

ZESZYTY NAUKOWO-TECHNICZNE  
STOWARZYSZENIA INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW KOMUNIKACJI  
RZECZPOSPOLITEJ POLSKIEJ  
ODDZIAŁ W KRAKOWIE  
seria: MATERIAŁY KONFERENCYJNE  
Nr 1(97)/2012

RESEARCH AND TECHNICAL PAPERS  
OF POLISH ASSOCIATION FOR TRANSPORTATION ENGINEERS  
IN CRACOW  
series: PROCEEDINGS  
No 1(97)/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 Szalkowski*  
(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 Czychuła*  
(Politechnika Krakowska - transport kolejowy)  
*prof. PK dr hab. inż. Janusz Cbodur*  
(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

<b>Jadwiga Brzuchowska, Jerzy Sławski</b> Analiza rozkładów przestrzennych podróży „dom-szkoła” we Wrocławiu . . . . .	5
<b>Mariusz Dudek</b> Doświadczenia zagraniczne w modelowaniu ruchu związanego z czasem wolnego . . . . .	21
<b>Tomasz Dybicz</b> Propozycja wymagań dla prognozowania ruchu w krajowym systemie zarządzania ruchem . . . . .	41
<b>Tomasz Dybicz, Wojciech Suchorzewski</b> Modelowanie ruchu drogowego dla potrzeb krótkoterminowych prognoz ruchu. . . . .	55
<b>Aleksandra Faron</b> Wpływ intensywności zabudowy na udział komunikacji zbiorowej w podróżach – analiza modelowa . . . . .	65
<b>Christoph Glogowski, Tadeusz Zipser</b> Formy i charakterystyki parametrów splotowego modelu pośrednich możliwości dla ruchów do pracy w dużych aglomeracjach . . . . .	77
<b>Kazimierz Jamroz, Jacek Oskarbiński, Lucyna Gumińska, Wojciech Kustra</b> Zastosowanie wielopoziomowego modelu ruchu dla systemu TRISTAR. . . . .	101
<b>Andrzej Krych</b> Modularne komponenty systemowe dla potrzeb analiz transportowych – zarys projektu MOSTAR . . . . .	117
<b>Andrzej Krych, Marek Cejrowski, Szymon Fierek, Mariusz Kaczmarek, Andrzej Maćkowiak, Karsten McFarland, Jacek Thiem, Jacek Żak</b> Wielopoziomowe struktury syntetyczne a struktury dedykowane w modelowaniu i prognozowaniu potoków ruchu . . . . .	123
<b>Aleksandra Romanowska, Kazimierz Jamroz, Tomasz Budziszewski</b> Problemy modelowania liczby podróży generowanych i absorbowanych na przykładzie Gdańska . . . . .	159
<b>Piotr Rosik, Marcin Stępniaik</b> Długość podróży w prognozowaniu zmian potencjałowej dostępności drogowej na przykładzie dwóch odcinków autostrady A2 . . . . .	173
<b>Joanna Sarbiewska, Michał Mokrzański, Adam Konarski</b> Tworzenie modeli podróży na przykładzie miasta Szczecin . . . . .	193
<b>Andrew P. Tarko, Andrzej Szarata</b> Modelowanie natężenia ruchu na drogach lokalnych w Stanie Indiana . . . . .	209
<b>Andrew P. Tarko</b> A Traffic Demand Model for Local Roads with Cellular Network Decomposition and High-resolution Land Use Representation . . . . .	221
<b>Marcin Zawisza, Krzysztof Maciasz, Tomasz Budziszewski, Krystian Birr, Kazimierz Jamroz</b> Wybrane problemy modelowania rozkładu przestrzennego i czasu podróży na przykładzie Gdańska . . . . .	235
<b>Michał Żądło</b> Wpływ gęstości podziału na rejony komunikacyjne na wyniki prognozy ruchu . . . . .	245
STRESZCZENIA ANGIELSKIE ARTYKUŁÓW . . . . .	257

INFORMACJE DLA AUTORÓW . . . . .	267
SPONSORZY KONFERENCJI . . . . .	269
INFORMACJE FIRM, PRZEDSIĘBIORSTW I ORGANIZACJI . . . . .	271

## ANALIZA ROZKŁADÓW PRZESTRZENNYCH PODRÓŻY „DOM-SZKOŁA” WE WROCŁAWIU<sup>1</sup>

**Jadwiga Brzuchowska**

dr inż. arch., Katedra Planowania Przestrzennego, Wydział Architektury, Politechnika Wrocławska, 50-317 Wrocław, ul. Prusa 53/55, tel.:+48 71 320 6414, e-mail: jadwiga.brzuchowska@pwr.wroc.pl

**Jerzy Sławski**

dr inż., Katedra Planowania Przestrzennego, Wydział Architektury, Politechnika Wrocławska, 50-317 Wrocław, ul. Prusa 53/55, tel.:+48 71 320 6414

**Streszczenie.** *Wśród nowych źródeł danych pozwalających na analizę zachowań przestrzennych mieszkańców obszarów zurbanizowanych ważną grupę stanowią bazy powstające w procesie informatyzacji administracji oraz możliwość ich odniesienia przestrzennego poprzez dane referencyjne. W przedstawionym badaniu wykorzystano dane referencyjne Systemu Informacji Przestrzennej UM Wrocławia oraz raporty z dwóch baz zawierających informacje adresowe: ewidencji ludności oraz systemu rekrutacji elektronicznej do szkół. Przeprowadzono analizę rozkładów przestrzennych podróży dom-szkola we Wrocławiu. Celem analizy było zbadanie różnych przestrzennych charakterystyk wyboru szkół stopnia gimnazjalnego i ponadgimnazjalnego. Następnie przeprowadzono ocenę zgodności modeli zachowań przestrzennych z danymi empirycznymi. Przebadano zgodność z rozkładami rzeczywistymi dwóch podstawowych modeli kontaktów: modelu grawitacji w dwóch wersjach funkcji oporu odległości (bipercylną funkcją i wykładniczą) i modelu „intervening opportunities”. W znacznej liczbie przypadków analizowane warianty modelu grawitacyjnego lepiej odwzorowują rozkłady rzeczywiste niż model „intervening opportunities”. Jednak w przypadku szkół położonych w obszarach o bardzo zróżnicowanym zagospodarowaniu albo w pobliżu silnych barier przestrzennych użycie modelu „intervening opportunities” daje dużo lepsze rezultaty. Zaletą modelu „intervening opportunities” jest prostota i powtarzalność wartości parametru oporu odległości (co ułatwia proces estymacji).*

**Słowa kluczowe:** *podróże dom-szkola, model grawitacji, model „intervening opportunities”, estymacja parametrów, analiza regresji*

### 1. Cel i zakres badań

Postępująca informatyzacja zarządzania świadczonymi usługami, w tym informatyzacja administracji, a także rozwój systemów informacji przestrzennej i infrastruktury informacji przestrzennej stwarzają nowe możliwości w zakresie tzw. geolokalizacji (odnoszenia przestrzennego) rejestrowanych zdarzeń czy interakcji. W przedstawionym badaniu charakterystyk przestrzennych dojazdów młodzieży do szkół wykorzystano dane referencyjne Systemu Informacji Przestrzennej UM Wrocławia, oraz raporty z dwóch baz zawierających informacje adresowe: systemu rekrutacji elektronicznej do szkół Wrocławia oraz, pomocniczo, bazy meldunko-

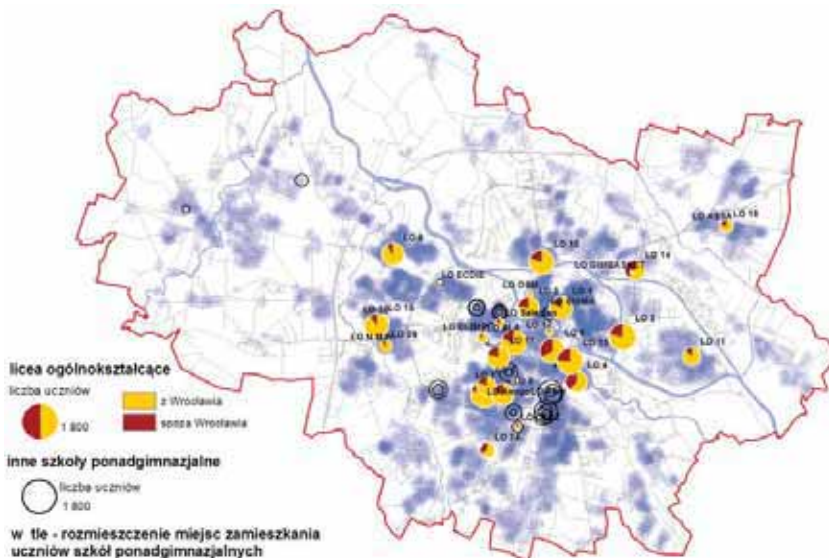
<sup>1</sup> Wkład autorów w publikację: Brzuchowska J. 50%, Sławski J. 50%

wej. Do odniesienia przestrzennego posłużyły dwa zbiory danych referencyjnych: dla obszaru Wrocławia - punkty adresowe oraz – dla okolic Wrocławia - punkty reprezentujące lokalizację miejscowości identyfikowane przez kod TERYT.

W efekcie kilkuletnich prac nad poprawą jakości bazy danych systemu rekrutacji, a w szczególności nad lepszą integracją z bazą adresową i bazą meldunkową, możliwe było wiarygodne odniesienie przestrzenne ponad 95% źródeł podróży do szkół (czyli miejsc zamieszkania uczniów poszczególnych placówek oświaty) i 100% celów podróży. Przedstawione poniżej badania dotyczyły roku 2011 i objęły młodzież dwóch poziomów nauczania: gimnazjalnego i ponadgimnazjalnego. Pominięto uczniów szkół specjalnych, jako kierujących się w wyborze szkoły innymi przesłankami niż reszta populacji.

Badaniu poddano uczniów grupując ich wg typów szkół, jak też w odniesieniu do poszczególnych placówek. Dla szkół ponadgimnazjalnych osobno badano uczniów 4 grup: liceów ogólnokształcących (grupę najbardziej liczną), liceów profilowanych (razem z liceami artystycznymi i sportowymi), techników i zasadniczych szkół zawodowych. Na rys. 1 pokazano przykładowo rozmieszczenie wrocławskich liceów ogólnokształcących oraz ilość i proporcję uczniów dojeżdżających z Wrocławia i okolicznych gmin. Dla szkół tego poziomu udział uczniów spoza miasta jest znaczący (rzędu 20%).

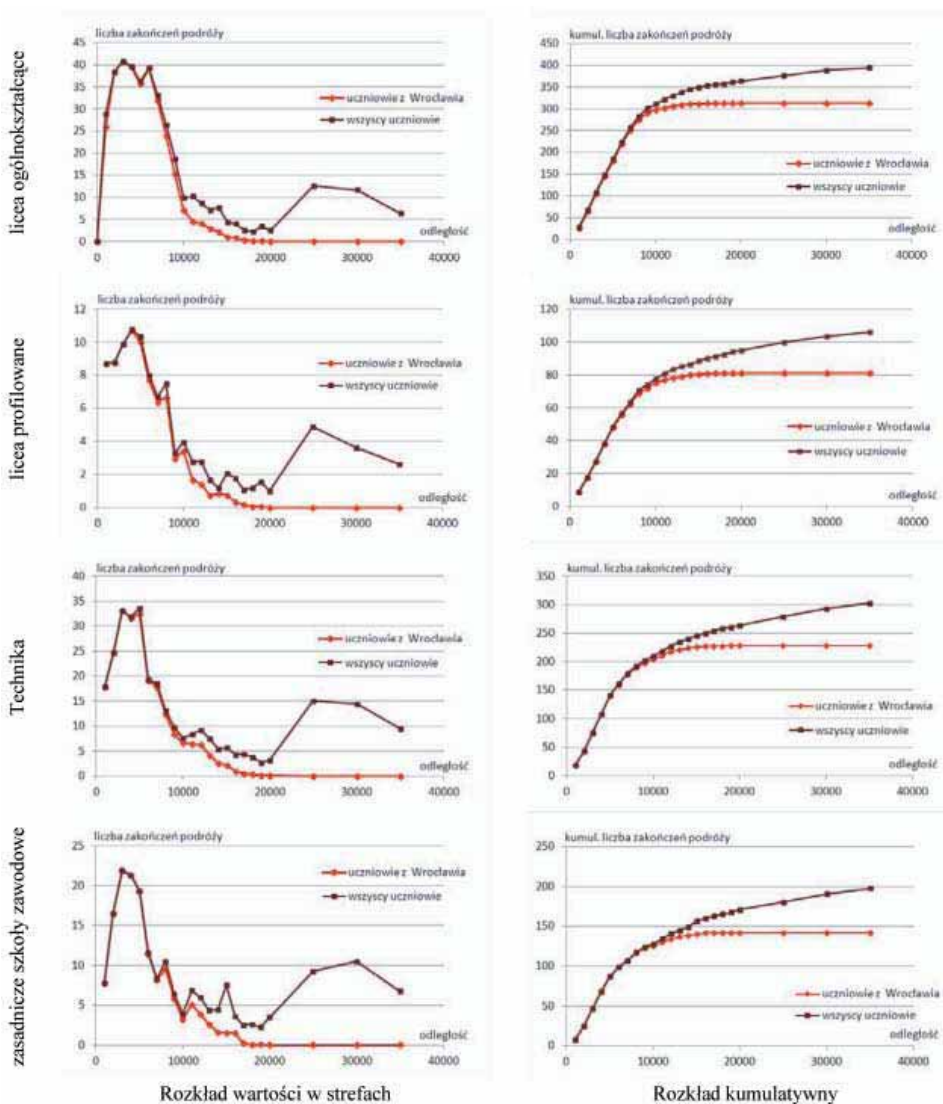
Szkoły poziomu ponadgimnazjalnego są zlokalizowane w obszarze śródmiejskim lub sąsiadującym pierścieniu osiedli o dużej intensywności zabudowy, w miejscach krzyżowania się tras komunikacji zbiorowej. Szkoły z obszaru centrum często obsługują uczniów z całego miasta i dojeżdżających ze wszystkich kierunków spoza miasta. Szkoły poza centrum służą głównie lokalnie, ew. zbierają młodzież dojeżdżającą ze strefy podmiejskiej w ramach danego sektora kierunkowego.



Rys.1. Rozmieszczenie i wielkość wrocławskich liceów ogólnokształcących na tle rozmieszczenia uczniów wszystkich szkół ponadgimnazjalnych

## 2. Wyniki badania długości dojazdów do szkół

Rozkład długości dojazdów uczniów do poszczególnych typów szkół przedstawiono na serii wykresów (rys.2.). Pierwsza seria ilustruje rozkład średniej ilości podróży zakończonych w kolejnych strefach odległości od szkoły, druga przedstawia te same dane w postaci rozkładu kumulatywnego wartości empirycznych (odpowiednika dystrybuanty dla rozkładów prawdopodobieństwa).

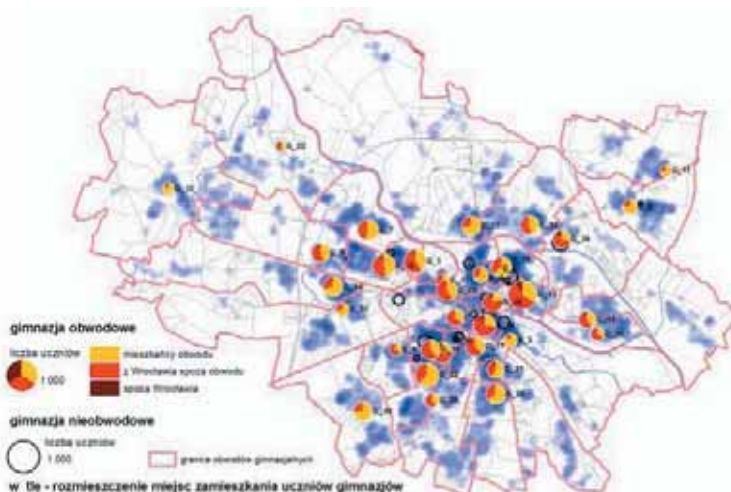


Rys. 2. Uśrednione rozkłady długości podróży dom-szkola uczniów czterech typów szkół ponadgimnazjalnych z wyróżnieniem podróży z Wrocławia i spoza Wrocławia

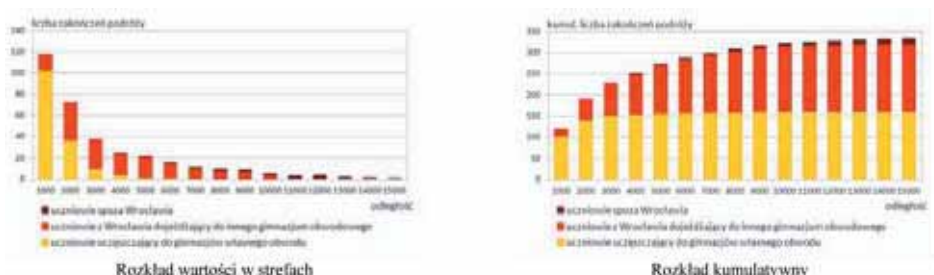


W dalszej części artykułu, gdzie będą prezentowane rozkłady rzeczywiste i modelowe dla poszczególnych szkół, stosowane będą rozkłady kumulatywne. Przyjmuje się powszechnie, że rozkład podróży jest funkcją odległości, i choć poszczególne przemieszczenia są wynikiem indywidualnych preferencji i decyzji osób podejmujących podróż, to jednak odległość pozostała kluczowym czynnikiem stosowanym do modelowego opisu zachowań zbiorowości.

Dojazdy były zliczane w strefach kilometrowych do 20 km i 5-cio kilometrowych przy dojazdach dalszych. Dystans był liczony wzdłuż sieci ulicznej, bez różnicowania prędkości przemieszczania na odcinkach. W badaniach podróży do szkoły gimnazjalistów rozdzielono uczniów gimnazjów obwodowych i nieobwodowych. Jak widać z map i wykresów (rys. 3, 4) gimnazja obwodowe mają znaczący udział uczniów spoza obwodu. Szczególnie dotyczy to gimnazjów sytuujących się w centrum miasta. Większy udział uczniów spoza Wrocławia często łączy się z zamieszkiwaniem w internacie.

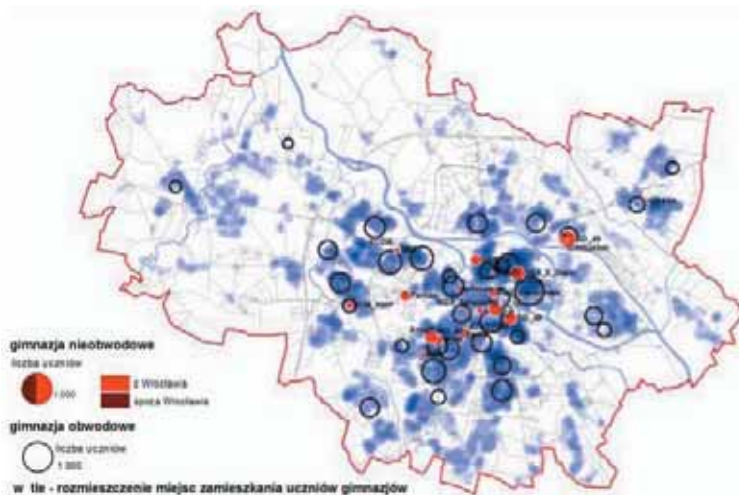


Rys. 3. Rozmieszczenie i wielkość gimnazjów obwodowych na tle rozmieszczenia uczniów wszystkich gimnazjów



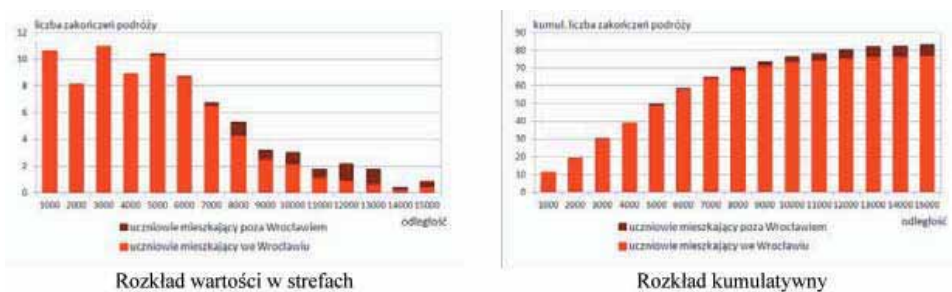
Rys. 4. Usrednione rozkłady długości podróży dom-szkoła uczniów gimnazjów obwodowych





Rys. 5. Rozmieszczenie i wielkość gimnazjów nie obwodowych na tle rozmieszczenia uczniów wszystkich gimnazjów

Przedstawione na rys. 5 gimnazja nie obwodowe mają charakter bardziej specjalistyczny (artystyczny, dwujęzyczny, wyznaniowy itp.) i, jak potwierdza rozkład długości podróży do szkół (rys.9), zbierają swych uczniów nie tylko z sąsiedztwa, ale z całego obszaru miasta.



Rys. 6. Uśrednione rozkłady długości podróży dom-szkola uczniów gimnazjów nie obwodowych

### 3. Odwzorowania rozkładu przemieszczeń uczniów za pomocą dwóch modeli zachowań przestrzennych

Próbę odwzorowania rozkładu przemieszczeń uczniów przedstawiono za pomocą dwóch podstawowych modeli zachowań przestrzennych: modelu grawitacji i modelu pośrednich możliwości („intervening opportunities” - MIO). W ramach przeprowadzonych badań wykonano identyfikację parametrów modeli teoretycznych dla wszystkich wrocławskich szkół stopnia gimnazjalnego i ponadgimnazjalnego. Celem badań było sprawdzenie stopnia dopasowania (zgodności) modeli z danymi empirycznymi i w konsekwencji porównanie jakości obu typów modeli.

Podstawę wszystkich odmian modelu grawitacji stanowi prosta formuła J. Stuarta (J. Stuart, 1948) i G. Zipfa (Zipf, 1949) wyrażająca podstawowe zależności między wielkościami opisującymi przestrzeń osadniczą i siłę oddziaływania (1).

$$T_{ij} = k \frac{O_i * D_j}{d_{ij}^2} \quad (1)$$

gdzie:

- $T_{ij}$  – wielkość strumienia podróży z obszaru  $i$  do  $j$ ,
- $O_i$  – wielkość źródła w obszarze  $i$ ,
- $D_j$  – liczba celów podróży w obszarze  $j$ ,
- $d_{ij}$  – odległość pomiędzy obszarami  $i, j$ ,
- $k$  – współczynnik skalujący.

Jednak wszystkie współczesne postacie modelu grawitacji przyjmują bardziej ogólną postać (2):

$$T_{ij} = k * f(O_i) * g(D_j) * h(d_{ij}) \quad (2)$$

gdzie  $f, g$  i  $h$  to funkcje zmiennych reprezentujących odpowiednio źródła podróży, okazje stanowiące cele podróży i odległości. Model grawitacji w formie klasycznej jest praktycznie nie stosowany z powodu słabej zdolności dopasowania do danych empirycznych. Stosowane funkcje  $f, g$  i  $h$  pozwalają dobrze dopasować model do danych pochodzących z pomiaru przepływów (R. Flowedew, 1982, L. De Benedictis, 2011).

W jednej z powszechnie występujących postaci modelu grawitacji funkcje  $f, g$  i  $h$  przyjmują postać hiperboliczną. W takiej formule modelu pojawiają się trzy współczynniki  $\alpha, \beta, \gamma$  (3). Ta odmiana wzoru została przyjęta jako jeden z dwóch testowanych przez autorów wariantów modelu grawitacji: modelu grawitacji hiperbolicznego (MGH). W pracy szczególne zainteresowanie autorzy przywiązywali do parametru  $\alpha$ , który pełni rolę regulatora funkcji odległości.

$$T_{ij} = k * O_i^\beta * D_j^\gamma * d_{ij}^\alpha \quad (3)$$

Drugi testowany wariant modelu grawitacji różni się od pierwszego tylko postacią funkcji odległości (4). W tym przypadku zastosowano odmianę funkcji oporu odległości pochodzącą od A.G. Wilsona to jest funkcję wykładniczą z parametrem  $a$  regulującym siłę oporu odległości. Dla tej odmiany modelu używana jest dalej nazwa: model grawitacyjny wykładniczy (MGW).

$$T_{ij} = k * O_i^\beta * D_j^\gamma * \exp(a * d_{ij}) \quad (4)$$

W przypadku modelu „intervening opportunities” (Zipser, 1988) podstawową formułę modelu przedstawia wzór (5):

$$T_{ij} = k * O_i \left[ e^{-sA_{ij}} - e^{-s(A_{ij}+D_j)} \right] \quad (5)$$

gdzie:

$O_i$  – wielkość źródła w obszarze  $i$ ,

$D_j$  – liczba celów podróży w obszarze  $j$ ,

$A_{ij}$  – liczba okazji pośrednich (leżących bliżej źródła podróży  $i$  niż okazje w obszarze  $j$ ,

$s$  – selektywność kontaktu,

$k$  – nasilenie kontaktu.

W formule tej jak widać występują tylko dwa parametry  $s$  i  $k$ . Wyrażenie w nawiasie kwadratowym wzoru (5) określa wartość prawdopodobieństwa zakończenia podróży w okazjach  $D_j$  obszaru  $j$ . Wartość tego prawdopodobieństwa obliczona jest jako różnica wartości dystrybuanty rozkładu wykładniczego dla obszaru penetracji wokół źródła podróży obejmującego okazje obszaru  $j$  (cele  $A_{ij} + D_j$ ) i obszaru penetracji poprzedzającego okazje obszaru  $j$  ( $A_{ij}$ ).

Za podstawę analiz przyjęto alternatywną formułę modelu „intervening opportunities”, w której oblicza się liczbę podróży  $T_{iX}$  ze źródła  $i$  (w którym rozpoczyna się  $k * O_i$  podróży), do obszaru ograniczonego izochroną kosztu pokonania przestrzeni zawierającego  $X$  okazji. Wielkość strumienia podróży jest równa (6) iloczynowi dystrybuanty rozkładu wykładniczego i wielkości strumienia podróży rozpoczynającego się w obszarze źródłowym  $k * O_i$ .

$$T_{iX} = k * O_i \left[ 1 - e^{-sX} \right] \quad (6)$$

Dzieląc obie strony równania przez ( $k * O_i$ ) dostajemy wzór na prawdopodobieństwo zakończenia podróży w obszarze zawierającym  $X$  okazji (7).

$$P_{iX} = \left[ 1 - e^{-sX} \right] \quad (7)$$

Ta właśnie formuła została przyjęta jako podstawa kalibracji modelu „intervening opportunities”. Warto zauważyć, że ta formuła zawiera tylko jeden parametr  $s$  zwany selektywnością kontaktu.

Kalibrację obu typów modeli przeprowadzono w oparciu o empiryczne rozkłady podróży powrotnych ze szkół do domu. Źródłem podróży są szkoły, których wielkość  $O_i$  to liczba uczniów szkół. Liczba celów podróży (okazji) obliczana jest na podstawie rozmieszczenia miejsc zamieszkania uczniów na terenie Wrocławia (z dokładnością do adresu zamieszkania lub zameldowania każdego z uczniów).

Kalibrację modeli wykonano przy pomocy metody regresji liniowej. W celu przeprowadzenia kalibracji, równania (3), (4) i (7) przekształcono odpowiednio do postaci (8), (9), (10), to jest:

dla modelu „intervening opportunities”:

$$\ln(T_{ij}) = \ln(k) + \beta \ln(O_j) + \gamma \ln(D_j) + \alpha \ln(d_{ij}) \quad (8)$$

dla modelu grawitacji z paraboliczną funkcją odległości:

$$\ln(T_{ij}) = \ln(k) + \beta \ln(O_j) + \gamma \ln(D_j) + \alpha d_{ij} \quad (9)$$

dla modelu grawitacji z wykładniczą funkcją odległości:

$$\ln(1 - P_{iX}) = sX \quad (10)$$

W celu wykonania kalibracji, wszystkie trzy wzory sprawdzono, przez zamiast zmiennych, do postaci funkcji liniowej o następującej postaci:

$$y = c_0 + c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + \varepsilon \quad (11)$$

Estymację wartości oczekiwanej zmiennej  $y$  wykonano metodą najmniejszych kwadratów, która prowadzi do estymacji współczynników  $c_i$  modelu statystycznego (11).

Analizy przeprowadzono dla 83 spośród wszystkich 97 szkół ponadgimnazjalnych (dla których dostępne były dane) oraz dla 65 szkół stopnia gimnazjalnego.

#### 4. Wyniki analiz

W artykule przedstawiono tylko wybrane wyniki analiz reprezentujące zaobserwowane charakterystyczne prawidłowości. Każdy z zamieszczonych rysunków dla wybranych szkół (rysunki od 7 do 9) zawiera 4 sekcje ułożone piętrowo, po dwa rysunki w każdej sekcji. W sekcji pierwszej (górnej) każdego z rysunków umieszczono graf rzeczywistego przestrzennego rozkładu kontaktów dla danej szkoły na tle mapy rozmieszczenia miejsc zamieszkania młodzieży szkolnej oraz wykres rozkładu zakończeń podróży w strefach odległości. W pozostałych trzech sekcjach pokazano kumulatywne rozkłady modelowe (dla trzech testowanych modeli) na tle kumulatywnych rozkładów rzeczywistych. W każdej z trzech sekcji rozkłady podróży pokazano w dwóch różnych przestrzeniach: przestrzeni odległości (strona prawa) i przestrzeni okazji (strona lewa). Na każdym wykresie umieszczono legendę zawierającą akronim szkoły, której rozkład kontaktów jest przedstawiony (wykres niebieski) oraz wartość parametru oporu odległości dla modelu, którego rozkład modelowy jest zamieszczony (kolor czerwony). W dolnej części rysunku zamieszczono tablicę wskaźników oceny stopnia dopasowania modeli do rozkładów rzeczywistych.

W tablicy umieszczono trzy wybrane wskaźniki oceny jakości dla każdego z trzech modeli:

- **Błąd standardowy (BS)** - odchylenie standardowe błędu prognozowanych wartości (modelowych) do wartości rzeczywistych zakończeń podróży.
- **Współczynnik determinacji  $R^2$  ( $R^2$ )** – jedna z podstawowych miar jakości dopasowania modelu, zwraca kwadrat korelacji iloczynu momentów Pearsona dla punktów, których jedna ze współrzędnych pochodzi z danych empirycznych a druga z estymowanych.
- **Test F (TF)** - test sprawdzający czy wariancje danych rzeczywistych i wartości estymowanych nie różnią się znacznie od siebie.

Na rys. 7 przedstawiono wyniki estymacji parametrów modeli kontaktów dla Liceum Ogólnokształcącego nr XIV (LO14) dla którego uzyskano dobre dopasowanie wszystkich trzech modeli, przy czym najlepszy okazał się hiperboliczny model grawitacji. Błąd BS udziału zakończeń podróży wynosi zaledwie 0.016, również pozostałe wskaźniki potwierdzają wysoki poziom dopasowania (patrz wskaźniki dopasowania w tablicy na rys. 7). Najgorszym z trzech okazał się model *intervening opportunities*, choć i jego wskaźniki dopasowania są przyzwoite.

Warto zauważyć dość regularną krzywą udziału zakończeń podróży dla LO14 w przestrzeni odległości, co skutkuje wyraźnie gładkim przebiegiem charakterystyki rozkładu kumulatywnego w przestrzeni odległości, jednak zdecydowanie wyższą regularność objawia wykres rozkładu kumulatywnego w przestrzeni okazji. Ta charakterystyka o wypukłym kształcie powtarza się bardzo wyraźnie w wielu innych przypadkach. Regularność rozkładu empirycznego w przestrzeni okazji pozwala na dobre, a czasem bardzo dobre, dopasowanie modelu „*intervening opportunities*”, mimo że model ten w porównaniu z wielo-parametrowym modelem grawitacji dysponuje tylko jednym parametrem  $s$ .

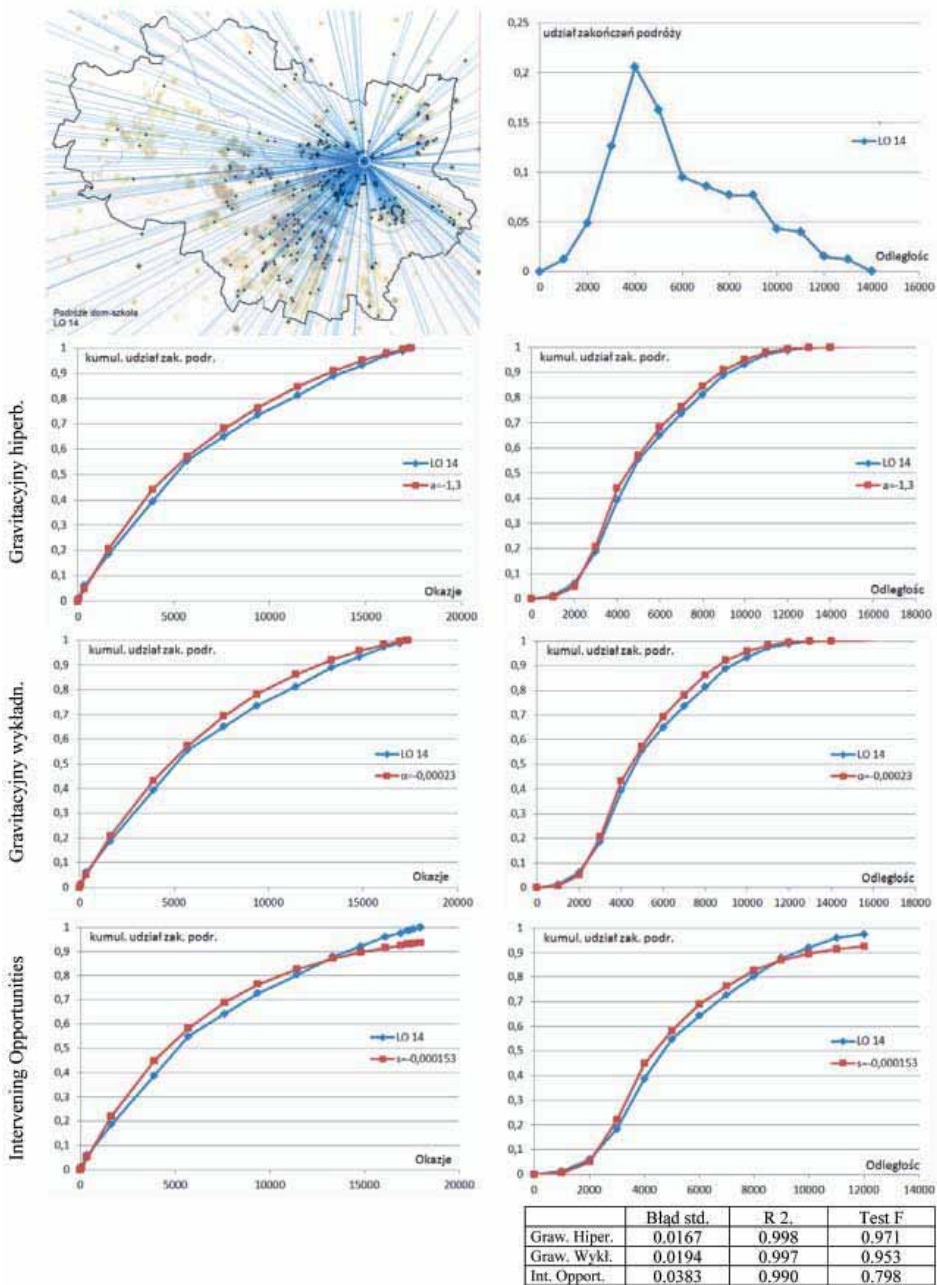
Nieco inaczej przedstawiają się wyniki estymacji dla Liceum Ogólnokształcącego nr XI (LO11) przedstawione na rys. 8. Tu najlepszym okazał się model MGW (błąd BS równy 0.016 oraz wysokie wartości wskaźników  $R^2$  i TF), a nieco gorszym, lecz nadal dobrze dopasowanym, model *intervening opportunities*. Model MGH znacznie odbiega od pozostałych, dużą wartością błędu BS (0.07) i słabej wartości wskaźnika TF. Przyczyny tego stanu należy szukać w specyficznej lokalizacji szkoły w stosunku do miejsc zamieszkania młodzieży w wieku ponadgimnazjalnym. Położenie LO11 ma charakter „wyspowy” – w rzeczywistości i w przenośni. Liceum znajduje się na terenie „Wielkiej Wyspy” o dużym udziale terenów rekreacyjnych i zielonych, ponadto sama wyspa otoczona jest z trzech stron szerokim pasem terenów zielonych, korytem rzeki Odry, jej kanałami i terenami zalewowymi o bardzo niskim lub zerowym nasyceniu mieszkalnictwem. Skutek tej sytuacji jest wyraźnie widoczny w nierównomiernym rozkładzie czarnych punktów stanowiących wierzchołki grafu podróży uczniów w kontakcie szkoła – dom i bardzo wyraźnie widoczny na wykresie udziału zakończeń podróży w postaci bardzo dużej nieregularności liczby zakończeń podróży w strefach, w tym widocznej głębokiej depresji w pierścieniu odległości 2 do 4 km od szkoły. Tymczasem obserwując wykres kumulatywny w przestrzeni okazji widać wyraźną regularność

polegającą na stopniowym, równomiernym spadku tempa wzrostu udziału zakończeń podróży wraz ze wzrostem przestrzeni okazji (wypukła linia przypominająca kształtem dystrybuantę rozkładu wykładniczego).

Ostatnią z omawianych tu szkół stopnia ponadgimnazjalnego jest Technikum nr X (T10). Na rys. 9, sekcja 1 widać dość regularny rozkład zakończeń podróży dla tej szkoły. Szkoła ma dogodne położenie w centralnej części miasta z dobrymi połączeniami komunikacją miejską. T10 z profilem elektronicznym i informatycznym ma dobrą renomę, co powoduje, że rekrutuje uczniów nawet z odległych części miasta. Z powodu braku wyraźnej konkurencji na rynku ofert nauczania w dziedzinie elektroniki i informatyki poziom zainteresowania szkołą jest tylko w niewielkim stopniu zależny od odległości. To potwierdza kształt wykresu kumulatywnego w przestrzeni okazji – wypukły, ale zbliżony do liniowego. Z tą sytuacją dużo lepiej radzi sobie model grawitacyjny, zarówno MGH jak i MGP. Błąd  $BS \leq 0.014$  i wskaźnik  $R^2 \geq 0.998$ , to bardzo dobry wynik. Wyraźnie gorzej wypada natomiast model MIO z błędem  $BS = 0.06$  i wyraźnie gorszymi wskaźnikami  $R^2$  i TF.

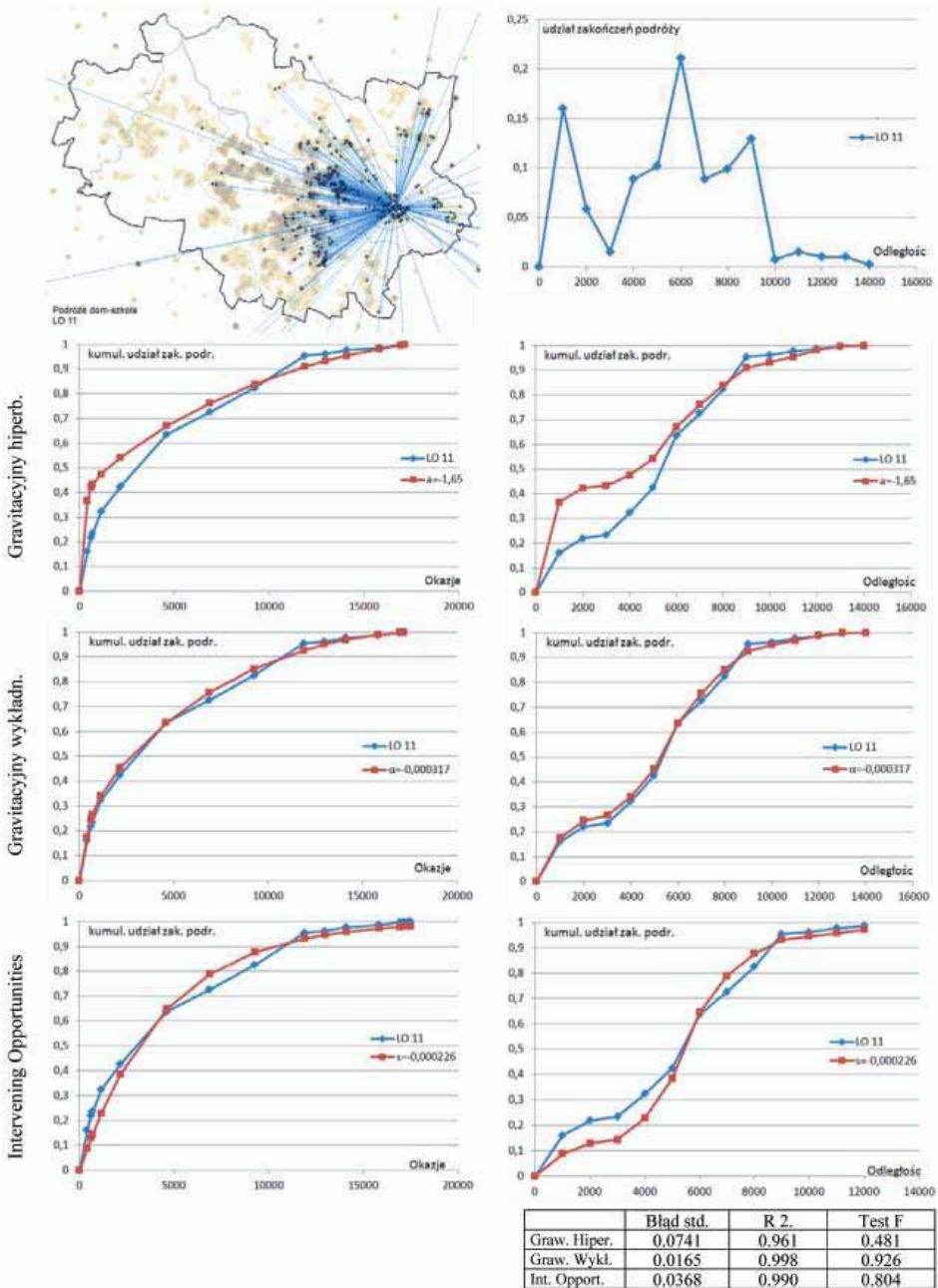
W podsumowaniu wyników analiz rozkładów podróży dla szkół ponadgimnazjalnych nasuwa się kilka wniosków. Żaden z trzech testowanych modeli nie może być uznany za lepszy w każdej sytuacji od pozostałych. Modele MGH i MGP są lepsze w przypadku szkół, które posiadają unikalną ofertę (profil muzyczny, plastyczny, językowy, itp.) i w mniejszym stopniu konkurują o ucznia z innymi placówkami szkolnymi, lepiej radzą sobie również w sytuacjach niejednorodnego przestrzennie poziomu „pobudzenia okazji”, tj. zróżnicowanego poziomu zainteresowania określonego typu ofertą w różnych obszarach miasta (przykład LO3 położonego w obszarze zamieszkałym przez ludność o niższym statusie społecznym). Tymczasem model MIO daje dużo lepsze rezultaty niż modele grawitacyjne, gdy występuje znaczne zróżnicowanie gęstości miejsc zamieszkania uczniów (gęstości okazji) w przestrzeni miejskiej lub pojawiają się silne bariery przestrzenne silnie deformujące strukturę dostępności. Efekt ten jest szczególnie widoczny, gdy tego typu zaburzenia występują w niedalekim sąsiedztwie szkoły. Model MIO bardzo dobrze odtwarza rozkład podróży, gdy decyzja o wyborze celu podróży podejmowana jest w warunkach wolności wyboru w obszarze, w którym występują alternatywne, konkurencyjne oferty. Ta cecha modelu wynika zresztą wyraźnie z doktryny stojącej u podstaw modelu MIO.



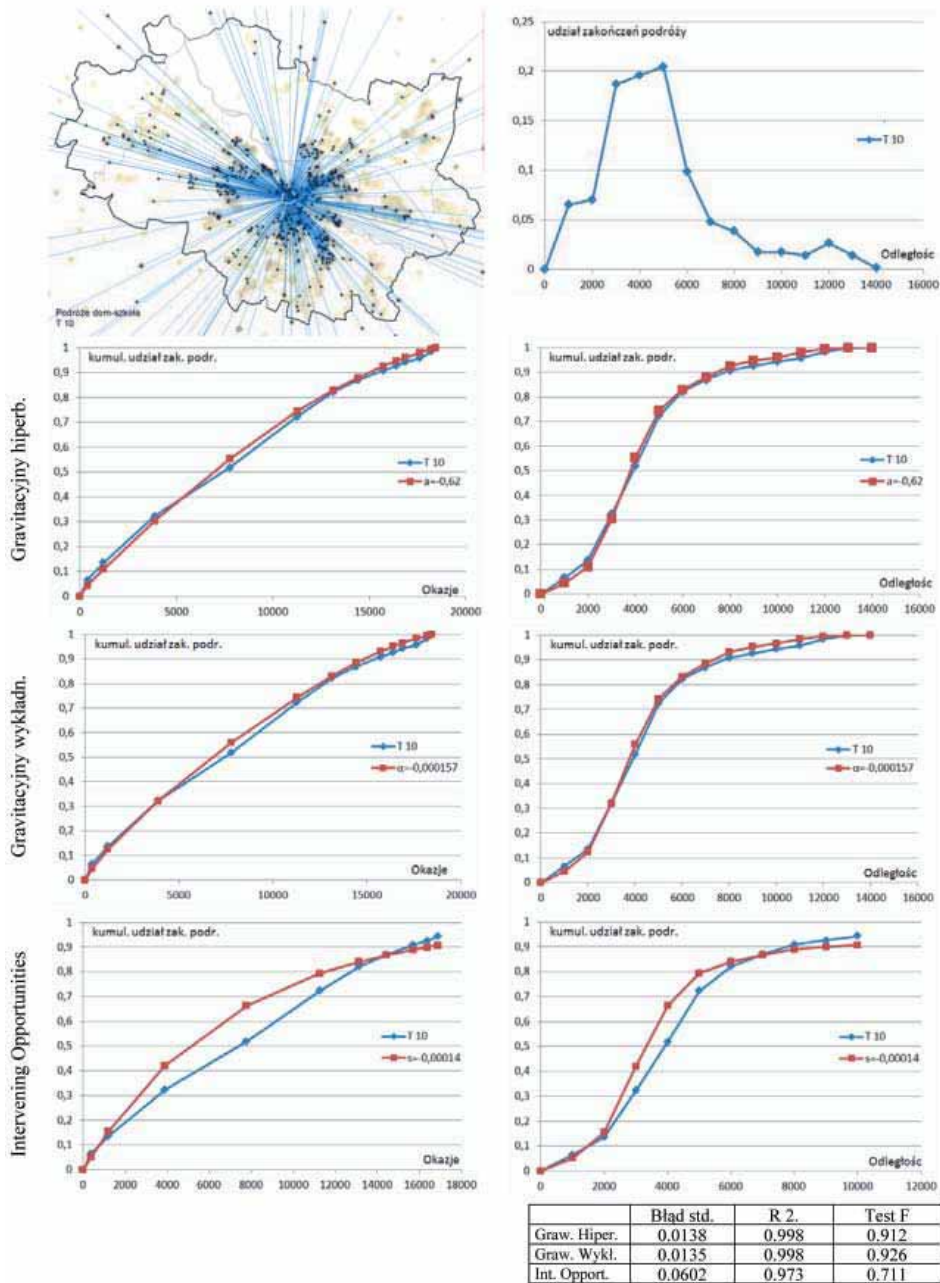


Rys. 7. Rozkład podróży szkoła – dom i trzy modele rozkładu rzeczywistego dla Liceum Ogólnokształcącego Nr 14 we Wrocławiu





Rys.8. Rozkład podróży szkoła – dom i trzy modele rozkładu rzeczywistego dla Liceum Ogólnokształcącego Nr 11 we Wrocławiu



Rys.9. Rozkład podróży szkoła – dom i trzy modele rozkładu rzeczywistego dla Technikum nr 10 we Wrocławiu

W analizie wyników zwrócono uwagę na wartości parametrów oporu odległości. Wyniki porównawcze przedstawiono w tab. 1. W przypadku modelu MIO wartość średnia parametru  $s$  wynosi  $-0.000143$  z niezłym skupieniem wyników wokół wartości średniej (odchylenie standardowe SD). Wartość średnia (M) dla modelu MGH wynosi  $-0.659$  a dla modelu MGP  $-0.000116$ , przy czym wahania wartości parametru dla różnych szkół są bardzo duże (patrz parametry SD w tab. 1).

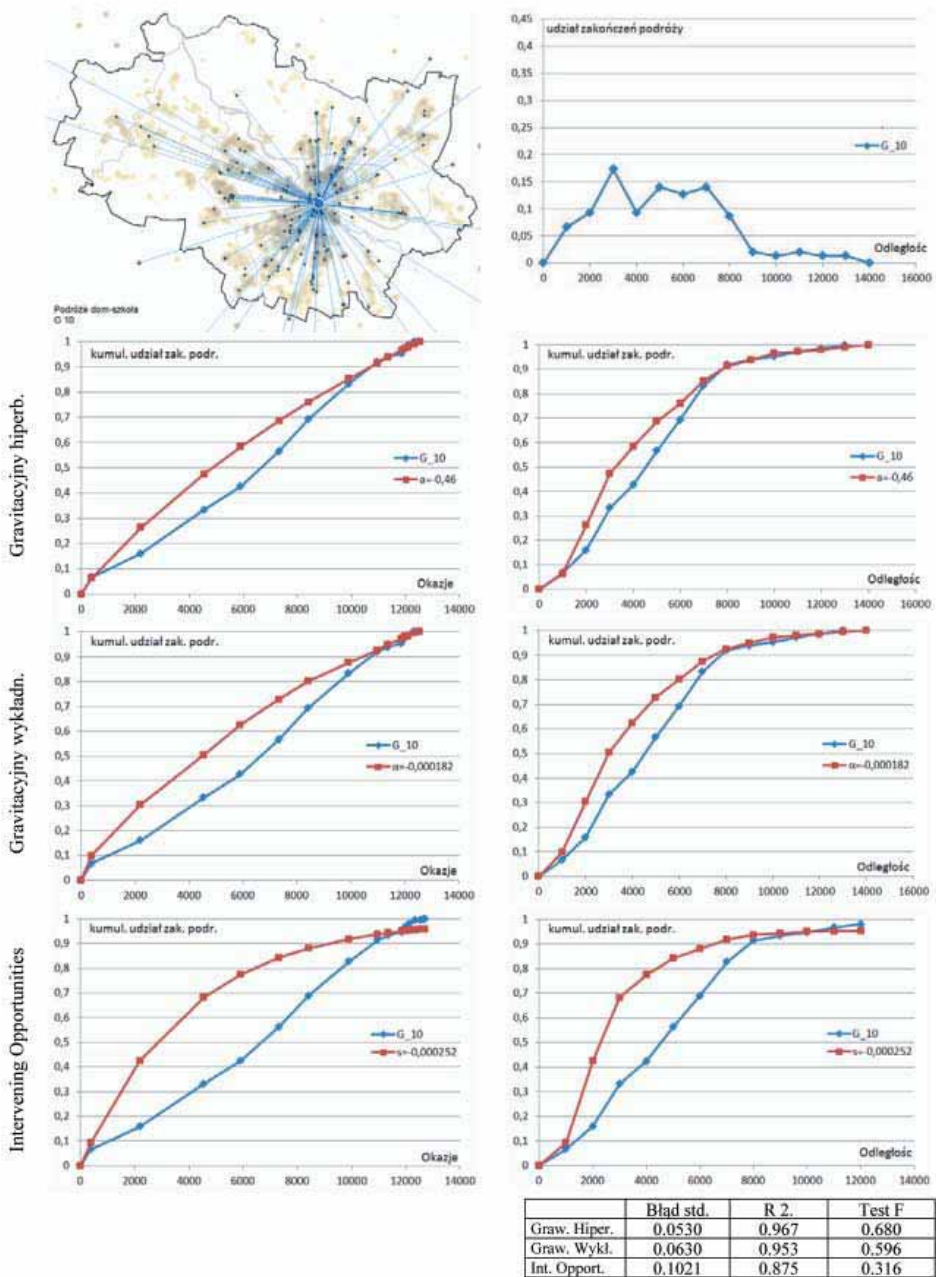
Dodatkowo wykonano analizę dwóch podgrup szkół ponadgimnazjalnych: grupy szkół położonych nisko w rankingach szkół oraz grupy szkół o unikalnym profilu lub wysoko w rankingach. Wartości średnie oraz odchylenia można znaleźć w tab. 1. W przypadku modelu MIO można zauważyć bardzo dobre skupienie wartości parametru oporu odległości wokół wartości średnich, natomiast estymacja modeli MGH i MGP daje znacznie większy rozrzut parametru oporu odległości. W przypadku obu grup szkół, podobnie jak dla wszystkich szkół, utrzymuje się wysoka wartość odchylenia SD.

Tabl. 1. Statystyki parametru oporu odległości dla modeli MGH, MGP i MIO

Grupa szkół		statystyka	symbol	$\alpha$ (MGH)	$\alpha$ (MGP)	$s$ (MIO)	
ponadgimnazjalne	wszystkie	wartość średnia	M	-0,659	-0,000116	-0,000143	
		odchyl. standard.	SD	0,488	0,000129	0,000037	
		wartość minimum	Min	-1,713	-0,000333	-0,000226	
		wartość maksimum	Max	0,125	0,000187	-0,000085	
	nisko w rankingu	wartość średnia	M	-1,332	-0,000278	-0,000205	
		odchyl. standard.	SD	0,361	0,000072	0,000020	
	o unikalnym profilu	wartość średnia	M	-0,325	-0,000012	-0,000110	
		odchyl. standard.	SD	0,273	0,000090	0,000011	
	gimnazja	wszystkie	wartość średnia	M	-1,142	-0,000242	-0,000332
			odchyl. standard.	SD	0,670	0,000146	0,000094
wartość minimum			Min	-2,365	-0,000498	-0,000520	
wartość maksimum			Max	-0,188	-0,000025	-0,000228	
obwodowe		wartość średnia	M	-1,637	-0,000356	-0,000392	
		odchyl. standard.	SD	0,428	0,000091	0,000088	
nieobwodowe		wartość średnia	M	-0,647	-0,000128	-0,000260	
		odchyl. standard.	SD	0,461	0,000084	0,000024	

Przeprowadzono również analizy rozkładów podróży dla szkół poziomu gimnazjalnego.

W przypadku Gimnazjum nr 10 (rys. 10) widać wyraźne rozciągnięcie wykresu udziału zakończeń podróży. Charakterystyki kumulatywne w początkowej części wykresu mają kształt wyraźnie zbliżony do liniowego. Podobnie jak dla Gimnazjum nr 1, żaden z modeli nie odtwarza dobrze charakterystyk empirycznych, ale znowu najlepiej robi to model MGH, a najgorzej MIO. Tym razem nieskuteczność modelu MIO bierze się stąd, że szkoły o unikalnym profilu nie działają w warunkach konkurencji o ucznia o bardzo ukierunkowanych oczekiwaniach i czynnik oporu odległości w obszarze do około 8 km od szkoły ma nieznaczny wpływ na zachowanie uczestników kontaktu.



Rys. 10. Rozkład podróży szkoła – dom i trzy modele rozkładu rzeczywistego dla Gimnazjum Dwujęzycznego nr 10 (nie obwodowe)

## 5. Podsumowanie

Z przeprowadzonych analiz wynika, że użyte w opracowaniu modele grawitacyjne lepiej odtwarzają rozkłady zakończeń podróży poszczególnych szkół, przy czym lepsze rezultaty uzyskano dla szkół ponadgimnazjalnych. Modele te jednak mają ograniczoną skuteczność w sytuacji silnego zróżnicowania gęstości celów, kontaktów i występowania barier silnie deformujących dostępność przestrzenną. Model „intervening opportunities” w licznych przypadkach słabiej odwzorowuje rozkłady rzeczywiste, wyraźne problemy tego modelu pojawiają się w sytuacjach, gdy z różnych powodów proces wolnego wyboru celu jest zaburzony. Natomiast model ten nie jest wrażliwy na niejednorodności pola penetracji (zróżnicowanie gęstości okazji, bariery przestrzenne). MIO daje bardzo dobre rezultaty, jeśli źródła podróży działają w warunkach swobody wyboru celu i to niezależnie od stopnia złożoności struktury przestrzennej. Niewątpliwą zaletą modelu MIO jest również prostota (jeden parametr) oraz powtarzalność wartości parametru (małe odchylenia od wartości oczekiwanej) dla wielu przypadków o podobnej charakterystyce kontaktów.

## Literatura

- [1] De Benedictis L., Taglioni D., *The Gravity model in International Trade. The Trade Impact of European Union Preferential Policies*, Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [2] Flowerdew R., *Fitting the Lognormal Gravity Model to Heteroscedastic Data*. Ohio State University Press, *Geographical Analysis* vol.14 no 3 July 1982.
- [3] Stewart J.Q., *Demographic Gravitation: Evidence and Application*. Sociometry, Vol. XI, pp 31-58, 1948.
- [4] Zipf G.K., *The P1P2/D hypothesis: on the inter-city movements of persons*. *American Sociological Review*, 11, 677-86, 1946.
- [5] Zipf G.K. (1949), *Human Behaviour and the Principle of Least Effort*. Cambridge, Mass.
- [6] Zipser T., Sławski J., *Modele procesów urbanizacji, Teoria i jej wykorzystanie w praktyce*. PWE, Warszawa, 1988.

## DOŚWIADCZENIA ZAGRANICZNE W MODELOWANIU RUCHU ZWIĄZANEGO Z WYKORZYSTANIEM CZASU WOLNEGO

---

**Mariusz Dudek**

dr inż., adiunkt, Instytut Inżynierii Drogowej i Kolejowej, Politechnika Krakowska, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, tel. +48 12 628 2028, e-mail: mariusz@transys.wil.pk.edu.pl

---

**Streszczenie.** *Artykuł zawiera przegląd literaturowy odnośnie modelowania ruchu związanego z czasem wolnym. Dotychczas w Polsce to zagadnienie nie zostało szczegółowo zbadane, a w opracowywanych modelach ruchu było traktowane bardzo ogólnikowo. Tymczasem jak pokazują badania niemieckie i szwajcarskie ruch związany z czasem wolnym stanowi około 1/4 podróży w ciągu dnia roboczego, a w dni wolne od pracy stanowi większość podróży. Przedstawiono wyniki badań dotyczące rozkładu czasowego i przestrzennego podróży związanych ze spędzaniem czasu wolnego oraz wyspecyfikowano czynniki wpływające na te parametry. Dodatkowo pokazano w tym artykule szereg czynników związanych ze specyfiką danego kraju (np. w Polsce – możliwość zakupów przez wszystkie dni tygodnia), ale także poszczególnych miast i miejscowości. W oparciu o modele dla warunków niemieckich i szwajcarskich stwierdzono konieczność uwzględnienia w modelach opracowywanych dla warunków polskich czynników socjo-ekonomicznych, których pozyskanie będzie niezwykle trudne.*

**Słowa kluczowe:** *modelowanie ruchu, ruch związany z wykorzystaniem czasu wolnego*

### Wprowadzenie

Podróże związane ze spędzaniem czasu wolnego stanowią coraz większe wyzwanie zarówno dla specjalistów z dziedziny urbanistyki czy rozwoju układów transportowych. Badania przeprowadzone w Szwajcarii określiły, że każdego dnia 7,7 mln jej mieszkańców realizuje podróże związane ze spędzaniem czasu wolnego o pracy przewozowej 60 mln osobokilometrów [1], które stanowią prawie 1/4 pracy przewozowej całego układu transportowego. Zagospodarowanie tego potencjału stanowi poważne wyzwanie także dla transportu zbiorowego. W związku z tym niezwykle ważne jest poznanie mechanizmów związanych z powstawaniem ruchu tej kategorii.

Pod pojęciem ruchu czasu wolnego definiuje się każdy ruch związany z czasem wolny poświęcony wypoczynkowi czy też urozmaiceniu życia codziennego [10]. Z tego punktu widzenia do tej kategorii ruchu nie zaliczamy podróży związanych z nieopłaconą pracą: praca w domu, opieka nad dziećmi czy osobami starszymi, niepłatna praca w różnych organizacjach czy gremiach politycznych. Jako ruch



czasu wolnego nie należy traktować podróży związanych z zakupami. Jednakże jak pokazały badania przeprowadzone w szwajcarskich centrach handlowych [3] znaczna część osób je odwiedzających po dokonaniu w nich zakupów spędza czas w sposób zaliczany do form czasu wolnego – dotyczy to 35% klientów centrów handlowych. Dlatego też w niniejszym referacie poruszone zostaną aspekty podróży związanych z zakupami.

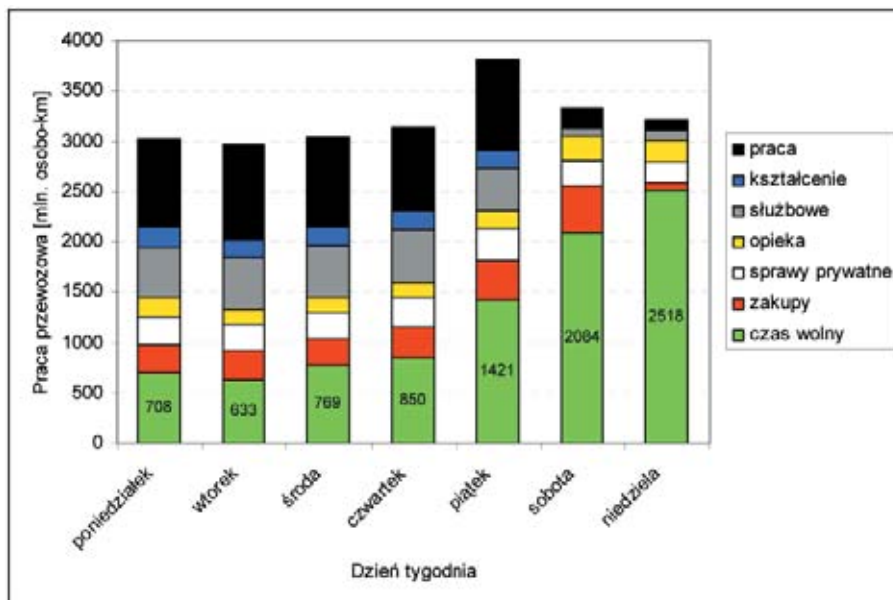
Również w Niemczech duże znaczenie odgrywa ruch związany ze spędzaniem czasu wolnego [4]. Według ostatnich badań podróże związane ze spędzaniem czasu wolnego stanowią obecnie 32% ogółu podróży, a związane z zakupami – 21%. Ich udział w ostatnich latach (2002 - 2008) systematycznie rośnie. Rośnie także bezwzględna liczba wykonywanych podróży w tym celu: podróży związanych z czasem wolnym o 7%, a z zakupami o 9%.

Czynnikiem wpływającym na intensywność podróży danym obszarze rekreacyjnym jest jakość jego środowiska [5]. Czynniki, jakie wówczas uwzględniają potencjalni użytkownicy tych obszarów, są: zanieczyszczenie powietrza, poziom hałasu, czy efekt rozcięcia przez infrastrukturę transportową, która ze względu na swój liniowy charakter może często stanowić trudną do przekroczenia barierę. Także jakość krajobrazu naturalnego czy też miejskiego i ewentualne jego zaburzenia mają wpływ na intensywność wykorzystania danego obszaru w ruchu związanym z czasem wolnym.

### Wpływ dnia tygodnia na ruch związany ze spędzaniem czasu wolnego

Jak łatwo się domyślić istotny wpływ na wielkość ruchu związanego z czasem wolnym ma dzień tygodnia. W dni robocze czasem wolnym dysponuje się dopiero po zakończeniu podróży obligatoryjnych związanych z pracą czy nauką. Mimo wszystko istotna część podróży w tych dniach związana jest z czasem wolnym. W dni wolne od pracy istnieje pełna dowolność w kształtowaniu czasu i większość podróży związana jest z jego spędzaniem. Zgodnie bowiem z definicją podróże związane z zakupami nie są wliczane do podróży związanych ze spędzaniem czasu wolnego. Badania przeprowadzone w Niemczech wykazały potwierdzenie tej tezy [4]. Na ich podstawie można stwierdzić, że liczba podróży związanych z czasem wolnym w dni robocze ulega nieznacznym wahaniom: najmniejsza jest w poniedziałki i wtorki, gdy wynosi ona 72 mln co stanowi 24% ogółu podróży, następnie w kolejne dni sukcesywnie narasta by w piątek osiągnąć wartość 88 mln i 29% udział wśród wszystkich podróży. W soboty liczba podróży związanych z czasem wolnym znacznie rośnie i wynosi 110 mln, co daje udział 43% w ogóle podróży. W niedziele natomiast aż 135 mln podróży związanych ze spędzaniem czasu wolnego, co stanowi aż 70% wśród wszystkich podróży odbywanych w tym dniu. Nieco odmiennie zmienność ta przedstawia się, gdy analizą obejmujemy pracę przewozową sieci transportowej (rys. 1).



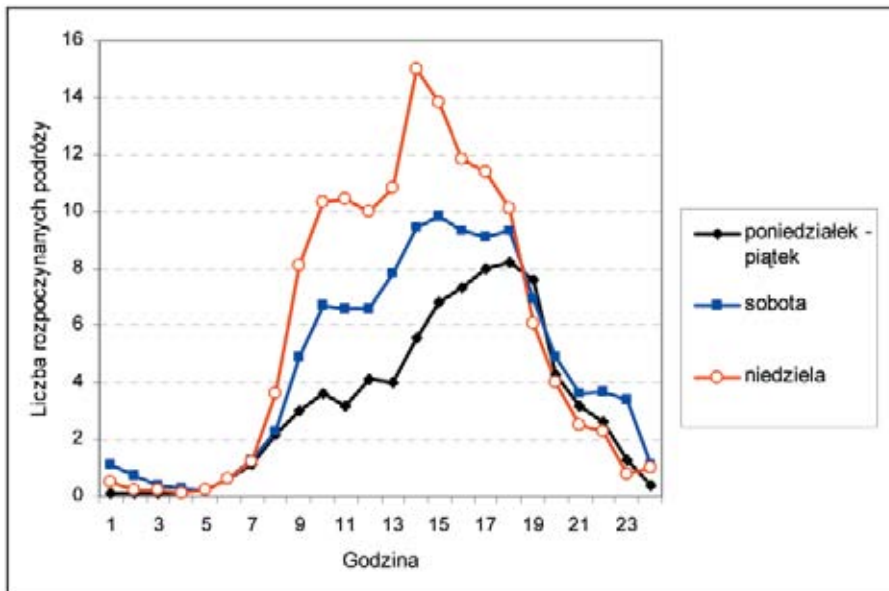


Rys. 1. Zmienność pracy przewozowej w sieci transportowej Niemiec w poszczególne dni tygodnia [4]

Analizując wielkość pracy przewozowej ogółem, ale także dla podróży związanych ze spędzaniem czasu wolnego, w poszczególne dni tygodnia ulega znacznym wahaniom. Od poniedziałku do czwartku zmienność wartości jak i udziału ulega pewnym nieznacznym wahaniom – najmniejsza jest we wtorek i wynosi 633 mln pojkm (udział 21,4%), a największa w czwartek – 850 mln pojkm (udział 27%). Znaczący wzrost pracy przewozowej dla podróży czasu wolnego obserwuje się już w piątek – 1421 mln pojkm (udział 37,4%) (podróże innych kategorii oprócz zakupów nie powodują w tym dniu większej pracy przewozowej). Bardzo duży wzrost pracy przewozowej związanej ze spędzaniem czasu wolnego następuje w soboty, gdy osiąga on wartość 2084 mln pojkm (udział 62,7%). Największą pracę przewozową generują podróże czasu wolnego w niedziele – wówczas osiąga ona wartość 2518 mln pojkm (udział 78,3%).

Cykliczne badania zachowań komunikacyjnych w Niemczech [4] umożliwiły również przeanalizowanie rozkładu czasu rozpoczęcia podróży związanych z czasem wolnym (rys. 2). W dni robocze (poniedziałek – piątek) liczba rozpoczynanych podróży narasta stopniowo od godzin porannych i swoje maksimum osiąga około godziny 18-tej, gdy zaczyna się ok. 4 mln podróży. Następnie bardzo szybko liczba ta spada. W soboty natomiast liczba rozpoczynanych podróży czasu wolnego także narasta od godzin porannych, jednakże bardziej intensywnie do godziny 10-tej, gdy następuje stabilizacja liczby rozpoczynanych podróży. Ponownie liczba ta zaczyna narastać od godziny 12-tej by ok. 15-tej osiągnąć swoją największą wartość w tym dniu wynoszącą 9,8 mln zaczynanych podróży. Następnie zaczyna ona stopniowo maleć, a od godz. 18-tej spadek jest bardzo dynamiczny. W niedziele liczba rozpoczynanych podróży związanych z czasem wolnym rośnie bardzo

szybko, by ok. 10-tej przekroczyć 10 mln i na dwie godziny ustabilizować się na tym poziomie. Następnie ponownie rośnie ona bardzo dynamicznie i ok. godziny 14-tej osiąga maksymalną wartość 15 mln zaczynanych podróży. Od tej pory liczba podróży stopniowo maleje.

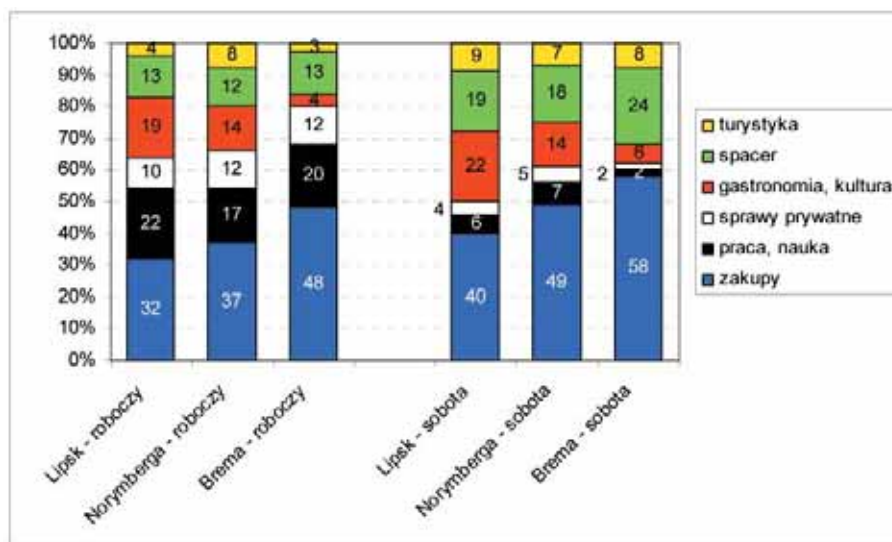


Rys. 2. Rozkład czasu rozpoczęcia podróży związanych z czasem wolnym w różne dni tygodnia [4]

Znaczący wpływ na podróże związane z czasem wolnym wykazały badania ruchu pieszego w centrach miast niemieckich [13]. Na podstawie szczegółowych pomiarów wykonanych na najważniejszych ulicach centrum Lipska można stwierdzić, że w dniu roboczym wielkość potoku pieszego bardzo dynamicznie rośnie od godzin porannych do godziny 13-tej, później dynamika wzrostu słabnie by osiągnąć największe wartości około godziny 18-tej, po której ruch pieszony stopniowo maleje. W soboty natomiast ruch dynamicznie rośnie od godzin porannych do godziny 16-tej, gdy osiąga największe natężenie, które jest większe o ponad 3/4 niż w dniu powszednim. Od tej pory ruch pieszony stopniowo maleje, przy czym w godzinach wieczornych nadal jest większy ok. 15% większy niż w dniu powszednim. Badania porównawcze wielkości potoków pieszego na głównych ulicach handlowych w dni robocze i soboty przeprowadzone zostały w grupie 10 miast o liczbie mieszkańców pomiędzy 490 000 a 600 000. Porównywano w nich potoki pieszego obserwowane w czwartek w godzinach popołudniowych (16:00 – 18:00) oraz w sobotę w godzinach południowych (11:00 – 13:00). Największy wzrost ruchu zaobserwowano w Düsseldorfie (Schadowstraße) i wyniósł on aż 84,2%, a najmniejszy w Hanowerze (Georgenstraße) tylko 15,9%. Świadczy to, że ruch pieszony w centrach miast ma charakter bardzo zindywidualizowany i w znacznej mierze zależy zagospodarowania oraz atrakcyjności tego obszaru.

Na przykładzie centrum Lipska można pokazać także wpływ dnia tygodnia na podział zadań przewozowych [13]. W dni robocze udział ruchu pieszego 13%, rowerowego – 10%, transportu zbiorowego – 47%, a indywidualnego – 30%. W soboty natomiast rośnie udział ruchu pieszego – 17% (wzrost o 1/3) oraz transportu indywidualnego – 35% (wzrost o 1/6). Udział ruchu rowerowego pozostał na tym samym poziomie, natomiast udział transportu zbiorowego zmalał do 38% (spadek o 1/5). Na podział zadań przewozowych istotny wpływ ma także miejsce zamieszkania. Dla mieszkańców Lipska udział poszczególnych środków transportu był następujący: pieszo – 14%, rower – 15%, transport zbiorowy 49%, natomiast indywidualny – 23%. W przypadku osób dojeżdżających do centrum spoza miasta kształtował się następująco: rower – 1%, transport zbiorowy – 35%, a indywidualny – 64%.

Badania ruchu w obszarze centrum dotyczyły również celu podróży [13]. Analizami porównawczymi objęto centra trzech miast o podobnej wielkości: Lipska, Norymbergi i Bremy (rys. 3). Na ich podstawie można stwierdzić, że praca stanowi cel  $17 \div 22\%$  podróży w dni robocze w zależności od miasta, a w soboty  $2 \div 7\%$ . Znaczna część podróży do centrum związana jest z zakupami, przy czym w tym wypadku ich udział zależy w dużym stopniu od charakteru miasta i w dni robocze waha się w granicach od 32% w przypadku Lipska do 48% w Bremie, natomiast w soboty od 40% w Lipsku do 58% w Bremie.



Rys. 3. Motywacje podróży w centrum Lipska, Norymbergi i Bremy w dni robocze i w soboty [13]

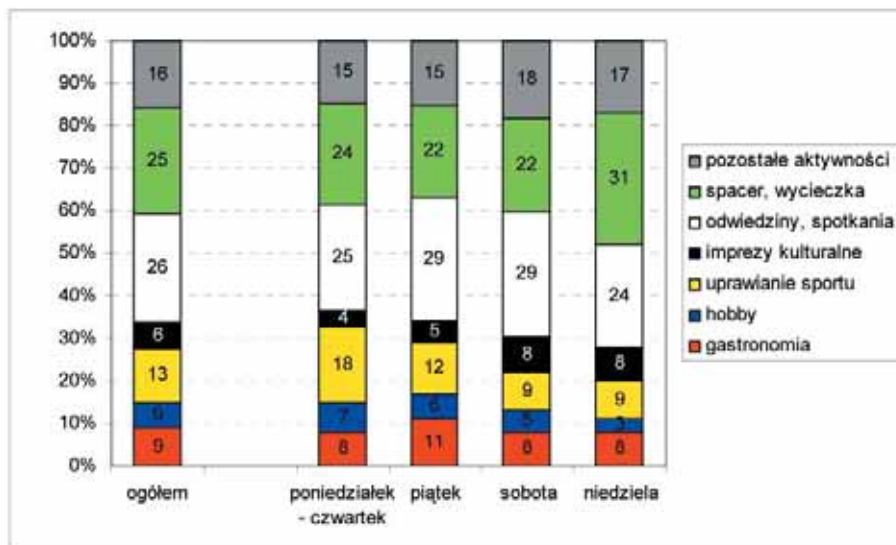
### Motywacje w ruchu związanym ze spędzaniem czasu wolnego

Celem dokładniejszego poznania rozkładu przestrzennego oraz specyfiki ruchu związanego z czasem wolnym należy przyjrzeć się szczegółowym motywacjom ja-

kie można wyróżnić jako formy spędzania czasu wolnego. W metodyce badań zachowań komunikacyjnych w Niemczech [4] przyjęto 7 kategorii spędzania czasu wolnego, których udział w całym ruchu związanym ze spędzaniem czasu wolnego wyniósł:

- spożywanie posiłków poza domem (gastronomia) – 9%,
- hobby – 6%,
- uprawianie sportu – 13%,
- uczestnictwo w imprezach kulturalnych – 6%,
- odwiedziny lub spotkanie towarzyskie – 26%,
- wycieczka, spacer – 25%
- pozostałe aktywności – 16%.

W porównaniu z poprzednimi badaniami (rok 2002) można stwierdzić spadek udziału „odwiedzin i spotkań towarzyskich” w całym ruchu czasu wolnego (o 4%) natomiast wzrost znaczenia „uprawiania sportu” (o 2%) oraz „wycieczek i spacerów” (także o 2%). Udział poszczególnych form spędzania czasu wolnego zależy w sposób istotny od dnia tygodnia: od poniedziałku do soboty ulubioną formą spędzania czasu wolnego są „odwiedziny i spotkania towarzyskie”, natomiast w niedziele – „spacery i wycieczki”. Dokładnie zmienność tę przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Motywacje podróży według badań niemieckich i ich udział w poszczególne dni tygodnia [4]

Podobne badania odnośnie szczegółowych form spędzania wolnego czasu zarówno w dni robocze jak i wolne od pracy zostały przeprowadzone w Lipsku [2]. Najczęstszą formą spędzania wolnego czasu są odwiedziny, których udział praktycznie nie zależy od rodzaju dnia i wynosi (23 ÷ 24%). Podobnie sytuacja przedstawia się w przypadku prac w ogródku działkowym (17 ÷ 19%), hobby (8 ÷ 9%), wizyt w obiektach gastronomicznych (3 ÷ 4%) czy też praktyk religijnych (2 ÷ 3%). Istotne różnice natomiast pomiędzy dniami pracy o wolnymi można stwierdzić

w przypadku takich form jak: spacer (dzień roboczy – 13%, dzień wolny – 17%), uprawianie sportu (dzień roboczy – 13%, dzień wolny – 8%), opieka nad podróżującymi dziećmi lub osobami starszymi (dzień roboczy – 8%, dzień wolny – 3%), czy też imprezy kulturalne (dzień roboczy – 5%, dzień wolny – 8%).

