaplanowano kilka wariantów sieci transportu autobusowego a następnie wybrano najlepszy. Kryterium wyboru najlepszego wariantu było dopasowane do założeń strategii np. w strategii degresywnej wybierano wariant charakteryzujący się najmniejszą pracą transportową nie zwiększający jednak czasu podróży w publicznym transporcie zbiorowym. Obliczenia wykonano z wykorzystaniem modelu podróży w publicznym transporcie zbiorowym za pomocą programu PTV Visum z uwzględnieniem modernizacji linii kolejowej i czynników integrujących transport.
- Następnie zbudowano 27 wariantów sieci publicznego transportu zbiorowego będących kombinacją wariantów sieci odpowiadających strategiom przyjmowanym poprzez poszczególnych graczy. Dla każdego wariantu wykonano zarówno rozkład podróży jak i badanie podziału zadań przewozowych. Podział zadań przewozowych wykonano za pomocą modułu Modal Split programu PTV Visum.
- Ostatnim krokiem było wyodrębnienie informacji o pracy transportowej, liczbie przejazdów realizowanych w autobusach będących w dyspozycji po-

szczególnych gmin oraz czasie podróży w publicznym transporcie zbiorowym mieszkańców poszczególnych gmin. Na podstawie tych informacji obliczono bilans finansowy i ekonomiczny z uwzględnieniem specyfiki transportu w poszczególnych gminach. Wyniki zapisano w tabelach wypłat.

Wybór wariantów w oparciu o teorię gier nie był działaniem skomplikowanym, tabele wyników pozwoliły na wyodrębnienie strategii dominujących. Na przykład w badaniu bilansu finansowego – pierwsza rozgrywka – okazało się, że każdy z graczy najlepszy wynik uzyska, gdy zastosuje strategię degresywną, niezależnie od tego jaką strategię wybrali pozostali gracze. W przypadku badania kosztów społecznych – druga rozgrywka – zauważono, że gmina Murowana Goślina zawsze wybierze strategię degresywną, bo niezależnie od wyborów pozostałych graczy uzyska najlepszy wynik. Wtedy łatwo było znaleźć punkt siodłowy dla Poznania i Czerwonaka. W obu przypadkach wybrano stan odpowiadający stanowi równowagi Nasha.

Wybrano jeszcze trzeci wariant, jednak wybór nie został dokonany w oparciu o teorię gier. Założono, że Poznań będzie musiał zastosować strategię progresywną wymuszoną przez realizację zamierzonych inwestycji. W takim przypadku dobrano najlepiej pasujące strategie Czerwonaka i Murowanej Gośliny.

Ostatecznie wybrano warianty:

- ekonomiczny w którym gminy przyjmują następujące strategie: Poznań – degresywną, Czerwonak – degresywną, Murowana Goślina – degresywną,
- społeczny w którym gminy przyjmują następujące strategie: Poznań – constans, Czerwonak – constans, Murowana Goślina – degresywną,
- docelowy w którym gminy przyjmują następujące strategie: Poznań – progresywny, Czerwonak – constans, Murowana Goślina – constans.

Wariantom przyjętych strategii odpowiadały warianty kształtu sieci transportu autobusowego.

Wnioski

1. Teoria gier znajduje szerokie zastosowanie w modelowaniu i analizach transportowych. Można za jej pomocą zarówno opisywać zależności w ruchu drogowym jak i rozwiązywać konflikty powstałe wokół zagadnień związanych z transportem. W Polsce projektanci i specjaliści od transportu zbyt rzadko sięgają po teorię gier jako narzędzie w analizach i projektach transportowych.
2. Zastosowanie teorii gier szczególnie przydatne jest przy analizach transportowych w których można spodziewać się wystąpienia sytuacji konfliktowych, a co gorsza konflikt może zdeterminować działania poszczególnych stron uniemożliwiając znalezienie wspólnego rozwiązania.
3. Wybór rozwiązań za pomocą teorii gier jest diametralnie różny od metod tradycyjnych np. analizy wielokryterialnej. W teorii gier nie szuka się najlepsze-

go rozwiązania z punktu widzenia postawionych kryteriów, tylko szuka się rozwiązania które zadowoli wszystkie strony ewentualnego konfliktu.

4. Zaprezentowany przykład udowadnia, że za pomocą teorii gier w nieskomplikowany sposób można znaleźć rozwiązania konfliktu interesu między jednostkami samorządowymi. Przedstawiona Koncepcja [4] znalazła poparcie wśród skonfliktowanych gmin i jest aktualnie wprowadzana w życie. Ten drobny sukces jest szczególnie ważny w świetle konieczności uchwalenia przez jednostki samorządowe planów transportowych. Należy spodziewać się, że na etapie sporządzania i uchwalania planów narodzi się cały szereg konfliktów, których nie będzie można rozwiązać tradycyjnymi metodami.

Literatura

[1] Teoria gier – giaur, T. Rostański, M. Drozd – publikacja internetowa – www.giaur.qs.pl
[2] Wstęp do teorii gier – Tadeusz Patkowski – Uniwersytet Warszawski 2012.
[3] The applicability of non-cooperative game theory in transport analysis – Yaron Hollander – Joseph N. Prashker – Spinger Science + Business Media B. V. 2006r.
[4] Koncepcja zintegrowanego systemu publicznego transportu zbiorowego w osi komunikacyjnej Poznań – Murowana Goślina – Wągrowiec – Gołańcz. BIT sp.j. Poznań – Stowarzyszenie Jednostek Samorządu Terytorialnego „Komunikacja" Wągrowiec 2011r.
[5] Williams J.D., Strateg doskonały – Wprowadzenie do teorii gier. Państwowe Wydawnictwo Naukowe; Warszawa 1965.

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. Opisywany 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
- Iinformacje 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 podróżnych 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.

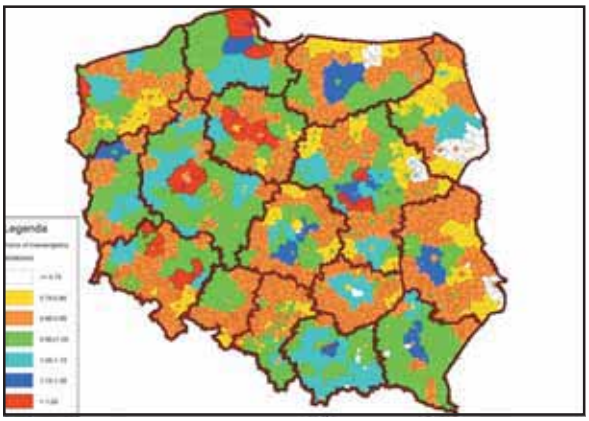
2. Model obszaru

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.

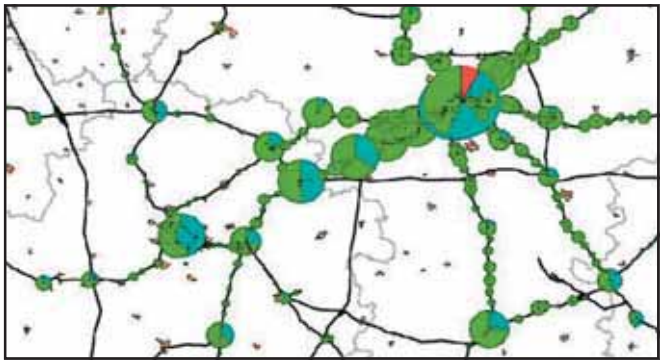
W porównaniu z siecią drogową i kolejową jest to więc sieć prosta, w której węzłami są porty lotnicze a odcinkami bezpośrednie połączenia pomiędzy nimi.

3.3. Sieć kolejowa

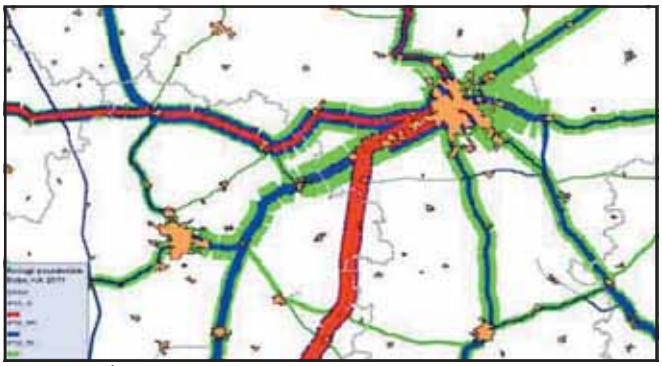
Model sieci kolejowej zbudowany został na podstawie informacji pobieranych z różnych dostępnych źródeł, głównie z baz danych PLK oraz od przewoźników. Sama baza danych zawiera węzły, linie i odcinki. Elementy te opisane są przez szereg atrybutów, wśród nich także te używane w statystyce, pozwalające 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

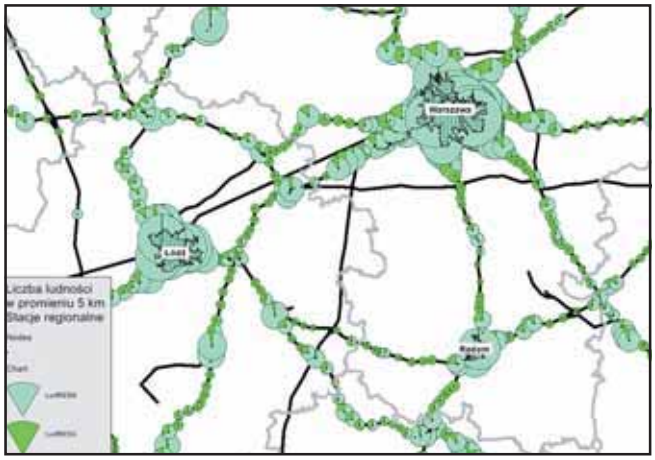
Dane historyczne określające liczbę sprzedanych biletów na stacjach pozwalają na określenie zależności pomiędzy tą liczbą a zmiennymi objaśniającymi charakteryzującymi otoczenie w jakim te stacje się znajdują. W modelu obszaru opisanym wcześniej, wszystkie te zmienne zostały zdezagregowane do poziomu 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

$$LP_{reg} = a*POC_{reg} + b*LUD_{2w} + c*SO_{2m} - d*SO_{5w} + e*K*PKB_{5m} \quad (1)$$

gdzie:

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

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

LUD_{2w} - liczba mieszkańców wiejskich w promieniu 2 km od stacji regionalnych w rejonie,

SO_{2m} - liczba samochodów mieszkańców miejskich w promieniu 2 km od stacji regionalnych w rejonie,

SO_{5w} - liczba samochodów mieszkańców wiejskich w promieniu 5 km od stacji regionalnych w rejonie,

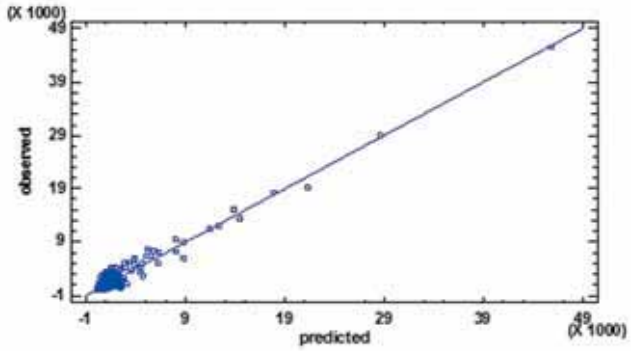
PKB_{5m} - wielkość PKB dla mieszkańców miejskich w promieniu 5 km od stacji regionalnych w rejonie,

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 zwiększanie. Wynika to pośrednio z powiększającego się zatłoczenia ulic w miastach w miarę przybywania samochodów i przenoszenia się podróżnych do komunikacji zbiorowej.



Rys. 6. Korelacja dla generowanych podróży regionalnych
Źródło: opracowanie własne

Podróże międzyregionalne

$$LP_{mreg} = a*POC_{mreg} + b*LUD_{5m} - c*SO_{2m} + e*K*PKB_{2m} \quad (2)$$

gdzie:

LP*mreg* - liczba podróży międzyregionalnych generowanych na stacjach międzyregionalnych w rejonie,

POC*mreg* - liczba pociągów międzyregionalnych zatrzymujących się na stacjach międzyregionalnych w rejonie,

LUD*5m* - liczba mieszkańców wiejskich w promieniu 2 km od stacji międzyregionalnych w rejonie,

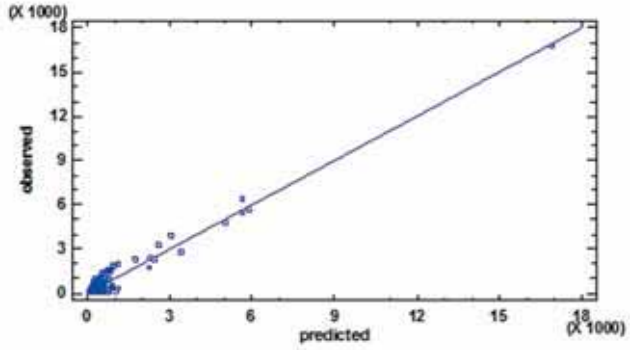
SO*2m* - liczba samochodów mieszkańców miejskich w promieniu 2 km od stacji międzyregionalnych w rejonie,

PKB*2m* - 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

$$LPmag = a*POCmag - c*SO5m + e*K*PKB5m \quad (3)$$

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,

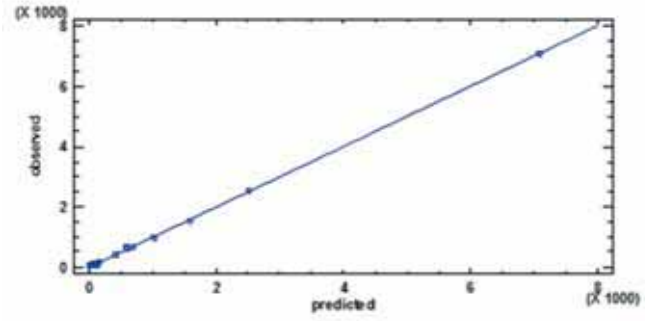
PKB*5m* - wielkość PKB dla mieszkańców miejskich w promieniu 5 km od stacji międzyaglomeracyjnych w rejonie,

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:

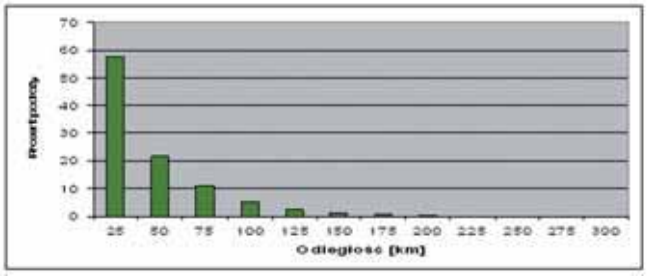
$$P_{ij} = S * \frac{P_i * A_j}{f(C_{ij})} \tag{4}$$

gdzie:

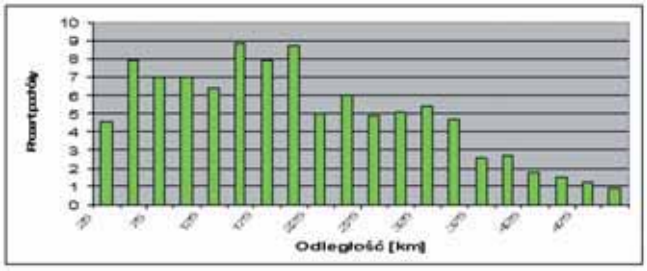
P_{ij} - liczba podróży na relacji pomiędzy rejonami „i-j”,
P_i - potencjał podróży generowanych w rejonie i,
A_j - potencjał podróży generowanych w rejonie j,
C_{ij} - uogólniony koszt podróży dla relacji pomiędzy rejonami „i-j”,
S - stała korygująca.

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.

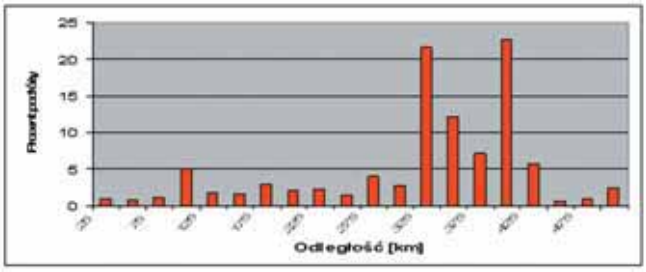
Prezentowane poniżej histogramy zostały opracowane przy wykorzystaniu historycznych macierzy przejazdów według sprzedanych biletów oraz odległości z modelu sieciowego.



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

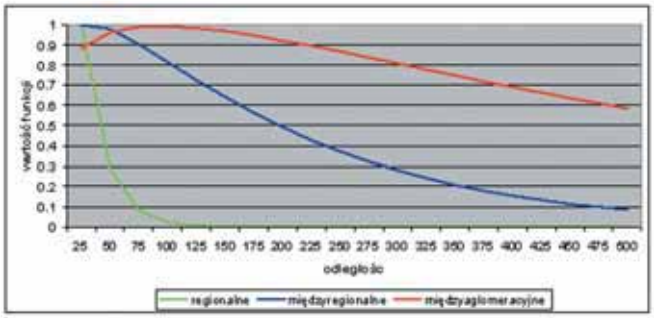
Średnie długości podróży w 2011 roku to dla przejazdów: regionalnych – 43 km, międzyregionalnych – 208 km i międzyaglomeracyjnych – 338 km.

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

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

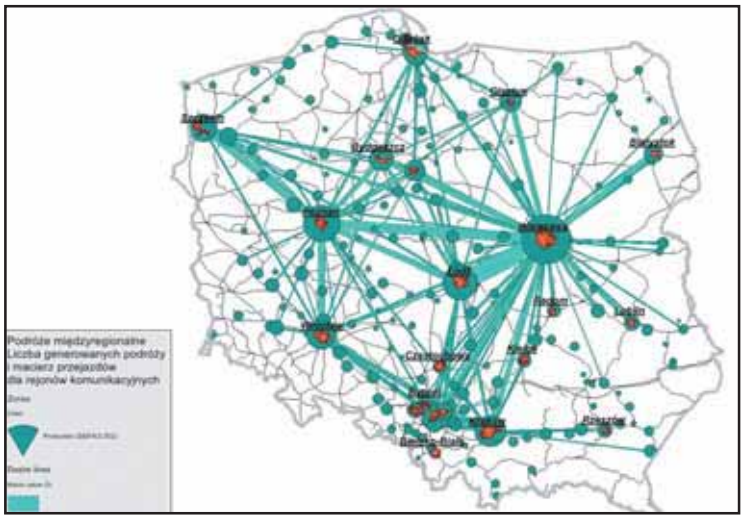
gdzie:
Cij - uogólniony koszt podróży dla relacji „i - j",
A, B, C - parametry funkcji, różne dla każdego rodzaju podróży.

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:

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

gdzie:

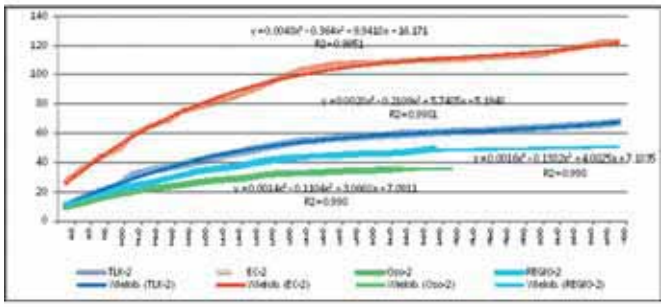
C_{ij} - uogólniony koszt przejazdu między rejonami i-j,
C_m - składniki kosztu podróży (bilet, koszt paliwa, opłata autostradowa),
T_n - składniki czasu podróży,
KJ - koszt jednostkowy czasu podróży.

Macierze kosztów dla podróży koleją obliczane są niezależne 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 funkcje, 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:

$$LP_{el} = E*LP \tag{7}$$

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 przyjmować, 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 komunkacyjne 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

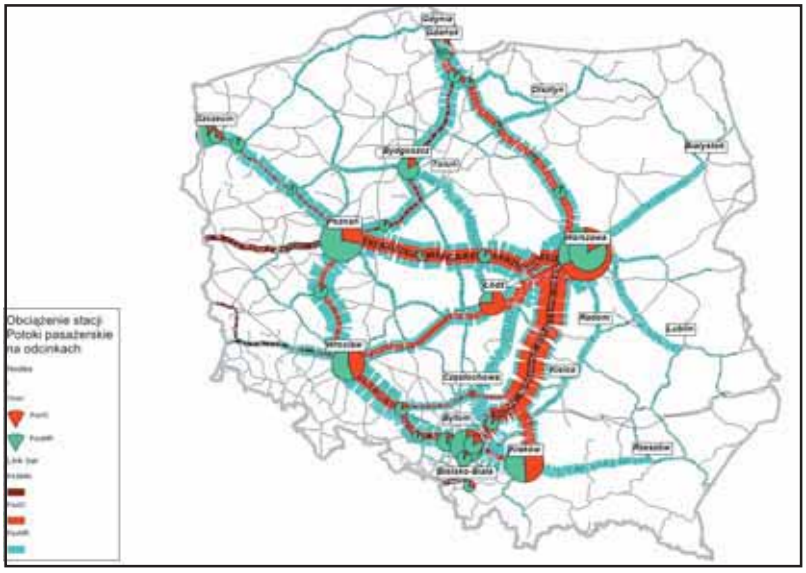
Weryfikacja modelu polegała na wykonaniu obliczeń według danych stanu istniejącego i porównaniu wyników obliczeń z danymi statystycznymi i pomiarami. Jako bazowy przyjęto rok 2011, ponieważ dostępna była dość duża liczba danych statystycznych i pomiarowych, łącznie z aktualnymi wynikami pomiaru ruchu 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.

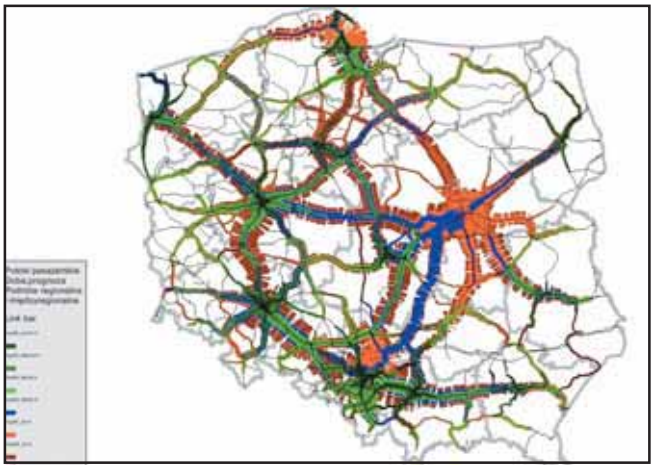
5. Przykłady zastosowań

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 międzregionalnych 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 artukule, 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.