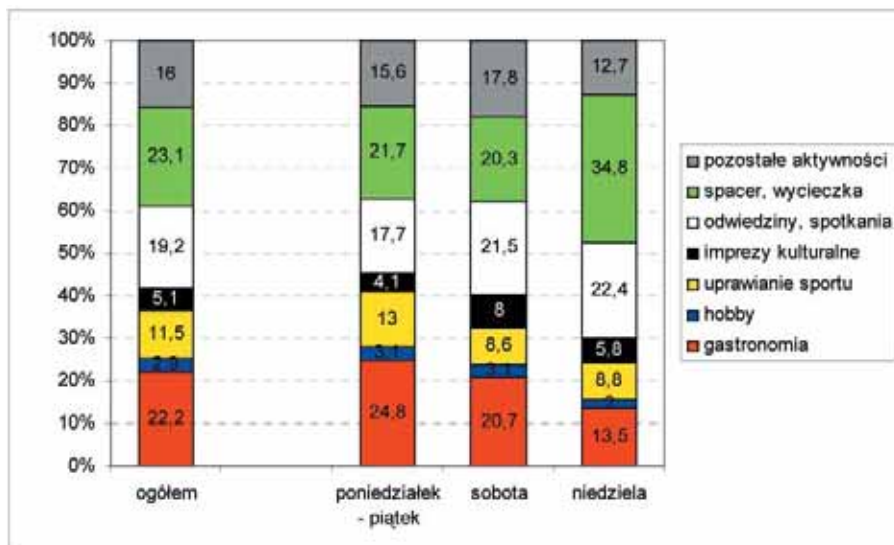
W badaniach szwajcarskich wylicza się aż 18 form spędzania czasu wolnego [15]. Ich udział w ruchu związanym ze spędzaniem czasu wolnego jest zróżnicowany i dla wielu form zależy od dnia tygodnia (tab. 1).

*Tab. 1 Formy spędzania wolnego czasu oraz ich procentowy udział w poszczególnych dniach tygodnia [15]*

Forma spędzania czasu wolnego	dni robocze	sobota	niedziela	ogółem
Odwiedziny	17,7	21,5	22,4	19,2
Gastronomia	24,8	20,7	13,5	22,2
Aktywne uprawianie sportu	13,0	8,6	8,8	11,5
Wędrówka	2,7	3,1	4,6	3,1
Jazda na rowerze	0,6	0,7	1,1	0,7
Kibicowanie na imprezach sport.	1,0	2,2	1,8	1,3
Spacer	19,2	17,2	26,0	20,0
Fitness / Wellnes	1,2	0,6	0,4	1,0
Imprezy kulturalne	4,1	8,0	5,8	5,1
Praca niepłatna	2,0	2,0	1,0	1,8
Działalność w organizacjach	1,8	1,3	0,7	1,6
Wycieczka	0,4	1,0	1,0	0,6
Religia	1,1	1,8	4,6	1,8
Aktywności wokół domu	1,1	1,1	1,0	1,1
Jedzenie poza restauracją	0,6	0,6	0,6	0,6
Shopping	1,8	2,1	0,3	1,6
Wycieczki objazdowe	0,2	0,4	0,3	0,3
inne	6,7	7,1	6,1	6,5

Z powyższego szczegółowego zestawienia wynika, że najbardziej ulubionymi formami spędzania czasu wolnego w Szwajcarii są: pobyt w obiektach gastronomicznych, spacer, odwiedziny u znajomych lub rodziny oraz aktywne uprawianie sportu. Stanowią one prawie 3/4 podróży związanych z czasem wolnym. W dni robocze największą popularnością cieszy się pobyt w lokalach gastronomicznych, w sobotę odwiedziny, natomiast w niedziele – spacer.

Celem porównania specyfiki ruchu związanego z czasem wolnym w Niemczech i w Szwajcarii pogrupowano poszczególne formy spędzania czasu wolnego w takie same kategorie jak stosowane w badaniach niemieckich (rys. 5). Porównując otrzymane wyniki można stwierdzić, że w Szwajcarii zdecydowanie większą popularnością cieszy się pobyt w obiektach gastronomicznych, natomiast w Niemczech większym zainteresowaniem cieszą się odwiedziny u rodziny czy znajomych.



Rys. 5. Motywacje podróży według badań szwajcarskich i ich udział w poszczególne dni tygodnia [15]

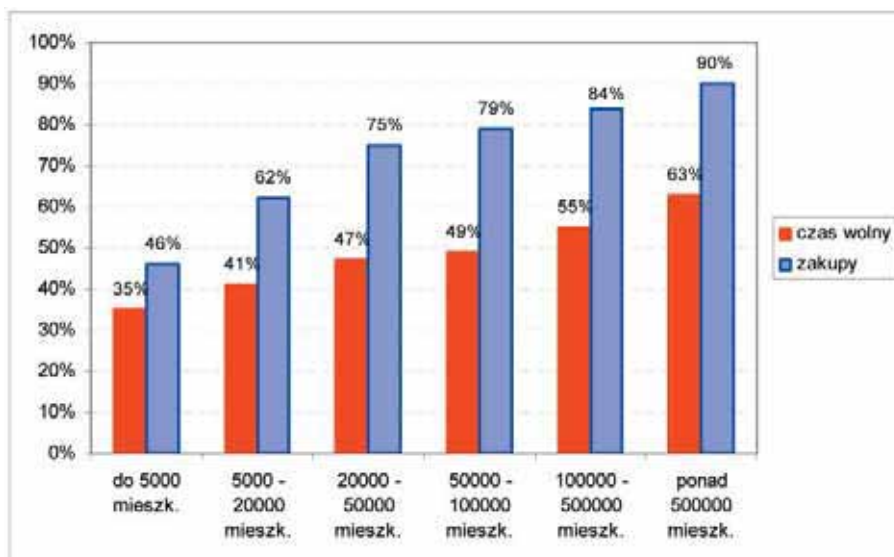
Analizując udział poszczególnych form spędzania czasu na przestrzeni ostatnich lat [10, 21] można stwierdzić zmniejszenie znaczenia odwiedzin u znajomych czy rodziny (spadek o 2-3%), natomiast nieznaczny wzrost takich form jak pobyt w obiektach gastronomicznych, spacer czy aktywne uprawianie sportu. Zmiany te są wprawdzie nieznaczne, ale odzwierciedlają pewne ogólniejsze tendencje natury socjologicznej.

### Rozkład przestrzenny podróży związanych ze spędzaniem czasu wolnego

Rozkład przestrzenny podróży związanych ze spędzaniem czasu wolnego jest bardzo istotny. Tego typu podróże bardzo często związane są z obszarami wrażliwymi na ruch samochodowy i związane z tym uciążliwości środowiskowe. Wiele podróży związanych jest bowiem z centrum miasta, które bardzo często ma charakter zabytkowy i stanowi dużą koncentrację obiektów kultury i usługowych. W obszarach tych występują poważne problemy z parkowaniem, a z drugiej strony są one bardzo dobrze obsługiwane komunikacją zbiorową. Ruch czasu wolnego w dużym stopniu związany jest również z obszarami rekreacyjnymi, wokół których ze względu na ich walory przyrodnicze i krajobrazowe powinny być minimalizowane uciążliwości wynikające z intensywnego ruchu dojazdowego do nich. Według badań przeprowadzonych w Niemczech [4] podróże związane ze spędzaniem czasu wolnego w większości odbywają się w obrębie miasta zamieszkania (47%), natomiast mniejsze znaczenie mają podróże poza miejsce zamieszkania (33%), a także podróże okrężne (20%). Udział podróży wewnątrz miejscowości zamieszkania zależy w dużym stopniu od jej wielkości i waha się w granicach od 35% dla



małych miejscowości (poniżej 5000 mieszkańców) do 63% dla dużych miast (ponad 500000 mieszkańców) (rys. 6).



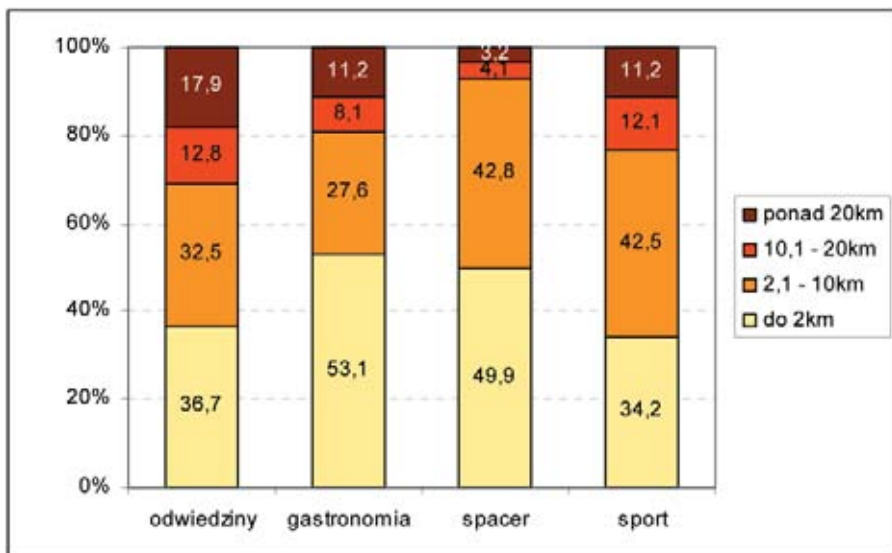
Rys. 6. Zależność lokalizacji celu podróży związanej z czasem wolnym w obrębie miejscowości zamieszkania od jej wielkości {4}

Szczegółowe badania zachowań komunikacyjnych w zakresie spędzania czasu wolnego zostały przeprowadzone wśród mieszkańców Lipska [2]. Na ich podstawie można stwierdzić, że przeciętnie mieszkańcy tego miasta w dniu roboczym odbywają podróże związane z czasem wolnym na odległość 7,8 km, w soboty na odległość 19,3 km, a w niedziele – 13,4 km. Przeznaczają oni na ten cel odpowiednio: w dni robocze 27 minut, w soboty – 37 minut, a w niedziele – 34 minuty. Przeciętna prędkość podróży związanych z czasem wolnym wynosi w związku z tym: w dni robocze – 17 km/h, w soboty – 31 km/h, a w niedziele – 24 km/h.

W badaniach szwajcarskich [15] określono bardzo szczegółowo rozkład odległości podróży w zależności od formy spędzania czasu wolnego. Ponieważ w wyodrębniono w nich bardzo dużo rodzajów aktywności czasu wolnego, dlatego też bardziej szczegółowe analizy przeprowadzone zostaną dla najbardziej popularnych form spędzania czasu wolnego (rys. 7).

Porównując wyniki badań zachowań komunikacyjnych z roku 2002 [6] i 2008 [15] można zaobserwować tendencję do skracania odległości podróży: rośnie udział podróży na mniejsze odległości (do 10 km), a maleje znaczenie podróży na większe odległości (zwłaszcza ponad 20 km). Może być to wynikiem dążenia do lokalizacji obiektów rekreacyjnych zwłaszcza w dużych miastach możliwie blisko miejsca zamieszkania [9]. Ma to bowiem przyczynić się do zmiany zachowań komunikacyjnych mieszkańców i zachęty ich do rezygnacji z podróży samochodem na rzecz ruchu pieszo i rowerowego.

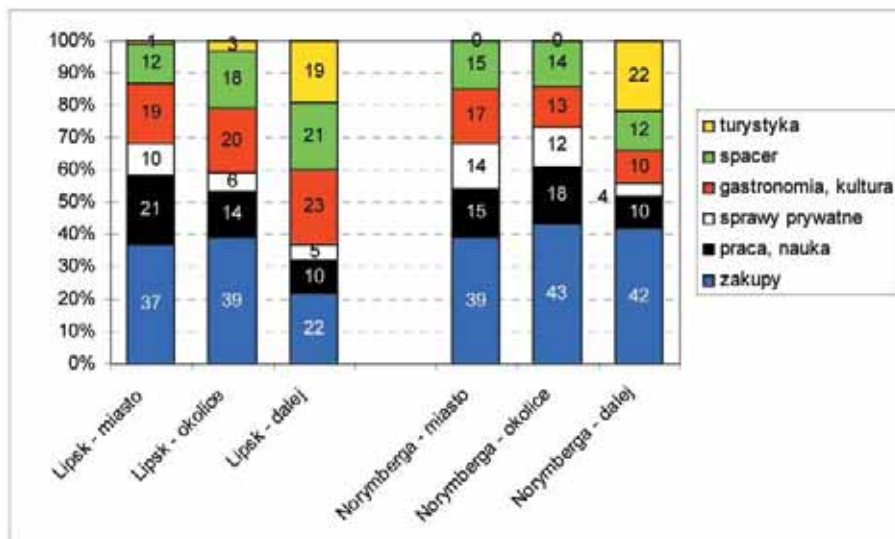




Rys. 7. Rozkład odległości podróży dla najpopularniejszych w Szwajcarii form spędzania czasu wolnego [15]

Na podstawie badań szwajcarskich można określić wartość średnią odległości podróży związanych ze spędzaniem czasu wolnego, która wynosi 5,7 km, a na jej realizację potrzeba 39,6 minuty. Różni się on jednakże od szczegółowej motywacji. Największe odległości pokonywane są podczas przejazdów samochodem po okolicy – 50,9 km, których pokonanie zajmuje 87,4 minuty. Ponadprzeciętne odległości pokonywane celem dotarcia do imprez masowych (10,1 km i 108 minut) i kulturalnych (7,9 km i 36,7 minuty). Pokonania większych odległości wymaga również uczestnictwo w imprezach sportowych (7,8 km i 33,9 minuty) oraz aktywne uprawianie sportu (7,4 km i 43,3 minuty), a także odwiedziny znajomych lub rodziny (6,1 km i 27,1 minuty). Pozostałe sposoby spędzania wolnego czasu odbywają się w mniejszych odległościach od miejsca zamieszkania.

Przeanalizowano również wpływ miejsca zamieszkania na motywację podróży do centrum na przykładzie Lipska i Norymbergi [13]. Dla potrzeb tych badań odwiedzający centrum zostali podzieleni na trzy grupy: mieszkańców danego miasta, mieszkańców okolicznych miejscowości oraz przyjezdnych z dalszych odległości. Wzajemna zależność motywacji podróży dla dojazdów do centrum oraz odległości z jakiej ten dojazd jest wykonywany zależy w znacznym stopniu od uwarunkowań lokalnych (rys. 8). Wspólną cechą jest, że dla osób, które przyjechały z większych odległości duże znaczenie miały turystyczne walory poszczególnych miast (Lipsk – 19%, Norymberga – 22%). Można także stwierdzić niewielkie zróżnicowanie motywacji podróży pomiędzy mieszkańcami samych miast jak i ich okolic. W przypadku Lipska można zauważyć większe zainteresowanie spacerem i zwiedzaniem w przypadku mieszkańców jego okolic niż samego miasta.



Rys. 8. Porównanie motywacji podróży w centrum na przykładzie Lipska i Norymbergi wśród mieszkańców tych miast, ich okolic, a także przyjezdnych z większych odległości [13]

Lokalizacja miejsca zamieszkania ma także istotny wpływ na liczbę odwiedzanych sklepów [13]. Mieszkańcy poszczególnych miast odwiedzają zdecydowanie mniejszą liczbę sklepów (średnio Lipsk - 4,1, Norymberga - 5,2) niż mieszkańcy okolic tych miast (Lipsk - 5,7, Norymberga - 5,9) oraz osoby przyjeżdżające z większych odległości (Lipsk - 5,9, Norymberga - 6,1). Na podstawie badań przeprowadzanych w Norymberdze od wielu lat [13] można stwierdzić, że ciągle rośnie przeciętna liczba odwiedzanych w trakcie zakupów sklepów. Obecnie w dni robocze 32% odwiedza 7 i więcej sklepów, a w soboty - co druga osoba.

**Podział zadań przewozowych dla podróży związanych ze spędzaniem czasu wolnego**

Podział zadań przewozowych ma bardzo istotne znaczenie dla ruchu związanego z czasem wolnym. Większość tych podróży jest bowiem związana z miejscami o dużych walorach przyrodniczych lub kulturowych, gdzie negatywny wpływ intensywnego ruchu samochodowego powinien być minimalizowany. Na podstawie badań niemieckich [8] można stwierdzić, że podróże związane ze spędzaniem czasu wolnego mają, oprócz podróży związanych z kształceniem, najbardziej pro-ekologiczny podział zadań przewozowych. Aż 33% podróży związanych ze spędzaniem czasu wolnego odbywa się pieszo, 11% - rowerem, 49% - transportem indywidualnym (w tym 20% - jako kierowca, a 29% - jako pasażer), a tylko 7% - transportem zbiorowym. Sformułowanie o przyjazności środowiska takiego podziału zadań przewozowych można uzasadnić tym, że w świetle najnowszych badań parku samochodowego z uwzględnieniem liczby przewożonych osób [8]

stwierdzono, że nowoczesny samochód osobowy, w którym podróżuje 3 lub więcej osób, emituje mniej substancji szkodliwych w przeliczeniu na jednego pasażera i 1 km niż autobus o małym napełnieniu (poniżej 20%). Należy jednak pamiętać, że wyniki te dotyczą rynku niemieckiego, gdzie tabor samochodowy jest znacznie młodszy, a ponadto rokrocznie kontrolowany jest dokładnie stan techniczny pojazdu wraz ze spełnieniem przezeń norm czystości emitowanych spalin.

Na bardzo wysoki udział ruchu pieszego w podróżach związanych ze spędzaniem czasu wolnego ma istotny wpływ zagospodarowanie przestrzenne miast niemieckich. Na podstawie przeprowadzonych badań [4] można stwierdzić, że dla 92% mieszkań w odległości do 10 minut dojścia pieszego znajduje się park lub tereny zielone, dla 87% mieszkań – restauracja, a dla 52% mieszkań – basen lub tereny sportowe. Takie korzystne rozmieszczenie potencjalnych miejsc spędzania czasu wolnego powoduje, że 44% podróży pieszych związanych jest z ruchem czasu wolnego, a w przypadku roweru udział ten wynosi 36%. Także aż 44% podróży jako pasażer samochodu związanych jest ze spędzaniem czasu wolnego, co świadczy o dużym napełnieniu samochodów w tego typu podróżach.

Na podstawie badań przeprowadzonych w Lipsku [2] można stwierdzić istotną zmienność podziału zadań przewozowych w zależności od dnia tygodnia. Największe znaczenie w podróżach związanych z czasem wolnym ma samochód, którego udział w dni robocze wynosi 37%, natomiast w soboty – 59%, a w niedziele – 46%. To wysokie udziały są wynikiem większego napełnienia samochodu w dni wolne od pracy, które w soboty wynosi 1,9 osoby, a w niedziele – 2,0 osoby. Odwrotnie natomiast zmienia się udział ruchu pieszego, który w dni robocze wynosi 30%, w soboty – 18%, a w niedziele – 29%. Małe znaczenie posiada transport zbiorowy (18% - w dni robocze, 12% - w soboty, a 15% - w niedziele) oraz ruch rowerowy (odpowiednio: 15%, 11% i 10%).

Wedle badań szwajcarskich [15] podział zadań przewozowych dla ruchu związanego z czasem wolnym liczony na podstawie pracy przewozowej przedstawia się następująco: pieszo – 8,0%, rower – 2,7%, samochód – 66,3%, kolej – 16,2%, natomiast transport publiczny – 3,3%. Jeżeli podział zadań przewozowych oszacować na podstawie liczby realizowanych podróży wówczas jest on następujący: pieszo – 48,7%, rower – 2,7%, samochód – 33,4%, kolej – 4,1%, natomiast transport publiczny – 6,7%. Tą ostatnią metodą określono również podział zadań przewozowych dla poszczególnych form spędzania czasu wolnego, z których szerzej omówione zostaną te najbardziej popularne. Najbardziej proekologiczny okazał się on w przypadku aktywności „spacer” i wyniósł odpowiednio: ruch niezmotoryzowany (pieszy i rowerowy) – 84,5%, samochód – 12,5%, a transport publiczny – 2,2%. Mniejsze znaczenie ruchu powolnego zaobserwowano w przypadku pobytu w obiekcie gastronomicznym (46,2%) czy też „aktywne uprawianie sportu” (44,7%). Udział transportu indywidualnego wyniósł wówczas odpowiednio 41% (gastronomia) i 43% (sport). Najmniejsze znaczenie ruchu powolnego stwierdzono w przypadku aktywności „odwiedziny u znajomych lub rodziny”, który wyniósł 29,6%. Udział motoryzacji indywidualne wyniósł wówczas aż 58,3%, natomiast transportu publicznego – 11,5%.

Na podstawie innych badań szwajcarskich uwzględniających poziom dochodu gospodarstwa domowego [11] można stwierdzić ich istotny wpływ na podział zadań przewozowych. W przypadku gospodarstw domowych o najniższym poziomie dochodów (poniżej 2000 CHF na miesiąc) największy udział ma ruch niezmotoryzowany (pieszy i rowerowy) – 52%, samochód – 34%, a komunikacja zbiorowa tylko 14%. W przypadku gospodarstw o najwyższym dochodzie udział ten wynosi następująco: ruch niezmotoryzowany – 33%, samochód – 62%, a transport zbiorowy – 5%.

### Czynniki socjo-ekonomiczne wpływające na wielkość ruchu związanego z czasem wolnym

Bardzo ważnym zagadnieniem wpływającym na wielkość ruchu związanego z czasem wolnym jest grupa czynników o charakterze socjo-ekonomicznym. Z jednej strony są one bardzo trudne do określenia, a dodatkowo obarczone oceną subiektywną poszczególnych respondentów. Z drugiej strony mają one istotny wpływ na częstotliwość podróży związanych z czasem wolnym, ale także pokonywane w tym celu odległości. Na podstawie badań przeprowadzonych w Szwajcarii uwzględniających poziom dochodów [15] można stwierdzić, że udział ruchu związanego z czasem wolnym wśród wszystkich podróży maleje wraz ze wzrostem poziomu dochodów zarówno w dni robocze (poniedziałek – piątek) od wartości 46,9% dla miesięcznych dochodów poniżej 2000 CHF na gospodarstwo domowe do wartości 30,5% dla gospodarstw o dochodzie powyżej 14000 CHF. Taka sama tendencja utrzymuje się w niedziele: udział ten dla gospodarstw o dochodzie poniżej 2000 CHF wynosi 86,4%, a dla gospodarstw o dochodzie ponad 14000 CHF wynosi 75,2%. Jedynie w soboty ta tendencja jest odwrotna i udział ruchu związanego z czasem wolnym w ruchu dobowym wynosi od 57,8% dla gospodarstw najuboższych do 66,5% dla gospodarstw najbogatszych. Porównując z wynikami historycznymi z roku 2002 [6] można stwierdzić zasadnicze zmiany: tendencja dla dni roboczych pozostała bez zmian, jedynie zmieniły się wartości graniczne udziału ruchu czasu wolnego, który wynosił wówczas od 55,7% dla gospodarstw o najniższym dochodzie do 35% dla gospodarstw o dochodzie najwyższym. W dni wolne od pracy udział ruchu czasu wolnego w ruchu dobowym był niezależny od poziomu dochodów i wahał się wówczas w granicach 63,9% ÷ 78,8% w soboty oraz 75,6 ÷ 85,8% w niedziele.

Na podstawie innych badań szwajcarskich [11] można stwierdzić zależność pomiędzy odległością podróży w ruchu związanym z czasem wolnym, a poziomem dochodów gospodarstwa domowego. W gospodarstwach o najniższym poziomie dochodów (poniżej 2000 CHF) jego członkowie podróżują w czasie wolnym na odległość 12 km, na co poświęcają 49 minut. Wraz ze wzrostem te obydwa parametry rosną i w przypadku gospodarstw domowych o najwyższym poziomie

dochodów (ponad 14000 CHF) odległość rośnie do 22 km, a czas przeznaczony na jej pokonanie już tylko nieznacznie do 52 minut.

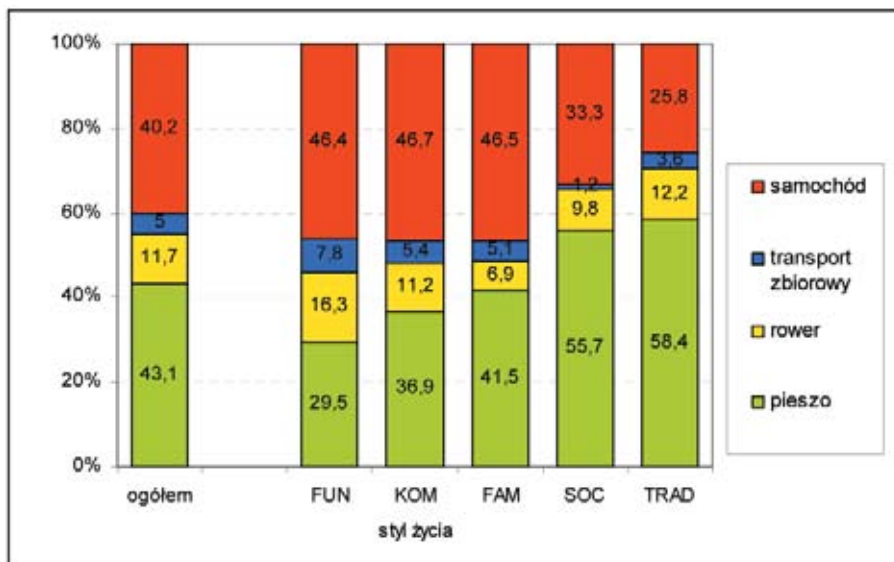
Badania niemieckie [8] wykazały również istotną zależność udziału podróży związanych z czasem wolnym we wszystkich podróżach od wieku osób: największy udział obserwuje się w grupie 11 ÷ 13-latków, który wynosi aż 43% i maleje wraz z wiekiem by osiągnąć minimum dla przedziału wieku 30 ÷ 59 lat, a następnie rośnie by dla osób w grupie wiekowej 65 ÷ 74 lat osiągnąć wartość 39%. Należy przy tym pamiętać, że w grupie osób starszych obserwuje się systematyczny wzrost mobilności, a także liczby osób posiadających prawo jazdy. W latach 2002 – 2008 zaobserwowano wzrost osób dysponujących prawem jazdy w grupie wiekowej 65 ÷ 74 lata wyniósł dla mężczyzn 5%, a dla kobiet 20%. Wśród osób liczących 75 lat i więcej wzrost ten wynosi odpowiednio: 12% dla mężczyzn i 15% dla kobiet.

W Niemczech zostały przeprowadzone również badania zachowań komunikacyjnych w czasie wolnym o charakterze socjologicznym [7]. Na ich podstawie można wydzielić pięć grup o zróżnicowanej mobilności:

- grupę nastawioną na czerpanie wielu przyjemności i przeżywanie wielu przygód (FUN) – 22% udział w populacji,
- grupę dążącą do wyróżniania się i życia w komfortowych warunkach (KOM) – 17% udział w populacji,
- grupa prorodzinna nastawiona na życie rodzinne (FAM) – stanowiąca 24% populacji,
- grupa oczekująca integracji socjalnej i poprawy warunków życia (SOC) – 11% udział w populacji
- grupa tradycyjna preferująca wartości tradycyjne (TRAD) – stanowiąca 26% populacji.

Grupy te różnią się pomiędzy sobą udziałem podróży związanych z czasem wolnym we wszystkich podróżach: najmniejszy udział obserwuje się w grupie „prorodzinnej” (29,4%), a największy w grupie „tradycyjnej” (37,3%) oraz w grupie FUN (38,2%). Dla dwóch pozostałych grup udział ten przyjmuje wartość pośrednią i wynosi: grupa nastawiona na komfort – 34,5%, a grupa „socjalna” – 33,4%.

Podział ten ma także istotny wpływ na podział zadań przewozowych (rys. 9). Analizując otrzymane wyniki badań można stwierdzić, że udział samochodu w podróżach związanych z czasem wolnym jest bardzo niski w grupie o tradycyjnych wartościach (TRAD) i wynosi 25,8%. Dla grupy socjalnej (SOC) jest już on większy i wynosi 33,3%. Dla pozostałych grup udział samochodu w podróżach tego typu jest zbliżony i waha się w granicach 46,4-46,7%. Udział ruchu pieszego jest największy dla grupy o zachowaniach tradycyjnych (58,4%), a najmniejszy dla grupy nastawionej na przyjemność (FUN) (29,5%). Rower z kolei najmniejszą popularnością cieszy się w grupie prorodzinnej (FAM) (6,9%), a największą w grupie nastawionej na przyjemność (FUN) (16,3%). Transport zbiorowy natomiast najmniej wykorzystywany w grupie socjalnej (SOC) (1,2%), a najbardziej również w grupie nastawionej na przyjemność (FUN) (7,8%).



Rys. 9. Wpływ na podział zadań przewozowych poszczególnych stylów życia [7]

Podobne badania o charakterze socjologicznym przeprowadzone zostały również w Szwajcarii [12]. Dotyczyły one młodzieży w wieku 18 – 25 lat, wśród której wyodrębniono 5 grup różniących się istotnie formami spędzania czasu:

- „wolność/niezależność” – najchętniej spędzająca wolny czas wspólnie prześiadując ze znajomymi, wychodząc do klubów, obserwując imprezy sportowe czy też odwiedzając przyjaciół;
- „spokój/samotność” – chętniej spędzający wolny czas w swoim mieszkaniu i są stosunkowo mało mobilni;
- „lubiący rodzinę” – najchętniej spędzający wolny czas na spotkaniach rodzinnych i bardzo rzadko uczestniczący w imprezach sportowych lub uprawiający sport;
- „aktywność” – spędzają najchętniej wolny czas uprawiając czynnie sport zarówno na wolnym powietrzu jak i w hali, a także uczestnicząc jak widz w imprezach sportowych, ale także chodząc do klubów lub pubów;
- „o oczekiwaniach religijno-duchowych” – najchętniej wolny czas spędzają zwiedzając galerie i wystawy, spacerując i wędrując, ale także na wycieczkach rowerowych.

Oprócz przynależności do jednej z powyższych grup jako czynnik socjologiczny służący do modelowania ruchu przyjęto również takie parametry jak: suma odległości do trzech najlepszych przyjaciół oraz suma częstości spotkań z najlepszymi przyjaciółmi. Stwierdzono również, że na spędzanie czasu wolnego mają wpływ takie czynniki jak: stan cywilny (samotny, związek partnerski, rodzina), poziom zadowolenia z mieszkania, a także ocena możliwości spędzania wolnego czasu w sąsiedztwie miejsca zamieszkania.



W Niemczech przeprowadzone zostały badania odnośnie poziomu przewidywalności odnośnie poszczególnych etapów decyzyjnych w modelowaniu ruchu związanego z czasem wolnym [17]. Cel podróży jest najczęściej uprzednio zaplanowany (68%), rzadziej jest decyzją spontaniczną (24%), czy też oparty na przyzwyczajeniu (8%). Moment rozpoczęcia podróży także jest najczęściej zaplanowany (52%), ale bardzo często jest wynikiem decyzji spontanicznej (40%), a bardzo rzadko wynika z przyzwyczajień (8%). Trasa podróży z kolei wybierana jest najczęściej na podstawie przyzwyczajajen (48%) lub jest wynikiem uprzedniego zaplanowania (34%), natomiast tylko niekiedy jest decyzją spontaniczną (18%). Środek transportu najczęściej wybierany na podstawie przyzwyczajajen (74%), a już w mniejszym stopniu uprzednio zaplanowany (22%), a tylko w nielicznych przypadkach oparty jest na decyzji spontanicznej (4%). Na tej podstawie można stwierdzić, że najłatwiej będzie można zamodelować podział zadań przewozowych (jako proces dający się przewidzieć – tylko 4% decyzji spontanicznych), a także trasę przejazdu (mniej niż 1/5 przypadków jest spontaniczna). W pozostałych przypadkach decyzje podjęte w sposób spontaniczny są niezwykle trudne do zamodelowania.

### Określenie współzależności zmiennych modelu parametrów ruchu czasu wolnego

Na podstawie badań szwajcarskich podjęta została próba opracowania modeli matematycznych dla poszczególnych etapów podróży związanych ze spędzaniem czasu wolnego [16]. W tym celu zastosowano model regresji Poissona, który umożliwia przyjmowanie przez niektóre zmienne nie tylko wartości ciągłych, ale także całkowitych nieujemnych, które nie są ciągłe. Przykładem takiej zmiennej jest „liczba dzieci w rodzinie” czy też „liczba pokoi w mieszkaniu”. W oparciu o te założenia opracowano równania dla następujących parametrów:

- liczba podróży związanych z czasem wolnym w ciągu tygodnia – zależy od wielkości mieszkania (okres lanej jako liczba pokoi), wyposażenia mieszkania w balkon lub ogródek, długości czasu zamieszkania w danym miejscu, płci, posiadania psa, liczby dzieci, wymiaru czasu pracy oraz poziomu dochodów;
- liczba odwiedzin przyjaciół w ciągu tygodnia – zależy od wyposażenia mieszkania w balkon lub ogródek, długości czasu zamieszkania w danym miejscu, liczby dzieci oraz posiadania samochodu;
- liczba spacerów w ciągu tygodnia – zależy od: wielkości mieszkania, wyposażenia mieszkania w balkon lub ogródek, długości czasu zamieszkania w danym miejscu, płci, posiadania psa, liczby dzieci, wymiaru czasu pracy, poziomu dochodów, posiadania prawa jazdy i samochodu.

W oparciu o badania przeprowadzone z kolei wśród młodych mieszkańców Szwajcarii [12] podjęta została inna próba modelowania różnych parametrów charakteryzujących ruch związany z czasem wolnym. Otrzymane modele miały po-



stać regresji wieloczynnikowej, przy czym zmienne objaśniające miały zarówno charakter obiektywny jak i subiektywny (uwzględniający osobiste odczucia czy preferencje poszczególnych osób), np.:

- dla oszacowania odległości podróży związanych ze spędzaniem czasu wolnego w niedzielę opracowano model zależny od takich parametrów jak „odległość od urzędzeń rekreacyjnych”, „odległość od trzech najlepszych przyjaźni” czy też „dostępność do samochodu”, a także „przynależność do grupy” czy też „stan cywilny”;
- dla określenia prawdopodobieństwa wyboru transportu zbiorowego w niedzielę – najistotniejszymi zmiennymi objaśniającymi są: „stan cywilny”, „użytkowanie w ciągu tygodnia transportu zbiorowego”, „koszt biletu” oraz „dostępność do samochodu”; nieistotnymi zmiennymi okazały się być „szybkość transportu zbiorowego” czy też „odległość od urzędzeń rekreacyjnych”;
- dla określenia prawdopodobieństwa wyboru transportu indywidualnego w niedzielę – najistotniejszymi zmiennymi objaśniającymi są: „dostępność do samochodu”, „niezadowolenie z transportu zbiorowego”, a w mniejszym stopniu „użytkowanie w ciągu tygodnia transportu zbiorowego” czy „stan cywilny”.

W innych badaniach szwajcarskich [5] zaproponowano uwzględnienie w modelowaniu ruchu związanego z czasem wolnym parametrów o charakterze ekonomicznym: koszty paliwa, koszty transportu indywidualnego (uwzględniające oprócz kosztów paliwa także opłaty za parkowanie czy przejazd poszczególnymi trasami turystycznymi), koszty podróży transportem zbiorowym (z uwzględnieniem zniżek grupowych, okazjonalnych czy pakietowych - zakup biletu wraz noclegiem czy abonamentem narciarskim) lub różnicy kosztów transportem indywidualnym i zbiorowym.

## Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych studiów literatury można stwierdzić, że modelowanie podróży związanych ze spędzaniem czasu wolnego jest skomplikowane i zdecydowanie bardziej złożone w porównaniu do podróży obligatoryjnych tzn. związanych z pracą czy nauką. Oprócz czynników, które łatwo sparametryzować jak np. odległość miejsca zamieszkania od terenów rekreacyjnych, koniecznym jest uwzględnienie szeregu czynników o charakterze socjologicznym np. styl spędzania czasu wolnego. Wpływają one bowiem bardzo istotnie nie tylko na sposób spędzania czasu wolnego, ale także na częstość związanych z tym podróży, a także pokonywane wówczas odległości. Innym czynnikiem wpływającym istotnie na modelowanie podróży tego rodzaju jest poziom dochodów. Jak wykazały przeprowadzone badania jest to czynnik wpływający w bardzo dużym stopniu na sposób spędzania czasu wolnego, intensywność podróży oraz odległości wówczas pokony-

wane. W warunkach polskich niezwykle trudnym zagadnieniem będzie konieczność pominięcia wielkości dochodów, których wyjawienie dla ogromnej większości respondentów wywołuje stanowczy sprzeciw.

Istotnym czynnikiem różnicującym warunki polskie od cytowanych w niniejszym referacie warunków niemieckich czy szwajcarskich jest funkcjonowanie handlu we wszystkie dni tygodnia. To powoduje istotną zmianę w podejściu do spędzania czasu wolnego. W warunkach polskich zwłaszcza w większych miastach przyczyni się to zwiększenia ruchu związanego z zakupami w niedziele, ale także powiązanego z nim „shoppingu”, który wedle cytowanej literatury stanowi formę spędzania czasu wolnego. Na tej podstawie należy stwierdzić zasadność prowadzenia tego typu badań w warunkach polskich, bowiem modele opracowane w krajach zachodnich nie przystają do warunków polskich z powodu zdecydowanie niższego poziomu dochodów, ale także zupełnie innych przyzwyczajzeń i innych preferowanych form spędzania czasu wolnego.

## Bibliografia

- [1] Artho J., Schneider S., Bäumler R., Strategie Freizeitverkehr des Bundes; Analyse der Aktivitäten Besuche von Verwandten und Bekannten, Gastronomiebesuche und aktiver Sport; Universität Erich, Planungsbüro Jud, Erich, 2011.
- [2] Badrow A., Verkehrsentwicklung deutscher Städte im Spiegel des Systems repräsentativer Verkehrsbefragungen unter besonderer Berücksichtigung des Freizeitverkehrs; Technischen Universität Dresden, 2000.
- [3] Eggenberger M., Mobilitätsverhalten; Einkaufs- und Freizeitverkehr Glattal; Regionalplanung Zürich und Umgebung, Zürich, 2002.,
- [4] Follmer R. u.a., Mobilität in Deutschland 2008 Ergebnisbericht Struktur – Aufkommen – Emissionen – Trends; infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Bonn und Berlin, 2010.
- [5] Frey Marti C., Laesser Ch., Freizeitverkehr aus der Sicht der Tourismusorte; konferencja Freizeitverkehr im Zeichen wachsender Freizeitmobilität, Bergisch Gladbach, 1997.
- [6] Gindraux M., Simma A, Marconi D., Mobilität in der Schweiz Ergebnisse des Mikrozensus 2005 zum Verkehrsverhalten; Bundesamt für Statistik, Neuchâtel, 2007.
- [7] Götz K., Loose W., Schmied M., Schubert S., Mobilitätsstile in der Freizeit; Institut für angewandte Ökologie, Frankfurt am Main, 2002.
- [8] Knörr W., Aktualisierung "Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030" (TREMODO) für die Emissionsberichterstattung 2012; Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg, 2012.

- 
- [9] Lorenzi R., Schild P., Strategie Freizeitverkehr Bericht des Bundesrates, Bern 2009.
  - [10] Lorenzi R., Schild P., Faktenblatt Strategie Freizeitverkehr des Bundes; Bundesamt für Raumentwicklung ARE, Bern, 2012.
  - [11] Marconi D., Freizeitverkehr Zusatzauswertungen des Mikrozensus zum Verkehrsverhalten 2005; Bundesamt für Raumentwicklung, Bern, 2009.
  - [12] Matthes U., Schad H., Freizeitmobilität junger Erwachsener im Raum Basel; Universität Basel, Basel, 2003.
  - [13] Monheim R., Heller J., Die Innenstadt von Leipzig aus Sicht ihrer Besucher – attraktiv durch urbane Vielfalt; SDV Direct World GmbH, Bayreuth, 2011.
  - [14] Ohnmacht T., Freizeitverkehr innerhalb der Schweizer Agglomerationen; ITW Working Paper Series, Hochschule Luzern, Luzern, 2008.
  - [15] Reimann K., Ohnmacht T., Mobilität in der Schweiz, Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2010; Bundesamt für Statistik, Neuchâtel, 2012.
  - [16] Schlich R., Axhausen K.W. - Wohnumfeld und Freizeitverkehr – eine Untersuchung zur Fluchttheorie; IVT ETH Zürich, 2003
  - [17] Steinberg G., Freizeitverkehr mit öffentlichen Verkehrsmitteln Grundlagen und Konzept für ein optimiertes Angebot für Tagesausflügler und Kurzurlauber im Landkreis Wernigerode; Planersocietät, Dortmund, 2004.

## PROPOZYCJA WYMAGAŃ DLA PROGNOZOWANIA RUCHU W KRAJOWYM SYSTEMIE ZARZĄDZANIA RUCHEM

---

**Tomasz Dybicz**

dr inż., Instytut Dróg i Mostów, Politechnika Warszawska, 00-637 Warszawa, Al. Armii Ludowej 16, tel. +48 22 234 629, e-mail: T.Dybicz@il.pw.edu.pl

---

*Streszczenie. Jednym z głównych przedsięwzięć, które Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad zamierza zrealizować w najbliższych latach jest budowa Krajowego Systemu Zarządzania Ruchem (KSZR). Systemem tym zostaną objęte wszystkie autostrady i drogi ekspresowe oraz pozostałe drogi krajowe, które są objęte system elektronicznego poboru opłat. Jednym z głównych zadań systemu będzie wykonywanie zarządzania ruchem w trybie on-line na potrzeby którego będą wykonywane krótkoterminowe prognoz warunków ruchu w sieci drogowej. W artykule opisano i scharakteryzowano dylematy towarzyszące procesowi opracowywania wymagań w zakresie analizowania i prognozowania ruchu przed przyszłymi wykonawcami Krajowego Systemu Zarządzania Ruchem. Przedstawiono również końcową wersję opracowanych wymagań.*

*Słowa kluczowe: modelowanie ruchu, prognozowanie ruchu, zarządzanie ruchem*

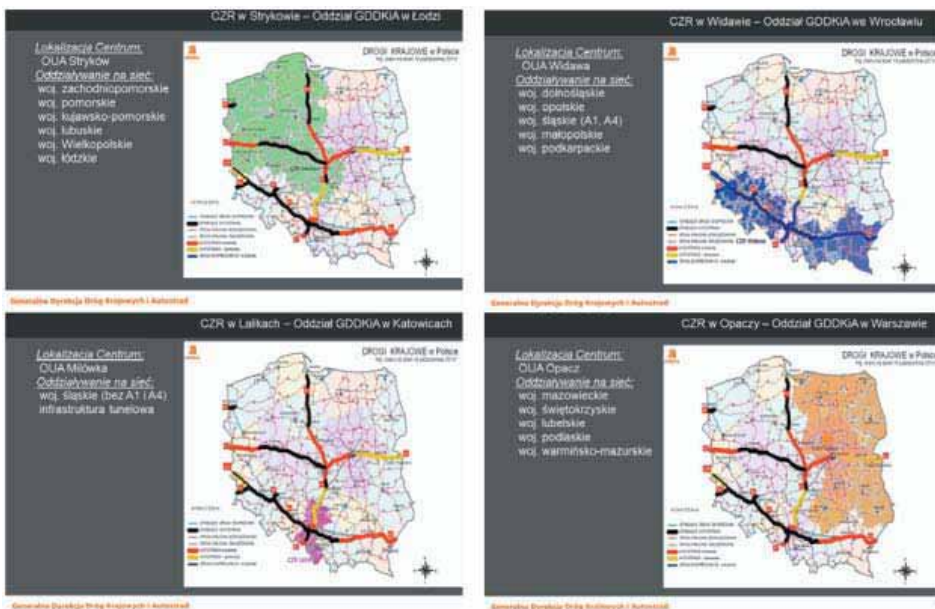
### I. Wstęp

Jednym z głównych przedsięwzięć, które Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad zamierza zrealizować w najbliższych latach jest budowa Krajowego Systemu Zarządzania Ruchem (KSZR). Systemem tym zostaną objęte wszystkie autostrady i drogi ekspresowe oraz pozostałe drogi krajowe, które są objęte system elektronicznego poboru opłat (rys. 1). KSZR będzie obsługiwany przez cztery lokalne centra zarządzania ruchem oraz jedno centrum główne.

Plan budowy KSZR zakłada, że do końca grudnia br. powstanie ostateczna wersja specyfikacji technicznych, co umożliwi ogłoszenie przetargu i wybór wykonawcy systemu do połowy 2013 r. Zakłada się, że projektowanie systemu potrwa do końca 2014, a jego budowa do końca 2016 r.

Doświadczenia z wdrażania w naszym kraju projektów ITS umożliwiają stwierdzenie, że jednym z najważniejszych czynników decydujących o sukcesie i uzyskaniu spodziewanych efektów jest należyte przygotowane specyfikacje przetargowe. Świadomość tą posiada również GDDKiA, do która na potrzeby opracowania specyfikacji technicznych podjęła współpracę ze Stowarzyszeniem ITS POLSKA dotyczącą wspólnego opracowania pakietu Specyfikacji Technicznych w ramach prac specjalnie utworzonych grup ekspertów. Prace w ramach zawartego porozumie-

nia rozdzielono na osiem tematycznych zagadnień i przydzielono do opracowania utworzonym grupom ekspertów.



Rys. 1. Drogi szybkiego ruchu, które będą objęte KSZR

Źródło: [1]

Jedną z grup ekspertów, której przewodniczącym był Prof. Wojciech Suchorzewski, a w której pracach był zaangażowany autor niniejszego artykułu, pełniący funkcję sekretarza, nosiła nazwę „Aplikacje dedykowane do krótko- i długoterminowych prognoz ruchu”. Zadaniem tej grupy było: sformułowanie wymagań dla komputerowych modeli ruchu i innych narzędzi informatycznych wykorzystywanych przy prognozowaniu ruchu dla celów zarządzania ruchem oraz zdefiniowanie horyzontów czasowych prognoz krótko i długoterminowych oraz obszarów i sieci drogowych objętych prognozami ruchu oraz zakresu niezbędnych danych z badań i pomiarów ruchu oraz innych źródeł.

Zadanie postawione przed grupą było bardzo odpowiedzialne, ponieważ analizy i prognozy ruchu będą jednymi z kluczowych elementów KSZR. Jedną z podstawowych trudności pracy grupy jest brak potencjalnych wzorców do naśladowania w formie warunków czy wytycznych. Przykładem są Warunki Techniczne TLS 2010 opracowane przez BASt [1], gdzie pomimo bardzo dokładnych sprecyzowań odnośnie urządzeń, transmisji danych, obróbki danych itp., aspekty analizowania i prognozowania ruchu nie są w nich ujęte.

W wyniku pracy ekspertów w grupie ósmej opracowano propozycje wymagań dotyczące:

- stosowania horyzontów czasowych prognoz;
- wielkości obszarów i sieci drogowych objętych prognozami ruchu;

- zakresu niezbędnych danych, które powinny być pozyskiwane z innych elementów KSZR;
- komputerowych modeli ruchu i innych narzędzi informatycznych wykorzystywanych przy prognozowaniu ruchu dla celów zarządzania ruchem.

Przed rozpoczęciem prac eksperci w grupie dokonali przeglądu niektórych negatywnych przykładów projektów ITS funkcjonujących w naszym kraju. Wykonany przegląd umożliwił określenie dylematów mających na celu opracowanie specyfikacji w taki sposób, by wyeliminować możliwość powtórzenia w KSZR przypadków nieefektywnych rozwiązań.

## 2. Dylematy towarzyszące pracy ekspertów

Dylematy towarzyszące pracy ekspertów nad sformułowaniem wymagań dla komputerowych modeli ruchu i innych narzędzi informatycznych wykorzystywanych przy prognozowaniu ruchu dla celów zarządzania ruchem wynikają z analizy dotychczasowych krajowych doświadczeń w tym względzie. Niestety nie napawają one zbytnim optymizmem. Zbudowane w ostatnich latach systemy zarządzania ruchem w polskich miastach realizują na ogół funkcje sterowania ruchem i monitoringu (nie licząc systemów będących w fazie budowy). Niestety ocena pozostałych elementów systemów zarządzania ruchem nie wypada najlepiej. Dotyczy to zwłaszcza reagowania na sytuacje kryzysowe. W niektórych miastach praca w centrach zarządzania ruchem zaczyna się o godz. 7:30 i kończy o 16:30 w dniach powszednich, czyli zaczyna się już w trakcie szczytu porannego, a kończy jeszcze w trakcie szczytu popołudniowego. O sytuacjach kryzysowych, które zdarzają się w dniach wolnych od pracy, pracownicy centrum dowiadują już po dniach wolnych od pracy.

Sytuacja taka rodzi dylemat czy warto jest stawiać wymagania, które będą skutkowały wydatkiem znacznych środków budżetowych na narzędzia do zbierania i analizowania danych o ruchu w trybie on-line, jeżeli mogą pojawić się problemy kadrowe i możliwości systemu nie będą w pełni wykorzystywane?

Doświadczenia krajowe nie napawają optymizmem również w zakresie informowania użytkowników poprzez znaki o zmiennej treści oraz strony internetowe. Przykładem w tym względzie może być Zintegrowany System Zarządzania Ruchem w Warszawie (ZSZR). Informacje o aktualnych warunkach ruchu na sieli ulicznej prezentowane w Internecie nie zawsze zgadzają się stanem faktycznym (rys. 2). Sytuacja taka może zniechęcać użytkowników z korzystania z takich informacji i powoduje kolejny dylemat zdefiniowania wysokich wymagań na etapie budowy systemu i ponoszenia adekwatnych kosztów. Jeżeli później, po oddaniu systemu, nie będzie wykonywana należyta rutynowa kontrola podawanych informacji i ich zgodności ze stanem faktycznym, to powstaje pytanie, czy warto inwestować w drogę urządzania i systemy.

Początkowo ZSZR w Warszawie miał wykonywać również krótkoterminowe prognozy ruchu podobnie jak wykonywane są w Systemie Zarządzania Ruchem w Berlinie

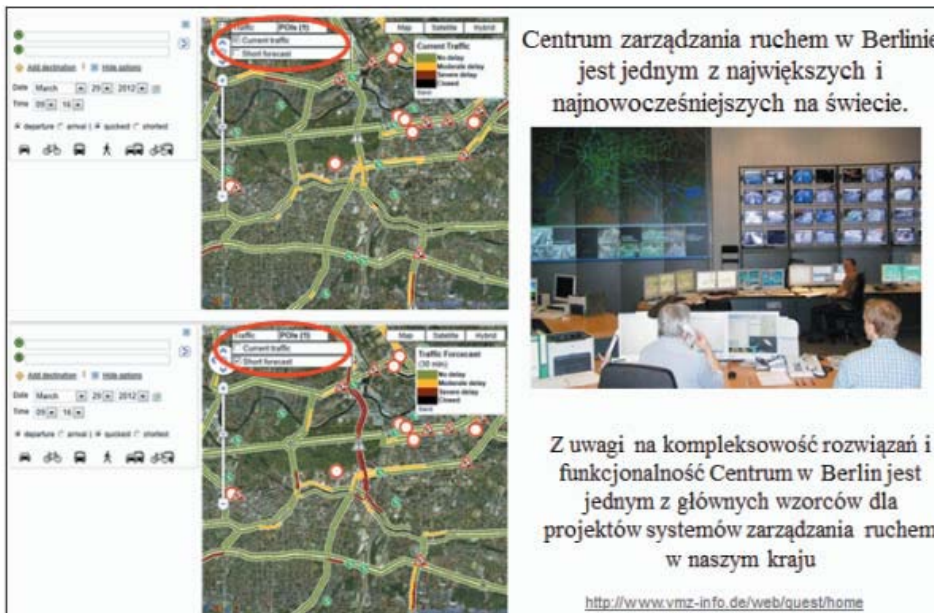


(rys. 3), który jest jednym z najbardziej zaawansowanych systemów w Europie. Jednak ostatecznie w Warszawie nie udało się zrealizować takiej funkcjonalności i informacje o prognozowanych warunkach ruchu nie są przedstawiane użytkownikom.



Rys. 2. Informacja o warunkach ruchu w ZSZR w Warszawie poprzez stronę internetową

Źródło: <http://zszr.zdm.waw.pl/>



Rys. 3. Przykład dostarczania informacji o aktualnych i prognozowanych warunkach ruchu z Berlina

Źródło: <http://www.v mz-info.de>

Na etapie projektowania i budowy ZSZR przedstawiano podsystem znaków o zmiennej treści, jako ten, który będzie stanowił wizytówkę systemu. Niestety informacje podawane kierowcom nie mają specjalnej przydatności. Na przykład informacje podawane o zatłoczeniach na poszczególnych odcinkach Wisłostrady nie mają praktycznego znaczenia, gdyż kierowcy nie mają innego wyjścia i dalej muszą jechać Wisłostradą lub dostają informację o utrudnieniach w sytuacji, kiedy już dobrze o tym wiedzą (rys. 4). Informacja o zatłoczeniu, mająca na celu zasugerowanie wybranie innej trasy, musiałaby zawierać również informację o potencjalnych objazdach i występujących na nich warunkach ruchu.

Dodatkową trudnością jest wymóg wynikający z rozporządzenia [3], dopuszczający możliwość wyświetlania jedynie komunikatów zatwierdzonych wcześniej przez Inżyniera Ruchu. Przy braku operatywnej współpracy odbywającej się w czasie rzeczywistym pomiędzy Inżynierem Ruchu, a Centrum ZSZR skuteczność informowania kierowców (oraz zarządzania ruchem) w sytuacjach awaryjnych jest mocno ograniczona.



Rys. 4. System znaków o zmiennej treści w ZSZR w Warszawie, dyskusyjna efektywność

Źródło: <http://zszr.zdm.waw.pl/>

Nasuwa się pytanie, czy należy zakładać budowę zaawansowanego i drogiego systemu znaków o zmiennej treści nie mając pewności, czy będzie on później w efektywny sposób wykorzystywany oraz czy podawane informacje będą przydatne kierowcom. Na uwagę zasługuje fakt, że w Polsce do tej pory nikt nie przeprowadził badań nad czytelnością i rozumieniem przez kierowców informacji dostarczanych poprzez systemy znaków o zmiennej treści. Nie ma również wytycznych jak formułować komunikaty, by były zrozumiałe dla kierowców. Przykładem dobrej praktyki może być Instytut BAST, który prowadził ponad dwu letni program

badawczy, w ramach którego, między innymi, oceniano sposób formułowania komunikatów w różnych krajach. Postawiono sobie za cel opracowanie wytycznych, przy stosowaniu których wyświetlane komunikaty będą zrozumiałe nie tylko dla osób znających język niemiecki [4, 5].

Jedną z często dyskutowanych kwestii jest sprawa własności i dostępności do modeli ruchu, które będą tworzone przez przyszłego wykonawcę KSZR. Już na pierwszym spotkaniu grupy roboczej za jeden z najważniejszych postulatów zgłoszonych przez ekspertów było wymaganie, by wszystkie opracowywane formuły i modele ruchu były dokładnie opisane oraz, co najważniejsze, mogły być w formie nadającej się do ich udostępniania poprzez GDDKiA instytucjom naukowym do prowadzenia prac badawczych oraz dalszej pracy nad ich udoskonalaniem.

Początkowo sprawa ta nie budziła kontrowersji i na pierwszym spotkaniu panował zgodność ekspertów co do sformułowania takiego wymagania. Jednak na ostatnich spotkaniach część przedstawicieli potencjalnych wykonawców oprotestowała ten postulat sugerując, że takie wymaganie może spowodować, że niektórzy potencjalni wykonawcy mogą nie wystartować w przetargu z uwagi na ochronę ich własności intelektualnej.

Sprawa z pozoru błaha urasta do dość poważnego problemu, ponieważ w sytuacji, kiedy wykonawca nie będzie musiał udostępnić zastosowanych modeli ruchu i rdzenia systemu (sposób wykonywania analiz i prognoz ruchu) i doprowadzi do działającej tzw. „czarnej skrzynki”, zapewni on sobie monopol na aktualizowanie modeli, wykonywanie funkcji operatorskich, itp. Dodatkowo zabezpieczy się przed dokładnym sprawdzeniem i weryfikacją wykonanych modeli ruchu oraz uzyskiwanych wyników. Będzie to niewątpliwie sytuacja bardzo korzystna dla przyszłego wykonawcy, która będzie stawiała go w uprzywilejowanej pozycji w stosunku do zamawiającego.

### 3. Opracowane propozycje wymagań w zakresie prognozowania ruchu

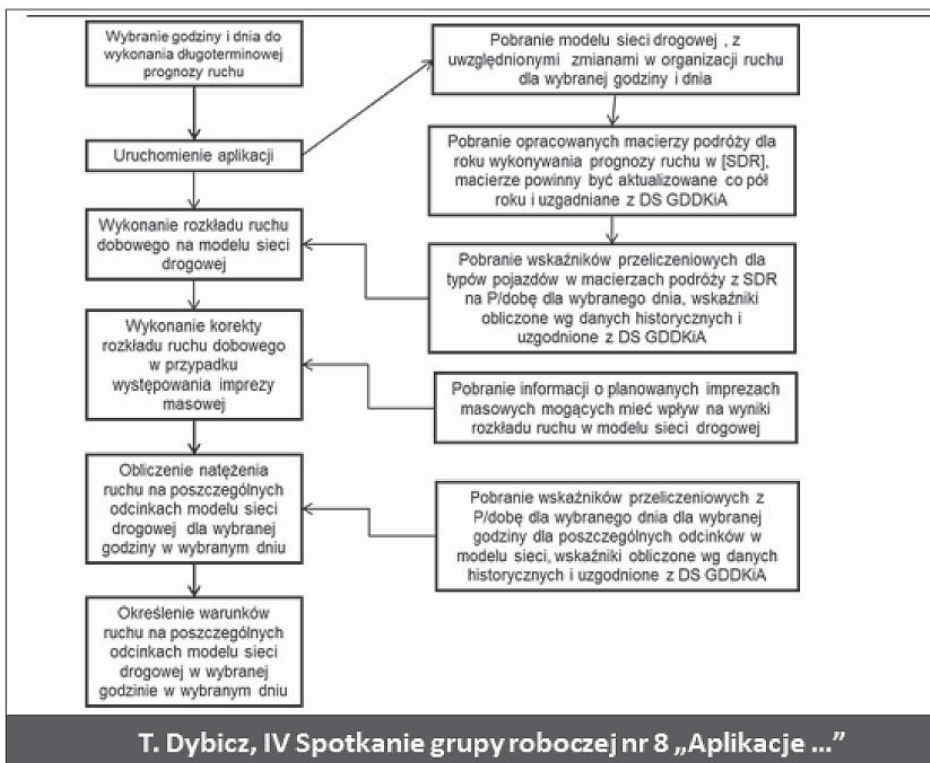
Jednym z podstawowych założeń, które miało późniejsze przełożenie na szczegóły prognozowania ruchu było przyjęcie założenia, że prognozy ruchu będą wykonywane dla trzech horyzontów czasowych:

- Horyzont krótkoterminowy – obejmuje okres czasu do 60 minut mierzonych od chwili bieżącej.
- Horyzont średnioterminowy – obejmuje okres czasu od 60 minut mierzonych od chwili bieżącej do kolejnych 240 minut.
- Horyzont długoterminowy – obejmuje okres czasu od 240 minut mierzonych od chwili bieżącej do ostatniego dnia 12. miesiąca liczonego od miesiąca bieżącego.

Odpowiednio dla każdego horyzontu czasowego zdefiniowano oddzielne wymagania co do poziomów szczegółowości prognoz ruchu oraz sposobu przedstawiania wyników.

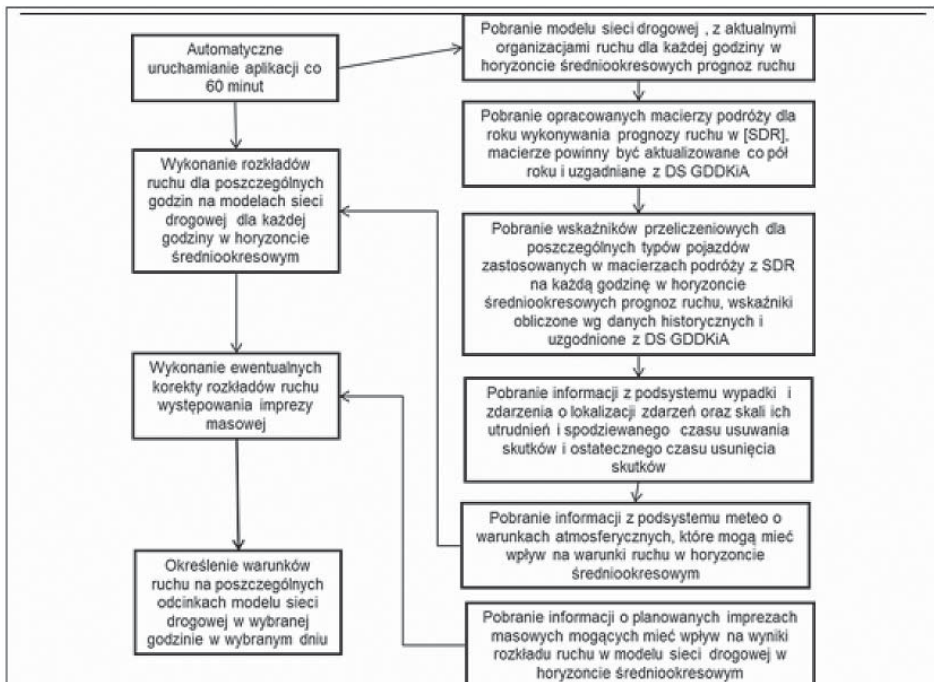
Zaproponowano, że przyszły Wykonawca, na potrzeby wykonywania prognoz średnio i długoterminowych, będzie musiał dostosować Krajowy Model Ruchu [6], który będzie mu udostępniony przez GDDKiA. Krajowy Model Ruchu do czasu wyłonienia zwycięzcy przetargu zostanie zaktualizowany przez Departament Studiów GDDKiA, niemniej jednak wykonawca będzie odpowiadał za ewentualne dalsze jego uaktualnienia i dostosowania na potrzeby KSZR.

Opracowano procedury (rys. 5 i 6), które mogą być wykorzystane przez wykonawcę przy wykonywaniu średnio i długoterminowych prognoz ruchu i prezentacji wyników na stronie internetowej systemu oraz wykorzystywane przez operatora systemu (rys. 7).



Rys. 5. Procedury do wykonywania długoterminowych prognoz ruchu





### T. Dybicz, IV Spotkanie grupy roboczej nr 8 „Aplikacje ...”

Rys. 6. Procedury do wykonywania średnioterminowych prognoz ruchu

The screenshot shows the 'Traffic Forecaster' web application. The interface includes a navigation menu on the left with options like 'Traffic Information', 'Road Projects', 'Accidents', 'Your Partners', 'Contact Us', and 'Register for small alerts'. The main content area is titled 'Traffic Forecaster' and contains two steps: 'STEP 1: Choose from...' with a 'Traffic Conditions' dropdown, and 'STEP 2: Select an area, or use the map'. Below this, there is a list of regions with examples: North (e.g., Newcastle, Carlisle, Sunderland), Central North (e.g., Liverpool, Manchester, Leeds), West Midlands (e.g., Birmingham, Wolverhampton, Coventry), East Midlands (e.g., Nottingham, Leicester, Norwich), South West (e.g., Exeter, Plymouth, Truro), South East (e.g., London, Brighton, Dover), and South (e.g., Southampton, Bournemouth, Portsmouth). On the right, there is a map of England with a red circle indicating a selected area. The date is set to November 3, 2012, and the time to 18:00. The 'transport' logo is visible in the bottom left corner.

Rys. 7. Przykład wykonywania prognozy ruchu poprzez stronę internetową systemu zarządzania ruchem

Źródło: <http://www.trafficengland.com>

Zaproponowano, że Krajowy Model Ruchu przed przekazaniem wykonawcy zostanie zweryfikowany i uaktualniony przez GDDKiA w następującym zakresie:

- podział na rejony komunikacyjne,
- rozkład przestrzenny podróży, motywacje i kategorie pojazdów,
- podział na typy odcinków, przepustowość odcinków, prędkości w ruchu swobodnym pojazdów,
- parametry funkcji do obliczeń prędkości w zależności od natężenia ruchu,
- procedury wprowadzania LOP i ich uwzględniania przy określaniu warunków ruchu,
- wartości VOT oraz VOC dla poszczególnych typów pojazdów i motywacji podróży,
- wskaźniki komfortu i stawki opłat dla poszczególnych typów dróg.

Wykonawca w przypadku wykorzystania modelu, pomimo jego uaktualnienia, będzie musiał zweryfikować i uaktualnić go we własnym zakresie tak, by mógł być wykorzystany do realizacji zadań w KSZR.

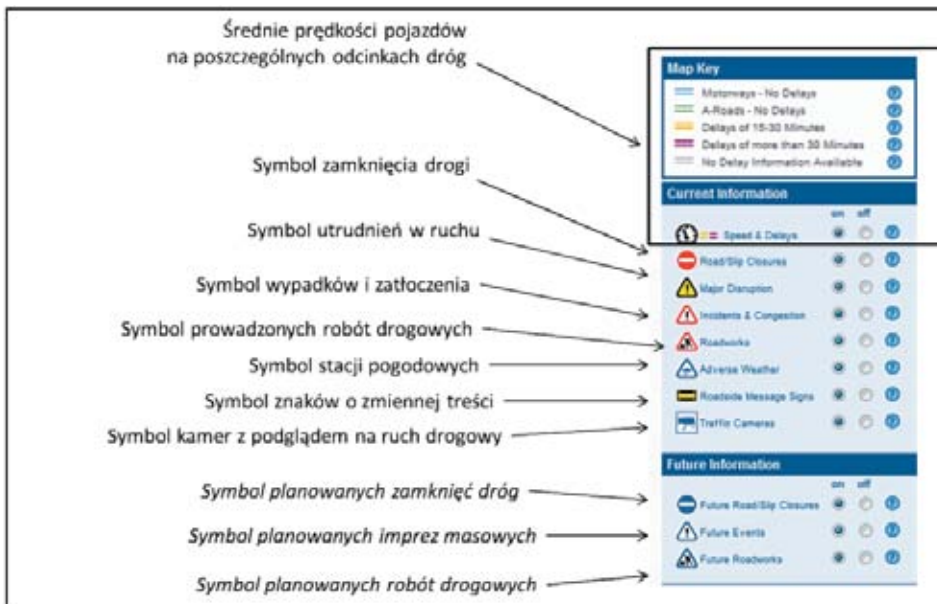
Jednym z najważniejszych elementów średnio i długoterminowego prognozowania ruchu jest skorelowanie modelu z bazą danych o planowanych remontach, zmianach organizacji ruchu oraz występowania imprez masowych (rys. 8, 9 i 10).



Rys. 8. Przykład informowania o bieżących i przyszłych zdarzeniach mogących mieć wpływ na warunki ruchu na sieci drogowej

Źródło: <http://www.trafficengland.com>





Rys. 9. Przykład legendy mapy dostępnej na stronie internetowej systemu zarządzania ruchem, na której użytkownicy mogą sprawdzić bieżące i planowane utrudnienia w ruchu

Źródło: <http://www.trafficengland.com>

The Disruptions Search provides you with a complete list of all known current and expected disruptions on the motorways and major A-Roads. Why not try selecting the date of your trip to see if there are any planned events or roadworks that are expected to cause delays?

Date of Travel  
 Start Date: 15 July 2012  
 Delays for the next: Month  
 Delay Time: All

Traffic Information  
 Road Slip Closures  
 Major Disruption  
 Incidents & Congestion & Future Events  
 Roadworks  
 Adverse Weather

Road / Direction of Travel  
 Road Type: Motorway  
 Road Name: M1  
 Direction: Both  
 Search

Disruptions on the M1 (Both)

Last updated: 12:03pm  
 Print Disruptions  
 Update Now  
 Save This DS View

Sort By: Road  
 Show: 10 results per page  
 page 1 of 2

Road	Location	Direction	Description	Delay	Start Date/Time	End Date/Time	Map
M1	J10 ↓ J11	Northbound	<b>Current Roadworks</b> Roadworks On the M1 northbound between junctions J10 and J11, there are currently delays of 10 mins due to roadworks. Expect disruption until 12:30 on 31 December 2012.	10 mins	N/A	31/12/2012 00:00	Map
M1	J10 ↓ J11	Northbound	<b>Future Roadworks</b> Roadworks On the M1 northbound between junctions J10 and J11, expect delays of up to 30 mins at peak times due to roadworks. From 12 am on 1 August 2009 to 12 am on 31 December 2012.	30 mins	1/08/2009 00:00	31/12/2012 00:00	Map
M1	J12	Northbound	<b>Current Roadworks</b> Roadworks	10 mins	N/A	30/12/2012	Map

Rys. 10. Przykład informowania użytkowników poprzez stronę internetową o planowanych remontach i zamknięciach odcinków oraz planowanych imprezach masowych

Źródło: <http://www.trafficengland.com>

Model ten powinien być zapisany w formacie/formatkach, które będą umożliwiały jego późniejsze przekazywanie do GDDKiA.

Zaproponowano, że model będzie dopuszczony do wykorzystywania w KSZR, jeżeli będzie spełniał co najmniej kryterium GEH na 85% odcinków w sieci, a poszczególne elementy modelu będą uzgadniane z GDDKiA. Trwają prace nad ustaleniem wymogu co do kalibracji rozkładu długości podróży.

Ustalono również, że w przypadku krótkoterminowych prognoz ruchu stosowane będą modele ruchu, z których każdy będzie odpowiadał za realizację innych zadań (rys. 11):

- model opierający się na formułach i danych on-line o prędkościach pojazdów na sieci drogowej. Zadaniem modelu będzie obliczanie czasów przejazdu, które będą podawane na znakach o zmiennej treści;
- model opierający się o klasyczne modelowanie ruchu, który będzie służył do badania alternatywnych strategii przez operatora systemu w przypadku wystąpienia sytuacji kryzysowych lub nadzwyczajnych.

Trwa dyskusja na sformułowanie wymagań dla modeli, które będą stosowane do krótkoterminowego prognozowania ruchu. Jeden z wariantów, to wymaganie, że model obliczający średnie czasy przejazdu samochodów osobowych, które będą podawane na znakach o zmiennej treści, powinien być dokładny w zakresie +/- 20%, natomiast model do badania alternatywnych strategii zarządzania ruchem powinien prawidłowo określać warunki ruchu (przyjęto 3 poziomy) na 85% liczby odcinków (rys. 12).



Rys. 11. Przykład przedstawiania wyników krótkookresowych prognoz ruchu

**Dokładność modeli wykorzystywanych do krótkoterminowego prognozowania ruchu**

Zgodność prezentowanych warunków ruchu na 85% odcinkach (objętych KSZR)  
- definicja 3 poziomów warunków?

Dokładność przedstawiania średniego czasu przejazdu samochodów osobowych +/- 20%

dane tylko z kamer (rejestracje pojazdów)  
- na węzłach  
- Via Toll mało przydatny w systemie zamkniętym

T. Dybicz, IV Spotkanie grupy roboczej nr 8 „Aplikacje ...”

Rys. 12. Dyskutowane propozycje wymagań dla modeli do krótkoterminowego prognozowania ruchu

#### 4. Wnioski

Prace grup ekspertów zajmujących się opracowaniem specyfikacji technicznych dla KSZR zostały zakończone w lipcu br. i są materiałem GDDKiA służącym do wypracowania końcowych specyfikacji, które zostaną przedstawione w przetargu potencjalnym Wykonawcom. Z uwagi na powyższe dyskusja nad dylematami, których część została przedstawiona w niniejszej publikacji oraz nad propozycją wymagań może wspomóc prace GDDKiA służące zakończeniu prac nad specyfikacjami. Wydaje się, że konferencja MODELOWANIE PODRÓŻY I PROGNOZOWANIE RUCHU z uwagi na obecność szerokiego grona ekspertów zajmujących się problematyką modelowania i prognozowania ruchu będzie odpowiednim miejscem do przeprowadzenia dyskusji w zakresie wymagań będących przedmiotem pracy grupy ekspertów nad wymaganiami dla Aplikacji dedykowanych do krótko- i długoterminowych prognoz ruchu.

## Literatura

- [1] Prezentacja: "Krajowy System Zarządzania Ruchem". GDDKiA, luty 2012.
- [2] Warunki techniczne dostaw dla stacji drogowych E N T W U R F TLS 2010. Federalny Urząd ds. Drogownictwa (BASt), Bergisch.
- [3] ROZPORZĄDZENIE MINISTRÓW INFRASTRUKTURY ORAZ SPRAW WEWNĘTRZNYCH I ADMINISTRACJI w sprawie znaków i sygnałów drogowych. Dz. U. z dnia 12 października 2002 r.
- [4] RWVA: Richtlinien für Wechselverkehrszeichenanlagen an Bundesfernstraßen; Verkehrsblatt-Dokument Nr. B 6740. Verkehrsbl.-Verlag, 1997.
- [5] RWVZ. Richtlinien für Wechselverkehrszeichen an Bundesfernstraßen Verkehrsblatt-Dokument; B 6738. Verkehrsblatt-Verlag, 1997.
- [6] Budowa oraz zastosowania Krajowego Modelu Ruchu (2005). GDDKiA 2009.

## MODELOWANIE RUCHU DROGOWEGO DLA POTRZEB KRÓTKOOKRESOWYCH PROGNOZ RUCHU<sup>1</sup>

**Tomasz Dybicz**

dr inż., Instytut Dróg i Mostów, Politechnika Warszawska, 00-637 Warszawa, Al. Armii Ludowej 16, tel. +48 22 234 629, e-mail: T.Dybicz@il.pw.edu.pl

**Wojciech Suchorzewski**

prof. dr inż., Instytut Dróg i Mostów, Politechnika Warszawska, 00-637 Warszawa, Al. Armii Ludowej 16, tel. +48 22 234 6297, e-mail: W.Suchorzewski@il.pw.edu.pl

---

***Streszczenie.** Niniejszy artykuł dotyczy modelowania ruchu drogowego dla potrzeb zarządzania ruchem w czasie rzeczywistym. Realizacja tego zadania jest jednym z największych wyzwań dla specjalistów zajmujących się modelowaniem ruchu. W artykule przedstawiono funkcje modeli ruchu, które są stosowane w krótkookresowych prognozach ruchu oraz ich podział na kategorie. Wykonano przegląd wyników badań nad wpływem treści komunikatów VMS na zachowania kierowców. Przedstawiono przykład zastosowania modułu VMS w programie Paramics w zarządzaniu ruchem na obwodnicy miasta Maastricht w Holandii. Przedstawiono dwie koncepcje prognozowania i modelowania ruchu umożliwiające uwzględnienie wpływu komunikatów VMS na rozkład ruchu na modelach sieci drogowych.*

*Słowa kluczowe:* modelowanie ruchu, prognozowanie ruchu, zarządzanie ruchem

### 1. WSTĘP

Niniejszy artykuł dotyczy jednej z wielu kwestii poruszonych w artykule współautora niniejszego artykułu, T. Dybicza<sup>2</sup>. Jest nią modelowanie ruchu drogowego dla potrzeb zarządzania ruchem w czasie rzeczywistym. Decyzje dotyczące strategii podejmowane są automatycznie lub przez operatora. W obu przypadkach konieczne jest przewidywanie wpływu tych decyzji na rozkład i w efekcie na natężenia i warunki ruchu. Realizacja tego zadania jest jednym z największych wyzwań dla specjalistów zajmujących się modelowaniem ruchu. Jest oczywiste, że wymagania dotyczące modeli ruchu wspierających zarządzanie ruchem zależą od kategorii systemu zarządzania ruchem. Dwie najczęściej spotykane kategorie to: (i) zarządzanie ruchem w obszarach miejskich (obszarowe) oraz (ii) zarządzanie ruchem na drogach krajowych (linio-sieciowe). W artykule skupiono się na drugim przypadku.

---

1 Wkład autorów w publikację: Dybicz T. 50%, Suchorzewski W. 50%

2 T.Dybicz. Propozycja wymagań dla prognozowania ruchu w krajowym systemie zarządzania ruchem.

## 2. FUNKCJE MODELI RUCHU STOSOWANYCH W KRÓTKOOKRESOWYCH PROGNOZACH RUCHU

Do najważniejszych funkcji zaawansowanych systemów zarządzania ruchem należy: (i) informowanie użytkowników o warunkach ruchu, aktualnych i spodziewanych w najbliższym okresie; (ii) reagowanie na zdarzenia, takie jak awarie i wypadki. Obie te funkcje wymagają krótkoterminowych prognoz ruchu. Termin ten używany jest dla prognoz dotyczących krótkich okresów czasu mierzonych od chwili bieżącej. Długość tego okresu przyjmowana przez autorów różnych rozwiązań waha się od kilkunastu minut do nawet 12 godzin (Amsterdam). W pracach nad wymaganiami dla systemu zarządzania na drogach krajowych (KSZR) jako horyzont czasowy dla krótkoterminowych prognoz ruchu przyjęto 60 minut.

W sytuacji, kiedy nie występują zdarzenia nieprzewidziane, prognoza ruchu może być oparta na wynikach monitoringu (pomiarach natężeń ruchu i czasu pokonywania odcinków) oraz danych historycznych dla danego okresu. Znacznie bardziej złożonym, trudniejszym zadaniem jest prognozowanie ruchu w przypadku zdarzeń nieprzewidzianych. Podstawowym celem jest wówczas wybór optymalnej strategii zarządzania ruchem. Po dokonaniu wyboru strategii i rozpoczęciu jej wdrażania, konieczne jest dostarczenie danych do systemu informowania użytkowników, np. o spodziewanych warunkach ruchu w obszarze wpływu zdarzenia. Formy przekazywania informacji do użytkowników to: znaki o zmiennej treści, internet, radio, CB radio, i in.

## 3. KATEGORIE MODELI RUCHU

Zróznicowanie funkcji modeli ruchu skłania do stosowania modeli dwóch kategorii. Pierwszy, to model stosowany do obliczania aktualnych czasów przejazdu (stan „0”), wykorzystujący bieżące dane o ruchu (natężenia, prędkości i czasy przejazdu wybranych odcinków). Wyniki obliczeń są podstawą informacji dla użytkowników. Czas aktualizacji obliczanych i podawanych czasów przejazdów nie powinien przekraczać kilku minut. W wytycznych dla KSZR model ten nazwano Modelem Bazowym (MB). Jako okres aktualizacji przyjęto 6 minut.

W przypadkach zdarzeń mających wpływ na warunki ruchu, konieczne jest zastosowanie bardziej złożonego modelu, którego celem jest analiza wariantowych strategii zarządzania ruchem. Wybór strategii dokonywany jest przez operatora. Model tej kategorii, w wytycznych KSZR nazwany Modelem Strategicznym (MS), może być zbudowany z wykorzystaniem standardowej metodyki modelowania ruchu.

Po wyborze i rozpoczęciu wdrażania strategii informacje o warunkach ruchu (czasy przejazdu) zastępują informacje podawane na podstawie modelu bazowego. Dodatkowo emitowane są informacje o zalecanych/rekomendowanych trasach przejazdu w obszarze wpływu zdarzenia.



#### 4. DYLEMATY

Do najtrudniejszych zadań stojących przed opracowującymi krótkoterminowe prognozy ruchu jest uwzględnienie sposobu uwzględnienia przez użytkowników/kierowców informacji o warunkach ruchu, w tym zwłaszcza zaleceń wyboru trasy. Na temacie tym skoncentrowano się w kolejnym punkcie.

Inny problem wynika z faktu, że zarządzanie ruchem obejmuje często tylko część sieci drogowej, natomiast ruch rozkłada się na sieć znacznie bogatszą. Oznacza to, że przy prognozowaniu ruchu analizą objąć należy sieć znacznie bogatszą, niż sieć objęta zarządzaniem ruchem. Wynikają z tego trzy trudności. Po pierwsze, strategiczne modele ruchu budowane muszą być dla sieci znacznie bogatszej, niż objęta przedmiotowym systemem zarządzania ruchem. Drugi problem wynika z faktu, że ograniczone są możliwości uzyskiwania informacji o ruchu (natężenia, struktura, czasy przejazdu odcinków i in.) na sieci objętej modelem. Dotyczy to zwłaszcza dróg samorządowych. A w przypadku, gdy informacje takie są zbierane (np. w niektórych miastach), konieczne jest zastosowanie interfejsów, umożliwiających wykorzystanie danych, na ogół o różnorodnym formacie. Trzeci problem wynika z faktu, że skuteczność strategii zarządzania ruchem, np. na kluczowej drodze krajowej, w sytuacjach kryzysowych może być znacznie zwiększona, o ile obejmie ona również doraźne dostosowanie zarządzania ruchem (np. sterowanie na skrzyżowaniach) w obszarze wpływu tej drogi. Wymaga to jednak decyzji politycznej (gotowość współpracy zarządców dróg) oraz rozbudowy modelu strategicznego o dodatkowe komponenty.

#### 5. REAKCJA UŻYTKOWNIKÓW NA INFORMACJE O WARUNKACH RUCHU

Rzeczywisty rozkład ruchu na sieci drogowej a nawet wybór środka transportu w pewnym stopniu zależy od zachowań użytkowników, w tym od ich reakcji na informacje o warunkach ruchu. W przypadku operatywnego zarządzania ruchem, uwzględniającego aktualną sytuację, chodzi przede wszystkim o trafność przewidywań skutków decyzji operatora, podejmowanych z uwzględnieniem wyników prognoz krótkoterminowych. Trafność ta zależy od jakości zastosowanych modeli, które powinny brać pod uwagę typowe zachowania użytkowników. Dwa podstawowe pytania, to: (i) udział (odsetek) użytkowników, do których dotrą informacje o warunkach ruchu i zaleconych reakcjach (np. trasy objazdu), oraz (ii) udział odbiorców informacji, którzy podjęli decyzję o zmianie trasy, celu czy nawet rezygnacji z kontynuowania podróży. Odpowiedź na te pytania jest przedmiotem badań, jednak wyniki tych badań są wciąż ograniczone.

Dowodem złożoności tematu są wyniki badań wykonanych w Purdue University<sup>3</sup>, dotyczących wpływu jakości i treści znaków o zmiennej treści (VMS) na zacho-

3 School of Civil Engineering, Purdue University,

wania kierowców<sup>4</sup>. Badania dotyczyły wycinka obciążonej dużym ruchem wycinka sieci autostrad i dróg głównych w stanie Illinois. Badano preferencje kierowców przez ich ankietowanie. Badanie wykazało, że na wybór/zmianę trasy największy wpływ ma szczegółowość i konkretność informacji. Czynniki dodatkowe, to: kategoria użytkownika (płeć, wiek, kierowca samochodu osobowego lub ciężarowego), znajomość sieci i opinia o trafności rekomendacji (zaufanie).

Wynikowy ranking wariantowych treści podanych informacji był następujący (w kolejności stopnia wpływu na zachowanie, poczynając od najmniej skutecznych):

- 1) Informacja o wypadku – wyłącznie.
- 2) Informacja o miejscu wypadku – wyłącznie.
- 3) Przewidywane straty czasu – wyłącznie.
- 4) Zalecana trasa objazdu – wyłącznie.
- 5) Lokalizacja miejsca wypadku i zalecana trasa objazdu.
- 6) Lokalizacja miejsca wypadku i przewidywane straty czasu.
- 7) Przewidywane straty czasu i zalecana trasa objazdu.
- 8) Lokalizacja miejsca wypadku, przewidywane straty czasu i zalecana trasa objazdu.

Wyniki badań były podstawą budowy logitowego binarnego modelu umożliwiającego przewidywanie udziału kierowców wybierających zalecaną trasę w zależności od treści informacji na znaku zmiennej treści. Wnioski końcowe podsumować można następująco: (i) treść informacji ma decydujące znaczenie; najbardziej efektywne są informacje zintegrowane (opcje 7 i 8); (ii) kierowcy samochodów ciężarowych są bardziej sceptyczni i w mniejszym stopniu wybierają sugerowane trasy.

Badania wpływu informowania użytkowników o warunkach ruchu i zalecanych trasach alternatywnych na ich zachowania przeprowadzono w wielu innych krajach i miastach, w tym w Amsterdamie<sup>5</sup>, Atenach<sup>6</sup>, Pekinie, Danii, Indiach. Jednym z kryteriów oceny skuteczności systemów informowania użytkowników jest badanie zgodności między prognozowanymi i zaobserwowanymi warunkami ruchu.

## 6. MIKROSYMULACJA RUCHU JAKO NARZĘDZIE WSPIERAJĄCE PROGNOZY KRÓTKOOKRESOWE

Jednym z rozwiązań stosowanych w krótkoterminowym prognozowaniu ruchu jest uwzględnienie wpływu znaków o zmiennej treści (VMS) w mikrosymulacyjnych modelach ruchu. Jednym z przykładów jest procedura przetestowana na

4 Srinivas Peeta, Jorge L. Ramos, and Raghubhushan Pasupathy. Content of Variable Message Signs and On-Line Driver Behavior (2000). Transportation Research Record 1725. Paper No. 00-0970. P.102-108

5 Jan Maarten van den Berg. Short term traffic forecast, lessons from Amsterdam. City of Amsterdam, Department for Traffic and Transport

6 Dimitris Sermpis, Charilaos Babis, Pavlos Chorianopoulos. The Impact of VMS on Drivers' Route Choice in Athens. 2007

obwodnicy holenderskiego miasta Maastricht<sup>7</sup>. Zbudowany został moduł umożliwiający uwzględnienie wpływu znaków VMS w programie symulacyjnym Paramics. Operator systemu otrzymał narzędzie do wyboru informacji dostarczanych kierowcom, biorąc pod uwagę wykorzystanie tych informacji.

Moduł VMS wykorzystuje: (i) system detekcji zatłoczenia (kolejek) na autostradach holenderskich; (ii) dane o reakcji kierowców na informacje wyświetlane na znakach VMS w Rotterdamie; (iii) dynamiczną procedurę wyboru trasy w programie Paramics; (iv) oprogramowanie stosujące Standard Network Management Protocol; (v) wyniki testowania procedury na przykładzie obwodnicy miasta Maastricht.

Oryginalnym, szczególnie interesującym elementem procedury wyboru informacji dla kierowców jest testowanie jej skuteczności przez porównanie wynikającego z obliczeń optymalnego podziału ruchu między alternatywne trasy (z którego wynika informacja dla kierowców) z rzeczywistym, zaobserwowanym podziałem ruchu. W przypadku braku zgodności dokonywana jest korekta treści komunikatów.

Treść komunikatów może obejmować: długość kolejek, czas przejazdu odcinka, ostrzeżenie o zdarzeniach. Strategie zarządzania ruchem obejmują m.in.: dynamiczne zarządzanie ruchem na pasach (w tym na pasie awaryjnym) i ograniczenia prędkości.

Niestety z uwagi na duże ograniczenie możliwości powiązania mikrosymulacji ruchu z procedurami wyboru optymalnych ścieżek przejazdu różnych typów pojazdów i motywacji podróży pomiędzy rejonami komunikacyjnymi<sup>8</sup> (w praktyce jest to ograniczone do stosunkowo niewielkich obszarów<sup>9</sup>) zastosowanie metody podobnej do zastosowanej w przypadku obwodnicy miasta Maastricht w KSZR nie będzie możliwe.

## 7. PROGNOZOWANIE RUCHU Z UWZGLĘDNIENIEM WPŁYWU KOMUNIKATÓW VMS NA ZACHOWANIA KIEROWCÓW

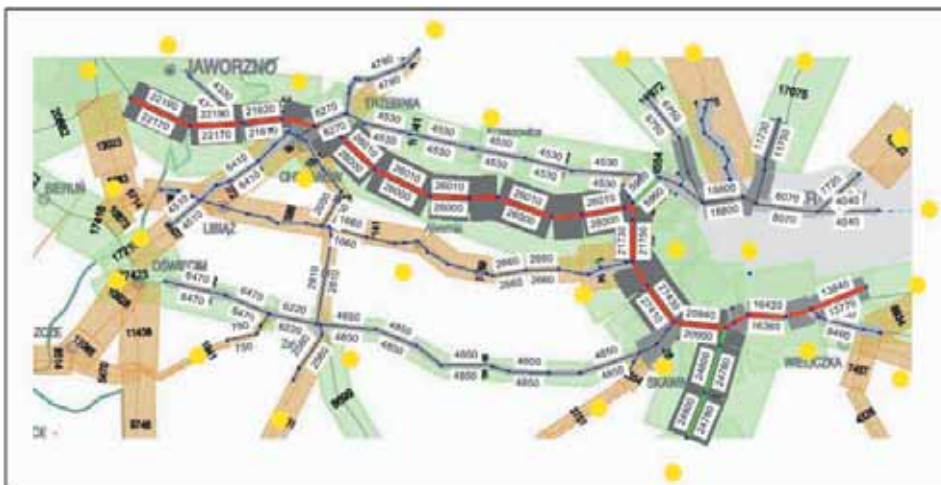
Opisane wcześniej zależności występujące pomiędzy treściami komunikatów VMS, a prawdopodobieństwem dokonania zmiany trasy przejazdu kierowców, mogą być wykorzystane również w krótkoterminowym prognozowaniu ruchu na potrzeby zarządzania ruchem.

W celu zobrazowania potencjalnej metody modelowania ruchem, która umożliwi uwzględnienie wpływu VMS, wykorzystano wycinek Krajowego Modelu Ruchu z ruchem prognozowanym dla roku 2015 (rys. 1).

7 N.D. Cohn, P. Krootjes, J.C. Zee, Simulating Variable Message Signs. Influencing dynamic route choice in microsimulation. Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk 2004

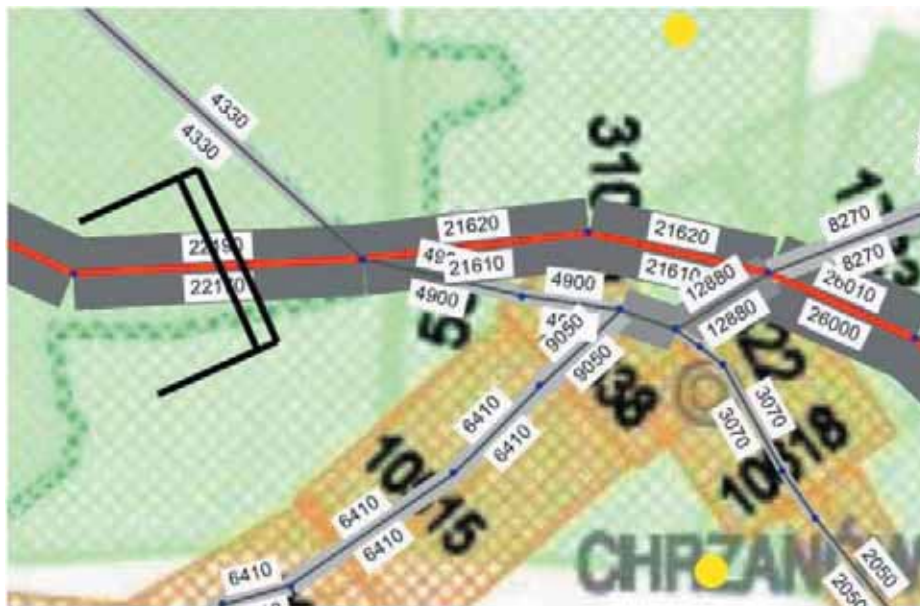
8 T. Dybicz. Metodyka uwzględniania lokalnych ograniczeń przepustowości w modelowaniu ruchu. Rozprawa doktorska. Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Warszawa 2009 r.

9 Friedrich M. i inni. A Dynamic Traffic Assignment Method for Planning and Telematic Applications, Proceedings of Seminar K, European Transport Conference, Cambridge, 2000



Rys. 1. Prognoza ruchu (SDR), rok 2015 - Krajowy Modelu Ruchu

W analizowanym fragmencie Krajowego Modelu Ruchu przebiega autostrada A4. Na podstawie zapowiedzi przedstawicieli GDDKiA można domniemywać, że będzie ona włączona do KSZR. Jeżeli przed węzłem Chrzanów będzie ustawiona tablica VMS (rys. 2), operator systemu będzie mógł informować kierowców o zdarzeniach mających negatywny wpływ na warunki ruchu występujące na odcinku od Chrzanowa do Krakowa.



Rys. 2. Potencjalna lokalizacja tablicy VMS na autostradzie A4 w przypadku, gdy będzie ona włączona do KSZR



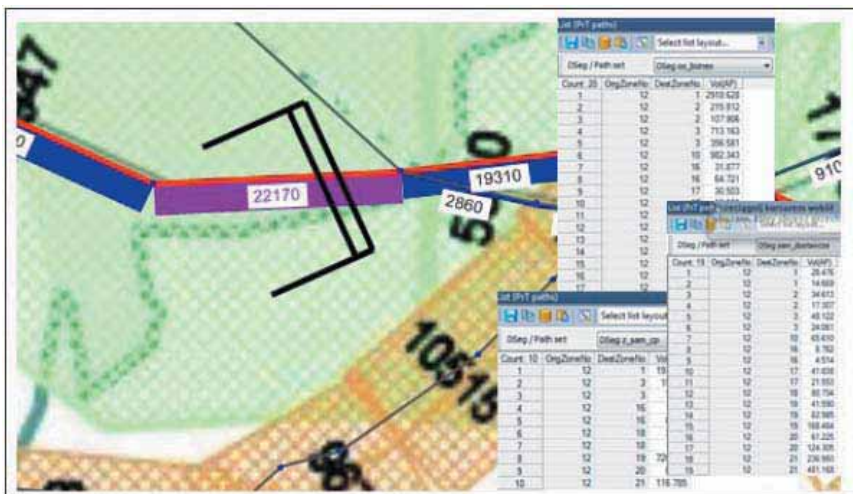
Znając zależności pomiędzy treścią komunikatów a zachowaniami kierowców, operator będzie mógł oszacować jaki procent kierowców (w zależności od typu pojazdu i motywacji podróży) zjedzie na najbliższych węzłach na trasy alternatywne.

Dysponując narzędziem, które umożliwi operatorowi wykonanie analizy zmiany warunków ruchu na drogach alternatywnych, którą spowodują pojazdy zjeżdżające z autostrady jeszcze przed wyświetleniem komunikatu, operator będzie mógł dobrać w procesie iteracyjnym badania wpływu komunikatu optymalną treść komunikatu, mając na uwadze warunki ruchu na autostradzie oraz na drogach alternatywnych.

Podstawowa trudność modelowania wpływu komunikatu VMS polega na tym, że nie można po prostu zmieniać parametrów odcinków (np. ograniczając ich przepustowość, czy prędkość ruchu) leżących za tablicą VMS. Takie podejście jest z powodzeniem stosowane w planowaniu, jednak przy dynamicznym zarządzaniu ruchem jest niepraktyczne. Przy takim podejściu, w czasie rozkładania ruchu na modelu sieci drogowej, część podróży zostanie przeniesiona na inne ciągi, przez co zmniejszy się natężenie ruchu również na odcinku, na którym zlokalizowana jest tablica VMS. Niestety, prawidłowe modelowanie ruchu wpływu VMS wymaga, by wpływ komunikatu na zachowania kierowców wywierany był na odcinkach za tablicą VMS. Stąd natężenie ruchu na odcinku, na którym jest tablica VMS musi być stałe, niezależne od rodzaju wyświetlanego komunikatu.

Niestety aktualnie nie ma programu czy modułu, które umożliwiłyby operatorowi wykonywanie takich analiz w sposób automatyczny. Do wykonania takich analiz można posłużyć się następującą metodą.

W pierwszym kroku operator może sprawdzić tzw. drzewka podróży przechodzących przez odcinek, na którym jest zainstalowana tablica VMS oraz wykaz podróży z uwzględnieniem rejonów komunikacyjnych początku i końca podróży, liczby podróży w podziale na poszczególne typy pojazdów i motywacje podróży (rys. 3).



Rys. 3. Przykład sprawdzenia drzewek podróży i wykonania listingów dla podróży przejeżdżających przez odcinek z tablicą VMS

W następnym kroku operator powinien wprowadzić dodatkowy rejon komunikacyjny, który będzie podłączony centroidą do pierwszego węzła leżącego za tablicą VMS. Następnie operator powinien zmodyfikować macierze podróży. Rejon docelowy podróży, które przechodziły przez odcinek z tablicą VMS powinien zostać podmieniony na nowo utworzony rejon komunikacyjny. W zależności od treści komunikatu, odpowiedni procent podróży powinien zostać przekierowany na trasy alternatywne. W tym celu operator przypisze w macierzy podróży, jaka liczba podróży będzie „kontynuować” podróż autostradą, gdzie nowy rejon będzie rejonem początkowym, a rejonem końcowym będzie pierwotny docelowy rejon komunikacyjny. W przypadku podróży, które powinny wybrać trasy alternatywne, kontynuacja podróży powinna zostać zapisana w taki sposób, że nowy rejon będzie również rejonem początkowym, a rejonem końcowym będzie rejon leżący na trasie alternatywnej. W celu umożliwienia kolejnej kontynuacji tych podróży w modelu, rejon leżący na trasie alternatywnej posłuży jako rejon początkowy, a rejonem końcowym będzie pierwotny docelowy rejon komunikacyjny.

Dobór rejonu pośredniego leżącego na trasie alternatywnej musi być dobrany w taki sposób, by nie dopuścić do „powrotu” pojazdów na odcinek autostrady leżący za tablicą VMS.

W drugiej proponowanej metodzie operator będzie postępował podobnie jak w przypadku pierwszej metody do momentu wprowadzenia dodatkowego rejonu komunikacyjnego, który będzie podłączony centroidą do pierwszego węzła drogowego za tablicą VMS. Na podstawie wykonanego wykazu podróży operator powinien dodać w modelu użytkowników, którzy będą przeniesieni na trasy alternatywne. Każdy dodany użytkownik powinien mieć przyporządkowane takie same składowe koszty uogólnione jak użytkownik podstawowy. Różnica będzie dotyczyła tylko odcinka leżącego za tablicą VMS, z którego dodani użytkownicy nie będą mogli korzystać.

Wszystkie podróże przechodzące przez odcinek z tablicą VMS będą musiały zostać podzielone na dwie części. Pierwsza będzie się kończyła w nowym rejonie komunikacyjnym. Druga podróż będzie się w tym rejonie zaczynała i będzie się kończyć w docelowym rejonie komunikacyjnym.

Wykorzystując wykaz podróży korzystających z odcinka z tablicą VMS, operator będzie mógł przenieść odpowiedni procent podróży (bazując na wpływie treści komunikatu na zachowania kierowców) z podstawowych macierzy podróży do macierzy dla dodanych grup użytkowników. Wykonanie rozkładu ruchu na model sieci drogowej zaowocuje tym, że na odcinku z tablicą VMS natężenie ruchu będzie stałe, natomiast poprzez zablokowanie możliwości wjazdu dodatkowych użytkowników na odcinek autostrady leżący za tablicą, kierowcy będą automatycznie wybierać odcinki alternatywne bez konieczności „prowadzenia” ruchu, jak w przypadku pierwszej procedury.



## 7. WNIOSKI

Krótkoterminowe prognozowanie natężeń i warunków ruchu jest szczególnie trudnym zadaniem. Trafność prognoz decyduje o efektywności zaawansowanych systemów zarządzania ruchem, zwłaszcza w sytuacjach wymagających doraźnych interwencji (zdarzenia/wypadki, warunki pogodowe, imprezy i in.). Jednym z najtrudniejszych zadań jest uwzględnienie w modelach ruchu zachowań użytkowników/kierowców (wybór trasy) i ich wpływu na rzeczywisty rozkład i warunki ruchu. Istnieją podstawy do twierdzenia, że: (i) istotny wpływ na udział kierowców zmieniających trasę pod wpływem informacji o warunkach ruchu i zalecanych trasach ma treść i forma informacji; (ii) występują istotne różnice między stopniem reagowania różnych grup użytkowników oraz wynikające z różnic kulturowych. Wśród wymagań stawianych modelom ruchu jednym z trudniejszych do spełnienia są także bardzo krótkie (kilkuminutowe) przedziały czasowe. Dotyczy to zwłaszcza modeli/procedur stosowanych do analizy i wyboru wariantowych strategii zarządzania ruchem w przypadkach nietypowych. Przedstawione wyżej propozycje dwóch procedur, umożliwiających uwzględnienie wpływu treści komunikatów na rozkład ruchu, powinny być przeanalizowane pod kątem celowości ich wykorzystania w krajowym systemie zarządzania ruchem.

# WPŁYW INTENSYWNOŚCI ZABUDOWY NA UDZIAŁ KOMUNIKACJI ZBIOROWEJ W PODRÓŻACH – ANALIZA MODELOWA

---

Aleksandra Faron

mgr inż., Katedra Systemów Komunikacyjnych, Politechnika Krakowska, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, tel. +48 12 628 2028, afaron@pk.edu.pl

---

**Streszczenie.** *Planowanie struktury przestrzennej miasta powinno wpływać na przeciwdziałanie zatłoczeniu motoryzacyjnemu, co przejawia się zwiększaniem udziału komunikacji zbiorowej w podróży. Proces ten powinien brać pod uwagę zrównoważoną formę zagospodarowania przestrzennego, ale także konieczność dostosowania układu transportu zbiorowego w obszarze do zabudowy mieszkaniowej. Zarówno forma urbanistyczna jak i transportowa muszą ze sobą współgrać i być planowane równocześnie. Obecność atrakcyjnej formy transportu zbiorowego w obszarze przy dużej gęstości zaludnienia, może wpływać na zmianę zachowań komunikacyjnych mieszkańców, w kierunku wzrostu wykorzystania transportu zbiorowego w codziennych podróży.*

**Słowa kluczowe:** *modelowanie ruchu, planowanie zagospodarowania przestrzennego, wskaźnik intensywności zabudowy, dostępność do transportu zbiorowego*

## 1. Wstęp

Rozwijające się w sposób dynamiczny miasta polskie i obszary podmiejskie, wpływają na wzrost liczby podróży, które coraz częściej realizowane są za pomocą transportu indywidualnego. O ile w miastach zaobserwować można politykę przestrzenną, polegającą na zwiększaniu intensywności zabudowy w obszarze, o tyle na obszarach podmiejskich, bardzo często leżących przy granicy dużych miast, polityka przestrzenna właściwie nie istnieje. Porozumienia gmin ościennych z dużymi miastami, na temat kształtu zagospodarowania przestrzeni na obszarach sąsiadujących, właściwie nie są realizowane. Zagospodarowanie terenu na obszarach podmiejskich najczęściej charakteryzuje się zabudową niską, jednorodziną, co powoduje zwiększanie powierzchni zabudowanej obszaru o charakterze rozproszonym. Takie działania wpływać mogą na tworzenie się stanów kongestii motoryzacyjnej, głównie na wlotach drogowych do miast, a następnie przenoszą się na układ wewnętrzny ulic miejskich. Polityka przestrzenna gmin i miasta powinna dążyć do realizacji takich założeń, które prowadzą do wspólnego kształtowania przestrzeni mieszkaniowej o wysokiej intensywności - przy węzłach komunikacyjnych, przystankach kolejowych czy parkingach P&R. Wpływ wysokiej intensywności zabudowy oraz dostępności do transportu zbiorowego na udział komunikacji zbiorowej

w podróży jest przedmiotem tego artykułu. Wykorzystując z odpowiedni sposób czynniki struktury przestrzennej obszaru, możemy kontrolować liczbę podróży odbywanych transportem indywidualnym.

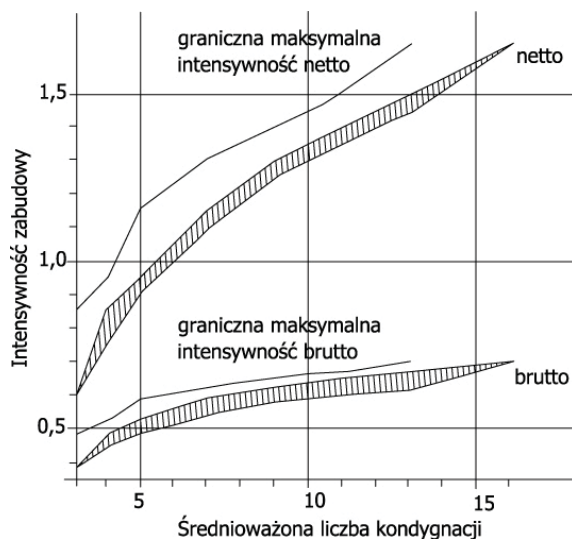
## 2. Czynniki struktury przestrzennej wpływające na liczbę podróży odbywanej transportem zbiorowym

Istnieje kilka czynników, które charakteryzują strukturę przestrzenną. Należą do nich m.in.: wielkość obszaru pod względem populacji, lokalizacja tego obszaru i odległość od centrum miasta, gęstość lub intensywność w odniesieniu do zabudowy, populacji i osób zatrudnionych, wielofunkcyjność funkcji obszaru i jego zabudowy, dostępność do infrastruktury, a także czynniki związane z transportem, jak obsługa parkingowa oraz parametry sieci ulicznej [1, 2, 3]. W artykule zostaną poddane analizie tylko dwa czynniki związane z zagospodarowaniem przestrzennym – wskaźnik intensywności zabudowy oraz dostępność do transportu zbiorowego.

### 2.1. Intensywność zabudowy

Intensywność zabudowy obrazuje stosunek powierzchni ogólnej zabudowy (powierzchnia zabudowy razy liczba kondygnacji) do powierzchni terenu (w określonych granicach). Różnicowanie intensywności zabudowy w obszarze może wpływać na generowaną wielkość potencjałów, skutkować zmianą podziału zadań przewozowych, a także przestrzennego rozkładu ruchu w modelowaniu podróży. Określenie wpływu czynnika intensywności na wymienione etapy prognozowania ruchu mogą wskazać na konieczność takiego przyjmowania wartości wskaźnika intensywności przy planowaniu struktur przestrzennych, który minimalizować będzie zatłoczenie motoryzacyjne w obszarze wynikające z generowania przez ten obszar ruchu.

W Polsce, do określenia ekonomicznego stopnia wykorzystania terenów miejskich stosuje się wskaźniki intensywności zabudowy. Wskaźniki te są przydatnym miernikiem przy projektowaniu zarówno zabudowy mieszkaniowej, jak i przekształcania obszarów miasta w zabudowę wielofunkcyjną. Najczęściej intensywność zabudowy zwiększa się w miarę wzrostu liczby kondygnacji. W 1974 roku, dla terenów zabudowy mieszkaniowej w Polsce, opracowany został normatyw, uzależniający obowiązujące wówczas minimalne i maksymalne wskaźniki intensywności zabudowy od średniej ważonej liczby kondygnacji (średnia ważona liczby kondygnacji to stosunek powierzchni ogólnej zabudowy do powierzchni zabudowanej, czyli terenu zajętego przez budynki). Poniższy rysunek 1 przedstawia zależność średniej ważonej liczby kondygnacji od intensywności zabudowy [4].



Rys.1. Relacja wskaźnika intensywności zabudowy mieszkaniowej netto do brutto w zależności od średnioważonej liczby kondygnacji budynków mieszkalnych

Jak widać z rysunku, przy średniej ważonej ponad 5 kondygnacji, wysokość zabudowy ma minimalny wpływ na intensywność zagospodarowania terenów mieszkaniowych. Badania przeprowadzone w Niemczech wskazują, że miasta zagospodarowane w przewadze zabudową jednorodziną wolno stojącą są najbardziej rozległe obszarowo, zaś miasta zabudowane domami do pięciu kondygnacji najmniejsze obszarowo. Miasta zabudowane budynkami wysokimi oraz miasta o zwartej niskiej zabudowie jedno i dwukondygnacyjnej, są w zasadzie równe obszarowo.

Polityka przestrzenna miast powinna zatem dążyć do takiego kształtowania obszarów mieszkalnych, które będą charakteryzowały się dosyć wysoką gęstością zaludnienia, skoncentrowanych przy węzłach komunikacyjnych (pętlach autobusowych, tramwajowych, węzłach przesiadkowych, przystankach kolejowych) lub wzdłuż korytarzy transportowych. Tylko taka lokalizacja zabudowy uskuteczni działania związane z redukowaniem udziału komunikacji indywidualnej w podróży. Natomiast polityka przestrzenna polegająca na braku kontroli zabudowy mieszkaniowej, może wpłynąć na decentralizację osadnictwa. O ile rozproszona zabudowa, tak charakterystyczna dla obszarów podmiejskich, odznacza się niskimi kosztami zasiedlenia (np. koszt zakupu działki), to koszty związane z zapewnieniem odpowiednich standardów komunikacji zbiorowej dla takiego obszaru są bardzo duże. Jednocześnie dla osób zamieszkujących takie obszary, istnieje najczęściej tylko jedyny środek transportu w podróży do centrum miasta, jakim jest samochód osobowy. A to związane jest z wysokimi kosztami użytkowania tego środka transportu.

## 2.2. *Dostępność do transportu zbiorowego*

Dostępność jest tą cechą obszaru, która świadczy o jego atrakcyjności. Dostępność możemy rozważać w dwóch kwestiach: jako dostępność urbanistyczną i dostępność transportową. Dostępność urbanistyczna jest rozumiana najczęściej jako zapewnienie wielu celów podróży, które są położone blisko jego źródła w taki sposób, aby istniała możliwość zrealizowania tego celu poprzez transport przyjazny środowisku. Dostępność transportowa rozumiana jest z jednej strony jako możliwość łatwego dostępu do różnych środków transportu (rozumiana pod względem krótkiego czasu dojścia do danego środka transportu), komfortu jego użytkowania oraz jego bezpieczeństwa. Należy jednak pamiętać, aby zapewnienie dostępności do infrastruktury drogowej, skupionej jedynie na wykorzystaniu samochodu, było kontrolowane. W artykule zostanie poddana analizie dostępność do transportu zbiorowego z analizowanego obszaru, jako odległość dojścia pieszego do przystanku komunikacji zbiorowej (linii kolejowej), liczona w linii prostej. Takie podejście jest stosowane najczęściej, gdy rozpatruje się obszary dostępności pieszej do przystanku. Istnieje jednak metoda określania ekwiwalentnej odległości dojścia do przystanku, która bierze pod uwagę rzeczywistą uciążliwość podróży pieszej do przystanku [5]. Model umożliwia określenie prawdopodobieństwa wyboru opcji pieszej przy dotarciu do przystanku komunikacji zbiorowej. Został on skalibrowany (przez P. Olszewskiego) na podstawie badań dostępności pieszej do kilku stacji metra w Singapurze [5]. Metoda ta bierze pod uwagę długość trasy dojścia, liczbę przejść przez ulice w jednym poziomie, liczbę stopni do pokonania w trakcie drogi do przystanku, liczbę kolizji z ruchem kołowym. Dla tak zdefiniowanych warunków, definiuje się ekwiwalentną odległość dojścia pieszego, w skutek czego powstają izoliny ekwiwalentne odległości dojścia. Podejście to jest dużo dokładniejszą metodą wyznaczania obszarów dojścia do przystanków komunikacji zbiorowej. W referacie zostanie poddana analizie tylko metoda określenia odległości dojścia pieszego w linii prostej. Dla warunków rzeczywistych, możliwe jest zdefiniowanie odległości dojścia na podstawie modelu Olszewskiego.

Jeżeli rozpatrujemy dostępność transportową w obszarze, powinniśmy kształtować rejony miasta w taki sposób, aby wzajemnie dostosowywać strukturę i funkcję zabudowy jednostek urbanistycznych oraz korytarzy transportowych, realizując zasadę: „średnicowy przebieg komunikacji zbiorowej, obrzeżny przebieg ponadlokalnego ruchu samochodowego”[8]. Dzięki takiemu kształtowaniu struktury przestrzennej mamy możliwość wpływania na wielkość generowanego ruchu indywidualnego przez jednostkę urbanistyczną. W trakcie tworzenia planów zagospodarowania przestrzennego należy badać strefy dojścia do przystanków komunikacji zbiorowej i kształtować zabudowę w taki sposób, aby każdy użytkownik przestrzeni miejskiej miał możliwość dogodnego dostępu przystanku komunikacji zbiorowej. Zatem już na etapie tworzenia, np. planów miejscowych, planiści mają możliwość kształtowania zachowań komunikacyjnych mieszkańców i wpływu na obniżanie kongestii motoryzacyjnej. Działania takie są dużo bardziej efektywne ekonomicznie i realizacyjnie, niż działania polegające na ingerencji w układ drogowy, już w trakcie zaistniałego problemu zatłoczenia motoryzacyjnego.

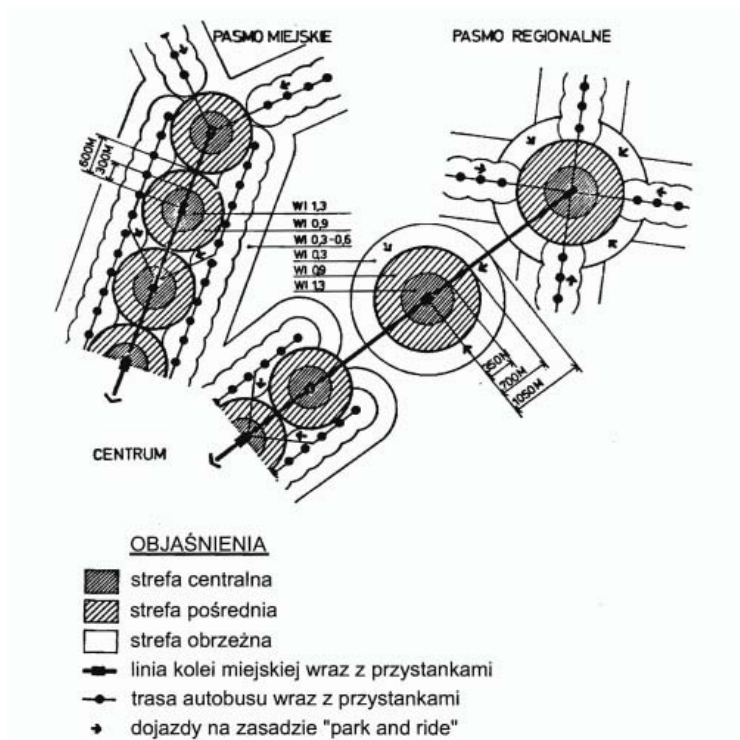
### 3. Model gęstości Hamburga – szacowanie potencjału ruchotwórczego pasma intensywniej zabudowy ciężącego do przystanku kolejowego

Lokalizacja przystanków komunikacji zbiorowej powinna być związana z intensywnością zabudowy. Kształtowanie intensywności zabudowy powinno opierać się o następującą zasadę: w promieniu szczególnie dobrej dostępności pieszej do przystanku (do 300 – 400 m) należy zapewnić wysoką intensywność zabudowy, a w strefie dalej położonej od przystanku, do 1000 m, należy przewidzieć dość wysoką intensywność zabudowy. W modelach polskich i zagranicznych można znaleźć kilka wartości promieni dojścia do przystanku komunikacji zbiorowej, głównie autobusowej (parametry zebrane w [6]), z uwzględnieniem stopnia intensywności zabudowy. Średnia wartość promieni dojścia wyniosła: dla centrum miasta – 300 m, dla zabudowy wielorodzinnej (intensywna zabudowa) – 450 m, zabudowa jednorodzinna (ekstensywna) – 750 m.

W latach 60-tych, XX wieku, w Niemczech stworzono koncepcję urbanistyczną, której istotę stanowiło wzajemne przyporządkowanie funkcji strukturalno – przestrzennej i komunikacji zbiorowej. Szczególny przykład rozwoju uporządkowanej i intensywnie zagospodarowanej strefy osadniczej można odnaleźć w Hamburgu [7]. Wg modelu stworzonego dla miast niemieckich, rozwój obszarów miał odbywać się wzdłuż miejskiej i regionalnej osi komunikacji miejskiej. Za najważniejsze cele modelu uznano zapewnienie prawdziwej, zrównoważonej mobilności mieszkańców, lepszą jakość życia i warunki środowiskowa naturalnego przyjazne dla mieszkańców. Związane z tym były także regulacje prawne i przedsięwzięcia finansowe, których celem było popieranie komunikacji publicznej, przede wszystkim na terenach miast. Wg tych założeń i regulacji, komunikacja publiczna miała otrzymać pełen priorytet. Dotychczasowa wolnorynkowa polityka przestrzenna, skupiona głównie na komunikacji indywidualnej, miała być zastąpiona kontrolowaną i zorientowaną na komunikację publiczną politykę inwestycyjną państwa. Bardzo widocznym dowodem takiego podejścia jest miasto Hamburg, w którym szkielet struktury osadniczej stanowi sieć komunikacji szynowej, ze współpracującym z nią systemem komunikacji publicznej, jak linie autobusowe i system P&R. Celem tego przedsięwzięcia było także wspomaganie komunikacji publicznej poprzez zagospodarowanie terenu i sterowanie gęstością użytkowania wokół przystanków. Według stworzonego tzw. modelu gęstości, w Hamburgu zrealizowano kilka wielkich osiedli mieszkaniowych, dzięki czemu Hamburg posiada sprawny system komunikacji zbiorowej, zapewniający wysoki komfort dla użytkowników. Poniżej przedstawiono schemat osi rozwojowych przewidzianych w tzw. modelu gęstości dla pasma miejskiego i regionalnego.

Na rys. 2. przedstawiony został układ pasma miejskiego wg modelu gęstości Hamburga, gdzie rdzeniem jest kolej miejska, z odstępem pomiędzy przystankami ok. 1200 m.





**Rys.2. Schemat osi rozwojowych przewidzianych w tzw. modelu gęstości Hamburga**

*WI - wskaźnik intensywności zabudowy: stosunek sumy powierzchni poszczególnych kondygnacji budynków do powierzchni obszaru, na którym zabudowa ta jest zlokalizowana*

Przystanki komunikacji miejskiej są dostępne pieszo z bezpośredniej strefy ciążenia. Koła o promieniu 300 m i 600 m pokazują obszar o bardzo dobrej i dobrej dostępności pieszej, gdzie wskaźniki intensywności zabudowy wynoszą 1,3 i 0,9. Teren położony dalej niż 600 m od kolei jest obsługiwany liniami autobusowymi, które bieżą obrzeżem wzdłuż pasma zabudowy z gęsto zlokalizowanymi przystankami (z odstępem 300 m) i z taką wartością zasięgu strefy dojazdu. W tym obszarze wskaźnik intensywności zabudowy powinien wynosić od 0,3 do 0,6. Linie autobusowe w module co drugi przystanek kolejowy są naprzemiennie doprowadzone do kolei ciągiem zgodnym z kierunkiem ciężarów ruchu (do śródmieścia), gdzie następuje przesiadka na kolej miejską. Dodatkowo z przystanków kolejowych korzystają także użytkownicy samochodów osobowych podróżujący w systemie Park & Ride.

Kontynuacją pasma miejskiego jest pasmo regionalne obsługiwane przez kolej aglomeracyjną z większym odstępem przystanków (2,5 km i więcej). Tu także obowiązuje zasada strefowania intensywności zabudowy.

Na podstawie schematu przedstawionego powyżej, możliwe jest oszacowanie potencjału pasażerskiego dla jednego przystanku kolejowego lub komunikacji szy-

nowej, a w konsekwencji także dla całego pasma zabudowy wzdłuż linii komunikacji zbiorowej (na podstawie szacunków przedstawionych w [8]).

#### 4. Przykład obliczeniowy

W oparciu o przedstawiony powyżej model gęstości Hamburga, dokonano szacunku wielkości potencjału pasażerskiego, uwzględniając przypadek modelowy. Analiza zakłada, że oś komunikacyjna obszaru jest obsługiwana linią kolejową (lub miejskiego transportu szynowego), z odległością między przystankami ok. 1200 m. Obszar analizy podzielony jest na trzy strefy. Strefa I zdefiniowana jest poprzez następujące parametry: obszar bardzo dobrej dostępności do przystanku o promieniu 300 m, wskaźniku intensywności 1,3 oraz udziale komunikacji zbiorowej 70%. Strefę II stanowi obszar ograniczony okręgami o promieniu 300 i 600 m, wskaźnikiem intensywności 0,9 oraz udziałem komunikacji zbiorowej 50%. Strefa III leży poza obszarem ograniczonym okręgiem o promieniu 600 m, gdzie wskaźnik intensywności wynosi 0,3 – 0,6 i udział komunikacji zbiorowej 30%. Dla tak zadanych parametrów możliwe jest oszacowanie potencjału generującego ruch pasażerów komunikacji zbiorowej w odniesieniu do przystanku. Strefa I ma powierzchnię 283 tys. m<sup>2</sup>, zalecana powierzchnia kondygnacji budynków zlokalizowanych w tej strefie wynosi zatem  $1,3 \times 283 \text{ tys.} = 367 \text{ tys. m}^2$ . Założmy, że będzie to tylko zabudowa mieszkaniowa, a na jednego mieszkańca przypada 50 m<sup>2</sup>. Otrzymuje się zatem ogólnie zaludnienie strefy I równe  $367:50 = 7,3 \text{ tys. osób}$ . Ze względu na korzystną ofertę komunikacji zbiorowej tej strefy, możemy założyć, udział w ruchliwości pieszej mieszkańca, szacowanej na 1,8 podróży na dobę, wyniesie 70%. Czyli  $7300 \times 1,8 \times 0,7 = 9\,200$  podróży w dobie, których źródłem lub celem jest strefa I. W następnej strefie – w formie pierścienia – ze względu na mniejszą dogodność w dostępie do przystanku tramwajowego, udział komunikacji zbiorowej wyniesie 50% - postępując w obliczeniach jak wyżej, uzyskuje się wynik 13 700 podróży w dobie. W strefie III znajduje się obsługa autobusem z odległością między przystankami 300 m. System obsługi autobusowej zakłada autobusy dowożące tylko ze strefy III oraz dowóz do przystanków tramwajowych w systemie co drugi naprzemiennie, raz z jednej strony obszaru raz z drugiej. Zakładając, że w strefie tej udział komunikacji zbiorowej w podróżach wynosi już tylko 30%, to otrzymuje się 2 600 podróży na dobę. Modułowy fragment pasma ciężący do poszczególnych przystanków tramwajowych generuje ok.  $9\,200 + 13\,700 + 2\,600 = 25\,500$  podróży na dobę. Zatem całe pasmo zabudowy, składające się z czterech modułów, generuje w ciągu doby ponad 100 tys. podróży.

W ramach prac badawczych, przeprowadzono analizę dotyczącą wpływu zmiany wartości wskaźnika intensywności zabudowy na możliwy wzrost udziału komunikacji zbiorowej w poszczególnych strefach. Analiza zakłada, że w skutek zwiększenia się popytu (potencjału pasażerskiego) w strefach, podaż (rozumiana jako częstotliwość kursowania środka transportu) zostaje do niego dostosowana.

W analizie założono także, że komunikacja zbiorowa przejmuje część podróży odbywanych dotychczas samochodem osobowym, w skutek poprawy oferty przewozowej (wzrost częstotliwości kursowania).

W ramach prac badawczych dokonano następujących założeń:

- analizowany przypadek dotyczy układu pasma, składającego się z czterech modułów, a te składają się z trzech stref (rys.2);
- wstępnie, dla każdej strefy, założono wyjściowe wskaźniki intensywności zabudowy oraz udział komunikacji zbiorowej w podróżach;
- obliczenia uwzględniają jedynie motywacje: dom – praca, praca – dom, dom – nauka, nauka – dom;
- przyjęto udział godziny szczytu porannego w podróżach dla zadanych motywacji na poziomie 15% [9];
- wielkość podróży podana w (tab.1) bierze pod uwagę zsumowaną wartość potencjału z poszczególnych modułów;
- założono, że wszystkie podróże odbywają się kierunku centrum, bez dojazdów bocznych. Wzrost potoku pasażerskiego wynikającego z dojazdów liniami autobusowymi jest nieistotny, z uwagi na małą ich liczebność;
- przyjęto rodzaj środka transportu, który będzie obsługiwał pasmo - środkiem transportu jest skład kolejowy złożony z dwóch wagonów, każdy o pojemności 220 miejsc siedzących oraz 180 miejsc stojących;
- poziom komfortu podróży dla pasażerów stojących w analizowanym środku transportu jest na poziomie  $4 \text{ os/m}^2$  [8]. W obliczeniach można stosować różne poziomy komfortu podróżowania w celu sprawdzenia różnicy w kosztach obsługi linii.

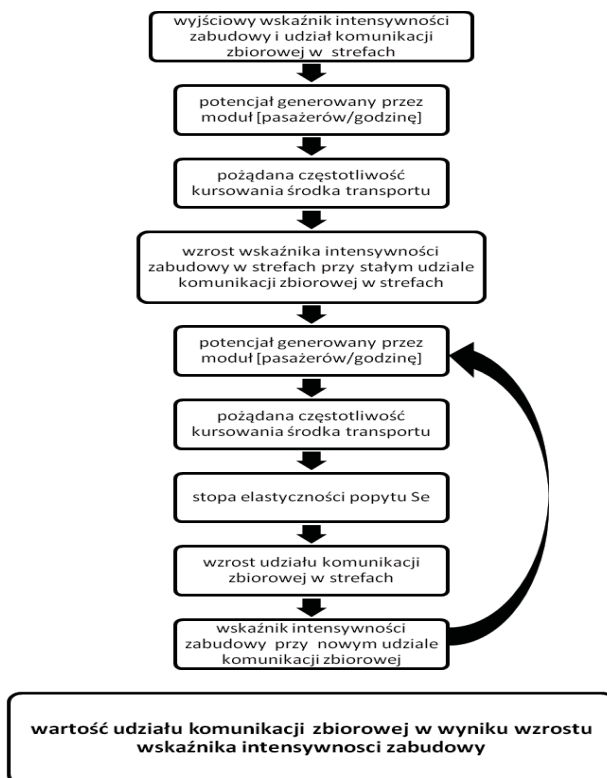
Przyjmując powyższe założenia oraz korzystając z obliczeń zawartych w [8], można wyznaczyć pożądaną częstotliwość kursowania środka transportu. W następnym kroku należy powtórzyć obliczenia, dla zwiększonych wskaźników intensywności zabudowy w poszczególnych strefach, jednak przy takim samym udziale komunikacji zbiorowej. W wyniku zwiększenia intensywności zabudowy, zwiększa się wartość potencjału generowanego przez obszar. Jednocześnie ulega zwiększeniu częstotliwości kursowania środka transportu, w wyniku założenia, że podaż dostosowuje się do popytu. Korzystając ze stopy elastyczności popytu  $S_e$ , przyjętego na poziomie 0,3 [6], wyznaczono wartość wzrostu potoku generowanego przez obszar. W konsekwencji wyznaczono nowe wartości udziału komunikacji zbiorowej w poszczególnych strefach. Dokonując kilkakrotnej iteracji obliczeń, przy założeniu nowej wartości udziału komunikacji zbiorowej na wstępie, wyznaczono ostateczne wartości udziału analizowanego środka transportu w podróżach. Takie obliczenia dokonano dla różnych wartości wskaźników intensywności zabudowy.

Obliczenia rozpoczęto od przyjęcia wskaźników intensywności zabudowy na poziomie: 1,0 w strefie I, 0,6 w strefie II i 0,1 w strefie III. Wyjściowa wartość udziału komunikacji zbiorowej wynosiła (w kolejności jak wyżej) – 60%, 40% i 20%. W następnych krokach założono wzrost wskaźnika intensywności zabudowy o wartość 0,1 w każdej strefie. W tab. 1 przedstawiono wyniki analizy.

Tab.1. Zmiana udziału komunikacji zbiorowej w strefach w wyniku zmian w zagospodarowaniu przestrzennym

Nr	strefa	Wskaźnik intensywności zabudowy	udział komunikacji zbiorowej	potencjał pasma [pas/h]	liczba [pociągów/h]	pożądana częstotliwość kursowania [min]
1	strefa I	1	60%	8 300	10	6
	strefa II	0,6	40%			
	strefa III	0,1	20%			
2	strefa I	1,1	64,9%	10 260	13	4,5
	strefa II	0,7	43,2%			
	strefa III	0,2	21,6%			
3	strefa I	1,2	69,1%	12 700	16	3,5
	strefa II	0,8	46,0%			
	strefa III	0,3	23,0%			
4	strefa I	1,3	73,3%	15 100	19	3
	strefa II	0,9	48,7%			
	strefa III	0,4	24,4%			

Na rys. 3 przedstawiono schemat wyznaczenia większej wartości udziału komunikacji zbiorowej w podróżach, w skutek wzrostu wskaźnika intensywności zabudowy w obszarze.



Rys. 3. Schemat blokowy wyznaczenia zmiany udziału komunikacji zbiorowej w skutek wzrostu wskaźnika intensywności zabudowy w module

Na potrzeby analizy, dokonano oszacowania kosztów związanych ze zwiększeniem pożądanej częstotliwości kursowania pociągów na analizowanej linii, w przedstawionym powyżej paśmie obsługi. W tym celu założono, że linia ta ma długość 4,8 km. Założono, że linia funkcjonuje w następujący sposób – kurs zaczyna się w na pierwszym przystanku, w pierwszym, północnym module pasma (patrz rys. 2), a kończy się na piątym, południowym przystanku kolejowym, na którym wszyscy pasażerowie wysiadają. Założono, że na kolejnych przystankach pasażerowie nie wysiadają z pojazdu, a jedynie się dosiadają, zwiększając liczbę pasażerów w pojeździe. Koszty związane ze wzrostem częstotliwości kursowania wyznaczono na podstawie [6]. Przyjęto zatem następujące dane wejściowe:

$L$  – długość pełnego obiegu linii – 4,8 [km],

$v_e$  – prędkość eksploatacyjna – 35 [km/h],

$h$  – interwał międzypojazdowy [min],

$f$  – częstotliwość kursowania [poj/h] zmienna w zależności od przypadku (patrz tab. 1),

$n$  – liczba pojazdów na linii zmienna w zależności od przypadku (patrz tab. 1),

$k_o$  – jednostkowy koszt eksploatacji pojazdu [zł/km] – przyjęto 10 [zł/km]

gdzie:

$$\text{- czas obiegu linii } T_e = \frac{60 * L}{v_e} \text{ [min]}$$

$$\text{- średni interwał międzypojazdowy } h = \frac{T_e}{n} \text{ [min]}$$

$$\text{- koszt eksploatacji linii w ciągu godziny } K_L = n * v_e * k_o \text{ [zł/h]}$$

$$\text{- koszt eksploatacji 1 km linii w ciągu godziny } K_{L0} = \frac{K_L}{L} \text{ [zł/km/h].}$$

$$\text{- procentowy wzrost kosztu eksploatacji linii } -\Delta K = \frac{f_2 - f_1}{f_1} * 100, \text{ gdzie } f_1 < f_2$$

Dla przypadku 1 w tab. 1. koszt eksploatacji linii wynosi 3500 [zł/h] lub 730 [zł/km]. Dla przypadku 2 koszt eksploatacji linii wynosi 4550 [zł/h] lub 950 [zł/km], dla przypadku 3 – 5600 [zł/h] lub 1170 [zł/km] oraz dla przypadku 4 – 6650 [zł/h] lub 1390 [zł/km]. Procentowe koszty wzrostu eksploatacji linii (w kolejności między przypadkiem 1 i 2, 2 i 3 oraz 3 i 4) wynoszą: 33,3%, 28,5% oraz 16,7%.

Analizując tab. 1. można stwierdzić, że im wskaźnik intensywności zabudowy jest większy, to różnice pomiędzy pożądanymi częstotliwościami kursowania linii kolejowej są coraz mniejsze. Potwierdza tę regułę analiza kosztów eksploatacji linii kolejowej. Im gęstość zabudowy w obszarze jest bardziej intensywna, to przy dodatkowych zmianach w zagospodarowaniu przestrzennym, koszty inwestycyjne ponoszone na rzecz poprawy standardów komunikacji zbiorowej (częstotliwości kursowania) nie rosną już tak szybko, jak w przypadku zabudowy bardziej intensywnej.

## 5. Wnioski

Na podstawie analiz zmian czynników struktury przestrzennej, głównie wskaźnika intensywności zabudowy, można stwierdzić, że zmiany w strukturze przestrzennej mogą wpływać na zwiększenie udziału komunikacji zbiorowej w codziennych podróżach, łagodząc skutki kongestii. Możliwe zwiększenie udziału komunikacji zbiorowej wynika ze wzrostu liczby ludności w obszarze oraz poprawy standardów komunikacji zbiorowej. Jednocześnie analizy kosztowe pokazały, że wraz ze wzrostem intensywności zabudowy, koszty eksploatacji linii komunikacji zbiorowej wzrastają dużo wolniej, niż w przypadku mniejszego wskaźnika intensywności. Wyniki te wskazują, że dogęszczanie zabudowy w obszarze pozytywnie wpływa na łagodzenie skutków kongestii motoryzacyjnej oraz pozwala efektywnie inwestować w infrastrukturę transportu publicznego.

## Literatura

- [1] Banister D., *Unsustainable transport – City transport in new century*. Transport, Development and Sustainable Series, Routledge, Maj, 2005.
- [2] Song Y., *Impacts of Urban Growth Management on Urban Form: A comparative study of Portland*. National Center for Smart Growth Research and Education University of Maryland, 2003
- [3] Bramley G., Power S., *Urban form and social sustainability: the role of density and housing type*. Paper presented in Environment and Planning Website – Planning and Design, www.envplan.com, October 2008.
- [4] Chmielewski J.M., *Teoria urbanistyki w projektowaniu i planowaniu miast*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2001.
- [5] Olszewski P., *Dostępność piesza jako element jakości miejskiego transportu zbiorowego*. Transport Miejski i Regionalny 01/2008.
- [6] Rudnicki A., *Jakość komunikacji miejskiej*. Monografia, Kraków, 1999.
- [7] Bieda K., *Wpływ czynnika komunikacji na kształtowanie struktur osiedleńczych*. Zeszyt Naukowy Politechniki Krakowskiej Nr 6, Kraków, 1980.
- [8] Rudnicki A., *Materiały konferencyjne XIV Konferencji Naukowo – Technicznej – Skuteczne zmniejszenie zatłoczenia miasta – „Polityka rozwoju przestrzennego a zatłoczenie komunikacyjne”*, Poznań – Rosnówko, Czerwiec 2009.
- [9] Jamroz K. z zespołem, *Transportowy model symulacyjny miasta Gdańska, etap I*. Biuro Rozwoju Gdańska, Fundacja Rozwoju Inżynierii Łądowej, materiały niepublikowane, Gdańsk 2012.



# FORMY I CHARAKTERYSTYKI PARAMETRÓW SPLOTOWEGO MODELU POŚREDNICH MOŻLIWOŚCI DLA RUCHÓW DO PRACY W DUŻYCH AGLOMERACJACH<sup>1</sup>

---

**Christoph Glogowski**

dr. inż. arch., Kolberger Str. 24E, D - 76139 Karlsruhe,  
tel.: +49 0721 / 4024668, e-mail: dr.ch.glogowski@  
kabelbw.de

**Tadeusz Zipser**

prof. dr hab., Politechnika Wrocławska, 50-317 Wroc-  
ław, ul. B. Prusa 53/55, tel.: +48 71 328 3158,  
e-mail: tadeusz.zipser@pwr.wroc.pl

---

**Streszczenie.** *Problematyka właściwego doboru parametrów i określenie ich wartości liczbowych w modelach wymiany ruchu stanowi kluczowe zagadnienie dla ich właściwego zastosowania. Modele oparte na klasycznej teorii pośrednich możliwości, jakkolwiek z definicji jednoparametrowe, doczekały się wielu publikacji odnoszących się do sterującego procesem rozkładu podróży parametru selektywności. Hipoteza spłotowa wprowadza jednak dwa rozkłady prawdopodobieństwa, wykładniczy z selektywnością jako parametrem i rozkład równomierny, którego zakres i wartości liczbowe należy dopiero określić, aby uzyskać właściwy typ rozkładu spłotowego. Problematyka ta stoi w centrum uwagi niniejszego opracowania. Analizie poddano rozkłady podróży do pracy uzyskane na podstawie wyników badań empirycznych. Określone na ich podstawie typy występujących rozkładów, zakres i wartości liczbowe parametrów skonfrontowano następnie z teoretycznymi wykresami rozkładów spłotowych. Zwrócono przy tym uwagę na przestrzenne aspekty występowania poszczególnych wariantów spłotu. Powyższe rozważania zilustrowano na przykładzie trzech aglomeracji, Wrocławia, Frakfurtu n. Menem i Kassel.*

**Słowa kluczowe:** *teoria pośrednich możliwości, hipoteza rozkładu spłotowego, model wymiany ruchu, parametry modelowe*

## 1. Wprowadzenie

Problematyka właściwego doboru parametrów oraz określenie ich wartości liczbowych w modelach wymiany ruchu stanowi kluczowe zagadnienie dla ich optymalnego zastosowania. Modele oparte na klasycznej teorii pośrednich możliwości, jakkolwiek z definicji jednoparametrowe, doczekały się wielu publikacji odnoszących się do sterującego procesem rozkładu podróży parametru selektywności [1, 2]. Parametr ten, jak stwierdzono w przeprowadzonych przez autorów wielostronnych studiach, posiada uniwersalny charakter, a jego wartości liczbowe korelują z wielkościami i stopniem rozwoju struktur jednostek osadniczych [3].

---

<sup>1</sup> Wkład autorów w publikację: Glogowski C. 50%, Zipser T. 50%

Ponieważ model pośrednich możliwości (intervening opportunities) nie jest tak popularny, a nawet tak znany jak starszy od niego model grawitacji, celowe jest przypomnienie jego zasadniczych, wyróżniających cech wersji, która jest tu rozważana. Powstała ona na Politechnice Wrocławskiej w ramach szeroko zakrojonych prac wykorzystujących w różny sposób i dla różnych celów ideę modelu pośrednich możliwości. Zasadnicze różnice między mechanizmem tego modelu, a sposobem działania różnych odmian modelu grawitacji (łącznie z pokrewnym modelem A. G. Wilsona) są następujące:

1. Model pośrednich możliwości (MPM) określa prawdopodobieństwo jedynie zakończenia podróży w danym obszarze, które odnosi się do ustalonej liczby podróży rozpoczynanych (źródeł) w pewnym rejonie. Nie może zachodzić nierówność sumy podróży rozesłanych z rejonu, a liczbą tychże źródeł, nie ma więc potrzeby przywracania (na ogół iteracyjnego) tej zgodności. Może nastąpić jedynie niedobór wynikający z faktu, że część podróży, jako niezaspokojona znalezieniem właściwego celu musi udać się dalej poza układ (lub wywołać rezygnację).
2. Bezpośrednia odległość między źródłem ruchu, a wchodzącym w rachubę celem nie ma żadnego znaczenia. Decyduje jedynie kolejność rozważanych okazji.
3. Prawdopodobieństwo akceptacji rozważanego celu zależy od czynników cywilizacyjnych, takich jak zróżnicowanie ofert, specjalizacja, podział pracy, itd. i w związku z tym należy oczekiwać ich uniwersalnego i powtarzalnego wymiaru.

Z powyższych cech wynika cecha następna i ogólna polegająca na tym, że model ten w równym stopniu informuje o przepływach wewnątrz dużej struktury zagospodarowania, jak i o siłach tę strukturę kształtujących. Może więc służyć do symulacji zawiązywania się układów, szczególnie pod kątem kształtu i nasilenia koncentracji.

Niezgodności bilansu przy celach, to znaczy braku równości liczby ruchów kończonych w rejonie, a liczbą znajdujących się w nim możliwości zakończenia podróży (celów), to kłopotliwa sytuacja obciążająca wszystkie modele wymiany ruchu (w modelach grawitacyjnych dotycząca także bilansu źródeł). Prowadzi to do technik wyrównywania bilansu procedurami, które zniekształcają założony mechanizm i dlatego trudne są do zinterpretowania. Chociaż pod tym względem kluczowy parametr modelu pośrednich możliwości, czyli selektywność kontaktu jest w silniejszym stopniu odbiciem motywów lokalizacyjnych, to jednak i on jest trudny do zaadaptowania do szczegółowych fluktuacji penetrowanego zbioru celów. To wydaje się być powodem dla czego „pośrednie możliwości” znacznie lepiej symulują sytuację wielko-skalowej wymiany ruchu niż szczegółowe aplikacje wewnątrz tkanki miejskiej. Dlatego już w końcu lat 70. w zespole Politechniki Wrocławskiej wprowadzono znaczącą modyfikację do klasycznej postaci modelu pochodzącej z opracowania Chicago Area Transportation Study (CATS) z roku 1960. Modyfikacja ta dążyła do dostosowania wynikowych wykresów kumulatywnych przestrzennych rozkładów zakończeń podróży do zaobserwowanych regularności

w odchyleniach od spodziewanych „klasycznych” rozkładów. Należy zaznaczyć, że obserwuje się je w specyficznym układzie współrzędnych, to jest w odniesieniu do liczby potencjalnych zakończeń podróży, a nie jako funkcję pokonanej odległości.

Jako matematyczny aparat oddający dość wiernie charakter zaistniałych kilku rodzajów deformacji okazał się model operujący splotem dwu rozkładów prawdopodobieństwa: jednego będącego klasycznym rozkładem modelu pośrednich możliwości, czyli rozkładem wykładniczym prawdopodobieństwa oraz drugiego, który jest odpowiednikiem „białego szumu” w teorii informacji – rozkładu jednostajnego o różnym zasięgu i różnym usytuowaniu na osi  $x$ -ów.

Hipoteza splotowego rozkładu prawdopodobieństwa akceptacji okazji wprowadza, więc do mechanizmu modelowego dwie funkcje, funkcję wykładniczą z selektywnością  $p$  (w anglojęzycznych publikacjach oznaczana jest symbolem  $L$ ) jako zasadniczym parametrem oraz funkcję prostokątną. Określenie parametrów drugiej z nich wyznacza zarówno zakres jej wielkości, jak i przesądza o typie zastosowanej w modelowaniu rozkładu podróży funkcji wynikowej.

W prezentowanym artykule ograniczono się do analiz obu funkcji i ich parametrów badając kumulatorywne rozkłady zakończeń podróży do pracy uzyskane na podstawie danych empirycznych dla wybranych układów miejskich o różnym stopniu rozwoju struktury przestrzenno - funkcjonalnej oraz roli w otaczającym ją systemie osadniczym.

Określone na tej podstawie kształty wykresów kumulatorywnego wzrostu liczby zakończonych podróży skonfrontowano z przebiegami dystrybuant rozkładów teoretycznych o różnym doborze parametrów i wielkościach ich zakresów. Zwrócono również uwagę na przestrzenne aspekty występowania poszczególnych wariantów funkcji splotowej. Powyższe rozważania zilustrowano przykładami aglomeracji Wrocławia oraz Frakfurtu n. Menem i Kassel, posiłkując się również wynikami uzyskanymi dla innych miast.

## 2. Warianty rozkładów splotowych

### 2.1. *Rozkład wykładniczy*

Podstawowym rozkładem modelu wymiany ruchu pozostaje nadal rozkład wykładniczy, logiczne jest więc spostrzeżenie, że na jego parametr, selektywność podróży  $p$  należy zwrócić szczególną uwagę. Dobranie właściwej wielkości selektywności, szczególnie dla kategorii ruchów do pracy jest stosunkowo proste, zwłaszcza, że w toku szerego prac badawczych, przeanalizowano wiele empirycznych rozkładów penetracji zbiorów okazji dla krajowych jednostek osadniczych w różnych przedziałach czasowych. Autorzy artykułu uzupełnili je o analizy wykonane dla wybranych miast niemieckich, opierając się na danych uzyskanych ze spisu powszechnego i spisu zatrudnienia przeprowadzonych równocześnie w 1987 roku.

Przeprowadzone obliczenia wartości liczbowych parametru selektywności wykonano korzystając ze wzoru wyprowadzonego bezpośrednio z formuły pośrednich możliwości i zapisanego jako:

$$p = \frac{h \frac{1}{R}}{a} \quad (1)$$

gdzie:

$a$  - liczba okazji zawartych w badanym rejonie,

$h \frac{1}{R}$  - logarytm naturalny z odwrotności  $R$  rozumianej jako ułamek potrzeb niezaspokojonych w badanym rejonie.

Powyższy wzór, łatwy do zastosowania w praktyce, ma również tą przewagę nad metodami wiążącymi selektywności z charakterystykami rozkładów ruchu takimi jak przykładowo średnia długość podróży, że w pełni uniezależnia pomiar parametru od wzorca, na podstawie którego przeprowadzana jest równocześnie jego kalibracja. Ten ostatni aspekt poruszany był jako generalny mankament badań amerykańskich testujących zgodności parametrów modelowych zarówno w modelach pośrednich możliwości, jak i w modelach grawitacyjnych [4].

Jak podkreślono na wstępie wartość parametru selektywności ma uniwersalny charakter, stąd istnieje możliwość przyjmowania do modelowania konkretnych wartości liczbowych znanych z badań empirycznych dla innych jednostek osadniczych. Również rozkład wartości parametru  $p$  w miarę oddalania się do źródła ruchu przebiega zasadniczo według podobnego wzorca. Prawidłowości te zilustrowano zestawiając wartości selektywności dla wybranych rejonów komunikacyjnych takich miast jak Wrocław, Frankfurt n. Menem i Kassel.

Tabela 1. Selektywności ruchów do pracy wybranych rejonów komunikacyjnych

Rejony komunikacyjne			Potencjał rejonu		Wartość selektywności (p) x 10-6		
Nr.	Nazwa rejonu	Nr. Rej.	Źródła	Cele	Rejon źródłowy	R = ca. 50%	średnia dł. podr.
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Wrocław 1972</b>							
1.	Sródmiście - południe	2.	15 056	27 282	1,95	4,69	9,84
2.	ul. Sienkiewicza	4.	13 790	7 240	3,75	4,20	7,18
3.	pl. Grunwaldzki	5.	17 080	21 032	3,26	6,64	7,98
4.	ul. Jedności Narodowej	6.	17 909	2 531	3,90	6,64	6,64
5.	pl. Św. Macieja (pl. Engelsa)	7.	15 422	11 593	4,20	6,14	8,41
6.	ul. Swobodna - zachód	18.	4 094	644	24,88	6,32	6,79
7.	Huby, ul. Borowska	20.	6 033	5 502	6,66	5,52	7,62

8.	Biskupin	31.	4 423	1 299	19,01	8,45	8,19
9.	Karlowice	43.	3 685	5 636	11,90	8,35	10,20
10.	Liczba źródeł i celów całego układu		249 068	256 103	cały układ	wartości średnie	
11.					13,1	11,53	15,92
<b>Frankfurt n. Menem 1987</b>							
1.	Innenstadt - Ost	2.	2 645	13 501	53,36	29,60	4,50
2.	Westend - Ost	4.	5 024	17 909	36,49	13,80	4,53
3.	Nordend - Ost	7.	15 400	6 697	53,57	5,63	4,10
4.	Bornheim	9.	13 037	7 850	46,47	5,89	4,46
5.	Griesheim	19.	10 775	12 941	36,75	16,40	4,45
6.	Bockenheim	12.	12 564	17 559	31,97	9,57	4,46
7.	Sachsenhausen	13.	8 652	8 123	63,21	8,56	4,17
8.	Höchst	36.	3 824	7 433	80,30	23,31	3,86
9.	Liczba źródeł i celów całego układu		319 993	557 848			
<b>Kassel 1987</b>							
1.	Karthäuser Straße	3.	2 373	14 782	45,10	45,10	11,10
2.	Frankfurter Tor	4.	2 720	1 905	236,90	18,72	14,02
3.	Wehlheiden	7.	3 286	1 926	221,91	23,96	15,82
4.	Vorderer Westen	10.	6 109	6 584	92,10	33,40	16,50
5.	Kirchditmold	21	2 910	1 075	317,28	18,14	15,76
6.	Holländische Straße	24.	3 404	3 517	111,08	17,01	11,24
7.	Fasanenhof	29.	3 804	3 924	79,43	16,43	13,42
8.	Weserspitze	30.	4 116	4 300	115,94	33,59	13,24
9.	Liczba źródeł i celów całego układu		89 051	122 150			

Źródła: Kompleksowe badania ruchu we Wrocławiu 02.03.1972 cz. III BSiPK i KM, Wrocław, 1973.

Ausgewählte Strukturdaten über Bevölkerung am 25 Mai 1987 nach Gemeinde und Gemeindeteilen.

Ergebnisse der Volkszählung 1987. HLS, Wiesbaden, 1990.

Ausgewählte Strukturdaten über Arbeitsstätten und beschäftigten in den hessischen gemeinden und Gemeindeteilen am 25 Mai 1987.

Ergebnisse den Arbeitsstättenzählung 1987. HLS, Wiesbaden, 1990.

Berufsauspendler am 25 Mai 1987 nach Wohnsitzgemeinden und ausgewählten Zielgemeinden am 25 Mai 1987.

Ergebnisse der Volkszählung 1987. HLS, Wiesbaden, 1990.

Obliczenia własne.

## 2.2. Rozkład prostokątny

Rozkład prostokątny wprowadzony został do modelu splotowego jako efekt stwierdzonych na podstawie wielu analiz kumulatywnych wykresów rozkładów podróży odstępstw od klasycznej reguły pośrednich możliwości w penetrowaniu zasobów okazji. Z operacyjnego punktu widzenia są one równoznaczne ze zmianą w kolejności penetrowania zbioru celów, względnie jego rozrzedzenia. Te przypad-

ki przesunięcia kolejności mogą być interpretowane, jako efekt szczególnej zaostrej konkurencji w określonym miejscu układu, bądź jako fakt, że rozmiary rejonu źródłowego wywołują znaczące różnice między poszczególnymi konkretnymi źródłami ruchu, co do zgodności z percepcją przestrzeni zakładaną w umownym środku ciężkości rejonu.

Dość wyrazista interpretacja jest tu możliwa dzięki wspomnianej okoliczności, że zapewniona jest zawsze zgodność bilansowa przy źródle i wykres może być traktowany jako jednoznaczny obraz prawdopodobieństwa przestrzennego rozkładu zakończenia podróży.

Interpretowany najogólniej jako strefa zakłóceń wyboru decyzji spowodowanych wpływem różnorodnych uwarunkowań, jako funkcja gęstości zapisany jest następująco:

$$f(x) = \frac{1}{d-b} \quad \text{dla } b \leq x \leq d \quad (2)$$

$$0 \quad \text{dla } x < b \text{ lub } x > d$$

gdzie:  $b$  i  $d$  to dowolne stałe, przy czym  $b < d$ .

Istotną cechą w interpretacji tego rozkładu jest jego typowo matematyczny charakter, niezwiązany bezpośrednio z czynnikami np. socjoekonomicznymi. Na obecnym etapie badań nie stwierdzono także istotnych prawidłowości, zarówno, gdy chodzi o jego zakres, wielkości, jak i lokalizację na osi  $x$ .

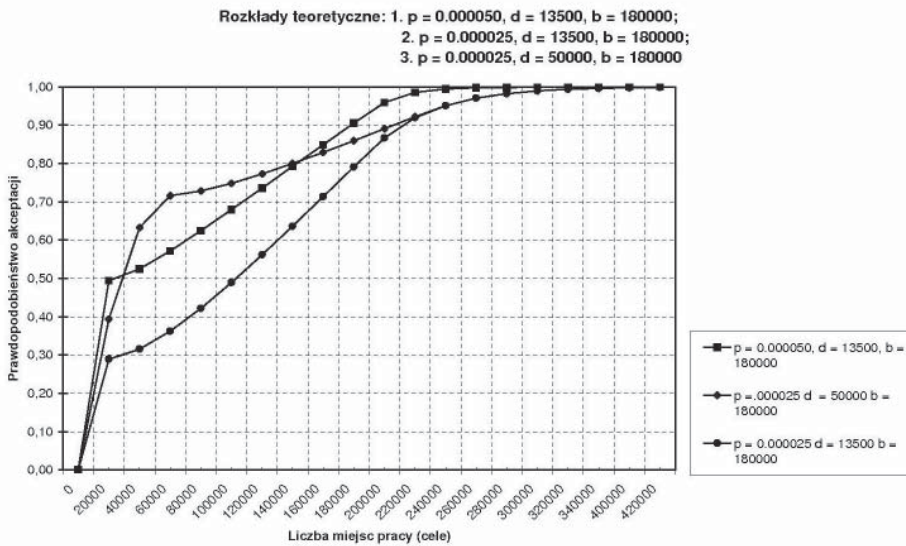
### 2.3. Rozkład splotowy

O charakterze rozkładu splotowego, będącego z definicji zmodyfikowaną wersją oryginalnych funkcji, przesądza w głównej mierze wielkość oraz położenie na osi  $x$  przedziału wartości  $\langle b, d \rangle$ . Dla potrzeb modelowania komunikacyjnego przyjęto więc trzy podstawowe warianty lokalizacji tego zakresu, co określa jednocześnie typ wykresu splotowego.

- Typ I.            dla  $d = 0$  oraz  $b > 0$ ,
- Typ II.           dla  $d < 0$  oraz  $b > 0$  i
- Typ III.          dla  $d > 0$  oraz  $b > 0$

Nie omawiając tutaj szczegółowo poszczególnych rozkładów, zilustrowano jedynie wpływ wartości zmiennych obu funkcji ( $p$  i  $\langle b, d \rangle$ ) na wynikowy kształt wykresu.





Rys. 1. Rozkłady teoretyczne dla kilku wartości parametrów splitowych

### 3. Analizy rozkładów podróży kategorii dom - praca

Podane powyżej teoretyczne przesłanki splitowej hipotezy teorii pośrednich możliwości skonfrontowano z empirycznymi wynikami badań penetracji okazji w różnych kategoriach przejazdów. Bliższa analiza wyników pokazała jednak, że najodpowiedniejszą dla tego typu porównań jest jednak kategoria dom - praca. Ponieważ rola i znaczenie tej kategorii w całodobowym rozkładzie podróży jest powszechnie znane, podkreślić w tym miejscu należy jedynie fakt, że stosunkowo łatwo definiuje się dla niej źródła i cele, a do dyspozycji stoi szeroki wachlarz danych z różnorodnych badań pomiarów ruchu dla wielu jednostek osadniczych.

Splitowa forma modelu pozwoliła otrzymać bardzo dobre odzwierciedlenia sytuacji rzeczywistych we Wrocławiu i Wałbrzychu już w pierwszej iteracji, gdy współczynniki korelacji sięgające 0,98 dla porównań rzeczywistych i wymodelowanych wierszy, kolumn i pierścieni oddalenia dotyczyły rejonów wysyłających od 70% (Wrocław) do 76% (Wałbrzych) wszystkich ruchów do pracy (współczynniki korelacji wyższe niż 0,8 - tab. 2.).

Tabela 2. Współczynniki korelacji ruchów do pracy w rejonach komunikacyjnych Wałbrzycha. Model splitowy, korelacja całości układu: 0,9114

WAŁBRZYCH: KORELACJA W PIERŚCIENIACH WG ŹRÓDEŁ	
NR REJONU	I PRZYBLIŻENIE
1	0,9829
2	0,9378
3	0,9802

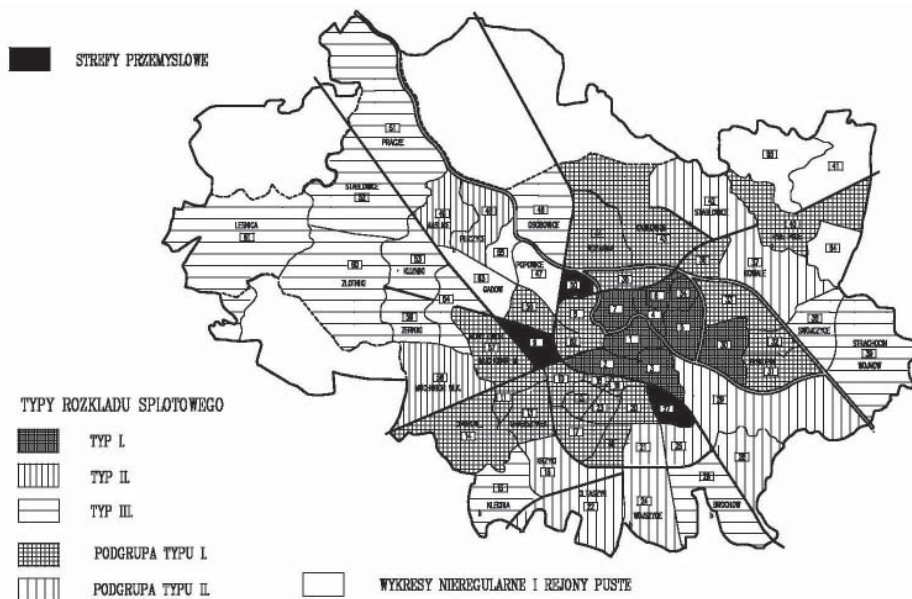
4	0,9406
5	0,9846
6	0,8884 <i>minimum</i>
7	0,8988
8	0,9678
9	0,9887
10	0,9766
11	0,9869
12	0,9832
13	0,9923
14	0,9792
15	0,9797
16	0,9971
17	0,9916
18	0,9898
19	0,9616
20	0,9620
21	0,9817
22	0,8990

Oczywiście, aby doprowadzić do zupełnej zgodności trzeba było i tu zastosować postępowanie iteracyjne (tzw. cofanie nadwyżek i ponowne ich rozesłanie), co nie jest jednak sprzeczne z zasadą mechanizmu modelu i dotyczy tylko fluktuacji jednego parametru, a przede wszystkim dotyczy niewielkiej części ruchu.