PROGNOZOWANIE TURYSTYCZNEGO RUCHU ROWEROWEGO

Andrzej Zalewski
dr inż., Politechnika Łódzka, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Katedra Geotechniki i Budowli Inżynierskich, Al. Politechniki 6, 90-924 Warszawa, azplan@supermedia.pl

Streszczenie. *Artykuł przedstawia metodę prognozowania turystycznego ruchu rowerowego zastosowaną w Studium Wykonalności „Trasy Rowerowe w Polsce Wschodniej". Wykorzystana metoda w trakcie realizacji projektu uległa pewnym zmianom, co jest związane z poziomem agregacji danych. Na podstawie wykonanych prognoz nasuwa się wniosek, że ich horyzont czasowy nie powinien przekraczać 10 lat, gdyż powyżej tego okresu tracą zupełnie wiarygodność.*

Słowa kluczowe*: turystyka, ruch rowerowy, modelowanie podróży, prognozy ruchu*

1. Wprowadzenie

Zagadnienie modelowania i prognozowania turystycznego ruchu rowerowego jest zagadnieniem mało zbadanym w warunkach polskich. Wynika to z faktu, że turystyka rowerowa nie była dotychczas w Polsce rozwijana systemowo, jak również liczba turystów rowerów była stosunkowo niewielka. W wielu krajach zachodnioeuropejskich oraz Australii, Kanadzie i USA turystyka rowerowa jest bardzo popularnym sektorem turystyki, stanowiącym przedmiot zainteresowania wielu specjalistów z różnych dziedzin aktywności społecznej, ekonomicznej i naukowej. Rozwój turystyki rowerowej znajduje również swoje odzwierciedlenie w promowanej przez Unię Europejską polityką zrównoważonego rozwoju, w tym transportu oraz wyrównywaniem szans regionów dotychczas o niższym poziomie rozwoju ekonomicznego niż średnia unijna. Rozwój turystyki rowerowej w programach unijnych ma swoje odzwierciedlenie m.in. w Programie Operacyjnym Rozwój Polski Wschodniej, w działaniu V.2. Trasy Rowerowe w Polsce Wschodniej[1]. W programie tym, zakłada się, że rozwój turystycznych tras rowerowych będzie dźwignią rozwoju społeczno – ekonomicznego województw: warmińsko – mazurskiego, podlaskiego, lubelskiego, podkarpackiego i świętokrzyskiego.

Autor niniejszego artykułu na II Konferencji „Modelowanie i prognozowanie ruchu" (Kraków 2010) przedstawił artykuł pt. Propozycja metody prognozowania

1 Program Operacyjny „Rozwój Polski Wschodniej", **Oś priorytetowa V: Zrównoważony rozwój potencjału turystycznego opartego o warunki naturalne, Działanie** V.2. Trasy Rowerowe. www.polskawschodnia.gov.pl/ WstepDoFunduszyEuropejskich/Strony/program.aspx (X.2010).

turystycznego ruchu rowerowego w warunkach polskich" [13]. Zawarto w nim propozycję metody prognozowania, która została zastosowana do opracowania modelowania i prognoz ruchu rowerowego dla turystycznych tras rowerowych w Polsce [12]. Doświadczenia zdobyte w ramach wykonanych prognoz oraz skonfrontowanie proponowanej metody z dostępnością danych stanowią przedmiot niniejszego artykułu.

2. Cele i założenia do prognoz turystycznego ruchu rowerowego

Cele prognoz turystycznego ruchu rowerowego różnią się od prognoz innych środków i form przemieszczeń, co wynika ze specyfiki tego środka lokomocji i turystyki. Obok oszacowania prognozowanych wielkości potoków ruchu rowerowego dla określonego horyzontu czasowego, zdaniem autora, nie dłuższego niż 10 lat, bardzo istotne jest oszacowanie wielkości i struktury natężenia ruchu samochodowego na drogach wzdłuż trasy rowerowej. Oszacowane wielkości natężeń służące do analiz ekonomiczno – finansowych, są również wytyczną do wstępnego określenia warunków drogowo – ruchowych dla rowerów przy danej wielkości potoku ruchu samochodowego oraz wyboru formy prowadzenia ruchu rowerowego względem jezdni drogowej.

Przegląd literatury przedmiotu wskazuje, że w warunkach polskich prognozę turystycznego ruchu dla tras rowerowych długodystansowych można wykonać metodą korytarzową. Doświadczenia autora artykułu wynikające z opracowanej prognozy turystycznego ruchu rowerowego dla Tras Rowerowych w Polsce Wschodniej pozwalają na stwierdzenie, że racjonalne jest wykorzystanie w prognozowaniu wskaźników wzrostu PKB zalecanych w prognozach ruchu przez Generalną Dyrekcję Dróg Krajowych i Autostrad [8] oraz metody CRDFM *(Model przewidywania wielkości ruchu rowerowego)*, która została opracowana dla uwarunkowań krajów Unii Europejskiej[2].

Zgodnie z przedstawioną powyżej charakterystyką ruchu rowerowego na turystycznych trasach rowerowych prognozowany ruch składać się będzie z następujących składowych:

- ruchu codziennego mieszkańców,
- ruchu rekreacyjnego mieszkańców,
- ruchu turystycznego jednodniowego,
- ruchu turystycznego wielodniowego.

Ze względu na zasięg terytorialny ruch rowerowy powstaje na:

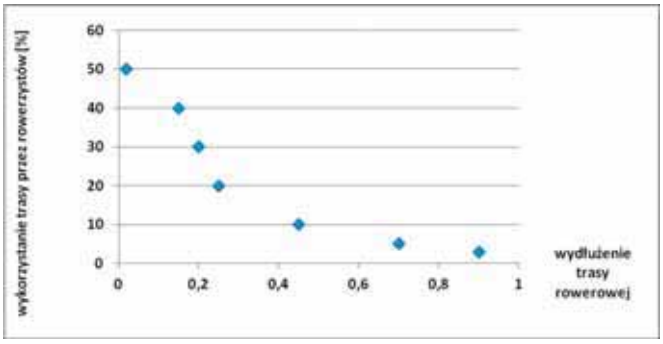
- obszarach zurbanizowanych, pod pojęciem których rozumie się tereny miast i tereny podmiejskie w promieniu 6 km od centrum miasta - obszaru zwartej zabudowy mieszkaniowej,

2 Metoda ta opracowana została w ramach pracy „*European Cycle Route Network Eurovelo*" (Bruksela 2009) i wykonana na zamówienie Directorate - General for Internal Policies Policy Department Structural and Cohesion Policies (Dyrekcję Generalną Polityki Wewnętrznej Departamentu Polityki Strukturalnej i Spójności) Parlamentu Europejskiego.

- terenach pozamiejskich usytuowanych w promieniu powyżej 6 km od centrum miasta.

Istotnym zagadnieniem jest kwestia modelowania ruchu rowerowego w ujęciu czasowym. Wnioski wynikające z przeglądu literatury wskazują, że w związku ze specyfiką, turystyczny ruch rowerowy może być analizowany w ujęciu dobowym i rocznym. Jednocześnie, ze względu na mały udział turystycznego ruchu rowerowego w istniejących potokach ruchu, można przyjąć, że zmiany w podziale zadań przewozowych spowodowane realizacją tras rowerowych dalekiego zasięgu w najbliższych 10 – 15 latach będą w Polsce na tyle małe, że można je pominąć na poziomie dokładności obliczeń dla celów prognozy.

Codzienny ruch rowerowy charakteryzuje się tym, że rowerzyści dążą do wyboru możliwie najkrótszej trasy przejazdu. W wypadku przebiegów alternatywnych wydłużonych w stosunku do najkrótszych połączeń, lecz atrakcyjnych rekreacyjnie można założyć, że korzystać z nich będzie cały prognozowany turystyczny ruch rowerowy, natomiast ruch codzienny mieszkańców przechodzić będzie na trasę alternatywną wg wskaźników przedstawionych na rys.1 [1].



Rys. 1. Prawdopodobieństwo wyboru trasy dłuższej w funkcji stosunku jej długości do trasy krótszej[3]

W modelowaniu i prognozowaniu ruchu rowerowego bardzo istotnym parametrem charakteryzującym zachowania rowerzystów są średnie długości podróży rowerowych. W zastosowanej metodyce [12] oszacowane zostały w następujący sposób:

- Średnią długość codziennej podróży rowerem wewnątrz obszaru zurbanizowanego w miastach małych i średnich oszacowano wg wzoru[4]:

$$l_{śr} = 1{,}2 + 0{,}22\sqrt{Q}\ \text{[km]} \qquad (1)$$

gdzie Q jest to powierzchnia zwarta (zabudowy zwartej) w [km^2] obliczona wg mapy topograficznej w skali 1:25 000.

3 Bello – Morales A. i Fonseca J.M. (1985). Manual para El planimiento, proyecto y ejecucion de pistas ciclistas, Association Espanola Permanente de los Congresos de Carreteras, Madrid.

4 Wg Mazurek T. i Kubalski J. (1968). *Komunikacja miejska*, WKiŁ, Warszawa.

- Średnią długość codziennej podróży rowerem wewnątrz obszaru zurbanizowanego w miastach powyżej 100 000 mieszkańców, przyjęto jako $l_{śr} = 3{,}0$ km[5].
- Średnią długość jednodniowej turystycznej podróży rowerem określono na podstawie doświadczeń zagranicznych[6,7] na poziomie $l = 51$ km, podobnie jak średnią długość przejazdu dziennego w turystycznych wielodniowych podróżach rowerowych.

Wykorzystanie roweru w ciągu roku jest zróżnicowane. W warunkach polskich wg badań autora[8] średni roczny ruch rowerowy w warunkach polskich wynosi ok. 54 % jego wartości maksymalnej, przypadające na okres letni (lipiec – sierpień). Dla okresu prognostycznego i wzrostu popularności roweru wśród ludności zamieszkującej dany obszar można przyjąć, że jego wzrost ma miejsce w kwietniu, a spadek w listopadzie. Minimalny ruch rowerowy odnotowuje się w okresie miesięcy zimowych od stycznia do lutego (zaledwie ok. 4% wielkości ruchu osiąganego w okresie letnim, co spowodowane jest dużymi spadkami temperatury[9]. W wykonanej prognozie przyjęto założenie, że sezonowość użytkowania roweru utrzyma się w okresie prognostycznym.

Wg szacunków zespołu autorskiego [12], na podstawie danych zawartych w opracowaniu GDDKiA - *Ruch rowerowy w Generalnym Pomiarze Ruchu 2005 STUDIUM*[10], średni miesięczny udział ruchu rowerowego w stosunku do maksymalnego udziału ruchu rowerowego w ciągu roku wynosi ok. 52 %.

Oznacza to, że wartości proponowane przez A. Zalewskiego oraz wg opracowania GDDKiA są zbieżne, jeśli weźmie się pod uwagę stopień dokładności szacunków powyższej wielkości. Dlatego też, w omawianej metodzie przyjęto do prognoz wskaźnik średni miesięczny udział ruchu rowerowego w stosunku do maksymalnego udziału ruchu rowerowego w ciągu roku na poziomie 0,6, przyjmując założe-

5 Zgodnie z wynikami badań dla obszarów silnie zurbanizowanych dla miast holenderskich wg CROW (1998). *Recommendations for traffic provisions in built – up areas ASVV, Ede*, przy założeniu średniej prędkości ruchu rowerowego V = 18 km/h oraz czasu przygotowania u źródła podróży i odstawienia w miejscu celu podróży rowerem. Wartość $l_{śr} = 3{,}0$ km jest również podawana jako charakterystyka średniej długości podróży rowerem w warunkach niemieckich wg Mobilitat In Deutschland 2002 – Fahrradverkehr, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Jednocześnie zauważyć należy, że wg danych zawartych w Cycling Expertise from Germany A-1/2010 (German Institute of Urban Affairs (Difu) GmbH, Berlin) udział podróży rowerami do 2 km wynosi aż 79 % wszystkich podróży rowerowych. Na podstawie powyższych danych i szacunków autora, średnia długość podróży rowerem wynosi 2,1 km. Dlatego za celowe i uzasadnione uważa się korzystanie w miastach małych i średnich ze wzoru (1), który uwzględnia rozwój przestrzenny terenów zurbanizowanych.

6 *Regionalwirtschaftliche Effekte des Radtourismus in Rheinland-Pfalz* (2007); opracowanie wykonane przez Europejski Instytut Turystyki Uniwersytetu w Trier na zlecenie *Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Landwirtschaft und Weinbau Rheinland-Pfalz przy wsparciu Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung*.

7 *European Cycle Route Network Eurovelo*. (2009). Directorate-General for Internal Policies Policy Department Structural and Cohesion Policies Comission of European Union, Bruksela .

8 Zalewski A., Wpływ infrastruktury komunikacyjnej i czynników środowiskowych na ruch rowerowy w miastach średnich w Polsce, dysertacja doktorska, Politechnika Krakowska 1993.

9 Podobna sytuacja w zakresie turystycznego wykorzystania roweru jest w większości dróg rowerowych w Niemczech, w tym również wzdłuż Trasy Rowerowej Rzeki Mozeli – patrz źródło przypis 3.

10 Tab. 7 ww. opracowania.

nie, że budowa trasy rowerowej zwiększy udział ruchu rowerowego w miesiącach, gdy ruch rowerowy jest mniejszy.

Na podstawie doświadczeń autora oraz doświadczeń zachodnioeuropejskich przyjęto w przybliżeniu, że udział ruchu rowerowego w podziale zadań przewozowych na terenach zurbanizowanych bez dobrze rozwiniętej komunikacji zbiorowej wynosić będzie 15 % ÷ 20 %, co oznacza przy łącznej ruchliwości 1,8 podróży na mieszkańca i dobę, ruchliwość rowerem będzie wynosić 0,27 ÷ 0,36 podróży.

W obszarach z dobrze rozwiniętą komunikacją zbiorową udział rowerów w podziale zadań przewozowych wynosi ok. 50 % - 66 % udziału w miastach bez komunikacji zbiorowej, tj. 7 ÷ 13 %, co oznacza (przyjmując jak wyżej ruchliwość całkowitą), że ruchliwość rowerem szacować można na 0,13 ÷ 0,23 podróży na mieszkańca i dobę. W obu wypadkach są to średnie wielkości ruchu rowerowego, jakie generują dobrze wyposażone w drogi dla rowerów obszary zurbanizowane w Europie Zachodniej.

Na terenach pozamiejskich na drogach krajowych i wojewódzkich udział ruchu rowerowego jest niewielki, jednak wykazuje zróżnicowanie geograficzne, co wynika ze specyfiki regionalnej.

W prognozie ruchu rowerowego na terenach zamiejskich uwzględniono jego wzrost w zależności od regionu i przyjęto udział ruchu rowerowego w całości potoku pojazdów. Przykładowo na terenach pozamiejskich w województwie podkarpackim przyjęto udział ruchu rowerowego w potoku ruchu w wielkości 1,7 %, co oznacza wzrost w stosunku do stanu istniejącego o ok. 55 %. Wartości te uwzględniają wzrost udziału rowerów w potoku ruchu spowodowany realizacją Tras Rowerowych w porównaniu z wynikami struktury rodzajowej pomiarów ruchu GPR GDDKiA 2005[11].

Prognozę turystycznego ruchu rowerowego dla warunków polskich oparto o wspomnianą wcześniej metodę CRDFM[12] [3], wg której wielkość rowerowego ruchu turystycznego uzależniona jest od gęstości miejsc noclegowych lub od gęstości zaludnienia. Są to zależności wynikające z analizy wielu zmiennych objaśniających odnoszących się do tras rowerowych w krajach, gdzie turystyka rowerowa jest bardzo popularna (m.in. Niemcy, Szwajcaria, Austria). Gęstość miejsc noclegowych oraz gęstość zaludnienia okazały się zmiennymi o najwyższych wartościach współczynnika korelacji w stosunku do uzyskiwanych z innych badanych zmiennych.

11 Na drogach pozamiejskich w Polsce Wschodniej udział ruchu rowerowego potoku ruchu wyniósł wg GPR GDDKiA 2005 w województwie: warmińsko – mazurskim 2,34 %, świętokrzyskim 0,87 %, podlaskim 1,22 %, podkarpackim 1,09 %, lubelskim 1,72 %. Są to wartości bardzo małe, jednak wskazują na zróżnicowanie regionalne analizowanego zjawiska. Oczekując, że realizacja Tras rowerowych spowoduje wzrost wykorzystania roweru w poszczególnych regionach, przyjęto wzrost udziału ruchu rowerowego po zrealizowaniu Tras od 1,2 – 1,7 w stosunku do stanu istniejącego. Założono, że wzrost będzie większy w województwach, w których wg danych dla roku 2005, udział był relatywnie mały (świętokrzyskie – ok. 70 % i podkarpackie – ok.55 %), a dla pozostałych województw wzrost mniejszy (o 20 %).

12 Metodę tą wykorzystano m.in. do studium wykonalności i projektu Trasy Rowerowej Żelaznej Kurtyny i jest zalecana do prognoz turystycznego ruchu rowerowego w krajach europejskich.

Prognozy demograficzne dla jednostek administracyjnych, przez które przebiegać będą turystyczne trasy rowerowe przyjęto wg prognoz GUS, co oznacza, że poziom agregacji dostępnych danych to gmina. Zmiany w rozmieszczeniu zaludnienia określono na podstawie informacji zawartych w „Studiach uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego" i „Strategiach rozwoju" tych jednostek samorządu terytorialnego.

3. Modelowanie ruchu rowerowego

3.1. Ruch rowerowy na terenach zurbanizowanych

Ruch codzienny mieszkańców

Wielkość podróży rowerowych w obszarze zurbanizowanym oszacowano z wykorzystaniem następujących formuł:

- Średniodobowa liczba podróży rowerowych mieszkańców w obszarze zurbanizowanym:

$$N_{rd} = M * y_r \quad (2)$$

gdzie:

M – liczba mieszkańców w obszarze zurbanizowanym,

y_r – ruchliwość rowerem [podróży/mieszkańca/dobę] - 0,27 ÷ 0,36 (dla miast bez dobrze rozwiniętej komunikacji publicznej) i 0,13 ÷ 0,23 (dla miast z dobrze rozwiniętą komunikacją publiczną);

w_w - wskaźnik średniorocznego wykorzystania roweru - 0,65.

- Roczna liczba podróży rowerowych w obszarze zurbanizowanym:

$$N_{rr} = 365*N_{rd} \quad (3)$$

Ruch rekreacyjny mieszkańców w obszarach zurbanizowanych

W opracowanej prognozie założono, że ruch rowerowy mieszkańców terenów zurbanizowanych, jak również w pozamiejskich został uwzględniony w ruchu rowerowym o charakterze codziennym.

3.2. Ruch rowerowy na terenach pozamiejskich

Wielkość natężeń ruchu rowerowego na zamiejskich odcinkach dróg oszacowano, podobnie jak dla ruchu drogowego wg metody GDDKiA [8] uzależniającej wzrost ruchu drogowego od corocznych wartości wskaźnika zmian PKB, określonych dla poszczególnych subregionów. Dla oszacowania wzrostu natężeń ruchu na drogach krajowych i wojewódzkich przyjęto wartości wskaźników proponowane w metodzie GDDKiA, natomiast dla dróg powiatowych i gminnych ww. wskaźnik pomniejszony o 50 %, co wynika, z charakteru tych dróg. Na drogach ww. ka-

tegorii nie ma generalnie znaczącego przyrostu ruchu, o ile nie następują znaczące zmiany w zagospodarowaniu przestrzennym terenu, które dana droga obsługuje.

Ruch turystyczny

Prognozy turystycznego ruchu rowerowego dla warunków polskich oszacowano wspomnianą powyżej metodę CRDFM [3]. Metoda ta wyznacza roczną liczbę podróży rowerowych (N_{rrt}) na określonym obszarze (gminy), będącej sumą ruchu turystycznego o charakterze jednodniowym (N_{rrt1}) oraz wielodniowym (N_{rrt2}):

$$N_{rrt} = N_{rrt1} + N_{rrt} \quad (4)$$

$$N_{rrt1} = 4{,}6\ g_z \quad (5)$$

gdzie:

g_z - gęstość zaludnienia [liczba mieszkańców/km^2] dla roku analizy[13];

$$N_{rrt2} = 29\ g_{n0}\ w_k \quad (6)$$

gdzie:

g_{n0} - gęstość liczby miejsc noclegowych w roku wyjściowym [liczba miejsc noclegowych/ km^2],

g_{nk} - gęstość liczby miejsc noclegowych w k - tym roku prognozy [liczba miejsc noclegowych/ km^2],

w_k - wskaźnik wzrostu ruchu dla k - tego roku prognozy wyliczony jak dla ruchu drogowego wg metody GDDKiA [8] opartej na wskaźniku zmian PKB, ($w_0 = 1$)

4. Prognoza potoków turystycznego ruchu rowerowego

W ramach Studium Wykonalności Projektu „Turystyczne trasy rowerowe w Polsce Wschodniej" dla każdego z województw i dla wybranego wcześniej korytarza trasy rowerowej opracowano po 3 wariantowe przebiegi trasy rowerowej oraz prognozy ruchu dla lat 2010 – 2035 wg wariantów.

Wariant 0 trasy rowerowej poprowadzono po istniejącej sieci drogowej[14]. Założono, że w wariancie tym nie będzie się prowadziło zadań inwestycyjnych w zakresie infrastruktury rowerowej, jak również nie nastąpi spodziewany wzrost turystycznego ruchu rowerowego spowodowany zwiększeniem bazy noclegowej i gastronomicznej, które wg przyjętych założeń są czynnikami generującymi potoki turystycznego ruchu rowerowego. W aspekcie prognostycznym ruch rowerowy wzdłuż wariantu na odcinkach miejskich i zamiejskich generowany jest przez zagospodarowanie przestrzenne. **Dla okresu prognozy wzrost ruchu rowerowe-**

13 Prognozy demograficzne (liczbę mieszkańców) na poziomie powiatów przyjęto wg danych Głównego Urzędu Statystycznego

14 Był to tzw. wariant odniesienia, dla którego wykonane prognozy ruchu wykorzystywane są w analizach efektywności ekonomicznej.

go spowodowany będzie wzrostem liczby mieszkańców (tereny zurbanizowane) oraz wzrostem średniorocznego dobowego ruchu samochodowego.

Warianty 1 i 2 są wariantami projektowymi inwestycyjnymi.

Wariant 1 trasy rowerowej tylko na bardzo krótkich odcinkach wykorzystuje drogi krajowe. Część trasy poprowadzono drogami leśnymi i polnymi, które zostały wskazane jako odcinki podstawowe w wyniku odbytych konsultacji społecznych.

Wariant 2 trasy rowerowej na odcinkach trasy, które stanowią swego rodzaju „objazdy' i są wydłużone w stosunku do przebiegu wg wariantu 1, ruch codzienny nie korzysta z tych odcinków i prowadzony jest najkrótszymi połączeniami. Ruch turystyczny, w szczególności jednodniowy, korzysta z tych odcinków.

W wariancie 1 i 2 ruch rowerowy w aspekcie prognostycznym jest wynikiem nakładania się na trasę ruchu turystycznego i ruchu codziennego.

Prognozy ruchu z uwzględnieniem prognoz wielkości potoku ruchu drogowego i jego struktury rodzajowej, z wyróżnieniem ruchu samochodowego, pojazdów ciężkich (samochody ciężarowe i autobusy) oraz rowerów wg analizowanych wariantów opracowano dla lat 2010 – 2035. Dla oszacowania wiarygodności przyjętego modelu wyniki prognozowanych potoków ruchu rowerowego dla roku 2010 dla wariantu 0 projektowanej trasy rowerowej porównano następnie z wynikami wykonanych pomiarów ruchu rowerowego oraz wybranych wyników pomiarów ruchu rowerowego wg generalnych pomiarów ruchu drogowego 2010. Wyniki porównania pokazały, że różnice między wielkościami oszacowanymi a pomierzonymi nie przekraczały 20 – 30 % w zależności od punktu pomiarowego, co potwierdza prawidłowość przyjętej metodyki prognoz.

Wielkość prognozowanych potoków ruchu rowerowego zależy od roku prognozy i liczby mieszkańców, a także zmian demograficznych (niekorzystnych) oraz wielkości bazy noclegowej. Np. w województwie podkarpackim prognozowane wielkości potoków ruchu rowerowego dla roku 2020, w zależności od wariantu, wynoszą od 16 – 47 r/d w mieście Narol, przez ok. 500 r/d w Radymnie do ok. 2800 – 3150 r/d w Rzeszowie. Szacowany rząd wielkości potoków ruchu rowerowego wskazuje, że nawet na wydzielonych ścieżkach i pasach dla rowerów na jezdni przepustowość tych urządzeń nie będzie przekroczona. Ocenia się, że na odcinkach, gdzie rowerzysta przemieszczać się będzie po jezdni, będą sprzyjające warunki do jazdy rowerem z punktu widzenia ruchowego.

Przewidywane, niekorzystne zmiany demograficzne w miastach i gminach usytuowanych wzdłuż planowanej Trasy Rowerowej, rekompensowane przez wzrost ruchu turystycznego, wskazują, że generalnie będzie obserwowany niemalże stały ruch rowerowy w województwie podkarpackim.

Na obszarach zamiejskich woj. podkarpackiego wielkości prognozowanego ruchu rowerowego, bez względu na wariant nie przekroczą 100 r/d w roku 2020. Wyniki otrzymanych prognoz wskazują, że w potoku ruchu rowerowego dominuje obecnie i taka tendencja utrzyma się również w najbliższej przyszłości – okres najbliższych 10 lat, ruch codzienny (szczególnie w miastach) oraz tury-

ści jednodniowi. Te grupy użytkowników stanowić będą ponad 94 % wszystkich przemieszczających się rowerami.

Prognozowane wielkości potoków ruchu samochodowego pozwoliły również na określenie możliwego usytuowania trasy rowerowej w przekroju drogowo – ulicznym oraz wyboru typu infrastruktury liniowej dla rowerów z punktu widzenia bezpieczeństwa ruchu rowerowego. Zgodnie z zaleceniami Europejskiej Federacji Cyklistów [4] przyjęto trzy poziomy natężeń ruchu samochodowego w funkcji, których zaproponowano formy rozwiązań infrastruktury rowerowej. Wg [4], gdy:

- SDR[15] < 1000 p/d – rower może być prowadzony na ogólnych zasadach w ruchu (typ A),
- 1000 < SDR < 3000 p/d - wydzielenie roweru z jezdni jest zalecane, bądź w wypadku gdy będzie niemożliwe, a warunki lokalne (odpowiednia szerokość jezdni) umożliwiają wprowadzenie rekomendowanych pasów dla rowerów lub wydzielonych pasów dla rowerów (typ B),
- SDR > 3000 p/d – rower powinien być wydzielony bezwzględnie z jezdni (typ C).

W ten sposób oszacowano długości i udział odcinków projektowanej Trasy rowerowej wg możliwości prowadzenia ruchu rowerowego i usytuowania infrastruktury dla rowerów w przekroju drogi oraz wg wariantów. Np. w województwie podkarpackim w wariancie rekomendowanym na zaledwie 12,1 % długości projektowanej trasy (54,9 km) ruch rowerowy będzie mógł być prowadzony po jezdni na zasadach ogólnych, natomiast na pozostałej długości ok. 400 km wydzielenie roweru z jezdni jest konieczne lub zalecane.

5. Wnioski

1) Przedstawiona metoda może być stosowana do oszacowania potoków turystycznego ruchu rowerowego w warunkach polskich. Horyzont czasowy prognozowania turystycznego ruchu rowerowego dla potrzeb oceny spodziewanych warunków ruchu, ze względu na jego dużą zmienność nie powinien przekraczać 10 lat. 25-cio letni horyzont czasowy dla potrzeb analiz ekonomiczno - finansowych należy uznać za mało wiarygodny, ze względu na duży stopień niepewności prognozowania turystycznego ruchu rowerowego.
2) Ze względu na stopień agregacji danych – gmina i powiat, uznaje się za nieuzasadnione prognozowanie turystycznego ruchu rowerowego w skali przestrzennej mniejszej niż gmina lub miasto.
3) Przedstawioną metodą prognostyczną oszacowano ruch rowerowy na trasach turystycznych, z uwzględnieniem odcinków wariantowych na długości ok. 4000 km. Prognozowane potoki ruchu rowerowego dla roku „0" porów-

15 SDR – średnie roczne dobowe natężenie ruchu [p/d]

nano następnie z wynikami wykonanych pomiarów ruchu samochodowego i rowerowego, z których wynika duża zgodność z opracowaną wcześniej prognozą. Wskazuje to, że przedstawiona powyżej metoda może być zastosowana do potrzeb modelowania i prognozowania turystycznego ruchu rowerowego w skali regionalnej (wojewódzkiej). Niemniej jednak, za celowe uważa się podjęcie prac badawczych nad modelowaniem turystycznego ruchu rowerowego w warunkach polskich, celem określenia czynników wpływających na generację, zasięg i rozkład przestrzenny turystycznych podróży rowerem.

Bibliografia

[1] Bello – Morales A. i Fonseca J.M., Manual para El planimiento, proyecto y ejecucion de pistas ciclistas, Association Espanola Permanente de los Congresos de Carreteras, Madrid, 1985.
[2] Cycling Expertise from Germany A-1/2010, German Institute of Urban Affairs (Difu) GmbH, Berlin, 2010.
[3] European Cycle Route Network Eurovelo. Directorate-General for Internal Policies Policy Department Structural and Cohesion Policies Commission of European Union, Brussels, 2009. www.ecf.com (V.2010).
[4] Give Cycling a Push Implementation Fact Sheet, Infrastructure, Presto, www.ecf.com
[5] Mazurek T., Kubalski J., Komunikacja miejska, WKiŁ, Warszawa, 1968.
[6] Recommendations for traffic provisions in built – up areas ASVV, Ede, 1999.
[7] Mobilitat In Deutschland 2002 – Fahrradverkehr, Bundesministerium fur Verkehr, Bau Und Stadtentwicklung, Berlin 2003.
[8] Pismo Dyrektora Departamentu Studiów GDDKiA do Scott Wilson Sp. z o.o., znak GDDKiA-DS.-WPR/4083/166/10 z lipca 2010r.
[9] Regionalwirtschaftliche Effekte des Radtourismus in Rheinland-Pfalz na zlecenie Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Landwirtschaft und Weinbau Rheinland-Pfalz przy wsparciu Federalnego Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung wykonanej przez Europejski Instytut Turystyki Uniwersytetu w Trier, Trier, 2007.
[10] Ruch rowerowy w Generalnym Pomiarze Ruchu 2005 STUDIUM, www.gddkia.gov.pl, (VI.2010).
[11] www.polskawschodnia.gov.pl/WstepDoFunduszyEuropejskich/Strony/program.aspx (X.2010) Program Operacyjny Rozwoju Polski Wschodniej, działanie V.2. Trasy Rowerowe w Polsce Wschodniej.
[12] Wykonanie analizy wariantowej dopuszczalnych przebiegów Trasy głównej „Trasy rowerowe w Polsce Wschodniej", Etap IIb, Województwo Pod-

karpackie Działanie V.2. „Trasy rowerowe" Program Operacyjny Rozwój Polski Wschodniej na lata 2007 – 2013" oś priorytetowa V: „Zrównoważony rozwój potencjału turystycznego opartego o warunki naturalne", Zamówienie Ministerstwa Rozwoju Regionalnego, M&G Consulting Marketing, Warszawa 2011.

[13] Zalewski A., Propozycja metody prognozowania turystycznego ruchu rowerowego w warunkach polskich, II Konferencja „Modelowanie i prognozowanie ruchu", Politechnika Krakowska i Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji RP, Monografie (Kraków 2010).

PRZEGLĄD LITERATURY NA TEMAT ZJAWISKA KONGESTII I ZAKŁÓCEŃ RUCHU W SYSTEMIE TRANSPORTOWYM MIASTA W ASPEKCIE MODELOWANIA PODRÓŻY[1]

Renata Żochowska
dr inż., Katedra Inżynierii Ruchu, Wydział Transportu, Politechnika Śląska, 40-019 Katowice, ul. Krasińskiego 8, tel. +48 32 603 4121, e-mail: renata.zochowska@polsl.pl

Grzegorz Karoń
dr inż., Katedra Inżynierii Ruchu, Wydział Transportu, Politechnika Śląska, 40-019 Katowice, ul. Krasińskiego 8, tel. +48 32 603 4159, e-mail: grzegorz.karon@polsl.pl

Streszczenie. *System transportowy podlega różnym zakłóceniom, których źródeł należy szukać zarówno w obszarze funkcjonalno-użytkowym (np. brak odpowiedniej efektywności w odniesieniu do wielkości popytu), w obszarze techniczno-eksploatacyjnym (np. roboty drogowe prowadzące do całkowitego lub częściowego zamknięcia elementów sieci), jak również w obszarze związanym z czynnikami losowymi (np. niekorzystne warunki atmosferyczne, działania terrorystyczne, wypadki i kolizje drogowe). Zdarzenia te prowadzą do zmniejszenia przepustowości elementów sieci transportowej oraz obniżenia poziomu swobody ruchu. W efekcie tego często powstaje zatłoczenie (kongestia) a wywołane nim straty czasu powodują spadek jakości przemieszczania. W artykule, na podstawie dostępnej literatury, przedstawiono przegląd i klasyfikację czynników wpływających na występowanie kongestii i zakłóceń w ruchu drogowym.*

Konsekwencje zakłóceń w sieci drogowej są znacznie szersze niż wzrost czasu podróżowania i powinny być rozpatrywane jako problem zredukowanej efektywności całego systemu transportowego w mieście. Proces powstawania ruchu w systemie transportowym opisywany jest często w postaci czterostopniowego (klasycznego) modelu podróży jako efekt sekwencyjnego podejmowania decyzji dotyczących potrzeb i czasu przemieszczania (transportu), wyboru miejsca docelowego, środka transportu oraz drogi przemieszczania. W takim ujęciu szeroki zakres oddziaływania zakłóceń wiąże się z koniecznością uwzględnienia ich wpływu na każdym z etapów procesu decyzyjnego.

Słowa kluczowe: *kongestia, zakłócenie, system transportowy, modelowanie podróży*

Wstęp

Złożoność procesu przemieszczania się osób i przewozu towarów w miejskiej sieci transportowej wynika zarówno z rozproszenia przestrzennego aktywności społecznej i gospodarczej, jak i nieliniowości charakterystyk ruchu, obejmującej również ich niestacjonarność i niejednorodność. Ponadto w miejskich systemach transportowych zróżnicowane potrzeby użytkowników konkurują w tym samym

1 Wkład autorów w publikację: Żochowska R. 50%, Karoń G. 50%

czasie o ograniczoną pojemność elementów sieci drogowej. Prowadzi to do zakłócenia stanu równowagi w sieci miejskiej[2], a w efekcie często do kongestii, której bezpośrednim skutkiem jest powstawanie znacznych kolejek, zatorów komunikacyjnych, a nawet zablokowanie części miasta dla ruchu. Zjawiska te z kolei mogą być bezpośrednią przyczyną obniżenia bezpieczeństwa, sprawności i efektywności podróżowania oraz wpływać negatywnie na środowisko i zdrowie mieszkańców. Zachwianie strukturalne sprawnego działania systemu transportowego w obszarze miejskim powoduje zakłócenia w funkcjonowaniu całej jednostki osadniczej jako systemu.

Przyczyny powstawania kongestii cyklicznej i przypadkowej

Kongestia jest definiowana w różny sposób. Samo pojęcie **kongestii** należy rozumieć jako sytuację, w której większa liczba nabywców ubiega się o pewne dobro, które nie może być dostarczone w formie oddzielnych jednostek [14, 41]. Istotą kongestii jest wzajemne oddziaływanie użytkowników na siebie powodujące negatywne skutki eksploatacyjne i ekonomiczne. Z eksploatacyjnego punktu widzenia **kongestia transportowa** oznacza różnicę w kosztach zasobów między siecią drogową, funkcjonującą w warunkach rzeczywistych a siecią eksploatowaną w warunkach idealnych, gdzie nie występują straty czasu a ruch odbywa się z maksymalnie bezpieczną prędkością [34]. Kongestię transportową definiuje się również jako wzajemne utrudnianie ruchu przez pojazdy, będące konsekwencją obiektywnej zależności między prędkością przemieszczania się a wielkością przepływu, w warunkach, gdy stopień wykorzystania pojemności systemu transportowego zbliża się do wartości granicznych [13].

Specyficzne mechanizmy związane z powstawaniem kongestii w sieci transportowej różnią się w zależności od klasy drogi. Kongestia na odcinkach umożliwiających nieprzerwany potok ruchu (np. autostrady, drogi ekspresowe), nie pojawia się w ten sam sposób i z tych samych przyczyn, co kongestia na odcinkach charakteryzujących się przerywanym potokiem ruchu, jak te zlokalizowane w gęstych sieciach miejskich.

Zakłócenia w sieci transportowej miasta można ogólnie podzielić na **typowe i nietypowe**.

Zakłócenia typowe wywołane są **nierównomiernością** popytu transportowego w czasie i przestrzeni i mają **charakter cykliczny** w określonym horyzoncie czasu. Bezpośrednim skutkiem zakłóceń wynikających ze zbyt dużego zapotrzebowania na transport, pojawiającego się w szczytach poszczególnych cykli (godzinowych, dobowych, tygodniowych, sezonowych, rocznych) w stosunku do ograniczonej przepustowości jest **kongestia cykliczna** (strukturalna) (ang. *recurring*

2 Według Tundys [42] osiągnięcie stałej równowagi w sieci miejskiej jest niemożliwe ze względu na nierównomierny rozwój poszczególnych elementów warunkujących sprawne funkcjonowanie miasta, prowadzący do sprzeczności i napięć wewnętrznych. W tym kontekście można mówić jedynie o równowadze przejściowej, po której następują okresy destabilizacji.

congestion, recurrent congestion) [15]. Jest ona konsekwencją czynników, które oddziałują regularnie lub okresowo na system transportowy. Innymi przyczynami tego typu kongestii może być także niedorozwój infrastruktury transportowej lub jej niewłaściwe zaprojektowanie, źle skonfigurowana sygnalizacja świetlna czy występowanie przejazdów kolejowych. Zjawisko kongestii cyklicznej jest szczególnie uciążliwe **w okresach szczytu ruchowego**, który w niektórych obszarach miasta może obejmować znaczny okres doby [22]. Kongestia cykliczna może również wykazywać duży stopień losowości, szczególnie z punktu widzenia czasu trwania i konsekwencji zakłóceń. **Zakłócenia typowe** są zazwyczaj charakterystyczne dla tych elementów sieci transportowej, gdzie przepustowość jest niewystarczająca dla zaspokojenia potrzeb transportowych. Miejsca takie charakteryzują się dużą podatnością na zakłócenia i stanowią tzw. „wąskie gardła" systemu. Przykład analizy warunków ruchu w całej sieci aglomeracji górnośląskiej (okres 2007-2008), z identyfikacją wąskiego gardła, oceną zmienności warunków ruchu i wywołanych zakłóceń, przedstawiono w [21, 23, 24].

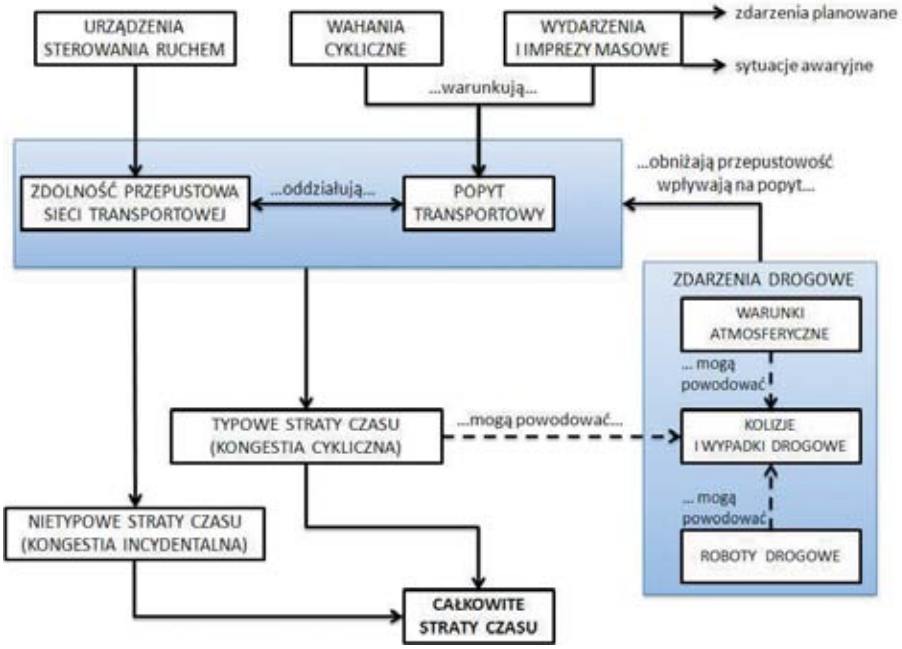
Nie wszystkie zakłócenia spowodowane są niewystarczającą zdolnością przepustową elementów sieci. **Zakłócenia nietypowe**, traktowane jako efekt szczególnych chwilowych warunków lub okoliczności, mogą być spowodowane występowaniem zdarzeń losowych (m.in. awariami urządzeń podziemnych lub awariami występującymi na obiektach komunikacyjnych), robotami inżynieryjnymi prowadzonymi w pasie drogi lub w bezpośrednim jej sąsiedztwie oraz imprezami, wymagającymi wprowadzenia odpowiedniej organizacji ruchu, ze względu na wykorzystanie jezdni lub gromadzenie dużej liczby osób w jednym obszarze. Przyczynami zakłóceń nietypowych mogą być również różnego rodzaju zdarzenia drogowe (np. wypadki, kolizje drogowe, wyciek oleju, itp.), niekorzystne warunki atmosferyczne (np. intensywne opady śniegu, powodzie, osuwiska skalne), chwilowy zły stan nawierzchni czy nawet ataki terrorystyczne. Zakłócenia nietypowe prowadzą do powstania **kongestii przypadkowej** (incydentalnej) (*random congestion, non-recurring congestion*) [15, 19]. Prawdopodobieństwo powstania i rozmiar kongestii, powstałej w wyniku zakłóceń nietypowych, są zróżnicowane w zależności od typu sieci i jej podatności na zakłócenia, związanej m.in. z efektywnością działań dotyczących zarządzaniem ryzykiem, właściwym planowaniem robót drogowych czy sprawnością w usuwaniu przeszkód w płynnym przemieszczaniu się pojazdów.

Podczas, gdy większość zakłóceń nietypowych wywołuje podobne negatywne konsekwencje dla ruchu drogowego, nie wszystkie z nich charakteryzują się jednakowym stopniem losowości, czy trudnościami we wcześniejszym ich przewidzeniu. Przykładowo, większość awarii ma charakter nieprzewidywalny ze swej natury, natomiast miejsca szczególnie niebezpieczne ze względu na występowanie kolizji i wypadków można zidentyfikować na podstawie analizy statystycznej, określonych parametrów geometryczno-ruchowych czy analizy wyposażenia w urządzenia zabezpieczenia ruchu. Podobnie, roboty drogowe mogą być zarządzane w taki sposób, aby zminimalizować ich wpływ na płynność ruchu, począwszy od prowadzenia prac w porze nocnej aż do całkowitej zmiany organizacji ruchu, ingerującej w geometrię skrzyżowania. W opracowaniu [37] przedstawiono wyniki badań

przepustowości skrzyżowania z sygnalizacją świetlną, na którym wprowadzono tymczasową nową organizację ruchu – z wyspą centralną. Zmiany związane były z pracami remontowymi torowiska tramwajowego, przecinającego skrzyżowanie. W czasie robót wybudowano wyspę centralną, co wiązało się z koniecznością zmiany organizacji ruchu oraz programu sygnalizacji świetlnej. Rozwiązanie to okazało się bardzo dobre, ponieważ warunki ruchu nie uległy pogorszeniu. Co więcej, przeprowadzone obliczenia wykazały, że sprawność ruchu w tym miejscu wzrosła. Wskazują na to między innymi wybrane miary jakościowe i ilościowe warunków ruchu (większa o ok. 16,5% wartość przepustowości, niższy stopień obciążenia skrzyżowania, mniejsze (prawie trzykrotnie) globalne straty czasu na skrzyżowaniu, poziom swobody ruchu (PSR) III, a nie IV, mniejsze wartości wskaźnika liczby zatrzymań i wskaźnika udziału pojazdów zatrzymanych).

Nawet z uciążliwymi warunkami atmosferycznymi, choć niemożliwymi do zmiany (przynajmniej na razie), można sobie lepiej radzić poprzez systemy aktywnego zarządzania prędkością i przygotowanie planów awaryjnych, które mogą znacznie zmniejszyć negatywny wpływ na ruch drogowy.

Sposób kształtowania się kongestii z punktu widzenia oddziaływania różnego rodzaju zakłóceń przedstawiono w raporcie [35] oraz na rysunku 1.



Rys. 1. Kształtowanie zakłóceń i związanych z nimi strat czasu w sieci drogowej
Źródło: Opracowanie na podstawie [35]

Reasumując, **zakłócenia typowe** są spowodowane **strukturalnym deficytem przepustowości** lub **wzrostem popytu transportowego**, podczas gdy źródłem **zakłóceń nietypowych** jest **incydentalny brak przepustowości** lub **nadwyżka**

popytu transportowego. Warto zauważyć, że nawet w przypadku kongestii typowej, charakterystyki ruchu mogą się zmieniać w kolejnych dniach, prowadząc do niepewności w precyzyjnym określeniu miejsca i momentu tworzenia się i zanikania kolejek pojazdów oraz szacowaniu wielkości czasu traconego w zatorze komunikacyjnym[3]. Stąd głównym czynnikiem przy analizie wpływu kongestii na zachowania podróżnych, oprócz strat czasu wynikających z wydłużenia czasu przemieszczania, jest niezawodność lokalizacji kolejki, czasu jej trwania i momentu rozpoczęcia [30].