### 3.1. Analizy rozkładów podróży w obszarze aglomeracji wrocławskiej

Pierwsze w kraju, szeroko zakrojone badania, pod kątem zastosowania idei pośrednich możliwości, więźb wymian ruchu pomiędzy rejonami komunikacyjnymi przeprowadzone zostały dla aglomeracji wrocławskiej, wykorzystując dane zebrane w toku kompleksowych badań ruchu w okresie od listopada 1971 do listopada 1972 [5] oraz z badań ankietowych z roku 1965 [6]. Zebrany materiał obejmował nie tylko rzeczywiste więźby wymiany ruchu dla wszystkich rejonów komunikacyjnych miasta, również uzyskano aktualne dla nich tabele dostępności.

Otrzymane wykresy dystrybuant rozkładów podróży dla obydwu przedziałów czasowych (1965 i 1972) stały się bazą dla pierwszych empirycznych analiz przebiegu samych krzywych i dalej, typologii rozkładów oraz ich przestrzennego rozmieszczenia. Posługując się podaną w punkcie 2.3 typologią wykresów można wysunąć sugestie, że dominującymi rozkładami były rozkłady typu I i II, a jedynie rejon peryferyjny, znacznie oddalony od rdzenia aglomeracji charakteryzował typ III. Dla żadnego rejonu nie zaobserwowano natomiast typowego, klasycznego rozkładu wykładniczego. Występowanie poszczególnych rozkładów dla rejonów komunikacyjnych 1972 r. pokazano na rys. 2.

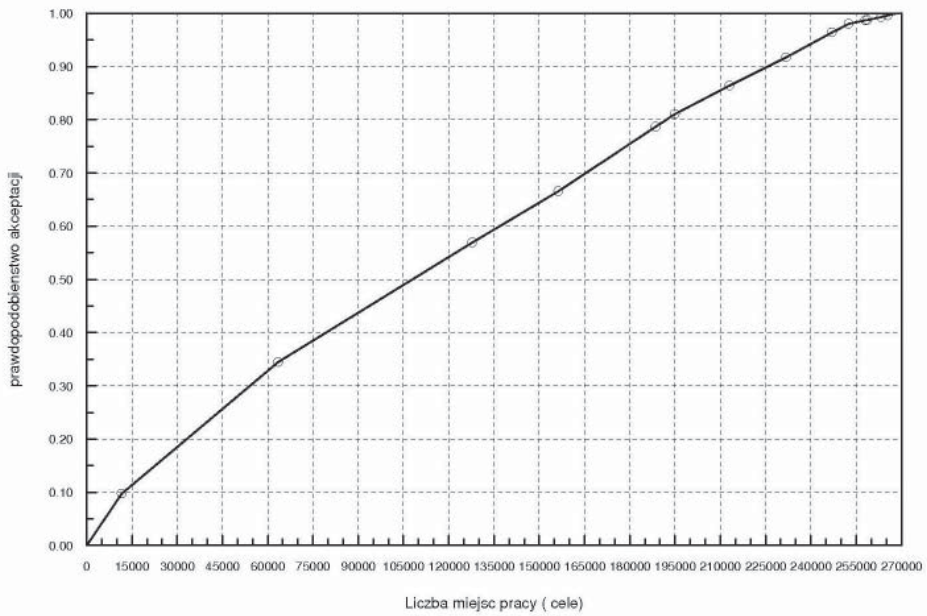


Rys.2. Wrocław 1965- 1972 - przestrzenne rozmieszczenie typów rozkładów podróży

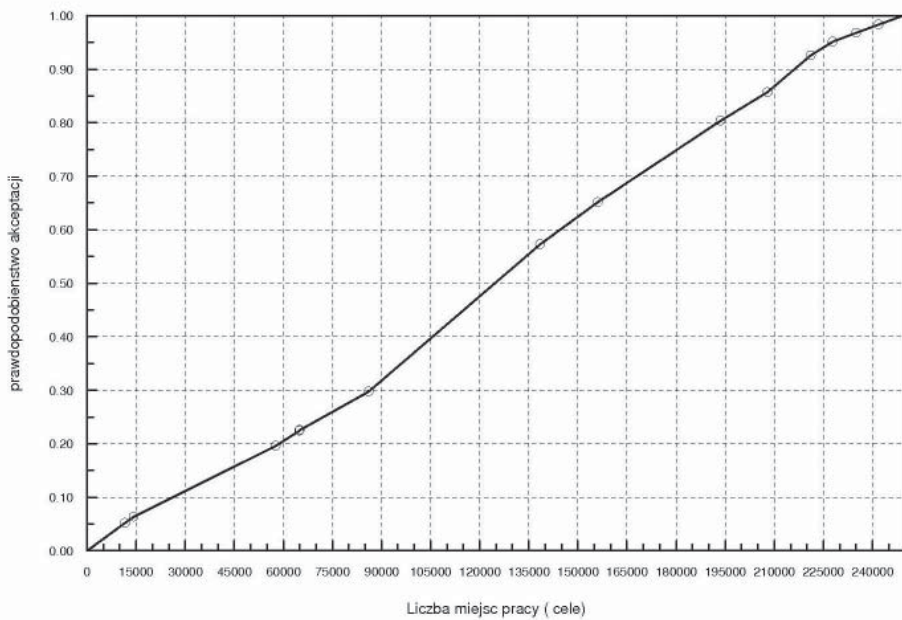
Przestrzenne rozmieszczenie poszczególnych typów rozkładów splitowych cechuje dominacja I typu w ścisłym centrum aglomeracji. Jeżeli dodać warianty tego typu rozkładu, można zauważyć, że rozmieszczenie ich pokrywało się ze zwartym obszarem śródmiejskim. Co nie jest też niespodzianką, osiedla podmiejskie i peryferyjne, zwłaszcza w części zachodniej aglomeracji charakteryzował III typ rozkładu o przesuniętych strefach zakłóceń w przebiegu procesu akceptacji okazji.

Nie omawiając szczegółowo rodzajów i przebiegu penetracji zbiorów okazji dla poszczególnych rejonów, wykorzystując natomiast fakt, że do dyspozycji stały dane z pomiarów ruchu dla dwóch przedziałów czasowych, 1965 i 1972 roku, porównano sporządzone odpowiednio dla nich wykresy dystrybuant rozkładów podróży. Trudność sprawiły różne w niektórych częściach miasta podziały na rejon komunikacyjny, niemniej większość badanych rejonów nie wykazywała się większymi różnicami terytorialnymi. Porównując wyniki dla omawianych okresów można ogólnie stwierdzić, że nie zaobserwowano istotnych różnic, jeśli chodzi o typy splitów dla poszczególnych rejonów. Występujące natomiast różnice obejmowały niewielkie odchylenia przebiegu samych krzywych, co da się tłumaczyć zarówno zmianami systemów dostępności, jak i rozwijającym się zatrudnieniem i tworzeniem nowych miejsc pracy, co podnosiło chwilowo atrakcyjność zbioru okazji w niektórych częściach aglomeracji. Jako ilustracje tego zjawiska wybrano przykłady trzech rejonów, dwóch o stabilnej strukturze ludnościowej oraz jednego rejestrującego w tym przedziale czasowym znaczne przyrosty mieszkańców.

Pl. Św. Macieja (rej. nr 7), położony na styku Starego Miasta, dobrze skomunikowany z resztą aglomeracji, rejon o stabilnej strukturze ludnościowej i strukturze zatrudnienia. Odpowiednie rozkłady dystrybuant podano na rys. 3 i 4.



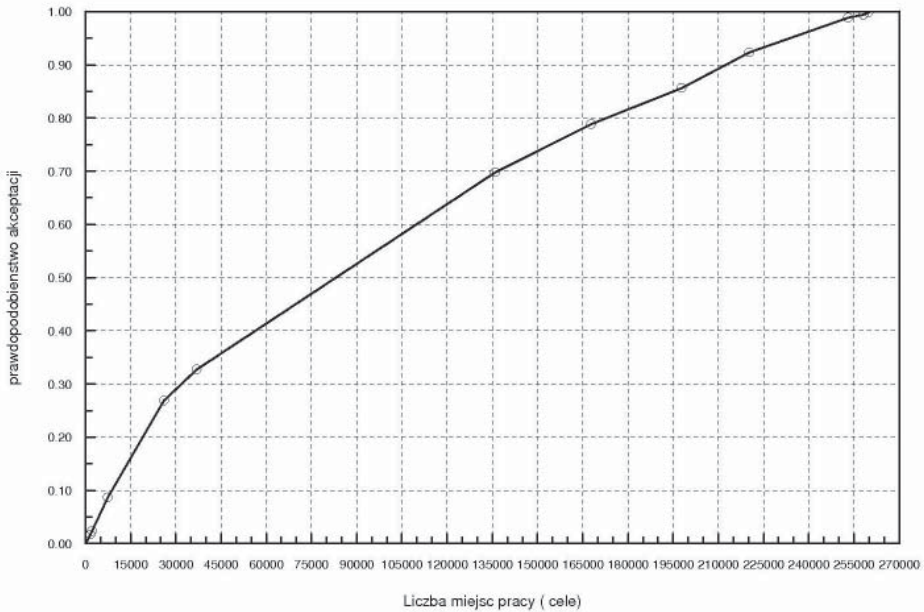
Rys. 3. Rejon nr 7 - Dystrybuanta rozkładu podróży dla 1965 r.



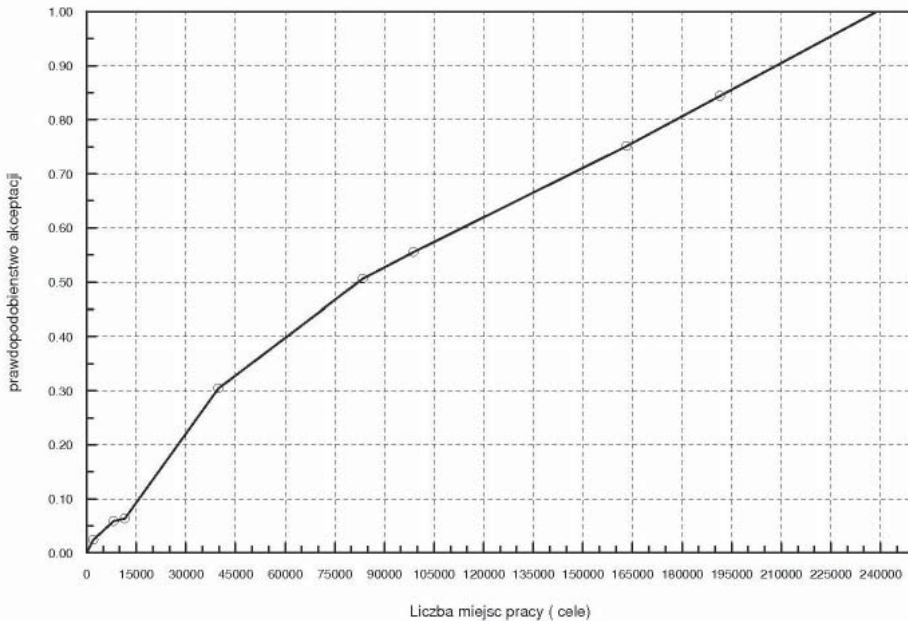
Rys. 4. Rejon nr 7 - Dystrybuanta rozkładu podróży dla 1972 r.

Dla odmiany rejon Biskupina (rej. nr 31) to typowy obszar bliskiego obrzeża miasta, również stabilny zarówno, gdy bierze się pod uwagę miejsca pracy, jak

i strukturę społeczną ludności. System dostępności, sama jego geometria oraz najbliższe otoczenie, także charakteryzowały się dużym stopniem stabilności. Odpowiednie wykresy prezentują rys. 5 i 6.

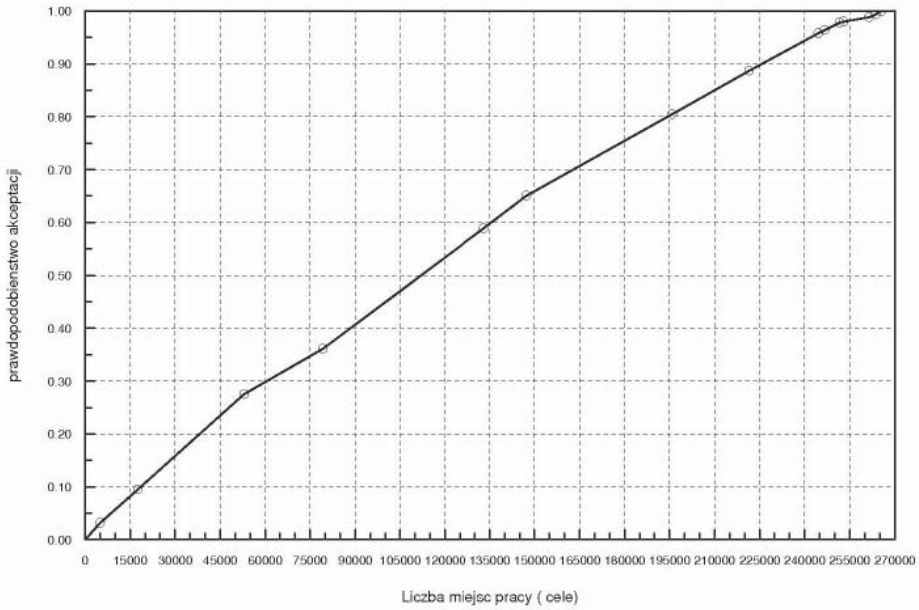


Rys. 5. Rejon nr 31 - Dystrybuanta rozkładu podróży dla 1965 r.

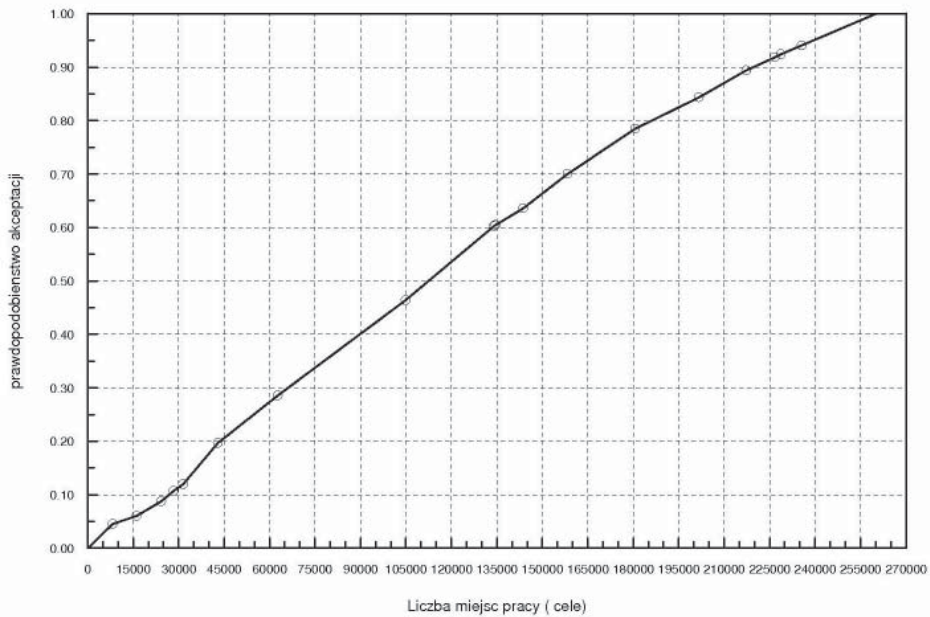


Rys. 6. Rejon nr31 - Dystrybuanta rozkładu podróży dla 1972 r.





Rys. 7. Rejon nr 10 - Dystrybuanta rozkładu podróży dla 1965 r.



Rys. 8. Rejon nr 10 - Dystrybuanta rozkładu podróży dla 1972 r.

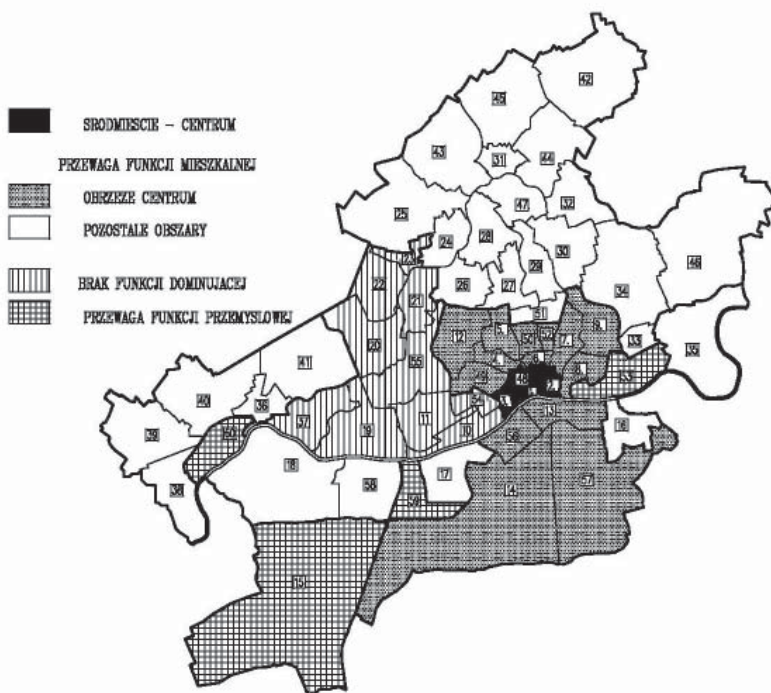
Dla odmiany rejon ul. Grabiszyńskiej i Gajowic (rej. nr 10) to obszar miasta, w którym dla omawianego okresu następował znaczny przyrost ludności, co w znacznym stopniu odbijało się w zmiennej, nie w pełni ustabilizowanej struk-



turze społecznej. Jednocześnie specyfika położenia rejonu w systemie dostępności wskazywała w obu przekrojach czasowych na strukturalne wady np. w połączeniach z południową częścią miasta. Pomimo to i w tym przypadku występujące odchylenia przebiegu krzywych mieściły się w granicach określonego typu rozkładu splotowego z lekkim zakłóceniem wzorca akceptacji w najbliższym zbiorze okazji.

### 3.2. Analizy rozkładów podróży w obszarze aglomeracji Frankfurtu nad Menem

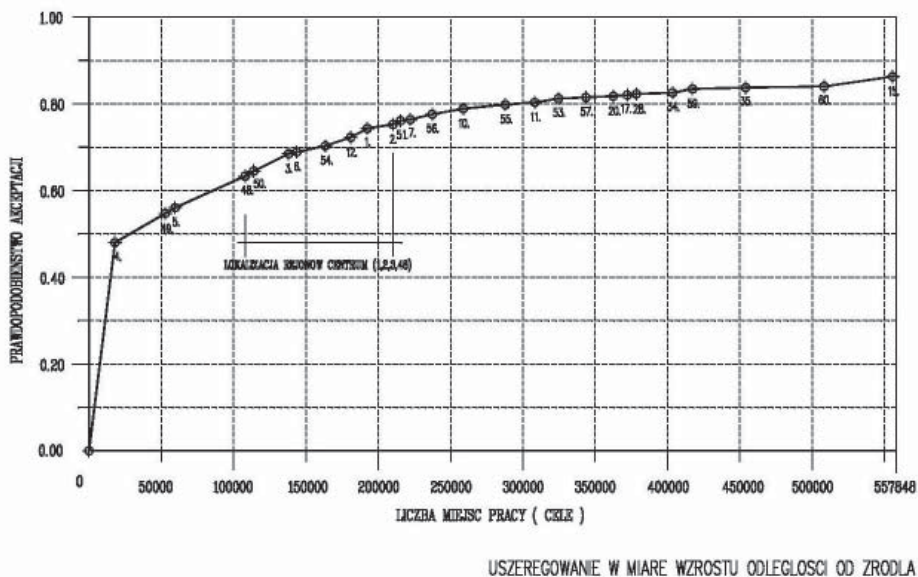
Frankfurt n. Menem stanowi dobry przykład aglomeracji zdecydowanie dominującej w systemie osadniczym dynamicznie rozwijającego się regionu (Rhein - Main Gebiet). Układ typowo otwarty (wyjazdy ca. 45300 oraz przyjazdy ca. 329179 osób) o ponad przeciętnym zatrudnieniu (ca. 557848 zatrudnionych przy potencjale źródłowym miasta ca. 298084 osób), ulegającym w badanym okresie (1987) dynamicznej restrukturalizacji. Również charakterystyczną cechą była i jest wyraźna dominacja rdzenia miasta (ca. 97628 miejsc pracy), przy jednoczesnych dużych skupiskach miejsc pracy na obrzeżu (lotnisko frankfurckie ca. 41180 zatrudnionych i zakłady Höchst ca. 30190 zatrudnionych) [7]. System komunikacyjny w badanym okresie to gęsta sieć komunikacji masowej i indywidualnej, zapewniająca dobrą dostępność komunikacyjną wszystkim rejonom miasta. Strukturę przestrzenno - funkcjonalną przedstawiono na rys. 9.



Rys. 9. Frankfurt n. Menem. Struktura przestrzenno - funkcjonalna

Przeprowadzone badania kumulatywnych rozkładów zakończeń podróży oparte zostały na zestawach danych opracowanych na podstawie wyników i materiałów narodowego spisu powszechnego [8] oraz spisu zatrudnienia [9] przeprowadzonych w 1987 roku. Również z tego źródła pochodzą tabele dostępności, obliczone dla wyjściowych rejonów komunikacyjnych o przyjętym bardzo drobnym podziale, co umożliwiło następnie precyzyjne lokalizowanie środków ciężkości zagregowanych dla celów prognostycznych i badawczych właściwych rejonów obliczeniowych (Planzelle). Ta dokładna i kompleksowa baza danych pozwoliła na opracowanie wyjątkowo precyzyjnych, a co najistotniejsze, w pełni porównywalnych z innymi miastami niemieckimi, analiz wzorców rozkładu penetracji zbiorów okazji.

Wykonane w ramach studiów VDRM (Verkehrsdatenbasis Rhein – Main 1991) matryce czasów przejazdów i odległości w sieci ulicznej uzupełnione przez autora referatu matrycą połączeń w liniach powietrznych uelastyczyły możliwości wykonania pomiarów oraz stały się punktem wyjścia do oceny oddziaływania systemu dostępności na rozkład rozptyłu podróży dla stałego zbioru okazji. Rozszerzeniem tego toku rozumowania było skonfrontowanie dwóch systemów szeregowania rejonów komunikacyjnych, a mianowicie układu dowolnych kordonów czasowych lub odległościowych oraz uszeregowania poszczególnych rejonów w rangowej kolejności progresji odległości.



Rys. 10. Rejon 4 - Uszeregowane rejonów w miarę wzrostu odległości od źródła

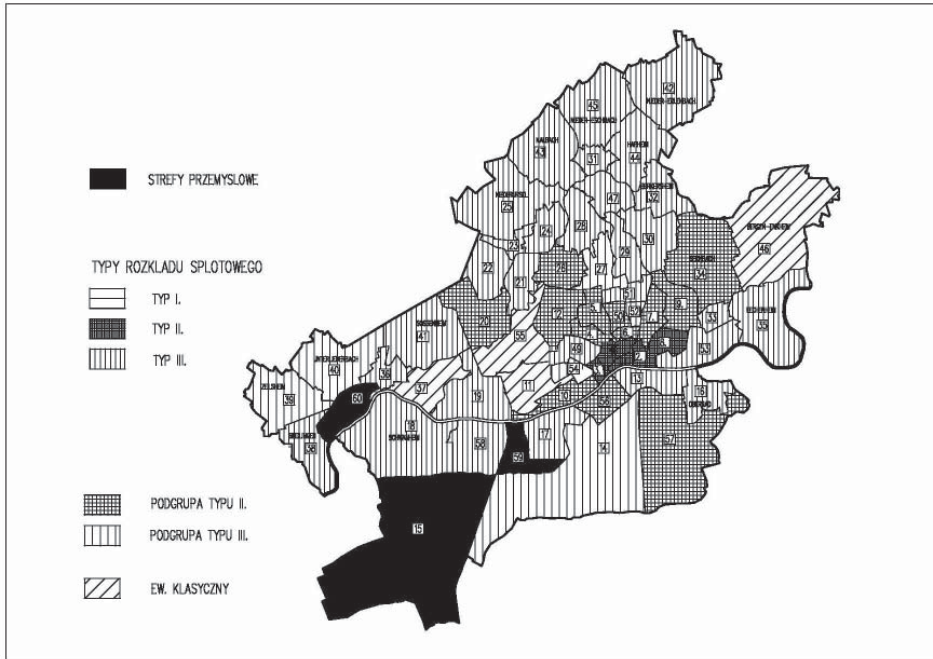
Bliższa analiza wszystkich wykresów dystrybuant rozkładów podróży pozwoliła wysunąć przypuszczenie, że przy dużej ilości przedziałów wyniki dla wszystkich tak zdefiniowanych systemów dostępności nie wykazują istotnych różnic. Podkreślić również należy, że przyjęcie tabeli odległości mierzonej w liniach powietrznych

przy odpowiednio dobranych wielkościach rejonów obliczeniowych i gęstym systemie dostępności nie wpływa na jakość i dokładność uzyskiwanych rezultatów. Przykład przebiegu wykresu dystrybucyjności rozkładu podróży w systemie uszeregowania w rangowej kolejności wzrostu odległości pokazano na przykładzie rejonu nr 4 Westend.

Niezależnie od spostrzeżeń dotyczących systemów dostępności, podstawowym celem badań, jak podkreślono na wstępie, było określenia typów i charakterystyk wykresów splotowych każdego rejonu komunikacyjnego. Otrzymane wykresy i tabele wynikowe, dla każdego rejonu w kilku opisanych powyżej systemach dostępności, nie odbiegały od oczekiwań opartych na teoretycznych przesłankach, niemniej zaobserwowano odchylenia od rezultatów wcześniej przeprowadzonych studiów. Podstawowym spostrzeżeniem jest fakt pełnego potwierdzenia splotowego charakteru wykresów dystrybucyjności rozkładów podróży, z jednym zastrzeżeniem, a mianowicie tym, że nie udało się wyodrębnić kształtu krzywej odpowiadającej I typowi splotu, który dla wcześniej wykonanych analiz charakteryzował zwłaszcza centralne obszary jednostek osadniczych. Wystarczy wskazać tu tylko na przykłady Wrocławia w obu przekrojach czasowych, badania aglomeracji warszawskiej czy też studia dla Eindhoven z roku 1973 (rejon centrum i dwa rejony bezpośredniego obrzeża) [10]. Również nietypowym zjawiskiem było pojawienie się wykresów niedających się jednoznacznie sklasyfikować jako krzywych splotowych, natomiast bardzo zbliżonych do rozkładu klasycznego. Zjawisko to wymaga bliższej analizy, a zwłaszcza wykonania szeregu obliczeń teoretycznych, niemniej można się w tym wypadku sugerować efektem ciągłego rozkładu okazji w przeważającej części struktury miejskiej dla kilku, jednocześnie uprzywilejowanych w systemie dostępności, rejonów. Podkreślić jednak należy, że na tym etapie badań pomimo wielokierunkowych i precyzyjnych analiz wyjściowych, odniesienie poszczególnych wykresów empirycznych do krzywych modelowych nie było jednoznaczne i co za tym idzie wymaga jeszcze dalszych porównań. Dotyczy to szczególnie II typu rozkładu z zakresem wartości ujemnych, które dla parametru  $d$  przyjmują wartości  $|-d| > b$  lub  $|-d| < b$ . Przestrzenne rozmieszczenie poszczególnych wstępnie sklasyfikowanych typów wykresów splotowych przedstawiono na rys. 11.

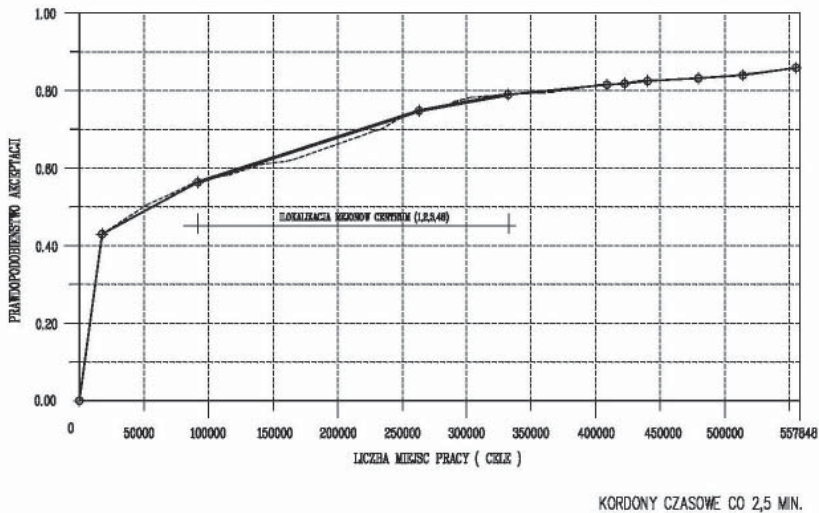
Jak można zauważyć, przestrzenna typologia rozkładów splotowych wykazuje duży stopień podobieństwa do obrazu struktury przestrzenno - funkcjonalnej (rys. 9), szczególnie w odniesieniu do rdzenia aglomeracji. Trudno przy obecnym zaawansowaniu badań wyjaśnić tę zbieżność, można jednak wysnuć przypuszczenie, że jest ona wywołana efektem specyfiki tego obszar z jego ogromnym zasobem różnorodnych aktywności. Jeżeli dodać do tego fakt, że okazje zlokalizowane w tym obszarze aglomeracji były akceptowane jako cele przez wszystkie rejony źródłowe, obraz specyfiki tej części miasta stanie się bardziej zrozumiały.

Analizując przebieg wykresów dystrybucyjności rozkładów podróży od punktu osiągnięcia wyżej opisanego podzbioru okazji stwierdzono wyraźne zakłócenia przebiegu krzywych, co potwierdza prawidłowość wysuniętej hipotezy o odmiennym mechanizmie procesu wyboru celu dla tego specyficznego zasobu okazji.

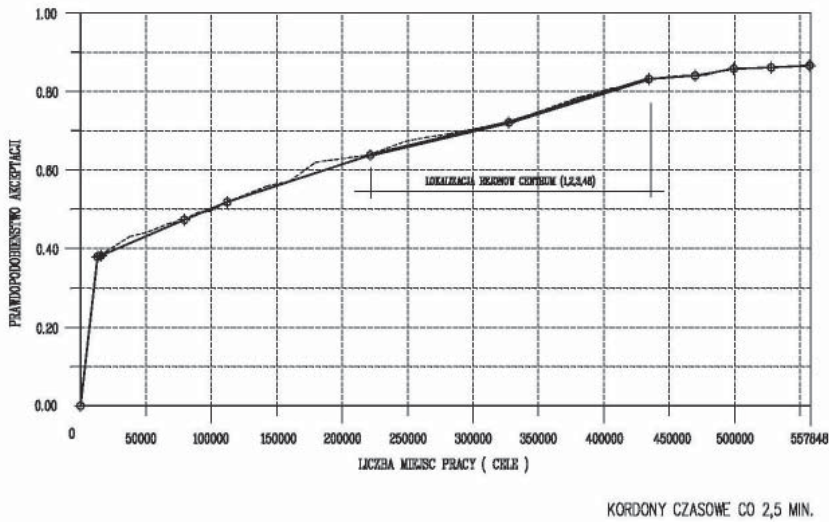


Rys.11. Frankfurt n. Menem - przestrzenne rozmieszczenie typów rozkładów podróży

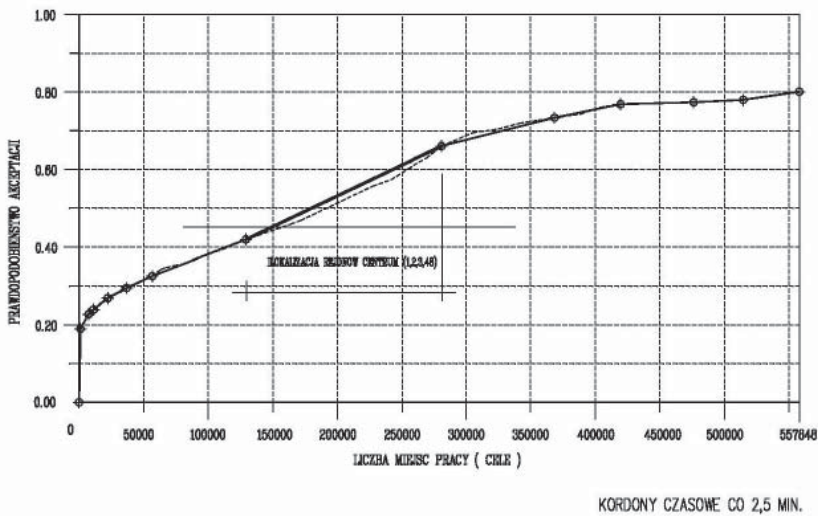
Nie omawiając wszystkich wyników, jako ilustrację zaprezentowano wykresy dla rejonów Bockenheim (rejon nr 12 wchodzący w obszar najbliższego otoczenia centrum), Griesheim (rejon nr 19) i Bonames (rejon nr 31). Dwa ostatnie rejonu położone są w pewnym oddaleniu od centrum układu, charakteryzują się jednak odmienną strukturą funkcjonalno - przestrzenną (rys. 13).



Rys. 12. Rejon 12 Bockenheim - dystrybucja rozkładu podróży



Rys. 13. Rejon 19 Griesheim - dystrybuanta rozkładu podróży



Rys. 14. Rejon 31 Bonames - dystrybuanta rozkładu podróży

Kończącym zagadnieniem omawianej problematyki dla przykładu Frankfurtu n. Menem jest analiza zakresu liczbowego strefy zakłóceń oraz próba określenia jej wielkości ( $d$  i  $b$ ). W pełni potwierdziła się także i w tym przypadku sugestia, że wartości te charakteryzują każdy rejon indywidualnie, w zależności od jego położenia w systemie dostępności. Jedynie zakres wielkości tego podzbioru okazji można ostrożnie określić, wyodrębniając strefę zakłóceń wiążącą się, jak sugerowano



uprzednio, z rdzeniem aglomeracji. Zestawienie liczbowe wartości  $d$  i  $b$  dla wybranych przykładów uzupełnione o potencjały aktywności rejonów, które stanowiły cele zakończeń podróży dla wszystkich źródeł i jako takie mogły oddziaływać na rozkład, co zostało już zasygnalizowane powyżej.

*Tabela 3. Wielkości stref zakłóceń dla wybranych rejonów komunikacyjnych*

Rejony komunikacyjne			Strefa zakłócenia przebiegu rozkładu			potencjał centrum		
Nr.	Nazwa rejonu	Nr. rej.	początek	koniec	wielkość	centrum	centrum*	ogółem
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	Bockenheim	12.	112000	280000	168000	97628	71319	168947
2.	Griesheim	19.	190000	380000	150000	97628	71319	168947
3.	Bonames	31.	160000	310000	150000	97628	71319	168947
4.	rejon centrum					1,2,3,48	5,6,8,12, 13,50,54	

### *3.2. Analizy rozkładów podróży w obszarze aglomeracji Kassel*

Ostatnim z omawianych w artykule przykładów jest przypadek aglomeracji Kassel. Miasto to, jako centrum regionu o spadkowych tendencjach, zarówno, jeśli chodzi o ludność, jak i miejsca pracy, jest oddalone od innych większych aglomeracji, takich jak najbliższej położona Getynga (ca. 50 km), poza niewielką fazą wzrostu w latach 1985 - 1993 wykazuje stagnację w strukturze ludnościowej. Cechą charakterystyczną samej struktury miejskiej jest duży procent wolnych terenów zielonych, dobry system komunikacji masowej kompletnie zmodernizowanej po zniszczeniach wojennych z węzłem w centrum układu oraz wykształcenie się kilku silnych lokalnych ośrodków centralnych z jednoczesnym ubytkiem tych funkcji w dawnym historycznym centrum. Zatrudnienie w dwóch rejonach centralnych (rejon nr 1 Stare Miasto i rejon nr 3 Karthäuserstr.) wynosiło 31.996 przy ogólnej liczbie 122.150 miejsc pracy. Również odbiegający od standardów innych miast niemieckich był w tym okresie, z jednej strony dynamiczny wzrost udziału komunikacji masowej w ogólnej sumie przejazdów przy jednocześnie niskiej, poniżej średniej heskiej, liczbie samochodów na 1000 mieszkańców.

Przeprowadzone badania dojazdów do pracy oparte zostały, podobnie jak dla Frankfurtu n. Menem, na materiałach ze spisu powszechnego przeprowadzonego w 1987 roku [8, 9], uzupełnione jedynie o tabele dostępności udostępnione autorowi przez GVP des ZRK Kassel dla komunikacji masowej i indywidualnej w układzie 53 rejonów komunikacyjnych.

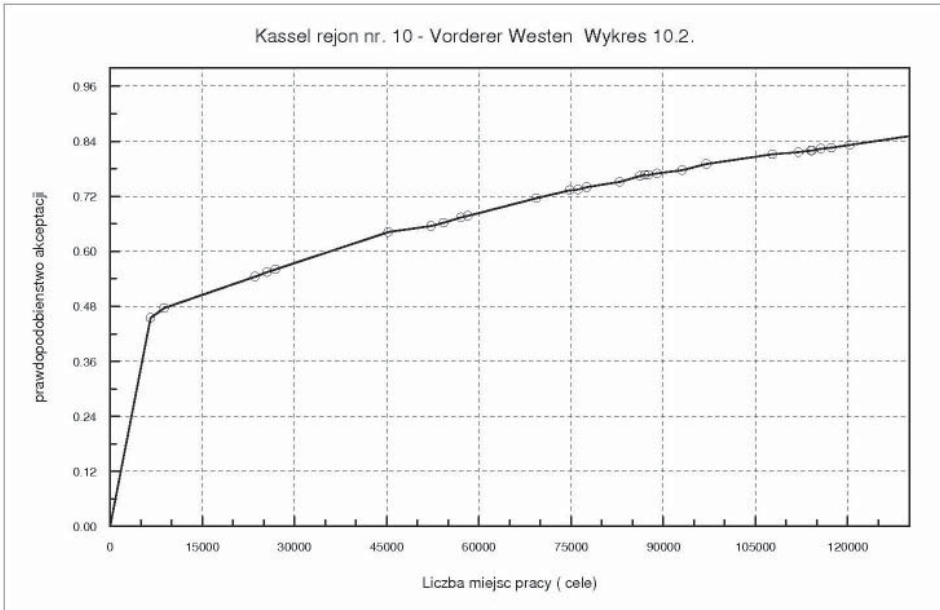
Rozkłady rozplywu podróży, zarówno w układach kordonowych, jak i w uszeregowaniach rejonów w porządku rangowym narastającej odległości, zostały wyliczone odpowiednio dla wariantu komunikacji masowej i indywidualnej, co umożliwiło ich wzajemne porównanie. Jak się jednak okazało po przeprowadzeniu odpowiednich zestawień porównawczych, nie stwierdzono



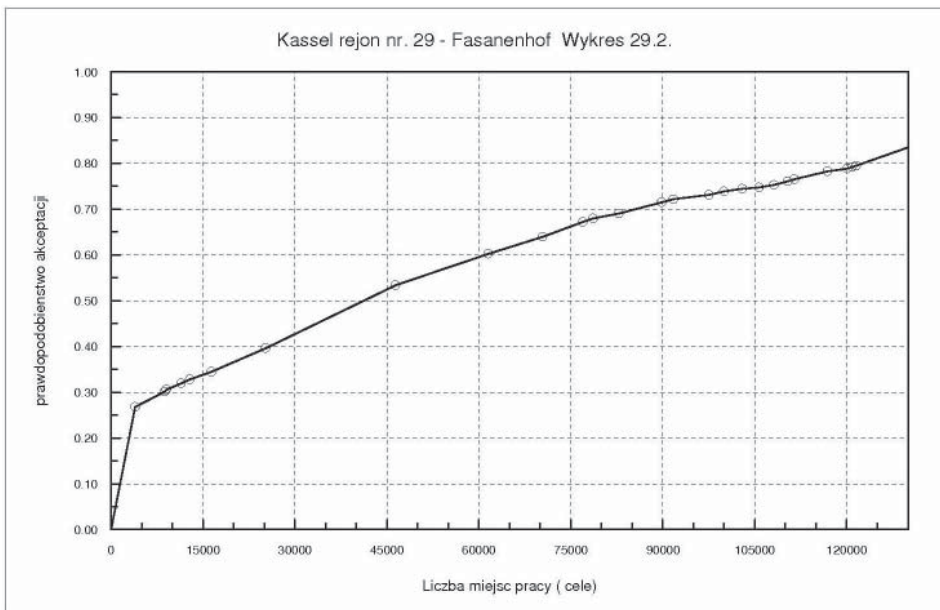
dla prawie wszystkich rejonów komunikacyjnych istotnych różnic w przebiegu samych krzywych splotowych. Wyjątkiem od tej prawidłowości był zaledwie jeden rejon (rejon nr 12 Brasselsberg), położony na obrzeżu aglomeracji i co wydaje się szczególnie istotnym, w niewielkiej odległości od zakładów VW w Baunatal (18.404 zatrudnionych) zlokalizowanych przy granicy administracyjnej miasta.

Analizując same liczby wyjazdów ze wszystkich rejonów źródłowych stwierdzono stosunkowo niski, jak na tę skalę wielkości miasta, procent akceptacji okazji w całokształcie oferowanych w systemie miejsc pracy. Odpowiednio dla 89.051 generowanych przejazdów i 122.150 oferowanych miejsc pracy, 12.826 osób (14,4%) opuściło jednak granicę miasta. Zjawisko to wymaga dalszych badań, chociaż można przypuszczać, że jest to efekt stałego przysuwania się miejsc pracy z obrębu samego miasta do jednostek osadniczych usytuowanych na głównych ciągach komunikacyjnych, pociągający za sobą również zatrudnionych.

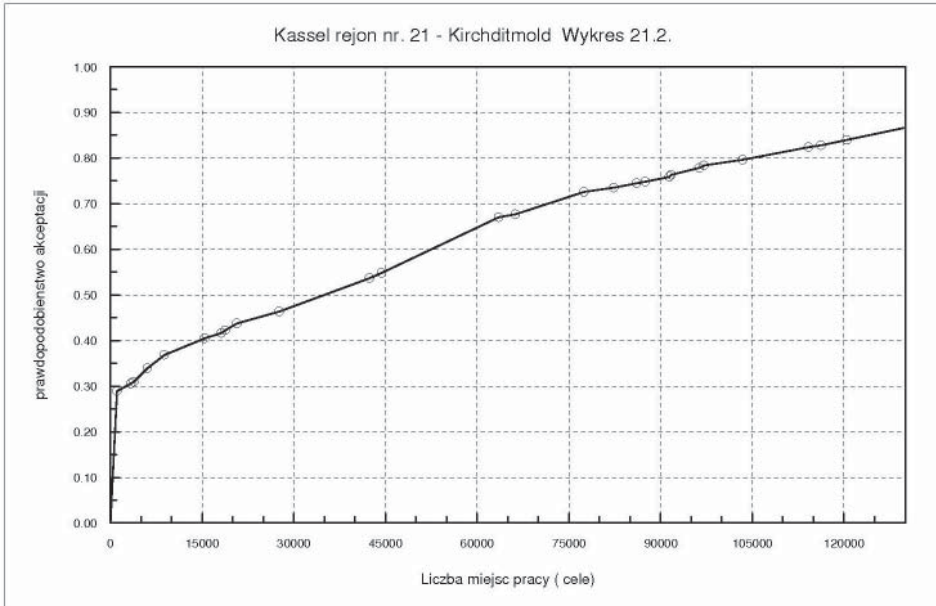
Wykonane dla wszystkich rejonów komunikacyjnych wykresy dystrybuant rozkładów podróży potwierdziły zasadniczo rezultaty znane z badań przeprowadzonych dla Frankfurtu n. Menem. Jedyną istotną różnicą był brak wykresu zbliżonego kształtem do rozkładu klasycznego, czego można było oczekiwać, porównując nieciągły rozkład miejsc pracy w układzie miasta oraz stosunkowo mocno zróżnicowany system podziału na rejon komunikacyjne. Także wykres I typu nie znalazł potwierdzenia w przebadanych rozkładach. Dominujące rozkłady, sploty typu II i III, jakkolwiek bardziej zdecydowane, jeśli uwzględnić kształt wykresu, nasuwają nadal pewne wątpliwości w prawidłowym dopasowaniu do właściwego dla nich typu splotu. Uwaga ta dotyczy szczególnie II typu rozkładu splotowego, gdzie zakres wartości ujemnych może przybierać różne wartości, co pociąga za sobą zmiany proporcji pomiędzy wartościami ujemnymi i dodatnimi. Jak zaznaczono uprzednio na obecnym etapie badań dokonano jedynie wstępnej analizy wyników. Dalsze i pogłębione badania są w tym wypadku konieczne, aby zjawisko to bliżej zanalizować. Jako ilustrujące charakterystyczne rozkłady podróży wybrano cztery różnie usytuowane w strukturze miasta rejon. Są to: rejon śródmiejski (rejon nr 10 Vorderer Westen), dalsze przedmieścia (rejon nr 29 Fasanenhof i rejon nr 21 Kirchdetmold) oraz nowe osiedle peryferyjne z lat 1965 (rejon nr 42 Wohnstadt Waldau).



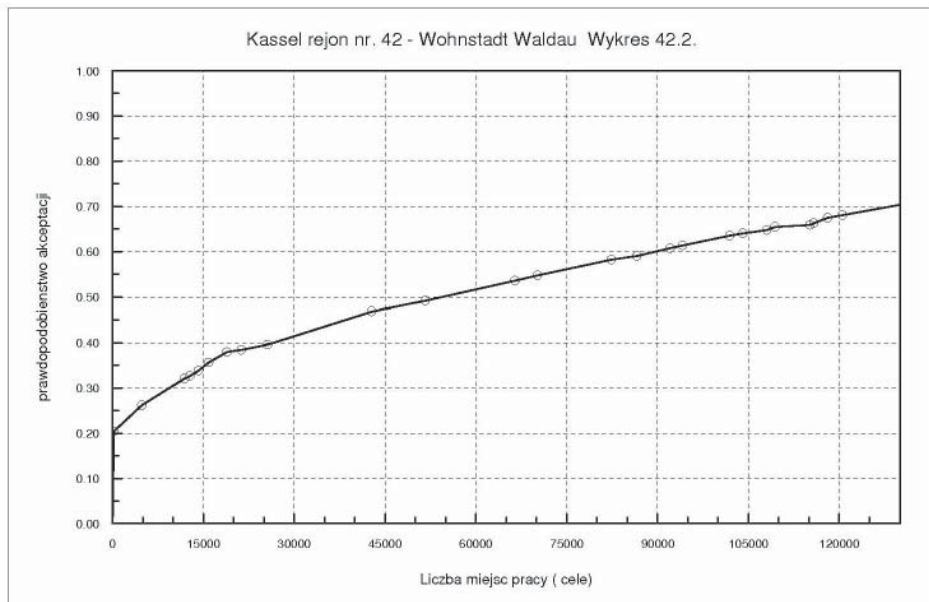
Rys. 15. Rejon nr 10 Vorderer Westen - dystrybuanta rozkładu podróży



Rys. 16. Rejon nr 29 Fasanenhof - dystrybuanta rozkładu podróży



Rys. 17. Rejon nr 21 Kirchdetmold - dystrybuanta rozkładu podróży



Rys. 18. Rejon nr 42 Wohnstadt Waldau - dystrybuanta rozkładu podróży

#### 4. Podsumowanie

Przedstawione w skróconej formie wyniki badań i analiz rozkładów podróży do pracy dla zmiennych przedziałów czasowych oraz różnych struktur osadniczych mają istotną cechę wspólną. Jeżeli bowiem przyjmiemy za podstawę interpretacji rozkładów podróży hipotezę splotową, to uzyskane rezultaty w pełni ją potwierdzają. Zwłaszcza problematyka wyjaśnienia kształtów przebiegu funkcji akceptacji okazji, dostarczająca od końca lat 60. wielu problemów interpretacyjnych, ale praktycznie nieprzebadana empirycznie, została rozbudowana w oparciu o wiarygodny i wszechstronny materiał porównawczy. Szczególnie istotne są tutaj badania komunikacyjne miast niemieckich z uwagi na ich bazę danych, opartą na wynikach spisu powszechnego i stabilnym w czasie systemie podziału na rejony komunikacyjne. Takie, bowiem ujęcie problemów rozkładu ruchu w systemach osadniczych odróżnia się zdecydowanie od badań amerykańskich, niezających praktycznie pojęcia samego spisu powszechnego, a oparte jedynie o struktury charakterystyk parametrów przejazdów.

Przyjęta teoretycznie typologia rozkładów splotowych, zwłaszcza dla przesuniętych zakresów rozkładu jednostajnego znalazła pełne potwierdzenie praktycznie we wszystkich badanych przypadkach. Problematyczny jest jedynie typ I rozkładu, którego nie zaobserwowano dla rejonów Frankfurtu n. Menem i Kassel. Charakteryzował on jednak rejony centralne Wrocławia, śródmiejskie obszary aglomeracji Warszawy (1973 r.), dwa rejony centrum Eindhoven i co jest również interesujące, centrum miasta Lippstadt w Nadrenii - Westfalii [11]. W tym ostatnim przykładzie ten rodzaj rozkładu splotowego pojawił się również dla innej kategorii podróży, a mianowicie ruchów ogółem.

Rozkłady splotowe, przedstawione w niniejszym artykule wymagają jednak dalszych badań i testów. W centrum uwagi znajduje się problematyka opracowania aparatu matematycznego umożliwiającego skorelowanie wykresów teoretycznych z empirycznymi oraz ich dokładna typologia. Szczególnie interesujące wydaje się tutaj zastosowanie estymatorów, zwłaszcza wykorzystanie metody największej wiarygodności, powszechnie obecnie stosowanej w badaniach komunikacyjnych.

Również szacowanie podstawowego parametru modelu, a mianowicie selektywności  $p$ , musi być poddane rewizji. Dotychczasowe bowiem metody pomiarów, jakkolwiek wystarczające dla potrzeb modelu klasycznego, w przypadku modelowego aparatu splotowego nie dają w pełni zadowalających rezultatów. Jeżeli bowiem model splotowy reaguje na dysproporcje rozkładu celów z jego nadwyżkami przykładowo w strefach centralnych oraz nieciągłym rozkładem w innych częściach badanego obszaru, być może rozwiązania należy szukać w takim doborze parametru, aby zapewniał on teoretyczną równowagę całego analizowanego systemu. Tolerancję i elastyczność zapewniałby przy tak określonym głównym parametrze modelu rozkład jednostajny, a zwłaszcza dobór odpowiednich dla niego parametrów określających zakres i położenie na osi  $x$ . Ponieważ rozkład ten wymaga doboru parametrów praktycznie dla wielu rejonów, posiłkowanie się i w tym wypadku metodą największej wiarygodności wydaje się najbardziej odpowiednie.

Wymaga to jednak pogłębienia badań i przeanalizowanie większej ilości porównywalnych przykładów. Jest to celowe zwłaszcza, gdy chodzi o ruchy do pracy, dla których nawet klasyczny (niezmodyfikowany) model pośrednich możliwości daje rezultaty nieco lepsze niż model grawitacji [12].

## Literatura

- [1] Catanese A., *New perspectives in urban transportation research*. Lexington Books, 1972.
- [2] Ruiter E., *Improvement in understanding, calibrating and applying the opportunity model*. Highway Research Record, 165: 1-21, 1967.
- [3] Dobrowolski M., Glogowski K., Zipser T., *Zastosowanie modelowania symulacyjnego do oceny i prognozowania rozwoju wybranych elementów obszarów zurbanizowanych*. Prace Naukowe Ośrodka Badań Prognozytycznych Pol. Wrocław, 12 Seria: Studia i Materiały, 3, Wrocław, 1978.
- [4] Beyerle G., *Betrag zu den Verteilungsmodellen des städtischen Individualverkehrs*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 144, Bonn, 1973.
- [5] *Kompleksowe badania ruchu, cz. III. BStiPK i IM*, Wrocław, 1973.
- [6] *Wyniki pomiarów ruchu dla m. Wrocławia. BStiPK i IM*, Wrocław, 1965.
- [7] *Gebietsauswertung SrV 1998*. Frankfurt am Main. TU Dresden, Dresden, 1998.
- [8] *Innengemeindliche Berufsauspendler am 25. Mai. 1987. nach Herkunftsgemeindeteilen, Verkehrsmittel und Zeitaufwand. Ergebnisse der Volkszählung 1987*. HSL – Wiesbaden, Wiesbaden, 1990.
- [9] *Ausgewählte Strukturdaten über Arbeitsstätten und Beschäftigten in den hessischen. Gemeinden und Gemeindeteilen. Ergebnisse der Arbeitsstättenzählung am 25 Mai 1987*. HSL – Wiesbaden, Wiesbaden, 1990.
- [10] *Verkeers - en vervoersstudie agglomeratie Eindhoven. Deel 2. Onderzoek naar het huidige relatiepatroon, uitvoering en enkele resultaten. Samenwerkingsoorgaan agglomeratie Eindhoven*. Eindhoven, 1973.
- [11] Kallenberger W., *Beitrag zu den Opportunity – Modellen als Verkehrsverteilungsmodelle des individuellen Verkehrs*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 262: 71-145, 1978.
- [12] Zhao F., *Refinement of FSUTMS Trip Distribution Methodology*, Technical Memorandum No. 3, Florida International Univ. 2001.

## ZASTOSOWANIE WIELOPOZIOMOWEGO MODELU RUCHU DLA SYSTEMU TRISTAR<sup>1</sup>

---

### Kazimierz Jamroz

dr hab. inż., Katedra Inżynierii Drogowej, Politechnika Gdańska, Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, tel. 58 347 11 47, e-mail: kjamroz@pg.gda.pl

### Jacek Oskarbski

dr inż., Katedra Inżynierii Drogowej, Politechnika Gdańska, Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, tel. 58 347 17 97 e-mail: jacek.oskarbski@wilis.pg.gda.pl

### Lucyna Gumińska

mgr inż., Katedra Inżynierii Drogowej, Politechnika Gdańska, Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, tel. 58 348 63 56, e-mail: guminska@gmai.com

### Wojciech Kustra

mgr inż., Katedra Inżynierii Drogowej, Politechnika Gdańska, Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, tel. 58 348 62 97, e-mail: wojciech.kustra@wilis.pg.gda.pl

---

**Streszczenie.** *Warunki zmiennego popytu ruchu implikują konieczność pozyskiwania aktualnych informacji o funkcjonowaniu systemów transportu w celu umożliwienia optymalizacji procesów transportowych. Jednocześnie ze względu na dynamiczne zmiany zachodzące w strukturze systemów transportowych i zagospodarowaniu przestrzennym oraz znaczny koszt wykonywania badań ruchu i badań zachowań transportowych, wskazane jest stosowanie środków Inteligentnych Systemów Transportu w celu pozyskiwania danych, umożliwiających systematyczną aktualizację modeli systemów transportu, również w celach planistycznych. W artykule przedstawiono ideę budowy wielopoziomowego modelu ruchu z uwzględnieniem zastosowania środków Inteligentnych Systemów Transportu, które posłużą do zasilania modeli ruchu danymi pochodzącymi z systemów detekcji parametrów ruchu. Połączenie w jedną strukturę modelu wielopoziomowego z Systemem Planowania Ruchu, który jest realizowany w ramach systemu TRISTAR, pozwoli na wykorzystanie danych pochodzących z automatycznych pomiarów ruchu w sferze operacyjnej zarządzania transportem, jak również w analizach planistycznych. Ponadto w artykule skrótowo opisano szereg narzędzi (pakietów) do modelowania procesów transportowych. Ze względu na to, że poszczególne pakiety i programy opisane w niniejszym artykule posiadają funkcjonalności, które je wyróżniają i czynią użytecznymi dla różnych potrzeb, zasadne jest stosowanie szerokiego wacblarza oprogramowania, uzupełniającego się i umożliwiającego wspomaganie procesu projektowania, planowania i zarządzania na różnych poziomach i płaszczyznach. Niezbędne jest również opracowywanie nowych aplikacji, modeli i narzędzi, które pozwolą na usprawnienie i rozszerzenie możliwości zastosowania oraz zakresu danych pozyskanych automatycznie.*

**Słowa kluczowe:** *sterowanie ruchem, modelowanie ruchu, narzędzia modelowania, model wielopoziomowy*

### 1. Wstęp

Technologie korzystające z telematyki transportu oferują narzędzia służące wzmocnieniu systemów transportowych w miastach poprzez oddziaływanie na zmiany zachowań transportowych mieszkańców, racjonalizację wykorzystania ist-

---

<sup>1</sup> Wkład procentowy poszczególnych autorów: K. Jamroz – 20%, J. Oskarbski - 40%, L. Gumińska – 20%, W. Kustra – 20%



niejącej infrastruktury oraz zwiększenie jej niezawodności przy jednoczesnej redukcji kosztów funkcjonowania transportu. Zastosowanie nowoczesnych technologii wykorzystujących instrumenty Inteligentnych Systemów Transportu pozwala ponadto na usprawnienie sfery operacyjnej w zarządzaniu ruchem, ale również może wspomagać działania związane z planowaniem systemów transportu i projektowaniem bieżących rozwiązań organizacji ruchu. Mając na uwadze powyższe korzyści Miasta Aglomeracji Trójmiejskiej również podjęły działania mające na celu wdrożenie środków ITS. Pierwsze koncepcyjne prace nad strukturą systemu zarządzania ruchem TRISTAR (Trójmiejski Inteligentny System Transportu Aglomeracyjnego) rozpoczęły się w roku 2002. Powstały wówczas koncepcje zintegrowanego systemu dla Obwodnicy Trójmiejskiej oraz dla miasta Gdyni. W kolejnych latach zespół Katedry Inżynierii Drogowej Politechniki Gdańskiej opracował koncepcje systemu zarządzania ruchem dla kolejnych miast: Sopotu i Gdańska. Opracowane koncepcje przyczyniły się do kontynuacji działań, mających na celu wdrożenie systemu. W roku 2006 prezydenci Gdańska, Gdyni i Sopotu podpisali porozumienie o podjęciu wspólnych działań, zmierzających do przygotowania wniosku o dofinansowanie zewnętrzne na budowę systemu, co stanowiło podstawę do rozpoczęcia współpracy służb poszczególnych miast w celu osiągnięcia założonego celu. W roku 2007 na bazie porozumienia, opracowano koncepcję szczegółową systemu TRISTAR [1].

Obecnie trwa wdrożenie pierwszych etapów systemu, obejmujących podstawowy układ uliczny Trójmiasta z ok. 150 skrzyżowaniami i przejściami dla pieszych, wyposażonych w sygnalizację świetlną, infrastrukturą połączeń systemowych (między innymi kanalizacją kablową i kablem światłowodowym) o długości ok. 100 km, montażem ok. 60 kamer nadzoru wizyjnego, ok. 60 kamer identyfikacji pojazdów, ok. 70 tablic informacji przystankowej, ponad 20 znaków i tablic zmiennej treści oraz wyposażeniem prawie 700 pojazdów transportu zbiorowego w nadajniki pozycji i komputery pokładowe [2]. W założeniach docelowo system obejmie wszystkie ciągi Trójmiasta wyposażone w sygnalizację świetlną oraz zostanie zintegrowany z planowanymi systemami na drogach ekspresowych (Obwodnica Trójmiasta, budowana Obwodnica Południowa), jak również z portami lotniczymi, koleją oraz portami morskimi na terenie Trójmiasta. w przyszłości będzie rozszerzany.

Jednym z modułów systemu TRISTAR będzie System Planowania Ruchu, który wspomagany informacjami pozyskanymi z pozostałych modułów systemu oraz zintegrowany z wielopoziomowym modelem ruchu pozwoli na usprawnienie prac planistycznych, projektowych oraz tymczasowych zmian organizacji ruchu w związku z robotami drogowymi, imprezami masowymi oraz zmian organizacji ruchu w czasie rzeczywistym np. po wystąpieniu zdarzenia drogowego z wykorzystaniem znaków i tablic zmiennej treści.

## 2. Idea wielopoziomowego systemu modelowania ruchu

Planowanie sieci transportowych, podejmowanie decyzji o zmianach w organizacji ruchu, jak również planowanie tymczasowej organizacji ruchu w związku z robotami drogowymi, imprezami masowymi lub zdarzeniami drogowymi wymagają rozwiązania złożonych zagadnień optymalizacji w transporcie. Ułatwieniem w procesie podejmowania decyzji planistycznych są wyniki analiz prowadzonych za pomocą różnego rodzaju narzędzi, do których zaliczyć można pakiety programów do prognozowania zmian zachowań transportowych podróżujących. W przypadku systemów transportowych prognozowanie dotyczy najczęściej oszacowania przyszłego (krótko lub długoterminowego) ruchu drogowego, wielkości podróży lub przewozów pasażerskich lub towarowych w istniejącej lub planowanej sieci transportowej. Przedmiotem analiz w optymalizacji sieci transportowych jest iteracyjne obliczanie wielkości potoków ruchu w zależności od wielkości popytu na transport (wynikającego z rozmieszczenia funkcji zagospodarowania przestrzennego i przypisanych im atrybutów) oraz podaży systemu transportowego (mierzonej najczęściej przepustowością poszczególnych elementów tego systemu). Zagadnienia obliczania przepustowości, jak i zagadnienia optymalizacji sieci transportowych nie mogą być rozwiązywane w sposób analityczny, za pomocą jednego kroku obliczeniowego. Dlatego do rozwiązywania tych zagadnień stosuje się wielopoziomowe, dość skomplikowane modele matematyczne [3]. Modelowanie matematyczne potoków podróży i potoków pojazdów było dość silnie rozwijane w drugiej połowie ubiegłego wieku [4], [5], [6] w wyniku czego opracowano wiele pakietów komputerowych umożliwiających prognozowanie ruchu w miastach i obszarach zamiejskich. Pakiety te (np. EMME, INTEGARTION, VISUM/VISSIM, SATURN) zawierają modele matematyczne i skomplikowane procedury obliczeniowe umożliwiające prognozowanie i symulację wyników prognoz. Na obszarze województwa pomorskiego stosowane są różne narzędzia prognozowania i analiz transportowych, które mogą być zasilane, kalibrowane i aktualizowane danymi, które będą zbierane i gromadzone w systemie TRISTAR. Katedra Inżynierii Drogowej Politechniki Gdańskiej wyszła z inicjatywą opracowania i wdrożenia zintegrowanego, hierarchicznego systemu prognoz i analiz transportowych. Inicjatywa ta uzyskała poparcie władz wojewódzkich, władz miejskich i instytucji i biur projektów zajmujących się analizami transportowymi oraz zarządzaniem ruchem drogowym i transportem. Bardzo ważnym elementem takiego modelu będzie możliwość pozyskiwania i wykorzystywania danych z systemu TRISTAR.

Doświadczenia z prowadzenia analiz i prognozowania ruchu na obszarze województwa pomorskiego wskazują na konieczność uporządkowania podejścia do opracowywania modeli prognostycznych dla potrzeb analiz transportowych [3] w celu budowy wielopoziomowego modelu ruchu. Według założeń koncepcji budowy systemu do prognozowania i analiz ruchu drogowego w województwie pomorskim powinien:

- obejmować obszar całego województwa pomorskiego, a także poszczególnych miast i powiatów,

- posiadać strukturę hierarchiczną, obejmującą warstwy wnikające z podziału obszarowego (administracyjnego) województwa i warstwy wynikające z poziomu zarządzania, w których dane pozyskane z systemu TRISTAR będą odgrywały najbardziej istotną rolę,
- umożliwiać sprawną wymianę informacji i danych pomiędzy poszczególnymi warstwami, jak również z Systemem Planowania Ruchu i oprogramowaniem do sterowania ruchem, które zostanie wdrożony w ramach systemu TRISTAR,
- umożliwiać dostarczanie danych do realizacji różnych zadań wynikających z procesu życia systemów i obiektów transportowych, które ułatwią podejmowanie optymalnych decyzji,
- dostarczać dane do prac planistycznych, studiów wykonalności obiektów transportowych, projektów zmian organizacji ruchu oraz rozwiązań geometrycznych na skrzyżowaniach i węzłach, jak również dane dla Systemu Zarządzania Ruchem Drogowym i Systemu Planowania Ruchu, modułów systemu TRISTAR oraz dla zarządców transportu zbiorowego i komórek utrzymaniowych zarządców dróg,
- dostarczać informacje o różnych parametrach ruchu i miarach oceny efektywności: praca przewozowa, czas podróży, stopień wykorzystania przepustowości na odcinku zużycie paliwa, emisja spalin, bezpieczeństwo ruchu itp., dla celów planistycznych i operacyjnych we współpracy z systemem TRISTAR, którego narzędzia będą zintegrowane w wielopoziomym modelu ruchu.

Powyższe założenia mogą być spełnione jedynie poprzez budowę zintegrowanego, wielostopniowego systemu prognozowania ruchu i analiz transportowych (tablica 1) w województwie pomorskim. Model będzie wielopoziomowy i wielowarstwowy bazujący na idei przejętej przez Wydział Transportu Miasta Londyn [7]. Poziomy określają obszar administracyjny, natomiast warstwy określają poziomy wykonywania analiz ruchu i zarządzania ruchem.

*Tablica 1. Propozycja wykorzystania narzędzi modelowania ruchu w zależności od poziomu zarządzania i obszaru w województwie pomorskim na podstawie [3]*

	Poziom zarządzania	Strategiczny	Taktyczny	Operacyjny
<b>Obszar</b>	Obiekt transportowy	Sieć transportowa	Sieć/ciągi dróg i ulic	Droga, ulica, skrzyżowanie
	Rodzaj modelu	Dedykowany - prognostyczny	Zawansowany	Symulacyjny
	Klasa modelu	Makro	Mezo	Mikro
<b>Kraj</b>	Narzędzie	VISUM	VISUM	
<b>Województwo</b>		VISUM	VISUM	
<b>Aglomeracja</b>		VISUM	VISUM, SATURN	DRACULA
<b>Powiat/miasto</b>		VISUM	SATURN, TRANSYT, DRACULA BALANCE offline	VISSIM, DRACULA

**Poziom strategiczny** obejmuje dostarczanie danych do opracowania polityki transportowej, wykonania prac planistycznych, wykonanie studiów sieciowych. Podstawowym problemem przy budowie tego systemu modelowania ruchu jest opracowanie i rozwój na poziomie strategicznym dedykowanych modeli prognozy stycznych dla poszczególnych obszarów zarządzania transportem. Przewidziano cztery rodzaje obszarów dla których będą budowane lub rozwijane modele prognozowania i analiz transportowych: kraj, województwo, aglomeracja oraz miasto lub powiat.

**Poziom taktyczny** obejmuje dostarczanie danych do opracowania materiałów decyzyjnych dotyczących projektów transportowych (studia sieciowe, korytarzowe, studia wykonalności), opracowania projektów organizacji ruchu, sterowania ruchem oraz oceny efektywności podejmowanych działań. Obiektem transportowym będzie w tym przypadku sieć transportowa, ciąg drogowy lub uliczny, odcinek linii transportu zbiorowego.

**Poziom operacyjny** obejmuje dostarczanie danych do opracowania szczegółowych projektów organizacji ruchu, programów sterowania ruchem, projektów obsługi transportowej wybranych obiektów, wizualizacji funkcjonowania obiektów transportowych. Obiektem transportowym będzie w tym przypadku ciąg drogowy lub uliczny, odcinek linii transportu zbiorowego, skrzyżowanie.

W przyjętej koncepcji systemu SYMPAT przyjęto, że na poziomie strategicznym w województwie pomorskim we wszystkich obszarach stosowana będzie platforma programu VISUM. W tabelicy 2 zestawiono podstawowe charakterystyki modeli na poszczególnych obszarach. Analizując te charakterystyki można stwierdzić, że im mniejszy obszar analiz tym większa, zakładana dokładność modelu.

*Tabela 2. Propozycja wykorzystania narzędzi modelowania ruchu w zależności od poziomu zarządzania i obszaru w województwie pomorskim*

Model	Rejon	Sieć dróg	Dane o ruchu - transport indywidualny	Dane o przewozach - transport zbiorowy	Przekazywanie informacji	Budowa modelu
Krajowy	Powiat	Krajowe, wojewódzkie	Generalny pomiar ruchu (pomiary przekrojowe)	Informacje o liczbie pasażerów na podstawie np. sprzedaży biletów		Procedura uproszczona
Wojewódzki	Gmina	Krajowe, wojewódzkie, powiatowe	Generalny pomiar ruchu (pomiary przekrojowe), uzupełniające pomiary na drogach powiatowych	Pomiar napełnień w przekrojach pojazdów transportu zbiorowego	Informacje o tranżycie i jazdach źródłowo-celowych na kordonie województwa z modelu krajowego	Procedura uproszczona
Aglomeracyjny	Gmina, Miejscowość/ Dzielnica/Osiedle	Krajowe, powiatowe, ważnejsze gminne	Generalny pomiar ruchu, uzupełniające badania ruchu na drogach powiatowych gminnych, badania prędkości przejazdu. Prędkości i wartości natężeń ruchu pozyskane z Systemu Sterowania Ruchem Drogowym oraz Systemu Monitorowania i Nadzoru Ruchu Pojazdów	Pomiar napełnień w przekrojach pojazdów transportu zbiorowego. Prędkości pozyskane z Systemu Zarządzania Transportem Zbiorowym TRISTAR. Docelowo detekcja liczby pasażerów w ramach systemu TRISTAR	Informacje o tranżycie i jazdach źródłowo-celowych na kordonie aglomeracji z modelu województwa	Procedura rozwinięta, badania zachowań na małej próbie – dane pozyskane z systemu TRISTAR pozwolą na jej rozszerzenie

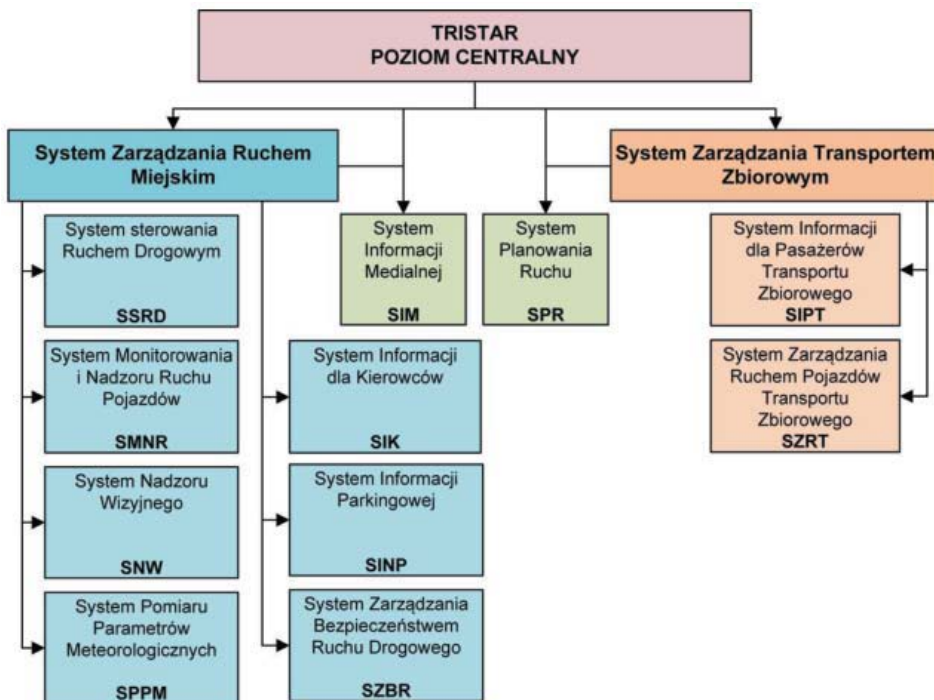
Miasta/ Powiaty	Rejon transportowy	Krajowe, wojewódzkie, powiatowe, gminne	Generalny pomiar ruchu, badanie ruchu w przekrojach i na skrzyżowaniach, badania prędkości przejazdu. Prędkości i wartości natężeń ruchu pozyskane z Systemu Sterowania Ruchem Drogowym oraz Systemu Monitorowania i Nadzoru Ruchu Pojazdów.	Pomiar napięć w przekrojach, badania prędkości przejazdu pojazdów transportu zbiorowego. Docelowo detekcja liczby pasażerów w ramach systemu TRISTAR	Informacje o transzycie i jazdach źródłowo-celowych na kordonie miasta, powiatu z modelu województwa lub aglomeracyjnego	Procedura rozwinięta, kompleksowe badania ruchu/ możliwość kalibracji za pośrednictwem danych pozyskanych z systemu TRISTAR
--------------------	--------------------	--	--	--	--	---

### 3. System Planowania Ruchu w TRISTARZE

W ramach koncepcji szczegółowej systemu TRISTAR opracowano architekturę regionalną systemu, tak aby przyszły rozwój systemu, który w poszczególnych miastach Aglomeracji może przebiegać niezależnie, nie spowodował jego dezintegracji [1]. W architekturze regionalnej zdefiniowano struktury logiczne i sprzętowe dla elementów realizowanych w pierwszych etapach systemu w ramach Programu Operacyjnego Infrastruktura i Środowisko. Architektura określa czteropoziomą, hierarchiczną strukturę funkcjonalną (poziom zarządzania metropolitalnego, miejskiego, obszarowego i lokalnego), którą można wpisać w poszczególne poziomy modelu przedstawionego w tablicy 1 w zakresie wykorzystania poszczególnych modeli ruchu (przede wszystkim modelu aglomeracyjnego i modeli miejskich). Na poziomie tym (zwanym również warstwą centralną) realizowane będą główne postulaty wynikające z polityki transportowej poszczególnych miast Aglomeracji Trójmiejskiej. Zasadniczą funkcją poziomu centralnego, zlokalizowanego fizycznie w Centrach Zarządzania Transportem w Gdańsku i Gdyni, będzie integracja wszystkich systemów wchodzących w skład systemu TRISTAR (rys.1). Integracja będzie zapewniona przez wspólne środki sprzętowe i programowe, wspólną sieć transmisji danych oraz wspólne bazy danych umożliwiające wzajemne przetwarzanie informacji dostarczanych przez System Zarządzania Ruchem Miejskim (SZRM), System Zarządzania Transportem Zbiorowym (SZTR) i System Planowania Ruchu (SPR), który korzystał będzie z analiz przeprowadzonych za pośrednictwem modelu wielopoziomowego oraz jednocześnie zasilał model w dane niezbędne do aktualizacji analiz. Zastosowanie hierarchicznej i modułowej struktury systemu pozwoli na jego przyszłą rozbudowę poprzez dołączanie nowych elementów i uzupełnianie o nowe funkcje. Podstawowym zadaniem systemu centralnego będzie integracja systemów, podsystemów i modułów poprzez gromadzenie, przetwarzanie i dystrybucję danych [2].

System Planowania Ruchu (SPR) wspomagany będzie narzędziami (pakietami programów), wyszczególnionymi w tablicy 1, za pośrednictwem których opracowywane są lub zostaną poszczególne elementy modelu wielopoziomowego, użyteczne w planowaniu systemów transportu, analizach warunków ruchu oraz testowaniu i symulacjach rozwiązań organizacji ruchu przewidywanych do wprowadzenia lub koniecznych do wprowadzenia w ramach zarządzania operacyjnego.

Wszystkie programy będą korzystać z danych pochodzących z urządzeń i systemów detekcji, gromadzonych w hurtowni danych.



Rys. 1. Struktura funkcjonalna pierwszego etapu systemu TRISTAR

Źródło: {2}, {8}

Oprogramowanie i modele opracowane w ramach modułu MPR Systemu Planowania Ruchu wspierały będą zarządzanie strategiczne ruchem, a modele zbudowane w ramach modułów MPTT i MPRJ zarządzanie dyspozytorskie transportem zbiorowym. Docelowo planuje się realizację i integrację z SPR wielopoziomowego modelu systemów transportowych, który umożliwi opracowywanie analiz i prognoz ruchu do celów planistycznych, ale również dla potrzeb bieżącego zarządzania ruchem. Koncepcja wielopoziomowego modelu zakłada, że model obejmie cały obszar miasta, jednakże zasilany będzie z modelu regionalnego (trójmiejskiego, wojewódzkiego i krajowego), obejmie zarówno transport indywidualny i jego infrastrukturę, jak i transport zbiorowy i sieć transportu zbiorowego, będzie posiadał hierarchiczną strukturę, składającą się z warstw dla poszczególnych poziomów zarządzania, umożliwi sprawną wymianę danych pomiędzy poszczególnymi poziomami zarządzania, umożliwi dostarczanie wyników analiz do zadań, wynikających z konieczności poprawy funkcjonowania systemu transportowego i usprawni proces decyzyjny w zakresie planowania przestrzennego, planowania systemów transportu, studiów wykonalności, projektów zmian w organizacji ruchu (przebudowy geometrii elementów układu drogowego lub zmian w sterowaniu ruchem). Model wielopoziomowy dostarczy ponadto informacji niezbędnych z punktu wi-



denia aktualizacji i wdrożenia rozwiązań z zakresu Planu Zrównoważonego Rozwoju Transportu (SUTP) oraz umożliwi szczegółowe analizy i zweryfikuje efekty proponowanych zadań zarządzania mobilnością przewidzianych w SUTP. Model dostarczy również narzędzi wizualizacyjnych i symulacyjnych, które będą wspomagać proces przekonywania lokalnej społeczności do akceptacji wdrożenia zaplanowanych zadań [2], [9]. Poziom strategiczny obejmie dostarczanie danych do opracowania polityki transportowej, prac planistycznych oraz analiz sieci ulicznej i transportu zbiorowego. Na poziomie strategicznym zastosowanie znajdzie model makroskopowy (np. VISUM lub sieć buforowa pakietu SATURN).