3. Źródła zakłóceń w sieci transportowej miasta

W gęstych sieciach transportowych zlokalizowanych w obszarach miejskich istnieje wiele źródeł zakłóceń, które nierzadko występują łącznie, przyczyniając się do powstawania kongestii. **Stąd często niemożliwe jest wskazanie jednej zasadniczej przyczyny problemów komunikacyjnych, czy ustalenia ich hierarchii**. Według [35] wyróżniono siedem podstawowych **źródeł zakłóceń** prowadzących do kongestii w sieci drogowej[4], tj:

- **ograniczona przepustowość elementów sieci** – zależna od wielu czynników, np. w odniesieniu do odcinków - liczby jezdni, liczby pasów ruchu oraz ich szerokości, obecności pobocza i jego szerokości; w odniesieniu do skrzyżowań – geometrii i sposobu organizacji ruchu; w odniesieniu do sieci – charakterystyki miejsc niekorzystnych z punktu widzenia płynności ruchu, tj. punktów poboru opłat, punktów kontroli pojazdów, miejsc zwężeń i innych,
- **zdarzenia drogowe** – kolizje, wypadki i awarie pojazdów oraz inne sytuacje, mające miejsce na jezdni oraz poza nią (np. zdarzenia na poboczu, incydenty w obszarze widoczności kierowców, które mogą skutecznie odwrócić ich uwagę, powodując ograniczenie ich prędkości), w wyniku których dochodzi do utrudnień w ruchu,
- **roboty drogowe** – prowadzące często do reorganizacji ruchu, (np. ograniczenia liczby pasów lub ich przesunięcia, zmniejszenia szerokości pasów,

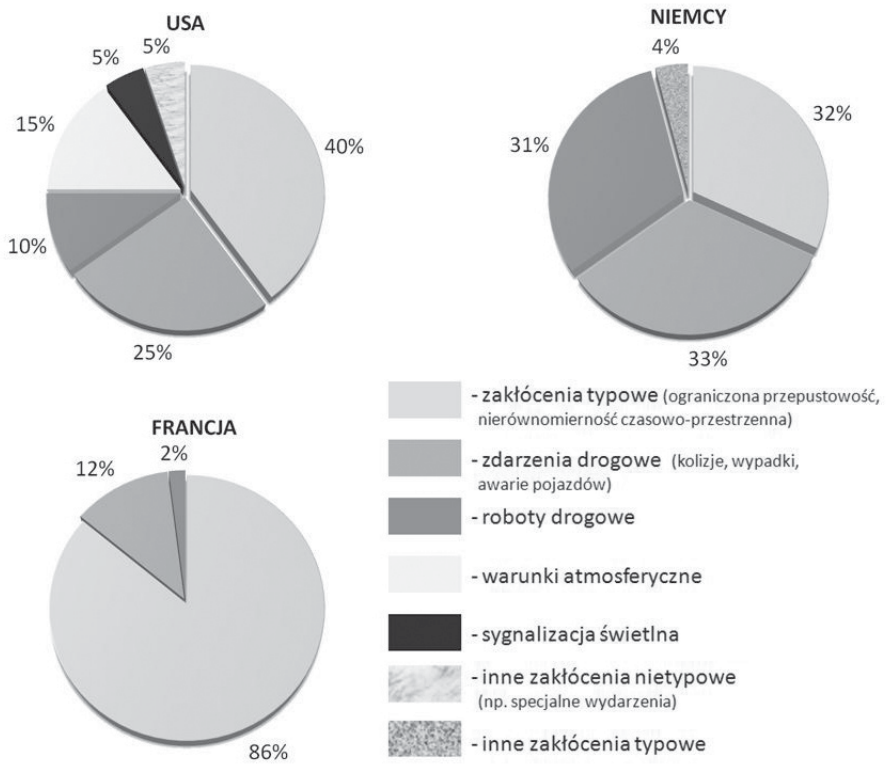
3 W wielu pracach podkreśla się, że dychotomia polegająca na uznaniu zakłóceń typowych jako przewidywalne, a nietypowych jako losowe nie jest prawdziwa [31]. Wyniki badań prowadzonych na poziomie mikroskopowym pokazują stochastyczny charakter zakłóceń typowych. Pomimo podobnego poziomu wielkości ruchu i gęstości, pomijając sytuacje związane z występowaniem czynników przypadkowych, podróżny na tym samym odcinku drogi w określonym momencie tego samego dnia tygodnia może doświadczać trzech różnych sytuacji: braku zatłoczenia, kongestii o niskim lub wysokim poziomie. Podobnie, pomimo oczekiwań podróżnego, który doświadczył wcześniej w określonym miejscu problemów zatłoczenia w okresie szczytu, czasami kolejki się nie pojawiają.

4 W raporcie [35] pogrupowano te czynniki na trzy zasadnicze kategorie:
- Grupa I – czynniki wpływające **na płynność ruchu pojazdów** (zdarzenia drogowe, roboty drogowe, warunki atmosferyczne),
- Grupa II – czynniki wpływające **na zmiany popytu** (nierównomierność czasowo-przestrzenna popytu, specjalne wydarzenia),
- Grupa III – czynniki stanowiące **fizyczne cechy infrastruktury** (ograniczona przepustowość elementów sieci, urządzenia regulacji ruchu).

usunięcia pobocza, skierowania ruchu na drogę objazdową, czasowego wyłączenia odcinka z ruchu), której efektem może być zwiększone ryzyko wypadku czy poziomu zatłoczenia,
- **warunki atmosferyczne** – prowadzące do zmiany zachowań kierowców, powodując zmniejszenie prędkości oraz zwiększenie odległości między pojazdami,
- **urządzenia regulacji ruchu** – niewłaściwie skonfigurowane programy sygnalizacyjne oraz nieprawidłowy dobór typu sygnalizacji, podobnie jak występowanie przejazdów kolejowych z rogatkami, zakłócają ruch, prowadząc do ograniczenia przepustowości i wahań czasu podróży,
- **wydarzenia i imprezy masowe** – imprezy sportowe, kulturalne, festyny oraz parady z okazji świąt narodowych prowadzące do nietypowego wzrostu ruchu w pobliżu miejsc, gdzie te wydarzenia się odbywają, powodując lokalne przeciążenie systemu transportowego,
- **nierównomierność czasowo-przestrzenna popytu** – wynikająca ze zmienności ruchu w poszczególnych dniach tygodnia w określonych relacjach (np. inny rozkład czasowy i przestrzenny ruchu w typowe dni robocze, w dni weekendowe oraz w dni „przejściowe" – piątek i poniedziałek) [22].

Źródła zakłóceń mogą być pojedyncze, jak również złożone, będące kombinacją poszczególnych typów. Stopień oddziaływania pomiędzy pojedynczymi rodzajami źródeł różni się znacznie zarówno w czasie (w poszczególnych okresach doby i dniach), jak i w przestrzeni (na poszczególnych elementach sieci). Jedne czynniki powodują powstawanie kolejnych. Przykładowo [35]:
- **nietypowo wysoka kongestia** może prowadzić do przeniesienia ruchu na inne drogi lub spowodować późniejszy wyjazd użytkowników, zmianę miejsc docelowych lub rezygnację z przemieszczenia,
- **wysoki poziom kongestii** może prowadzić do wzrostu liczby zdarzeń drogowych spowodowanych bliskością pojazdów w przestrzeni oraz przegrzewaniem pojazdów podczas miesięcy letnich,
- **złe warunki atmosferyczne** prowadzą do wypadków i kolizji drogowych,
- zakłócenia w ruchu i zachowania kierowców **zainicjowane przez zdarzenia drogowe** mogą prowadzić do wtórnych zdarzeń drogowych (np. awarie pojazdów).

Istnieje wiele różnorodnych sposobów grupowania czynników wpływających na ruch drogowy, co powoduje trudności w prowadzeniu analiz porównawczych dla różnych obszarów. Na rysunku 2 zamieszczono wyniki badań statystycznych prowadzonych w różnych krajach. Najbardziej szczegółowe analizy, z punktu widzenia przyczyn zakłóceń, prowadzone są w USA, najmniej szczegółowe – we Francji, gdzie wydzielono jedynie trzy grupy. W rozkładzie przyczyn zakłóceń występuje także znaczna różnorodność w poszczególnych krajach.



Rys. 2. Wyniki analiz przyczyn zakłóceń w różnych krajach
Źródło: Opracowanie na podstawie {31}

Inny podział czynników powodujących kongestię w miastach przedstawiono w publikacji [29] wydzielając czynniki bezpośrednie i pośrednie, zaprezentowane w tabeli 1. Jako uzupełnienie, w pracy [19] wskazano również **niekorzystne zachowania polskich kierowców**, tj.:

- zbyt mała dynamika przy opuszczaniu skrzyżowań wyposażonych w sygnalizację świetlną,
- blokowanie skrzyżowania poprzez wjeżdżanie na nie w sytuacji, gdy niemożliwe jest jego szybkie opuszczenie,
- wjeżdżanie na skrzyżowanie przy wyświetlaniu niewłaściwego sygnału,
- prowadzenie pojazdu z prędkością przekraczającą wartość dopuszczalną,
- brak kultury jazdy (m.in. uniemożliwianie tzw. „jazdy na suwak" przy zwężeniach dróg, blokowanie wyjazdu z dróg podporządkowanych),
- niedostateczna koncentracja na prowadzeniu pojazdu.

Tabela 1. Czynniki wpływające na kongestię w miastach według {29}

Czynniki bezpośrednie	strukturalne	- struktura przestrzenna obszaru, - układ i zdolność przepustowa sieci drogowej i pozostałych gałęzi transportu w odniesieniu do wielkości popytu.
	technologiczne	- stan techniczny sieci ulicznej, - sposób kontroli i zarządzania ruchem, - techniczne uwarunkowania funkcjonowania komunikacji miejskiej.
Czynniki pośrednie	społeczne	- poziom zamożności społeczeństwa, - model stylu życia, - świadomość negatywnych skutków eksploatacji samochodu.
	funkcjonalne	- stopień koncentracji i lokalizacja działalności gospodarczej aktywizującej społeczeństwo.
	geograficzne	- cechy topograficzne terenu, - gęstość zaludnienia, - budowa geologiczna podłoża.
	ekonomiczne	- wysokie koszty inwestycji transportowych.

Źródło: opracowanie własne na podstawie {19, 29}

Zakłócenia w ruchu drogowym mogą być wywołane przez **zdarzenia planowane i nieplanowane**. Do **zdarzeń planowanych** należy zaliczyć określone przedsięwzięcia związane z budową, utrzymaniem czy modernizacją składników infrastruktury drogowej oraz specjalne wydarzenia, których efektem jest częściowe lub całkowite zamknięcie elementu sieci transportowej [46, 47]. Zdarzenia te ujęte są w formie określonego harmonogramu robót drogowych zawierającego m.in. czas trwania zdarzenia oraz wariant organizacji ruchu w czasie jego realizacji. Odpowiednia organizacja zdarzeń planowanych oraz ich rozłożenie w czasie i przestrzeni może wpływać na minimalizację zakłóceń w gęstych sieciach miejskich. **Zdarzenia nieplanowane** nie są uwzględniane w harmonogramach. Mogą to być awarie elementów infrastruktury technicznej sieci oraz różnego rodzaju incydenty drogowe.

Zakłócenia mogą być klasyfikowane również w zależności od celu badania i związanych z tym kryteriów. Przykładowo biorąc pod uwagę **czas trwania** można wyróżnić zakłócenia **krótkoterminowe** (chwilowe) – odnoszone do godziny i mierzone w sekundach, **średnioterminowe** – odnoszone do doby i mierzone w minutach oraz **długoterminowe** – odnoszone do dłuższego horyzontu czasu i mierzone w dobach. W każdym przypadku wymagane są inne specyficzne rozwiązania organizacyjne związane z określonymi poziomami zarządzania.

Analizując stopień zajętości elementu sieci transportowej można wyodrębnić zakłócenia **punktowe i liniowe**. Przykładami zakłóceń punktowych mogą być m.in.: wypadki i kolizje drogowe czy też, potencjalnie, elementy sieci wyposażone w urządzenia regulacji ruchu np. skrzyżowania z sygnalizacją świetlną, przejazdy kolejowe itp. Zakłócenia liniowe wynikają z zajęcia części liniowego elementu infrastruktury drogowej spowodowanego m.in. prowadzeniem robót na dłuższym odcinku czy przemieszczaniu się większej grupy osób (np. pielgrzymki, demonstracje, kondukty pogrzebowe, większe zgromadzenia publiczne).

Z punktu widzenia zmienności lokalizacji zakłócenia w czasie można wyróżnić **zakłócenia stałe i ruchome**. Zakłócenia stałe zlokalizowane są w jednym miejscu w analizowanym przedziale czasu, natomiast lokalizacja zakłóceń ruchomych

zmienia się w analizowanym okresie. Przykładami mogą być np. roboty drogowe prowadzone na odcinku drogi (np. wymiana nawierzchni na pasie, odnawianie znaków poziomych, koszenie trawy na pasie rozdzielającym lub poboczu), których technologia wymaga stopniowego przesuwania zamkniętej części odcinka w ramach postępowania robót.

W pracy [36] na potrzeby badań **postrzegania warunków ruchu przez użytkowników** sieci miejskiej, wydzielono cztery grupy zakłóceń (**ruchowe, atmosferyczne, losowe, zaplanowane**), precyzując dokładnie przyczyny ich powstawania (tabela 2).

Tabela 2. Przyczyny powstawania zakłóceń według [36]

Zakłócenia ruchowe	Zakłócenia atmosferyczne	Zakłócenia losowe	Zakłócenia zaplanowane
– zwiększenie natężenia ruchu, – wzrost gęstości sieci w obszarach zurbanizowanych, – wpływ innych użytkowników dróg, – zły stan nawierzchni drogowej, – błędy w organizacji ruchu, – błędy w rozwiązaniach geometrycznych, – błędy w planowaniu i organizacji miejsc parkingowych, – czynnik ludzki.	– silne opady śniegu i deszczu, – gołoledź i zlodowacenie jezdni, – mgły, – silny wiatr, – ostre słońce i wysokie temperatury.	– wypadki i zdarzenia drogowe, – usterki systemów organizacji ruchu, – usterki pojazdów na drogach, – inne.	– zmiany w organizacji ruchu, – zwężenia jezdni na skutek wykonywanych robót drogowych, – budowa na środku jezdni konstrukcji zmniejszających prędkość jazdy.

Źródło: opracowanie własne na podstawie [36]

Według klasyfikacji zakłóceń [36], związanej z **postrzeganiem przez kierowców** płynności ruchu, **zakłócenia ruchowe** wynikają przede wszystkim z wzajemnego oddziaływania użytkowników jezdni, co ma miejsce zarówno w przypadku zwiększonego natężenia ruchu, jak też braku segregacji poszczególnych kategorii użytkowników systemu transportowego oraz nieumiejętnego lub niebezpiecznego prowadzenia pojazdu (np. brawura, łamanie przepisów ruchu drogowego, nieprzewidywalne zachowania). Ponadto obszary zurbanizowane charakteryzują się wyższym poziomem gęstości sieci, powodującym konieczność wykonywania większej liczby manewrów przez prowadzących pojazdy. W efekcie zwiększa się liczba punktów kolizji, w których płynność ruchu zostaje zakłócona. Nie bez znaczenia są również błędy popełniane przez jednostki zajmujące się planowaniem, projektowaniem czy bieżącym utrzymaniem elementów układu drogowego[5].

5 Należy tu wymienić m.in. nieprawidłowe rozmieszczenie miejsc parkingowych, ich niedostateczną liczbę lub organizację, niewłaściwe szerokości pasów ruchu, błędy popełniane przy projektowaniu drogi w planie oraz przekrojach podłużnych i poprzecznych, niewystarczająca widoczność drogi, nieodpowiednie oznakowanie poziome i pionowe, czy też parametry sterowania dobrane niezgodnie z bieżącą sytuacją drogową [36].

Zakłócenia atmosferyczne często powodują konieczność zmniejszenia prędkości, co może wpływać na pogorszenie warunków ruchu. Szczególnie uciążliwe dla kierowców podróżujących w pojazdach bez klimatyzacji mogą być wysokie temperatury występujące w sezonie letnim, prowadząc do zmęczenia i złego samopoczucia, co może być bezpośrednim powodem kolizji lub wypadków drogowych, których skutkiem są **zakłócenia losowe**. Inne zakłócenia tego typu wynikają głównie z awarii pojazdów oraz urządzeń regulujących ruch np. sygnalizacja świetlna, znaki i tablice zmiennej treści.

Specyficzną grupę wśród **zaplanowanych zakłóceń** oprócz zakłóceń, które spowodowane są zmianami w organizacji ruchu czy też całkowitym lub częściowym ograniczeniem przekroju drogi na skutek robót drogowych czy imprez masowych, stanowią zakłócenia wynikające z umieszczenia w przekroju jezdni **urządzeń uspokojenia ruchu**[6]. Rozwiązania takie stosuje się głównie w miejscach o dużym natężeniu ruchu pieszego i rowerowego, gdyż właśnie ten ruch jest najbardziej narażony na ujemne skutki ruchu kołowego. Wprowadzenie odpowiednich rozwiązań uspokojenia ruchu ma na celu zarówno poprawę brd, jak i uporządkowanie przestrzeni ruchu, poprawę krajobrazu, warunków środowiskowych oraz ułatwienie komunikacji wewnętrznej. Cele te realizowane są m.in. poprzez redukcję prędkości w obszarach zurbanizowanych, którą można uzyskać poprzez stworzenie takiego środowiska drogowego, które uniemożliwi lub znacznie utrudni jazdę z nadmierną prędkością [6].

Syntetyczne podejście do przyczyn zakłóceń przedstawiono również w pracy [17], dzieląc czynniki zakłócające funkcjonowanie systemu transportowego na trzy grupy[7] (rys. 3):

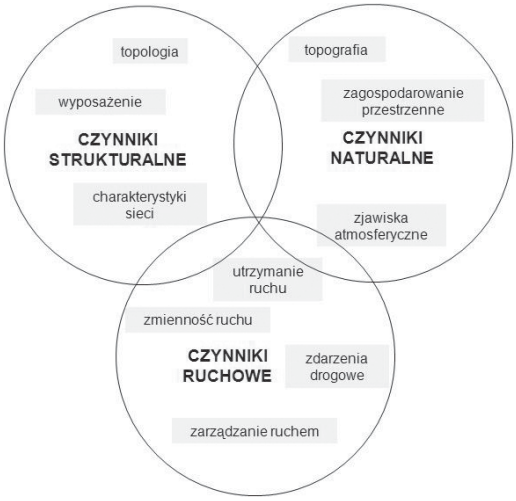
- **strukturalne** – odnoszące się do topologii, wyposażenia i charakterystyk sieci,
- **naturalne** – odnoszące się do topografii i zagospodarowania przestrzennego obszaru oraz zjawisk atmosferycznych,
- **ruchowe** – odnoszące się do zmienności ruchu, sposobów zarządzania i utrzymania ruchu oraz zdarzeń drogowych.

Czynniki te rzadko występują pojedynczo – zakłócenia często wywoływane są przez kilka czynników (również należących do różnych grup[8]) jednocześnie.

6 **Uspokojenie ruchu** polega na odpowiednim kształtowaniu środowiska drogowego za pomocą środków planistycznych i inżynieryjnych, celem osiągnięcia kompleksowego efektu poprawy bezpieczeństwa ruchu, zmniejszenia uciążliwości transportu i polepszenia przestrzeni publicznej w obszarach zabudowanych. Cele te uzyskuje się poprzez spowodowanie pożądanych zachowań uczestników ruchu i zapobieganie zachowaniom niepożądanym [6].

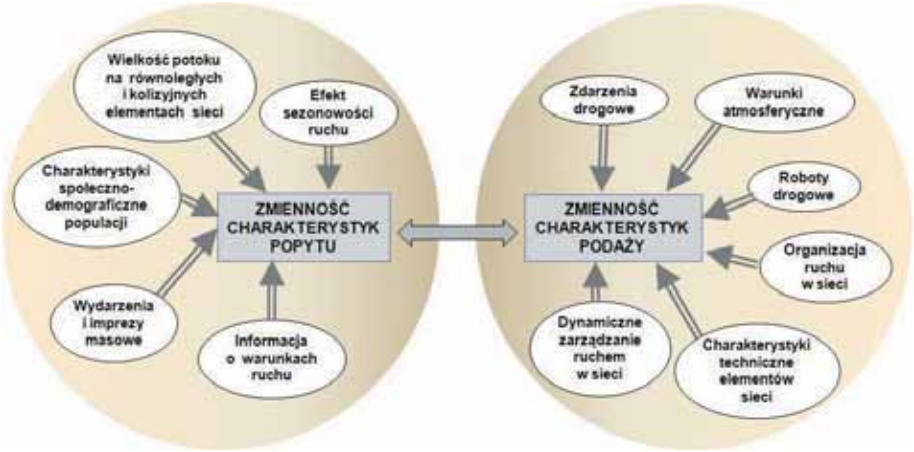
7 W pracy [18] zasugerowano wprowadzenie czwartej grupy czynników obejmującej zamierzone działania terrorystyczne.

8 Przykładem mogą być roboty w obszarze drogi prowadzone podczas niekorzystnych warunków pogodowych.



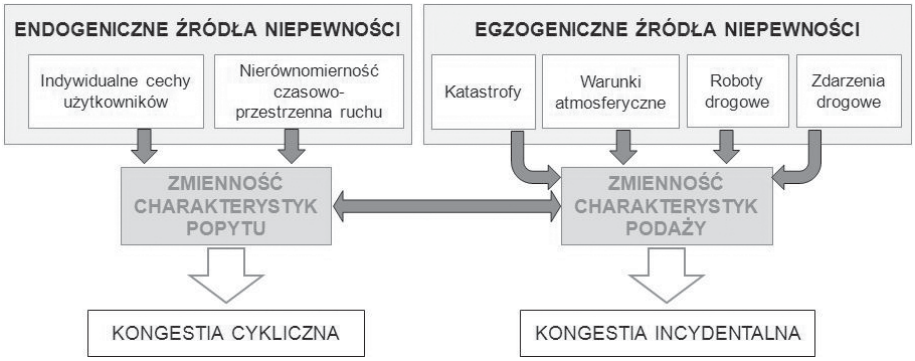
Rys. 3. Syntetyczne ujęcie przyczyn zakłóceń w sieci drogowej
Źródło: opracowanie własne na podstawie {17}

Jeszcze inne ujęcie przyczyn zakłóceń, dla potrzeb analizy niepewności w sieci drogowej i niezawodności czasu podróży, przedstawiono w pracy [44]. Źródła zakłóceń rozpatrywane są zarówno z punktu widzenia wpływu na zmienność charakterystyk popytu, jak i podaży. Dla potrzeb dalszych badań w tym zakresie w pracy [12] dokonano zmian przy określeniu czynników wpływających na zakłócenia, zarówno z punktu widzenia podaży, jak i popytu. Na rysunku 4 przedstawiono schemat uwzględniający wszystkie źródła zakłóceń zamieszczone w obu publikacjach.



Rys. 4. Źródła zakłóceń w sieci drogowej jako źródła niepewności
Źródło: opracowanie własne na podstawie {12, 44}

W pracy [28] dokonano kolejnej modyfikacji takiego podejścia. Czynniki wpływające na zmienność popytu i wywołujące kongestię cykliczną traktowane są jako **endogeniczne źródła niepewności**. Natomiast czynniki związane ze zmiennością podaży, prowadzące najczęściej do ograniczenia zdolności przepustowej różnych elementów sieci transportowej, a w konsekwencji do kongestii incydentalnej, to **egzogeniczne źródła niepewności**. W tym podejściu podkreślono również wzajemne oddziaływanie pomiędzy zmiennością charakterystyk popytu i podaży (rys. 5). Przykładowo, niekorzystne warunki atmosferyczne mogą spowodować ograniczenie przepustowości niektórych elementów sieci, co jednocześnie może wpłynąć na zmianę struktury czasowo-przestrzennej popytu[9].