Tablica 3. Podsystemy i moduły w Systemie Zarządzania Ruchem Miejskim

Podsystem	Moduł	Akronim
System Sterowania Ruchem Drogowym (SSRD)	Moduł Sterowania Ruchem Pojazdów i Pieszycy	MSRP
	Moduł Priorytetów dla Pojazdów Transportu Zbiorowego	MPTZ
	Moduł Pomiaru Parametrów Ruchu w SSRD	MPRD-SSRD
	Moduł Wykrywania Zdarzeń Drogowych w SSRD	MWZD-SSRD
System Monitorowania i Nadzoru Ruchu Pojazdów (SMNR)	Moduł Pomiaru Parametrów Ruchu Drogowego	MPRD
	Moduł Identyfikacji Pojazdów z Wykorzystaniem Kamer ANPR	MIPK
System Nadzoru Wizyjnego (SNW)	Moduł Nadzoru Wizyjnego	MNW
	Moduł Wspomagania Automatycznej Rejestracji Zdarzeń	MWARZ
System Pomiaru Parametrów Meteorologicznych (SPPM)	Moduł Pomiaru Parametrów Meteorologicznych	MPPM
System Informacji Parkingowej (SINP)	Moduł Pomiaru Napelnienia Parkingów	MPNP
	Moduł Zarządzania Parkowaniem	MZP
System Zarządzania Bezpieczeństwem Ruchu Drogowego (SZBR)	Moduł Automatycznego Nadzoru nad Zachowaniami Kierowców	MANZ
System Informacji dla Kierowców (SIK)	Moduł Kierowania Pojazdów na Trasy Alternatywne i Zastępcze	MKPT
	Moduł Zarządzania Ruchem na Odcinkach Międzywęzłowych	MZRO
	Moduł Zarządzania Prędkością w Miejscach Zagrożonych	MZPZ
	Moduł Zarządzania Zdarzeniami Drogowymi	MZZD
System Informacji Medialnej (SIM) - podsystem wspólny z SZTZ	Moduł Informacji Drogowej	MID
	Moduł Informacji Medialnej Transportu Zbiorowego	MIMT
System Planowania Ruchu (SPR) - podsystem wspólny z SZTZ	Moduł Planowania Ruchu	MPR
	Moduł Planowania Tras Transportu Zbiorowego	MPTT
	Moduł Planowania Rozkładów Jazdy	MPRJ

Źródło: {2}{8}

VISUM jest jednym z najpopularniejszych w Polsce oraz w Europie narzędzi do modelowania zachowań transportowych mieszkańców i prognozowania ruchu. Jest program VISUM opracowany przez firmę PTV. Program ten jest jednym z najlepszych narzędzi do określania zapotrzebowania na podróże, analizy i oceny dla istniejących planowanych układów transportowych. VISUM jest programem

integrującym wszystkie typy transportu prywatnego i publicznego w jednym modelu (modele multimodalne). Program posiada możliwość podziału zadań przewozowych oraz tworzenie modelu w klasyczny czterostopniowy model (generowanie podróży, rozkład podróży, wybór środka transportu, rozkład ruchu). Może być używany zarówno do obszarów miast, aglomeracji jak i subregionów, krajów oraz państw [3].

Model makroskopowy wymaga podziału obszaru miasta na rejony transportowe oraz odwzorowania sieci ulicznej i linii transportu zbiorowego, jak również uwzględnienia drogowej sieci regionalnej. Model będzie wykorzystywany do dostarczenia danych dla modeli mezoskopowych w zakresie prognoz ruchu drogowego, szczególnie na drogach wlotowych do obszaru miasta. Ze względu na rozwój systemów transportowych modele takie wymagają systematycznej aktualizacji. Dane pochodzące o prędkościach podróży, natężeniu ruchu i wielkości potoków pasażerskich będą pozyskiwane z hurtowni danych systemu TRISTAR i mogą posłużyć do aktualizacji i kalibracji modeli w zakresie funkcji oporu odcinka oraz wartości natężeń ruchu (T-Flow Fuzzy) w programie VISUM lub iteracyjnej techniki bilansowania (z możliwością korzystania z metody Furness) w programie SATURN. Pakiet SATURN umożliwia elastyczne podejście do procesu kalibracji poprzez definiowanie elementów macierzy lub wartości potoków ruchu, które nie mogą podlegać zmianom. Ponieważ techniki bilansowania (sukcesywne uśrednianie z niezmiennymi wybranymi elementami macierzy O-D) wykazują lepsze dopasowanie statystyczne modelowanych natężeń ruchu do natężeń wyjściowych od metody T-flow fuzzy [10] zalecana jest weryfikacja modelu opracowanego w programie VISUM, pakietem SATURN.

Pakiet programów SATURN rozwijany jest od 1976 roku przez Instytut Studiów Transportowych Uniwersytetu w Leeds [11], [12], [13]. W pakiecie możemy wyróżnić wiele narzędzi niezbędnych do modelowania systemów transportowych. W pakiecie istnieje możliwość stosowania zarówno konwencjonalnego, makroskopowego, statycznego rozkładu ruchu w sieciach transportowych różnej wielkości (definiowanie funkcji oporu połączeń między węzłami, bez szczegółowego uwzględniania typu i parametrów skrzyżowań), jak i symulacji z uwzględnieniem szczegółowych typów i cech skrzyżowań oraz ich użytkowników w skali uśrednionej (m. in. metoda Webstera i jej modyfikacje, metody TRRL) lub kombinacji powyższych podejść co czyni pakiet elastycznym i uniwersalnym w zastosowaniach obszarowych oraz celach jakimi mają służyć analizy (od analiz planistycznych, poprzez studia wykonalności do analiz rozwiązań szczegółowych np. organizacji ruchu na skrzyżowaniach i węzłach). Pomędzy modelem rozkładu ruchu i modelem symulacyjnym obejmującym skrzyżowania istnieje sprzężenie zwrotne, tzn. dane wynikowe są iterowane pomiędzy modelami, a ich zbieżność monitorowana. Uwzględniona jest dyspersja potoków ruchu pomiędzy skrzyżowaniami. W kolejnych iteracjach rozkładu ruchu uwzględniana jest dynamika zmian parametrów ruchu na skrzyżowaniach, która ma wpływ na wybór trasy przejazdu. W pakiecie SATURN istnieje możliwość zastosowania wielu typów rozkładów ruchu: deterministycznych, stochastycznych oraz rozkładów elastycznych, które pozwalają na

sprężenie zwrotne pomiędzy procesem rozkładu ruchu w sieci ulicznej oraz popytem na transport (istnieje zatem możliwość uwzględnienia tłumienia popytu, również w przypadku zmiany kosztów podróży), co pozwala na wiarygodne analizy dotyczące np. dostępności i pojemności obszarów i uwiarygodnia wyniki analiz. Pakiet umożliwia również estymację macierzy na podstawie pomiarów ruchu, co w niektórych uzasadnionych przypadkach znacznie ogranicza zakres niezbędnych do modelowania danych. Pakiet posiada zaawansowane i bardzo przydatne dla użytkownika programy do skomplikowanych operacji na macierzach (m. in. możliwość agregacji i dezagregacji rejonów, zmiany ich liczby, generacji macierzy wynikowych, rozszerzania lub kompresji oraz transpozycji itp.) oraz programy statystyczne pomocne między innymi w analizie błędów oraz weryfikacji modeli, jak również stanowi bazę danych, dzięki której w przejrzysty sposób można analizować wyniki. Modele sieci i popytu transportowego można bezpośrednio importować do programu DRACULA. Przydatność pakietu SATURN do zastosowań w warunkach polskich przeanalizowano w pracy. Zaletą programu jest wierniejsze odzwierciedlenie zachowań transportowych poprzez możliwość zastosowania symulacji, równoległe z rozkładem ruchu bazującym jedynie na cechach połączeń między węzłami, a zatem uwzględnienie dynamicznych zmian na skrzyżowaniach w sieci, co wpływa na wyniki rozkładu oraz parametry globalne [3]. Powyższe czyni pakiet użytecznym również do wykorzystania na poziomie taktycznym oraz operacyjnym, jako bazę dla symulacji w programie DRACULA.

DRACULA jest programem symulacyjnym [3], [14], który umożliwia mikro-symulację ruchu na obszarze sieci transportowej z uwzględnieniem wszystkich typów skrzyżowań i węzłów. Program DRACULA umożliwia również symulację ruchu pojazdów transportu zbiorowego, korzystając z modelu sieci transportu zbiorowego, którą można budować i analizować w programie PT-SATURN. W programie DRACULA uwzględnione są zachowania kierowców i pasażerów poprzez zastosowanie modelu jazdy za liderem, modelu zmiany pasa ruchu (również przed skrzyżowaniem oraz podczas wyprzedzania lub omijania np. autobusu oczekującego na przystanku lub miejsca wystąpienia incydentu lub robót drogowych), symulację detektora, czasu napełniania środka transportu zbiorowego w zależności od liczby pasażerów, priorytety w sygnalizacji dla pojazdów transportu zbiorowego, uwzględnienie struktury rodzajowej pojazdów, sterowania ruchem itp. Zarówno z programu SATURN jak i programu DRACULA otrzymujemy szczegółowe wyniki dotyczące np. parametrów ruchu, zużycia paliwa, emisji spalin. Wszystkie wymienione programy są ze sobą zintegrowane. Trwają również prace nad ulepszeniem strony graficznej poprzez integrację programów ze środowiskiem GIS (np. z programem MapInfo) [3].

Poziom taktyczny obejmuje dostarczanie danych do opracowania studiów sieciowych, korytarzowych, studiów wykonalności, projektów zmian organizacji ruchu, sterowania ruchem i oceny skuteczności planowania rozwiązań, jak również dla celów operacyjnych zarządzania ruchem. Na poziomie taktycznym zastosowany zostanie model mezoskopowy (np. program SATURN lub VISUM oraz BALANCE offline). Model ten będzie wykorzystywany do analiz scenariuszy zmian organiza-

cji ruchu, wytyczania objazdów, jak również do oceny efektywności planowanych zmian. Model będzie korzystał z wyników modelu makroskopowego w zakresie modelowania popytu przy jednoczesnym podziale zadań przewozowych na poszczególne środki transportu oraz zasilany i kalibrowany danymi z systemu TRISTAR (docelowo w przypadku wdrożenia detekcji liczby napełnień w pojazdach transportu zbiorowego do aktualizacji i kalibracji modeli będą wykorzystywane również te dane, odpowiednio opracowane statystycznie). Pozwoli to na kalibrację modelu z uwzględnieniem sieci drogowej w województwie pomorskim (wyniki z modelu makroskopowego). Modele makroskopowe i mezoskopowe stanowiąc będą podstawę do opracowania mikroskopowych modeli ruchu, które będą zasilane danymi bieżącymi lub historycznymi z hurtowni danych systemu TRISTAR i systemu sterowania ruchem BALANCE.

Poziom operacyjny obejmował będzie dostarczanie danych do opracowania i sprawdzenia skuteczności oraz przede wszystkim wizualizacji funkcjonowania ruchu w ramach zmian organizacji ruchu i parametrów sterowania ruchem. Na poziomie operacyjnym model mikroskopowy (w oparciu o program VISSIM i DRACULA) pozwoli na weryfikację i prezentację wyników uzyskanych z modeli makro i mezoskopowych. W ramach pierwszych etapów wdrożenia systemu TRISTAR zaplanowano zbudowanie i wykorzystanie modelu makroskopowego – dla potrzeb budowy scenariuszy zarządzania ruchem w przypadku wystąpienia incydentów, robót drogowych, imprez masowych oraz planowania tras (linii) lub zmian tras (linii) pojazdów transportu zbiorowego wraz z możliwością analizy zmian w rozkładzie jazdy (program VISUM) oraz modelu mikroskopowego – dla potrzeb symulacji planowanych zmian parametrów sterowania ruchem oraz analiz strategii sterowania (VISUM, BALANCE offline, VISSIM).

VISSIM jest popularnym programem do modelowania na poziomie mikroskopowym zarówno ruchu miejskiego, transportu zbiorowego, rowerzystów jak i pieszych potoków ruchu. Parametry zachowań kierowcy oparte są na modelu Wiedemanna „jazdy za liderem”. Stworzony model symuluje interakcje między użytkownikami drogi i zaprojektowanym otoczeniem dzięki czemu jesteśmy w stanie przewidzieć skutki powstałe w wyniku różnych scenariuszy rozwoju dla analizowanego obszaru [3]. Program pozwala na wykonanie oceny warunków ruchu nie tylko na skrzyżowaniach i odcinkach między nimi, ale także dla projektowanych parkingów, bramek opłat i analiz zachowania pieszych na węzłach przesiadkowych. W symulacjach powinny znaleźć zastosowanie zarówno program VISSIM, jak i DRACULA. VISSIM umożliwia symulację ruchu na kilku – kilkunastu skrzyżowaniach, podczas gdy w programie DRACULA wizualizowana jest cała sieć drogowa w modelu, co pozwala na bardziej efektywną identyfikację miejsc krytycznych i rozplywów ruchu pomiędzy obszarami. Przewagą programu VISSIM jest natomiast grafika wizualizacji.

Docelowo na obszarze Gdyni modele te zostaną rozszerzone na całe miasto i uszczegółowione oraz opracowane zostaną modele w pakiecie SATURN w ramach programu unijnego CIVITAS DYN@MO). Dostarczone oprogramowanie umożliwi symulację wpływu zdarzeń drogowych (kolizje, wypadki, zatłoczenie)

oraz imprez masowych na ruch. Opisane modele będą czerpać niezbędne do kalibracji lub symulacji dane bezpośrednio z hurtowni danych systemu TRISTAR [2].

Do wstępnych analiz, mających na celu optymalizację parametrów sterowania ruchem może być wykorzystywany program TRANSYT lub SATURN. TRANSYT jest powszechnie stosowanym programem do optymalizacji i koordynacji sygnalizacji świetlnej w arteriach i na sieci skrzyżowań. Proces optymalizacji odbywa się po przez poszukiwanie takich parametrów planów stałoczasowej sygnalizacji świetlnej przy zadanych potokach ruchu, dla których wartość wskaźnika PI (Performance Index) jako funkcji łączącej koszty strat czasu i liczby zatrzymań, jest najmniejsza. W programie zastosowano metodę optymalizacji parametrów programów sygnalizacji, opracowaną pierwotnie przez D. I. Robertsona w 1967r., a następnie dopracowaną w Transport Research Laboratory [3], [15]. Program TRANSYT może być stosowany jedynie do analiz wstępnych, ze względu na statyczny – niezmienny rozkład ruchu w modelu sieci, co nie odzwierciedla rzeczywistych zachowań transportowych kierowców, ze względu na to, że każda zmiana parametrów sygnalizacji powoduje zmianę strat czasu, przepustowości i długości kolejek na poszczególnych skrzyżowaniach, co z kolei powoduje zmianę wyboru tras przejazdu. Zasadne jest zatem rozszerzenie analiz z wykorzystaniem pakietów pozwalających na uwzględnienie dynamicznego rozkładu ruchu (np. program SATURN).

W Systemie Planowania Ruchu przewidziano ponadto wykorzystanie programu do wspomagania przygotowania projektów sygnalizacji świetlnej CROSSIG, który dane o potokach ruchu będzie czerpał z systemu sterowania ruchem BALANCE oraz z innych elementów wielopoziomowego modelu. Możliwa jest symulacja rozwiązań zaprojektowanych w programie CROSSIG z wykorzystaniem programu VISSIM poprzez wykorzystanie TRENDS (stacja testowa dla aplikacji napisanych w TRELAN, umożliwiająca testowanie opracowanych aplikacji celem stworzenia programu sygnalizacji działającego bezbłędnie) i TRELAN-Compiler (TRELAN jest językiem opisowym logiki inżynierii ruchu, dzięki graficznym schematom blokowym i tabelom parametrów TRELAN, umożliwia programowanie przy użyciu stacji roboczej inżyniera ruchu – CROSSIG, TRELAN-Compiler tłumaczy kod źródłowy programu sygnalizacji TRELAN na kod binarny, pobierany do różnych urządzeń pracujących w różnych środowiskach, np. sterowników lub programów symulacyjnych), a po sprawdzeniu przesłanie do sterownika sygnalizacji.

Dane pochodzące z układów detekcji Systemu Zarządzania Ruchem Miejskim (moduły SSRD i SMNR), takie jak natężenie i prędkość ruchu, liczba zatrzymań, długość kolejek oraz parametry sterowania będą pozyskiwane za pośrednictwem systemu sterowania ruchem BALANCE/DRIVERS. Centralny system sterowania ruchem BALANCE zbudowany przez niemiecką firmę GEVAS wysyła ramowe plany sygnalizacji do sterowników (na poziomie modelu makro w okresach średnio i długoterminowych 5-15 min), a poziom lokalny może je wykorzystać, jako programy stałoczasowe lub łączyć z akomodacyjnymi programami sygnalizacji bazującymi na lokalnych detektorach. Funkcja celu dla optymalizacji modelu systemu transportowego BALANCE może być dynamicznie tworzona i modyfiko-



wana, również z użyciem wag, które pozwalają na utworzenie jej z kombinacji wielu kryteriów optymalizacji. W odniesieniu do programów sygnalizacji obliczana jest funkcja celu z wykorzystaniem wskaźnika wydajności PI, w której wykorzystuje się takie pomierzone lub obliczone parametry i ich kombinacje dla grup sygnalizacyjnych, jak straty czasu, długości kolejek i liczba zatrzymań. DRIVERS umożliwia wykrywanie stanów i zakłóceń w ruchu (w przyszłości możliwe będzie pozyskiwanie danych z pojazdów) i natychmiastowe żądanie zmiany ustawień sygnalizacji w odpowiedzi na zmianę stanu ruchu. Dodatkowo wykorzystywane będą informacje ze stacji pomiaru ruchu, które umożliwią detekcję prędkości chwilowej, gęstości ruchu oraz jego struktury rodzajowej (klasa pojazdów wg EUR 6 na odcinkach między skrzyżowaniami lub wg EUR 3 w obrębie skrzyżowania), co umożliwi między innymi estymację i kalibrację macierzy podróży dla różnych rodzajów pojazdów w modelu wielopoziomowym. Detektory systemowe stacji pomiaru ruchu (podwójne pętle indukcyjne) zostaną podłączone do sterownika sygnalizacji świetlnej MSR.

Zastosowanie kamer ANPR oprócz funkcji określania czasu podróży pomiędzy poszczególnymi kamerami, pozwoli również na opracowanie aplikacji, umożliwiającej estymację macierzy podróży w czasie rzeczywistym do wykorzystania przez pakiety SATURN, VISUM lub BALANCE offline. Kalibrowane w programie SATURN lub VISUM macierze umożliwią analizę wpływu zmian parametrów sterowania na sprawność funkcjonowania systemu transportu i wybór strategii sterowania, przy czym w programie SATURN możliwe jest uwzględnienie redukcji popytu transportowego i dostępności poszczególnych obszarów dzięki zastosowaniu rozkładów elastycznych [16]. Wybrana strategia wspomagana będzie komunikatami wyświetlanymi na tablicach zmiennej treści.

W Systemie Planowania Ruchu znajdują również zastosowanie dodatkowe narzędzia dostarczone przez firmę GEVAS, umożliwiające nadzór i analizę jakości w zakresie realizacji priorytetów dla transportu zbiorowego (VTmonitor/FAS) oraz jakości funkcjonowania systemu sterowania ruchem (VTnet/pCoq), które będą dostarczały dodatkowych informacji o sprawności funkcjonowania systemów transportu na poszczególnych skrzyżowaniach w obszarze wdrożenia systemu TRISTAR, poza analizami przeprowadzanymi za pośrednictwem modeli analitycznych wielopoziomowego modelu ruchu.

#### 4. Zakończenie

Pojawianie się nowoczesnych narzędzi do prognozowania i analiz transportowych umożliwia zarówno usprawnienie procesu planowania, jak i zarządzania operacyjnego systemami transportowymi. Warunki zmiennego popytu ruchu implikują konieczność pozyskiwania aktualnych informacji o funkcjonowaniu systemów transportu w celu umożliwienia optymalizacji procesów transportowych. Ze względu na powyższe niezmiernie ważne jest powiązanie modeli do analiz ruchu



z wdrażanymi rozwiązaniami z zakresu Inteligentnych Systemów Transportu, jak również umożliwienie analitykom doboru i testowania parametrów modeli, które można pozyskać z układów detekcji systemów zarządzania ruchem. Niezmiernie ważne jest umożliwienie współpracy systemów sterowania ruchem poszczególnymi elementami modelu wielopoziomowego poprzez wypracowanie odpowiednich kompilatorów, umożliwiających automatyczne wykorzystanie danych bez konieczności żmudnego wprowadzania danych do poszczególnych modeli. Ze względu na to, że poszczególne pakiety i programy opisane w niniejszym artykule posiadają funkcjonalności, które je wyróżniają, zasadne jest stosowanie szerokiego wachlarza oprogramowania, uzupełniającego się i umożliwiającego wspomaganie procesu planowania i zarządzania ruchem, na różnych poziomach i płaszczyznach, wyróżnionych w strukturze modelu wielopoziomowego.

## Bibliografia

- [1] Oskarbski J., Inteligentny system transportu dla aglomeracji na przykładzie aglomeracji trójmiejskiej, *Komunikacja Publiczna* nr 1/2011.
- [2] Oskarbski J., Struktura funkcjonalna systemu zarządzania transportem w Trójmieście – TRISTAR, *Przegląd Komunikacyjny* nr 7-8/2011.
- [3] Jamroz K., Oskarbski J., Kustra W., Gumińska L., Wielopoziomowe modelowanie ruchu - koncepcja i doświadczenia praktyczne, VIII Konferencja Naukowo-Techniczna z cyklu: Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego: Nowoczesny transport publiczny w obszarach zurbanizowanych, Poznań- Rosnówko 15-17 czerwca 2011.
- [4] Singh R., Improved Speed-Flow Relationships: Application to Transportation Planning Models, Paper Presented at the 7th TRB Conference on Application of Transportation Planning Methods Boston, Massachusetts. March 1999.
- [5] FHWA, Model Validation and Reasonableness Checking Manual, Barton-Aschman Associates, Inc. and Cambridge Systematics, Inc., USA 1997.
- [6] Lilpop Z., Sidorenko A., Waltz A., Prognozowanie ruchu miejskiego, Warszawa 1983.
- [7] Smith J., Blewitt R. et al, Traffic Modelling Guidelines, Traffic Manager and Network Performance Best Practice, Version 3.0, Transport for London 2010.
- [8] Jamroz K., Krystek R. i inni, Koncepcja zintegrowanego systemu zarządzania ruchem na obszarze Gdańska, Gdyni i Sopotu, Gdańsk, Politechnika Gdańska, 2007.
- [9] Oskarbski J., Perspectives of Telematics Implementation in Tri-City Transport Systems Management and Planning. *Communications in Computer and Information Science (Modern Transport Telematics)*, nr 239/2011.

- [10] Ren J., Rahman A., Automatically Balancing Intersection Volumes in A Highway Network, 12th TRB Transportation Planning Application Conference, 2009.
- [11] <http://www.saturnsoftware.co.uk/>
- [12] Van Vliet D., Hall M., (1997), SATURN 9.3. user manual. Leeds/Surrey 1997.
- [13] Van Vuren T., Davies R., (1992), The use of shadow networks in the determination of limits to traffic growth in heavily-congested networks, Traffic Engineering+Control.
- [14] Liu R., Van Vliet D., Watling D., (1995/1), DRACULA: Dynamic Route Assignment Combining User Learning and Micro-simulation. Paper presented at PTRC vol. E. 1995.
- [15] University of Florida, Traffic Network Study Tool, Florida 2004.
- [16] Oskarbski J., Wpływ struktury sieci ulicznej na sprawność i efektywność funkcjonowania transportu indywidualnego w miastach, praca doktorska, Katedra Inżynierii Drogowej Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2005.

## MODULARNE KOMPONENTY SYSTEMOWE DLA POTRZEB ANALIZ TRANSPORTOWYCH – ZARYS PROJEKTU MOSTAR<sup>1</sup>

---

**Andrzej Krych**

dr inż., Instytut Inżynierii Lądowej, Politechnika Poznańska, 60-965 Poznań, ul. Piotrowo 5, tel.: +48 61 665 2433,  
e-mail: a.krych@bit-poznan.com.pl

---

**Streszczenie.** *Po dokonaniu krótkiej, syntetycznej diagnozy krajowej praktyki modelowania podróży i badań ruchu proponuje się zawiązanie sieciowego klastra technologicznego w celu rozwoju metod modelowania, prognozowania i symulacji ruchu. Zapropionowano strukturę oraz dwa cele generalne Projektu: budowa wielopoziomowego, uogólnionego modelu ruchu opartego na ogólnie dostępnych zbiorach danych (jako modelu syntetycznego) oraz zintegrowanie systemów operacyjnych, planistycznych i baz danych stosowanych do analiz ruchu, planowania i zarządzania ruchem. Proces rozwoju inspirować winno tworzenie Biblioteki danych, komponentu Informacji oraz realizacja kolejnych badawczych tematów niszowych, prowadzących do realizacji celów Projektu. Projekt ma strukturę modułową, prócz Biblioteki i komponentu Informacji tworzą ją Integratory – moduły, które poprzez tematy niszowe zawiązują zasoby Klastra w system. Sukces Projektu warunkuje przystąpienie do współpracy kilku ośrodków akademickich, kilkunastu biur konsultingowo-projektowych oraz kilku jednostek administracji publicznej związanych z planowaniem i zarządzaniem transportem. Zarysowano trzyetapowy proces rozwoju i analizę SWOT Projektu.*

**Słowa kluczowe:** *modelowanie podróży, badania ruchu, innowacje, sieciowy klastr technologiczny*

*„Musimy zrobić coś, co by od nas zależało, zważywszy, że dzieje się tak dużo, co nie zależy od nikogo”*

Stanisław Wyspiański, *Wyzwolenie*

### 1. Uwagi wstępne

W procesach badań, planowania i zarządzania transportem występują teoretyczne i praktyczne problemy w zakresie:

- danych i dostępu do danych dla potrzeb modelowania ruchu,
- archiwizacji i wykorzystywania danych o ruchu, zarządzania danymi i dostępem do danych,

---

<sup>1</sup> **Modularne Oprzyrządowanie Systemowe Transportowych Analiz Ruchu.**

- komplementarności danych i modeli ruchu dedykowanych dla obszarów sąsiedzkich lub w układzie wielopoziomowym<sup>2</sup>,
- organizacji kompleksowych badań ruchu,
- zintegrowania oprogramowania na bazie wspólnych danych i komunikacji między programami przeznaczonymi do badań, prognoz i zarządzania ruchem.

Niezależnie od powyższych problemów pojawiają się nowe możliwości archiwizacji, selekcji i pozyskiwania danych z rozwijanych komponentów ITS, tworzonych i budowanych systemów mapowych, rozwijanych nawigatorów i planerów podróży, powstających centrów administrowania i zarządzania danymi oraz danych pozyskiwanych w ramach różnych realizowanych projektów.

Biorąc pod uwagę potrzeby, opisane wyżej problemy oraz zarysowane możliwości, zachodzi celowość podjęcia i koordynowania odpowiednich działań na rzecz unowocześnienia warsztatu profesjonalnego w zakresie badań i zastosowań modelowania ruchu, planowania i zarządzania ruchem. Proponuje się zawiązanie projektu opartego na opisanej niżej strukturze celów, modularnej formule zadań tego projektu oraz określonej koncepcji organizacyjnej.

## 2. Cele i zadania Projektu

Nakreśla się dwa cele generalne Projektu, prowadzące do stworzenia:

1. Wielopoziomowego modelu syntetycznego (w rozumieniu [1]), umożliwiającego budowanie modeli ruchu dla dowolnej jednostki administracyjnej w oparciu o modele innych poziomów, bazy mapowe, centralne bazy danych i lokalne pomiary bazowe ruchu.
2. Modularnej struktury poziomej - metody, oprogramowanie i interfejsy łączące funkcje badania, modelowania i zarządzania ruchem przy użyciu nowych technologii i wykorzystaniu dostępnych oraz rozwijanych komponentów oprogramowania.

Częstkowe cele Projektu nakreślić można w formie budowy trzech komponentów modularnych projektowanego systemu: Biblioteki danych, Integratorów i Informacji.

**Biblioteki danych**, obejmujące przykładowo następujące moduły:

- ruch osób, pasażerów, pojazdów, ładunków, ich charakterystyki i zmienności,
- wskaźniki ruchliwości (produkcji ruchu),
- cechy i czynniki ruchotwórczych,
- charakterystyki modelowanego popytu i modelowane sieci,
- charakterystyki terenów i dostępne lub wzbogacane bazy mapowe,

formowane i aktualizowane w strukturze agregowanej terytorialnie (rejony i obszary administracyjne).

---

2 Kraj, region, powiat, miasto.

**Integratory**, takie jak:

- standaryzacja danych, raportów i algorytmy walidacji danych<sup>3</sup>,
- interfejsy<sup>4</sup> (w tym oprogramowanie integrujące, w tym makro i mikrosymulacji oraz programów operacyjnych),
- modele syntetyzujące,

winny zapewnić proces pozyskiwania, uzupełniania, przejrzystości i ewaluacji danych, prowadząc do zwiększenia ich walorów użytkowych, inicjowania ich nowych warstw źródłowych, transfer danych, usprawniania warsztatu metodycznego i analitycznego.

W strukturze **Informacji** konieczne jest funkcjonowanie trzech modułów:

- o dostępie, strukturze, standardach i zawartości Biblioteki danych,
- rejestru oprogramowania, projektów i badań realizowanych oraz zrealizowanych w ramach projektu,
- rejestru propozycji badawczych w zakresie tematów niszowych w rozwijającym systemie.

W tym komponencie funkcjonowałyby także aktualizowana baza informacji o cechach oprogramowania dostępnego na rynku, systemach danych oraz opracowanych mapach systemowych.

### 3. Koncepcja realizacji Projektu

Celowa jest współpraca środowisk akademickich, profesjonalnych biur inżynierii ruchu i administratorów sieci transportowych w budowie powyższych komponentów, poczynając od budowy baz danych, odpowiednio oprogramowanych instrumentami standaryzacji i walidacji oraz auto - aktualizacji lub aktualizacji online, a skończywszy na realizacji celów generalnych.

Optymalną formą takiej współpracy może być przemysłowy, sieciowy klaster technologiczny<sup>5</sup> ośrodków badawczo-rozwojowych, innowacyjnych biur projektowych i instytucji publicznych. Ideą przewodnią takiego klastra jest dążenie do zespolenia własnych efektów z efektami innych jednostek w realizacji określonych celów i zadań w celu ich synergicznego pomnożenia. Klaster technologiczny dą-

3 Wartościowanie danych dla różnych zastosowań z uwzględnieniem ich fluktuacji i rozmycia.

4 W znaczeniu: specyfikacja procedur, funkcji lub algorytmów umożliwiających komunikację z Biblioteką danych, systemami operacyjnymi lub innym systemem zewnętrznym w stosunku do aplikacji korzystającej z interfejsu.

5 **Klaster przemysłowy** (ang. *industrial cluster*, inne nazwy to: *grono*, *wiązka przemysłowa*, *lokalny system produkcyjny*, *biegun kompetencji*) – przestrzennie skoncentrowana grupa przedsiębiorstw, instytucji i organizacji powiązanych siecią pionowych i poziomych zależności, często o charakterze nieformalnym, która poprzez skupienie szczególnych zasobów pozwala osiągnąć tym przedsiębiorstwom trwałą przewagę konkurencyjną. Koncepcja klastra przemysłowego została sformułowana przez amerykańskiego ekonomistę Michaela Portera w wydanej w 1990 r. książce *The Competitive Advantage of Nations*. Jednak za jej prekursora należy uznać brytyjskiego ekonomistę Alfreda Marshalla, który analizując skłonność firm z sektorów produkcyjnych w Anglii do lokowania się w dystryktach przemysłowych w pobliżu konkurentów, dostawców i klientów stworzył pojęcie tzw. zewnętrznych korzyści skali (ang. *external economies of scale*). (cyt. za [2]).

żący do sukcesu z wykorzystaniem innowacji, umożliwia wypracowanie przewagi konkurencyjnej jednostek stowarzyszonych, udoskonalenie warsztatu profesjonalnego twórców oraz wzmocnienia potencjału decyzyjnego w sektorze publicznym. Forma klastra nie wyklucza konkurencji uczestnika z innymi jego podmiotami ani innych związków o charakterze funkcjonalnym lub prawnym, w jakie podmioty te wchodzi lub im podlegają (np. w problemie zamówień publicznych, prawa autorskiego, itp.).

Proponowany sieciowy klaster technologiczny, byłby organizacją dobrowolnie stowarzyszonych jednostek organizacyjnych (podmiotów), działającą w oparciu o trzy instytucjonalne formuły, zwykle formujące tego typu organizację:

- regulamin,
- radę,
- biuro.

#### 4. Struktura podmiotowa Klastra

W zakresie innowacji podstawową rolę powinny odgrywać ośrodki akademickie, które korzystając z budowanej systematycznie bazy danych podejmowałyby tematy niszowe w pracach dyplomowych, rozprawach doktorskich, grantach badawczych, itp. Biblioteka danych byłaby poważną inspiracją w podejmowaniu takich prac.

Biura projektowe i konsultingowe, prócz podjęcia tematów niszowych w ramach działań o charakterze aplikacyjnym, realizowanych w ramach komercyjnych prac studialnych, współtworzyć mogą Bibliotekę danych, komponent Informacji i działać innowacyjnie.

Jednostki administracji i instytucji publicznych winny mieć udział w budowaniu komponentu Informacji, Biblioteki danych uzyskując wpływ na kształtowanie tematyki niszowej, dostęp do formowanej Biblioteki danych, Integratorów, Informacji, zarazem stanowiąc poligon wdrożeniowy innowacji technologicznych.

Funkcja Biura, jako jednostki organizacji i zarządzania winna w początkowej fazie być oparta na regulaminie Klastra, merytorycznie podlegając Radzie Klastra, na pewnym etapie zaś może zostać osadzona w obowiązującym ustroju prawnogospodarczym umożliwiającym obrót handlowy. Możliwe jest wtedy oparcie działania Biura bądź na podstawie ustaw o stowarzyszeniach, bądź na zasadzie fundacji lub w formie spółki z o.o. W tej docelowej formule samodzielne utrzymanie finansowe Biura wynikałoby ze sprzedaży gotowych komponentów podmiotom zewnętrznym – pozostającym poza Klastrem, których wartość (cena sprzedaży) tworzyłyby udziały uczestników Klastra w dochodach netto. Rada Klastra (docelowo chociażby jako Rada Nadzorcza Sp. z o.o.) formowałaby zadania Biura (Zarządu) i zadania niszowe, zalecane do podjęcia przez podmioty Klastra.



## 5. Realizacja

Realizacja powyższego projektu obejmowałaby w pierwszym etapie:

- 1) utworzenie listy zainteresowanych podmiotów Klastra,
- 2) wypracowanie zasad współpracy, funkcjonowania Biura i tworzenia udziałów,
- 3) opracowanie Regulaminu,
- 4) powołanie Rady,
- 5) powołanie Biura,
- 6) uruchomienie działalności Klastra.

Spotkania zainteresowanych podmiotów, a następnie Rady Klastra można powiązać z cyklicznymi, dorocznymi konferencjami techniczno–naukowymi (głównie z konferencjami krakowską i poznańską) i seminariami akademickimi. Należy sądzić, że dałoby się etap pierwszy zamknąć jeszcze w 2013 roku.

Drugi etap, w trakcie którego postępowalaby budowa trzech podstawowych komponentów Projektu, mieściłby się pomiędzy wypracowaniem standardów dla pozyskiwanych danych i informacji (w tym słownika terminologicznego) a przygotowaniem tych komponentów do otwartej formuły sprzedaży oraz przesądzeniem prawno–organizacyjnej struktury Biura. Ocenia się także, że mniej więcej dwuletni interwał tego etapu powinien zostać zamknięty opracowaniem kilkunastu pełnowartościowych tematów niszowych, formując oferty w formie pakietów.

Po 2015 roku winno się wejść w etap najpoważniejszych i bardziej złożonych tematów niszowych (interfejsów). Rozpatrywać można pozyskanie dla niektórych spośród nich funduszy unijnych.

W tabeli 1 zestawiono analizę SWOT Projektu.

Tabela 1. Analiza SWOT Projektu

<p><b>MOCNE STRONY</b></p> <p>Wykorzystanie potencjału akademickiego dla rozwijania opracowań niszowych (prace dyplomowe, doktorskie, granty itp.) na podstawie rozwijanych baz danych (A).</p> <p>Wykorzystanie potencjału biur projektowych w dostarczeniu danych - wyników pomiarów, badań i analiz (B).</p> <p>Wykorzystanie potencjału administracji publicznej w procesie standaryzacji i normalizacji metod pomiarów, badań i analiz, rozwój ITS (C).</p>	<p><b>SŁABE STRONY</b></p> <p>Ograniczone możliwości pozyskiwania środków finansowych oraz ograniczone możliwości finansowania działań nieformalnego Klastra przez podmioty, np. problem udziałów z chwilą sformalizowania Biura (A).</p> <p>Trudności w zachowaniu równowagi pomiędzy korzyściami a wkładem podmiotów Klastra – złożoność problemu ekwiwalentu (B).</p> <p>Trudności w zachowaniu równowagi pomiędzy czynnikiem konkurencyjności a potrzebą współpracy (C).</p>
<p><b>SZANSE</b></p> <p>Wzrost zapotrzebowania na pomiary, badania i analizy ruchu (środki unijne, plany transportowe) (A).</p> <p>Wzrost możliwości pozyskiwania danych z rozwijanych na różnych poziomach i w różnych branżach systemów ITS (B).</p> <p>Rozwój systemów danych mapowych (C).</p>	<p><b>ZAGROŻENIA</b></p> <p>Możliwość konfliktów wobec trudności zarysowanych w punktach A, B i C powyżej (A).</p> <p>Zbyt liczna lub zbyt mało liczna liczba podmiotów Klastra (B).</p>

## 7. Wnioski

Działamy na rynku krajowym w sposób rozproszony, tworząc własne, niejednokrotnie niepowtarzalne wartości, ale zarazem nie unikając błędów, dochodzimy w sposób samodzielny do zbliżonych konkluzji. Funkcjonuje wśród nas wielu znaczących ekspertów, w znacznym stopniu działających w odosobnieniu. Średnio raz, czy dwa razy w roku konfrontujemy niektóre z naszych doświadczeń na krótkich konferencjach czy w zwartych publikacjach, która to konfrontacja nigdy nie daje pełnej i oczekiwanej satysfakcji a kuluarowe rozmowy pozostawiają poczucie niedosytu. Osłabia to znacznie innowacyjny potencjał całego, w istotnej swej części twórczego środowiska i przenosi się na konkurencyjną słabość w okolicznościach coraz bardziej zaniżonego poziomu wykonywania zawodu na obecnym rynku zamówień publicznych.

Uznając potrzebę innowacji i profesjonalne wykonywanego zawodu za wartości nadrzędne winniśmy lepiej zorganizować proces postępu w stosowanym warsztacie metodycznym, którego niedostatki przecież są nam dobrze znane. Formuła technologicznego klastru sieciowego wydaje się dla tych problemów optymalna. Samo zorganizowanie się w jego ramach kilku ośrodków akademickich i kilkunastu biur konsultingowo–projektowych już na wstępie rokować może sukces w krótszej lub dłuższej perspektywie. W obrębie administracji publicznej nawet słabe jej ogniwa zainteresowane planowaniem i zarządzaniem ruchem w hierarchii urzędowej wzmocnić mogą swoją pozycję, skuteczność i efektywność.

Za najbardziej pilne uznać należy tworzenie ogólnodostępnej dobrze zorganizowanej Biblioteki danych. Powinno to przyspieszyć osiągnięcie zadań określonych jako tematy niszowe, wyznaczające standardy i postęp w metodach pozyskiwania danych, operowania nimi i w wydajności oprogramowania stosowanego dla celów analiz. Standaryzacja elementów tego procesu ułatwi, a modułarne uzupełnianie struktury projektu przyspieszy, dojście do pakietów systemowych określonych celami generalnymi projektu.

Tworzenie innowacji winno owocować ofertą produktów interesujących dla administracji publicznej wszystkich szczebli. Dlatego korzystny jest jej udział i współpraca w ramach Klastra w zamian za dostęp do wartościowych danych, niejednokrotnie objętych w różnym stopniu ochroną praw autorskich. Spoiwem tych działań winien być komponent Informacji, budowanej jako niezbędny czynnik efektywnej organizacji, oszczędności czasu i dostępu do wiedzy.

## Materiały źródłowe

- [1] Krych A. z zesp., Wielopoziomowe struktury syntetyczne a struktury dedykowane w modelowaniu i prognozowaniu potoków ruchu. W: Modelling 2012. Mat. III Ogólnopolskiej Konferencji Modelowanie podróży i prognozowanie ruchu, Politechnika Krakowska, Kraków, 2012 (w opracowaniu).
- [2] [pl.wikipedia.org/wiki/Klaster](http://pl.wikipedia.org/wiki/Klaster)

## WIELOPOZIOMOWE STRUKTURY SYNTETYCZNE A STRUKTURY DEDYKOWANE W MODELOWANIU I PROGNOZOWANIU POTOKÓW RUCHU<sup>1</sup>

---

### Andrzej Krych

dr inż., Instytut Inżynierii Lądowej, Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 5, 60-965 Poznań, tel.: +48 61 665 2433, e-mail: a.krych@bit-poznan.com.pl

### Marek Cejrowski

mgr inż., Biuro Inżynierii Transportu, ul. Wrocławska 10, 61-838 Poznań, tel. +48 61 835 1973, e-mail: cejrowski@bit-poznan.com.pl

### Szymon Fierek

mgr inż., Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 5, 60-965 Poznań, tel.: +48 61 665 2716, e-mail: szymon.fierek@put.poznan.pl

### Mariusz Kaczmarek

dr inż., Instytut Informatyki, Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 5, 60-965 Poznań, tel.: +48 61 879 0790, e-mail: Mariusz.Kaczmarek@cs.put.poznan.pl

---

### Andrzej Maćkowiak

mgr inż., Biuro Inżynierii Transportu, ul. Wrocławska 10, 61-838 Poznań, tel. +48 61 835 1973, e-mail: makowiak@bit-poznan.com.pl

### Karsten McFarland

mgr, PTV AG Karlsruhe, Haid-und-Neu-Str. 15, 76131 Karlsruhe, Germany, tel. +49 721 9651-0, e-mail: mcfarland@t-online.de

### 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

### Jacek Żak

dr hab. inż., profesor PR, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 5, 60-965 Poznań, tel.: +48 61 665 2230, e-mail: jacek.zak@put-poznan.pl

---

**Streszczenie.** *Omawia się podstawowe problemy związane z krajową praktyką badań i modelowania ruchu. Wskazano istotne różnice między wynikami badań reprezentacyjnych a wynikami pomiarów, wpływ ruchu zewnętrznego ze stref podmiejskich i ruchu tranzytowego w sieci dróg krajowych. Problemem są również różnice pomiędzy aplikacjami modeli na poziomie krajowym i aglomeracyjnym w prognozowaniu ruchu na przebiegu projektowanych dróg krajowych na obrzeżach obszaru aglomeracji. Problem wielopoziomowości zasadza się głównie na uproszczonej formule ruchu wewnętrznego na poziomie wyższym w stosunku do zewnętrznego na poziomie niższym oraz niespójności struktur macierzowych. Zarysowano tendencje w rozwoju teorii oraz instrumentów pozyskiwania i przetwarzania danych w procesie modelowania ruchu, zwracając uwagę na ich ukierunkowanie na modelowanie dedykowane dla obszaru. W analizie rozwoju teorii modelowania wskazano na możliwość wykorzystania analiz kategorii, modeli aktywnościowych i użytkowania terenów (land-use) w przelamaniu problemów badań reprezentacyjnych gospodarstw domowych. Podano przykłady i opisano próby ujęcia syntetycznego modelu ruchu w przeszłości dla miast i średnich miast.*

*Diagnoza problematyki badań podróży każe zweryfikować konwencjonalne podejście o strukturach dedykowanych oraz silnych ograniczeniach poziomych i poszukiwać rozwiązań w formowaniu uogólnionych, niekonwencjonalnych metod modelowania podróży, także ruchu ładunków, opartych na prawach mobilności zależnych od cech fizycznego, ekonomicznego, transportowego*

---

1 Wkład autorów w publikację: Krych A. 40%, Cejrowski M. 8%, Fierek S. 10%, Kaczmarek M. 8%, Maćkowiak A. 8%, McFarland K. 8%, Thiem J. 8%, Żak J. 10%

*i kulturowego otoczenia obszaru. Modelowanie syntetyczne jest procesem, który w drodze badań i eksperymentów prowadziłoby od zestandaryzowanych modeli dedykowanych przez modele syntetyczne częściowo dedykowane do wielopoziomowego, uniwersalnego modelu syntetycznego, opartego na ogólnej teorii mobilności. Uważa się je za istotny element rozwoju praktyki i teorii w drodze wzajemnej weryfikacji.*

**Słowa kluczowe:** modelowanie podróży, badania ruchu, modele ruchu, ITS

## 1. Tezy wstępne

Rozwój metod modelowania podróży i prognozowania ruchu w Polsce opiera się w głównym nurcie na bazie aplikacji tych metod w studiach transportowych miast. Możemy mówić o modelowaniu o strukturze dedykowanej do zdefiniowanego obszaru. W nieco odmiennym nurcie - w badaniach regionalnych oraz logistycznych, na gruncie ekonomii i geografii transportu, formowane są modele funkcjonujące w obrębie założeń i ograniczeń dedykowane obszarowo i podmiotowo – dla wyodrębnionych sieci, układów komunikacyjnych, grup towarowych, określonych środków transportu.

W modelowaniu dedykowanym dla miast natrafia się na coraz większe problemy badań reprezentacyjnych, ograniczenia kosztowe i administracyjne (granice gmin). Jednym z istotnych ograniczeń modeli dedykowanych pozostaje problem kompatybilności struktur wielopoziomowych, wynikających głównie z metodycznej odmienności podejścia do tworzenia więźby ruchu zewnętrznego i wewnętrznego. Szczególnie dotyczyć to może relacji pomiędzy modelami krajowym, regionalnymi i miast (gmin).

Przy solidności ogólnej teorii modelowania podróży modelowanie dedykowane ma szereg wad praktycznych, których przewyciężenie jest możliwe poprzez wystarczająco szeroką bazę eksperymentowania, prowadzącą do uogólnień, które określić możemy jako proces syntetyzowania modelu. Istotnym doprecyzowaniem rozróżnienia pomiędzy modelowaniem syntetycznym a dedykowanym jest okoliczność, że model syntetyczny weryfikuje się w sposób wystarczająco wiarygodny wraz ze zmianą dedykowanego obszaru lub dedykowanego podmiotu. Odmienność przyjętych definicji, miar i innych standardów nie tylko ogranicza porównywalność modeli dedykowanych dla różnych obszarów, ale ogranicza możliwości badań rozwojowych. Pomijając różnorodność zastosowań, doświadczeń i definicji cech ruchu w tych aplikacjach warto podkreślić, że alternatywne ich wykorzystanie (na sposób „syntetyczny”) miały na gruncie krajowym charakter przyczynkowy [25, 52, 54, 55, 63, 79, 80].

Wymogi ustawowe budują nowy rynek krajowy potrzeb modelowania podróży w formie obligatoryjnych planów transportowych na kilku poziomach. Rozwój krajowej sieci dróg i modernizacji sieci kolejowej rodzą potrzebę budowy modeli ruchu o zasięgu krajowym, co leży w zainteresowaniach GDDKiA, a ostatnio także kolejnictwa. Te wymogi, a zarazem wymogi normatywne związane z pozyskiwaniem środków europejskich, tworzyły w ubiegłych latach i pewnie formować będą w przyszłości nowe wyzwania. W powyższych okolicznościach proces budowy

modeli dedykowanych można wykorzystać w budowaniu ich struktur wielopoziomowych, zapewniając kompatybilność podmiotu, obszarów i struktur modelu na różnych jego poziomach organizacji, zarządzania i administracji. W szczególności dotyczy to poziomów administracyjnych: miasta (aglomeracji, gminy), regionu (województwa) i kraju.

Modele krajowe o potencjalnej strukturze wielopoziomowej mają precedensy w modelowaniu ruchu w Niemczech (ruch drogowy, 2002 [34]) i Wielkiej Brytanii (ruch drogowy [23], poczynając zresztą już od lat sześćdziesiątych ub. wieku). Budowane są także, między innymi w ramach wymogów i standardów unijnych, nowoczesne systemy mapowe o stosunkowo głębokich warstwach, formach i strukturach informacji przydatnych w modelowaniu podróży i przemieszczeń ładunków (GIS, SIP, EMAPI itp.). Tworzy się także coraz większa baza pozyskiwania danych o ruchu w toku rozwijanych komponentów inteligentnych systemów transportowych (ITS, ang. Intelligent Transport Systems).

Diagnoza problematyki badań podróży każe zweryfikować konwencjonalne podejście o strukturach dedykowanych a zarazem poszukiwać rozwiązań w formowaniu uogólnionych, niekonwencjonalnych metod modelowania podróży a także ruchu ładunków, opartych na prawach mobilności zależnych od cech fizycznego, ekonomicznego, transportowego i kulturowego otoczenia obszaru. Proces syntetyzowania modeli mógłby być prowadzony w drodze badań i eksperymentów dedykowanych od modeli syntetycznych częściowo dedykowanych (podmiotowo i/lub obszarowo) do wielopoziomowego, uniwersalnego modelu syntetycznego. Ideę takiego projektu zarysowano w osobnej prezentacji [53].

## 2. Modelowanie ruchu

### 2.1. Uwagi ogólne

Na model transportowy składają się komponenty systemowego ujęcia transportu obejmującego dychotomiczne struktury popytu i podaży. Strukturę popytu odwzorowuje popytowy model ruchu, w szczególności zaś w ruchu osób – model podróży. Podażowy model układów transportowych obejmuje model numeryczny sieci transportowej z atrybutami interakcji<sup>2</sup> między modelowanym popytem i podażą. W szczególności model ruchu jako komponent modelu transportowego, jest specyficzną kategorią modelowania matematycznego<sup>3</sup>, przeznaczoną dla

2 Interakcje, to sprzężenia między komponentami struktury popytu i podaży, określającymi zasady dostępu do sieci transportowych. Sieci wraz z tymi atrybutami formują model układu transportowego [58].

3 Model matematyczny jest zbiorem reguł i zależności zapisanych w formie związków analitycznych (funkcji, wyrażeń matematycznych), które wiążą ze sobą różne elementy modelu - wielkości, mające sens pomiarowy i precyzyjnie zdefiniowane za pomocą miar ilościowych, jednostek i zakresów zmienności [24, 28, 62, 99]. Model matematyczny, ze swej istoty powinien mieć sens obliczeniowy, gdyż jest konstruowany po to, by mógł zastąpić obiekt rzeczywisty w zaplanowanych badaniach - eksperymentach obliczeniowych. Struktura modelu matematycznego ma najczęściej postać zadania do rozwiązania, którego spodziewany wynik (rezultat obliczeniowy, rozwiązanie zadania), osiągany w cyklu odpowiednio zaplanowanych eksperymentów obliczeniowych, jest ściśle powiązany z celem badań.

rozwiązywania zadań transportowych. Stosując w tym kontekście pojęcie modelu ruchu mamy intencję jego respektowania nie ograniczając się do podróży osób (jak w modelu podróży), ale obejmując nim także ruch pojazdów i przewóz ładunków. Efektem finalnym modelu ruchu jest rozkład potoków ruchu w sieciach transportowych - obraz potoków ruchu, odwzorowujący reakcję modelowanego popytu na interwencję operatora w elementach sieciowych modelowanego układu transportowego, ujętych w sposób adekwatny do rozwiązywanego zadania (Krych, Kaczkowski [58]).

Należy mieć na uwadze, że jako modelowanie ruchu określana jest też praktyka oparta na teorii strumienia ruchu (np. [27]). Ma ona szczególne znaczenie w tych aspektach, które dotyczyć mogą modeli określanych dalej jako modele mikroskopowe, najczęściej odnoszone do procesu mikrosymulacji ruchu ujmowanego w kategoriach podstawowego równania strumienia ruchu.

Ten sam potok ruchu, opisany miarą natężenia ruchu pojazdów na odcinku grafu modelowanej sieci drogowej jako strumień równania podstawowego w skali mikro, jest zarazem finalnym obrazem procesu modelowania ruchu w skali „makro” i jest podmiotem praktyki i teorii modelowania strumieni ruchu z wykorzystaniem teorii przepustowości i teorii sterowania. W przeciwieństwie do tej sfery, która w praktyce wiąże się z zarządzaniem ruchem (drogowym, a na bazie odrębnych zasad teoretycznych także z zarządzaniem transportem publicznym) domeną interesującej nas praktyki modelowania transportu jest planowanie sieci transportowych. Uwzględniając atrybuty dostępu do sieci transportowych w sposób optymalny, opisowy albo normatywny – staje się domeną badań i praktyki określanej coraz częściej jako zarządzanie popytem transportowym.

Warto podkreślić, że powyższa struktura pojęciowa różni się zasadniczo od konwencjonalnej, stosowanej w inżynierii ruchu drogowego, co szerzej omówiono i uzasadniono proponując ujęcie odrębne w toku poprzedniej Konferencji (2010, [58]). Tak jak sferom zarządzania ruchem przypisaliśmy teorię strumieni ruchu i teorii pokrewnych – jak np. sterowania i przepustowości, tak sferze zarządzania popytem i planowania możemy przypisać teorię mobilności z teorią pokrewną, zawiązującą się w obrębie teorii sieci i planowania układów transportowych.

## *2.2. Modelowanie czterostadiowe a modelowanie aktywnościowe*

W modelowaniu podróży dominują dwa zasadnicze podejścia powszechnie opisywane w literaturze przedmiotu [35, 73], to jest szeroko stosowany: model czterostadiowy (ang. Four Stage Model – FSM) oraz model aktywnościowy (ang. Activity-Based Model - ABM). Oba podejścia są systematycznie doskonalone przez różnych autorów [3, 36, 74, 78] i stosowane w różnych krajach [43]. Wiele z tych modeli powstaje dla opisu konkretnych systemów transportowych, stąd mają one raczej charakter dedykowany, a nie syntetyczny (uniwersalny)

W konkretnych przypadkach powstające modele ruchu są często integrowane z ekonometrycznymi modelami zagospodarowania przestrzennego (ang. land use models), dzięki czemu powstają zintegrowane podejścia do modelowania ruchu i wykorzystania terenu [20, 77]. Współczesną tendencją jest również kojarzenie



modeli ruchu z możliwościami technicznymi ITS, co pozwala na bieżącą aktualizację niektórych danych i parametrów popytowych modeli ruchu oraz uwzględnienie dynamicznych zmian w warunkach ruchu, czyli zastąpienie modeli statycznych przez ich dynamiczne odpowiedniki (por. rozdz. 6.2.).

Konwencjonalna postać modelu czterostadiowego bazuje na sekwencji czterech niezależnych kroków, obejmujących: generację podróży, rozkład przestrzenny podróży, podział zadań przewozowych oraz rozkład ruchu na sieć. We wszystkich tych fazach rozważa się pojedyncze podróże oraz agregację różnych zachowań transportowych<sup>4</sup>. Na przestrzeni wielu lat wprowadzono w modelu wiele udoskończeń obejmujących przede wszystkim powiązanie poszczególnych kroków modelu oraz uwzględnienie różnych motywacji.

W każdym ze stadiów FSM podróże pochodzące z i prowadzące do określonego miejsca są zagregowane do rejonów komunikacyjnych. Uniemożliwia to szczegółową analizę przestrzenną w ramach pojedynczego rejonu, a model jest silnie uzależniony od lokalizacji centroidy oraz charakterystyki konektora (połączenia centroidy z modelem sieci transportowych). Ponadto agregacja do rejonów komunikacyjnych prowadzi do uproszczenia sieci transportowej, w której drogi lokalne są pomijane i zastępowane przez konektory powiązane z węzłami dróg wyższej kategorii. W związku z tym zauważalna jest korzystna tendencja do zwiększania liczby rejonów przy jednoczesnym zmniejszeniu ich powierzchni. Barię dla rozwijania takiego podejścia coraz częściej przestaje być moc obliczeniowa komputerów (wymagania względem mocy obliczeniowej wzrastają wraz z kwadratem liczby rejonów). Dążeniem modelującego pozostaje zrównoważony związek podziału na rejonu z modelowym uproszczeniem grafu sieci. Pożądana gęstość sieci wiąże się z zapewnieniem w modelu wszystkich dróg alternatywnych występujących w podróżach międzyrejonowych, a liczba i kształt rejonów - z minimalizacją wewnątrzrejonowych podróży niepieszych. Spełnienie obu tych kryteriów określić można jako związek zrównoważony.

W modelu aktywnościowym kluczowe jest założenie, że decyzje o wykonywanych podróżach są podyktowane zbiorem różnych działań kształtujących porządek dnia oraz organizację życia domowego i w związku z tym nie mogą być analizowane indywidualnie. Zatem proces podejmowania decyzji transportowych osób jest modelowany z uwzględnieniem kooperacji i planu dnia zbioru osób stanowiących gospodarstwo domowe.

Zwykle struktura całego modelu ABM opiera się na zagnieżdżonych modelach logitowych (ang. Nested Logit Models<sup>5</sup>) ułożonych w sposób hierarchiczny.

4 Za P.A. Steenbrinkiem [87] jest to dekompozycja funkcji celu modelu mikroekonomicznego maksymalizacji różnicy korzyści i kosztów (z podróży) w decyzji osoby sprowadzającą się do odpowiedzi na cztery fundamentalne pytania: czy podjąć podróż, dokąd, czym i którędy ją zrealizować (model FSM). W modelu ABM – podmiotem mikroekonomicznym jest gospodarstwo domowe. Podejmowane wybory w wyniku decyzji określonych zbiorowości podmiotów mikroekonomicznych określane bywają jako zachowania komunikacyjne a ich zdekomponowane rezultaty w całej zbiorowości (produkcja, więźba, podział modalny ruchu i jego rozkład w sieci) opisują strukturę popytu.

5 Model logitowy – model prawdopodobieństwa opisany funkcją logistyczną w postaci  $p_i = e^{z_i} / (1 + e^{z_i})$  gdzie  $z_i = \alpha_0 + \alpha_1 x_{i1} + \dots + \alpha_k x_{ik}$ , a zatem wartości teoretyczne należą do przedziału [0,1] dla wszystkich wartości  $z_i$ .

Na samej górze znajduje się model określający prawdopodobieństwo dostępu do samochodu i posiadania określonej liczby samochodów w gospodarstwie domowym (ang. Auto Availability Model). Na kolejnym poziomie znajduje się model głównej aktywności (ang. Primary Activity Model), który określa jedną z alternatywnych głównych aktywności tj. praca, nauka, zakupy, działalność inna inne poza domem oraz inna w domu. Dla aktywności poza domem określone są miejsca docelowe oraz główny sposób podróżowania. Miejsca docelowe są wyznaczone w oparciu o wybór spośród dostępnych alternatyw (rejonów komunikacyjnych). Wybór głównego sposobu podróżowania dla łańcucha podróży jest kombinacją wyrażonych przez podróżujących preferencji i wzajemnych uzgodnień pomiędzy osobami gospodarstwa domowego. W kolejnych podmodelach (fazach) wprowadza się informację na temat występowania punktów pośrednich w drodze z domu do pierwotnej lokalizacji (dot. głównej aktywności) i/lub z powrotem do domu. Dla każdego takiego miejsca przystankowego dodatkowy model określa funkcję oporu, poprzez dodanie tego przystanku do całego łańcucha podróży. Funkcja ta jest funkcją addytywną, na którą składają się elementy składowe stanowiące ogniwa łańcucha podróży (pojedyncze podróże), co prowadzi do wybrania sposobu dotarcia do punktu pośredniego. Gdy wszystkie ogniwa łańcucha podróży obejmujące główne aktywności dnia są określone, następuje ocena prawdopodobieństwa wystąpienia dodatkowych podróży. Jeśli zakłada się wystąpienie podróży, to dla każdej dodatkowej z nich wykonywana jest procedura analogiczna do wyżej opisanej.

Wielu badaczy na całym świecie, pracuje nad doskonaleniem obu podejść do modelowania ruchu. W związku z szeroko zakrojonymi w tej dziedzinie pracami, w rozdz. 5 opisano najbardziej istotne tendencje rozwojowe w obu nurtach. Wielu badaczy pracowało na przestrzeni lat nad rozwojem modelu czterostadiowego.

### 3. Problemy czterostadiowego modelowania dedykowanego

#### 3.1. *Kompleksowe badania ruchu (KBR)*

##### 3.1.1. *Uwaga ogólna*

Klasyczną podstawą do budowy dedykowanych modeli ruchu są kompleksowe badania ruchu, na podstawie których kalibruje się odwzorowania matematyczne modelu czterostadiowego. Znaczącym atrybutem takiego modelowania jest jego struktura motywacyjna, która identyfikowana jest w badaniach reprezentacyjnych podróży prowadzonych w KBR, zapewniając przez zróżnicowany dla kategorii motywacyjnych opór przestrzeni modelu grawitacyjnego dualną formułę kosztu [56] a przez związek zmiennych objaśniających produkcję ruchu możliwość prognozowania potoków ruchu w długich horyzontach czasu. Zarazem problemy z wiarygodnością kompleksowych badań ruchu są powszechnie znane i często poruszane [26, 67, 83, 90], dlatego poniżej zaprezentowano tylko wybrane zagadnienia istotne dla budowania modelu ruchu.

### 3.1.2. Zaniżona ruchliwość w badaniach zachowań komunikacyjnych

W ostatnim dziesięcioleciu jest wiele przykładów badań ankietowych gospodarstw domowych wykonywanych w ramach KBR w wyniku których wskaźniki ruchliwości okazały się zbyt niskie (Poznań, Płock, Sosnowiec, Warszawa, Wrocław). Syndromy i struktura zaniżenia widoczna jest w estymacji następujących cech aplikacji modelu:

- wypiętrzenia okresów międzyszczytowych w zmiennościach dobowych ruchu,
- zbyt niskich napełnieniach samochodów osobowych pojazdów,
- niedoszacowanych liczbach podróży w ruchu źródłowym poza obszar badań,
- zaniżonym udziałem taksówek w ruchu,

w stosunku do pomiarów i wywiadów prowadzonych w ramach KBR na ekranach i kordonach.

Jedną z głównych tego przyczyn jest zaniżona reprezentacja grupy osób i gospodarstw domowych bardziej mobilnych w wywiadach domowych. Udział w badaniach ankietowych jest dobrowolny a osoby mobilne i bardziej zamożne są mniej dostępne, wykazują mniej gotowości uczestnictwa i woli pełnego zaangażowania w przeprowadzenie wywiadu - wykonując więcej podróży łatwo pomijają opis niektórych z nich.

Znaczenie problemu obrazuje tab.1, w której zebrano dane o grupie najbardziej mobilnej na podstawie badań [5, 6, 7], przyjmując jako kryterium grupy wykonania pięciu lub więcej podróży w dobie.

Tabela 1. Wpływ grupy osób najbardziej mobilnych na wielkość ruchu

	Wrocław	Sosnowiec	Płock <sup>6</sup>
<b>Udział grupy ludności najbardziej mobilnej w podróżujących mieszkańcach ogółem</b>	2,8 %	4,6 %	13,9 %
<b>Udział podróży wykonywanych przez grupę bardziej mobilną w podróżach mieszkańców</b>	6,7 %	11,1 %	25,2 %

Chociaż grupa ta nie jest bardzo liczna (zarazem dość zróżnicowana) to jednak ma duży udział sięgający nawet do 25% w ogólnej produkcji ruchu. Na podstawie tabl. 1 można by przyjąć, że każdy 1% błędu w udziale grupy osób bardziej mobilnych to około 2% błędu w ogólnej liczbie podróży mieszkańców.

Warto zwrócić uwagę na ważny aspekt tego problemu. Zbyt niska ruchliwość wynikająca z badań wiąże się na ogół z niedoszacowaniem podróży fakultatywnych. Z natury rzeczy podróże fakultatywne wykonywane są w znacznym stopniu przez osoby bardziej aktywne, więc badania obarczone są znacznie silniej brakiem informacji o tych podróżach niż ma to miejsce w podróżach obowiązkowych. Oznacza to, iż dane do modelowania zawierają nie tylko błąd w ilości podróży, ale również w ich strukturze.

6 W badaniu dla Płocka [7] jako podróż piesza zaliczano już przejście powyżej 100m w przypadku dwóch pozostałych badań odległość ta wynosiła 500m. Odzwierciedla to udział podróży pieszych który w Płocku przekracza 40% a we Wrocławiu i Sosnowcu wynosi około 20%.

### *3.1.3. Problem niezgodności wyników badań z danymi statystycznymi*

W znanych przykładach kompleksowych badań ruchu, dobór próby badawczej wykonany był starannie. Odzwierciedlało się to zgodną z danymi GUS strukturą płci czy strukturą wieku w próbie reprezentacyjnej. Problemy pojawiają się, gdy porównujemy bardziej szczegółowe dane, nie mniej istotne dla budowy modelu ruchu.

Jednym z celów badań jest określenie zachowań komunikacyjnych w grupach społecznych o jednorodnych zachowaniach komunikacyjnych. Trudnością jest ustalenie struktury społecznej przy podziale na te grupy. Jedną z takich kwestii jest różnica pomiędzy dostępną liczbą miejsc nauki a liczbą studentów w statystycznej liczebności mieszkańców miasta oraz pozostających poza tą statystyką (studenci należą do najbardziej mobilnych grup społecznych). Jeszcze większym problemem jest brak zgodności statystyk z lokalizacją miejsc pracy w rejonach komunikacyjnych.

Kolejną znaczącą niezgodnością wyników badań z danymi statystycznymi jest wielkość wskaźnika motoryzacji. Z reguły wskaźnik motoryzacji uzyskany w badaniach jest mniejszy niż wskaźnik ustalany na podstawie danych urzędowych. W badaniach w Sosnowcu [6] różnica ta wynosiła 62%, natomiast w Płocku [7] przekroczyła 100%. Jako przyczynę tych błędów czasami podaje się nie ujawnioną liczbę posiadanych samochodów w badaniach reprezentacyjnych. Jest to możliwe w pewnym tylko stopniu z przyczyn opisanych w rozdziale wyżej (3.1.2.) Jednak z doświadczeń poznańskich narastanie różnicy między badaniami reprezentacyjnymi a statystykami urzędowymi ma swój początek z okresem zamiany podatku drogowego na akcyzę paliwową<sup>7</sup>.

Struktury o opisanym deficycie powinny być definiowane na podstawie stosunkowo wysokiej reprezentacji i przez odpowiednio ukierunkowane badania ankietowe.

## *3.2. Model ruchu*

### *3.2.1. Uwaga ogólna*

Błędy badań reprezentacyjnych, o ile nie zostaną skorygowane, obciążają model ruchu. Nie mniej w procesie modelowania spotykamy się z wieloma problemami i narażeni jesteśmy na szereg błędów w samym tym procesie. Podobnie jak w przypadku KBR problemy te są znane i zostały wielokrotnie opisane [26, 67, 90]. Poniżej prezentuje się najważniejsze.

<sup>7</sup> W badaniach KBR Poznań 2000 różnica taka nie występowała w stopniu istotnym (konsekwentnie egzekwowana przez Urząd Miasta opłata podatku drogowego powodowała szybkie wyrejestrowanie nieużytkowanego pojazdu). Dynamika krzywej wskaźnika w ujęciu wieloletnim zbliżała się zdecydowanie do poziomu nasycenia (przy 210 do około 250 poj./tys. mk.). Prawdopodobnie występujące w następnych latach różnice powodowane są przez:

- znacznie mniejszą dynamikę wyrejestrowywania od dynamiki rejestrowania pojazdów nabytych przy relatywnie wysokim udziale i obrocie rynkowym pojazdów używanych,
- nasycenie rynku znacząca liczba pojazdów wieloletnich zwiększające wymianę pojazdów,
- zaleganie samochodów nieużywanych w komisach samochodowych,
- ekspedycja pojazdów na rynki trzecie, chłonne na pojazdy używane w większym stopniu niż rynek lokalny.

### *3.2.2. Problem granic obszaru modelowania*

W praktyce modelowania stosujemy różne podejście do modelu ruchu wewnętrznego oraz modelu ruchu zewnętrznego. O ile model ruchu wewnętrznego budowany jest w czterostadiowym procesie w silnym związku z zagospodarowaniem przestrzeni w otoczeniu źródła i celu podróży, o tyle model dla ruchu zewnętrznego budowany jest w ograniczonym jednostronnie związku (wywiady na kordonie zewnętrznym). Także w ruchu zewnętrznym określenie podobnych związków jak w przypadku ruchu wewnętrznego (np. funkcja oporu przestrzeni) ograniczone jest możliwościami pozyskiwania i/lub agregacji danych.

Często, ze względów finansowych lub administracyjnych, miasta decydują się na ograniczenie modelu do własnego obszaru administrowania (w ostatnich latach we Wrocławiu, Szczecinie, Gdańsku czy Sosnowcu) chociaż znajdziemy przykłady w pełni aglomeracyjnych (Poznań) lub strukturalnie rozszerzonych w tym względzie modeli dla Warszawy czy Krakowa.

W dużych miastach problemy komunikacyjne przeniosły się z centrum na trasy wlotowe. Ruch zewnętrzny charakteryzuje się o 20 do 40% większą długością przeciętnego przejazdu w obszarze miasta od średniej długości przejazdu w ruchu wewnętrznym, zdecydowaną przewagą samochodów w łącznej liczbie zrealizowanych podróży oraz większą dynamiką wzrostu<sup>8</sup>. Rozwiązywanie problemów transportowych miast wobec związku rozkładu ruchu w systemie transportowym z sieciami tego systemu i zagospodarowaniem przestrzennym wymaga modelu o zasięgu wykraczającym zdecydowanie poza granice administracyjne miasta.

Model ruchu opisuje strukturę popytu zastaną w kompleksowych badaniach ruchu. Dynamika procesu urbanizacji oraz rozpiętość i potencjalnie odrębne funkcje zmienności rozpatrywanych czynników ruchotwórczych wpływają na słabo kontrolowaną modelem dewiację tej struktury. To wiąże się z ograniczeniem jego przydatności prognostycznej i mniej wiarygodną predykcją wpływu zmian w kosztach i warunkach ruchu na jego rozkład.

### *3.2.3. Problem struktur wielopoziomowych*

O potrzebie integracji struktur o różnych poziomach, może świadczyć przykład aglomeracyjnego modelu Poznania (obejmującego aglomerację w granicach okalającego miasto powiatu ziemskiego) z modelem krajowym dla ruchu drogowego. W wyniku zintegrowania obu poziomów modelu okazało się, że model krajowy zawyżał ruch na ekspresowej obwodnicy zachodniej aglomeracji o niemal 50% a model aglomeracyjny zaniżał ruch na ekspresowej obwodnicy wschodniej o prawie 70%. Zatem oba modele z osobna nie były wiarygodne dla istotnych, podobnych i wzajemnie pokrywanych komponentów sieciowych.

Problem kompatybilności modeli o różnych poziomach wzrasta wraz ze znaczeniem integracji sieci i układów transportowych w procesie optymalizacji trans-

8 Wg KBR – Poznań 2000 (realizowanych w obszarze aglomeracji) wykazano, że uwzględniając pracę transportową ruchu samochodowego co czwarty pojazd na ulicach miasta realizował podróż z przekroczeniem jego granicy. Także ujawniła się w tych badaniach zdecydowanie wyższa dynamika wzrostu ruchu na granicach miasta od wzrostu wielkości ruchu wewnętrznego

portu w sieciach wyższego rzędu. Koncepcję zarządzania modelami formowanymi w strukturze wielopoziomowej prezentował zespół Politechniki Gdańskiej w pracy [32], jednak problem kompatybilności nie jest wyłącznie funkcją zarządzania modelami, ale także funkcją zintegrowania baz danych, architektury modeli i standaryzacji ich komponentów.

W ostatnich latach pojawiły się próby integracji modelu krajowego (będącego w dyspozycji Biura Studiów GDDKiA) oraz modeli miejskich. Połączenie takie, co prawda rozwiązuje problem związany ze zbyt skromnie, z punktu widzenia niektórych zadań transportowych, wyznaczonym zasięgiem modelu miejskiego, ale jednocześnie wiąże się z koniecznością rozwiązania kompleksu zagadnień [8]. Są to:

- Niespójność podziału na rejonny komunikacyjne. Model krajowy oparty jest na rejonach - powiatach (z wyodrębnieniem większych miast). W sąsiedztwie miast (w obszarach aglomeracji) jest to podział zbyt ogólny.
- Niezgodność struktur motywacyjnych i rodzajowych ruchu powodująca trudności w wykonaniu wspólnych więźb.
- Różnice funkcji oporów odcinków w modelach kalibrowanych niezależnie (prowadzące na przykład do zjawiska nadmiernego wypierania lub zasysania ruchu tranzytowego przez obszar miasta).
- Niespójność zakresu i horyzontów czasowych prognoz.
- Różnice układu współrzędnych, w którym zostały wykonane numeryczne modele sieci.
- Niemożność dokonania podziału modalnego. Model krajowy to model i prognoza transportu indywidualnego (ruchu pojazdów) - nie uwzględnimy więc przełożeń modalnych i ich skutków w obrazie potoków ruchu.

#### 3.2.4. Problem szczegółowości odwzorowań modelowych ruchu

Pytanie jakie często stawiają sobie projektanci ITS: jakich narzędzi użyć do sprawdzenia efektywności projektowanych rozwiązań? Makromodele służące do rozkładu potoków samochodowych w większości nie pozwalają dokładnie odwzorować warunków ruchu samochodowego w stanach kongestii komunikacyjnej. Prawidłowe określenie czasu traconego, długości kolejek, blokowania odcinków i relacji wymaga stosowania mikromodeli, ale te z kolei nie uwzględniają zmian w potokach samochodowych kształtujących się w procesie rozkładu ruchu większej skali np. w skali miasta, poprzez proces optymalizacji prowadzony z wykorzystaniem mikromodelu.

Można przyjąć, że makromodel nie musi idealnie odwzorowywać warunków, w jakich ten ruch się odbywa. Głównym zadaniem tego modelu jest symulacja procesu decyzyjnego kierujących pojazdami w czterech stadiach modelu. Warunki ruchu są brane pod uwagę przez kierowców subiektywnie i w sposób niejednorodny. W efekcie natężenia potoków samochodowych generowanych w programach do rozkładu ruchu takich jak Visum czy Emme są relatywnie wiarygodne, niezależnie od stopnia ich odwzorowania.



W projektach ITS zmiany w natężeniach potoków ruchu nie są jednak jedyną miarą efektywności rozwiązań. Określenie z dużą dozą prawdopodobieństwa takich informacji, jak wielkość kolejek na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną lub pierwszeństwem ruchu, straty czasu pojazdów, średnie prędkości czyli szczegółowych informacji o warunkach ruchu jest domeną mikromodeli do symulacji ruchu takich jak modele w programie Vissim. Mikromodele potrafią odwzorować zachowania pojazdów w ruchu drogowym, dają więc dokładniejsze dane do analizy warunków ruchu, wymagają jednak znacznie więcej informacji o sieci drogowej. Niezbędny znaczny nakład pracy, w szczególności ten związany z identyfikacją planów sterowania, powoduje, że sieci, dla których wykonuje się mikrosymulacje, są z reguły segmentami dużo rozleglejszych sieci, dla których modelowany jest rozkład potoków ruchu. Dodatkowo – zmiany warunków ruchu w obszarze mikrosymulacji związane są ze zmianą warunków ruchu poza obszarem mikrosymulacji, powodowaną zmianą rozkładu potoków ruchu<sup>9</sup>. Respektowanie wzajemnych sprzężeń jest tym ważniejsze, im mniejszy jest obszar symulacji, więc nie da się uniknąć prawidłowej estymacji i aplikacji przepustowości skrzyżowań w całej sieci.

Zarówno wybór modelu jak i możliwość integracji modeli mikro i makro, stanowią problem, który musi być rozwiązywany indywidualnie w powiązaniu z przedmiotem badania do którego model chcemy wykorzystać i w związku z dostępnym ku temu oprogramowaniem. Wysoka pracochłonność badań mogłaby być znacznie zmniejszona w przypadku inwentaryzowania szczegółowych danych o sieci, skrzyżowaniach i planach sterowania w strukturach kompatybilnych z dyspozycyjnym modelem mikrosymulacyjnym, a wynikające z mikrosymulacji obliczenia przepustowości automatycznie wprowadzane byłyby do numerycznego modelu sieci. Jest to zarówno problem zarządzania modelami jak budowy i dostępu do odpowiednich interfejsów jak stosownej architektury ITS w tym komponencie.

## 4. Doświadczenia krajowe w aplikacjach modelowania syntetycznego

### 4.1. Uwagi ogólne

Idee modelowania syntetycznego wraz z procesem badań i aplikacji prowadzone w T.U. Drezno [15] znane były w Polsce i cytowane w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku i rozwijane do połowy lat osiemdziesiątych. W tym samym czasie pracowano nad modelami syntetycznymi dla mniejszych miast w USA (dokładnie „simplified” - tj uproszczonymi, [39]). Ze względów praktycznych szczególnie za-

<sup>9</sup> W mikromodelach nawet najmniejsze zmiany natężenia potoku ruchu potrafią spowodować zmianę wyników. Jeżeli w modelu aplikowana jest funkcja rozkładu ruchu z wlotów do obszaru symulacji (np. VISSIM) dzieje się na odwrót - niewielkie zmiany warunków ruchu potrafią spowodować znaczną zmianę w rozkładzie potoków. Znacznie utrudnia to proces kalibracji i weryfikacji modelu i nie oddaje rzeczywistości, w której zysk kilku do kilkudziesięciu nawet sekund nie będzie kalkulowany wobec relatywnie losowego rozkładu czasów przejazdu w wielokrotnie realizowanych kilkunastominutowych przejazdach na znacznie większym obszarze w stosunku do obszaru symulacji.

interesowanie tym kierunkiem badań dotyczyło miast małych i średnich<sup>10</sup>, realizowane w krakowskim oddziale ówczesnego Instytutu Kształtowania Środowiska (IKŚ, Friedberg, Gadomski, Goras E. i K. [25, 79, 80] oraz w Instytucie Inżynierii Lądowej Politechniki Poznańskiej (Cejrowski, Krych, Piotrowski [52, 54, 55, 63]).

W podsumowaniu opisanych niżej prób modelowania syntetycznego wymienić należy zastosowanie różnych poziomów agregacji danych – miasta i jego odpowiednio podzielonej strefy zewnętrznej (quasi rejonu) w badaniach poznańskich oraz miasta w badaniach krakowskich. Różny jest podmiot podejścia syntetycznego (w krakowskich – ruch ogółem, z dylematem ruchu zewnętrznego i podróży fakultatywnych, w poznańskich – wyłącznie ruch samochodowy z dylematem struktury modalnej i motywacyjnej). Jednak opis obu przypadków ilustruje możliwość syntezy dedykowanych badań empirycznych oparty na uogólnionych prawach mobilności.

#### 4.2. *Badania krakowskie*

Badacze krakowscy wprowadzili pojęcie modelowania syntetycznego. Na podstawie modeli dedykowanych w badanych miastach (do 200 tys. mieszkańców) między innymi przetestowali idee „ankiety 500”<sup>11</sup> oraz potwierdzili możliwość stosowania w nich rozkładu proporcjonalnego w ruchu wewnętrznym [25, 79, 80]<sup>12</sup>. Opracowano w IKŚ „syntetyczny system modelowania ruchu” uwzględniający cechy stabilne i zmienne miast. Syntetyczne modele generacji ruchu dotyczyły ruchu wewnętrznego, podkreślając potrzebę dedykowanego podejścia do ruchu zewnętrznego a po części podróży fakultatywnych. Opracowano też model udziału ruchu niepieszego w podróżach wewnątrzmiastowych i zasady wyznaczania podziału ruchu niepieszego, silnie uzależnione od wówczas niskich i silnie zróżnicowanych wskaźników motoryzacji. **Należy podkreślić, że zarówno ruch zewnętrzny jak w znacznym stopniu podróże fakultatywne uznano za cechy niestabilne wobec zastosowanych zmiennych objaśniających.** Określono, że ruchliwość ogólna mieszkańców, jako „cecha stała” wynosi od 1,4 do 1,7 podróży na mieszkańca w dobie i jego zmienność w zasadniczym stopniu zależy od udziału młodzieży uczącej się oraz powiązań z innymi miastami w dojazdach do pracy i miejsc nauki, czyli od znaczących w tej kwestii cech endo- i egzogennych miasta.