Rys. 5. Źródła zakłóceń w sieci drogowej jako endogeniczne i egzogeniczne źródła niepewności
Źródło: opracowanie własne na podstawie [28]

Szersze ujęcie przyczyn zakłóceń przedstawiono w pracy [31], dzieląc czynniki wpływające na kształtowanie się kongestii na trzy główne grupy:

- **czynniki na poziomie mikroskopowym** – odnoszące się do ruchu na drodze,
- **czynniki na poziomie makroskopowym** – odnoszące się do popytu na korzystanie z dróg,
- **czynniki zewnętrzne** – odnoszące się do struktury aktywności, struktury sieci drogowej i jej charakterystyk oraz czynników losowych (np. warunki atmosferyczne, widoczność), które mogą odegrać ważną rolę w wystąpieniu zatłoczenia.

Na rysunku 6 przedstawiono wzajemne powiązanie tych czynników oraz ich wpływ na zachowanie użytkowników, które z kolei na zasadzie sprzężenia oddziałuje na system transportowy miasta.

9 Część podróżnych może zmienić drogę lub miejsce docelowe, a nawet odłożyć realizację przemieszczania w czasie.

Rys. 6. Czynniki wpływające na zakłócenia ruchu drogowego w ujęciu makro i mikroskopowym
Źródło: opracowanie na podstawie {7, 31}

Na podstawie rysunku 6 można wysnuć następujące wnioski:

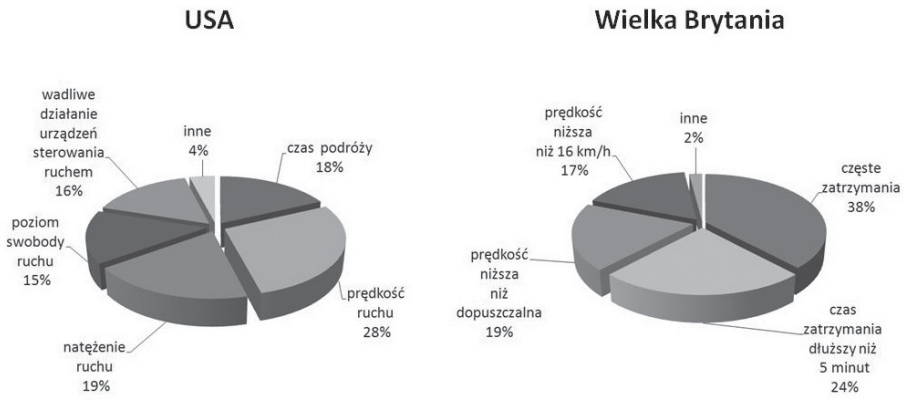
- **struktura aktywności**, kształtowana przez zagospodarowanie przestrzenne obszaru oraz czynniki o charakterze demograficznym, społecznym i ekonomicznym, ma wpływ na zachowania komunikacyjne użytkowników, zarówno gospodarstw domowych, jak i firm,
- **zachowania komunikacyjne** z kolei powodują powstawanie popytu o określonej strukturze i wielkości (poziomie), którego propagacja następuje w czasie i przestrzeni,
- **wielkość i struktura popytu** prowadzi zarówno do ustalenia ogólnego poziomu ruchu w sieci drogowej, jak i występowania specyficznych niejednorodnych potoków pojazdów (i kierowców) na pojedynczych odcinkach sieci drogowej, rozpatrywanych na poziomie mikroskopowym; na tym poziomie dynamiczna zdolność przepustowa jest kształtowana przez szereg oddziaływań (np. różnorodność typów i długości pojazdów, prędkości podróży, struktury wjazdów i wyjazdów, podłączeń pasów, interakcji pomiędzy kolejnymi pojazdami, jak również warunków atmosferycznych i struktury sieci drogowej),
- kiedy wielkość potoku ruchu przekracza **dynamicznie kształtowaną zdolność przepustową** określonego odcinka sieci, pojawia się kongestia a następnie jej propagacja na dalsze fragmenty sieci transportowej,
- **sprzężenie zwrotne** następuje, gdy użytkownicy, na podstawie wcześniejszych doświadczeń lub uzyskanej informacji, dostosowują odpowiednio swoje zachowanie do warunków ruchu; w ujęciu długoterminowym kongestia

może prowadzić do zmiany w strukturze aktywności, które z kolei wpływają na zachowania komunikacyjne, strukturę popytu, itd.

Schemat zamieszczony na rysunku 6 uzasadnia potrzebę opracowania strategii wielokryterialnego zarządzania kongestią. Strategie zarządzania ruchem, koncentrujące się na poziomie mikroskopowym, mają ostatecznie ograniczony wpływ, jeżeli strategia zarządzania kongestią nie obejmie również czynników przyczyniających się do jej pojawienia na poziomie makroskopowym i czynników zewnętrznych [31]. Ponadto kongestia powinna być rozpatrywana zarówno z punktu widzenia efektywności sieci i całego systemu transportowego, jak i percepcji jego użytkowników. Odpowiada to opisywanym w wielu publikacjach modelom normatywnym i opisowym ruchu (np. [20, 25, 39]).

Zakłócenie powinno się rozpatrywać w odniesieniu do określonego **stanu bazowego**. W ujęciu dynamicznym można ustalać stan bazowy dla każdego przedziału czasu (przy określonych odchyleniach), a następnie porównywać stan aktualny ze stanem bazowym. Ustalenie tego stanu może odbywać się na poziomie mikro, mezo lub makroskopowym.

Samo określenie stanu bazowego jest istotnym problemem z punktu widzenia oceny rozmiaru zakłóceń oraz kosztów z tym związanych. Według amerykańskiej definicji [4] kongestia pojawia się, kiedy wydajność systemu transportowego nie jest już akceptowalna ze względu na zakłócenia ruchu. Stąd poziom bazowy sprowadzony jest do poziomu **akceptowalnej efektywności systemu**, który zależy od rodzaju obiektu transportowego, lokalizacji geograficznej oraz pory dnia [27]. Ustalenie tego poziomu jest o tyle trudne, że powinno uwzględniać różne wyobrażenia i oczekiwania użytkowników, które mają charakter subiektywny. Na rysunku 7 zaprezentowano wyniki badań, przeprowadzonych za pośrednictwem Internetu wśród specjalistów z dziedziny transportu i w środowiskach akademickich w Stanach Zjednoczonych, na temat **definiowania kongestii** w obszarach metropolitarnych [4]. Dla porównania zamieszczono również wyniki podobnych badań przeprowadzonych w Wielkiej Brytanii [43].



Rys. 7. Postrzeganie kongestii przez respondentów
Źródło: opracowane na podstawie [4, 43]

Jak pokazano na rysunku 7, zarówno respondenci w USA, jak i Wielkiej Brytanii, wskazywali czas, prędkość, natężenie ruchu, poziom swobody ruchu oraz wady urządzeń sterowania ruchem (rozumiane jako sytuację, w której czas rozładowania kolejki jest dłuższy niż jeden cykl), jako podstawowe zmienne, za pomocą których można zdefiniować kongestię. Jako miary poziomu swobody ruchu podawano m.in. stopień obciążenia, gęstość ruchu, straty czasu oraz liczbę zatrzymań. Większość odpowiedzi zawiera komponent czasowy, co oznacza, że zmienne takie jak: czas podróży, prędkość, wady urządzeń sterowania ruchem oraz poziom swobody ruchu związane są z tym, że użytkownicy doświadczają wydłużenia czasu podróży z powodu kongestii.

Potwierdzono to na konferencji [31], gdzie stwierdzono, że nie istnieje uniwersalna definicja kongestii. Ciągłe przeszkody w dążeniu do spełnienia oczekiwań użytkowników ruchu czyni sformułowanie ilościowej definicji kongestii zadaniem trudnym, jeśli nie niemożliwym. W związku z tym **kongestia powinna być traktowana przede wszystkim jako zjawisko względne, które związane jest z różnicą pomiędzy efektywnością układu drogowego, oczekiwaną przez użytkowników a sposobem, w jaki układ ten funkcjonuje** [31]. W takim ujęciu można ją rozpatrywać w kontekście luki jakościowej pomiędzy jakością oczekiwaną a realizowaną [38]. Oczekiwania użytkowników, dotyczące wydajności systemu drogowego, mają więc kluczowe znaczenie dla zrozumienia sposobu postrzegania kongestii. Te same poziomy swobody ruchu mogą być postrzegane, zarówno jako bardzo uciążliwe czy nieakceptowalne, jak i zadowalające, w zależności od cech użytkowników drogi, takich jak: wiek, doświadczenie w prowadzeniu pojazdu, temperamentu, i innych. Dalsze czynniki mogą zależeć od celu podróży oraz znajomości sieci przez podróżnych.

Oczekiwania użytkowników w odniesieniu do warunków podróży nie są statyczne i charakteryzują się znaczną heterogenicznością, co wpływa na sposób postrzegania kongestii [31]. **Pewien poziom zakłócenia w obszarach miejskich jesteśmy w stanie zaakceptować**. Potwierdzają to wyniki badań [36], które wskazują, że 26% użytkowników transportu indywidualnego w Aglomeracji Górnośląskiej postrzega **ruch płynny**, jako w ogóle możliwość przemieszczania się w sieci objętej kongestią. Można zaryzykować stwierdzenie, że kierowcy ci przyzwyczaili się już do poruszania się w sieciach zatłoczonych, co powoduje obniżenie wymaganego poziomu jakości ruchu[10]. W związku z tym Autorzy rozróżniają dwa typy ruchu płynnego: **swobodny**[11], charakteryzujący się możliwością wyboru prędkości niezależnym od innych użytkowników ruchu, oraz **wymuszony**, w którym pojazdy przemieszczają się ze stałą, akceptowalną prędkością, jednak jest ona ściśle zdeterminowana aktualnymi warunkami ruchu.

10 W publikacjach amerykańskich do opisu tej sytuacji stosuje się pojęcie **akceptowalnej kongestii** (ang. *acceptable congestion*) [4]. Na tej podstawie można więc rozróżnić akceptowalną i nieakceptowalną kongestię.

11 W dłuższych horyzontach czasu ruch w gęstych sieciach miejskich, w przeciwieństwie do ruchu zamiejskiego, **nie może być traktowany jako swobodny ruch płynny**. Jedynie w krótkich przedziałach czasu w przypadku przemieszczania się pomiędzy węzłami sieci można mówić o chwilowej płynności ruchu.

4. Oddziaływanie zakłóceń na ruch drogowy i modelowanie podróży

Procesy ruchowe, zachodzące w sieci transportowej, są wynikiem odpowiednich **procesów decyzyjnych** użytkowników tej sieci. Zakłócenia w sieci miejskiej wpływają bezpośrednio na procesy ruchowe, kształtując określone warunki ruchu w sieci. Każdy z elementów sieci miejskiej może stanowić miejsce wspólnego funkcjonowania różnych podsystemów transportowych (np. system transportu indywidualnego, zbiorowego, ciężarowego). W związku z tym **efekty zakłóceń** występujących na tym elemencie mogą wpływać negatywnie na sprawne funkcjonowanie każdego z tych podsystemów.

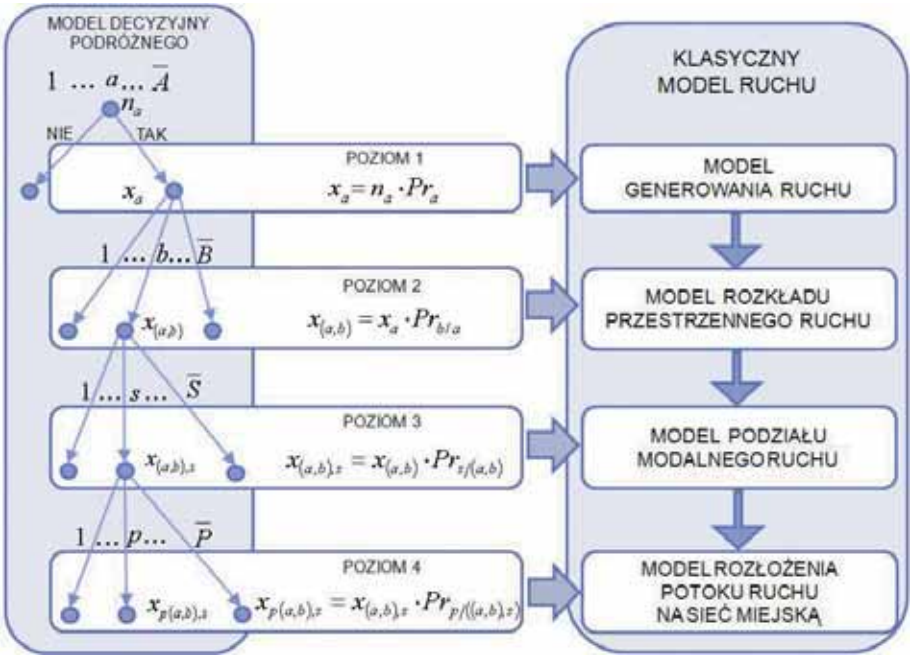
Ponadto pogarszające się warunki ruchu mogą powodować **zmianę zachowań komunikacyjnych**. Zmiana ta może obejmować zarówno wybór innego momentu rozpoczęcia podróży, ograniczenie jej długości lub całkowitą rezygnację z jej realizacji, jak również zmianę środka (podsystemu) transportu czy miejsca docelowego. Ze względu na tzw. czynnik ludzki oddziaływanie zakłóceń na oba procesy (decyzyjny i ruchowy) charakteryzuje się wysokim poziomem niepewności. Można mówić zarówno o bezpośrednim oddziaływaniu zakłóceń na oba procesy, jak i pośrednim (poprzez zakłócenie procesów decyzyjnych - na procesy ruchowe i odwrotnie: poprzez zakłócenie procesów ruchowych – na procesy decyzyjne).

Przy założeniu, że użytkownik sieci miejskiej zachowuje się w sposób racjonalny, proces decyzyjny może mieć **strukturę hierarchiczną**, w której wyróżnia się następujące poziomy [11, 32]:

- poziom 1 – podjęcie przez potencjalnego użytkownika sieci znajdującego się w miejscu początkowym a decyzji o rozpoczęciu przemieszczania w określonym celu (np. praca, nauka, rekreacja, zdrowie, inne) w danym momencie τ lub przedziale czasu t (np. godzina, doba)[12],
- poziom 2 – podjęcie decyzji o miejscu docelowym podróży b przez osobę, która dokonała określonego wyboru na poziomie 1,
- poziom 3 – podjęcie decyzji o środku transportu s przez podróżnego, który dokonał określonych wyborów na poziomie 1 i 2,
- poziom 4 – podjęcie decyzji o drodze przemieszczania p przez podróżnego, który dokonał określonych wyborów na trzech wcześniejszych poziomach.

Założenia te zostały wykorzystane w klasycznym czterostopniowym modelu stosowanym w planowaniu potoków ruchu w miastach [8, 33]. Na rysunku 8 przedstawiono strukturę hierarchiczną procesu decyzyjnego oraz jego powiązanie z modelem ruchu. Przez n_a oznaczono liczbę wszystkich potencjalnych podróżnych w miejscu źródłowym a, natomiast przez Pr_a, $Pr_{b/a}$, $Pr_{s/(a,b)}$ oraz $Pr_{p/((a,b),s)}$ - prawdopodobieństwa dokonania określonego wyboru na każdym z czterech poziomów procesu decyzyjnego.

12 Przesunięcie podróży w czasie traktowane jest jako rezygnacja z jej realizacji w analizowanym przedziale czasu.



Rys.8. Struktura hierarchiczna procesu decyzyjnego odwzorowanego modelem ruchu
Źródło: opracowanie własne

W przypadku zakłóceń ruchu podróżny może zareagować w jeden z następujących sposobów:

- rezygnacja z podróży (zmiana w procesie generowania podróży),
- przesunięcie podróży w czasie (zmiana w rozkładzie czasowym podróży),
- wybór innego miejsca docelowego (zmiana w rozkładzie przestrzennym podróży),
- wybór innego środka (podsystemu) transportu (zmiana w podziale modalnym),
- wybór innej drogi (zmiana w rozkładzie potoków ruchu na sieć transportową).

Jak wcześniej wspomniano, bezpośrednim efektem zakłócenia jest kongestia, która może być rozumiana jako sytuacje prowadzące do uciążliwości wynikających ze wspólnego użytkowania urządzeń lub jednoczesnego zgłaszania potrzeby obsługi [25]. Ze względu na miejsce powstawania można wyodrębnić dwa typy kongestii [9]:

- kongestię na sieci transportowej[13], w której można wyróżnić:

13 Kongestia tego typu nazywana jest również **kongestią ruchową** i określana jako „sytuacje, prowadzące do strat czasu wynikających ze wspólnego użytkowania (…) składnika sieci transportowej przez wiele pojazdów tworzących potok ruchu" [25].

  - kongestię na liniach – oddziałującą bezpośrednio na pojazdy (jej skutki są odczuwalne przez właścicieli pojazdów i ładunków, kierowców i pasażerów),
  - kongestię w punktach transportowych – oddziałującą bezpośrednio zarówno na pojazdy, jak i ładunki i pasażerów,
- kongestię w środkach transportu – wpływającą bezpośrednio na pasażerów i ładunki[14].

W gęstych sieciach miejskich miejscem powstawania problemów komunikacyjnych są głównie **skrzyżowania**, których przepustowość jest znacznie mniejsza niż przepustowość ciągów komunikacyjnych, na których występują. W efekcie zatłoczenia powstają kolejki pojazdów na wlotach takich skrzyżowań, a kongestia w nich powstająca nazywana jest **kongestią pierwotną**. Stąd zakłócenia przenoszone są na odcinki między skrzyżowaniami i dalej na inne elementy sieci transportowej, prowadząc do zatorów komunikacyjnych[15]. Potok ruchu, omijając odcinek krytyczny kieruje się w inne obszary sieci drogowej, powodując tam również przekroczenie przepustowości. Natomiast w otoczeniu „wąskiego gardła" kolejki powstające na wlotach, szczególnie w sieciach gęstych, zaczynają tamować i blokować ruch na odcinkach zbiegających się w tym węźle a następnie w węzłach sąsiednich – w miejscach, które nie są „wąskimi gardłami", ale na skutek kongestii pierwotnej ulegają zatłoczeniu. W taki sposób powtsaje tzw. **kongestia wtórna**.

Według Vickrey'a[16] [45] można wyróżnić następujące formy kongestii:

- **pojedyncza interakcja** (*single interaction*) - zachodzi pomiędzy dwoma pojazdami, przemieszczającymi się na tyle blisko siebie, że aby uniknąć kolizji, prędkość jednego z nich zostaje niekorzystnie zmniejszona, powodując straty czasu,
- **wielokrotne interakcje** (*multiple interaction*) - mają miejsce pomiędzy wieloma pojazdami i zachodzą przy większym zatłoczeniu niż w przypadku pojedynczej interakcji, prowadząc do ogólnego zmniejszenia prędkości i wydłużenia czasu jazdy,
- **bottleneck** („wąskie gardło") - występuje w miejscu, gdzie przepustowość infrastruktury jest niższa niż na otaczających ją elementach sieci, powodując powstawanie zatorów w punkach lub na odcinkach sieci drogowej,
- **triggerneck** – powstaje, gdy „wąskie gardło" powoduje utrudnienia ruchu na odcinkach sieci przecinających się z fragmentem infrastruktury, na której występuje zator,

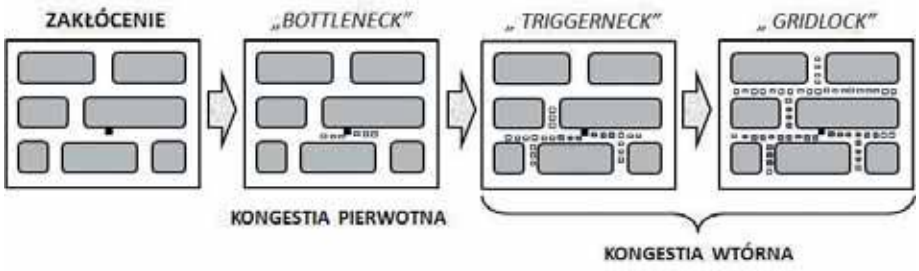
14 Przyczyną tego typu kongestii może być zarówno zatłoczenie występujące w sieci transportowej, jak i niedostosowanie częstotliwości kursowania pojazdów transportu publicznego i/lub ich pojemności do zgłaszanego popytu.

15 Szczególnym przypadkiem kongestii pierwotnej jest tzw. **kongestia węzłowa**, występująca w sytuacji, gdy skutkiem przekroczenia przepustowości skrzyżowania stanowiącego „wąskie gardło" jest zatrzymanie ruchu na wyodrębnionym obszarze przylegającym do tego skrzyżowania. Ten typ kongestii spotyka się często w krajach o wysokim poziomie motoryzacji.

16 William S. Vickrey w roku 1996 został (*wspólnie z Jamesem Mirrlessem)* uhonorowany nagrodą Nobla za *wybitny wkład w rozwój teorii działania w warunkach, gdy zdobycie pełnej informacji o rynku nie jest możliwe. Badania obu naukowców miały* fundamentalne znaczenie dla ekonomicznej teorii bodźców w warunkach asymetrii informacji.

- **powszechne zatłoczenie** (*general density*) - powstaje, gdy zatłoczenie na sieci korzystającej z danej gałęzi transportu (np.: transportu drogowego) zaczyna niekorzystnie oddziaływać na cały system transportowy w mieście, nawet gdy elementy infrastruktury poszczególnych gałęzi są wydzielone,
- kongestia **spowodowana działaniem urządzeń kontroli ruchu** (*network and control*) - specyficzna forma kongestii, spowodowana działaniem urządzeń regulacji ruchu.

Klasyfikacja ta w późniejszych latach została zmodyfikowana w oparciu o obserwację zatłoczenia w miastach i rozprzestrzenianie się zatorów komunikacyjnych. Na tej podstawie wyodrębniono jeszcze jeden typ kongestii określanej jako **gridlock**. Odpowiada on sytuacji, gdy na skutek wcześniejszego zatłoczenia (zwykle typu *bottleneck* lub *triggerneck*) dochodzi do zatrzymania ruchu w całej sieci odpowiadającej określonej gałęzi transportu w określonym obszarze miasta [10]. W związku z tym z punktu widzenia stopnia rozprzestrzeniania się zakłóceń w obrębie jednej gałęzi transportu[17] można wyróżnić trzy zasadnicze poziomy kongestii: **bottleneck**, **triggerneck** oraz **gridlock**, co przedstawiono schematycznie na rysunku 9.



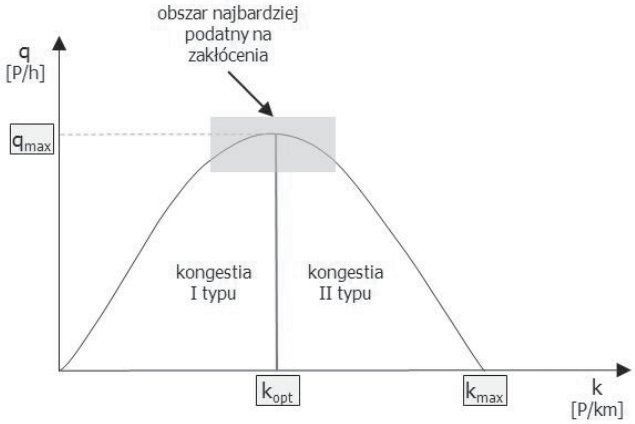
Rys. 9. Ewolucja kongestii w sieci miejskiej
Źródło: opracowanie własne na podstawie [41]

W ujęciu eksploatacyjnym opartym na krzywej zależności intensywności ruchu od jego gęstości można wydzielić dwa zasadnicze typy kongestii (rys. 10). Podstawą tego podejścia jest założenie, że intensywność ruchu jest zależna od prędkości, a każdy odcinek sieci ma ustaloną wartość przepustowości, odpowiadającą maksymalnej intensywności ruchu q_{max}. Wraz ze wzrostem liczby użytkowników drogi, rośnie również gęstość ruchu i równocześnie zwiększa się jego intensywność aż do osiągnięcia wartości maksymalnej q_{max}. Odpowiada to optymalnej wartości gęstości ruchu k_{opt}. **Kongestia I typu** może wystąpić w okresie wzrostu gęstości ruchu aż do osiągnięcia jej wartości optymalnej[18]. Dalsze zwiększanie liczby użytkowników

17 Oddziaływanie kongestii może być jeszcze szersze, np. może obejmować również inne gałęzie.

18 W praktyce stan optymalny z punktu widzenia kryterium techniczno-eksploatacyjnego określonego składnika infrastruktury odpowiadający maksymalnej wartości intensywności ruchu trudny jest do osiągnięcia i utrzymania. Wynika to z faktu, że przepustowość może być osiągnięta jedynie przy założeniu, że wszyscy użytkownicy poruszają się z jednakową ściśle ustaloną prędkością zachowując przy tym minimalne odstępy pomiędzy pojazdami oraz braku oddziaływania czynników zewnętrznych (np. warunki atmosferyczne, układ drogowy, wpływ innych użytkowników).

prowadzi do przekroczenia tej wartości, powodując nagłe i znaczne zmniejszenie intensywności ruchu i prędkości poruszania się pojazdów. Taki stan odpowiada **kongestii II typu**. Szczytową formą tego procesu jest całkowite zablokowanie danego odcinka drogi (intensywność spada do zera, a czas przejazdu rośnie do nieskończoności)[19].



Rys. 10. Zależność intensywności i gęstości ruchu z zaznaczeniem obszarów możliwego występowania kongestii I i II typu

Źródło: opracowanie na podstawie {2, 9, 19, 25, 41}

Z punktu widzenia płynnego przepływu potoku ruchu kongestia stanowi znaczną uciążliwość. W obszarach miejskich jest to spowodowane powszechnym występowaniem następujących sytuacji [35, 40]:

- zmniejszanie odległości między pojazdami wynikające z mniejszych prędkości, powodujące, że sieć transportowa jest szczególnie podatna na zaburzenia ruchu prowadzące do rozprzestrzeniania się tzw. „fali zaburzeniowej" i tworzenia kongestii wtórnej,
- duża liczba bodźców wizualnych wpływających na zachowanie kierowców (czynniki rozpraszające znajdujące się w zasięgu wzroku kierowcy, teoretycznie ograniczone możliwości przejazdu, wypadki drogowe, niekorzystne warunki pogodowe, nagłe zmiany w przekroju poprzecznym lub podłużnym drogi wymuszające zmianę prędkości),
- zamierzone ograniczenia w przepływie ruchu, wynikające z założeń organizacji i zarządzania ruchem,
- manewry związane ze zmianą pasa i kierunku ruchu.

Każde nieoczekiwane zakłócenie ruchu może wywoływać **nietypowe zachowania komunikacyjne** użytkowników sieci, wynikające z ich dezorientacji i podejmowania często nieracjonalnych decyzji. Zjawiska te mogą powodować zmianę

19 Stany bardzo silnej kongestii o charakterze przejściowym nazywane są **hiperkongestią** [1]. Przykładem takiej sytuacji mogą być nieplanowane zamknięcia tunelu zlokalizowanego pod rondem im. Gen. Jerzego Ziętka w Katowicach wywołane zdarzeniami losowymi, których bezpośrednim skutkiem są zaburzenia ruchu w całym układzie drogowym śródmieścia Katowic (dochodzące nawet do 3,5 km) [24].

przyjętego wcześniej planu działania [3]. Dla przykładu, w wyniku zbyt dużych strat czasu związanych z postojem w kolejce część kierowców jest skłonna zrezygnować z planowanej pierwotnie drogi przejazdu i wybrać drogę alternatywną. Rezygnacja ta może następować w różnych miejscach, np. w miejscu początku podróży w momencie wyjazdu (gdy kierowca posiada odpowiednią informację), poprzez wyłączenie się z potoku ruchu na jezdni głównej na jednym ze skrzyżowań, przez które przebiega kolejka pojazdów lub też na skrzyżowaniu, przez które aktualnie nie przebiega kolejka pojazdów, ale na wysokości którego kolejka pojazdów jest dobrze widoczna. Dopiero po pewnym **czasie adaptacji** do nowych warunków ruchu można mówić o nowym stanie równowagi [48].

Z punktu widzenia pojedynczego użytkownika sieci transportowej każde zakłócenie może wywołać odpowiedni **stan emocjonalny**, którego natężenie może być zróżnicowane. Przy znacznej liczbie zakłóceń i przeszkód w sprawnym przemieszczaniu się mogą pojawiać się znaczne trudności w organizacji właściwego sposobu zachowania, a w skrajnych przypadkach może dochodzić do całkowitej dezorganizacji [3].

Rolą transportu nie jest sama realizacja przemieszczenia, ale również spełnienie przy tym określonych warunków, które najogólniej można określić jako [26]:

- zapewnienie realizacji przemieszczenia w dokładnie określonym przedziale czasu,
- zapewnienie przyjazdu lub przywozu do dokładnie określonego miejsca docelowego,
- zapewnienie realizacji przemieszczenia dokładnie takim środkiem transportu, który najlepiej odpowiada podatności przewozowej towaru lub charakteryzuje się najmniejszą uciążliwości podróży z punktu widzenia określonego kryterium.

Każde zakłócenie w procesie transportowym może spowodować naruszenie tych uwarunkowań, a tym samym spadek poziomu jakości podróżowania. Stąd zasadne wydaje się przyjęcie odpowiedniego **poziomu zakłócenia**, odpowiadającego określonemu poziomowi strat jakości ruchu na skutek zakłócenia, po przekroczeniu którego skutki zakłóceń są odczuwalne. Poziom ten powinien być ściśle związany z warunkami ruchu, co oznacza, że należałoby rozpatrywać zakłócenie płynności ruchu na określonym poziomie. Indywidualni użytkownicy systemu transportowego w różny sposób reagują na zwiększone zatłoczenie na drodze i związane z tym zmniejszenie wiarygodności czasu podróży. W krótkiej perspektywie, można zmienić sposób podróżowania lub moment wyjazdu. W dłuższym horyzoncie czasu, zatory komunikacyjne mogą wpływać na decyzje dotyczące miejsca zamieszkania i pracy. Zakłócenia oddziałują również na sektor gospodarczy, powodując określone skutki nie tylko dla pojedynczych przedsiębiorstw, ale i całego regionu.

Specyficzną grupę zakłóceń stanowią **zjawiska atmosferyczne**. Opady śniegu i deszczu, silne wiatry oraz ekstremalne temperatury wpływają niekorzystnie na zachowania kierowców, funkcjonowanie pojazdów (np. stabilność, zwrotność), częściowe lub całkowite uszkodzenie nawierzchni a nawet zniszczenie całego elementu jezdnego infrastruktury. Często zjawiska atmosferyczne są przyczyną łań-

cucha zdarzeń prowadzącego do katastrofalnych skutków. Przykładowo silny wiatr poprzez naniesienie dużej ilości śniegu lub gruzu, a nawet powalenie drzew może spowodować zarówno całkowite zablokowanie odcinka drogi, jak i uszkodzenie pojazdu. Zjawiska atmosferyczne prowadzą więc do chwilowego ograniczenia przepustowości układu drogowego, pogarszając w ten sposób warunki ruchowe. Mogą temu towarzyszyć zmiany w sposobie zarządzania ruchem, co powoduje uciążliwość podróży, która w konsekwencji może wywołać zmianę zachowań komunikacyjnych. Badania przeprowadzone w Detroit [16] wykazały, że niekorzystne warunki atmosferyczne stanowiły jeden z głównych czynników w podejmowaniu decyzji o zmianie momentu rozpoczęcia podróży, ale znacznie mniejsze znaczenie miał ten czynnik w przypadku wyboru drogi przemieszczania. Wskazano również, że wrażliwość na informacje o pogodzie jest znacznie większa podczas szczytu porannego niż szczytu popołudniowego.

Warunki atmosferyczne mają również znaczny wpływ na bezpieczeństwo ruchu zarówno w sposób bezpośredni, jak i pośredni. W pracy [5] wskazuje się, że zjawiska pogodowe mogą wpływać w sposób pośredni na bezpieczeństwo ruchu drogowego poprzez m.in. podjęcie decyzji przez użytkownika o realizacji podróży, wybór środka transportu, widoczność drogi i innych użytkowników, kontakt pojazdu z drogą, zmiany behawioralne, np. bardziej ostrożny styl jazdy. Te czynniki mogą z kolei w sposób bezpośredni być przyczyną zdarzenia drogowego.

5. Podsumowanie

Przedstawione w artykule szerokie spektrum problemów, związanych z pojęciami zakłóceń i kongestii w transporcie, wskazuje na potrzebę podejścia systemowego w ich opisie i modelowaniu. Można stwierdzić, że zakłócenia w systemie transportowym występują od samego początku, głównie ze względu na to, że jest to system techniczno-ludzki. Jednak obecnie są one szczególnie dotkliwie odczuwalne przez użytkowników, głównie z powodu koncentracji (gęstości) potoków ruchu oraz dużego natężenia ruchu, osiągającego bardzo często stany nasycenia w elementach sieci transportowej występujących w obszarach zurbanizowanych. Takie stany obciążenia oraz przeciążenia sieci transportowej charakteryzują się minimalnymi wartościami rezerw przepustowości albo ich brakiem. Często rezerwy, które mogłyby skompensować skutki zakłóceń, są „uwięzione w sieci" (np. z powodu ograniczonej dostępności do drogi, wynikającej z jej klasy technicznej – kolejka pojazdów „uwięzionych" na drodze ekspresowej, przebiegającej przez aglomerację o gęstej sieci ulic i dróg miejskich). Bez znaczących i kompleksowych zmian w podziale modalnym, kształtowaniu odpowiednich zachowań komunikacyjnych, organizacji przewozów publicznym transportem zbiorowym, integracji systemów transportowych oraz sterowaniu i zarządzaniu ruchem na obszarze miejskim trudno będzie w istotny sposób złagodzić skutki zakłóceń, które są zarówno przyczyną, jak i skutkiem kongestii. Trudno będzie, nie tyle wyeliminować kon-

gestię, co nią sterować w taki sposób, aby minimalizować wielokryterialnie straty, jakie powoduje.

Literatura

[1] Arnott R., The Economic Theory of Urban Traffic Congestion: A Microscopic Research Agenda. CESifo Venice Summer Institute, Workshop on Environmental Economics and the Economics of Congestion: Coping with Externalities, Venice International University, San Servolo, 2001.
[2] Ashton W.D., The Theory of Road Traffic Flow. Wiley & Sons, New York, 1966.
[3] Bąk-Gajda D., Bąk J., Psychologia transportu i bezpieczeństwa ruchu drogowego. Wydawnictwo Difin SA, Warszawa, 2010.
[4] Bertini R., You are the Traffic Jam: An Examination of Congestion Measures. Proceedings of the 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, D.C., 2006.
[5] Bijleveld F., Churchill T., The influence of weather conditions on road safety. SWOV Institute for Road Safety Research, The Netherlands, 2009.
[6] Bohatkiewicz J., Biernacki S., Drach M., Kozłowski D., Nowak P., Zasady uspokajania ruchu na drogach za pomocą fizycznych środków technicznych. Biuro Ekspertyz i Projektów Budownictwa Komunikacyjnego „EKKOM" Sp. z o.o., opracowano na zlecenie Ministerstwa Infrastruktury, umowa nr TRD/1/2008 z dnia 05.02.2008.
[7] Bovy P., Hoogendoorn S., Ill-Predictability of Road Traffic Congestion. [in:] Bell M. and Cassir C. (eds.): Reliability of Transport Networks. Research Studies Press, Baldock, United Kingdom, 2000, pp. 43-53.
[8] Cascetta E., Transportation Systems Analysis. Models and Applications. 2nd Edition. Springer Optimization and Its Application, Vol.29. New York, 2009.
[9] Ciesielski M., Koszty kongestii transportowej w miastach. Zeszyty Naukowe – seria II, nr 87, Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Poznaniu, Poznań, 1986.
[10] Ciesielski M., Ekonomika infrastruktury transportowej. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Poznaniu, Poznań, 1992.
[11] Chen A., Yang C., Kongsomsaksakul S., Lee M., Network-based Accessibility Measures for Vulnerability Analysis of Degradable Transportation Networks. Networks and Spatial Economics, vol. 7, no. 3, 2007, pp.241-256.
[12] Chen A., Zhou Z., The α-reliable mean-excess traffic equilibrium model with stochastic travel times. Transportation Research Part B 44, 2010, pp.493-513.

[13] Dargay J.M., Goodwin P.B., Traffic Congestion in Europe. Introductory Report England. OECD Report, 1999.
[14] Gołembska E., Kompendium wiedzy o logistyce. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2002.
[15] Grant-Muller S., Laird J., Costs of Congestion: Literature based Review of Methodologies and Analytical Approaches. Scottish Executive Social Research, Institute for Transport Studies, University of Leeds, 2006.
[16] Hranac R., Sterzin E., Krechmer D., Rakha H., Farzaneh M., Empirical Studies on Traffic Flow in Inclement Weather. Publication No. FHWA-HOP-07-073, Cambridge Systematics, 2006. Zealand, 20-24 August 2004, pp.180-186.
[17] Husdal J., The vulnerability of road networks in a cost-benefit perspective. Proceedings of the Transportation Research Board Annual Meeting (TRB 2005), Washington D.C., USA, 9-13 January 2005.
[18] Igliński H., Ograniczanie poziomu kongestii transportowej a zrównoważony rozwój miast. Praca doktorska na Wydziale Gospodarki Międzynarodowej Uniwersytetu Ekonomicznego w Poznaniu, Poznań, 2009.
[19] Jacyna M., Modelowanie i ocena systemów transportowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
[20] Karoń G., Transport w logistycznym łańcuchu dostaw a zatłoczenie komunikacyjne miast i aglomeracji (w) Kowalska K., Markusik S. (red.): Sprawność i efektywność zarządzania łańcuchem dostaw. Wydawnictwo WSB w Dąbrowie Górniczej, s.101-129, Dąbrowa Górnicza 2011.
[21] Karoń, R. Janecki, A. Sobota z zespołem, Program inwestycyjny rozwoju trakcji szynowej na lata 2008 2011. Analiza ruchu, Praca NB, Wydział Transportu Politechniki Śl., Katowice 2009.
[22] Karoń G., Mikulski J., Transportation Systems Modelling as Planning, Organisation and Management for Solutions Created with ITS. In J. Mikulski (Ed.): Modern Transport Telematics, CCIS 239, pp. 277–290, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011.
[23] Krawiec S., Karoń G., Celiński I, Sobota A., Warunki ruchu w sieci drogowej konurbacji górnośląskiej w latach 2007-2008. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria TRANSPORT z. 66. Nr kol. 1825; s.43-56, Gliwice 2010.
[24] Leszczyński J., Modelowanie systemów i procesów transportowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
[25] Letkiewicz A., Gospodarowanie w transporcie samochodowym. Wybrane zagadnienia. Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk, 2006.
[26] Lomax T., Turner S., Shunk G., Quantifying Congestion. NCHRP Report **398**, National Academy Press, Washington D.C., 1997.
[27] Luathep P., Stochastic transport network model and optimization for reliability and vulnerability analysis. PhD Thesis, The Hong Kong Polytechnic University, Department of Civil and Structural Engineering, Hong Kong, 2011.

[28] Meyer B., Kongestia w transporcie zbiorowym. Transport Miejski, nr 7-8/1997, s.41-42.
[29] OECD: Traffic Congestion in Europe. OECD Report, 1999.
[30] OECD: Managing urban traffic congestion. European Conference of Ministers of Transport Report, OECD Publishing, Paris, 2007.
[31] Oppenheim N., Urban travel demand modeling. Wiley, New York, 1995.
[32] Ortuzar J., Willumsen L. G., Modelling transport. 3rd Edition. Wiley, New York, 2009.
[33] Pawłowska B., Zewnętrzne koszty transportu, problemy ekonomicznej wyceny. Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk, 2000.
[34] Report: Traffic Congestion and Reliability. Trends and Advanced Strategies for Congestion Mitigation. Final Report prepared for FHWA by Cambridge Systematics, Inc. with Texas Transportation Institute, September, 2005.
[35] Sobota A., Karoń G., Postrzeganie warunków ruchu miejskiego – płynność ruchu – wyniki badań. Zeszyty Naukowo – Techniczne SITK RP. Oddział w Krakowie. Kraków, 2009, s.215–234.
[36] Sobota A., Karoń G., Badanie przepustowości skrzyżowań w warunkach tymczasowej organizacji ruchu - Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria TRANSPORT, Gliwice 2012.
[37] Starowicz W., Jakość przewozów w miejskim transporcie zbiorowym, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2007.
[38] Steenbrink P., Optymalizacja sieci transportowych. WKiŁ, Warszawa 1978.
[39] Szołtysek J., Podstawy logistyki miejskiej. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Katowicach, Katowice, 2007.
[40] Szymczak M., Logistyka miejska. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Poznaniu, Poznań, 2008.
[41] Tundys B., Logistyka miejska – koncepcje, systemy, rozwiązania. Centrum Doradztwa i Informacji Difin sp. z o.o., Warszawa, 2008.
[42] UK: Perceptions of and Attitudes to Congestion. U.K. Department for Transport, 2002.
[43] Van Lint J.W.C., van Zuylen H.J., Tu H.J., Travel time unreliability on freeways: Why measures based on variance tell only half the story. Transportation Research Part A 42, 2008, pp.258-277.
[44] Vickrey W.S., Congestion Theory and Transport Investment. The American Economic Review. Vol.59, No.2. Papers and Proceedings of the Eighty-first Annual meeting of the American Economic Association, May 1969, pp.251-260.
[45] Żochowska R., Organizacja ruchu w czasie zamknięć drogowych. Materiały konferencyjne I Konferencji Naukowo-technicznej nt. „Systemy transportowe. Teoria i praktyka", Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z.47, Gliwice 2003.

[46] Żochowska R., Optymalizacja zamknięć ulic w złożonych sieciach transportowych. Praca doktorska na Wydziale Transportu Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2004.
[47] Żochowska R., Modelowanie zachowań podróżnych warunkach zamknięć ulic w gęstych sieciach miejskich. VI Międzynarodowa Konferencja „Systemy Logistyczne – teoria i praktyka" w Korytnicy, Logistyka 4/2012.

ZASTOSOWANIE MODELU CENA – CZAS DO SZACOWANIA PODZIAŁU ZADAŃ RZEWOZOWYCH W PODRÓŻACH MIĘDZYAGLOMERACYJNYCH

Andrzej Żurkowski
dr inż., Instytut Kolejnictwa, 04-275 Warszawa, ul. Chłopickiego 50, tel. +48 22 473 1300, e-mail: azurkowski@ikolej.pl

Streszczenie. *Model cena – czas stosowany jest przede wszystkim do modelowania podziału zadań przewozowych w korytarzach transportowych pomiędzy kolejami dużych prędkości (KDP), a lotnictwem. W artykule podjęto próbę jego zastosowania do oceny podziału modalnego w krajowych przewozach międzyaglomeracyjnych pomiędzy przewoźnikami kolejowymi a autobusowymi. W oparciu o przeprowadzone obliczenia dokonano oceny wpływu dwu podstawowych preferencji, czyli ceny i czasu na wybory dokonywane przez podróżnych oraz w konsekwencji na rozłożenie potoku w korytarzu transportowym wśród dwóch podstawowych przewoźników publicznych.*

Słowa kluczowe: *model „cena – czas", przewozy pasażerskie, transport lotniczy, transport kolejowy, transport autobusowy, podział zadań przewozowych*

1. Wprowadzenie

Przewozy międzyaglomeracyjne stanowią rozwijający się dynamicznie segment rynku pasażerskich usług transportowych. Rozpatrując układ osadniczy w Polsce, a w szczególności rozmieszczenie aglomeracji oraz innych największych miast, oddalonych od siebie o około 300 km jest oczywiste, że środkami transportu najlepiej predestynowanymi do realizacji takich przewozów są samochody osobowe, autobusy oraz pociągi. Wobec długich czasów przejazdu w niektórych relacjach, spowodowanych brakiem autostrad lub dróg szybkiego ruchu, kongestią ruchu drogowego lub niskimi prędkościami osiąganymi w transporcie szynowym, relatywnie duży udział w rynku takich przewozów mają także połączenia lotnicze.

W szeregu modeli związanych z prognozowaniem ruchu pomiędzy odległymi aglomeracjami przyjmuje się założenie, że początki i końce podróży znajdują się w ich centrach, utożsamianych na przykład z dworcami kolejowymi. Postępująca urbanizacja kraju, a w szczególności rozwój przestrzenny miast powoduje, że takie założenie okazuje się nadmiernym uproszczeniem.

W artykule rozpatrzono przykład korytarza Warszawa – Kraków próbując oszacować wpływ dostępności środków transportu (odwzorowanej czasem dojazdu do dworców kolejowych i autobusowych) z różnych dzielnic Warszawy na podział zadań przewozowych. Rozważania teoretyczne zobrazowano przykładem oblicze-

niowym wykorzystującym szacunkowe dane o wielkości przewozów w wybranych połączeniach kolejowych i autobusowych.