<sup>10</sup> Miasta te rzadko było stać na sfinansowanie kompleksowych badań ruchu.

<sup>11</sup> Uznano za wystarczającą podstawę dla budowania modelu podróży na podstawie wywiadów domowych w 500 gospodarstwach domowych, przyjmując, że w wyniku badania szacowany będzie potok ruchu równy 0,1 części potoku ogólnego, co odpowiadałoby podziałowi obszaru na 10 rejonów o równym potencjale produkcji ruchu [80].

<sup>12</sup> W uogólnionej formule funkcji oporu przestrzeni modelu grawitacyjnego rozkład proporcjonalny związany jest z pominięciem wpływu kosztu podróży na wybór jej rejonu docelowego (zerowa wartość wykładnika funkcji oporu). Jak wielkość miasta wpływa na wielkość zewnętrznego ruchu samochodowego ilustruje rys. 1.

### 4.3. *Badania poznańskie*

#### 4.3.1. *Uwagi ogólne*

Badania ruchu samochodowego prowadzone w Politechnice Poznańskiej w kilkunastu miastach średnich, pozwoliły na opublikowanie w 1985 roku modeli syntetycznych predykcji zewnętrznego docelowo – źródłowego ruchu samochodowego na ich granicach administracyjnych (Krych, [52]). Niezależnie opracowany został syntetyczny model użytkowania samochodów indywidualnych [63] oraz model predykcji udziału ruchu tranzytowego w ruchu zewnętrznym [54]. W 1999 roku ([55], rys. 1) zaprezentowano tezy dotyczące generalnej struktury rychliwości pojazdów indywidualnych oparte na wynikach cytowanych badań średnich miast, monitorowanych zmian w badaniach Poznania (1968, 1987, 1992, 1997) oraz przeprowadzonych w tym okresie badań kompleksowych w Krakowie, Łodzi i Warszawie.

#### 4.3.2. *Użytkowanie samochodu*

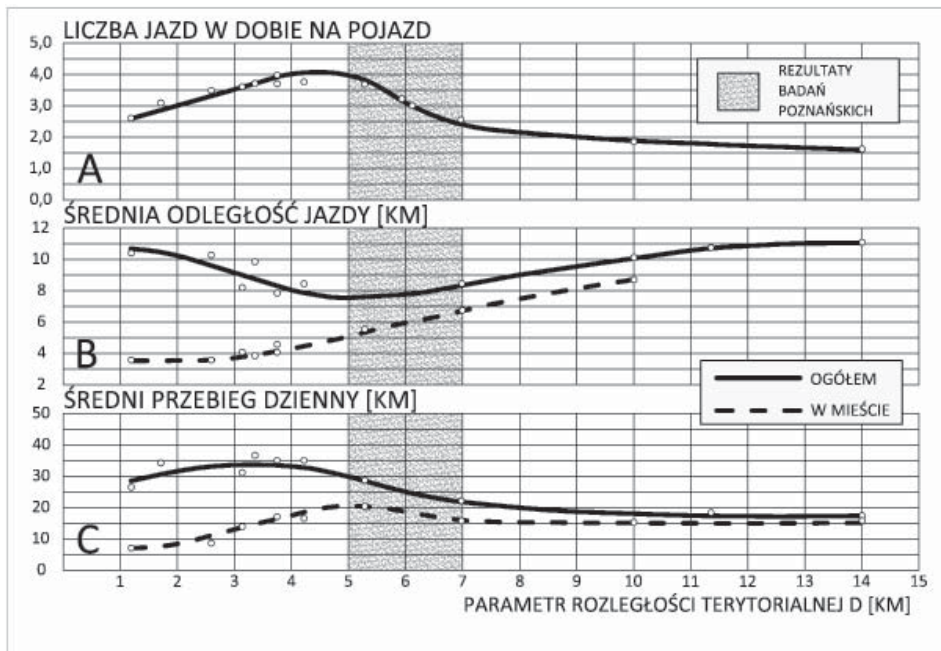
Mimo, iż cytowane wyżej badania ograniczają się do mobilności użytkowników samochodów, warte są szczególnej uwagi jako ilustracja idei modelowania syntetycznego opartego na prostych zmiennych objaśniających. Wg [55] liczba i średnia długość jazd (kosztu osiągnięcia celu) przeciętnego pojazdu utrzymywanego w obszarach administracyjnych jest funkcją wskaźnika  $D$  - promienia rozległości terytorialnej obszaru intensywnie zurbanizowanego w jego granicach, którego wartość odpowiada średniej geometrycznej wybranych osi rozpiętych pomiędzy granicami jego zasięgu. W zależności od rosnącego promienia  $D$  liczba jazd na pojazd w dobie podlega tendencji progresywnej do rosnącej wartości  $D$  do poziomu 4 – 5 km (poła tendencji optymalnej) oraz tendencji regresywnej dla  $D$  przekraczającego 5 km.

Objaśnienie powyższych uwarunkowań mobilności osadzone jest w ilościowych i jakościowych strukturalnie następujących fundamentalnych czynnikach ruchotwórczych:

- endogeniczna siła obszaru (praca transportowa w obszarze miasta) i egzogeniczna siła rynku (praca transportowa poza miastem – por. wykresy B i C na rys. 1),
- wpływu dostępności pieszej celów ruchu (regresywnie do wielkości miasta) i jakości transportu publicznego (rosnącego z wielkością miasta).
- kosztach ruchu, wyrażonych w pracy transportowej wynikającej z relacji do funkcji endogennych miasta (średnia odległość jazdy zbliżona jest w miastach najmniejszych do średniej długości jazdy w miastach największych, wchodząc w obszar minimum w polu tendencji optymalne – wykres C na rys. 1).

W polu tendencji optymalnej występują najniższe koszty użycia samochodu w podróży (najmniejsza średnia długość jazdy) przy malejącym z wzrostem wartości  $D$  wpływie i zapotrzebowaniu na funkcje egzogenne. Wśród badanych miast w granicach tych mieści się wyjątkowo rozległy Konin - rozdzielony szeroka doliną

Warty ( $D = 4,25$  km - w klasie tej mogą się mieścić nawet niektóre, stosunkowo zwarte miasta do 300 tys. mieszkańców<sup>13</sup>).



Rys. 1. Wpływ rozległości obszaru intensywnego zurbanizowania na użytkowanie samochodu

W polu tendencji regresywnej (miasta o zaludnieniu powyżej 0,5 mln mieszkańców) występuje początkowo silny spadek dziennej liczby jazd (dla  $D$  w granicach 5 do 7 km od niemal 4 do 2,5 jazd dziennie),<sup>14</sup> po czym dla  $D > 8$  km obserwuje się liniowy i łagodny regres 2,5 do asymptoty na poziomie 1,5 jazdy na pojazd w dobie. Pole tendencji regresywnej charakteryzuje rosnący koszt przejazdu samochodem wewnątrz obszaru w osiągnięciu korzyści z przejazdu (średnia długość podróży – por. wykres B, ponadto pewnie i wpływ zatłoczenie sieci na ruch wewnętrzny). Zarazem z wzrostem  $D$ , czyli obszaru intensywnej urbanizacji rośnie atrakcyjność i konkurencyjność transportu publicznego.

Dla miast średnich, leżących w polu tendencji progresywnej, liniowa zależność wskaźnika średniej liczby jazd na pojazd w dobie ( $X$ ) od promienia  $D$  (km), w korzystnych warunkach pogodowych przedstawia się jak niżej (wg [63]):

$$X - 2,386 + 0,347 \cdot D \quad (1)$$

13 W 1968 r. zbliżoną ruchliwość samochodu wykazały poznańskie badania ruchu przy promieniu  $D$  w granicach 5 km. W badaniach [63] wskaźnik motoryzacji oddziaływał w postaci funkcji nieliniowej jako trzeci, obok pogody, z istotnych czynników mobilności pojazdów. Wpływ motoryzacji wg tych funkcji asymptotycznie zanikał z chwilą osiągnięcia wskaźnika 100 do 130 poj./tys. mieszkańców.

14 Tendencja w tym zakresie poza miastami średnimi była monitorowana wyłącznie w Poznaniu, za to w rozległym okresie czasu z dynamiczną ekspansją urbanistyczną w granicach miasta w latach od 1968 do 1997 (zabudowa prawobrzeżnej części miasta i budowa północnego pasma osiedli mieszkaniowych).

Równanie (1) opisuje 97,8% występującej w eksperymencie zmienności ( $R^2$ )<sup>15</sup>.

#### 4.3.3. Ruch zewnętrzny

Zaproponowany w latach osiemdziesiątych matematyczny model ruchu zewnętrznego [52] ma strukturę warstwową, obejmując dziewięć modeli cząstkowych produkcji ruchu (tabl.2). Ruch docelowy kwantyfikowany jest do wlotów na podstawie ich obszarów wlotowych, natomiast model ruchu źródłowego prowadzony musi być dwuetapowo (produkcja i podział na obszary wlotowe). Ich uzupełnieniem jest model udziału ruchu tranzytowego dla poszczególnych wlotów [54] dopełniony natężeniem SDR lub pomiarem natężeń potoków ruchu na wlotach.

Tab. 2. Struktura warstwowego modelu syntetycznego docelowo - źródłowego ruchu zewnętrznego w miastach do 100 tys. mieszkańców [52]

	Obszar miasta – inne miasta		Obszar miasta – obszar nieurbanizowany		
			Rekreacja	Pozostałe cele	
Ruch źródłowy	Pojazdy osobowe	Pojazdy ciężarowe	Pojazdy osobowe	Pojazdy osobowe	Pojazdy ciężarowe
Ruch docelowy	Pojazdy osobowe	Pojazdy ciężarowe	-	Pojazdy osobowe	Pojazdy ciężarowe

W aplikacji modelu podstawową rolę odgrywa struktura zaludnienia w ekwidystantach jego środka komunikacyjnego<sup>16</sup>, zdefiniowanie zasięgu strefy aktywnej wokół miasta (obszaru nieurbanizowanego w zasięgu 30 do 80 km w zależności od wielkości miasta), podział na obszary wlotowe (obszaru ciężenia do miasta przez poszczególne wloty).

Główna idea modeli cząstkowych sprowadza się do dwóch zmiennych objaśniających – mocy ciężarów i ograniczeń funkcji centralnych miasta. Moc ciężarów zasadza się na strukturze modelu grawitacji miejskich ośrodków dominujących w otoczeniu obszaru analizy (wpływając na koncentrację potoków ruchu między miastami) a stopień funkcji centralnych określa ich konkurencyjny wpływ na ruch powstający w otoczeniu tych miast (funkcja potencjału). Obie te cechy dychotomicznie oddziałują na ruch zewnętrzny miasta a kompilacja obu cech stanowi ograniczenie reprezentatywności opisywanych modeli do zbioru około stu miast polskich o wyraźnych funkcjach centralnych.

Zakres danych potrzebnych dla zastosowaniu modeli obejmował:

- szczegółowe rozmieszczenie ludności w zasięgu 30 km od miasta,
- liczbę ludności miast w zasięgu 80 km,
- wskaźniki motoryzacji dla w/w miast i obszarów wiejskich (prawdopodobnie czynnik o silnie zanikającym znaczeniu - przynajmniej jego dokładności),

15 Pełne równanie obejmuje o tej charakterystyce obejmuje także nie cytowane we wzorze (1) zmienne objaśniające: wskaźnik motoryzacji (którego wpływ w aktualnych warunkach spada do zera - por. przypis 20) oraz uwzględniono średnie warunki pogodowe, określające stabilność wskaźnika ruchliwości X w granicach +/- 0,087 jazd na pojazd w dobie.

16 Tu: izolinie łączące na mapie punkty o jednakowej odległości od środka danego obszaru o gęstości 5 km.

- kilka szczegółowych danych o ośrodkach rekreacyjnych w zasięgu do 30 km od miasta.

Podkreślając konieczność zaktualizowania współczynników równań w modelach cząstkowych struktura proponowanego modelu w współczesnych warunkach technologicznych może się sprowadzić do odpowiedniego posługiwania się systemami mapowymi wspomaganymi odpowiednim interfejsem użytkownika.

Model określający udział ruchu tranzytowego na wlocie [54] jest bardziej uniwersalny – dla dowolnej wielkości miasta, ograniczony jedynie do ośrodków miejskich o funkcjach centralnych (poza aglomeracjami). Zawiera on macierz prostokątną (4x5) przynależności czterech funkcji, zbudowaną na czterech kategoriach wielkości miasta analizy i pięciu kategoriach wielkości miast, z których największe na analizowanym połączeniu drogowym wyznacza funkcję wlotu uzależnioną równocześnie od wyżej określonej kategorii wielkości miasta analizy<sup>17</sup>.

## 5. Kierunki rozwoju modelowania ruchu w badaniach teoretycznych

### 5.1. *Rozwój modelu czterostadiowego*

#### 5.1.1. *Uwagi ogólne*

W ciągu kilkudziesięciu lat nastąpił istotny rozwój modelowania czterostadiowego. Pryncypia pozostały takie same, natomiast można zauważyć, że rozwój dotyczył dwóch głównych nurtów – doskonalenia podmodeli w ramach poszczególnych faz oraz podejmowania próby integracji faz. Poniżej przedstawiono trendy rozwojowe w obu nurtach.

#### 5.1.2. *Generacja podróży*

W fazie generacji podróży wyróżnić można następujące tendencje rozwojowe:

- Próbę zwiększenia dokładności modelu generacji ruchu dzięki gromadzeniu coraz większej bazy danych wejściowych o zagospodarowaniu przestrzennym [31, 84, 93]. W miarę wzrostu dostępności danych możliwe jest poszerzanie modeli regresji liniowej o kolejne składniki i dopasowanie jej do wyników ankiet.
- Przejście do modeli niezagregowanych dzięki podziałowi popytu na klasy już na poziomie generacji podróży. Zamiast skalarnego opisu potencjału ruchotwórczego otrzymuje się wówczas osobny potencjał dla każdej z klas, co pozwala lepiej opisać generację ruchu dla różnych grup podróżnych [12, 37, 76]. Szczególną formą takiego podejścia jest klasyfikacja krzyżowa (model kategorii [65]).
- Wykorzystanie wskaźnika dostępności transportowej do wyznaczania potencjału ruchotwórczego - liczba podróży jest zależna od możliwości ich wykony-

17 Aglomeracja, miasta pow. 100 tys., miasta 20 do 100 tys., 5 do 20 tys. mieszkańców a dodatkowo – gdy na połączeniu z wlotem brak jest miast powyżej 5 tys. mieszkańców.



wania (wyrażonej w atrakcji okolicznych rejonów). Wówczas potencjał ruchotwórczy de facto zależy od rozkładu przestrzennego ruchu [24, 40, 70].

### 5.1.3. Wieżby ruchu

W rozkładzie przestrzennym podróży wyróżnić można następujące tendencje rozwojowe:

- Wykorzystanie deterministycznych modeli optymalizacyjnych jako metod transformacji tradycyjnego modelu grawitacyjnego<sup>18</sup> i powiązanie ich z metodami stochastycznymi, np. modelem logitowym [13, 18, 70, 72, 88, 93]. Zaznacza się tu jednak, że model logitowy jest znacznie trudniejszy do skalibrowania [2, 28].
- Uwzględnienie wielokryterialnego charakteru wyboru celu podróży. Udowodnia się, że wybór celów podróży – zwłaszcza fakultatywnych nie zależy wyłącznie od kosztów podróży, ale od szeregu innych czynników takich jak np. czas podróży, komfort podróży, dostępność transportowa w systemie transportu, itp. [2, 18, 73].
- Wykorzystanie alternatywnego, w stosunku do modelu grawitacyjnego, modelu alokacji pośrednich możliwości, zakładającego, że liczba osób podróżujących do określonego rejonu komunikacyjnego jest wprost proporcjonalna do liczby okazji w tym rejonie a odwrotnie proporcjonalna do liczby okazji możliwych do osiągnięcia w rejonach pośrednich (bliższych, kosztowo tańszych, itp.) [89, 97].

### 5.1.4. Podział zadań przewozowych

Zasadnicze kierunki rozwoju modelu podziału zadań przewozowych, obejmują:

- Dokładniejsze kalibrowanie modeli logitowych oparte o coraz precyzyjniejsze sposoby weryfikowania deklarowanych względem faktycznie podejmowanych wyborów (ang. Stated Preference i Reveled Preference) oraz wykorzystanie pomiaru rzeczywistych liczb podróży w sieci (np. karty miejskie takie jak Oyster, pomiary natężeń z systemów ITS) [2, 3, 29, 38, 68, 70, 71, 74, 96].
- Wykorzystanie modeli wielokryterialnych wykraczających poza zagregowane parametry składające się na uogólniony koszt podróży (czasy przejazdu, czasy poszukiwania miejsca parkingowego, prawdopodobieństwo miejsca siedzącego, niezawodność, komfort, czas stania w korku, itp.) dzięki czemu uzyskuje się lepsze odwzorowanie realnie dokonywanych wyborów [30, 60, 61, 94].
- Agregację według kategorii osób podróżujących ze względu na ich różne cechy (wiek, status materialny, przynależność społeczną, zawodową itp.). Taka dezagregacja pozwala na uwzględnieniu w modelowaniu celów podró-

<sup>18</sup> Model grawitacyjny to najbardziej powszechnie stosowany model rozkładu przestrzennego podróży, który oparty jest na II zasadzie Newtona (między dowolną parą ciał posiadających masy pojawia się siła przyciągająca, która działa na linii łączącej ich środki mas, a jej wartość rośnie z iloczynem ich mas i maleje z kwadratem odległości). Przez analogię - model grawitacyjny określa proporcjonalną zależność natężenia ruchu między dwoma rejonami od ich potencjału (produkcji i atrakcji ruchu – odpowiadające masom) oraz odwrotnie proporcjonalną do kosztu transportu wyrażoną funkcją oporu przestrzeni.

ży, zależności pomiędzy kategorią podróży a podejmowanych przez nich decyzjami.

#### *5.1.5. Dodatkowy piąty krok – wybór momentu rozpoczęcia podróży*

W klasycznym czterostadiowym ujęciu modelowania ruchu pojawia się często postulat stworzenia dodatkowego kroku, w którym czas rozpoczynania podróży nie jest ustalony w sposób deterministyczny, ale jest wynikiem modelowania o charakterze stochastycznym. Pozwala to uchwycić zjawisko rozlewania się szczytów komunikacyjnych w następstwie których użytkownicy sieci zmieniają godziny podróży. W klasycznym modelu czterostadiowym zachowania takie są pomijane w formule udziału godziny szczytu wynikającej z badań opisowego stanu ruchu.

W modelach uwzględniających ten krok określaną jest wielokryterialna funkcja celu, w której kryteriami mogą być punktualność, komfort podróży itp. W zależności od przyjętej wagi poszczególnych parametrów i charakteru podróży (fakultatywna, obligatoryjna) uzyskuje się wybór kryteriów bardziej i mniej preferowanych przez podróżnego, np. lepszy poziom wskaźnika punktualności przy zwiększeniu kosztów albo minimalizacja kosztów kosztem punktualności. Na podstawie analiz strat i zysków (ang. Trade-off) pomiędzy tymi kryteriami tworzone są modele wyboru czasu rozpoczęcia podróży, np. model logitowy [73, 82, 93].

#### *5.1.6. Powiązanie etapów modelu czterostadiowego*

Podstawowym zarzutem do modelu czterostadiowego jest brak powiązania pomiędzy jego poszczególnymi krokami. Stąd podejmowane badania zmierzają do powiązania między sobą czterech kroków modelu. Można zaobserwować następujące sposoby integracji:

- Powiązanie generacji ruchu i rozkładu przestrzennego podróży dzięki dodatkowemu uwzględnieniu (oprócz tradycyjnych zmiennych objaśniających) dostępności transportowej rejonów (funkcja oporu przestrzeni używana zazwyczaj w kroku drugim). Dzięki temu wielkość potoku zależy także od możliwości wykonywania podróży [2, 86, 96].
- Powiązanie podziału zadań przewozowych z rozkładem przestrzennym ruchu dzięki wykorzystaniu idei pierwotnego i wtórnego podziału zadań przewozowych. Dzięki temu rozkład przestrzenny podróży uwzględnia stronę popytową (np. rozkład dla rejonów o bogatej ofercie transportu publicznego jest inny niż dla podobnych rejonów, ale ze słabo rozwiniętą ofertą komunikacji zbiorowej) [4].
- Powiązanie rozkładu ruchu na sieć z podziałem zadań przewozowych. – osiągnięte dzięki iteracyjnemu zastosowaniu pętli, w której podział modalny jest uzależniony m.in. od czasów przejazdu, które wynikają z kolejnych rozkładów ruchu zależnych od natężeń, które z kolei zależą od podziału modalnego. Po kilkukrotnym wykonaniu takiej pętli osiąga się stabilizację podziału zadań przewozowych [18, 64, 85].

- Powiązanie generacji ruchu, rozkładu przestrzennego i podziału zadań przewozowych – oparte na modelu logitowym, wykorzystującym formułę Bayesa (ang. Bayesian approach - BIC<sup>19</sup>) z kryterium informacji o korzyściach w ogólnym algorytmie pożądanego rozwiązania układu równań nieliniowych (podejście o nazwie EVA, opracowane przez Lhose z zesp., 1997 [66]).

### 5.2. *Rozwój modelu aktywnościowego*

Rozwój modelu aktywnościowego koncentruje się na lepszym zrozumieniu procesu dokonywania wyborów i podejmowania decyzji w gospodarstwach domowych oraz ich wpływu na zachowania transportowe. Rozwój modeli aktywnościowych w ostatnich latach skupiał się na [1, 9, 10, 11, 14, 17, 22, 33, 41, 42, 46, 47, 49, 50, 51, 75, 81, 91, 95, 98]:

- Znalezieniu sposobów na modelowanie interakcji pomiędzy zachowaniami osób indywidualnych w ramach gospodarstwa domowego, co pozwala na uwzględnienie:
- wspólnego udziału kilku osób w danej aktywności np. w zakupach, w rekreacji,
- podróży wspólnych, np. podwożenia domowników do celu podróży (dzieci do szkoły, na zajęcia sportowe itp.),
- dzielenia się samochodem osobowym w gospodarstwie domowym, co dotyczy szczególnie rodzin z przynajmniej dwoma osobami posiadającymi prawo jazdy i jeden samochód w rodzinie,
- Analizie substytucyjności aktywności podejmowanych w domu i poza domem. Aktywności podejmowane w domu i poza domem mają diametralnie różne implikacje – pierwsze nie skutkują podróżą (dla osoby, która jest już w domu), podczas gdy te drugie wymagają jej wykonania. W związku z tym decyzje o aktywnościach podejmowanych w domu i poza domem wpływają na generowanie podróży [41]. Zrozumienie tej substytucyjności jest ważne, szczególnie z uwagi na sytuację, gdy nastąpił wyraźny wzrost aktywności związanych z rozrywką wykonywanych w domu (praktycznie nieograniczony dostęp do filmów, rozwój multimediiów, powszechny dostęp do internetu, gier video itp.). Tematykę tę podejmują prace R. Kitamury i innych [49], M. Kraana [51] oraz C. Bhatya [9],
- Wyborze czasowej jednostki analizy podejmowanych aktywności z uwzględnieniem odrębności zależnych od dni tygodnia. Badania skoncentrowane się na prostej agregacji miar zachowań związanych z aktywnościami (częstotliwość podróży, liczba, rodzaj i czas trwania przerw w podróżach) wskazują na istotne różnice pod tym względem w ciągu całego tygodnia [42, 75].

---

19 Kryterium wyboru modelu wśród skończonego zbioru modeli. Opiera się, w części, na funkcji prawdopodobieństwa i jest ściśle związana z kryterium informacji Akaike (AIC) - miarą względnej dobroci dopasowania danego modelu statystycznego.

## 6. Kierunki rozwoju w zastosowaniach praktycznych

### 6.1. Uwagi ogólne

Czy żyjemy nadal w czasach tradycyjnych planów zagospodarowania przestrzennego aktualizowanych co 5 lub co 10 lat? Czy nadal zadowolamy się kontrolowaniem sygnalizacji w sposób stały, w dni robocze i weekendy, w podziale na godziny normalne i godziny szczytu?

Transformacja społeczeństwa przemysłowego w społeczeństwo usługowe powoduje znaczące zmiany w strukturach mobilności. Zamiast regularnych codziennych tras do zakładu pracy, gospodarka oparta na usługach wymaga dużo więcej elastyczności w zachowaniach związanych z mobilnością. Tym dynamicznym przemianom towarzyszą ograniczenia w rozwoju infrastruktury w czasie i w przestrzeni. Struktury zabudowy w Europie nie pozwalają już na swobodną rozbudowę sieci transportowych. W wielu miejscach doszliśmy do granic rozwoju infrastruktury. Często brakuje miejsca nawet na dodatkowy pas ruchu. Tempo wzrostu ruchu drogowego coraz częściej wyprzedza tempo rozwoju infrastruktury.

Nie sprawdzają się już stare dogmaty, według których problemy komunikacyjne rozwiązywano prostą rozbudową infrastruktury. Podążanie drogą tradycyjnych rozwiązań przypomina wyścig, w którym biegniemy bez przerwy, każdego dnia, i nagle zdajemy sobie sprawę, że zamiast przybliżyć się do mety cały czas się od niej oddalamy.

Gdzie szukać zatem nowego podejścia do rozwiązywania w skuteczny i efektywny sposób naszych wyzwań komunikacyjnych? Aktualna sytuacja w ruchu drogowym wymaga inteligentnych systemów sterowania ruchem oraz nowych sposobów zarządzania. Pierwsze kroki prowadzą we właściwym kierunku. Klasyczne struktury z wyodrębnionymi jednostkami np. wydziały ruchu drogowego w zarządach dróg czy działy planowania transportu muszą się otworzyć na wszystkie aspekty zagadnienia i zintegrować swoje działania wnosząc wkład w opracowywanie inteligentnych, multimodalnych rozwiązań komunikacyjnych. Zamiast tradycyjnych ram czasowych działania w projektach infrastrukturalnych, nierzadko wynoszących ponad 10 lat (np. od zatwierdzenia pierwszego planu do otwarcia nowej drogi), potrzebujemy ciągle lepszych rozwiązań bieżących - w czasie rzeczywistym.

Co zmiany te oznaczają dla stosowanych narzędzi informatycznych? W jakim stopniu oprogramowanie do planowania transportu zapewni nam odpowiedź na te wyzwania (patrz 6.2.)? Czy narzędzia do planowania są w stanie wygenerować odpowiednie rozwiązania dla wyzwań związanych z ITS (patrz 6.3.)?

### 6.2. Oprogramowanie modelowania ruchu

Za najbardziej istotne ze względów praktycznych oczekiwania adresowane wobec rozwoju oprogramowania uznać należy:

- A. Wsparcie i integracja z instrumentami ITS i innym instrumentami monitorowania i zarządzania ruchem (w tym z bazą planów sterowania, systemami operacyjnymi zarządzania ruchem drogowym i transportem publicznym).

- B. Integracja makro, mezo i mikromodelowania w poziomach symulacji oraz w mikromodelowania na poziomach zarządzania sieciami.
- C. Operowanie dostępem i wspomaganie analizy baz danych, z danymi mapowymi włącznie.
- D. Zaawansowane symulacje i możliwości optymalizacji transportu publicznego, modalnego podziału ruchu oraz uwzględnienie transportu ładunków (logistyka miejska).
- E. Rynkowe i interaktywne<sup>20</sup> upowszechnienie produktu i rozwój zintegrowanych z nim nowych aplikacji.

Dla potrzeb Departamentu Transportu Abu Dhabi w 2010 r. konsorcjum Steer Davies and Glave i Mott MacDonald wykonało analizę czterech spośród pięciu opisanych niżej wyselekcjonowanych pakietów oprogramowania procesu modelowania i prognozowania ruchu. Biorąc pod uwagę 15 kryteriów funkcjonalności ważonych w skali 1 do 5 oceną 0 do 10 punktów uzyskane poziomy funkcjonalności wahały się od 88% (TransCad) przez 94% (EMMA) i 97% (VISUM) do 100% (licząc maksymalną liczbę punktów pozyskanych przez CUBE). Biorąc pod uwagę koszt trzech licencji TransCad osiągał 22% ceny najdroższego wśród nich pakietu VISUM (100%) (za [100]). Dodając do powyższych czterech hiszpański program AIMSUN w jego najnowszej mutacji, można powiedzieć, że wyznaczają one obecnie najwyższy poziom i trendy w rozwoju oprogramowania.

Produkt firmy Citilabs - CUBE – jest obecnie najbardziej rozpowszechniony na świecie. Zapewnia, jako jedyny, możliwość pracy w chmurze<sup>21</sup> i pełną integrację z danymi GIS. Jako komponent pełnego pakietu daje możliwość integracji modeli zagospodarowania przestrzennego z modelem transportowym. Uwzględnienia wzrost ekonomiczny, dynamikę zagospodarowania i zmiany zachowań komunikacyjnych. Zapewnia kompleksowe środowisko do modelowania ruchu i przewozu ładunków. Jest zintegrowany z dostawcą danych o pozycji telefonów komórkowych<sup>22</sup>.

EMME - produkt kanadyjskiej firmy INRO. W najnowszej wersji (EMME/3) posiada bardzo dobre atrybuty w modelowaniu sieci i rozkładu potoków w transporcie publicznym (np. wybór wiązki ścieżek). Zawiera też moduły dla rozkładu dynamicznego oraz wsparcie multimodalności. Możliwość dedykowanie różnych opcji modelowania (w tym własnych, włącznie z ich badaniem) ciągle pozostaje najsilniejszym atutem tego pakietu wobec pozostałych.

---

20 Produkty muszą być wzbogacane w oparciu o zachodzące zmiany i pojawiające się nowe wyzwania. Jeśli producent oprogramowania nie otrzymuje informacji zwrotnej z rynku np. od swoich klientów a ich użytkownicy, operatorzy będą pracować zamknięci w swoich informatycznych wieżach, rozwój okaże się ślepią ulicą prowadzącą nieuchronnie do wycofania obu partnerów z rynku.

21 Ogólnie - w rozumieniu korzystania, pozyskiwania danych, raportów, całych aplikacji z sieci serwerów, ogólnie dostępnych lub indywidualnie opłacanych stosownie do użycia. Zapewnia to niemal nieskończona moc obliczeniową, zbędność instalacji aplikacji na własnym dysku i serwerze, zdalny dostęp dla każdego z każdego miejsca w sieci info, pozyskiwanie i opłacanie aplikacji doraźnie potrzebnych, możliwość sieciowego zarządzania dużymi zbiorami danych i zdalnej ich wymiany. Jest to nie bez znaczenia dla organizacji i wydajności zespołów współpracujących w sieci (por. Cluster Cube, technologia Citilabs).

22 Specyfiką amerykańską jest możliwość przechowywania danych użytkownika przez pięć minut (za [59]). Umożliwia to, dzięki atrybutom użytkownika głębsze wykorzystanie danych z pozycjonowania telefonów.

TransCad amerykańskiej firmy Caliper posiada pełną integrację ze środowiskiem GIS i bazami danych NAVTEQ, narzędzia dedykowane do logistyki miejskiej z modułem przewozu ładunków i modelem komiwojażera, wspomaganie m.in. modelowania węzłów i przetwarzania danych ankietowych. Chyba najlepiej wśród wymienionych wykorzystuje SIP.

AIMSUN (firma TSS z Barcelony, aktualnie ponad 2,5 tys. użytkowników w 65 krajach). Wyróżnia się pełną integracją podejścia mikro, mezo i makro w jednym modelu, w jednej bazie danych i w jednym pliku. Jako jedyny ma równoczesną możliwość modelowania hybrydowego (np. miasto – makro, śródmieście – mezo, wybrany obszar – mikro) opierając się na zaawansowanym, mikrosymulacyjnym modelu traffic flow. Uwzględnia model zachowania kierowcy i modeluje ruch pieszy w ruchu drogowym oraz związany z pojazdami transportu publicznego. Dedykowany do współpracy z komponentami ITS wykonuje m.in. prognozy krótkoterminowe, uwzględnia ich działanie w sieciach, oferuje interfejsy współpracujące ze sterownikami sygnalizacji świetlnej.

VISUM – produkt PTV Group, wyróżnia szerokość oferty pakietu. Najlepiej wśród opisywanych ujmuje transport publiczny, uwzględniając dodatkowo oprogramowanie dla zarządzania i organizacji ruchu w transporcie publicznym. Pakiet PTV Vision obejmuje także logistykę, mikrosymulację i prognozowanie ruchu on-line. W procesie mikrosymulacji (VISSIM) uwzględnia się czasy obsługi przystanków i/lub liczbę pasażerów w pojeździe i wymianie. VISUM ma dużą potencję modelowania wielkich sieci i ruchu w dużych obszarach - stosowany jest w modelach krajowych a nawet kontynentalnych. Jego rozwój, jako najbardziej rozpowszechnionego i znanego nam produktu na krajowym rynku (także obecnego w około setce krajów na świecie), wart jest bliższego opisanie. Jednym z podstawowych jest uzupełnianie oprogramowania pakietu do poziomów formujących środowisko zarządzania ruchem drogowym, zarządzania transportem publicznym i planowania systemów transportu na różnych szczeblach (kraj, region, miasto). Umożliwia to coraz lepszą integrację tych warstw i poziomów na bazie wymiany i przetwarzania danych. PTV Group łatwo wchodzi w współpracę z firmami innowacyjnymi tworząc nowe, integralne aplikacje (por. rozdz. 6.2.2. lub inkorporowany program amerykańskiej firmy PTV-VISTRO). PTV VISTRO - wypełnia lukę pomiędzy modelowaniem ruchu (VISUM) a symulacją wyprowadzając z geometrii ulic i planów sterowania wartości przepustowości do poziomu makrosymulacji.

Niektóre produkty koncentrują się na planowaniu w skali makro (np. EMME, TransCad), a inne w skali mikro (AIMSUN, pominięty wyżej PARAMICS). Tyłko kilka produktów rozwija się w kierunku zintegrowanych pakietów oprogramowania. PTV rozpoczął od PTV Vision, z którym następnie zintegrowano PTV Visum i PTV Vissim oparte na standardowym modelu danych o ruchu drogowym. CUBE poszedł w jego ślady integrując różne istniejące linie produktów. AIMSUN w zasadzie nie uwzględnia transportu publicznego, poza dedykowaniem marszrut i tabeli rozkładu jazd w ruchu miejskim. Dość ograniczone w tym względzie pozostają także możliwości obu programów amerykańskich, chociaż pracujący w chmurze. CUBE zawiera spory potencjał aplikacji własnych programów.



W możliwościach mikrosymulacji można mieć również zastrzeżenia dla stosowanych algorytmów, biorąc pod uwagę różne uwarunkowania prawne jak i to, że amerykańskie sterowanie ruchem jest mniej dynamiczne od metod europejskich. Dodatkowo w warunkach polskich przejście automatyczne od zinventoryzowanych lub optymalizowanych planów sterowania do poziomu przepustowości w poziomie makrosymulacji wymagało by wprowadzenia coraz bardziej wymaganej w kraju rodzimej instrukcji w miejsce amerykańskiej metody HCM. Nieco bliższe do osiągnięcia wydaje się to w formule PTV VISTRO.

### 6.3. Wykorzystanie komponentów ITS

#### 6.3.1. Pomiarów potoków i warunków ruchu

W obecnym stanie systemów detekcji automatycznie pozyskiwane dane mają ograniczoną przydatność w modelowaniu czterostadiowym, jeżeli nie zarzucić wsparcia tych modeli ich głównym atutem - strukturami motywacyjnymi i modalnymi. Systemy te są nieźle zaawansowane w detekcji ruchu samochodowego i wykorzystaniu dla celów adaptacji ruchu i obiektów sterowania. Przy powszechnej już roli takich automatów w zarządzaniu ruchem ulicznym, stosunkowo słabo zaawansowane są systemy monitorowania napełnień w środkach transportu publicznego<sup>23</sup>. Nawet w okolicznościach przewidywanego rozwoju różnych sposobów identyfikacji niektórych elementów podróży (np. pozycjonowanie telefonów komórkowych) możemy mówić o częściowej substytucji ręcznych pomiarów i badań reprezentacyjnych, stanowiących bazę weryfikacji i aktualizacji modelu czterostadiowego. W przypadku tego ostatniego znacznie większych korzyści należałoby natomiast upatrywać w integracji baz danych o ruchu pozyskiwanych w sposób ciągły do walidacji i ewaluacji procesów a danych o warunkach ruchu do modelowania atrybutów obiektów w sieciach numerycznych. Jednym z niezbędnych działań w tym kierunku jest konieczność sprzężenia procesu planowania rozwoju sieci i procesu zarządzania ruchem w ramach ITS, zaś w związku z tym odpowiednich interfejsów dla odpowiedniej archiwizacji i stosownej możliwości analizy danych (por. [34]). Zacytować warto jednak fundamentalne pytanie: „czy klasyczne pojęcie modelu transportowego będzie dalej adekwatne dla narzędzia operującego na rzeczywistych danych ruchowych o podróżach?” (cyt. Kucharski, [59]).

Ten dylemat ma kluczowe znaczenie zarówno dla idei rozwoju modelowania podróży jak i otwarcia na ten „planistyczny” aspekt wykorzystania architektury systemów ITS. Zwracając uwagę na możliwość pozycjonowania dość powszechnie posiadanych telefonów mobilnych (por. koncepcja FCD<sup>24</sup> [59]) w aplikacjach ITS dominować winny rozwiązania oparte na mesh’owych sieciach komunikacji z komplementarną gęstością stacji telefonii komórkowej i otwartych platformach informatycznych. Odwrotnie – wraz z koniecznością ochrony danych osobowych

23 Por. analizę możliwości (Dybic, 2011, [19])

24 Cellular Floating Date

optymalizacja (planowanie) zarówno struktur użytkowania terenów jak sieci i układów transportowych czy np. prowadzenie polityki transportowej i zarządzania popytem, wymagać będą zastosowania odpowiednich i spójnych (jak np. dla czasoprzestrzeni typu STC<sup>25</sup>) modeli matematycznych silnie związanych z ogólną teorią mobilności.

ITS to nie tylko optymalizacja kontroli sygnalizacji. ITS oznacza przede wszystkim integrację danych z różnych dziedzin, które muszą zostać skompilowane i poddane wspólnej ocenie. ITS można z jednej strony opisać jako podejście do zarządzania ruchem drogowym w mieście, w regionie, nawet w kraju, jednakże ITS należy postrzegać także jako instrument podejmowania decyzji urbanistycznych, narzędzie do stosowania nie tylko w perspektywie krótkoterminowej (kwestie operacyjne), ale także wspierające podejmowanie decyzji w perspektywie średnio- i długoterminowej (zagadnienia konceptualne i strategiczne). ITS to także rewolucyjne wspomaganie transportu publicznego. Jak pokazują to wcześniejsze projekty ITS, Inteligentne Systemy Transportowe obejmują znacznie więcej zagadnień do praktycznego rozwiązania niż tylko same kwestie transportowe. To znacznie więcej niż tylko rozwiązanie problemów infrastrukturalnych (jak np. okablowanie komunikacyjne) – to także interakcja pomiędzy różnymi jednostkami, wymiana informacji na bazie współpracy między wieloma partnerami (np. detekcja na bazie FCD) i odmienne od konwencjonalnych sposoby zarządzania transportem, miastem i jego przestrzenią.

### 6.3.2. Modele ruchu on-line

Dychotomia, jaka panowała od połowy 20-go wieku w zakresie modeli ruchu dzieląc je na modele mikro i makro, musiała zostać przezwyciężona wraz z rozwojem dynamicznego zarządzania ruchem w ramach systemów ITS. Podstawowym zadaniem, jakie ma do spełnienia model ruchu w tych systemach, jest predykcja krótkookresowa on-line, której nie mogą zapewnić modele mikro, gdyż ze względu na dużą szczegółowość w odwzorowywaniu procesu ruchu są zbyt powolne, ani modele makro, gdyż z powodu dużej agregacji procesu ruchu są zbyt mało dokładne. Horyzont czasowy predykcji krótkookresowej (ok. 15 min.<sup>26</sup>) narzuca wymagania modeli „szybkich” obliczeniowo (poniżej 1 min.) oraz, ze względu na inne funkcjonalności ITS, z dostateczną dokładnością wyznaczających stany ruchu i wartości takich wskaźników jakości, jak przewidywane czasy podróży, długości kolejek oraz prędkości odcinkowe ruchu. W oparciu o nie w systemach ITS dokonuje się optymalizacji sterowania i zarządzania ruchem, uwzględniając jego konsekwencje w założonym horyzoncie czasowym.

Obserwuje się dwa kierunki rozwoju modeli ruchu (zwane modelami meso albo semi), które mają wypełnić lukę pomiędzy modelami mikro i makro:

25 W trójwymiarowym cylindrze czasoprzestrzeni (STC) dobowy opis podróży budują wstęgi przemieszczeń poszczególnych telefonów (podróżnych) identyfikowanych wg cytowanej koncepcji CFD [59].

26 Biorąc pod uwagę zjawisko zatłoczenia oraz potrzebę udzielania priorytetu systemowemu pojazdowi transportu publicznego, nie wystarczy „spoglądanie” na jeden cykl sygnalizacji świetlnej do przodu, ale należy antycypować sytuacje po kilku do kilkunastu cyklach (rolling horizon).

- uszczegółowienie modeli makro,
- agregacja modeli mikro.

Reprezentantem pierwszego kierunku jest CTM – model wg [16]: dzielący drogę na odcinki, zwane komórkami, w których obowiązują makro zależności, a przepływ pomiędzy komórkami odbywa się w oparciu o zasadę ciągłości ruchu. Graniczną wersją tego modelu są modele w postaci automatów komórkowych [69], w których komórka może pomieścić pojedynczy pojazd umowny. Ze względu na binarny charakter modelu ruchu (komórka zajęta albo pusta), automaty komórkowe umożliwiają szybką predykcję krótkoterminową ruchu w sieci.

Modele grupowe [44, 45] reprezentują drugi kierunek rozwoju modeli ruchu dla systemów ITS. Odwzorowanie ruchu na poszczególnych odcinkach sieci ulic odbywa się w nich za pomocą układu grup pojazdów, pozostających w podobnych stanach. Układy grup pojazdów zmieniają się w efekcie transformacji grup, a także oddziaływania sygnałów sterujących i wpływu odcinków dróg. Jedną z podstawowych jego wersji, to model  $MG_3$  [45] o trzech stanach stabilnych ruchu: ruchu względnie swobodnego, stanu nasycenia i stanu stacjonarnej kolejki. W modelach grupowych występuje o rząd mniej obiektów niż w modelach mikro i stąd są one dostatecznie „szybkie”, przy dokładności porównywalnej z modelem TRANSYT [92] w zakresie ruchu nie nasyconego, umożliwiając predykcję on-line.

Model TRANSYT, uzupełniono w ostatniej wersji o model CTM dla stanów przesyconych, co jednak nie stwarza możliwości do zastosowań on-line. Obserwuje się także, w ostatniej dekadzie, szybki rozwój modeli fazowych ruchu autostradowego [48], które stają się konkurencyjne dla makro modeli ruchu, umożliwiając predykcję tego ruchu, przy znacznym ograniczeniu systemu detekcji ruchu.

Z uwagi na interesujące na związki z popytowym modelowaniem ruchu opisane wyżej modele on-line wymagają osadzenia w otoczeniu systemowym stworzonym dla modelowania makro. Dla potrzeb adaptacji funkcji oporów przestrzeni w budowie więzby ruchu i odcinków sieci wymagają interfejsów wyprowadzających odpowiednie parametry strumienia i warunków ruchu w lukach i węzłach grafu sieci z archiwizowanych zbiorów. W istocie dopiero w oparciu o nie oprogramowany model czterostadiowy stanowiłby narzędzie zarówno średniookresowego planowania jak i bieżącej polityki transportowej. Nie jest to być może bariera nieprzekraczalna, chociaż wystarczającą wydaje zaletą jest możliwość walidacji dobowego modelu podróży w stosunku do zmiennych okresowo struktur popytu i interwałów czasowych (ruch roczny, godziny szczytu, ruch sezonowy). Wystarczy wspomnieć, że w systemie zarządzania ruchem w Berlinie zidentyfikowano 65 spośród wszystkich dni w roku, wystarczających dla pełnego opisu stanów całorocznych. Obecnie analizy rocznych przepływów ekonomicznych i finansowych wykonujemy przeważnie w oparciu o jeden model standardowy podróży dobowych<sup>27</sup>. Pytaniem podstawowym jest, jaka jest skuteczność zastosowania takiego modelu dla badania scenariuszy krótkoterminowych.

27 Takiej standaryzacji dokonano w KBR – Poznań 2000, prowadząc główną operację Badań w okresie dwóch tygodni a w ramach pomiarów rocznych określono relacje podróży dobowych modelu popytowego i podażowego do wartości rocznych.

Przykładem pewnej przyjaznej dla powyższych oczekiwań technologii jest oferta PTV Group środowiska OPTIMA&VISUM – Real Time [29]. Software PTV Optima dokonuje identyfikacji i krótkoterminowych predykcji stanów ruchu online wspomagając software PTV Balance przeznaczony do wyboru i optymalizacji planów oraz ich edycji do systemu sterowania. Identyfikacja stanów ruchu oraz ich prognozy dokonują się na bazie sprzężenia systemu off-line opartego na macierzach wygenerowanych z modelu transportowego (podaży i popytu), który budowany jest ze wsparciem źródeł danych systemu on-line. Jest rzeczą oczywistą, że podejście macierzowe do prognoz on-line pozwala lepiej zintegrować funkcjonalności planowania z funkcjonalnością zarządzania ruchem w sytuacji, gdy model transportowy (tu - VISUM) może korzystać z tych samych danych. Istotne jest, że opisany produkt jest inkorporowany indywidualnie do dedykowanej struktury ITS. W referencjach PTV Optima odnotujemy jej zastosowania w największych stolicach Europy (m.in. Londyn, Rzym, Bruksela).

#### 6.4. *Badania i modelowanie ruchu*

Wykorzystanie związków pomiędzy parametrami strumienia ruchu (w rozumieniu podstawowego jego równania) w modelowaniu wyboru drogi, podobnie jak iteracyjna procedura typu TFlowFuzzy, zatracą walory motywacyjnej struktury modelu podróży w prognozach długoterminowych i w zachowaniu dualnego odwzorowaniu kosztów ruchu. Jednakże i w tym przypadku rozwiązania należy szukać w podejściu aktywnościowym, które winno prowadzić do lepszego odwzorowania podróży fakultatywnych i estymacji odpowiedniej formuły kosztu. Dla zachowania w strukturze modelu grawitacyjnego i w funkcji oporu odcinka dualnej struktury kosztu możliwe jest także zachowanie bilansu kosztu na zasadzie iterowania obu funkcji w oparciu o równowagę pracy transportowej monitorowanej sieci transportowej i sumarycznej pracy transportowej w estymowanej macierzy [57]<sup>28</sup>.

Analiza sytuacji i możliwości [100] wskazuje, że kompleksowe badania ruchu (w rozumieniu definicji [58]), pozostają niezbędną podstawą budowy modelu podróży w ciągu następnej dekady lat. Podobny wniosek dotyczy modelu czterostadiowego [100]. Biorąc pod uwagę wymienione krytyczne elementy sprzężeń między badaniami i modelem oraz kierunki rozwoju ITS wydaje się, że dla optymalnej ścieżki rozwoju może być podejście wykorzystujące podstawy modelu aktywnościowego z wyodrębnieniem na poziomie klasycznych badań kompleksowych modelu kategorii agregowanego na poziomie gospodarstw domowych (na wzór [65]). Klasyfikacja gospodarstw domowych w modelu kategorii pozwalała by na zawężenie próby wywiadów domowych w oparciu o ich strukturę wtedy, gdy zmienne objaśniające sprowadzić do dostępnych baz danych dla rejonów ko-

28 Teoretycznie optymalne rozwiązanie opisowego modelu grawitacyjnego oparte jest na funkcji celu - maksimum rozproszenia (entropii) w granicach średniego kosztu [21], a więc zasadza się na odpowiednim estymowaniu tego kosztu. Teoria tego modelu nie odnosi się do jego dualnej struktury zawartej w dychotomii kosztu czasu i kosztu energii (dystansu). Koszt czasu zależy od motywacji, zatem struktura motywacyjna zachowuje formułę dualną w sposób quasi dualny [56].

munikacyjnych a struktury gospodarstw domowych identyfikowane na bazie pesel i spisów powszechnych. Zbiór rejonów komunikacyjnych, jako podmiot badań o stosunkowo dużej rozpiętości cech ruchotwórczych i analiza zachowań komunikacyjnych w tych rejonach na bazie analizy kategorii gospodarstw domowych mogą tworzyć spójną podstawę modelowania syntetycznego z zachowaniem walorów zarówno modelowania FSM jak ASM.

W latach osiemdziesiątych sugerowano objęcie modelami kategorii<sup>29</sup> 108 grup wyróżniając sześć grup strukturalnych (według liczby osób powyżej 6 lat i liczby osób zawodowo czynnych) o trzech kategoriach zmotoryzowania i sześciu klasach dochodu.[65]. Sytuacja komunikacyjna gospodarstw domowych zależna jest jednak także (prócz liczby pojazdów) od dostępności do transportu publicznego. Wyróżniając np. cztery stopnie dostępności kosztem czterech zamiast sześciu klas dochodu osiągnąć można przy mniej jak 0,2% reprezentacji badań systematycznych (około 300 grup) poziom wiarygodności równorzędny kilkukrotnie większej reprezentacji badania klasycznego, pod warunkiem jednak najpierw zidentyfikowania a następnie kontrolowania zmienności tej struktury w populacji. Podejście powyższe przybliży naszej uwadze procedury modelowania aktywnościowego zważywszy, że analiza kategorii winna łatwiej identyfikować różnice mobilności wynikające z aktywności fakultatywnych przy odpowiednio silnie zdeterminowanej aktywności obligatoryjnej. Ten zresztą czynnik jest niezwykle istotny, jeżeli zważyć, że analiza i model kategorii w substytucji do struktury motywacyjnej modelu czterostadiowego pozwala na uwzględnienie, być może nawet w dużo większym stopniu, dualnej struktury kosztu w zadaniu transportowym.

Klasyfikacja krzyżowa, oparta na odpowiednio dużej reprezentacji wywiadów w jednym badaniu dedykowanym dla miasta, umożliwiła by prowadzenie analiz kategorii i wylosowanie niezbyt dużej liczby stałych respondentów poddanych badaniom systematycznym, co z kolei umożliwiło by ewaluację zmian w sposób kontrolowany z punktu widzenia struktury całej populacji<sup>30</sup>. Stałe badanie gospodarstw domowych ma wreszcie kluczowe znaczenie dla aktualizacji popytowej struktury w modelu ruchu – dostarczając dodatkowych parametrów w modelowaniu wspartym środkami ITS.

Postulując rejon komunikacyjny jako podstawę agregacji modelu ma się na myśli dowolnie wybrany obszar na mapie kraju z elastycznymi ograniczeniami, zależnymi (docelowo) jedynie od postawionego problemu i zadania transportowego. Relacja rejonu w stosunku do przestrzeni sąsiedzkiej (sytuacja komunikacyjna) wiąże się w każdym przypadku z relacją pomiędzy funkcjami endo i egzogennymi w rejonie i jego otoczeniu na bazie uniwersalnego (w rozumieniu [21]) mod-

29 Dla podjęcia takiej procedury stosowano także takie określenia jak analiza krzyżowa lub analiza kategorii [65]. Określenia te wynikały z tłumaczenia instrukcji amerykańskiego oprogramowania pozyskanego przez IKŚ w ramach oenzytowskiego wsparcia (UNDP).

30 Dla wylosowanych gospodarstw stosowane mogą być bodźce o charakterze promocyjnym w dostępie do oferowanych dóbr komunalnych nie wyłączając bezpośredniej płatności. Bodźcem niewątpliwie było by także konsultowanie w tych gospodarstwach domowych istotnych decyzji z punktu widzenia różnych komponentów polityki transportowej, czy polityki komunalnej w ogóle.



elu grawitacyjnego (por. opis pkt. 4.3.3 i zmienność pracy transportowej - rys. 1). Identyfikacja zasięgu wpływu bilansującego rynek nauki i pracy oraz układu komunikacyjnego wyzwalaającego aktywności fakultatywne winny prowadzić do dedykacji modelu syntetycznego w dowolnie agregowanych rejonach.. Powyższe rozumienie rynku kieruje naszą uwagę w kierunku modelowania opartego na użytkowania i potencjalnej użyteczności terenów („land use”). Istniejące bądź optymalizowane układy przestrzenno - transportowe zawiązują wówczas strukturę kosztową zadania transportowego przez przekwalifikowanie sytuacji komunikacyjnej gospodarstw domowych (zmiana aktywności), przekształcenia urbanistyczne (zmiany użytkowania terenów) i ekonomiczne (w grupach dochodowych).

Badania aktywności i wpływu użytkowania terenów prowadzone w szerszej skali winny w prostej drodze prowadzić do znacznego zaawansowania rozwoju modelowania syntetycznego. Stanowiąc zatem mogą także syntezę trzech różnych, scharakteryzowanych w rozdziale 5 głównych kierunków rozwoju modelowania podróży. W nawiązaniu do dylematu Kucharskiego (pkt 6.2.1.) – stanowiłyby przejrzystą alternatywę lub dopełnienie dla rozwoju dedykowanego modelowania czterostadiowego. Model syntetyczny ułatwiałby zarazem integrację modeli dedykowanych zarówno poprzez wspólnie definiowane standardy: np. warstwy więźb ruchu i bazodanowe, funkcje oporu odcinków i przestrzeni oparte na standardach kosztów uogólnionych o adekwatnej strukturze dualnej i modalnej.

Funkcje syntetycznego modelowania ruchu można przyrównać do roli teorii weryfikowanej empirycznie. Wynik eksperymentu o formule dedykowanej osadzony w opozycji do możliwej teoretycznie weryfikacji, analizowany może być zarówno z punktu widzenia formalnych przyczyn odstępstwa od teorii, jak prowadzić do weryfikowania teorii wynikami kolejnych eksperymentów. Takie sprzężenie teorii i praktyki jest w istocie zasadniczym wyznacznikiem postępu w nauce.

## 6. Wnioski

Rozwój metod modelowania dedykowanego niewątpliwie jest niezbędny i będzie postępował, a dedykowane modelowanie czterostadiowe niewątpliwie jest i będzie jeszcze wiele lat optymalną ścieżką postępowania. Przemawia za tym także rozwój metod, instrumentów i oprogramowania wspomagającego warsztat projektowy. Podstawowe problemy kompleksowych badań ruchu są silnym ograniczeniem dla uzyskania zadawalającej satysfakcji w obszarze dotąd stosowanej metodyki i skuteczności prognoz. Dotyczy to głównie kwestii właściwej reprezentacji (losowego charakteru próby badawczej), także implikacji związanych z relacjami pomiędzy ruchem zewnętrznym i wewnętrznym a także dość marginalnie traktowanej, a niedocenianej kwestii ruchu pojazdów nieprzeznaczonych do indywidualnego przewozu osób – logistyki miejskiej.

Postrzeżać należy pięć dziedzin, w obrębie których bądź dokonuje się, bądź możliwe jest dokonanie znacznego postępu:



1. Rozwój baz danych, systemów mapowych (SIP i GIS) i przede wszystkim inteligentnych instrumentów zarządzania ruchem (ITS) – w ramach zaś tych ostatnich zintegrowanie funkcji modelowania popytu z funkcją zarządzania ruchem.
2. Wykorzystanie dostępnego na rynku oprogramowania o ciągle poszerzających się możliwościach w zakresie pozyskiwania danych i zintegrowanych polach zastosowań.
3. Rozwój teorii modelowania, w tym modeli syntetycznych, wsparty na syntezie badań oraz modelowania dedykowanego. Wydaje się, że w obu przypadkach integracja rozwijanego modelu czterostadiowego i modelowania aktywnościowego winna zagwarantować najlepsze odwzorowanie podróży.
4. Rozwoju teorii i jej praktycznych zastosowań upatrywać można w obserwacji takich tendencji jak podejście stochastyczne do modelowania zachowań transportowych, podejście wielokryterialne w różnych fazach modelowania, wreszcie - w integrowaniu poszczególnych faz modelu czterostadiowego.
5. Zintegrowania wielopoziomowych przestrzeni modeli poczynając od modelu krajowego do modelu gminy poprzez odpowiednie procedury i standardy w badaniach i interfejsy oprogramowania a docelowo – przez strukturę wielopoziomową modelu syntetycznego.

Te dziedziny winny zapewnić wszechstronną możliwość weryfikacji danych uzyskiwanych z kompleksowych badań ruchu, łatwość aktualizacji, weryfikacji i przetwarzania danych zbudowanych na podstawie badań kompleksowych w procesie budowy modeli ruchu oraz odpowiedniego dopływu danych z ITS. Szczególnym wyzwaniem jest integracja mikro i mikromodelowania popytu w ramach architektury ITS, obejmująca zarówno ruch w transporcie publicznym jak pojazdów indywidualnych i obrót ładunków. Niewątpliwie decydującą formą usprawnienia i przyspieszenia rozwoju metod i warsztatu winna być standaryzacja tych badań, budowa słownika terminologicznego oraz integracja potencjału jednostek badawczych, administracyjnych i eksperckich wokół tożsamyh w istocie celów i zadań.

### Materiały źródłowe

- [1] Arentze T.A., Timmermans H., A need-based model of multi-day, multi-person activity generation. *Transportation Research Part B* 43 (2009).
- [2] Ben-Akiva M., Bowman J., Gopinath D., *Travel Demand Model System for the Information Era*. *Transportation*, Vol. 23, pp. 241-266, 1996.
- [3] Ben-Elia E., Shiftan Y., Which road do I take? A learning-based model of route-choice behavior with real-time information. *Transportation Research Part A, Policy and Practice*, vol. 44, no. 4, pp. 249–264, May 2010.
- [4] Bielaire M., *Mathematical Models for transportation demand analysis*. Doctoral dissertation. Université de la Fédération Wallonie-Bruxelles, 1995.

- [5] Biuro Inżynierii Transportu, Kompleksowe Badania Ruchu – Wrocław 2010, zeszyt 2 – Badanie gospodarstw domowych oraz preferencji, Wrocław 2010.
- [6] Biuro Inżynierii Transportu / SMG KRG, Studium komunikacyjne gminy miejskiej Sosnowiec – część wstępna, Miasto Sosnowiec 2009.
- [7] Biuro Inżynierii Transportu, Studium transportowe i bezpieczeństwa transportu w mieście Płocku - zeszyt 1 Kompleksowe Badania Ruchu, Miasto Płock 2008.
- [8] Biuro Inżynierii Transportu, Koncepcja zintegrowanego systemu publicznego transportu zbiorowego w osi komunikacyjnej Poznań – Murowana Goślina – Wągrowiec – Gołańcz. Stowarzyszenie Jednostek Samorządu Terytorialnego „Komunikacja”, Wągrowiec 2011.
- [9] Bhat C., A post-home arrival model of activity participation behavior. *Transportation Research*, 32B, 361-371, 1998.
- [10] Bhat C.R., A hazard-based duration model of shopping activity with non-parametric baseline specification and nonparametric control for unobserved heterogeneity. *Transportation Research*, 30B, 3, 189-207, 1996.
- [11] Bhat C.R., Modeling the commute activity-travel pattern of workers, formulation and empirical analysis. Technical Paper, Department of Civil Engineering, University of Texas at Austin, 1998.
- [12] Bowman, J.L., Ben-Akiva M.E., Activity based disaggregate travel demand model system with activity schedules. *Transportation Research A*, 35, 1-28, 2000.
- [13] Button, K. J., *The Economics of Urban Transport*. Saxon House, Farnborough 1977.
- [14] Chandra R., Koppelman F.S., Activity-Based Modeling of Travel Demand. W: Hall R.W. (red.), *Handbook of Transportation Science*. Kluwer Academic Publishers, New York 2003.
- [15] Christfreund W., Wyniki badań Zakładu Planowania Komunikacyjnego Uniwersytetu Technicznego T.U. Dresden, 1973 (tłumaczenie raportu w zbiorach Politechniki Krakowskiej).
- [16] Daganzo C.F., The Cell Transmission Model, A Dynamic Representation of Highway Consistent with the Hydrodynamic Theory. *Transportation Research*, Vol. 28B, p.269-287, 1992.
- [17] Dijst M., Vidakovic V., Individual action space in the city, in *Activity-Based Approaches to Travel Analysis*. Ed. Dick Ettema and Harry Timmermans. Elsevier Science, Ltd., pp. 117-134, 1997.
- [18] Dobes L., *Urban Transport Models, A Review*. Working Paper 39, Bureau of Transport Economics, Canberra 1998.
- [19] Dybicz T., Metody cyklicznego szacowania przewozów pasażerskich w transporcie zbiorowym. Materiały VIII Konferencji N-T „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego”, 375-384, SITK RP, Poznań, 2011.

- [20] Echenique, M.H., The Use of Integrated Land Use and Transport Models, The Cases of Sao Paulo, Brazil and Bilbao, Spain, W: Florian M. (Ed.), The Practice of Transportation Planning. Elsevier 1985, pp. 263-286.
- [21] Erlander S., Stewart N.,F., The gravity model in transportation analysis. Theory and extensions. VSP, Utrecht, 1990.
- [22] Ettema D., Borgers A., Timmermans H., Simulation model of activity scheduling behavior. Transportation Research Record, 1413, 1-11, 1993.
- [23] O'Flaherty C.,A., Highway Traffic Planning and Engineering , Third Edition, Volume 1, Edward Arnold, London, 1986.
- [24] Fried, M., Havens J., and Thall M., Travel Behavior, A Synthesized Theory. Final Report NCHRP. Transportation Research Board/National Research Council, Washington 1977.
- [25] Friedberg J., Modele generacji rozkładu przestrzennego ruchu w warunkach małych i średnich miast polskich. IKŚ, Kraków, 1979.
- [26] Friedberg J., Szarata A., Jakość danych wejściowych w badaniach i modelach ruchu, od KBR do prognoz. Materiały konferencji Kompleksowe Badania Ruchu, teoria i praktyka, doświadczenia miast polskich, 61-71, zeszyt SITK nr 93 Kraków 2010.
- [27] Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M., Inżynieria Ruchu Drogowego. Teoria i praktyka. WKŁ, Warszawa, 2009.
- [28] Gao S., Frejinger E., Ben-Akiva M., Cognitive cost in route choice with real-time information, An exploratory analysis. Transportation Research Part A, Policy and Practice, vol. 45, no. 9, pp. 916–926, Nov. 2011.
- [29] Gentile G., Meschini L., Using dynamic assignment model for real-times traffic forecast on large urban networks. 2<sup>nd</sup> International Conference on models and technologies for Intelligent Transportations Systems, 2011, Leuven.
- [30] Gentile G., Nguyen S., Pallottino S., Route Choice on Transit Networks with Online Information at Stops. Transportation Science, vol. 39, no. 3, pp. 289–297, Aug. 2005.
- [31] González R. M., Marrero G. A., Induced road traffic in Spanish regions, A dynamic panel data model. Transportation Research Part A, Policy and Practice, vol. 46, no. 3, pp. 435–445, Mar. 2012.
- [32] Gumińska L., Jamroz K., Kustra W., Oskarbski J., Wielopoziomowe modelowanie ruchu – koncepcja i doświadczenie praktyczne, W: Nowoczesny transport publiczny w obszarach zurbanizowanych (red.. Krych A.). Materiały VIII Konferencji N-T Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego, 15-30, SITK RP, Poznań-Rosnowko, 2011.
- [33] Hamed M., Mannering F., Modeling travelers' postwork activity involvement, toward a new methodology. Transportation Science, 27, 4, 381-394, 1993.
- [34] Haupt Th., Friderich Th., Heidi U., Validate, A New Method To Generate Nationwide Traffic Data. PTV AG, Karlsruhe.

- [35] Hensher D.A., Button K., J. (red.), Handbook of Transport Modelling. Elsevier, Oxford, 2000.
- [36] Hölscher C., Tenbrink T., Wiener J. M., Would you follow your own route description? Cognitive strategies in urban route planning. *Cognition*, vol. 121, no. 2, pp. 228–47, Nov. 2011.
- [37] Horowitz J.L., A utility maximizing model of the demand for multi-destination non-work travel. *Transportation Research*, 14B, 369-386, 1980.
- [38] <https://oyster.tfl.gov.uk/oyster/entry.do>
- [39] Jones A.D., Grecco W.L., Simplified procedure for major thoroughfare planning in small urban areas. *Highway Record* nr 472, 1973.
- [40] Jones, P. M., Dix M. C., Clarke M. I., Heggie I. G., Understanding Travel Behavior. Aldershot, Gower, 1983.
- [41] Jones P. M., Koppelman F.S., Orfeuil J.P., Activity analysis, state of the art and future directions, in *Developments in Dynamic and Activity-Based Approaches to Travel Analysis*, 34-55, Gower, Aldershot, 1993.
- [42] Jou R-C., Mahmassani H.S., Comparative analysis of day-to-day trip chaining behavior of urban commuters in two cities, forthcoming. *Transportation Research Record*, 1997.
- [43] Jovicic G., Activity based travel demand modeling – literature study. Note 8, Denmark 2001.
- [44] Kaczmarek M., Fuzzy Group Model of Traffic Flow In Street Networks. *Transportation Research*, Vol. 13C, p. 93-105, 2005.
- [45] Kaczmarek M., Trójpunktowy model grupowy ruchu pojazdów na odcinku drogi. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria TRANSPORT* z. 44, 2002.
- [46] Kato H. and Matsumoto M., Intra-household interaction in a nuclear family, A utility-maximizing approach. *Transportation Research Part B* 43 (2009).
- [47] O'Kelly M.E., Miller E.J., Characteristics of multistop multipurpose travel, an empirical study of trip length. *Transportation Research Record*, 976, 33-39, 1984.
- [48] Kerner B.S., *The Physics of Traffic*. Springer 2004.
- [49] Kitamura R., Yamamoto T., Fujii S., Sampath S., A discrete-continuous analysis of time allocation to two types of discretionary activities which accounts for unobserved heterogeneity. W: Lesort J.B. (red.) *Transportation and Traffic Theory*, 431-453, Elsevier, Oxford, 1996.
- [50] Kitamura R., Incorporating trip chaining into analysis of destination choice. *Transportation Research*, 18B, 67-81, 1984.
- [51] Kraan M., Time to travel?; a model for the allocation of time and money. Ph.D. dissertation, Department of Civil Engineering, University of Twente, Netherlands 1996.
- [52] Krych A., Predykcja natężeń ruchu samochodowego na wlotach średnich miast, W: *Badania i modelowanie ruchu w planowaniu komunikacyjnym*. Mat. konf. N-T, 135 - 174, SITK, Kraków - Muszyna, 1985.

- [53] Krych A., Modularne komponenty systemowe dla potrzeb analiz transportowych – zarys projektu. W: Modelling 2012. Mat. III Ogólnopolskiej Konf. N-T. Modelowanie podróży i prognozowanie ruchu, Politechnika Krakowska, Kraków, 2012.
- [54] Krych, A., Podział ruchu na wlotach drogowych średnich miast. Transport Miejski nr 4, 1973.
- [55] Krych, A., Proces urbanizacji a poziom zatłoczenia motoryzacyjnego. Materiały II Konferencji N-T Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego, 155-165, SITK RP, Poznań, 1999.
- [56] Krych A., Transport publiczny w dualnym zadaniu transportowym. Materiały VIII Konferencji N-T Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego, 89-112, SITK RP, Poznań, 2011.
- [57] Krych A., Dynamiczne zarządzanie ruchem w sieci zatłoczonej. Materiały VII Konferencji N-T Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego, 385-400, SITK RP, Poznań, 2009.
- [58] Krych A., Kaczkowski M., Słownictwo kompleksowych badań i modelowania potoków ruchu. Materiały konferencji Modelowanie podróży i prognozowanie ruchu, 159-179, 357-396, Zeszyty NT SITK RP nr 153, seria Materiały Konferencyjne nr 94, Kraków, 2010.
- [59] Kucharski R., Metoda detekcji Cellular Floating Data – możliwości i perspektywy. Materiały konferencji Modelowanie podróży i prognozowanie ruchu, 143-154, Zeszyty NT SITK RP nr 148, seria Materiały Konferencyjne nr 90, Kraków, 2009.
- [60] Kucharski R., Optymalizacja kształtu monocentrycznej sieci komunikacyjnej z zastosowaniem optymalizacji wielokryterialnej. Przegląd Komunikacyjny, no. 7-8, 2011.
- [61] Laporte, G., Marin A., Mesa J.A., Perea F., Designing robust rapid transit networks with alternative routes. Journal Of Advanced Transportation 45 (1), 54-65, 2011.
- [62] Leszczyński J., Modelowanie systemów i procesów transportowych. Oficyna Wydawnicza Politechnika Warszawskiej, Warszawa, 1999.
- [63] Lewandowski D., Przyjemski M., Model syntetyczny generacji ruchu samochodowego w średnim mieście. Praca magisterska, Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1983.
- [64] Levinson D.M., An Evolutionary Transportation Planning Model, Structure and Application. Transportation Research Record 1493 p. 64-73, 1996.
- [65] Lilpop Z., Sidorenko A., Waltz A., Prognozowanie ruchu miejskiego. IKS, Warszawa, 1983.
- [66] Lohse, D., et al., Ermittlung von Verkehrsströmen mit n-linearen Gleichungssystemen – Verkehrsnachfragemodellierung. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr, TU Dresden, Dresden, 1997.
- [67] Macioszek E., Żochowska R., Karoń G., Problemy gromadzenia danych dla potrzeb modelowania podróży i prognozowania ruchu. Materiały kon-

- ferencji Modelowanie podróży i prognozowanie ruchu, 203-222, zeszyt SITK nr 94 Kraków 2010.
- [68] Martínez F.J., Toward the 5-Stage Land Use-Transport Model, In: Selected Papers of the 6th World Conference on Transportation Research. Land Use Development and Globalization. Lyon 1992, pp. 79-90.
- [69] Nagel K., Schreckenberg M. J., *Physique I France* 2, 2221 (1992).
- [70] McNally M. G., Recker W., On the Formation of Household Travel/Activity Patterns. USDOT Final Report, Institute of Transportation Studies, University of California, Irvine 1986.
- [71] McNally M. G., Rindt C. R., The Activity-Based Approach. UCI-ITS-WP-07-1, Institute of Transportation Studies, University of California, Irvine 2007.
- [72] Oppenheim N., *Urban Travel Demand Modelling*. John Wiley (USA), New York 1995.
- [73] Ortuzar J., Willumsen L.G., *Modelling Transport*. John Wiley & Sons, New York, 2011.
- [74] Papinski D. and Scott D. M., A GIS-based toolkit for route choice analysis. *Journal of Transport Geography*, vol. 19, no. 3, pp. 434–442, May 2011.
- [75] Pas E.I., Koppelman F.S., An Examination of the Determinants of Day-to-Day Variability in Individuals' Urban Travel Behavior. *Transportation*, 13, 183-200, 1986.
- [76] Pendyala R.M., Kitamura R., Reddy D.V.G.P., Application of an activity-based travel demand model incorporating a rule-based algorithm. *Environment and Planning B*, 25, 753-772, 1998.
- [77] Pfaffenbichler P., The strategic, dynamic and integrated urban land use and transport model MARS (Metropolitan Activity Relocation Simulator), Development, testing and application. *Dysertacja doktorska*, Wiedeń, 2003.
- [78] Pillat J., Mandir E., Friedrich M., Dynamic Choice Set Generation based on a Combination of GPS Trajectories and Stated Preference Data Dynamic Choice Set Generation based on a Combination of GPS Trajectories and Stated Preference Data. vol. 496, pp. 1–16, 2010.
- [79] Planowanie systemów transportowych miast małych i średnich. *Mat. konf., SITK, Opole 1979*, w tym Gadomski A, Goras E., Goras K., Metody badań i prognozowania ruchu w miastach małych i średnich oraz Friedberg J., Proces planowania komunikacyjnego na tle planowania przestrzennego i społeczno-gospodarczego.
- [80] Planowanie systemów transportu, Część 2 szczegółowa. *Praca zbiorowa (red. Friedberg J.), SITK, IKS – Kraków*, s. 221-233.
- [81] Roorda, M.J., Carrasco, J.A. and Miller, E.J., An integrated model of vehicle transactions, activity scheduling and mode choice. *Transportation Research Part B* 43 (2009).



- [82] Rossi, T. & Y. Shiftan, Tour-Based Travel Demand Modeling in the U.S. Proceeding of the 8th IFAC/IFIP/IFORS Symposium on Transportation Systems, Chania, Greece, June 1997.
- [83] Rudnicki. A., Dylematy metodyczne kompleksowych badań ruchu. Materiały konferencji Kompleksowe badania ruchu, teoria i praktyka, doświadczenia miast polskich, 139-152, zeszyt SITK nr 93 Kraków 2010.
- [84] Schlaich J., Analyzing Route Choice Behavior with Mobile Phone Trajectories. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, vol. 2157, no. -1, pp. 78–85, Dec. 2010.
- [85] Sivakumar A., Modelling Transport, A Synthesis of Transport Modelling Methodologies. Imperial College, London 2007.
- [86] Shiftan Y., A Practical Approach to Model Trip Chaining. Transportation Research Record, No. 1645, pp. 17-23, 1999.
- [87] Steenbrink P.A., Optymalizacja sieci transportowych. WKiŁ, Warszawa, 1978.
- [88] Stopher P., Meyburg A. H., Urban Transportation Modelling and Planning. Lexington Books, London, 1975.
- [89] Stouffer S.A., American Sociological Review, p.846 December 1940.
- [90] Szarata A., Thiem J., Metodyka i standaryzacja badań i modelowania podróży. Materiały VIII Konferencji N-T Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego, 52-65, SITK RP, Poznań, 2011.
- [91] Timmermans H., Zhang J., Modeling household activity travel behavior, Examples of state of the art modeling approaches and research agenda. Transportation Research Part B 43 (2009) 187–190.
- [92] TRANSYT 13 User Guide. TRL 2009.
- [93] Travel Demand Forecasting, Parameters And Techniques National Cooperative Highway Research Program Report 716. Transportation Research Board, Washington, D.C 2012.
- [94] Trépanier M., Morency C., Agard B., Calculation of Transit Performance Measures Using Smartcard Data. pp. 79–96.
- [95] Wang, D. and Li, J., A model of household time allocation taking into consideration of hiring domestic helpers. Transportation Research Part B 43 (2009).
- [96] Will R., A Bridge between Travel Demand Modeling and Activity-Based Travel Analysis, Recent Work, Center for Activity Systems Analysis. Institute of Transportation Studies, University of California, Irvine 2000.
- [97] Zipser T., The Model of Intervening Opportunities in Theory and Practice of Territorial Arrangement. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1990.
- [98] Zhang J., Kuwano M., Lee B. and Fujiwara A., Modeling household discrete choice behavior incorporating heterogeneous group decision-making mechanisms. Transportation Research Part B 43 (2009).

- [99] Żak J., Modelowanie i optymalizacja wielokryterialna funkcjonowania systemów transportowych komunikacji miejskiej. Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań, 1994.
- [100] Żak J. (kier. Projektu), Koncepcja modelu ruchu w aglomeracji poznańskiej. Politechnika Poznańska, 2012.

## PROBLEMY MODELOWANIA LICZBY PODRÓŻY GENEROWANYCH I ABSORBOWANYCH NA PRZYKŁADZIE GDAŃSKA<sup>1</sup>

---

**Aleksandra Romanowska**

mgr inż., Katedra Inżynierii Drogowej, Wydział Inżynierii Łądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, 80-233 Gdańsk, ul. Narutowicza 11/12

**Kazimierz Jamroz**

dr hab. inż., Katedra Inżynierii Drogowej, Wydział Inżynierii Łądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, 80-233 Gdańsk, ul. Narutowicza 11/12, tel. +48 58 347 1147, e-mail: kjamroz@pg.gda.pl

**Tomasz Budziszewski**

mgr, Biuro Rozwoju Gdańska, 80-855 Gdańsk, Wały Piastowskie 24, e-mail: tomaszbudziszewski@o2.pl

---

**Streszczenie.** *Jedną z podstawowych danych niezbędnych do planowania elementów systemu transportowego jest informacja o liczbie podróży odbywanych na analizowanym obszarze. Dane te uzyskiwane są najczęściej za pomocą symulacyjnych modeli transportowych. Jednym z istotnych elementów i pierwszym etapem najczęściej stosowanego, klasycznego modelu czterostopniowego jest modelowanie liczby podróży generowanych i absorbowanych, podczas którego to etapu uzależnia się liczbę podróży mieszkańców od charakterystyk demograficznych, społeczno-ekonomicznych, obszarowych, transportowych analizowanego obszaru. W klasycznym podejściu do modelowania liczby podróży generowanych i absorbowanych w rejonach transportowych buduje się modele regresyjne dla poszczególnych motywacji podróży w oparciu o podstawowe zmienne, tj. liczbę mieszkańców, liczbę miejsc pracy oraz liczbę miejsc w szkołach. Celem artykułu jest przedstawienie podejścia do modelowania liczby podróży generowanych i absorbowanych zastosowanego przy budowie Transportowego modelu symulacyjnego dla miasta Gdańska. W zastosowanych modelach uwzględniono wpływ dodatkowych zmiennych demograficznych, społeczno-ekonomicznych oraz zmiennych charakteryzujących rejon transportowy, pozwalających na uwzględnienie różnic w zagospodarowaniu przestrzennym tych rejonów.*

**Słowa kluczowe:** *model transportowy miasta, model czterostopniowy, generacja podróży, modelowanie podróży generowanych i absorbowanych*

### 1. Wprowadzenie

Modelowanie generacji i absorpcji podróży (pierwszy etap modelu czterostopniowego) umożliwia matematyczne określenie związku pomiędzy liczbą podróży generowanych i absorbowanych w analizowanym obszarze, a jego zagospodarowaniem przestrzennym czy charakterystykami demograficznymi i społeczno-ekonomicznymi zamieszkujących go mieszkańców. Wyniki modelowania pozwalają na

---

<sup>1</sup> Wkład autorów w publikację: Romanowska A. 60%, Jamroz K. 20%, Budziszewski T. 20%

zdefiniowanie wielkości zapotrzebowania na podróże w ciągu doby w całym systemie transportowym analizowanego obszaru, na odpowiednim poziomie agregacji danych (np. rejonów transportowych lub gospodarstw domowych), dla różnych celów podróży (motywacji), które to informacje następnie wykorzystuje się do prognozowania popytu na podróże.