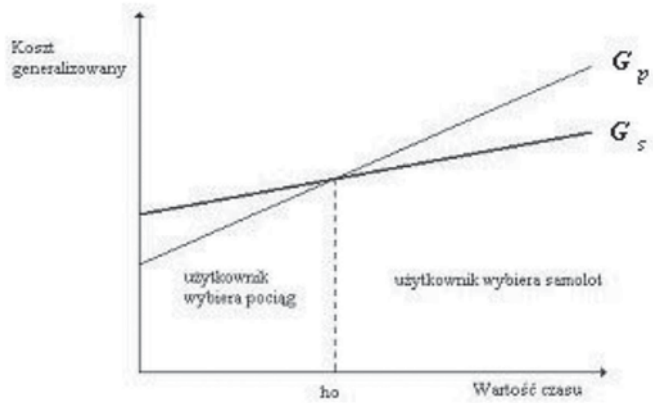
2. Podstawy teoretyczne modelu cena – czas

Model *cena – czas* służy do badania podziału modalnego w korytarzu transportowym, a jego podstawowym zastosowaniem jest ocena konkurencyjności Kolei Dużych Prędkości w stosunku do połączeń lotniczych [1, 2, 4, 6]. Zgodnie z nazwą w modelu tym przyjmuje się, że dwoma kluczowymi (i jedynymi) elementami wyboru środka transportu są *czas realizacji podróży* oraz jej *koszt*, powiązane formułą kosztu uogólnionego postaci:

$$G = c + h \cdot t \tag{1}$$

gdzie:
G – koszt generalizowany przejazdu pociągiem lub przelotu samolotem,
c – całkowita cena przejazdu lub przelotu,
h – jednostkowy koszt czasu podróżnego,
t – całkowity czas podróży.

Kluczowym elementem modelu cena–czas jest wartość h, czyli tzw. jednostkowy koszt czasu podróżnego (inaczej: *walor* albo *wartość czasu* podróżnego [2]). Jest to konkretna wartość (wyrażona na przykład w zł/h), jaką przypisuje on swojemu czasowi poświęcanemu na podróż[1]. W ten sposób pasażer wybiera ten środek transportu, z którym związany jest mniejszy koszt generalizowany G. Obrazują to wykresy na rysunku 1.



Rys. 1. Funkcje kosztu generalizowanego dla pociągu (G_p) oraz samolotu (G_s)

1 Ocena kosztu jednostkowego (wartości czasu) ma charakter indywidualny (zdezagregowany). Definicja przenosząca to pojęcie na pewną populację podróżnych (agregacja) jest następująca: jeżeli jedna godzina wydłużenia czasu podróży daje taki sam efekt w postaci zmniejszenia zapotrzebowania na przewozy, jak wzrost ceny biletu o h złotych, to h nazywamy wartością (walorem) czasu.

W rozważanej relacji istnieje wartość czasu h_0 (nazywana *obojętną*) taka, że $G_p = G_s$. Jeżeli zatem $h < h_0$ to oznacza, że użytkownik wybrał pociąg; w przeciwnym przypadku użytkownik wybrał samolot. Wartość h_0 wynika ze wzoru:

$$h_0 = \frac{c_s - c_p}{t_p - t_s} \tag{2}$$

gdzie:

c_s, c_p – odpowiednio: całkowita cena przelotu samolotem lub przejazdu pociągiem,

t_p, t_s – odpowiednio: całkowity czas podróży pociągiem samolotem.

Postać rozkładu wartości czasu h w populacji podróżujących w danej relacji nie jest zazwyczaj znana. Przyjmuje się zatem hipotezę, że jest ona taka sama (analogiczna) jak rozkład przychodów w społeczeństwie i ma postać rozkładu logarytmiczno-normalnego dla przychodów najniższych oraz rozkładu Pareto dla przychodów o wyższej wartości.

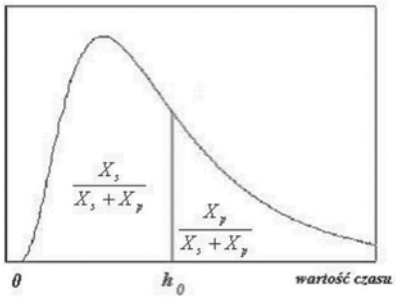
Przyjmując dla uproszczenia odwzorowanie w całości rozkładem logarytmiczno – normalnym oznaczmy przez X_p oraz X_s liczbę pasażerów korzystających odpowiednio z pociągu i z samolotu. Otrzymujemy wówczas:

$$X_p = F(h_0) = \int_0^{h_0} f(x)dx \tag{3}$$

oraz

$$X_s = 1 - F(h_0) = \int_{h_0}^{\infty} f(x)dx \tag{4}$$

Powierzchnie odpowiadające proporcji (udziałowi) w rynku przypadające na pociąg oraz na samolot przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Funkcja gęstości rozkładu wartości czasów podróżnych {2}

Przykłady modelu cena–czas opisywane są często we francuskiej literaturze przedmiotu i znalazły tam szereg zastosowań praktycznych związanych z oceną podziału modalnego pomiędzy TGV a samolotem [3, 4]. Osobnym zagadnieniem

pozostaje opracowanie dokładnej postaci funkcji kosztu generalizowanego odwzorowującej warunki lokalne z uwzględnieniem na przykład czasu oczekiwania na najbliższe połączenie w danej relacji[2] [2, 4]. Wprowadzany ostatnio także przez SNCF (Koleje Francuskie) tzw. równoodstępowy rozkład jazdy w sposób istotny zmienia dotychczasowe zachowania pasażerów ułatwiając zaplanowanie podróży i zwiększając dostępność (czasową) kolei [3].

Cena i czas są tylko wybranymi cechami potrzeb transportowych składającymi się na dłuższą listę preferencji podróżnych. Wśród pozostałych wymienić można także bezpieczeństwo osobiste i komunikacyjne, dostępność (geograficzną i czasową) środka transportu, terminowość realizacji podróży i szereg innych [6, 7]. W indywidualnych przypadkach zachowań odgrywają one różną rolę w podejmowaniu decyzji przez podróżnych, a ustalenie ich listy dla warunków konkretnego korytarza transportowego jest bardzo istotne[3]. W ogólnym przypadku obejmującym dłuższą listę preferencji oraz wybór spośród dwu lub więcej środków transportu stosuje się tradycyjnie wielomianowy model logitowy [5, 6].

Niezależnie od słuszności powyższych uwag za wyborem modelu opisującego związki jedynie ceny i czasu przemawia zarówno praktyka modelowania, jak i doświadczenie z procesu badania zachowań rynkowych. Dyskusyjne jest bowiem założenie, że każdy podróżny poprzedza swoje decyzje o sposobie odbywania podróży rozbudowaną analizą obejmującą wiele różnorakich aspektów.

Powstaje pytanie, czy model cena–czas może znaleźć zastosowanie także w warunkach polskich, gdzie perspektywa pojawienia się Kolei Dużych Prędkości wydaje się obecnie dosyć odległa. W szeregu korytarzach transportowych rywalizują natomiast nie tylko kolej i samolot, ale także kolej i publiczni przewoźnicy autobusowi. Wobec takich realnych uwarunkowań rynkowych w artykule przedstawiono próbę zastosowania opisanego modelu w warunkach wybranego krajowego korytarza transportowego z zastosowaniem danych odnoszących się do aktualnych ofert przewozowych.

3. Sytuacja rynkowa i zachowania konkurencyjne w podróżach międzyaglomeracyjnych

Przewozy międzyaglomeracyjne (tzw. *kwalifikowane*) były dotychczas w Polsce domeną głównie transportu kolejowego, co przez wiele lat wynikało ze stanu dróg kołowych oraz słabego rozwoju motoryzacji indywidualnej. Relatywnie nieliczne, regularne połączenia autobusowe nie stanowiły także realnej konkurencji dla kolei w bezpośrednich przewozach pomiędzy największymi miastami. Modernizacja wielu dróg krajowych, a w ostatnim okresie również coraz dłuższa sieć autostrad oznaczają zmianę tej sytuacji. Dotyczy to przede wszystkim przejazdu samocho-

2 W opisywanym modelu wartość czasu *t* powinna uwzględniać zarówno przeciętny czas dojazdu do terminalu (dworca lub lotniska), jak też średni czas oczekiwania na najbliższe połączenie.

3 Analiza rynku przewozowego w Japonii wskazuje na istotne znaczenie tzw. LPP (preferencji ukrytych), wśród których wymienia się na przykład punktualność, „łatwość' przewozu bagażu itp. [5].

dami, gdzie czas podróży autostradą (np. z Warszawy do Poznania) zbliża się do czasu przejazdu pociągiem, nawet osiągającym (na pewnych odcinkach) prędkość 160 km/h.

Jeśli chodzi o przewozy autobusowe, to na rynku istniej obecnie bardzo wiele połączeń pomiędzy aglomeracjami realizowanych przez licznych przewoźników zarówno wywodzących się z byłych przedsiębiorstw PKS, jak i nowo utworzonych, głównie prywatnych. W dużej skali i w sposób systemowy budowę takiej sieci połączeń przez jednego przewoźnika podejmowano w ostatnich latach dwukrotnie. W latach 1994 – 2009 funkcjonował *Polski Express*, który w tym okresie zdominował na przykład przewozy pasażerskie pomiędzy Warszawą a Bydgoszczą. Pomimo początkowych sukcesów komercyjnych firma ostatecznie wycofała się z rynku.

W czerwcu 2011 roku pojawił się nowy przewoźnik *PolskiBus.com* rozwijający sieć połączeń, która docelowo ma być obsługiwana przez 100 nowoczesnych autobusów dwu typów o pojemności 70 oraz 80 pasażerów i stanowiący realną alternatywę dla innych środków transportu. W sytuacji długich czasów przejazdu pociągów w wielu podstawowych relacjach, co wynika z intensywnej modernizacji szeregu linii kolejowych, przewaga autobusu jest oczywista: oferowany czas przejazdu jest podobny (a czasami wręcz krótszy), a ceny biletów bardzo atrakcyjne[4]. Oferta PB jest szczególnie ciekawa także z tego powodu, że dostępność geograficzna autobusów została bardzo ograniczona i sprowadza się jedynie do największych miast.

Rozważania powyższe są prowadzone z perspektywy pożądanej konkurencyjności kolei oraz przy założeniu, że nowoczesny system transportowy powinien uwzględniać wszystkie współczesne środki transportu, z których każdy powinien realizować taki rodzaj i wolumen zadań przewozowych, do których jest najlepiej dostosowany.

Tworzenie i rozwój takiego modelowego systemu wymaga prowadzenia w skali regionu, kraju i kontynentu skutecznej polityki transportowej. Modelowanie przewozów może wspomagać zarówno wytyczanie celów i kierunków takiej polityki, jak i w pewnym zakresie dostarczać odpowiednich narzędzi do jej realizacji.

Proponowane w dalszej części artykułu zastosowanie modelu cena – czas do analizy pewnej części rynku przewozów w korytarzu transportowym pomiędzy wybranymi aglomeracjami wiąże problematykę organizacji przewozów z zagadnieniem postępującej urbanizacji, której konsekwencją jest między innymi zmniejszanie się dostępności geograficznej kolei za sprawą wydłużającej się, średniej odległości pomiędzy coraz odleglejszymi dzielnicami a dworcami kolei, zlokalizowanymi w centrach miast.

Głównym celem modelowania jest w tym przypadku dokonanie oceny, na ile dostępność geograficzna środka transportu, obrazowana czasem przejazdu do terminala (dworca kolejowego lub autobusowego) z różnych dzielnic miasta może wpływać na podział zadań przewozowych. Model ekonometryczny uwzględniający

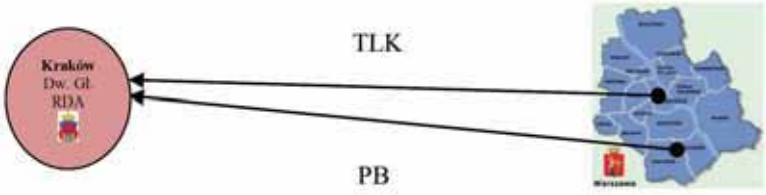
4 Np. w relacji Warszawa – Gdańsk kursuje obecnie 15 par autobusów na dobę; równoodstępowy rozkład jazdy w porze dziennej przewiduje połączenia co jedną godzinę.

zarówno czas podróży, jak jej cenę wydaje się adekwatny do przeanalizowania tego problemu.

4. Próba zastosowania modelu w korytarzu transportowym. Warszawa – Kraków

Rozpatrzmy zatem przykład korytarza transportowego Warszawa–Kraków. Załóżmy jednocześnie, że koncentrujemy się takim na segmencie rynku, w którym podróżny zainteresowany jest możliwie tanim sposobem przemieszczania się transportem publicznym. W konkretnych warunkach niech oznacza to wybór pomiędzy pociągami tzw. *Tanich Linii Kolejowych* (TLK) a autobusami sieci *PolskiBus.com* (PB).

Z punktu widzenia dostępności geograficznej obie oferty zbiegają się w Krakowie w jednym węźle intermodalnym, obejmującym zarówno kolejowy Dworzec Główny, jak i Regionalny Dworzec Autobusowy. W Warszawie sytuacja jest natomiast odmienna. Dworzec Centralny oraz przystanek PB na tzw. Pętli Wilanowska dzieli odległość kilku kilometrów, którą metro pokonuje w czasie 12 minut, natomiast tramwaj (zdecydowanie bliższy obu terminalom) w ciągu 25 minut (rysunek 3).



Rys. 3. Schemat korytarza transportowego Warszawa – Kraków

Jak wynika z rysunku mieszkańcy południowych dzielnic Stolicy mają znacznie lepszy dostęp do terminalu PB na pętli Wilanowska niż do Dworca Centralnego. Powstaje zatem pytanie, na ile czas podróży autobusem z południa Warszawy do Krakowa (pomimo, że znacznie dłuższy niż koleją z Centrum miasta) w powiązaniu z niższą ceną biletu może skłonić podróżnych do skorzystania z oferty autobusowej i jakie wnioski w tej sprawie podsuwa analiza przypadku za pomocą modelu cena – czas.

Do budowy modelu wykorzystano dane z rzeczywistych ofert przewozowych wg stanu na początek września br. Rozkładowy czas jazdy autobusu PB wynosił 4h55 przy liczbie 4 par połączeń na dobę (w tym jedno nocne), natomiast średni czas przejazdu pociągiem TLK przyjęto dla uproszczenia jako 3h00 (w rzeczywistości $2h45 < t < 3h13$), przy 5 parach połączeń (przez CMK). Cena biletu na autobus to 30 – 35 zł, natomiast na pociąg TLK w 2 klasie – 56 zł.

Zakładając, że liczba miejsc inwentarzowych w kursujących składach pociągów i w autobusach jest w wystarczającej mierze odzwierciedleniem potoków określonego rodzaju pomiędzy Warszawą a Krakowem można obliczyć, że struga relacyj-

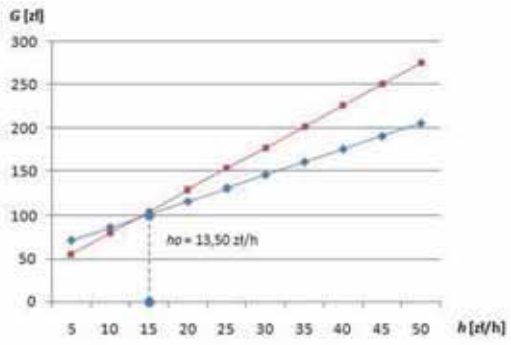
na pasażerów wynosi łącznie około 1 tys. osób na dobę[5], a udziały w tym segmencie rynku pociągów TLK oraz autobusów PB to odpowiednio 76 i 24%.

Analizując ofertę komunikacji publicznej w Warszawie można jednocześnie założyć, że dla mieszkańców dzielnic południowych czas dojazdu do Dworca Centralnego jest dłuższy o około 30 minut niż do pętli Wilanowska. Przyjęcie założenie, że z oferty PB korzystają jedynie ci mieszkańcy jest oczywiście przesadą, ale celem dociekań jest ustalenie, na ile rozległość miasta oraz czas dojazdu do terminala komunikacji dalekobieżnej może wpływać na decyzje o wyborze środka transportu.

Rozpoczynając od modelu cena – czas zbudowanego w oparciu jedynie o dane podstawowe otrzymujemy, że wartość obojętna czasu podróżnego, zgodnie ze wzorem (2) wynosi:

$$h_0 = \frac{61zl - 30zl}{4h55 - 3h00} \approx 13{,}50 \text{ zł/h} \tag{5}$$

Obliczenia przeprowadzone przy takich założeniach prowadzą do wniosku, że wyboru autobusu dokonują ci podróżni, którzy oceniają wartość swojego czasu na mniej niż 13,50 zł/h (rysunek 4). Dla zobrazowania tej wartości można zauważyć, że przyjmując przeciętną liczbę dni roboczych w miesiącu wynoszącą 168 (dane dla roku 2012) odpowiada to osobie zarabiającej poniżej 2268 zł/miesiąc.



Rys. 4. Funkcje kosztu generalizowanego G dla TLK oraz PB

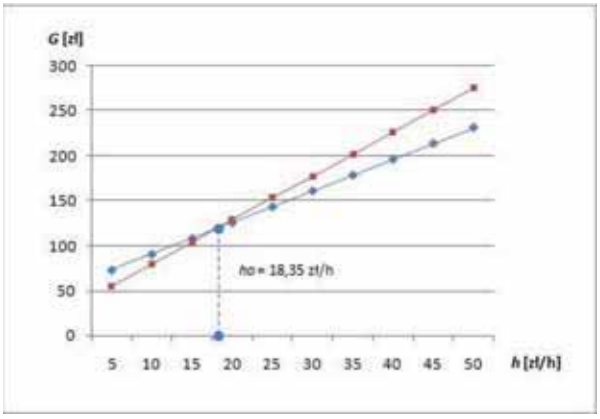
Rozważmy teraz w jaki sposób można ocenić preferencje klientów w przypadku uwzględnienia w bilansie czasu podróży pociągiem czas τ na dojazd z południa Warszawy do Dworca Centralnego, oszacowany na około 30 min. Otrzymujemy wówczas:

$$h_0 = \frac{61zl - 30zl}{4h55 - 3h30} \approx 18{,}35 \text{ zł/h} \tag{6}$$

Zatem w tym przypadku wyboru autobusu dokonują ci podróżni, którzy oceniają wartość swojego czasu na mniej niż 18,35 zł/h. Odnosząc tę wielkość ponow-

5 Przy założeniu badania rynku obejmującego jedynie przejazdy wagonami 2 klasy TLK oraz autobusami PB.

nie do zarobków można stwierdzić, że wybór autobusu odpowiada teraz osobie zarabiającej poniżej 3083 zł/miesiąc (rysunek 5). Wynik taki odzwierciedla teraz dostępność kolei dla mieszkańców południowej części Warszawy.

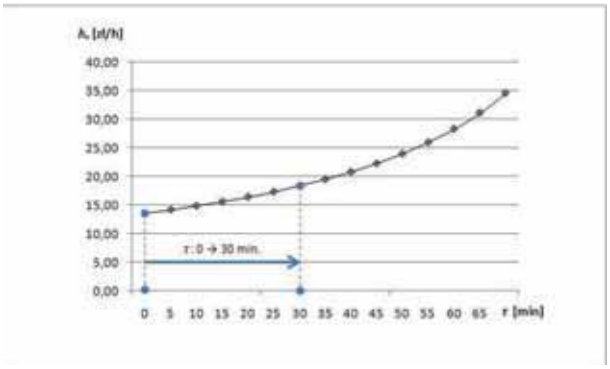


Rys. 5. Funkcje kosztu generalizowanego G dla TLK oraz PB (z uwzględnieniem dostępności geograficznej)

We wzorach (5) i (6) zmianie ulega jedynie czas podróży pociągiem t_p, (wydłużany o czas τ). Dla badanego przykładu można zatem określić zależność h_0 od t_p jako funkcję postaci:

$$h_0(\tau) = 26 \cdot (1{,}92 - \tau)^{-1} \tag{7}$$

Wykres tej funkcji przedstawiono na rysunku 6. Jest to funkcja wykładnicza, co w kontekście wzorów (1) – (6) oznacza, że w miarę wydłużania się czasu dojazdu do dworca kolejowego τ liczba podróżnych, którzy zdecydują się na autobus rośnie nieliniowo.

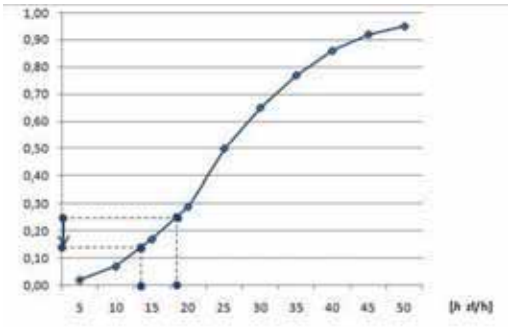


Rys. 6. Zależność „obojętnej" wartości czasu podróżnego od czasu dojazdu do jednego z terminali

Powstaje teraz oczywiste i najważniejsze pytanie, w jaki sposób powyższe zależności przełożą się na podział modalny w badanym segmencie przewozów pasażerskich w korytarzu transportowym Warszawa – Kraków.

W celu przeprowadzenia niezbędnych obliczeń konieczne jest przyjęcie założenia odnośnie do rozkładu wartości czasu w populacji podróżnych korzystających z połączeń TLK i PB na trasie pomiędzy Warszawą a Krakowem. Jedynym wiarygodnym źródłem takich danych mogłyby być reprezentatywne badania marketingowe. Nie dysponując z oczywistych powodów takim materiałem dla potrzeb przykładu przyjmijmy, że – zgodnie z założeniami modelu cena–czas – takie wartości czasu mają rozkład logarytmiczno-normalny.

Dystrybuanta takiego rozkładu dla przyjętych wartości parametrów ma postać, jak pokazano na rysunku 7. Przyjmując, że podróżni biorą pod uwagę dojazd do dworca, jako element wpływający na czas podróży udział PB w rynku wynoszący 24% (odpowiadający $b_0 = 18{,}35$ zł/h) mógłby się obniżyć nawet o około 10%, gdyby odległość między terminalami była $\tau = 0$ (na wykresie linie przerywane).



Rys. 7. Dystrybuanta w rozkładzie logarytmiczno-normalnym – podział modalny

Wszystkie powyższe rozważania mają wymiar wyłącznie teoretyczny i odnoszą się do przyjętych uprzednio założeń. Modelując podział modalny na potrzeby rzeczywiste należałoby przede wszystkim zweryfikować fundamentalne założenie o przydatności modelu cena – czas do badanego przypadku. Podobnie konieczne jest zweryfikowanie kolejnych hipotez oraz uzyskanie danych rzeczywistych dotyczących na przykład preferencji klientów.

Powyższe zastrzeżenia nie zmieniają faktu, że w oparciu o przeprowadzone obliczenia można wyciągnąć szereg interesujących wniosków. Podstawowe z nich zapisano w ostatnim rozdziale. Z punktu widzenia przewoźników zarówno wielkość interesującego ich rynku, jak i możliwość skutecznego konkurowania z innymi podmiotami mają fundamentalne znaczenie dla kształtowania oferty przewozowej i w efekcie dla osiąganych wyników ekonomicznych.

5. Podsumowanie i wnioski

W oparciu o analizę części przewozów w korytarzu transportowym Warszawa–Kraków można sformułować następujące wnioski:

1. W modelowaniu podróży i prognozowaniu ruchu dotyczącym pasażerskich przewozów międzyaglomeracyjnych rozległość aglomeracji, wpływająca na dostępność geograficzną do terminali transportu publicznego ma istotny wpływ na wybór środka transportu. W budowanych modelach konieczne jest zatem uwzględnianie czasu dojazdu z poszczególnych rejonów (dzielnic) miasta do dworców kolejowych i autobusowych.
2. Przy takim modelowaniu należałoby zatem, podobnie jak to ma miejsce w klasycznym czteroetapowym modelu transportowym (budowanym zazwyczaj dla jednej aglomeracji i jej okolic), dokonywać dekompozycji rozległych obszarów zurbanizowanych na szereg rejonów i uwzględniać zróżnicowane czasy dojazdu podróżnych do terminali transportu międzyaglomeracyjnego.
3. Postępująca urbanizacja kraju oraz fakt, że niektóre dzielnice i osiedla znajdują się w pobliżu dróg szybkiego ruchu lub autostrad w istotny sposób zmienia dostępność do międzymiastowego transportu publicznego, w tym zwłaszcza kolei i przekłada się ostatecznie na podział zadań przewozowych w coraz większym stopniu faworyzującym udział transportu drogowego.
4. W tak zmieniających się warunkach kolej pragnąc zwiększać swoją konkurencyjność powinna nie tylko odpowiednio kształtować swoje oferty taryfowe, ale także możliwie maksymalnie skracać czasy przejazdu oraz uwzględniać w swoich planach strategicznych rozwój połączeń w relacjach o takich długościach, gdzie jej pozycja może być najsilniejsza.

Literatura

[1] Abraham C., À la recherche de la valeur du temps perdue. Transports nº 418, 3-4/2003.
[2] Bonnel P., Prévoir la demande de transport. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paryż 2004.
[3] Gourgouillon D., Le projet „Cadencement". Revue Générale des Chemins de Fer, 4/2009.
[4] Pradayrol J-P., Champeaux J., Études de dessertes „Intercités à Grande Vitesse ". Revue Générale des Chemins de Fer, 11/2007.
[5] Shibata M., Muto M., Okuda D., Development of Modal Share Estimation Method Considering Latent Passenger Preference for transportation Modes. Quarterly Report of Railway Technical Research Institute RTRI, Vol.53 No. 3/2012.
[6] Żurkowski A., Modelowanie przewozów międzyaglomeracyjnych. Problemy Kolejnictwa z. 148 (2009).
[7] Żurkowski A., Ruch i przewozy kolejowe. Kolejowa Oficyna Wydawnicza, Warszawa 2010.

STRESZCZENIA ANGIELSKIE ARTYKUŁÓW

Marek Bauer

INFLUENCE OF PERCEIVED ROUTE QUALITY ONTO PASSENGER'S CHOICE OF PUBLIC TRANSPORT LINE

Summary. The decision-making process of passenger waiting for public transport vehicle at the bus stop has been discussed in the paper. The set of factors with disturbing character, influencing onto state of the public transport system has been established. They have a very essential influence onto passenger's assessment of the system and his decisions on risk and uncertainty conditions. In this paper the own research results of public transport lines choice have been shown and discussed with taking into consideration to the quality of public transport operation. Also preliminary results of variability decisions caused by changes in public transport system have been presented.

Keywords: public transport, rationality of decisions, public transport line modelling

Krystian Birr, Marcin Zawisza, Tomasz Budziszewski, Kazimierz Jamroz

SOME PROBLEMS OF PUBLIC TRANSPORT TRIPS MODELLING ON CASE OF GDANSK

Summary. Modelling of public transport trips is an elementary part of the process of building model of trips, mainly in urban areas. Actually in Gdansk a new transport simulation model, based on PTV VISUM software, is building. The problems of building and calibration modal split from separation pedestrians traffic, to distribution of individual and public transport trips have been described in this article. The capability of change in variables and parameters of this model for forecasts, based on established changes of motorization rate, transport behaviour, transport policy and value of fuel have been also described. Moreover the problems and methods of calibration of transport public network by using PTV VISUM software have been presented.

Keywords: modelling, public transport, modal split

Daniel Błażków, Zygmunt Bobowski

ESTIMATION OF THE LOST BENEFITS RELATED TO FREE AND REDUCED FARES IN MUNICIPAL PUBLIC TRANSPORT SYSTEMS. STUDY REPORT

Summary. The authors present a methodology of estimating the lost benefits from free and reduced fares in public transport, which they used in their study covering the public transport companies operating in Jelenia Góra, Bolesławiec, Głogów and Nysa.

Reaching the study objectives required, *inter alia*, an evaluation of:

- volumes and structure of passenger traffic, with particular regard to the share of free / reduced-fare rides, on the basis of surveys;
- lost benefits – breakdown of company total and of individual routes;
- size of compensation required to set off the lost benefits (the compensation would be a subsidy from the municipal budget).

The study results were then used to analyse the profitability of individual transport routes and to formulate the conclusions related e.g. to the feasibility of maintaining the existing public transport routes or to the necessary of modifications in the existing fare tables.

The methodology relied mainly on surveying the public transport passengers.

Keywords: public transport, survey, free and reduced fares, lost benefits

Ireneusz Celiński, Grzegorz Sierpiński

SPACE RESISTANCE FOR ALTERNATIVE TRAVELS

Summary. The conception of 3D space resistance function building with variance of vertical dislocation has been presented in the article. Authors have shown results of travel surveys that had been performed on Upper Silesia Region. Inhabitants were asked about their preferences on alternative modes of transportation in urban network (in case of obligatory travels – to work places and to educational institution). The analysis of received answers helped to describe space resistance function for actual and alternative mode. The idea was illustrated by theoretical and practical 3D space resistance. Modelling of traffic flow in dense transportation network needs to use different to actual methods. The conception of utilization the GSM and GPS technology to identify space resistance has been proposed. Inhabitants perception on travel distance and travel time have been also discussed.

Keywords: travel modelling, travel forecast, 3D space resistance function, space variation of resistance function, vertical travel, time and space recognition

Szymon Fierek, Andrzej Szarata, Jacek Żak

THE APPLICATION OF TRANSPORTATION MODELS AND THE MULTIPLE CRITERIA DECISION MAKING IN TRAM NETWORK DEVELOPMENT

Summary. The methodology of designing and evaluating tramway routes within the urban area has been presented in the paper. Using a macro simulation tool VISUM and analysing various transportation solutions different variants of the tramway routes in the urban area have been designed/generated. Next the proposed variants have been evaluated by a consistent family of criteria. The modelling the DM's preferences have been also demonstrated. Computational experiments resulting in the final ranking of variants and selection of the most desirable solution have been carried out with the application of the Multiple Criteria Decision Making ranking method AHP.

Keywords: demand modelling, four stage model, multiple criteria decision making/aiding

Petro Horbachov, Vitalii Naumov, Olga Svichynska

MODEL OF THE CHOICE OF TRIP ROUTES TO WORKPLACES IN THE CONDITION OF LARGE CITY

Summary. The approach to formulating model of passenger behaviour in urban public transport according to the rules of conscious taking a decision by any person and some models of discrete choices have been presented in the paper. The theoretical basis for modelling according to which the values of attractiveness for trip routes are counted using Fredholm integral equations and its statistical probabilities of the usage of alternative routes by each respondent have been proposed. The regression function has been applied for counting the value of parameters in attractiveness function. The assessment of forecast accuracy of probability for the choice of alternatives has been presented. The attractiveness function drown up as a result of trip to workplaces research for the city of Charkow has been presented.

Keywords: travel modelling, public transport

Kazimierz Jamroz

MODELLING MOTORIZATION INDEX AT NATIONAL LEVEL

Summary. Motorization index is one of the most widely used measures of the development of the motorization in the analysed country. Motorization level depends on many factors: economic, social, spatial, transport. The modelling procedure of motorization index changes depending on some factors at macro level has been presented in the paper. The indicator also shows the forecast for the Polish automotive industry by 2050.

Keywords: development of motorization, motorization index, modelling

Łukasz Kowalski, Anna Łobodzińska, Gergő Szabó

USE OF THE GRAVITY MODEL FOR DEVELOPMENT OF THE BICYCLE PATH NETWORK IN KRAKOW

Summary. The aim of the paper is to discover the order in which new sections of Cracow cycle route network shall be built. Basing on gravity model the authors created a location model for any new section of the network. Potential flows between homes and city centre, workplaces, secondary schools and universities were considered. Exponential function was applied as a distance-decay function. Moreover, the authors assumed that a well-planned cycle network shall fulfil two requirements: coherence and directness. Data used in the model were reduced to centroids (population and workplaces) or their actual locations (schools, universities and student houses). Measured values of interactions were standardised and summed. As a result, general index, informing about the importance of particular section in the whole network, was obtained. The authors proposed an order of building the cycle paths basing on general index value and location of a section within cycle network. The priority was given to sections, which obtained high index value and will increase coherence and directness of the network, as well as to short paths completing existing network. The presented model assumes the equal treatment for all groups of inhabitants. On the other hand, it enables prioritisation of certain group by changes of weights in the general index.

Keywords: location model, gravity model, bicycle network, bicycle traffic, distance decay function

Rafał Kucharski

THEORETICAL BACKGROUND FOR ADAPTIVE AND DYNAMIC PATH CHOICE MODEL IN TRAFFIC MODELLING

Summary. Article is a theoretical background needed to define adaptive route choice model for transport modelling. The aim is to define state-of-the-art and state-of-the-practice in theoretical models which constitute route choice modelling, namely shortest path search, route sampling, and route choice modelling. Article shows basic and advanced techniques of solving mentioned models. Static, dynamic, and stochastic cases of transport networks are discussed. Examples include the most recent proceedings. Adaptive aspects of models are emphasized.

Keywords: the shortest path, dynamic problem of the shortest path, path sampling, route choice in transportation network, adaptation of traffic models

Katarzyna Nosal

APPLICATION OF LOGIT MODELS FOR ASSESSMENT OF EFFICIENCY OF MOBILITY MANAGEMENT TOOLS

Summary. The article consists of some review. To remind the process of modelling discrete choices, their theoretical frames and the construction of utility function basing on some parameters connected with the process for choice of means of transport have been presented. Then basing on examples from foreign literature, the application of logit and multinomial nested models for assessment of efficiency of mobility management tools.

Keywords: mobility management, assessment of mobility management tools, logit models

Bartłomiej Piątkowski, Michał Maciejewski

APPLICATION OF OSM MAPS IN CREATION OF A POZNAN AGGLOMERATION NETWORK MODEL FOR SIMULATION IN MATSIM

Summary. The procedure of creating a road network model with the use of GIS data from the OpenStreetMap project has been described and some initial results of traffic simulation for the Poznan agglomeration in MATSim have been presented in the paper. The process of creating the Poznan agglomeration network model and its use in the MATSim system has been shown. Next, the authors evaluated the influence of the network mapping detail level on the simulation results. To compare it, firstly four models of different detail level has been built, then a synthetic population of agents has been created based on the OD matrices from the Poznan agglomeration model provided by the Poznan City Council. After four different simulations were run, their results have been compared with such indicators like mean speed, average travel time etc.

The developed model is the first stage in creating a new traffic model for the Poznan agglomeration. Our aim is to conduct a 24-hour multiagent simulation in MATSim based on the whole-day activity chains.

Keywords: multi-agent simulation, queue-based traffic flow models, MATSim, OpenStreetMap

Aleksandra Romanowska, Kazimierz Jamroz

RESEARCH AND ANALYSIS OF FUNCTIONING OF THE THIRD GENERATION: A CASE STUDY FROM TRI-CITY (POLAND)

Summary. Large-sized commercials (shopping centers, office buildings, etc.) generate high volume of traffic, and therefore often lead to significant deterioration of traffic conditions in adjacent street network and distortions in urban transport system. Due to the lack of Polish experiences it appears to be necessary to study the impact of selected demographic, economic, spatial, infrastructural or organizational factors on the level of traffic generated by the objects. On that basis it is possible to create the tools for forecasting the traffic generation of that kind of commercial buildings and their impact on urban transport network.

The aim of this paper is presentation of the results of studies and analyses of the Tri-City third generation shopping centres and identification of most significant determinants of traffic generation. The paper presents the preliminary results of traffic

modelling in large-sized commercials, as well as examples of using research results and built models to forecast the volume of traffic generated by the objects.

Keywords: shopping centres, traffic generation, traffic analysis, traffic modelling.

Andrzej Rudnicki

A CONTRIBUTION TO THE VALUATION OF TRAVEL ATTRIBUTES IN URBAN PUBLIC TRANSPORT

Summary. In this paper an attempt has been made to identify and classify attributes of urban transport. Classification includes groups of attributes concerning aspects of space and time and travel conditions, as well as structure of travel. Some of attributes are consequence of the conditions in which travel is made. Another group attributes relate to economical and environmental aspects, and as results of traveller characteristics. Attributes, which synthesize previously given, close the list. Few attributes are specific for urban public transport. The travel attributes used in models to predict future traffic have been indicated

Valuating the travel attributes involves three cases: a) the random variation of travel time for the repeatable travel, b) travel comfort for driving conditions, c) reduce the inconvenience effects of travel, including travel time components. Values are expressed in equivalent units of time or in utiles, with reference to the concepts of utility theory. Based on the valuated components of travel one can construct generalized travel cost, which in the simulation model accurately expresses the impact of various factors on the real behaviours of transport users, particularly in the step of the modal split.

Keywords: travel attributes, urban public transport, identification and classification, valuation of attributes.

Jacek Thiem

APPLICATION OF GAME THEORY TO SOLVE CONFLICTS IN THE TRANSPORT ANALYSIS

Summary. Game theory, despite many examples of traffic modelling and transport analysis is a tool rarely used in Poland. It is a mistake, especially in case when transport analysis regards conflict situations.

The paper presents an example of the application of game theory to the bus network design in Poznan and in surrounding communities within the concept of public transport integration.

Keywords: transport analysis, game theory, integration of public transport, bus network

Andrzej Waltz

NATIONAL TRANSPORT NETWORK MODEL FOR RAILWAY PASSENGER TRAFFIC FORECAST

Summary. Principles of traffic model construction for railway passenger traffic forecast calculation are presented. Model consists of: railway network, other transport modes networks, area model presented by traffic zones with socio-economic data. Network models consist of existing and future transport networks parameters. Presented traffic models are based on existing traffic counts, ticketing statistics and other sources analysis. Volume of railway passenger traffic is calculated from socio-economic characteristics of the area surrounding stations on demand side and train frequency, speed and other factors describing railway offer on supply side. Other modes network models enables modal split modelling based on different factors, like travel time, travel cost etc.

Calculation has been executed using typical 4-stage model: traffic generation, traffic distribution, modal split, traffic assignment. Program VISUM was used for building the model and to execute calculations.

Keywords: network models, forecast, railway

Andrzej Zalewski

TOURIST BICYCLE TRAFFIC FORECASTING

Summary. The method for tourist bicycle traffic forecasting applying to Bicycle Routes in Eastern Poland has been presented in the paper. This method consists of the bicycle traffic forecast for one day period and for the long distance tourist traffic along bicycle routes in non-urban and sub-urban areas. The method uses the experiences resulting of bicycle tourist traffic forecasting in Western Europe and the author's experiences in daily bicycle traffic forecasting in conditions of Polish medium cities. In author's opinion minimal level of spatial provision is a commune, because data required for traffic modelling are available in this level of aggregation. In the reason of bicycle specificity as transportation and tourist mode, maximal period of bicycle tourist traffic forecasting should not be longer than 10 years.

Keywords: tourism, bicycle traffic, travel modelling, traffic forecasts

Renata Żochowska, Grzegorz Karoń

REVIEW OF LITERATURE ON CONGESTION EFFECT AND TRAFFIC DISTURBANCES IN URBAN TRANSPORTATION SYSTEM IN THE ASPECT OF TRAVEL MODELLING

Summary. Transportation system is expose to different disturbances, the sources of that could be found not only in functional and practical area (e.g. lack of proper efficiency of demand value), technical and operating area (e.g. road works carry on to total or partial closure of road network elements) but in the area related to random events (e.g. unfavourable weather conditions, terrorist actions, road traffic accidents and collisions). The events lead to the decrease of capacity of transportation network and to reduction of level of traffic freedom. As a result there is a congestion on the roads and waste of time causing the decrease of travel quality. The review and classification of factors influencing on congestion and disturbances appearance in road traffic have been given in the paper. The consequences of disturbances in road network are more extended than only increase of travel time and they should be considered as a problem of reduced capacity of transportation system in a city. The process of traffic arisen in transportation system is often described in form of four-step (classical) model as an effect of sequential process of taking a decision towards necessities and travel time, choice of destination, means

of transport and route of travel. This approach leads to the necessity of taking into account disturbances and their influence at each step of decision process.

Keywords: congestion, transportation system, travel modelling

Andrzej Żurkowski

AN APPLICATION OF THE PRICE - TIME MODEL FOR ESTIMATION OF MODAL SPLIT FOR TRAVELS BETWEEN TWO URBANIZED AREAS

Summary. The price-time model is used above all for modelling the division of operation tasks on the transport corridors between high speed railways and aviation. In the article the attempt has been made to apply it to the evaluation of modal division in the national intercity operation between railway and bus operators. Basing on the calculations, the evaluation has been made of the impact of two basic preferences price- and time- regarding the choices made by the travellers and in the consequence on the apportionment of their flow on the transport corridors among two basic public operators.

Keywords: model "price - time", passenger transport, air transport, rail transport, bus transport, modal split

Informacje dla Autorów

Procedura recenzowania publikacji

1. Każda publikacja przesłana do Redakcji drogą elektroniczną lub pocztową podlega procedurze recenzowania (dwóch niezależnych recenzentów spoza jednostki zatrudniającej Autora) i ocenie językowej (redaktor językowy). Recenzentów wyznacza Redaktor Naczelny po zasięgnięciu opinii redaktorów tematycznych.
2. W przypadku wykorzystywania w publikacji zaawansowanych metod statystycznych publikację ocenia również redaktor statystyczny.
3. W przypadku tekstów powstałych w języku obcym, co najmniej jeden z recenzentów będzie afiliowany w instytucji zagranicznej innej niż narodowość autora pracy.
4. W doborze recenzentów stosuje się model, w którym autor i recenzenci nie znają swoich tożsamości (tzw. „*double-blind review proces*").
5. W szczególnych przypadkach niemożności dostosowania się do powyższej zasady (wąska problematyka artykułu, brak dużej liczby potencjalnych recenzentów) recenzent pochodzący z tej samej jednostki będzie podpisał deklarację o niewystępowaniu konfliktu interesów. Za konflikt interesów będzie się uznawać zachodzące między recenzentem a autorem:
   - bezpośrednie relacje osobiste (pokrewieństwo, związki prawne, konflikt),
   - relacje podległości zawodowej,
   - bezpośrednia współpraca naukowa w ciągu ostatnich dwóch lat poprzedzających przygotowanie recenzji.
6. Recenzja ma formę pisemną i kończy się jednoznacznym wnioskiem, co do dopuszczenia artykułu do publikacji bez zmian, dopuszczenia artykułu do publikacji po uwzględnieniu uwag zawartych w recenzji lub jego odrzucenia.
7. Zasady kwalifikowania publikacji do druku w wyniku recenzji:
   - oryginalność publikacji w zaproponowanej metodzie rozwiązania problemu, w zastosowaniu nowych ujęć teoretycznych problemu lub w przedstawieniu interesującego syntetycznego spojrzenia na pewną dziedzinę badań,
   - poprawność terminologiczna zastosowana w publikacji,
   - poprawność stylistyczna i językowa publikacji,
   - trafny i wystarczający dobór literatury,
   - właściwy dobór materiału ilustracyjnego.
8. Nazwiska recenzentów poszczególnych publikacji nie będą ujawniane w kolejnych numerach czasopisma; lista recenzentów będzie podana do publicznej wiadomości raz w roku.

Informacja o zabezpieczeniu przed zjawiskiem ghostwriting

Zjawisko ***ghostwriting*** występuje wówczas, gdy ktoś wniósł istotny wkład w powstanie publikacji, bez ujawnienia swojego udziału jako jeden z autorów lub bez wymienienia jego roli w podziękowaniach zamieszczonych w publikacji.

Zjawisko ***guest authorship (honorary authorship)*** występuje wówczas, gdy udział autora jest znikomy lub w ogóle nie miał miejsca, a pomimo to jest autorem lub współautorem publikacji.

Aby przeciwdziałać przypadkom *ghostwriting* i *guest authorship* Redakcja Zeszytów Naukowo-Technicznych Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Oddział w Krakowie wdraża poniższe rozwiązania:

1. Redakcja wymaga od autorów publikacji ujawnienia wkładu poszczególnych autorów w powstanie publikacji (z podaniem ich afiliacji oraz kontrybucji, tj. informacji, kto jest autorem koncepcji, założeń, metod, protokołu, itp. wykorzystywanych przy przygotowaniu publikacji), przy czym główną odpowiedzialność będzie ponosić autor zgłaszający opracowanie.
2. Redakcja, począwszy od numeru 1/2012, wyjaśnia w Informacji dla Autorów, że *ghostwriting* i *guest authorship* są przejawem nierzetelności naukowej, a wszelkie wykryte przypadki będą demaskowane, włącznie z powiadomieniem odpowiednich podmiotów (instytucje zatrudniające autorów, towarzystwa naukowe, stowarzyszenia edytorów naukowych itp.).
3. Redakcja wymaga od Autorów informacji o źródłach finansowania publikacji, wkładzie instytucji naukowo-badawczych, stowarzyszeń i innych podmiotów („*financial disclosure*").
4. Redakcja dokumentuje wszelkie przejawy nierzetelności naukowej, zwłaszcza łamania i naruszania zasad etyki obowiązujących w nauce.

Przygotowanie tekstów do druku

- Tekst powinien być napisany w edytorze WORD czcionką Times New Roman o rozmiarze 12 pt, odstęp między wierszami pojedynczy, do rozpoczęcia akapitu stosować pojedynczy „Tab", a nie spacje.
- Nie należy stosować więcej niż jednej spacji między wyrazami i ręcznego dzielenia wyrazów.
- Ilustracje należy przesyłać jako oddzielne pliki: *.tif, *.pdf lub *.jpg (rozdzielczość 300dpi), w odpowiednich miejscach w tekście należy zamieścić podpisy.
- Zamieszczenie materiału ilustracyjnego powinno spełniać wymogi prawa autorskiego (do artykułu należy dołączyć oświadczenie).
- Wszystkie rysunki, fotografie i tabele powinny mieć numer i podpis.
- Rysunki, wykresy i tabele powinny być przygotowane w technice czarno-białej.
- Prosimy Autorów artykułów o podanie stopni i tytułów naukowych, afiliacji (miejsce pracy), adresu pocztowego, telefonu, adresów mailowych.
- W przypadku, gdy jest więcej niż jeden Autor, w przypisie do polskiego tytułu należy określić procentowy wkład Autorów w publikację.
- Pełny tekst nie powinien przekroczyć 16 stron wraz z tabelami, zdjęciami i rysunkami.
- Na końcu artykułu prosimy o zamieszczenie streszczenia artykułu i kilku słów kluczowych (minimum trzy) oraz tłumaczeń tytułu artykułu, streszczenia i słów kluczowych na język angielski.
- Artykuły nie mogą zawierać cech i elementów komercyjnych.
- Pliki mogą być spakowane przy pomocy programów RAR lub ZIP.
- Tekst proszę dostarczać w postaci pliku na CD lub mailem.