W roku 2011 przystąpiono w Gdańsku do budowy nowego Transportowego modelu symulacyjnego dla miasta Gdańska [1]. W modelu tym zastosowano także klasyczne czterostopniowe podejście. Jednym z etapów budowy tego modelu był problem modelowania liczby podróży generowanych i absorbowanych w poszczególnych rejonach transportowych. Korzystając z wyników badań kompleksowych przeprowadzonych w Gdańsku w roku 2009 [2] zostały opracowane matematyczne modele prognostyczne pozwalające na oszacowanie liczby podróży wjazdowych i wyjazdowych z poszczególnych obszarów (rejonów transportowych) w oparciu o dane demograficzne, społeczno-ekonomiczne, itp. W artykule przedstawiono informacje teoretyczne dotyczące modelowania podróży generowanych i absorbowanych oraz proponowane dla Gdańska podejście do modelowania, w oparciu o dostępne dane i przeprowadzone analizy. W końcowej części porównano także wyniki szacowania liczby podróży generowanych i absorbowanych za pomocą modeli zastosowanych w Gdańsku i prostych modeli opartych na czterech podstawowych zmiennych [3].

## 2. Stan zagadnienia

Każdą podróż wykonywaną przez mieszkańców miasta definiuje się poprzez jej początek i koniec lub odpowiednio źródło i cel podróży - podróż jest produkowana z jednego jej końca (źródła), a następnie jest przyciągana przez określony rejon, gdzie znajduje się jej drugi koniec - cel podróży [4] (rys. 1). Podróże wychodzące z danego rejonu transportowego nazywa się podróżami generowanymi lub produkowanymi przez rejon, podróże wchodzące natomiast podróżami absorbowanymi lub przyciąganymi przez rejon transportowy (odpowiednio generacją i absorbcją lub produkcją i atrakcją).

Z matematycznego punktu widzenia proces modelowania liczby podróży wewnętrznych polega na tym, że tworzy się oddzielne modele (tj. funkcje matematyczne) do szacowania produkcji (liczby podróży generowanych) i atrakcji (liczby podróży absorbowanych) dla każdej motywacji podróży, co ogólnie można zapisać w postaci:

$$LPG_i^p = f^p(X_i) \quad (1)$$

$$LPA_i^p = f^p(X_i) \quad (2)$$

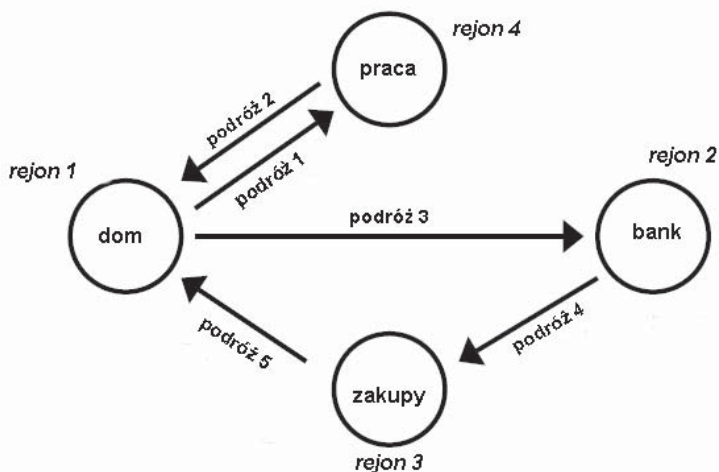
gdzie:

$LPG_i^p$  - liczba podróży generowanych (produkcja) przez rejon  $i$ , dla motywacji  $p$ ,

$LPA_i^p$  - liczba podróży absorbowanych (atrakcja) przez rejon  $i$ , dla motywacji  $p$ ,

$X_i$  - zbiór zmiennych opisujących rejon transportowy  $i$ ,

- $i$  - numer rejonu transportowego (gdzie:  $i=1, 2, 3, \dots, n$ ),  
 $p$  - cel/ motywacja podróży.



Rys. 1. Produkcja i atrakcja rejonów transportowych  
Źródło: [5]

Stworzone modele generowania podróży powinny być tak zbudowane, aby na podstawie dostępnych danych możliwe było uzyskanie wielkości potoków ruchu jak najbliższych danym empirycznym zebranych dla poszczególnych rejonów transportowych. Większą dokładność może dać na przykład podział podróży ze względu na cele (motywacje) podróży czy modelowanie liczby podróży generowanych podróży dla określonej pory dnia. Zawsze jednak zastosowanie wymienionych podziałów zależy od charakterystyki obszaru, pożądanej dokładności wyników czy po prostu dostępności danych.

Spośród najczęściej wymienianych w literaturze, wyróżnia się następujące metody modelowania liczby podróży generowanych i absorbowanych w modelu czterostopniowym:

- metoda analizy regresji,
- metoda analizy kategorii.

**Metody regresyjne** pozwalają na opisanie w sposób statystyczny zależności występującej pomiędzy liczbą generowanych podróży (zmienna zależna) a zmiennymi charakteryzującymi podróżujących, rejon transportowy, czy sieć transportową (zmiennie niezależne lub zmiennie objaśniające) [6]. W analizie regresji liniowej rozpatruje się zbiór obserwacji  $y_i$  (gdzie  $i=1,2,\dots,n$ ) określonej zmiennej  $y$ , która jest zależna od szeregu zmiennych  $x_1, \dots, x_{ki}$  dla których zostały zaobserwowane wartości  $y_i$ . Dla znanych zmiennych niezależnych dla obserwacji  $i$  metodą regresji liniowej szacuje się wartości parametrów przy zmiennych niezależnych w równaniu regresji [7]:

$$y_i = a_1 + a_2 * x_{1i} + a_3 * a_{2i} + \dots + a_m * x_{ki} + \varepsilon_i \quad (3)$$

gdzie:

$y_i$  – zbiór obserwacji zmiennej zależnej  $y$  (gdzie:  $i=1,2,\dots,n$ ),  
 $x_{1i}, \dots, x_{ki}$  – zmienne niezależne, dla których zaobserwowane zostały wartości  $y_i$ ,  
 $a_1, \dots, a_m$  – parametry modelu szacowane metodą regresji liniowej,  
 $\varepsilon_i$  – błąd, którego wartość oczekiwana jest równa 0.

Najczęściej wykorzystywaną metodą wyznaczania współczynników modelu jest metoda najmniejszych kwadratów oraz pochodne tej metody. Pierwszym krokiem modelowania jest dobór zmiennych objaśniających na podstawie analizy korelacji występujących pomiędzy zmiennymi modelowanymi (liczbą podróży) a zmiennymi charakteryzującymi rejon transportowe (zmienne demograficzne, społeczno-ekonomiczne, charakterystyka rejonów). Wyniki tej analizy oraz ogólna ocena możliwości występowania tych zmiennych w modelach pozwalają na budowę funkcji matematycznych opisujących dane zależności oraz pozwalających na szacowanie/prognozowanie wartości zmiennych objaśnianych (wielkości podróży). Przedstawione analizy można wykonywać w programach statystycznych, takich jak, np. STATSoft Statistica czy innych.

W przypadku stosowania metody analizy regresji konieczne jest sprawdzenie dopasowania wygenerowanego modelu, które można osiągnąć wykorzystując odpowiednie wskaźniki i statystyki, m.in.:

**Współczynnik determinacji  $R^2$**  – „informuje, jaka część danego zjawiska jest wyjaśniona przez obserwowane w próbie zmiany w wartościach zmiennych objaśniających” [7]:

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (\hat{y}_t - \bar{y})^2}{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2} \quad (4)$$

gdzie:

$y_t$  - wartość obserwowana zmiennej  $y$  w chwili  $t$ ,  
 $\hat{y}_t$  - wartość przewidywana zmiennej  $y$  w chwili  $t$  (obliczona na podstawie modelu),  
 $\bar{y}$  - średnia arytmetyczna obserwowanych wartości zmiennej objaśnianej.

**Błąd średniokwadratowy względny** – „informuje, jaką część wartości średniej modelowanej zmiennej stanowi średni błąd dopasowania modelu” [7]:

$$BKW = \sqrt{\frac{\sum (y_p - y_o)^2}{n}} * 100 \quad (5)$$

gdzie:

$BKW$ - błąd średniokwadratowy względny [%],



- $y_p$  - wartość pomierzona,  
 $y_o$  - wartość obliczona na podstawie modelu,  
 $Y_t$  - wartość średnia badanej zmiennej,  
 $n$  - liczebność wyników.

**Wartości prawdopodobieństwa testowego  $p$**  przy oszacowanych wartościach współczynników modelu – informują o prawdopodobieństwie popełnienia błędu polegającego na odrzuceniu hipotezy zerowej, kiedy jest ona prawdziwa. Jeżeli wartość  $p$  jest mniejsza od przyjętego poziomu istotności (najczęściej wynosi on 0,05), to otrzymany wynik uznawany jest za istotny statystycznie, co oznacza, że wynika on z występowania pewnej prawidłowości i nie jest jedynie skutkiem spłotu przyczyn losowych [8].

**Ocena logiczności modelu** – wykorzystanie praktyki inżynierskiej do oceny istotności czy prawdziwości związków zachodzących między danymi, oceny możliwości pozyskania danych, itd.

**Metoda analizy kategorii** (lub inaczej metoda klasyfikacji krzyżowej) polega na szacowaniu liczby generowanych podróży oddzielnie dla jednorodnych wewnętrznie (społeczno-ekonomicznych) grup społecznych – osób lub gospodarstw domowych na modelowanym obszarze. Na podstawie zagregowanych lub niezagregowanych zestawów danych dla każdej klasy społeczno-ekonomicznej otrzymuje się wskaźniki generowania podróży, czyli oszacowaną liczbę podróży wykonywanych przez osobę lub generowanych przez gospodarstwo domowe. Otrzymane wskaźniki mnoży się przez udziały konkretnych kategorii w populacji oraz dodaje do siebie celem otrzymania wyników dla populacji generalnej [9]. Najczęściej wykorzystywanymi oraz zalecanymi w metodzie kategorii zmiennymi są: dochód mieszkańców oraz liczba posiadanych samochodów (mimo silnej korelacji występującej między zmiennymi). W warunkach polskich, gdzie zdobycie danych o dochodach w gospodarstwach domowych jest trudne, stosuje się częściej zmienne dotyczące liczby osób w gospodarstwie domowym oraz liczby posiadanych samochodów.

W metodzie analizy kategorii ze względu na podział każdego rejonu na kilka klas, do szacowania liczby generowanych podróży w każdym rejonie transportowym wykorzystuje się więcej niż jeden średni wskaźnik generowania podróży. Liczba generowanych podróży przez rejon transportowy  $i$  będzie obliczana za pomocą wzoru (6).

$$T_i^p = \sum_b N_{bi} \cdot t_b^p \quad (6)$$

gdzie:

- $T_i^p$  - liczba podróży generowanych przez rejon  $i$ ,  
 $N_{bi}$  - liczba gospodarstw domowych w danej klasie  $b$  w rejonie  $i$ ,  
 $t_b^p$  - wskaźnik ruchliwości dla klasy  $b$ ,  
 $i$  - numer rejonu transportowego (gdzie:  $i=1, 2, 3, \dots, n$ ),  
 $p$  - cel/ motywacja podróży.

Wybór metody modelowania liczby generowanych podróży zależy od poziomu agregacji danych, który ma istotny wpływ na przydatność modelu. W przypadku wyboru rejonu transportowego jako jednostkę zachowania transportowego, model wyjaśnia różnice w wielkości generowanych podróży pomiędzy rejonami, natomiast modele wykorzystujące gospodarstwo domowe jako jednostkę zachowania transportowego objaśniają różnice w zachowaniach transportowych pomiędzy grupami rodzin [9].

Wymienione metody dotyczą modelowania rejonów wewnętrznych (podróży mieszkańców obszaru, których źródła i cele znajdują się w granicach analizowanego obszaru). Podróże zewnętrzne modeluje się z osobna. Najczęściej stosowaną praktyką jest przyjęcie danych empirycznych jako wielkości produkcji i atrakcji oraz przyjęcie odpowiednich wskaźników wzrostu ruchu dla celów prognostycznych.

### 3. Modelowanie liczby podróży generowanych i absorbowanych w modelu transportowym Gdańska

Podczas tworzenia prognostycznego modelu transportowego dla Miasta Gdańska [3] do opracowania modelu liczby podróży generowanych i absorbowanych, posłużono się metodą analizy regresji. W związku z tym, że w Gdańsku podjęta została już wcześniej próba stworzenia modelu transportowego, w dalszych pracach zastosowano istniejący podział miasta na 161 wewnętrznych rejonów transportowy i 35 rejonów zewnętrznych i dzięki temu w łatwy sposób udało się uzyskać wiele danych demograficznych charakteryzujących rejon i mieszkańców w nich zamieszkujących (w tym cztery podstawowe zmienne wykorzystane do szacowania generacji i absorpcji podróży w poprzednim modelu Gdańska: liczba mieszkańców, liczba miejsc pracy ogółem i w usługach oraz liczba miejsc w szkołach wyższych i średnich). Dane o podróżach dla poszczególnych rejonów wewnętrznych i zewnętrznych uzyskano z Kompleksowych Badań Ruchu wykonanych w Gdańsku w 2009 roku [2]. Przeprowadzone badania zachowań transportowych mieszkańców Gdańska objęły badaniem próbę stanowiącą niespełna 2,6% populacji (badania ankietowe przeprowadzono w ponad 5000 gospodarstwach domowych w Gdańsku). Rozszerzenie próby do populacji dokonane zostało z zastosowaniem wagi analitycznej dopasowującej strukturę próby do struktury populacji ze względu na zamieszkiwaną dzielnicę oraz wiek respondentów [10].

W modelu transportowym dla Miasta Gdańska [3] wykorzystano podział podróży na siedem motywacji: dom – praca, praca – dom, dom – nauka, nauka – dom, dom – inne, inne – dom, nie związane z domem. Wskaźniki ruchliwości osób w podróżach ogółem uzyskane z KBR dla poszczególnych motywacji wyniosły [10]:

- dom-praca: 0,3
- praca-dom: 0,3
- dom-nauka: 0,1
- nauka-dom: 0,1

- dom-inne: 0,4
- inne-dom: 0,4
- nie związane z domem: 0,2 podróży.

Produkcję i atrakcję rejonów transportowych modelowano dla doby, natomiast wartości dla szczytu popołudniowego, wykorzystane w następnych krokach modelowania, uzyskano ze stosunku podróży w godzinie szczytu popołudniowego do podróży w dobie, na podstawie wyników Kompleksowych Badań Ruchu w Gdańsku w 2009 roku [2].

W celu doboru zmiennych objaśniających do modeli wykonana została analiza statystyczna korelacji występujących pomiędzy tymi zmiennymi, a zmiennymi objaśnianymi (liczbą podróży) dla poszczególnych motywacji podróży. Analizowano ok. 20 zmiennych objaśniających, m.in.: powierzchnia rejonu, liczba mieszkańców, liczba i powierzchnia lokali mieszkaniowych, liczba miejsc pracy, liczba miejsc w szkołach, liczba miejsc noclegowych, powierzchnie handlowe i biurowe, liczba miejsc parkingowych przy wielko-powierzchniowych obiektach handlowych, liczba obiektów kulturalnych (muzea, biblioteki, teatry, kina, itp.) w rejonie. Zaobserwowano, że liczba podróży wyjazdowych z domu lub wjazdowych do domu jest silnie powiązana z liczbą mieszkańców, liczbą lokali mieszkaniowych, powierzchnią lokali czy w przypadku podróży związanych z pracą – liczbą zawodowo czynnych. W przypadku podróży wjazdowych do pracy i wyjazdowych z pracy wysokie współczynniki korelacji występowały dla zmiennych liczby miejsc pracy ogółem oraz liczby miejsc pracy w usługach. Analogiczna sytuacja wystąpiła w podróżach związanych z nauką (wysokie współczynniki korelacji dla liczby studentów zamieszkujących rejon transportowy oraz liczby miejsc w szkołach). W przypadku innych podróży, w tym nie związanych z domem, główną zmienną wysoce skorelowaną z liczbą podróży była liczba miejsc pracy w usługach, jednak wysokie zależności zauważono również dla powierzchni wielkopowierzchniowych obiektów handlowych, powierzchni biurowych czy też liczby banków (współczynnik korelacji ok. 0,8!) [1]. Ostatecznie do budowy modeli liczby podróży generowanych i absorbowanych wykorzystano 11 zmiennych niezależnych, część z wcześniej analizowanych zmiennych odrzucono m.in. ze względu na zbyt niskie skorelowanie ze zmienną objaśnianą, w przypadku liczby i powierzchni lokali mieszkaniowych ze względu na lepsze wyniki modelowania dla liczby mieszkańców i/lub liczby zawodowo czynnych czy w przypadku liczby miejsc parkingowych przy wielkopowierzchniowych obiektach handlowych lepsze wyniki modelowania dla powierzchni tych obiektów. Zmienne wykorzystane podczas tworzenia modeli absorpcji i generacji podróży przedstawiono poniżej:

- O* - powierzchnia rejonu [km<sup>2</sup>],
- LM* - liczba mieszkańców [tys.],
- LME* - liczba miejsc w szkołach średnich i wyższych [tys.],
- LS* - liczba studentów zamieszkałych w rejonie [tys.],
- LZC* - liczba zawodowo czynnych [tys.],
- UZC* - udział zawodowo czynnych ( $UZC=LZC/LM$ ),
- LPO* - liczba miejsc pracy ogółem [tys.],

$LPU$  - liczba miejsc pracy w usługach [tys.],  
 $POWH$  - powierzchnia handlowa wielkopowierzchniowych obiektów handlowych [tys. m<sup>2</sup>],  
 $POWB$  - powierzchnia usługowa biurów [tys. m<sup>2</sup>],  
 $LB$  - liczba banków.

Dobór najlepiej dopasowanych do danych rzeczywistych funkcji matematycznych do opisanego liczbą podróży generowanych i absorbowanych przez rejony transportowe przeprowadzono na bazie analizy wielu zależności matematycznych. Brano pod uwagę trzy grupy modeli zapisane w postaci ogólnej i czynnikowej. W pierwszym przypadku funkcję matematyczną dobierano bezpośrednio dla liczby podróży (wzór 7). W pozostałych przypadkach dla wskaźnika gęstości demograficznej podróży (wzór 8) i wskaźnika gęstości obszarowej podróży wzór (9).

$$P_i^p = f^p(X_i) \quad (7)$$

$$P_i^p = WPo_i^p * O \quad (8)$$

$$P_i^p = WPo_i^p * O \quad (9)$$

gdzie:

$P_i^p$  - suma podróży wyjazdowych (produkcja) z rejonu transportowego  $i$ ,  
 $X_i$  - zbiór zmiennych niezależnych opisujących rejon transportowy  $i$ ,  
 $WPd_i^p$  - wskaźnik gęstości demograficznej liczby podróży (podróży/tys. m<sup>2</sup>),  
 $WPo_i^p$  - wskaźnik gęstości obszarowej liczby podróży (podróży/km<sup>2</sup>),  
 $i$  - numer rejonu transportowego (gdzie:  $i=1, 2, 3, \dots, n$ ),  
 $p$  - cel/ motywacja podróży.

Najlepsze wyniki uzyskano wskutek zastosowania modeli w postaci ogólnej (wzór 7), stąd też w dalszej analizie odrzucono modele w postaci czynnikowej (wzory 8 i 9).

W tabeli 1 zestawiono modele liczby podróży generowanych i absorbowanych uzyskane w wyniku prowadzonych analiz [1, 2]. Podstawą wyboru modeli były kryteria opisane w punkcie 2. Zestawiono ze sobą proste (modele podstawowe) i rozbudowane (modele alternatywne) modele liczby podróży generowanych (produkcji) i podróży absorbowanych (atrakcji) w każdej z przyjętych motywacji i na podstawie wartości współczynnika determinacji czy wartości błędu analizowano w jaki sposób zastosowanie dodatkowych zmiennych pozwoliło na poprawę dopasowania modeli.

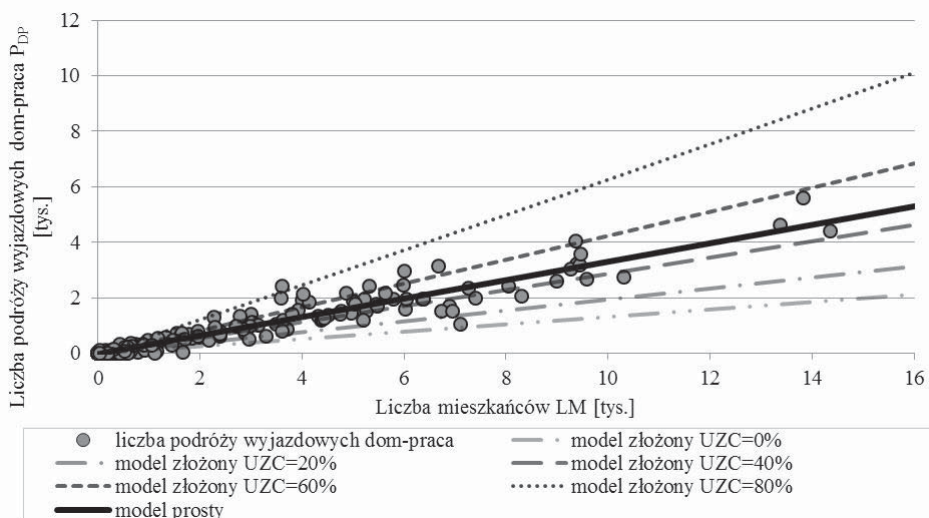
Tab. 1. Modele generacji i absorpcji podróży w Gdańsku

Podróż	Modele podstawowe	R <sup>2</sup>	BKW [%]	Modele alternatywne	R <sup>2</sup>	BKW [%]
Produkcja dom-praca	$P_{DP_0} = 0,33 * LM - 0,02$	0,90	36	$P_{DP_1} = 0,32 * LM^{1,02}$	0,90	36
				$P_{DP_2} = 0,41 * LM^{0,66} * e^{0,12 * LZC}$	0,93	31
				$P_{DP_3} = 0,12 * LM^{1,02} * e^{1,95 * UZC}$	0,97	21
				$P_{DP_4} = 0,71 * LZC^{0,99}$	0,97	19
Atrakcja dom-praca	$A_{DP_0} = 0,63 * LPO + 0,001$	0,77	71	$A_{DP_1} = 0,6 * LPO^{1,03}$	0,77	71
				$A_{DP_2} = 0,56 * LPO^{0,9} + 0,03 * POWB + 0,09 * LB$	0,82	62
Produkcja pracadom	$P_{PD_0} = 0,56 * LPO + 0,02$	0,76	73	$P_{PD_1} = 0,56 * LPO^{1,01}$	0,76	73
				$P_{PD_2} = 0,52 * LPO^{0,87} + 0,02 * POWB + 0,08 * LB$	0,81	64
Atrakcja pracadom	$A_{PD_0} = 0,3 * LM - 0,03$	0,89	39	$A_{PD_1} = 0,27 * LM^{1,04}$	0,89	39
				$A_{PD_2} = 0,37 * LM^{0,62} * e^{0,13 * LZC}$	0,92	33
				$A_{PD_3} = 0,11 * LM^{1,04} * e^{2,02 * UZC}$	0,96	25
				$A_{DP_4} = 0,63 * LZC^{1,02}$	0,96	23
Produkcja dom-nauka	$P_{DN_0} = 0,11 * LM + 0,01$	0,77	58	$P_{DN_1} = 0,12 * LM^{0,96}$	0,77	58
				$P_{DN_2} = 0,08 * LM^{0,98} + 0,46 * LS$	0,80	54
Atrakcja dom-nauka	$A_{DN_0} = 0,33 * LME + 0,18$	0,76	90	-	-	-
Produkcja naukadom	$P_{ND_0} = 0,29 * LME + 0,17$	0,72	92	-	-	-
Atrakcja naukadom	$A_{ND_0} = 0,1 * LM + 0,01$	0,75	62	$A_{ND_1} = 0,11 * LM^{0,99}$	0,75	62
				$A_{ND_2} = 0,07 * LM^{1,03} + 0,47 * LS$	0,78	57
Produkcja dom-inne	$P_{DI_0} = 0,3 * LM + 0,01$	0,80	53	$P_{DI_1} = 0,36 * LM^{0,91}$	0,81	52
Atrakcja dom-inne	$A_{DI_0} = 0,6 * LPU + 0,2$	0,54	96	$A_{DI_1} = 0,93 * LPU^{0,77}$	0,54	97
				$A_{DI_2} = 0,45 * LPU + 0,05 * POWH + 0,09 * LB$	0,73	76
				$A_{DI_3} = 0,83 * LPU^{0,63} * e^{0,03 * POWH + 0,02 * POWB + 0,04 * LB}$	0,75	71
Produkcja inne-dom	$P_{ID_0} = 0,64 * LPU + 0,23$	0,49	95	$P_{ID_1} = 0,99 * LPU^{0,78}$	0,49	95
				$P_{ID_2} = 0,85 * LPU^{0,58} * e^{0,03 * POWH + 0,04 * POWB + 0,05 * LB}$	0,78	72
Atrakcja inne-dom	$A_{ID_0} = 0,31 * LM + 0,02$	0,81	52	$A_{ID_1} = 0,39 * LM^{0,89}$	0,81	51
Produkcja nie związ. z domem	$P_{NZD_0} = 0,38 * LPU + 0,08$	0,73	72	$P_{NZD_1} = 0,47 * LPU^{0,89} * e^{0,02 * POWH + 0,02 * POWB + 0,01 * LB}$	0,81	61
Atrakcja nie związ. z domem	$A_{NZD_0} = 0,36 * LPU + 0,1$	0,56	98	$A_{NZD_1} = \left( \frac{25,09 * LM + 265,43 * LPU}{1000} \right)^{0,83} * e^{0,05 * LB + 0,03 * POWH + 0,01 * POWB}$	0,83	63

W modelach rozbudowanych poza standardowymi, wykorzystywanymi podczas modelowania liczby podróży generowanych i absorbowanych, za pomocą prostych zależności, zmiennymi (liczba mieszkańców, liczba miejsc w szkołach wyższych i średnich, liczba miejsc pracy ogółem oraz w usługach) wykorzystano dodatkowe zmienne, takie jak: liczba i udział zawodowo czynnych, liczba studentów zamieszkujących w rejonach, liczba banków, powierzchnia handlowa wielkopowierzchniowych obiektów handlowych, powierzchnia usługowa biurowców. Modele te zostały porównane z modelami prostymi wykorzystującymi 4 podstawowe zmienne za pomocą wskaźników determinacji, błędu średniokwadratowego oraz wykresów wartości przewidywanych i obserwowanych. Powyższa tabela i inne wyniki analizy pokazały, że w przypadku modeli związanych z domem, pracą i nauką modele złożone (rozbudowane) poprawiają dopasowania modeli o 3-7%

( $R^2$  jest większe o 0,03-0,07), ale pozwalają zmniejszyć błąd średniokwadratowy względny o 4-17%. W przypadku modelowania podróży dla motywacji: dom-inne, inne-dom i nie związanych z domem różnica jest już istotna i daje o 20-30 % lepsze dopasowanie analizowanych funkcji do danych rzeczywistych i błąd średniokwadratowy względny niższy o nawet 35% (model atrakcji dla motywacji nie związane z domem).

Dla przykładu przeanalizowano modele (podstawowy i alternatywny) liczby podróży wyjazdowych dla motywacji dom-praca. W standardowym podejściu przedstawionym w tabeli zależność ta modelowana jest z wykorzystaniem liczby mieszkańców jako jedynej zmiennej niezależnej. Analiza wykazała, że uzupełnienie prostego modelu o dodatkową zmienną, jaką jest udział zawodowo czynnych poprawia dopasowanie funkcji, dając  $R^2$  bliskie 1. Różnice w obu funkcjach wyraźnie pokazują wykresy przedstawione na rysunku 2 (wykres liczby podróży w zależności od liczby mieszkańców) – w przypadku modelu prostego rzeczywiste wartości podróży są odwzorowywane przez model tylko za pomocą jednej prostej, w przypadku modelu złożonego, w zależności od udziału zawodowo czynnych w rejonie funkcja dopasowuje się do zmiennych za pomocą wielu krzywych.



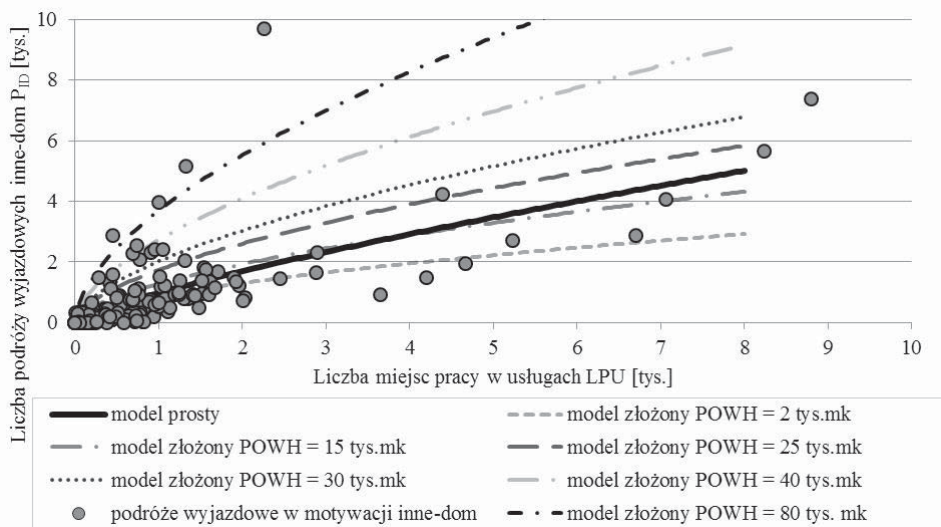
Rys. 2. Porównanie modeli podstawowych i alternatywnych na przykładzie produkcji w motywacji dom-praca - zależność liczby podróży od liczby mieszkańców dla różnych udziałów osób zawodowo czynnych

Źródło: opracowanie własne.

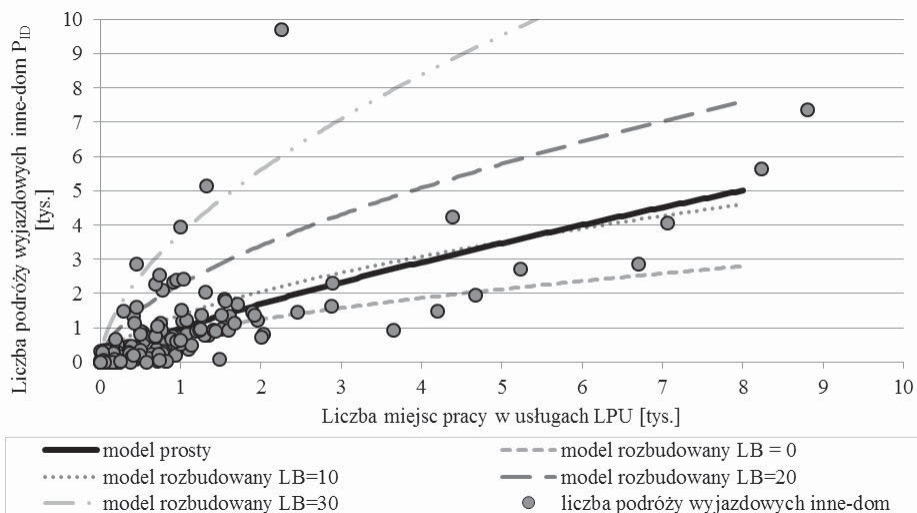
Inny przykład to model liczby podróży wyjazdowych w motywacji inne-dom. Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono wykresy rozrzutu liczby podróży w zależności od liczby miejsc pracy w usługach oraz wykresy krzywych uzyskanych z modelu podstawowego i rozbudowanego o dodatkowe zmienne, przedstawiające liczby podróży generowanych w zależności od liczby miejsc pracy w usługach i dodatkowo



powierzchni sprzedaży wielkopowierzchniowych obiektów handlowych oraz liczby banków (przy przyjęciu średnich wartości pozostałych zmiennych niezależnych).



Rys. 3. Porównanie modeli podstawowych i alternatywnych na przykładzie produkcji w motywacji inne-dom – zależność liczby podróży od liczby miejsc pracy dla różnych wielkości powierzchni handlowych  
Źródło: opracowanie własne



Rys. 4. Porównanie modeli podstawowych i alternatywnych na przykładzie produkcji w motywacji inne-dom – zależność liczby podróży od liczby miejsc pracy dla różnej liczby banków w  
Źródło: opracowanie własne

Jak pokazały analizy rzeczywistych liczby podróży w poszczególnych motywacjach w dokładniejszy sposób reprezentowane są przez złożone funkcje matema-

tyczne, wykorzystujące więcej niż jedną zmienną niezależną, które jednocześnie lepiej dopasowują się do rzeczywistych wartości zmiennych objaśnianych.

Dla podróży wyjazdowych w motywacji inne-dom przeanalizowano dodatkowo, czy przyjęcie do modelu zmiennej „powierzchnia handlowa wielkopowierzchniowych obiektów handlowych” poprawia dopasowanie modelu w rejonach, gdzie takie obiekty występują. Wyniki analizy pokazały, że wyłącznie dla rejonów, gdzie występują takie powierzchnie w przypadku modelu rozbudowanego otrzymano  $R^2=0,70$ , natomiast model prosty wyjaśnił tylko 38% przypadków ( $R^2=0,38$ ). Wynika stąd, że w przypadku rejonów, gdzie zlokalizowane są wielkopowierzchniowe obiekty handlowe rozbudowany model daje o ok. 30% lepsze dopasowanie niż model prosty. Podobnie w przypadku zmiennej „liczba banków”. Jest to dość nietypowa zmienna, mimo, że banki nie generują bezpośrednio znaczącej liczby podróży w rejonach transportowych, w zbudowanych modelach zmienna ta pozwoliła na uwzględnienie występowania centrów usługowych w Gdańsku – podczas gdy w większości rejonów transportowych występuje kilka lub żaden bank, to w rejonach centralnych i o charakterze typowo usługowym (Śródmieście, Wrzeszcz) występuje po 20-30 banków. Biorąc pod uwagę niską wartość parametrów przy tej zmiennej w modelach ma ona znaczenie jedynie w rejonach o dużej liczbie banków i w związku z tym pozwala ona uwzględnić atrakcyjność tych rejonów, a co za tym idzie poprawić dopasowanie modeli w przypadku tych obszarów. Prawidłowość tę potwierdza analiza wykonana dla dzielnic Gdańska: Śródmieście i Wrzeszcz. Analizując dla przykładu produkcję w motywacji inne-dom w tych rejonach transportowych w przypadku modelu złożonego uzyskano dopasowanie rzędu 88%, w przypadku zastosowania modelu prostego dopasowanie wynosi 41%.

#### 4. Podsumowanie

Podstawowymi celami budowy modelu symulacyjnego są: prognozowanie wielkości ruchu i przewozów pasażerskich w zależności od kierunków i wielkości zmian zagospodarowania przestrzennego analizowanego obszaru, możliwość oceny i weryfikacji planów rozbudowy sieci transportowej, ocena realizacji założeń polityki transportowej miasta, czy też ocena wpływu zmian w strukturze przestrzennej miasta na warunki ruchu. Realizacja tych celów możliwa jest tylko dzięki stworzeniu kompletnego narzędzia, z uwzględnieniem wszystkich etapów jego budowy, przy czym pierwszym jego istotnym elementem jest stworzenie formuł matematycznych pozwalających na odzwierciedlenie procesu powstawania podróży.

Zastosowane w Gdańsku modele liczby podróży generowanych i absorbowanych pozwalają na szacowanie wielkości podróży w poszczególnych rejonach transportowych Gdańska, a zastosowane w nich zmienne dają możliwość uwzględnienia zarówno sytuacji demograficznej i społeczno-ekonomicznej, jak i występowania funkcji usługowych i handlowych w tych rejonach.

Wykonane analizy oraz uzyskane wyniki modelowania generacji i absorpcji podróży w Gdańsku wskazują, że warto jest skoncentrować się na temacie modelowania generacji i absorpcji podróży i kontynuować badania nad wykorzystaniem w modelach dodatkowych zmiennych m.in. społeczno-ekonomicznych czy przestrzennych charakteryzujących rejony transportowe. W przyszłych badaniach należy uwzględnić także dane z innych miast, aby sprawdzić czy zaproponowane modele można uogólnić dla obszaru całego kraju.

## Literatura

- [1] Birr K., Maciasz K., Romanowska A., Zawisza M., *Metodyka budowy prognostycznego modelu transportowego na przykładzie Miasta Gdańska*. Praca dyplomowa magisterska. Politechnika Gdańska. Gdańsk, 2012.
- [2] Biuro Rozwoju Gdańska: *Badania Kompleksowe dla Gdańska*. Gdańsk. 2009.
- [3] Jamroz K., Kustra W., Budziszewski T., Birr K., Maciasz K., Romanowska A., Zawisza M., *Transportowy Model Symulacyjny Miasta Gdańska*. Biuro Rozwoju Gdańska, Fundacja Rozwoju Inżynierii Lądowej. Gdańsk, 2012.
- [4] Hensher, D.A., Button K.J., *Handbook of Transport Modelling*. First edition. Handbooks in Transport, Vol. 1. PERGAMON. Amsterdam, 2000.
- [5] Chatterjee A., Venigalla M.M., *Travel Demand Forecasting for Urban Transportation Planning*.
- [6] Bovy P.H.L., Bliemer M.C.J., Nes R.v., *Transportation Modelling*. Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Transport & Planning Section. Delft, 2006.
- [7] Kot S.M., Jakubowski J., Sokołowski A., *Statystyka*. Wydanie drugie, poprawione. Difin. Warszawa, 2009.
- [8] Sokołowski A., *Przykłady prognozy ekonomicznej*.
- [9] Supernak J., *Modele powstawania miejskiego ruchu osobowego*. Biblioteka Drogownictwa. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa, 1980.
- [10] PBS: *Kompleksowe badania ruchu na terenie Miasta Gdańska 2009*. Raport V - opracowanie wyników. Sopot - Warszawa, 2009.

# DŁUGOŚĆ PODRÓŻY W PROGNOZOWANIU ZMIAN POTENCJAŁOWEJ DOSTĘPNOŚCI DROGOWEJ NA PRZYKŁADZIE DWÓCH ODCINKÓW AUTOSTRADY A2<sup>1</sup>

**Piotr Rosik**

dr, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN, ul. Twarda 51/55, 00-818 Warszawa, tel. 503 873 291, e-mail: rosik@twarda.pan.pl

**Marcin Stępiak**

dr, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN, ul. Twarda 51/55, 00-818 Warszawa, e-mail: stepniak@twarda.pan.pl

**Streszczenie.** *Celem artykułu jest zaprezentowanie rezultatów badań nad dostępnością potencjałową na poziomie gminnym zrealizowanych w 2012r. w Instytucie Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN. Wskaźnik drogowej dostępności potencjałowej gmin uzyskano poprzez zsumowanie trzech komponentów: potencjału własnego, potencjału krajowego oraz potencjału zewnętrznego (międzynarodowego). Wskaźnik pozwala na wykonanie symulacji zmian dostępności w wyniku realizacji poszczególnych inwestycji infrastrukturalnych. W artykule symulację wykonano na przykładzie dwóch odcinków autostrady A2 – Łódź Północ-Warszawa oraz Świecko-Nowy Tomysł. Zmiany drogowej dostępności potencjałowej gmin zostały pokazane na poziomie krajowym oraz międzynarodowym. Celem podróży dla wszystkich symulacji była liczba ludności w rejonach komunikacyjnych. Prognozowanie zmian dostępności ma na celu wskazanie priorytetów realizacji poszczególnych odcinków sieci w kontekście ich znaczenia dla zmian dostępności na różnych poziomach analizy. Szczególną rolę pełni również zakładana długość podróży, którą różnicuje się poprzez dobór odpowiednich parametrów funkcji oporu przestrzeni. Dla wykorzystanej w referacie funkcji wykładniczej wykorzystano podział na podróże krótkie ( $\beta = 0,02$ ) i długie ( $\beta = 0,005$ ).*

*W artykule wskazano, iż różnice w zmianach dostępności między krótkimi i długimi podróżami są najwyższe w kontekście międzynarodowym po otwarciu odcinka peryferyjnego położonego blisko tzw. europejskiego rdzenia (Świecko-Nowy Tomysł). Jednocześnie odcinek ten nie ma dużego znaczenia dla zmian dostępności w ujęciu krajowym (niezależnie od długości podróży). Z kolei odcinek położony w centralnej Polsce skutkuje generalnie większymi zmianami dostępności na obszarze całego kraju. Jednak różnice między wariantami w zmianach dostępności nie są tak duże, jak przy odcinku peryferyjnym.*

*Zastosowana w niniejszym artykule metoda badawcza w postaci tzw. dostępności potencjałowej daje ogromne możliwości ewaluacyjne zarówno w formie ewaluacji ex-post jak i ex-ante. Dzięki zastosowaniu modelu potencjału istnieje możliwość porównywania odcinków sieci drogowej pod kątem zmian dostępności w zależności od długości podróży, zasięgu przestrzennego badania, a także, co nie było tematem niniejszego artykułu, z punktu widzenia atrakcyjności celu podróży, a także typu i gałęzi transportu lub motywacji podróży.*

**Słowa kluczowe:** *dostępność potencjałowa, symulacje zmian dostępności, autostrada A2, długość podróży, zasięg przestrzenny badania*

## 1. O ewaluacji inwestycji infrastrukturalnych

Jednym z zadań sieci transportowych, w tym sieci TEN-T, jest dostarczenie regionom peryferyjnym lepszego dostępu do centrów ekonomicznych. Jednak efekt w zakresie zmian dostępności i redukcji peryferyjności w wyniku realizacji inwestycji infrastrukturalnych jest często traktowany jako tzw. efekt pozardzeniowy lub też pozostały (Van Excel i in. 2002, Vickerman 2000). W tradycyjnej procedurze CBA (*cost benefit analysis*) wykorzystywanej do celów ewaluacyjnych i rangowania projektów rzadko analizuje się efekty w zakresie inwestycji zmian dostępności, a efekt ogranicza się do oszczędności w czasie podróży (Vickerman 2000).

W szerszym ujęciu efekty inwestycji transportowych mogą być analizowane z punktu widzenia trzech interakcji (Laird i in. 2005):

- 1) interakcje w obrębie systemu transportowego, włączając w to przestrzenne efekty zewnętrzne (*spillovers*), czyli wpływ odcinka sieci na zjawiska sieciowe poza obszarem badań w postaci tzw. transportowych efektów sieciowych,
- 2) interakcje między systemem transportowym a środowiskiem naturalnym,
- 3) interakcje między systemem transportowym a rozwojem społeczno-gospodarczym.

W przypadku interakcji w obrębie systemu transportowego (interakcje nr 1), które są przedmiotem badania w niniejszym opracowaniu, efekt inwestycji infrastrukturalnych powinien być ewaluowany poprzez porównanie wskaźników dostępności *z* i *bez* implementacji danego projektu. Dlatego ważnym jest wyznaczenie sytuacji bazowej (*base case*) i sytuacji projektowej (*project case*), a następnie porównanie obu. Ważnym jest również wyznaczenie zasięgu przestrzennego analizowanych efektów projektu infrastrukturalnego, którym może być kontekst europejski lub supranarodowy, narodowy, regionalny, korytarzowy lub sieciowy (Van Excel i in. 2002).

Interakcje w obrębie systemu transportowego na poziomie supranarodowym, w tym przestrzenne efekty zewnętrzne były tematem prac Gutiérrez (2001) i Gutiérrez et. al. (2011). W pierwszej tematem były zmiany dostępności w wyniku budowy linii kolejowej dużej prędkości Madryd-Barcelona-granica hiszpańsko-francuska. W drugiej autorzy wykonując analizę zmian dostępności potencjałowej (*potential accessibility*) w ujęciu międzynarodowym w kontekście realizacji korytarza transportowego TEN-T Priority Project 25 motorway axis Gdansk-Brno/Bratislava-Vienna dochodzą do wniosku, iż projekty o dużej wartości dodanej w kontekście europejskim powinny bardziej zasługiwać na wsparcie finansowe, niż te istotne z punktu widzenia poszczególnych krajów członkowskich (Gutiérrez et. al. 2011). W porównaniu do Gutiérrez et. al. (2011) wartością dodaną w niniejszym artykule jest analiza zmian dostępności w dwóch wymiarach przestrzennych: krajowym i europejskim oraz w podziale na efekty dla krótkich i długich podróży w zależności od postaci oporu przestrzeni (*impedance*).

Najczęstszym podejściem do tematu zmian dostępności w wyniku realizacji inwestycji infrastrukturalnych jest podejście bazujące na wskaźnikach dostępności takich, jak dostępność kumulatywna (*cumulative accessibility*) lub dostępność

potencjałowa (*potential accessibility*) (Linneker i Spence (1996), Gutiérrez i Gómez (1999)). Dostępność potencjałowa jako metoda została wykorzystana również w niniejszym opracowaniu.

## 2. Dostępność i peryferyjność

Dostępność i peryferyjność (*accessibility and peripheralty*) są terminami nieściślemi i nie można mówić o jednej teorii centrum-peryferie (Copus 2001, Ball 1996). Można jednak wyróżnić trzy grupy elementów składających się na koncept peryferyjności: przyczynowe, warunkowe i powiązane (*causal, contingent and associated*). Do elementów przyczynowych peryferyjności można zaliczyć te związane z systemem transportowym oraz użytkowaniem przestrzeni (*land-use*), tj. transport oraz słabe korzyści aglomeracji, natomiast wśród elementów powiązanych wymienia się m.in. słabą lokalną i wewnątrzregionalną infrastrukturę, a także małą gęstość zaludnienia (Copus 2001).

Większość badań peryferyjności wykorzystuje wskaźniki dostępności potencjałowej jako miarę peryferyjności (Spiekermann i in. 2002, Spiekermann i Aalbu 2004). Przy porównaniu dostępności w ujęciu krajowym z dostępnością w wymiarze europejskim dla krajów Unii Europejskiej, można wnioskować, że generalnie peryferyjność w skali europejskiej idzie w parze z peryferyjnością w skali krajowej. Od tej reguły są jednak wyjątki w postaci niektórych regionów w krajach Beneluxu, wzdłuż zachodniej granicy Niemiec, a także Alzacji i Lotaryngii we Francji, które są relatywnie peryferyjnie położone w skali kraju, ale centralne w kontekście europejskim.

Z kolei na południu Europy oraz w krajach skandynawskich peryferyjność w skali europejskiej oznacza również peryferyjność w skali krajowej. Istnieją jednak duże różnice w zależności od poziomu dezagregacji, ponieważ dla krajów skandynawskich liczba ludności żyjących na obszarach peryferyjnych w skali europejskiej rośnie z 27 % (dla NUTS 3) do 46 % (LAU-2) co potwierdza potrzebę dezagregacji przestrzennej analizy dostępności potencjałowej (Spiekermann i Aalbu 2004).

Na obszarze Europy Środkowej również istnieją rejony położone peryferyjnie w skali kraju ale bardziej centralnie w kontekście europejskim. Należą do nich na poziomie NUTS 3: Karlovy Vary w Czechach, Vas na Węgrzech, a także Gorzowski i Zielonogórski w Polsce. Sytuacja województw lubuskiego (podregiony gorzowski i zielonogórski) pod tym względem zmieniła się ze względu na budowę analizowanego w niniejszym artykule odcinka autostrady A2 Świecko-Nowy Tomyśl.

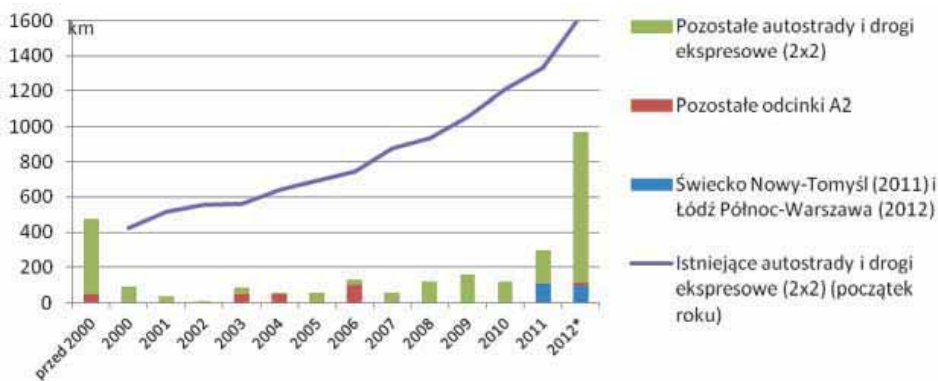
Celem artykułu jest dokonanie ewaluacji znaczenia dla zmian dostępności potencjałowej w kontekście krajowym i międzynarodowym (europejskim) dwóch nowo wybudowanych odcinków autostrady A2 Świecko-Nowy Tomyśl oraz Łódź Północ-Warszawa. Nacisk został położony na lokalizację odcinków w kontekście peryferyjności oraz wymiary dostępności w postaci zasięgu przestrzennego badania i parametrów funkcji oporu przestrzeni utożsamianych z długością podróży.



### 3. Lokalizacja, gęstość zaludnienia, natężenie ruchu na analizowanych odcinkach autostrady A2

Autostrada A2 przebiega równoleżnikowo przez centralne obszary Polski i należy w całości do tzw. sieci bazowej TEN-T. Ponadto stanowi fragment trasy międzynarodowej E30, prowadzącej z Irlandii, przez Wielką Brytanię, Holandię, Niemcy (w tym Berlin), Polskę, Białoruś do Rosji (Moskwa).

Autostrada A2, podobnie jak większość dróg wyższych klas w okresie PRL-u (1945-1989) była zaniedbywana. W latach 70. podjęto decyzje o budowie dużego odcinka łączącego Poznań z Warszawą. Bezpośrednim powodem decyzji była zbliżająca się olimpiada w Moskwie w 1980r. Przez trzy dekady, do 1989r. ukończono jednak jedynie 48 km autostrady w Wielkopolsce na odcinku między Wrześnią (30 tys. mieszk.) a Koninem (80 tys. mieszk.). Ukończenie tego odcinka jako pierwszego jest decyzją kontrowersyjną, ponieważ autostrada docelowo ma łączyć miasta o znacznie większej liczbie mieszkańców, takie jak Warszawa (1700 tys. mieszk.), Łódź (730 tys. mieszk.), Poznań (550 tys. mieszk.). Realizacja ważnych odcinków z punktu widzenia potrzeb popytowych oraz zmian dostępności dużych miast miała miejsce dopiero w 2003r., gdy oddano do użytkowania 50,8 km odcinek łączący Poznań z Wrześnią, wraz z autostradową południową obwodnicą Poznania. W kolejnym roku oddano 50,4 km trasy od Poznania do Nowego Tomysła, a w 2006r. 102 km odcinek między Koninem, a Strykowem (Łódź Północ). Tym samym w 2011 roku istniał 253 km odcinek autostrady w województwie wielkopolskim oraz łódzkim (rys. 1).



Rys. 1. A2 i inne autostrady oraz drogi ekspresowe według lat oddania do użytkowania

Peryferyjny w Polsce, lecz położony relatywnie blisko europejskiego rdzenia 106 km odcinek autostrady A2 między Świeciem (granica z Niemcami) a Nowym Tomysłem w woj. wielkopolskim został oddany w grudniu 2011r. Odcinek przebiega przez tereny lesiste (korytarze ekologiczne), charakteryzujące się niską gęstością zaludnienia. Od granicy z Niemcami na odcinku ok. 50 km gęstość zaludnienia wzdłuż odcinka A2 nie przewyższa 20 mieszk./km<sup>2</sup>. Bliżej granicy z woj. wielkopolskim i w samej Wielkopolsce gęstość ludności wzrasta, ale nadal utrzy-

muje się na relatywnie niskim poziomie, tj. poniżej 50 mieszk./km<sup>2</sup>. Najbliższe miasto powyżej 100 tys. mieszk. (Zielona Góra) oddalone jest od analizowanego odcinka o ponad 50 km. Ruch pojazdów ma głównie charakter międzynarodowy. Odcinkiem tym kieruje się ruch ciężarowy z Polski (oraz tranzyt z krajów bałtyckich) w kierunku Niemiec i innych krajów Europy zachodniej.

Centralnie położony w Polsce, a bardziej oddalony od europejskiego rdzenia odcinek Stryków (Łódź Północ) – Konotopa (Warszawa) został oddany w czerwcu 2012r. Gęstość ludności w centralnej Polsce jest relatywnie wysoka i w większości gmin przez które prowadzi odcinek wynosi ponad 50 mieszk./ km<sup>2</sup>, a w gminach pod Warszawa sięga 80 mieszk./ km<sup>2</sup>. Na odcinku tym ruch tranzytowy miesza się z ruchem lokalnym, przy czym w województwie łódzkim są to głównie dojazdy do miasta Łodzi, a w województwie mazowieckim – dojazdy do Warszawy z gęsto zaludnionych gmin położonych w pasie wzdłuż historycznego szlaku kolei warszawsko-wiedeńskiej od Żyrardowa, przez Grodzisk Mazowiecki i Pruszków do Warszawy.

W świetle badań GUS wysokie wynagrodzenia możliwe do osiągnięcia w Warszawie są czynnikiem, który przyciąga dojeżdżających do pracy nawet z dalszych odległości. Przykładowo w 2012r. dzięki nowemu odcinkowi autostrady czas przejazdu z oddalonego o niecałe 60 km Żyrardowa do Warszawy skrócił się dwukrotnie, tj. z około 80 do 40 minut. Tym samym dzięki redukcji kongestii na wjeździe do Warszawy zmniejsza się poczucie peryferyjności mieszkańców miast takich jak Żyrardów. Wjeżdżający do stolicy Polski z południowego-zachodu autostradą A2 kierują się w 2012r. na węzle Konotopa w stronę północnych i zachodnich dzielnic Warszawy drogą ekspresową S8 a w 2013r. uzyskają możliwość kontynuowania podróży również w kierunku południowych i wschodnich dzielnic drogą ekspresową S2 (Południowa Obwodnica Warszawy) (tab. 1).

Tablica 1. Parametry odcinków A2 Świecko-Nowy Tomyśl i Stryków (Łódź Północ) –Konotopa (Warszawa)

	Świecko (granica polsko-niemiecka)- Nowy Tomyśl (woj. wielkopolskie)	Stryków (Łódź Północ) – Konotopa (Warszawa)
<b>Długość (km)</b>	106 km w tym: 92,5 km – lubuskie 13,4 km - wielkopolskie	91 km w tym: 46,2 km – łódzkie 44,8 km - mazowieckie
<b>Charakterystyka odcinka</b>	Autostrada płatna (zamknięty system pobierania opłat) realizowana w systemie koncesyjnym; koncesjonariusz Autostrada Wielkopolska SA II – umowa koncesyjna do 2037r.	Autostrada docelowo płatna (zamknięty system pobierania opłat) budowana przez państwo
<b>Przekrój jezdni</b>	2x2; nawierzchnia betonowa	2x2 (docelowo 2x3) z wyjątkiem ostatniego odcinka przed Warszawą Pruszków-Konotopa 2x3 (docelowo 2x4)
<b>Liczba węzłów drogowych</b>	6 (docelowo 8), w tym planowane otwarcie w 2013r. węzła Jordanowo łączącego A2 z drogą ekspresową S3	8 (w tym węzeł Stryków (Łódź Północ))
<b>Koszt budowy</b>	1298 mln €; (12,2 mln za 1 km)	873 mln €; (9,6 mln za 1 km)

#### 4. Wymiary dostępności

Wśród ekonomistów, planistów i geografów istnieje duża różnorodność w klasyfikacji metod analizy dostępności. Bruinsma i Rietveld (1998) wyróżniają aż jedenaście alternatywnych sposobów mierzenia dostępności, Song (1996) wyróżnia dziewięć miar dostępności. Baradaran i Ramjerdi (2001) piszą o pięciu podejściach teoretycznych. Geurs i van Wee (2004) identyfikują cztery podstawowe grupy metod, a Geurs i Ritsema van Eck (2001) opisują trzy grupy metod (w tym kilka podgrup). Trzy typy dostępności zostały wyodrębnione również dla wskaźników złożonych przez Spiekermanna i Neubauera (2002).

Część bardziej wyrafinowanych metod badawczych bazuje na znacznym spersonifikowaniu wskaźników dostępności. Jednak przy analizie zmian dostępności w wyniku realizacji inwestycji infrastrukturalnych wykorzystanie tzw. komponentu indywidualnego bez wyczerpujących badań uczestników ruchu na danym odcinku jest znacznie utrudnione. Z tego względu przy analizie zmian dostępności w wyniku oddania do użytkowania nowego odcinka drogi wykorzystuje się znacznie mniejszą liczbę metod badawczych. Linneker i Spence (1996) mierząc efekt zmian dostępności w wyniku realizacji obwodnicy Londynu M25 wykorzystali jako miarę zmian dostępności potencjał rynkowy. Gutiérrez i Gómez (1999) użyli trzech wskaźników do ewaluacji zmian dostępności w wyniku budowy obwodnicy Madrytu M-40. Do miar dostępności należał ważony średni koszt podróży, dostępność kumulatywna oraz potencjał ekonomiczny i demograficzny. W kolejnej publikacji Gutiérrez (2001) szacując zmiany dostępności w następstwie budowy linii kolejowej dużej prędkości Madryd-Barcelona-granica hiszpańsko-francuska wykorzystał ponownie wyżej wymienione trzy wskaźniki dostępności, z tą różnicą, że dla dostępności kumulatywnej limit czasowy dla tak dużej międzyregionalnej inwestycji wynosił w Gutiérrez (2001) 4 godziny (dostępność dzienna), a nie jak w przypadku Gutiérrez i Gómez (1999) jedynie 20 i 30 minut właściwe w transporcie aglomeracyjnym. Warto zauważyć, że Linneker i Spence (1996), Gutiérrez i Gómez (1999) i Gutiérrez (2001) wykorzystywali w analizie dostępność potencjałową (*potential accessibility*) określoną za pomocą ogólnego wskaźnika (Spiekermann, Neubauer 2002):

$$A_i = \sum_j g(M_j) f(c_{ij}) \quad (1)$$

gdzie:

$A_i$  – dostępność transportowa rejonu komunikacyjnego  $i$ ,

$M_j$  – masy dostępne w rejonie komunikacyjnym  $j$ ,

$c_{ij}$  – łączna odległość fizyczna, czasowa (czas) lub ekonomiczna (koszt) związana z podróżą/przewozem z rejonu komunikacyjnego  $i$  do rejonu komunikacyjnego  $j$ .

Niezależnie od przyjętej metody badania dostępności można wyróżnić dwa podstawowe komponenty dostępności: **komponent użytkowania przestrzeni**

(*land-use component* -  $g(M_i)$ ) oraz **komponent transportowy** (*transport component* -  $f(c_{ij})$ ), które w szerszym ujęciu uzupełniają również komponent okresowy (*temporal component*) i komponent indywidualny (*individual component*) (Geurs, Ritsema van Eck 2001).

Poszczególne komponenty można interpretować w kontekście tzw. wymiarów dostępności. Listę wymiarów podaje m.in. Spiekermann i Neubauer (2002). Do wymiarów dostępności związanych z komponentem użytkowania przestrzeni należą m.in.: źródła podróży, cele podróży oraz zasięg przestrzenny badania i aspekt spójności terytorialnej.

Do wymiarów dostępności związanych z komponentem transportowym (*transport component*) należą: typy transportu, gałęzie transportu, ograniczenia, bariery, a także tzw. opór przestrzeni (*distance decay*). Wskaźniki dostępności można analizować w ujęciu statycznym oraz dynamicznym.

W niniejszym artykule szczególnie istotne są trzy wymiary dostępności, dwa związane z komponentem użytkowania przestrzeni, tj. zasięg przestrzenny badania i aspekt spójności oraz jeden związany z komponentem transportowym, czyli opór przestrzeni. Analizie poddano zmiany dostępności w dwóch ujęciach przestrzennym: krajowym oraz kontynentalnym (europejskim), a także dla dwóch odcinków mających z punktu widzenia spójności charakter peryferyjny lub centralny w zależności od kontekstu przestrzennego.

**Zasięg przestrzenny badania.** W kontekście europejskim analizy zmian dostępności drogowej prowadzone są od początku lat osiemdziesiątych (Keeble i in. 1982, Schürmann i in. 1997). Powyższe badania dały podstawę do kolejnych cyklicznych badań dostępności potencjałowej przestrzeni europejskiej do ludności oraz PKB na poziomie NUTS 3, w tym wykonanych przez Wegenera i in. (2001). Jako bariery uwzględniony został w tym badaniu czas oczekiwania na granicach państwowych. W dalszych badaniach dostępności potencjałowej przestrzeni europejskiej zespołu prowadzonego przez K. Spiekermanna dokonano aktualizacji wskaźników dostępności drogowej oraz pokazano zmiany jakie były wynikiem rozbudowy sieci transportowych w powiększającej się Unii Europejskiej, w tym o Polskę (Spiekermann, Schürmann 2007). W badaniach dostępności drogowej dla mniejszych jednostek (LAU-1 lub LAU-2) zasięg przestrzenny jest najczęściej ograniczony do terytorium jednego państwa (Bröcker 1989, Geurs i Ritsema van Eck (2001), Holl 2007, Kotavaara (2011)). Niektóre analizy dotyczą grupy państw, czyli dostępności w ujęciu transgranicznym (Spiekermann i Aalbu (2004)). Brakuje analiz dostępności (z wyjątkiem Spiekermann i Aalbu 2004), które z jednej strony łączyłyby wysoki poziom dezagregacji przestrzennej (np. LAU-2) przy jednoczesnym szerokim, np. europejskim zasięgu przestrzennym.

**Funkcja oporu przestrzeni.** Istotą wskaźników dostępności potencjałowej jest to, iż wraz z rosnącą odległością podróży (odległością fizyczną, czasowa, kosztowa lub wygodą podróżowania) maleje atrakcyjność celu podróży. Charakter spadku atrakcyjności celu podróży jest mierzony za pomocą funkcji oporu przestrzeni. Do najczęściej używanych w literaturze przedmiotu form funkcyjnych należą (Geurs i Ritsema van Eck 2001): potęgowa, wykładnicza lub funkcja log-logistyczna.

Wybór formy funkcyjnej oraz wysokości parametrów zależy m.in. od takich czynników jak: gałąź transportu, motywacja podróży, cechy charakterystyczne uczestnika ruchu oraz celu podróży.

**Długość podróży.** Funkcja wykładnicza jest jedną z tych funkcji, która znajduje zastosowanie w badaniach dostępności na poziomie krajowym lub międzynarodowym oraz w podróżach międzyaglomeracyjnych, podczas gdy na poziomie lokalnym, w podróżach wewnątrzaglomeracyjnych właściwsze jest zastosowanie funkcji potęgowej, charakteryzującej się większą stromizną funkcji (Fotheringham 1983) lub funkcji wykładniczej o relatywnie wysokim wskaźniku  $\beta$ , np. jak u Dalvi i Martin (1976) rzędu 0,17-0,225. W badaniach na poziomie europejskim wskaźnik  $\beta$  jest już znacznie niższy i wynosi dla transportu osobowego np. 0,007 (Schürmann i Talaat 2000) lub 0,005 (Spiekermann i Schürmann 2007). Wrażliwość wyników modelu potencjału na zmiany parametrów funkcji oporu przestrzeni była tematem rozważań m.in. Ingram (1971), Dalvi i Martin (1976), Bröcker (1989), Song (1996) i Geurs i Ritsema van Eck (2001).

## 5. Założenia analizy empirycznej

Ogólny wskaźnik dostępności potencjałowej został zdefiniowany jako suma trzech elementów, tj. (por. Tóth, Kincses 2011):

- potencjału własnego -  $\sum_j M_i \exp(-\beta t_{ij})$
- potencjału krajowego
- potencjału zewnętrznego

$$A_i = M_i \exp(-\beta t_{ii}) + \sum_j M_j \exp(-\beta t_{ij}) + \sum_k M_k \exp(-\beta t_{ik}) \quad (2)$$

gdzie:

$M_i$  – masa własna (liczba ludności) rejonu komunikacyjnego  $i$ ,

$M_j$  – masa (liczba ludności) rejonu komunikacyjnego  $j$  położonego na terytorium Polski,

$M_k$  – masa (liczba ludności) rejonu komunikacyjnego  $k$  leżącego poza terytorium Polski,

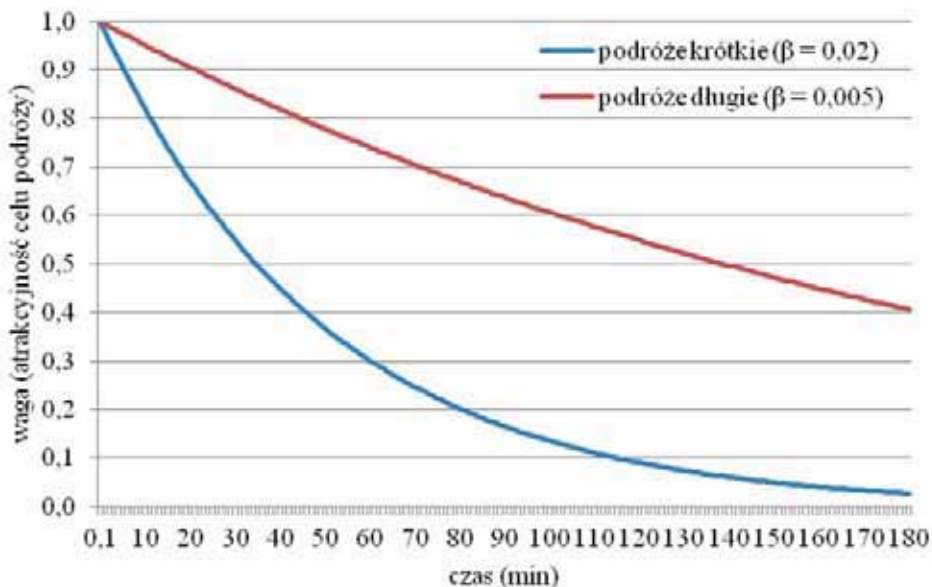
$t_{ii}$  – czas podróży wewnętrznej w rejonie komunikacyjnym  $i$ ,

$t_{ij}$  – czas podróży między rejonami komunikacyjnymi  $i$  oraz  $j$  leżącymi na terytorium Polski,

$t_{ik}$  – czas podróży między rejonami komunikacyjnymi  $i$  oraz  $k$ , gdzie  $k$  jest rejonem komunikacyjnym poza terytorium Polski,

$\beta$  – parametr beta, dla podróży krótkich założono, że wynosi 0,02, dla podróży długich 0,005.

Parametr  $\beta$  decyduje o stromiznie funkcji oporu przestrzeni (*distance decay*). Dla wykorzystanych w niniejszym artykule wartości parametru  $\beta$  dla podróży krótkich (0,02) i długich (0,005) funkcja oporu przestrzeni obrazująca spadek atrakcyjności celu podróży następujący wraz z wydłużaniem się czasu podróży została przedstawiona na rys. 2.



Rys. 2. Funkcja oporu przestrzeni dla podróży krótkich i długich

**Masy w Polsce.** W Polsce wyodrębniono 2321 rejonów komunikacyjnych spośród zbioru 2479 gmin w Polsce w 2010r. wybrano miasta (lub wsie), w których znajduje się siedziba gminy. W każdym z rejonów komunikacyjnych wyodrębniono miejscowość węzłową według siedziby gminy. Liczba ludności 2321 rejonów komunikacyjnych na poziomie gminnym w Polsce została obliczona na podstawie danych GUS z 2008 roku. Założono, że masa rejonu komunikacyjnego jest przypisana do węzła.

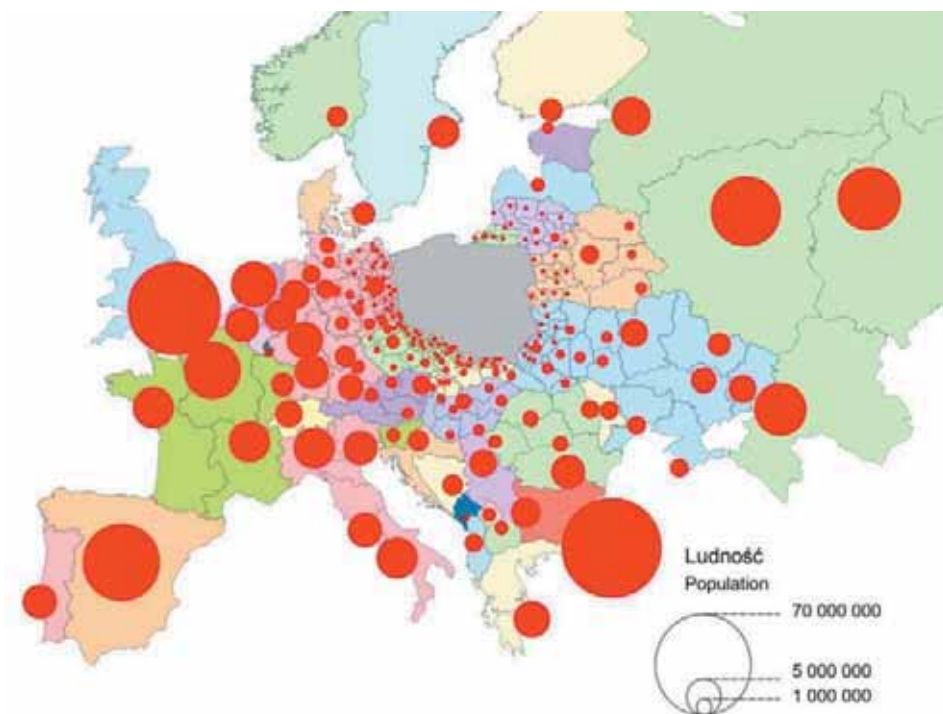
**Masy poza Polską.** Poza Polską wyodrębniono 212 rejonów komunikacyjnych, które swoim zasięgiem pokryły całą Europę kontynentalną, wraz z europejską częścią Rosji oraz Turcją. Ze względu na znaczne oddalenie od Polski oraz utrudnienia związane z przeprawą promową wykluczono z badania wyspy Morza Śródziemnego (państwa Cypr i Maltę, oraz części państw, tj. wyspy takie jak Sycylia, Korsyka i inne), a także Irlandię i Islandię. Włączono natomiast możliwość przejazdu samochodem do Wielkiej Brytanii (z wykluczeniem Irlandii Północnej).

Głównym kryterium delimitacji rejonów komunikacyjnych była odległość od polskiej granicy. Liczba rejonów komunikacyjnych była najwyższa w bezpośredniej bliskości granicy z Polską (do ok. 30-50 km), a następnie wraz z oddalaniem się od



granicy ich liczba malała. Im dalej położony od granicy był cel podróży, tym masa rejonu komunikacyjnego mogła być wyższa.

Rejony komunikacyjne położone przy granicy z Polską w Czechach oraz na Słowacji były to jednostki LAU 1 (lub grupy jednostek LAU 1). W Niemczech, gdzie jednostki LAU 1 są znacznie mniejsze wybrano do analizy jednostki NUTS 3 (lub grupy jednostek NUTS 3). Podobnie na Litwie, gdzie cały kraj podzielono na 10 rejonów komunikacyjnych, zgodnie z podziałem według klasyfikacji NUTS 3. Dla krajów nie należących do systemu klasyfikacji jednostek terytorialnych NUTS, tj. Rosji, Białorusi oraz Ukrainy, uwzględniono podział administracyjny obowiązujący w poszczególnych państwach. Na Ukrainie i Białorusi wykorzystano podział na obwody oraz – dla obwodów graniczących z Polską – rejon. Obszar eksklawy Obwodu Kaliningradzkiego podzielono również na grupy rejonów. Pozostały obszar europejskiej części Rosji został włączony w postaci czterech okręgów federalnych. Rejony komunikacyjne położone w dalszej odległości od granicy z Polską, najczęściej odpowiadały w krajach Unii Europejskiej obszarom NUTS 2, NUTS 1 oraz poszczególnym państwom (NUTS 0).



Rys. 3. Liczba ludności w 212 rejonach komunikacyjnych poza Polską

Miasta charakteryzujące się największą liczbą ludności na obszarze danego rejonu komunikacyjnego są jednocześnie miastami węzłowymi, tj. tymi, którym przypisano masę całego rejonu komunikacyjnego. Do tych miast obliczono czas przejazdu transportem drogowym z miast węzłowych w Polsce. Liczba ludności

w rejonach komunikacyjnych położonych w krajach Unii Europejskiej została obliczona na podstawie danych z Eurostat za rok 2008. W przypadku rejonów komunikacyjnych w Czechach oraz na Słowacji obejmujących obszar LAU 1 (lub grupujących LAU 1) źródłem danych dotyczących liczby ludności były odpowiednie urzędy statystyczne w Czechach oraz na Słowacji. W przypadku różnic w danych pomiędzy NUTS 3 (Eurostat), a sumą liczby ludności w poszczególnych LAU 1 należących do tego samego NUTS 3 według urzędów statystycznych Czech i Słowacji, dokonano na poziomie LAU 1 przeszacowania zgodnie z zasadą, iż suma mas jednostek niższego rzędu musi odpowiadać masie jednostki wyższego rzędu. Eurostat był również źródłem danych dotyczących liczby ludności dla następujących krajów europejskich znajdujących się poza Unią Europejską: Bośnia i Hercegowina, Chorwacja, Macedonia, Czarnogóra, Albania, Mołdawia, Norwegia, Serbia, Szwajcaria, Turcja oraz Kosowo. Liczba ludności w rejonach komunikacyjnych w Rosji, na Ukrainie oraz na Białorusi została obliczona na podstawie danych z urzędów statystycznych tych krajów.

**Prędkości w Polsce.** W Polsce prędkości pojazdów osobowych i ciężarowych zostały określone w ramach modelu prędkości ruchu zbudowanego dla samochodów osobowych. Sieć drogowa zaktualizowana na koniec 2011 r. zawiera wszystkie odcinki istniejących dróg krajowych i wojewódzkich (10,7 tys. rekordów) oraz wybrane odcinki dróg gminnych i powiatowych (2 tys. rekordów). Wszystkie 2321 miejscowości węzłowych w rejonach komunikacyjnych podłączono do sieci. Odcinki zostały ponadto podzielone na pododcinki o długości 100 m w celu obliczenia przeciętnej.

Model prędkości ruchu dla Polski został opracowany przy założeniu wpływu trzech zmiennych na prędkość pojazdów (Komornicki i in. 2010, Rosik 2012):

- liczby ludności w buforze 5 km w otoczeniu każdego 100-metrowego odcinka na podstawie rozmieszczenia ludności w rejonach spisowych w 2008 r.,
- odsetka obszaru zabudowanego w buforze 100-metrowego odcinka,
- ukształtowania terenu w postaci odchylenia standardowego różnic wysokości w heksagonie o boku 3 kilometrów na podstawie bazy wysokościowej numerycznego modelu terenu według SRTM-3.

Ludność w otoczeniu odcinka, przejazd przez teren zabudowany oraz ukształtowanie terenu wpływają w różny sposób na prędkość pojazdu w zależności od kategorii drogi oraz jej szerokości. Wyróżniono 14 typów dróg w zależności od kategorii drogi i jej szerokości. Funkcje, które opisują zależności między prędkością pojazdu a zmiennymi ją warunkującymi są funkcjami logitowymi. Zaletą funkcji logitowych jest ich s-kształtny charakter. Redukcja prędkości ma charakter ciągły w zależności od liczby ludności w buforze odcinka, odsetka obszaru zabudowanego lub ukształtowania powierzchni terenu. Ogólny wpływ poszczególnych zmiennych w modelu na prędkość pojazdów na odcinku drogi wyliczono się za pomocą tzw. „zasady najslabszego ogniwa”. Zasada ta polega na tym, że przy obliczaniu średniej prędkości na danym odcinku wybiera się minimalną prędkość, wynikającą z wpływu trzech zmiennych warunkujących prędkość.

**Potencjał własny.** Przy obliczaniu czasów przejazdu wewnątrz rejonów komunikacyjnych przyjęto stosunkowo prostą zasadę. Przyrównano obszar rejonu komunikacyjnego do koła o powierzchni  $\pi r^2$ . Założono, że średnia odległość podróży wewnątrz rejonu jest równa połowie promienia  $r$ . Podobnie założyli m.in. Stewart (1947), Rich (1978), Keeble i in. (1982) oraz Gutiérrez i in. (2011). Szeroką dyskusję na temat wrażliwości wyników modelu potencjału na długość podróży wewnętrznej w rejonie komunikacyjnym przeprowadzono w Frost i Spence (1995). Czas podróży wewnętrznej wynika ze wzoru:

$$t_{ii} = \frac{0,5 \sqrt{\frac{area}{\pi}}}{v_{ii}} \times 60 \quad (3)$$

gdzie:

$\overline{t}_{ii}$  – czas podróży wewnątrz rejonu komunikacyjnego (min),

$v_{ii}$  – średnia prędkość podróży wewnątrz rejonu komunikacyjnego (km/h),

$area$  – powierzchnia rejonu komunikacyjnego (km).

Zdecydowano się jednak na znaczące uproszczenie i założono, że średnia prędkość wewnątrz rejonu komunikacyjnego wyniesie 20 km/h, co jest prędkością dużo niższą niż np. 40 km/h założone dla Finlandii przez Kotaavara (2011), ale przy relatywnie dużej gęstości zaludnienia oraz kiepskim stanie dróg lokalnych w Polsce jest to wysokość racjonalna.

**Czasy oczekiwania na granicy.** Założono, że na całej granicy wschodniej (granica z Ukrainą, Białorusią i Rosją – Obwodem Kaliningradzkim), która jest zewnętrzną granicą strefy Schengen minimalny czas oczekiwania na przejazd na przejściu granicznym (wraz z odprawą) wynosi 1 godzinę. Pozostałe czasy wynikają ze średniej w wywozie i przywozie dla pojazdów osobowych na podstawie danych Straży Granicznej dla okresu zima 2010-2011 i lato 2011.

**Prędkości poza Polską.** Prędkości w ruchu poza Polską dla pozostałych krajów europejskich nie były łatwe do ustalenia. Brak odpowiednich danych niezbędnych do skonstruowania modelu prędkości ruchu analogicznego jak w Polsce skutkowało potrzebą arbitralnego wyznaczenia prędkości w zależności od przepisów drogowych obowiązujących w danym kraju. Drogi poza granicami Polski podzielono na cztery kategorie: autostrady, pozostałe drogi dwujezdniowe, drogi główne oraz drogi drugorzędne. Dla dróg głównych i drugorzędnych konieczne było również dostosowanie prędkości, tak by na obszarach przygranicznych nie różniła się ona znacząco, od prędkości wynikającej z modelu prędkości ruchu dla Polski. Założono, że na Ukrainie, ze względu na katastrofalny stan dróg, uzyskiwane prędkości na drogach drugorzędnych są znacznie niższe niż w pozostałych krajach graniczących z Polską. Najwyższe prędkości wśród krajów sąsiednich na drogach drugorzędnych, ze względu na najlepszy stan dróg, przypisano Niemcom. Dla Niemiec ponadto, mimo braku formalnych ograniczeń prędkości, założono w modelu prędkość na autostradach równą 130 km/h. Czasy przejazdu między wszystkimi miastami węzłowymi obliczono na podstawie algorytmu najkrótszej ścieżki podróży.

## 6. Rezultaty analizy

Rezultaty analizy zmian dostępności transportowej w wyniku realizacji dwóch odcinków autostradowych A2 Świecko-Nowy Tomyśl oraz Stryków-Konotopa można przedstawić w formie czterech wariantów. Warianty różnią się między sobą w zależności od:

- zasięgu przestrzennego badania (krajowy oraz międzynarodowy (europejski)),
- długości podróży (podróże krótkie –  $\beta = 0,02$  i podróże długie –  $\beta = 0,005$ ).

Dla każdego z wariantów wzór dostępności potencjałowej wygląda nieco inaczej (tab. 2).

Tablica 2. Warianty analizy dostępności w zależności od zasięgu przestrzennego badania oraz długości podróży

		Zasięg przestrzenny badania
		Dostępność krajowa
Długość podróży	Podróże krótkie	$A_{i,natshort} = M_i \exp(-0.02t_{ii}) + \sum_j M_j \exp(-0.02t_{ij})$
	Podróże długie	$A_{i,natlong} = M_i \exp(-0.005t_{ii}) + \sum_j M_j \exp(-0.005t_{ij})$
		Dostępność międzynarodowa
Długość podróży	Podróże krótkie	$A_{i,intshort} = M_i \exp(-0.02t_{ii}) + \sum_j M_j \exp(-0.02t_{ij}) + \sum_k M_k \exp(-0.02t_{ik})$
	Podróże długie	$A_{i,intlong} = M_i \exp(-0.005t_{ii}) + \sum_j M_j \exp(-0.005t_{ij}) + \sum_k M_k \exp(-0.005t_{ik})$

Źródło: opracowanie własne

Zmiany dostępności w wyniku ukończenia odcinka autostrady A2 Łódź Północ-Warszawa są bardzo duże i swoim zasięgiem obejmują cały kraj z wyjątkiem południkowego pasma w postaci obszarów wzdłuż autostrady A1 i drogi ekspresowej S7 (mieszkańcy tych obszarów nie wykorzystują odcinka A2 między Łodzią a Warszawą w najkrótszych podróżach samochodem).

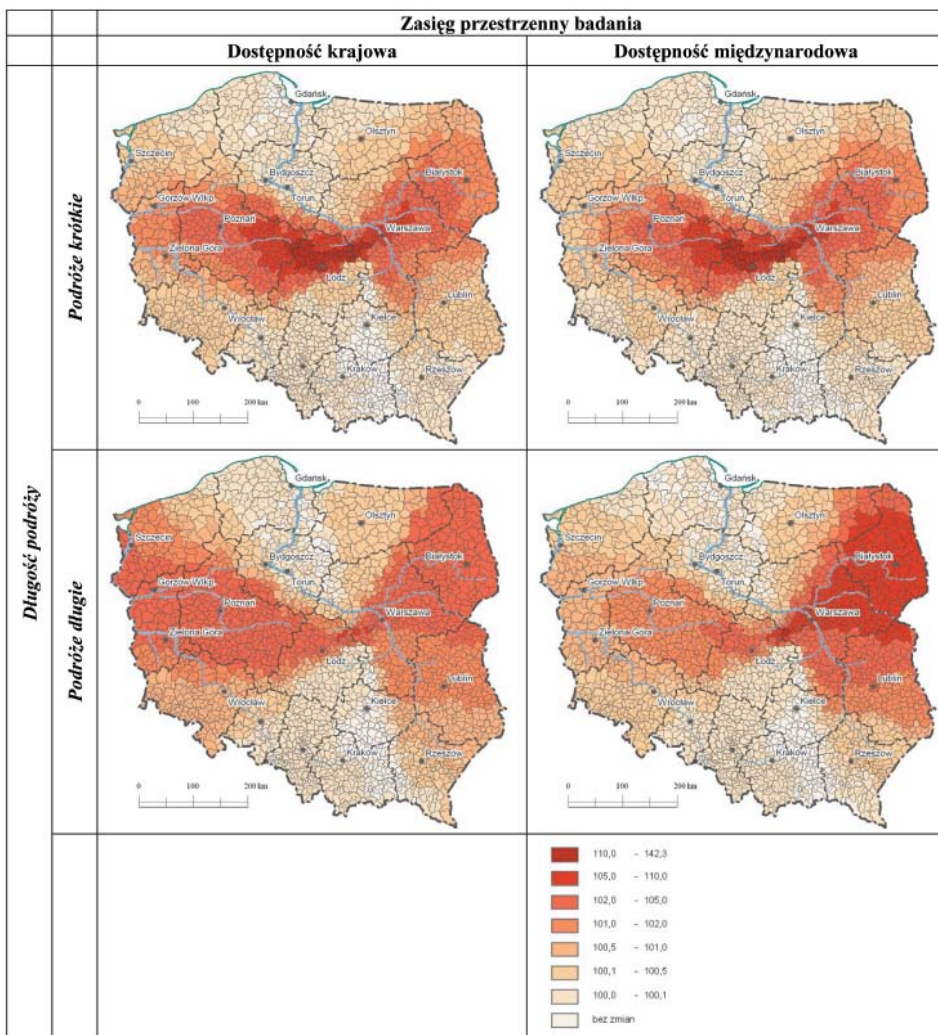
Największe zmiany dostępności (powyżej 10%) w podróżach krótkich mają miejsce z oczywistych względów wzdłuż nowo wybudowanego odcinka A2

(w szczególności w gminach położonych wzdłuż węzłów autostradowych) oraz wzdłuż istniejącego odcinka A2 Konin-Łódź. Dostępność wzrasta powyżej 5% na obszarach w kierunku Poznania oraz Warszawy, a także za Warszawą w kierunku północno-wschodnim wzdłuż drogi ekspresowej S8 Radzymin-Wyszków. Zmiany dostępności powyżej 1% rozciągają się w kierunku zachodnim przez obszar Wielkopolski, aż do granicy polsko-niemieckiej w województwie lubuskim, a także w kierunku północno-wschodnim, na obszar Podlasia, wschodniego i południowego Mazowsza oraz północnych skrajów województwa lubelskiego. Po otwarciu modelu potencjału na całą Europę sytuacja nie zmienia się w sposób znaczący. We wschodniej Polsce zmiany dostępności są niemalże identyczne jak przy dostępności krajowej, co wynika z relatywnie długich czasów oczekiwania na granicy wschodniej. Z kolei w Polsce zachodniej różnica jest widoczna w województwie lubuskim, gdzie w dostępności międzynarodowej otwarcie odcinka A2 Łódź Północ-Warszawa skutkuje zmianami dostępności niższymi niż 1%, czyli znacznie niższymi niż przy dostępności krajowej. Różnica ta wynika z relatywnie niskiego poziomu dostępności krajowej w tym peryferyjnie położonym w skali kraju województwie oraz relatywnie wysokiej dostępności międzynarodowej, która w krótkich podróżach wynika przede wszystkim z bliskości dużej „masy” Berlina.

W **podróżach długich** różnice w dostępności powyżej 5% są charakterystyczne jedynie dla pojedynczych gmin w bezpośredniej bliskości autostrady A2. W porównaniu do podróży krótkich na znacznie większym obszarze kraju (ze względu na znaczne skrócenie czasu podróży do Warszawy i Polski centralnej) zmiany dostępności są w granicach 2% - 5% (po zachodniej stronie kraju województwo wielkopolskie, lubuskie oraz południowa część województwa zachodniopomorskiego). Otwarcie modelu potencjału na Europę skutkuje znacznymi zmianami dostępności (powyżej 5%) głównie w województwie podlaskim (w wachlarzu między Warszawą a przyszlą drogą ekspresową S61 i autostradą A4 w kierunku Kukuryk). W Wielkopolsce zmiany (1% - 2%) są znacznie niższe niż na obszarze północnego lubelskiego oraz południowo-wschodniego Mazowsza. Niewielkie zmiany dostępności w Polsce zachodniej wynikają z jej relatywnie wysokiego wskaźnika dostępności międzynarodowej w podróżach długich (najwyższy poziom w Polsce). Przy wysokiej „bazie” dostępności efekt otwarcia autostrady w centralnej Polsce z tego punktu widzenia nie jest wysoki.

Zmiany dostępności w wyniku oddania do użytkowania odcinaka autostrady A2 **Świecko-Nowy Tomyśl** znacznie różnią się do efektów ukończenia odcinka centralnego A2. W **podróżach krótkich** dostępność krajowa wzrasta znacząco tylko dla mieszkańców obszarów położonych na północ i południe od zachodniego fragmentu odcinka autostrady, dzięki któremu mieszkańcy tych terenów mają możliwość odbywania szybkich podróży w kierunku Poznania. W niewielkim stopniu z nowego odcinaka autostrady korzystają (w sensie poprawy dostępności) mieszkańcy zachodniej Wielkopolski. Przy otwarciu modelu dostępności na poziom europejski w krótkich podróżach zyskują nie tylko mieszkańcy pogranicza, ale również wszystkie gminy położone wzdłuż trasy A2, a poprawa dostępności powyżej 2% jest odczuwalna nawet na wschodzie Wielkopolski.



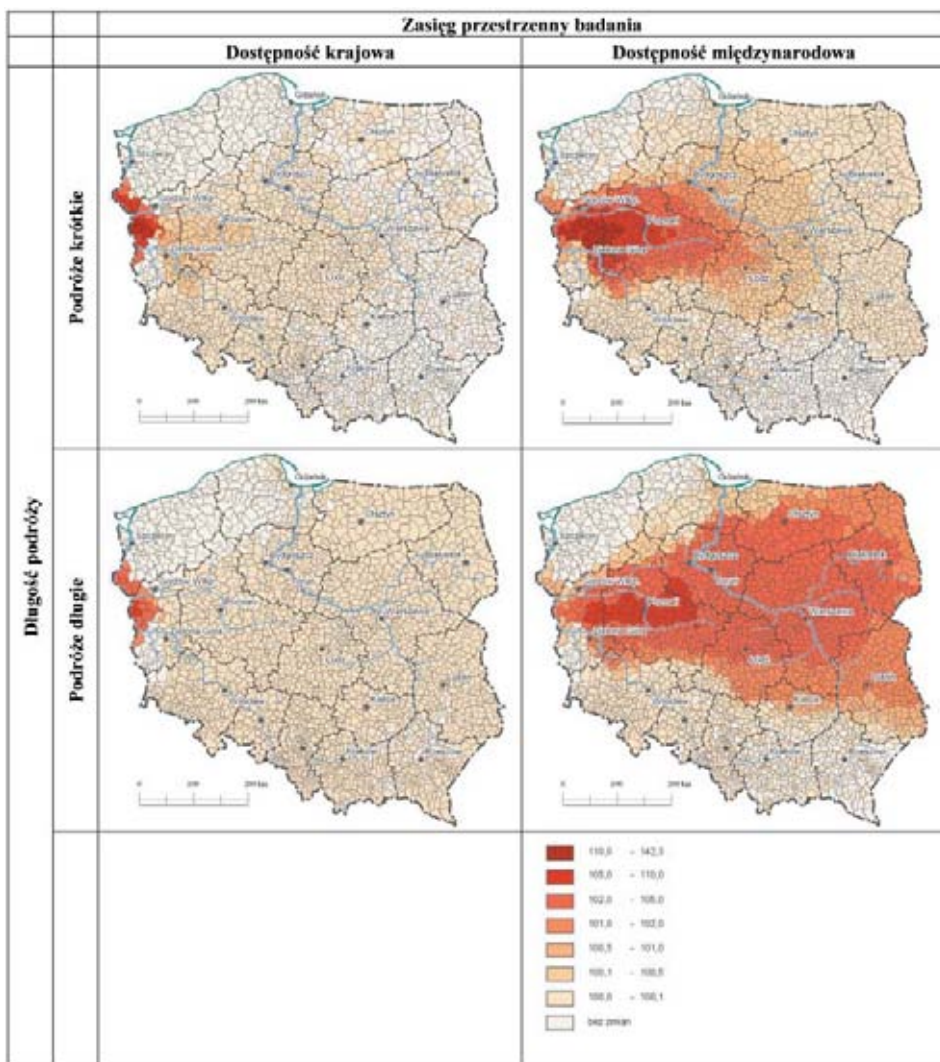


Rys. 4. Zmiany dostępności potencjałowej w wyniku oddania do użytkowania odcinka A2 Łódź Północ-Warszawa

W podróżyach długich efekt zmian dostępności krajowej jest podobny jak przy podróżyach krótkich. Zyskują głównie obszary pogranicza polsko-niemieckiego. Zmiany w ujęciu procentowym są znacznie niższe niż przy podróżyach krótkich, aczkolwiek mają większy zasięg przestrzenny i w zasadzie mieszkańcy całego kraju (z wyjątkiem Pomorza) w niewielkim stopniu korzystają z odcinka Świecko-Nowy Tomyśl w podróżyach długich. Z kolei otwarcie modelu na poziom europejski charakterystycznie wydłuża wachlarz oddziaływania odcinka na obszar całego kraju z wyjątkiem Pomorza i województw Polski południowej. W położonej na drugim końcu Polski Hajnówce zmiana dostępności przekracza dla podróży długich 2%!



Dla obszarów Polski północno-wschodniej odcinek A2 Świecko-Nowy Tomyśl jest bardzo ważny na dłuższych trasach i prawie nieistotny w podróżach krótkich.



Rys. 5. Zmiany dostępności potencjalowej w wyniku oddania do użytkowania odcinka A2 Świecko-Nowy Tomyśl

## 7. Wnioski

W analizie dostępności bardzo ważnym czynnikiem jest długość podróży. Nie można porównywać efektu zmian dostępności w wyniku realizacji kilku lub więcej odcinków drogowych bez wskazania w metodyce badawczej na długość podróży oraz zasięg przestrzenny badania.

W artykule wskazano, iż różnice w zmianach dostępności między krótkimi i długimi podróżami są najwyższe w kontekście międzynarodowym po otwarciu odcinka peryferyjnego położonego blisko tzw. europejskiego rdzenia (Świecko-Nowy Tomyśl). Jednocześnie odcinek ten nie ma dużego znaczenia dla zmian dostępności w ujęciu krajowym (niezależnie od długości podróży). Z kolei odcinek położony w centralnej Polsce skutkuje generalnie większymi zmianami dostępności na obszarze całego kraju. Jednak różnice między wariantami w zmianach dostępności nie są tak duże jak przy odcinku peryferyjnym.

Przy podróżach długich zmiany dostępności są widoczne również w regionach peryferyjnych, charakteryzujących się niską „bazą” dostępności. Przykładem jest obszar województwa podlaskiego zyskujący w podróżach długich zarówno na odcinku centralnym Łódź-Warszawa, jak i odcinku Świecko-Nowy Tomyśl, co prawda położonym na drugim końcu Polski, ale znacznie „przybliżającym” atrakcyjne cele podróży, takie jak np. Berlin.

Zastosowana w niniejszym artykule metoda badawcza w postaci tzw. dostępności potencjałowej daje ogromne możliwości ewaluacyjne zarówno w formie ewaluacji *ex-post* jak i *ex-ante*. Dzięki zastosowaniu modelu potencjału istnieje możliwość porównywania odcinków sieci drogowej pod kątem zmian dostępności w zależności od długości podróży, zasięgu przestrzennego badania, a także, co nie było tematem niniejszego artykułu, z punktu widzenia atrakcyjności celu podróży, a także typu i gałęzi transportu lub motywacji podróży.

## Literatura

- [1] Ball R., 1996, Local sensitivities and the representation of peripherality, *Journal of Transport Geography*, 4 (1), pp. 27-36.
- [2] Baradaran S., Ramjerdi F., 2001, Performance of Accessibility Measures in Europe, *Journal of Transportation and Statistics*, 4, 2-3, pp. 31-48.
- [3] Bröcker J., 1989, How to eliminate certain defects of the potential formula, *Environment and Planning A*, 21, 6, pp. 817-830.
- [4] Bruinsma F.R., Rietveld P., 1998, The Accessibility of European Cities: Theoretical Framework and Comparison of Approaches. *Environment and Planning*, 30, 3, pp. 499-521.
- [5] Copus A.K., 2001, From core-periphery to polycentric development: concepts of spatial and aspatial peripherality, *European Planning Studies*, 9 (4), pp. 539-552.
- [6] Dalvi M.Q., Martin K.M., 1976, The measurement of accessibility: some preliminary results, *Transportation*, 5, pp. 17-42.
- [7] Fotheringham A.S., 1983, A new set of spatial-interaction models: the theory of competing destinations, *Environment and Planning A*, 15, pp. 15-36.

- [8] Frost M. E., Spence N. A., 1995, The Rediscovery of Accessibility and Economic Potential: the Critical Issue of Self-potential. *Environment and Planning A*, 27, pp. 1833-1848.
- [9] Geurs K. T., Ritsema van Eck, 2001, Accessibility Measures: Review and Applications. RIVM report 408505 006, National Institute of Public Health and the Environment, Bilthoven.
- [10] Geurs K. T., van Wee B., 2004, Accessibility Evaluation of Land-use and Transport Strategies: Review and Research Directions. *Journal of Transport Geography*, 12, pp. 127-140.
- [11] Gutiérrez J., 2001, Location, economic potential and daily accessibility: an analysis of the accessibility impact of the high-speed line Madrid-Barcelona-French border, *Journal of Transport Geography*, 9, pp. 229-242
- [12] Gutiérrez J., Condeco-Melhorado A., López E., Monzón A., 2011, Evaluating the European added value of TEN-T projects: a methodological proposal based on spatial spillovers, accessibility and GIS, *Journal of Transport Geography*.
- [13] Gutiérrez J., Gómez G., 1999, The impact of orbital motorways on intrametropolitan accessibility: the case of Madrid's M-40, *Journal of Transport Geography*, 7, pp. 1-15.
- [14] Ingram D. R., 1971, The Concept of Accessibility: a Search for an Operational Form. *Regional Studies* 5, pp. 101-107.
- [15] Keeble, D., Owens, P.L., Thompson, C., 1982, Regional accessibility and economic potential in the European Community, *Regional Studies* 16, pp. 419-432.
- [16] Komornicki T., Śleszyński P., Rosik P., Pomianowski W., 2010, Dostępność przestrzenna jako przesłanka kształtowania polskiej polityki transportowej, *Biuletyn KPZK PAN*, Warszawa, vol. 241, 165 pp.
- [17] Kotavaara O., Antikainen H., Rusanen J., 2011, Population change and accessibility by road and rail networks: GIS and statistical approach to Finland 1970–2007, *Journal of Transport Geography*, 19, pp. 926-935.
- [18] Laird J.L., Nellthorp J., Mackie P.J., 2005, Network effects and total economic impact in transport appraisal, *Transport Policy*, 12, pp. 537-544.
- [19] Linneker B., Spence N., 1996, Road transport infrastructure and regional economic development. The regional development effects of the M25 London orbital motorway, *Journal of Transport Geography*, 4, 2, pp. 77-92.
- [20] Rich D.C., 1978, Population potential, potential transportation cost and industrial location, *Area*, 10, pp. 222–226.
- [21] Rosik P., 2012, Dostępność lądowa przestrzeni Polski w wymiarze europejskim, *Prace Geograficzne, IGiPZ PAN*, Warszawa, vol. 233, 307 pp.
- [22] Schürmann, C., Spiekermann, K., Wegener, M., 1997, Accessibility Indicators. *Berichte aus dem Institut für Raumplanung* 39, Dortmund: Institute of Spatial Planning, University of Dortmund.

- [23] Schürmann, C., Talaat, A., 2000, Towards a European Peripherality Index. Final Report. Report for General Directorate XVI Regional Policy of the European Commission, Berichte aus dem Institut für Raumplanung 53, Dortmund, IRPUD.
- [24] Song S., 1996, Some tests of alternative accessibility measures: a population density approach, *Land Economics*, 72, 4, pp. 474-482.
- [25] Spiekermann K., Neubauer J., 2002, European Accessibility and Peripherality: Concepts, Models and Indicators. Nordregio Working Paper, Stockholm.
- [26] Spiekermann K., Schürmann C., 2007, Update of selected potential accessibility indicators. Final report, Spiekermann & Wegener, Urban and Regional Research (S&W), RRG Spatial Planning and Geoinformation.
- [27] Spiekermann, K., Aalbu, H., 2004, Nordic Peripherality in Europe. Nordregio Report 2005, 4, Stockholm.
- [28] Spiekermann, K., Wegener M., Copus, A., 2002, Review of Peripherality Indices and Identification of Baseline Indicator, Deliverable 1 of AsPIRE – Aspatial Peripherality, Innovation, and the Rural Economy. Dortmund/Aberdeen: S&W, IRPUD, SAC.
- [29] Stewart J. Q., 1947, Empirical Mathematical Rules Concerning the Distribution and Equilibrium of Population. *Geography Review* 37, pp. 461–485.
- [30] Tóth G., Kincses Á., 2011, Factors of accessibility potential models, *Regional Science Inquiry Journal*, 3 (1), pp. 27-44.
- [31] Van Excel J., Rienstra S., Gommers M., Pearman A., Tsamboulas D., 2002, EU involvement in TEN development: network effects and European value added, *Transport Policy*, 9, pp. 299-311.
- [32] Vickerman R., 2000, Evaluation methodologies for transport projects in the United Kingdom, *Transport Policy*, 7, pp. 7-16.
- [33] Wegener, M., Eskelinnen, H., Fürst, F., Schürmann, C., Spiekermann, K., 2001, Criteria for the Spatial Differentiation of the EU Territory: Geographical Position, *Forschungen* 102, 2, Bonn, Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung.

## TWORZENIE MODELI PODRÓŻY NA PRZYKŁADZIE MIASTA SZCZECIN<sup>1</sup>

---

**Joanna Sarbiewska**

mgr inż., Ove Arup & Partners International Ltd. Sp. z o.o.  
Oddział w Polsce, e-mail: joanna.sarbiewska@arup.com

**Adam Konarski**

mgr inż., Ove Arup & Partners Ireland, e-mail: adam.konarski@arup.com

---

**Michał Mokrzański**

mgr inż., Ove Arup & Partners International Ltd. Sp. z o.o. Oddział w Polsce, e-mail: michal.mokrzanski@arup.com

***Streszczenie.** W artykule opisano wybrane problemy, jakie można napotkać przy budowie modelu ruchu dla miasta oraz przykładowe sposoby ich rozwiązania. Autorzy podkreślają, jak bardzo istotnym elementem w modelowaniu jest jakość danych wejściowych, optymalizacja procesu kodowania i przetwarzania danych oraz indywidualne podejście do każdego opracowania.*

***Słowa kluczowe:** zachowania komunikacyjne mieszkańców, czterostopniowy model ruchu, badanie ankietowe, generacja podróży, rozkład przestrzenny, rozkład ruchu na sieć, kalibracja modelu*

### 1. Wstęp

Model ruchu jest matematycznym zapisem struktury popytowej transportu, opartym na badaniu zachowań komunikacyjnych w wyodrębnionej jednostce terytorialnej, który poprzez model interakcji transportowych przeznaczony jest do prognozowania ruchu, badania zmiany potoków ruchu w procesie planowania układów transportowych, optymalizacji sieci transportowych, rozwiązywania zadań transportowych i wspomagania decyzji w innych problemach transportowych związanych z układami transportowymi [1]. Autorzy niniejszego artykułu mieli możliwość współuczestniczyć przy przeprowadzeniu kompleksowych badań ruchu i budowie modelu ruchu dla miasta Szczecina. Poniżej opisane zostały wybrane problemy, z których rozwiązaniem przyszło im się zmierzyć na etapie realizacji opracowania.

### 2. Rzetelność danych wejściowych – badania i pomiary ruchu

#### 2.1. Natężenie ruchu pojazdów i pasażerów transportu zbiorowego

Prawo Zamówień Publicznych pozwala w obecnej formie Zamawiającym na posługiwanie się wyłącznie kryterium cenowym przy wyborze oferenta na dowol-

---

1 Wkład procentowy poszczególnych autorów: Sarbiewska J. 42 %, Konarski A. 16 %, Mokrzański M.42 %

ną usługę. Prowadzi to do sytuacji, kiedy potencjalni Wykonawcy minimalizują zakres badań, jeśli nie jest sprecyzowany w Opisie Przedmiotu Zamówienia, w celu zwiększenia konkurencyjności składanej oferty. Powoduje to obniżenie jakości opracowania już na etapie zbierania danych niezbędnych do budowy i kalibracji modelu ruchu.

W przypadku KBR w Szczecinie dokładnie określono typy badań i pomiarów ruchu, jak również lokalizację punktów pomiarowych. Obszar badań został podzielony na:

- kordon miasta – 17 punktów badania ankietowego kierowców i pasażerów komunikacji zbiorowej oraz 24 godzinny pomiar natężenia ruchu,
- kordon kolei – 7 przekrojów pomiarowych dla natężenia ruchu pasażerskiego oraz pojazdów w cyklu 24 godzinnym,
- ekran Odry Zachodniej oraz Odry Wschodniej – 21 przekrojów pomiarowych dla natężenia ruchu pasażerskiego oraz pojazdów w cyklu 24 godzinnym,
- obszar Centrum – 15 przekrojów pomiarowych dla natężenia ruchu pasażerskiego oraz pojazdów w cyklu 16 godzinnym,
- przekroje dodatkowe – 17 punktów pomiarowych.

KBR w Szczecinie swoim zakresem objęło również badania generacji i absorpcji centrów handlowych oraz tras przejazdów (na potrzeby opracowania krzywych oporu odcinka). Niezależnie zostały przeprowadzone badania ankietowe w gospodarstwach domowych. Takie podejście pozwoliło oczekiwać danych wejściowych o dobrej jakości.

### *2.2. Badania ankietowe kierowców: punkty zlokalizowane na autostradzie i drodze ekspresowej*

Dwa z punktów wybranych do badań ankietowych kierowców zlokalizowane zostały na autostradzie i drodze ekspresowej. Jest to stosunkowo niebezpieczne umiejscowienie punktów pomiarowych dla osób ankietujących ze względu na duże prędkości pojazdów i właściwie brak możliwości organizacji miejsca zatrzymywania pojazdów, nie wprowadzającego zakłóceń w ruchu drogowym.

Przeprowadzenie ankietowych badań ruchu wymaga również wprowadzenia tymczasowej organizacji ruchu. Projekt tymczasowej organizacji ruchu należy uzgodnić z zarządcą drogi (w tym przypadku GDDKiA O. Szczecin) i zarządcą ruchu (w tym przypadku Komenda Wojewódzka Policji w Szczecinie). W opisywanym przypadku brak zgody GDDKiA uniemożliwił realizację badań w punktach wskazanych w OPZ, co wymagało wyznaczenia punktów alternatywnych. Lokalizacja punktów ankietowych w miejscach obsługi podróżnych okazała się niemożliwa, ze względu na warunek spełnienia minimalnej wielkości próby pomiarowej. Punkty alternatywne zostały wyznaczone na łącznicach węzłów drogowych w celu zapewnienia warunków do zbadania ruchu źródłowego i docelowego, co zdecydowanie podniosło bezpieczeństwo osób ankietujących. Przeprowadzenie badań ankietowych kierowców w punktach alternatywnych nie miało wpływu na wyniki,



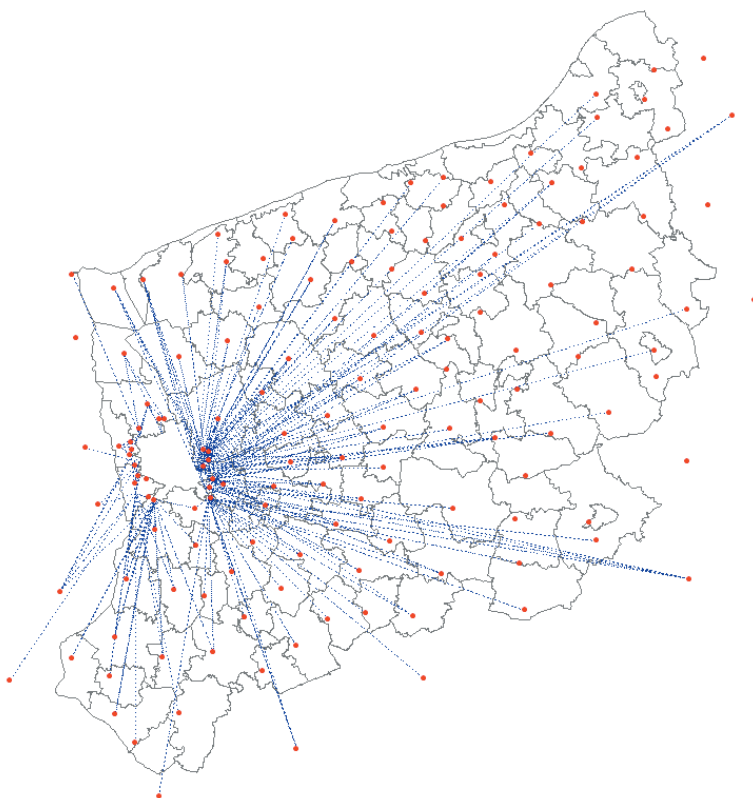
lecz wymagało większej ilości obliczeń na potrzeby wydzielenia ruchu tranzytowego na odcinku A6 – S3.

### *2.3. Wyniki badań ankietowych kierowców a podział na zewnętrzne rejony komunikacyjne*

W modelach podróży obszar analizy dzielimy na wewnętrzne rejony komunikacyjne oraz na zewnętrzne. Zwyczajowo definiuje się po jednym rejonie zewnętrznym na jeden wlot do miasta. Wymagania względem modelu ruchu dla Szczecina wskazywały, iż poza granicami miasta granice rejonów komunikacyjnych powinny odwzorowywać podział terytorialny kraju, w granicach województwa zachodniopomorskiego (podział na rejony komunikacyjne odwzorowujące gminy). Na granicy województwa zachodniopomorskiego powinny zostać wprowadzone rejony kordonowe na drogach krajowych i wojewódzkich oraz na liniach kolejowych.

W praktyce oznaczało to utworzenie 114 rejonów komunikacyjnych na terenie województwa zachodniopomorskiego, a poza granicami administracyjnymi Szczecina oraz 16 rejonów na granicy województwa. Taki podział obszaru badań na zewnętrzne rejony komunikacyjne w połączeniu z budową sieci drogowej i kolejowej poza granicami miasta może zafałszować rozkład ruchu zewnętrznego, szczególnie w kontekście badań ankietowych kierowców, które zostały przeprowadzone na kordonie miasta. Ruch tranzytowy rozkładający się na sieci drogowej praktycznie całego województwa, może wówczas zostać poprowadzony innymi trasami przejazdu – z pominięciem sieci Szczecina.

Finalnie wszystkie zewnętrzne rejony komunikacyjne zostały podłączone do wybranych węzłów znajdujących się na granicy miasta, często do więcej niż jednego, ponieważ różni kierowcy lub pasażerowie wjeżdżali do miasta różnymi wlotami (analogiczna sytuacja miała miejsca dla ruchu wyjazdowego). Dodatkowym problemem w identyfikacji ruchu zewnętrznego/tranzytowego były powtarzające się nazwy małych miejscowości na terenie województwa, które wymagały odpowiedniego przyporządkowania do rzeczywistej lokalizacji oraz ruch generowany na przedmieściach Szczecina. Były to osiedla mieszkaniowe, zakłady pracy lub miejsca usług zlokalizowane w niewielkiej odległości od granic miasta, tym samym z punktu widzenia geograficznej lokalizacji stanowiące ruch zewnętrzny, jednak funkcjonalnie będące częścią ruchu miejskiego – wewnętrznego. Odwzorowanie ruchu generowanego przez tereny zlokalizowane na przedmieściach, zostało uzyskane poprzez dodanie rejonów komunikacyjnych z centroidami położonymi bezpośrednio przy granicach Szczecina. Siatkę zewnętrznych rejonów komunikacyjnych i ich połączeń przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Zewnętrzne rejony komunikacyjne z podłączeniami

#### 2.4. Dane ruchotwórcze: miejsca pracy

Poprawne zgeokodowanie miejsc pracy na terenie miasta jest jedną z podstaw wiarygodnego wyliczenia wielkości ruchu generowanego przez poszczególne rejony komunikacyjne. Dokładne dane demograficzne zostały pozyskane z bazy danych PESEL, natomiast dane nt. liczby osób zatrudnianych przez poszczególne zakłady pracy pozyskane przekazane zostały z Głównego Urzędu Statystycznego. GUS prowadzi statystykę pracodawców w zależności od liczby zatrudnianych pracowników. Statystyka klasyfikuje każdy zakład pracy do jednej z grup:

- firmy o liczbie pracowników od 1 do 49,
- firmy o liczbie pracowników od 50 do 249,
- firmy o liczbie pracowników od 250 do 999,
- firmy o liczbie pracowników powyżej 1000.

Na podstawie powyższych danych można oszacować średnie zatrudnienie w firmie należącej do danego zakresu oraz liczbę miejsc pracy przypadającą na poszczególne rejony. Jednakże bezkrytyczne przyjmowanie tego rodzaju danych, szczególnie w kontekście szacowania średniego zatrudnienia, może doprowadzić

do zafałszowanych wyników nt. rozmieszczenia liczby miejsc pracy na terenie miasta. Jest to spowodowane m.in. następującymi sytuacjami:

- firmy nie posiadają lokalizacji faktycznego miejsca pracy pod wskazanym adresem (biuro zarządu, a lokalizacja zakładu pracy, rejestracja firmy, a oddziały w innych miastach, itd),
- działalność gospodarcza opiera się na pracy w terenie (firmy ochroniarskie, sprzątające itd.),
- firma jest oddziałem lub filią większej firmy.

W celu poprawy jakości danych wejściowych wskazana jest weryfikacja liczby pracowników zatrudnianych szczególnie przez największe podmioty, ponieważ generują one największy ruch. W związku z powyższym podczas budowy modelu podróży dla miasta Szczecin przeprowadzono ankietę telefoniczną z ok. 3000 pracodawców w celu korekty faktycznej liczby miejsc pracy w zdefiniowanych rejonach komunikacyjnych.

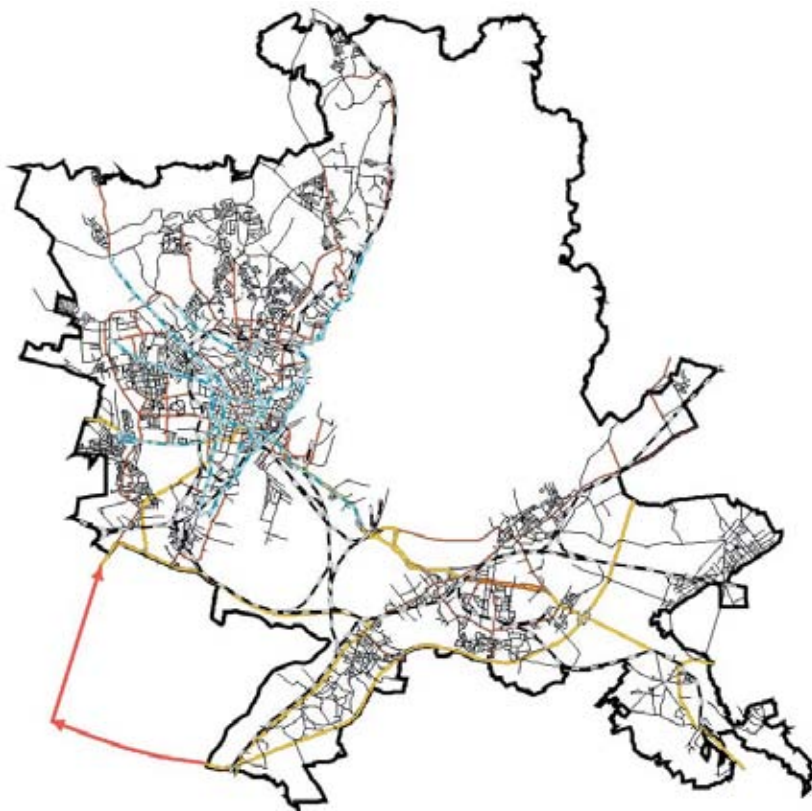
### *2.5. Dane ruchotwórcze: uczelnie*

Poprawne zgeokodowanie liczby studentów na uczelniach wyższych jest jedną z podstaw właściwego wyliczenia wielkości ruchu generowanego przez studentów, szczególnie w przypadku miast, w których znajdują się duże jednostki naukowe. Dane o liczbie studentów uczęszczających do poszczególnych jednostek w Szczecinie zostały dostarczone bezpośrednio od uczelni. Informacje te jednak nie posiadały wyszczególnienia, czy podana liczba odnosi się do studentów dziennych czy zaocznych, nie otrzymano również informacji o liczbie studentów na poszczególnych wydziałach. Dane te zostały zweryfikowane w trakcie przeprowadzenia rozmów telefonicznych z jednoczesną identyfikacją faktycznej liczby studentów dziennych i zaocznych na poszczególnych wydziałach. Dokonano również właściwej lokalizacji wydziałów uczelni na terenie miasta.

## **3. Budowa modelu sieci transportu zbiorowego i indywidualnego**

### *3.1. Zasięg sieci*

Modele podróży swoim zasięgiem terytorialnym obejmują miasta w granicach administracyjnych, jeśli weźmiemy pod uwagę podział na rejony komunikacyjne, jak również sieć drogowo - uliczną. Na etapie budowy modelu ruchu dla Szczecina okazało się, że część mieszkańców wykorzystuje zewnętrzny układ drogowy na potrzeby odbywania podróży wewnętrznych. Zachęca do tego szybki i bezkolizyjny przejazd Autostradą A6 oraz często zatłoczona sieć uliczna miasta. Mimo wydłużenia trasy przejazdu, kierowcy często decydują się na wybór tej ścieżki przejazdu ze względu na korzyści czasowe. Zjawisko to występuje w Szczecinie dla podróży odbywających się pomiędzy osiedlem Podjuchy, a zachodnią częścią miasta. W celu lepszego odwzorowania odbywania takich podróży przez mieszkańców Szczecina, rozbudowano sieć drogową miasta, wydłużając autostradę A6 i drogę krajową nr 13. Wynik tego zabiegu przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Układ drogowy poza granicami administracyjnymi miasta

### 3.2. Budowa sieci transportu zbiorowego

Budowa sieci transportu zbiorowego w programie Visum nie jest procesem bardzo skomplikowanym, jednak pracochłonnym. Na potrzeby dokładnego odwzorowania należy wprowadzić do programu wszystkie przystanki transportu zbiorowego, trasy linii oraz rozkłady jazdy w analizowanym przedziale czasu. Zastosowanie narzędzi Visum, mimo ich nieustannemu ulepszaniu, jest dość niewygodne i wymaga dużego nakładu pracy. W takiej sytuacji można zadać sobie pytanie, jak w późniejszym okresie będzie przebiegać aktualizacja modelu. Sieć transportu zbiorowego w danym kształcie jest chwilowa, a zmiany mogą mieć duży wpływ na zachowania komunikacyjne mieszkańców. Model który jest budowany na potrzeby miasta powinien charakteryzować się łatwością aktualizacji, bo w przeciwnym przypadku bardzo szybko może zacząć generować wyniki niezgodne z rzeczywistością.

Ciekawym rozwiązaniem, które znacznie przyspiesza pracę jest obiekt COM Visum. Dzięki jego możliwościom uzyskujemy dostęp do wszystkich funkcji programu Visum oraz możliwość przeglądania, zmiany oraz zapisywania wszystkich

danych zawartych w pliku .ver. Wszystkie operacje, które wykonujemy za pomocą interfejsu graficznego Visum możemy również (często o wiele szybciej) wykonać za pomocą obiektu COM, używając wiersza poleceń lub wykorzystując obiekt w źródłach skryptów (VBA lub Python). Mamy do dyspozycji narzędzie, dzięki któremu możliwe jest szybkie utworzenie wszystkich elementów sieci transportu zbiorowego, od przystanków poprzez poszczególne kursy, na typach pojazdów kończąc. W czasach wszechobecnych aplikacji internetowych służących do planowania podróży nie powinno być również problemu z pozyskaniem podstawowych danych do budowy modelu transportu zbiorowego. Koncern Google uruchomił usługę Transit, która korzysta z danych udostępnianych w doskonale udokumentowanym standardzie<sup>2</sup>. Wszystkie informacje znajdują się w plikach tekstowych bardzo prostych do użycia w dowolnym języku programowania. Dane w tym formacie przekazuje aktualnie sześć polskich miast, są to: Białystok, Olsztyn, Szczecin, Warszawa, Zielona Góra oraz Łódź. Zakodowane są w nim wszystkie niezbędne informacje, jak i wiele innych. Dwanaście polskich miast (aglomeracji: (Białystok, Bydgoszcz, Górnośląski Okręg Przemysłowy, Kraków, Łódź, Trójmiasto, Poznań, Radom, Szczecin, Toruń, Warszawa, Wrocław) znajduje się w popularnej wyszukiwarce połączeń „Jak Dojade”.

Niestety podczas prac nad modelem ruchu dla Szczecina nie udało się jeszcze zaimplementować powyższego rozwiązania. Wszystkie dane odnośnie przystanków, linii autobusowych, tramwajowych etc. zostały wprowadzone do modelu manualnie, jednak perspektywa szybszego budowania jak i łatwego aktualizowania sieci transportu zbiorowego jest wyjątkowo kusząca i wydaje się być jak najbardziej realna.

### 3.3. *Skrzyżowania z sygnalizacją świetlną*

Modele podróży dla miast tworzone są na potrzeby:

- bieżących prac dotyczących funkcjonowania układu drogowego miasta,
- bieżących prac dotyczących organizacji przewozów środkami transportu zbiorowego oraz wykonywania prognoz i analiz przewozów pasażerskich w ramach opracowywania planów rozwoju komunikacji zbiorowej,
- wykonywania prognoz i analiz ruchu w ramach planistyczno-projektowych prac nad rozwojem systemu transportowego miasta.

Sieć transportu indywidualnego w modelu podróży dla miasta Szczecin została zdefiniowana mając na uwadze właściwość miejskiej sieci ulicznej, tj. zależność warunków ruchu od przepustowości skrzyżowań. W modelu wprowadzono kary za skręty za przejazd przez dane skrzyżowanie. Zdefiniowano 10 typów skrzyżowań i na podstawie obliczeń w programach Transport Research Laboratory wprowadzono dodatkowy czas dla każdego użytkownika przejeżdżającego przez dany typ skrzyżowania. Typy skrzyżowań zostały wprowadzone poprzez nadanie wartości typom węzłów, a następnie przypisanie im odpowiednich wartości ze zdefinio-

---

2 <https://developers.google.com/transit/gtfs/reference>

wanych standardów relacji skrzyżnych. Typy skrzyżowań zastosowane w modelu przedstawia tablica 1.

Tablica 1. Typy skrzyżowań

Lp.	Typ węzła	Typ skrzyżowania
1	1	Średnie rondo
2	2	Duże rondo
3	10	Skrzyżowanie bez sygnalizacji świetlnej
4	11	Skandalizowane skrzyżowanie bez sygnalizacji świetlnej
5	12	Wielopasowe skandalizowane skrzyżowanie bez sygnalizacji świetlnej
6	13	Skrzyżowanie bez sygnalizacji świetlnej – dominująca relacja z pierwszeństwem przejazdu
7	90	Skrzyżowanie sterowane sygnalizacją świetlną
8	91	Skandalizowane skrzyżowanie z sygnalizacją świetlną
9	92	Wielopasowe skandalizowane skrzyżowanie z sygnalizacją świetlną
10	93	Skrzyżowanie z sygnalizacją świetlną – dominująca relacja z pierwszeństwem przejazdu

Innym sposobem na uwzględnienie właściwości sieci miejskiej jest zamodelowanie rozkładu ruchu na sieci z zastosowaniem funkcji programu Visum „blocking – back”. Pozwala to na określenie czasu traconego w kolejkach oraz długości kolejek już na etapie modelu makroskopowego. Realizacja tego założenia wymaga dokładnego sparametryzowania sieci ulicznej, m.in.: określenia liczby pasów, wyliczenia przepustowości odcinków na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną i bez. Należy przy tym mieć na uwadze, że sieć drogowa zarówno w rzeczywistości jak i w modelu napełnia się począwszy od dróg niższej klasy – dojazdowych poprzez drogi lokalne aż do dróg o najwyższej przepustowości. Brak sieci dróg dojazdowych i podłączenie rejonów komunikacyjnych niewielką ilością konektorów może powodować przekroczenie przepustowości układu już na poziomie dróg lokalnych, ponieważ w takiej sytuacji, w modelu, mają one za zadanie przenosić większy ruch niż w rzeczywistości. W Szczecinie podjęto próby takiego sposobu zakodowania sieci transportu indywidualnego, jednak nie zakończyły się powodzeniem. Zastosowanie funkcji „blocking – back” wymaga znacznego zwiększenia liczby rejonów komunikacyjnych, odcinków drogowych oraz konektorów, co nie zawsze daje dobry wynik w kontekście stosunku ilości zaangażowanych godzin pracy do efektów i celów, jakim ma służyć model podróży.

#### 4. Budowa modelu ruchu

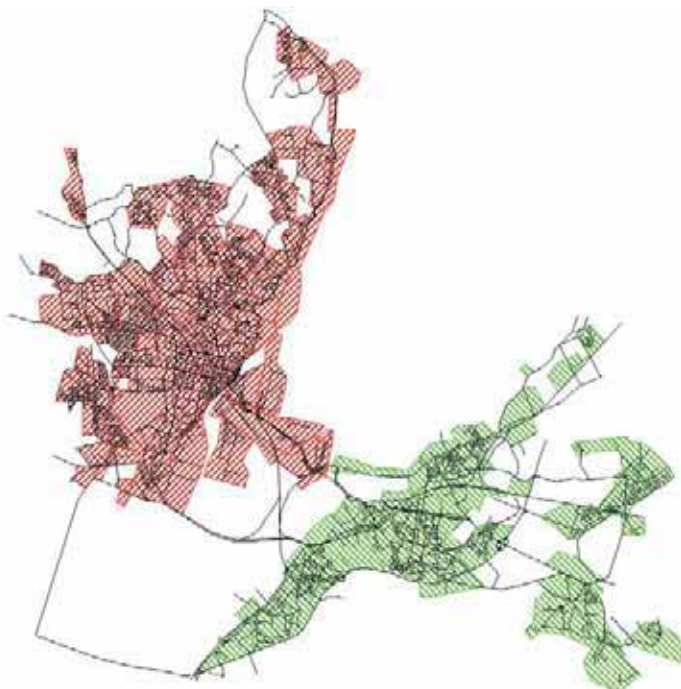
##### 4.1. Generacja podróży

Model ruchu dla miasta Szczecin opierał się na klasycznym podejściu do generacji ruchu, to jest ułożeniu równań regresji dla zidentyfikowanych motywacji podróży. Na potrzebny opracowania generacji podróży, na podstawie wyników ba-



dań ankietowych, wyodrębniono następujące motywacje podróży: dom – praca, praca – dom, dom – szkoła, szkoła – dom, dom – uczelnia, uczelnia – dom, dom – zakupy, zakupy – dom, dom – centrum handlowe, centrum handlowe – dom, dom – inne, inne – dom i niezwiązane z domem.

Wskaźniki ruchliwości zostały określone wspólnie dla każdego rejonu w zależności od motywacji. Metoda ta dała pozytywne wyniki na etapie porównywania liczby podróży w mieście. Niestety, dalsza kalibracja przeprowadzana na kolejnych etapach budowy modelu nie dawała satysfakcjonujących wyników. Potwierdzeniem tego było porównanie wyników potoków ruchu pasażerskiego i samochodowego otrzymanych z modelu i pomierzonych. Analizując wyniki otrzymane z wywiadów w gospodarstwach domowych udało się zaobserwować różnice pomiędzy wskaźnikami ruchliwości, jak również innymi charakterystykami podróży pomiędzy mieszkańcami lewo- i prawobrzeża. Na tej podstawie wprowadzono rozdział miasta wzdłuż ekranu Odry Wschodniej. W wyniku tego dla każdego rejonu wyliczono dla każdej motywacji po dwa wskaźniki ruchliwości dla podróży wewnętrznych (odbywających się w granicach administracyjnych miasta). Postępowanie takie pozwoliło otrzymać znacznie lepsze wyniki kalibracji modelu ruchu. Założenie to skutkowało dalszymi konsekwencjami w kolejnych etapach budowy modelu tj.: rozkładzie przestrzennym i podziale zadań przewozowych – de facto zbudowane zostały cztery modele ruchu wewnętrznego: lewobrzeże – lewobrzeże, lewobrzeże – prawobrzeże, prawobrzeże – lewobrzeże, prawobrzeże – prawobrzeże. Podział miasta na lewobrzeże i prawobrzeże przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Podział miasta na lewobrzeże i prawobrzeże

#### 4.2. Rozkład przestrzenny podróży

Do odwzorowania rozkładu przestrzennego ruchu, wyznaczającego liczby podróży odbywanych między poszczególnymi rejonami komunikacyjnymi w Szczecinie przyjęto model grawitacyjny o postaci:

$$T_{ij} = \frac{P_i \cdot A_j \cdot F_{ij}}{\sum_{j=1}^n A_j \cdot F_{ij}} \quad (1)$$

gdzie:

$T_{ij}$  – liczba podróży rozpoczynanych w rejonie „i”, a kończonych w rejonie „j”,  
 $P_i$  – liczba podróży rozpoczynanych w rejonie „i”,  
 $A_j$  – liczba podróży kończonych w rejonie „j”,  
 $F_{ij}$  – współczynnik oporu przestrzeni wyliczany według empirycznie określonej funkcji oporu.

Parametrem decydującym o rozkładzie przestrzennym, jest odległość między rejonami liczona wg tras odbywanych transportem indywidualnym. Funkcja oporu przestrzeni ma postać:

$$F_{ij} = a * dis_{ij}^b * e^{c * dis_{ij}} \quad (2)$$

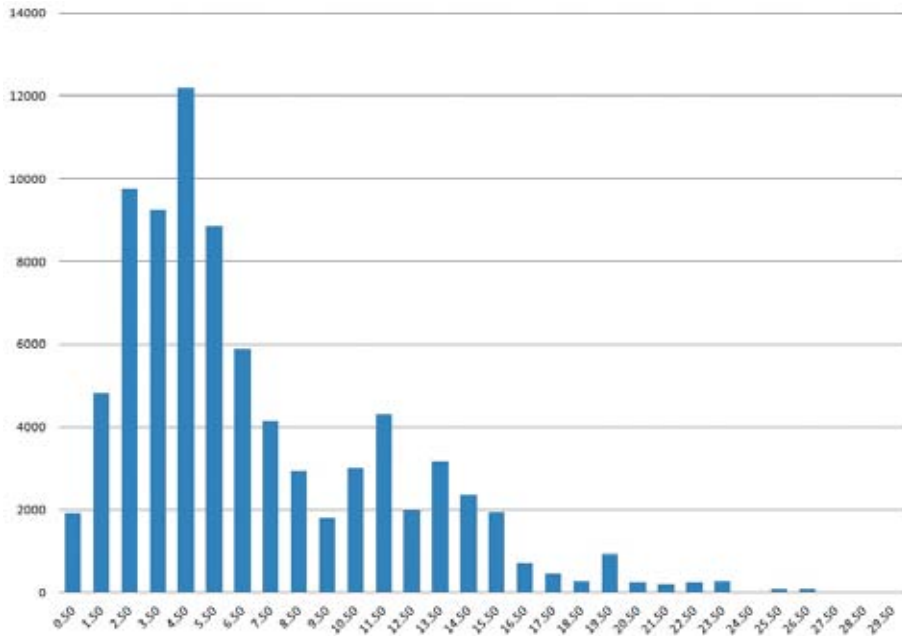
gdzie:

$dis_{ij}$  – odległość pomiędzy parą rejonów „i” oraz „j”,  
 $a, b, c$  – parametry wyznaczające kształt krzywej,  
 $e$  – podstawa logarytmu naturalnego.

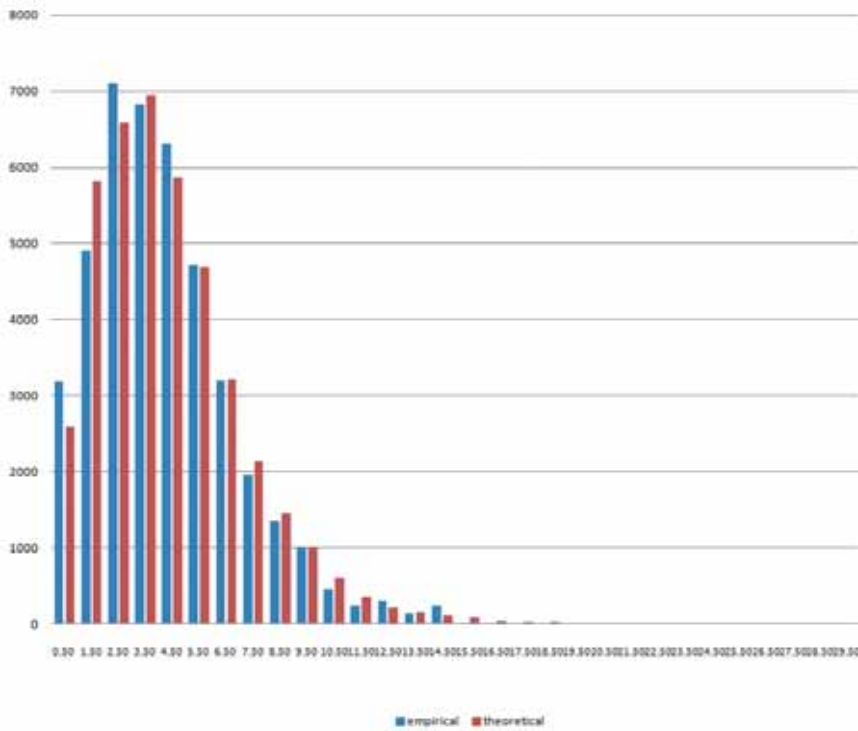
Przed podziałem modelu ruchu na lewo- i prawobrzeże kalibracja modelu grawitacyjnego dla miasta Szczecin nie dawała satysfakcjonujących wyników. Powodem tego były dwa ekstrema w przedziałach długości podróży: dla podróży o średniej długości 4,5 km oraz dla podróży o średniej długości 11,5 km. Takie zależności znacznie trudniej jest opisać ciągłymi, liniowymi funkcjami matematycznymi. Na rys. 4 przedstawiony został wykres średnich długości podróży dla motywacji dom – praca, ilustrujący podróże wewnętrzne na terenie całego miasta [oś odciętych – długość podróży w kilometrach, oś rzędnych – liczba podróży].

Finalnie w modelu podróży dla Szczecina, w rozkładzie przestrzennym ruchu uwzględniono podział na lewo- i prawobrzeże. Choć oznaczało to cztery razy więcej obliczeń, to otrzymane wyniki były znacznie lepszej jakości. Funkcję oporu przestrzeni wyznaczono dla każdej motywacji i dla każdej grupy podróży (lewo-brzeże, prawobrzeże, lewo-brzeże – prawobrzeże i prawobrzeże – lewo-brzeże).

Na rys. 5 przedstawiono porównanie wyników rozkładu ruchu obliczonych na podstawie ankiet w gospodarstwach domowych i obliczonych w modelu dla motywacji dom – praca dla lewo-brzeżnej części miasta [oś odciętych – długość podróży w kilometrach, oś rzędnych – liczba podróży].



Rys. 4. Rozkład długości podróży dla motywacji dom – praca (całe miasto)



Rys. 5. Rozkład długości podróży dla motywacji dom – praca (lewobrzeże)

Uzyskane parametry funkcji to:

$$a = 0.1943751$$

$$b = -0.34363304$$

$$c = -0.10462492$$

otrzymano dla nich wartość współczynnika  $R^2$  równą 0,93.

### 4.3. Kalibracja modelu

Kalibracja modelu podróży dla Szczecina była wielostopniowa, a poprawność przeprowadzanych obliczeń została sprawdzana na każdym etapie budowy modelu:

- \* na etapie generacji podróży i rozkładu zastosowano statystyczne metody analizy korelacji i regresji:
  - porównano wskaźniki ruchliwości obliczone z wykorzystaniem modeli generacji ruchu i wyznaczone na podstawie badań zachowań komunikacyjnych oraz dokonano oceny zgodności liczb podróży obliczonych za pomocą modelu grawitacyjnego z liczbami rzeczywistych podróży uzyskanych z badań ruchu, dla każdej motywacji podróży z osobna,
  - na etapie rozkładu przestrzennego (dla każdej motywacji) porównywano również rozkłady długości podróży obliczone w modelu oraz otrzymane z badań,
- \* dla podziału zadań przewozowych:
  - porównano udziały podróży odbywanych samochodem i transportem zbiorowy w każdej y motywacji,
- \* na etapie rozkładu ruchu:
  - porównano wartości natężeń ruchu uzyskane z modelu z wartościami natężeń ruchu uzyskane w punktach pomiarowych usytuowanych na kordonach i ekranach,
  - porównano liczby pasażerów w pojazdach komunikacji zbiorowej uzyskane z modelu z liczbami pasażerów uzyskanymi w punktach pomiarowych usytuowanych na kordonach i ekranach,
  - porównano sumaryczne natężenie ruchu pojazdów na poszczególnych ekranach i kordonach uzyskane z modelu z wartościami natężeń ruchu uzyskanych z badań,
  - porównano sumaryczne liczby przewożonych pasażerów na poszczególnych ekranach i kordonach uzyskane z modelu z wartościami uzyskanymi z badań.

Maksymalny dopuszczalny błąd w oszacowaniu wynosił:

- \* W przypadku natężenia ruchu pojazdów (osobowych i towarowych):
  - $\pm 15\%$  na poszczególnych punktach kontrolnych, dla których wykonano sprawdzenie, w przypadku gdy natężenie pojazdów było na poziomie 700 - 2700 pojazdów/godzinę dla 85 % liczby punktów,
  - $\pm 100$  pojazdów/godzinę na poszczególnych punktach kontrolnych, dla których wykonano sprawdzenie, w przypadku gdy natężenie pojazdów jest mniejsze od 700 pojazdów/godzinę, dla 85 % liczby punktów,

- $\pm 400$  pojazdów/godzinę na poszczególnych punktach kontrolnych, dla których wykonano sprawdzenie, w przypadku gdy natężenie pojazdów jest większe od 2700 pojazdów/godzinę, dla więcej niż 85 % liczby punktów,
- $\pm 5\%$  dla sumy poszczególnych ekranów i kordonów.

Dodatkowo, uzyskane wyniki poddano sprawdzeniu odnośnie warunku spełnienia wartości współczynnika GEH (obliczanego według wzoru):

$$GEH = \sqrt{\frac{(E - V)^2}{(E + V)/2}} \quad (3)$$

gdzie:

E – wartość natężenia uzyskana z modelu,

V – wartość natężenia uzyskana z badań ruchu.

Wymagane wartości:

GEH < 5 - na poszczególnych punktach kontrolnych,

GEH < 4 - dla sumy poszczególnych ekranów i kordonów.

\* W przypadku liczby pasażerów komunikacji zbiorowej:

- $\pm 15\%$ , na poszczególnych punktach kontrolnych, dla których wykonywane jest sprawdzenie;
- $\pm 5\%$ , na poszczególnych ekranach i kordonach.

Finalnie nie udało się otrzymać do końca zadowalających wyników dla wszystkich wielkości potoków ruchu pasażerskiego w autobusach i tramwajach. Spowodowane to było metodą przeprowadzania pomiarów napełnienia: pomiarowcy określali procentowe napełnienie pojazdu, wybierając jedną z opcji: 0% - 25% - 50% - 75% - 100%, w podziale na siedzących i stojących. Tymczasem przyjęte wymogi kalibracji dopuszczały wielkość błędu w pojazdach transportu zbiorowego  $\pm 15\%$ . Taka dokładność była trudna do otrzymania przy dysponowaniu powyższymi danymi wejściowymi.

#### 4.4. Złożona budowa modelu a potrzeba dużej liczby iteracji

Proces taki jak budowa czterostopniowego modelu ruchu jest zadaniem złożonym, charakteryzującym się:

- kilkukrotną weryfikacją danych wejściowych na różnych etapach prac,
- niejednokrotnie zmianą danych wejściowych na zaawansowanym etapie prac,
- koniecznością częstego powtarzania obliczeń cząstkowych i usprawnienia procesu obliczeń przez zastosowanie różnego rodzaju skryptów.

Jednym z przykładów jest generacja ruchu w mieście. Pierwszym założeniem, jakie zostało obrane było przyjęcie, iż zachowania komunikacyjne w całym Szczecinie są podobne. Przyjęto takie same wskaźniki ruchliwości dla wszystkich dzielnic Szczecina, jak również takie same parametry rozkładu przestrzennego ruchu. Przy próbie kalibracji tak zbudowanego modelu okazało się, że natężenia ruchu na odcinkach łączących lewą część Szczecina z prawą odbiegają od wartości obserwowanych. Miasto

Szczecin zostało podzielone na dwie części: na lewobrzeże i prawobrzeże, co zostało dokładniej opisane we wcześniejszych rozdziałach. Wszystkie obliczenia od początku były przeprowadzane „wewnątrz” programu Visum za pomocą skryptów oraz wbudowanych procedur. Pozwoliło to na przebudowanie całego modelu od podstaw w ciągu zaledwie dwóch dni. Dodatkową korzyścią, wynikającą z takiej konstrukcji modelu, jest możliwość wykorzystania stworzonych skryptów do tworzenia prognoz ruchu. Zmiana liczby ludności czy charakteru rejonu może zostać uwzględniona w modelu bardzo łatwo i szybko. Wystarczy zmienić atrybuty rejonu, a następnie wykonać pełny cykl obliczeń (procedury Visum oraz skrypty).

Innym przykładem jest szacowanie parametrów rozkładu przestrzennego podróży, aby wykonać obliczenia przy użyciu interfejsu graficznego Visum. Dla każdej motywacji należy odnaleźć odpowiednie pliki, po czym ustawić parametry procedury. Za pomocą obiektu COM Muuli wszystkie obliczenia można wykonać za pomocą kilku linii kodu, co więcej, wyniki można szybko (używając tego samego skryptu) wyeksportować np. do pliku .xls gdzie na dowolnie skonfigurowanym wykresie można zweryfikować wyniki obliczeń i zdecydować, czy potrzebna jest zmiana w parametrach procedury Kalibri. Dzięki zastosowaniu prostego skryptu oszczędzamy czas oraz dajemy sobie możliwość przetestowania dużej liczby różnych opcji ustawień oraz oceny wyniku cząstkowego.

Podczas budowy każdego modelu ruchu prawdopodobnie nie uda się uniknąć pewnego rodzaju komplikacji. W sytuacji, kiedy każda kolejna faza modelowania bezpośrednio zależy od wyników uzyskanych w fazie poprzedzającej, każdy błąd, niedopatrzenie czy zaniedbanie może doprowadzić do tego, że konieczne będzie powtórzenie bardzo wielu czynności i obliczeń od punktu, w którym popełniono błąd. Każda taka poprawka może okazać się bardzo czasochłonna. Wyjścia z powyższej sytuacji są dwa: można albo nie popełniać błędów albo być na nie przygotowanym. Oczywiście pierwsze rozwiązanie byłoby najlepsze, niestety często nie do końca mamy wpływ na to, czy wszystko ułoży się po naszej myśli. Niedokładne, niekompletne dane, których pozyskanie nie zawsze zależy tylko od nas mogą pokrzyżować nam plany równie skutecznie, jak pomyłki bądź poważne błędy merytoryczne. Budowa modelu ruchu dla Szczecina pokazała, że zautomatyzowanie pewnych powtarzalnych czynności, mimo początkowo zwiększonego nakładu pracy (każdy skrypt czy procedurę należy najpierw napisać bądź skonfigurować) może być opłacalna w dłuższej perspektywie. Każda zmiana danych bądź wykryty błąd we wcześniejszych obliczeniach mógł być z łatwością poprawiony.

## 5. Podsumowanie

Każde miasto ma swój odmienny charakter i specyfikę. Ma to wpływ na zachowania transportowe użytkowników systemu transportowego, a w konsekwencji na rozkład podróży w obrębie całego miasta. Dlatego trzeba mieć świadomość, że każdy model ruchu jest inny i wymaga indywidualnego podejścia.



Na każdym etapie budowy modelu ruchu, począwszy od etapu zbierania danych, poprzez szacowanie poszczególnych parametrów modelu, kończąc na etapie kalibracji, należy wykorzystywać wiedzę, jaką się zdobyło podczas poznawania zachowań komunikacyjnych mieszkańców. Podsumowując, aby dobrze skonfigurować model ruchu, prawidłowo odzwierciedlający rzeczywistość, należy jak najlepiej poznać miasto, jego układ przestrzenny, infrastrukturę oraz zachowania mieszkańców. Znajomość „dzieła”, które mamy za zadanie „skopiować” jest podstawą sukcesu, przy czym powinna obowiązywać zasada „ograniczonego zaufania” do danych nam przekazywanych. Ponadto praca z modelem ruchu dla miasta Szczecin uczy, że powinno się być gotowym na wszystko. Jeśli nawet poszczególne elementy przedstawione zostały prawidłowo i zgodnie ze sztuką, na samym końcu może się okazać, że nie pasują one do siebie, a całość nie spełnia wymaganych oczekiwań.

## Bibliografia

- [1] Krych A., Kaczkowski M., Słownictwo kompleksowych badań i modelowania potoków ruchu. Modelowanie podróży i prognozowanie ruchu, Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczypospolitej Polskiej, Oddział w Krakowie, Zeszyt nr 153, Kraków 2010.
- [2] Kompleksowe Badania Ruchu w Szczecinie, Ove Arup & Partners International Ltd. Sp. z o.o. Oddział w Polsce, Warszawa 2011.
- [3] VISUM 12.5 COM Documentation
- [4] Materiały konferencji Kompleksowe Badania Ruchu, teoria i praktyka, doświadczenia miast polskich. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczypospolitej Polskiej, Oddział w Krakowie, Zeszyt nr 93, Kraków 2010.

## MODELOWANIE NATĘŻENIA RUCHU NA DROGACH LOKALNYCH W STANIE INDIANA<sup>1</sup>

**Andrew P. Tarko**

prof., Director of Center for Road Safety, School of Civil Engineering, Purdue University, e-mail: aptarko@gmail.com

**Andrzej Szarata**

dr inż., Katedra Systemów Komunikacyjnych, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel. +48 12 628 2533, e-mail: aszarata@pk.edu.pl

**Streszczenie.** *Artykuł przedstawia problematykę modelowania pracy przewozowej dotyczącej ruchu drogowego dla dużych obszarów. Jako przykład posłuży tutaj stan Indiana, dla którego opracowano podejście pozwalające oszacować pracę przewozową wyrażoną w pojazdo-milach. Budowa modelu symulacyjnego, w klasycznym ujęciu, powinna bazować na właściwie oszacowanych zmiennych objaśniających wielkość ruchu generowanego przez rejony komunikacyjne oraz powiązania tych zmiennych poprzez zastosowanie odpowiednich zależności matematycznych (uzyskanych w ramach wywiadów w gospodarstwach domowych). Niniejszy artykuł podejmuje temat budowy modelu bez dostępnych wyników badań ankietowych, bazując jedynie na precyzyjnie dobranych zmiennych objaśniających. Proces budowy modelu popytu poprzedziło przyjęcie szeregu założeń dotyczących modelu sieciowego – został on podzielony na mniejsze części (klastry) a całość obliczeń popytu dotyczyła pojedynczego klastra. Parametry modelu popytu dla pojedynczego elementu zostały dopasowane poprzez zastosowane metody przeszukiwania heurystycznego (algorytmy genetyczne), a zmienne objaśniające (liczba mieszkańców, miejsc pracy itp.) wyznaczone w oparciu o precyzyjne dane GIS. Jakość modelu oceniono poprzez porównanie uzyskanych wyników pracy przewozowej z dostępnymi wynikami pomiarów przekrojowych. Referat przedstawia założenia przyjętej metodyki oraz wyniki analiz prowadzonych dla części sieci drogowej.*

**Słowa kluczowe:** *modelowanie podróży, praca przewozowa, algorytmy genetyczne, drogi lokalne*

### 1. Wprowadzenie

Jedną z ważniejszych informacji wspomagających proces zarządzania siecią drogową jest znajomość natężenia ruchu drogowego. Dotyczy to zwłaszcza poziomu utrzymania i zarządzania infrastrukturą. Znajomość średniodobowego natężenia ruchu SDR na drogach lokalnych jest niezbędna do wydajnego zarządzania lokalną infrastrukturą drogową, poprawą bezpieczeństwa ruchu drogowego oraz przewidywania i planowania remontów dróg [1], [2]. W Stanach Zjednoczonych federalne i stanowe wydziały transportu (*Department of Transportation - DOT*) prowadzą tego typu pomiary w sposób ciągły lub jako pomiar chwilowy, lecz dotyczy

<sup>1</sup> Wkład procentowy poszczególnych autorów: Tarko A.P. 40%, Szarata A. 60%

to głównie dróg o znaczeniu krajowym lub stanowym. Dostępne są odpowiednie instrukcje, które precyzują procedury konieczne do wykonania pomiarów oraz wyznaczają sposób zarządzania bazami danych [3], [4], [5]. Na drogach lokalnych pomiarów natężenia ruchu praktycznie się nie prowadzi, co wynika ogromnych kosztów jakie pomiary musiałyby pochłonąć w związku z rozbudowaną siecią takich dróg. W stanie Indiana (dla którego podjęto próbę szacowania wartości SDR na drogach lokalnych) całkowita długość sieci dróg to ponad 95 tys. mil (dla porównania w Polsce jest to ok. 230 tys. mil), co przy powierzchni trzykrotnie mniejszej od Polski wskazuje na ogrom prac związanych z pomiarem ruchu na drogach lokalnych. Pomimo tych trudności, część lokalnych zarządów dróg stara się zapłacić tę lukę w mniej lub bardziej systematyczny sposób. W większości przypadków pomiary natężenia ruchu są krótkotrwałe i najczęściej wrywkowe, o przypadkowych lokalizacjach punktów pomiarowych. Wobec braku jednolitego programu pomiarów na drogach lokalnych, dostępna baza danych, pomimo, że dość obszerna, jest niewystarczająca do szczegółowych analiz natężenia ruchu, wpływu zmian zagospodarowania przestrzennego na warunki ruchu czy parametrów pracy sieci drogowej.

W ramach niniejszego artykułu zostanie przedstawiona metoda modelowania ruchu na drogach lokalnych w oparciu o szczegółowe dane dotyczące zagospodarowania przestrzennego. W pracy wykorzystano oprogramowanie ArcView oraz Visum 11.

## 2. Modelowanie ruchu na drogach lokalnych – dotychczasowe ujęcie

Prowadzenie pomiarów na drogach lokalnych jest procesem kosztownym i czasochłonnym, zwłaszcza, że drogi takie mają zwykle znacznie niższe znaczenie w porównaniu do dróg krajowych przy jednoczesnym zdecydowanie większym udziale ich długości w całej sieci drogowej. Wobec braku dostępnej bazy danych pomiarowych przy jednoczesnym zapotrzebowaniu na takie informacje, wielu autorów próbowało opracować modele analityczne wyznaczające wartość SDR na drogach lokalnych. W tym celu posługiwano się modelami wyznaczającymi wartości jako modele regresyjne (liniowe i nieliniowe) uwzględniające pomiar SDR na sąsiednich drogach krajowych [6], [7], bardziej zaawansowane badania polegające na grupowaniu modeli regresyjnych czy zastosowanie przekrojowych okien czasowych [8], [9]. Podejścia takie pozwalały na oszacowanie z zadowalającą dokładnością wartości SDR na drogach lokalnych położonych w bezpośrednim sąsiedztwie dróg krajowych ze znaną wartością natężenia ruchu. Nie sprawdzały się natomiast w przypadkach układu dróg o wysokiej gęstości, czy w obszarach zurbanizowanych. Błędy te próbowano eliminować stosując coraz bardziej wyrafinowane podejścia – stosowano sieci neuronowe [10] czy algorytmy genetyczne [11], lecz wciąż wyniki pozostawiały wiele do życzenia.

Duże nadzieje wiązano z uwzględnianiem w procesie modelowania szczegółowych danych dotyczących zagospodarowania przestrzennego, łącząc te informacje ze spodziewanym ruchem drogowym w układach lokalnych. Dane te są przechowywane w formacie GIS (*Geographic Information System*) i stanowią podstawowe dane wejściowe do modeli wyznaczających natężenie ruchu na drogach lokalnych. Przydatność danych w formacie GIS do działań związanych z modelowaniem podróży w obszarach zurbanizowanych została już wielokrotnie potwierdzona (np. [12], [13], [14]), zwłaszcza w świetle powiązania wielkości podróży generowanych przez dany obszar ze spodziewaną wartością SDR. Podejścia te bazowały na odnalezionych związkach pomiędzy gęstością zaludnienia, a wielkością SDR. Dostrzeżono również, że nie daje się opracować modelu niezawodnie działającego we wszystkich obszarach i koniecznym było każdorazowe wykonanie pomiarów kontrolnych na części odcinków. Autorzy sami wskazywali na słabość swojej metody, zwłaszcza w obszarach o zróżnicowanej (nierównomiernie rozmieszczonej) gęstości zaludnienia.

W publikacji [15] skupiono się na opracowaniu modelu regresyjnego, opisującego relacje pomiędzy SDR a zbiorem zmiennych objaśniających, takich jak: liczba mieszkańców, przygód gospodarstwa domowego, poziom zatrudnienia i szacowane indywidualnie zmienne uwzględniające poziom dostępności do dróg stanowych. Autor wskazuje, że jego metoda pozwalała osiągnąć poziom zgodności nieprzekraczający  $R^2=0,74$ . W [7] zastosowano podejście grupujące dane GIS w jednorodnych obszarach (odpowiednik rejonu komunikacyjnego), a ich wpływ na natężenie ruchu był szacowany w odniesieniu do odległości danego odcinka od pojedynczego obszaru. W tym przypadku jakość modelu była znacznie słabsza  $R^2=0,63$  niż w poprzednim przypadku, lecz do ogólnych zastosowań wydawała się wystarczająca.

Najbardziej rozbudowana metoda została opracowana w [10], gdzie zastosowano pełny model czterostadiowy (w oparciu o metody QRM [16]) do modelowania wielkości SDR. Stosując narzędzia GIS dokonano podziału klasycznych rejonów komunikacyjnych na znacznie mniejsze obszary i dla nich budowano szczegółowy model symulacyjny. Zasadniczą wadą podejścia była zbyt wysoka złożoność i poziom skomplikowania, a co za tym idzie wymagany ogromny nakład pracy. Pomimo tego, sama jakość modelu nie była wystarczająca – autorzy podają  $R^2=0,48$  (na tak niską wartość największy wpływ miały różnice w SDR właśnie na drogach lokalnych!).

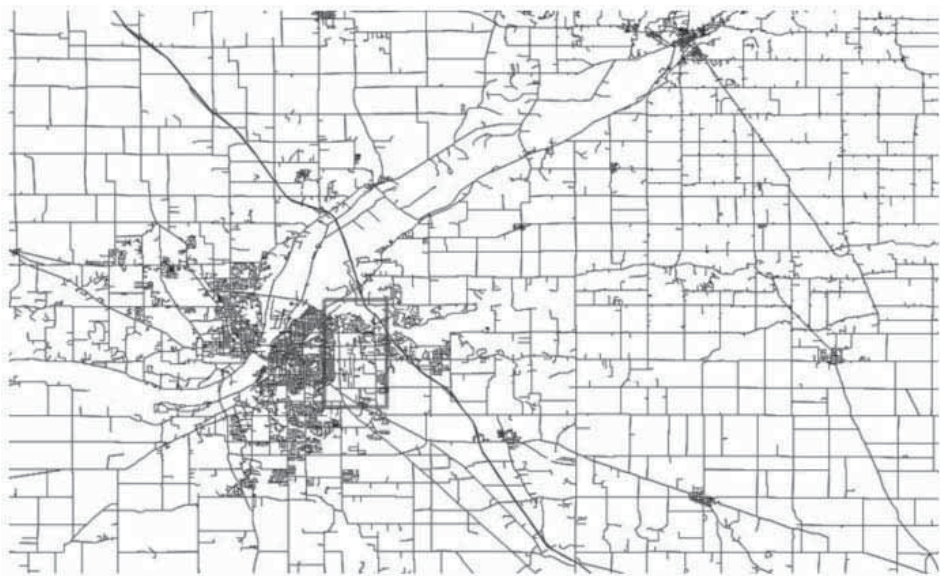
Dotychczasowe badania skupiały się na klasycznym podejściu polegającym bądź na zastosowaniu modelowania czterostadiowego lub prostszych modeli regresyjnych uwzględniających często dane w formacie GIS.

### 3. Założenia do modelu

W ramach prowadzonych badań, zaproponowano nieco odmienne podejście do modelowania wartości SDR na drogach lokalnych [17]. Bazuje się tutaj na trzech grupach danych wejściowych, które są dostępne:

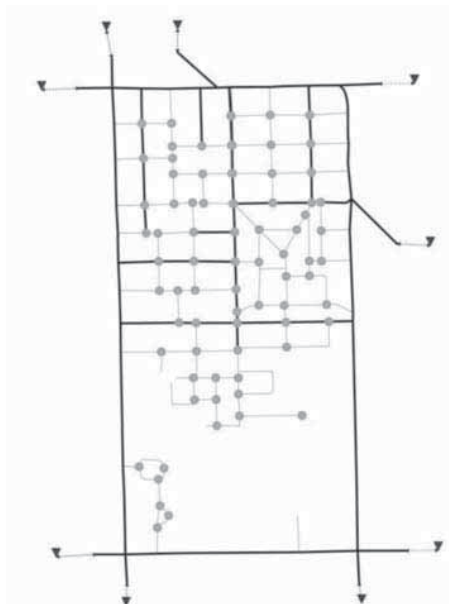
- wartości SDR na drogach stanowych i krajowych,
- dane w formacie GIS dotyczące zagospodarowania przestrzennego w odniesieniu do mieszkańców i przemysłu oraz usług,
- powiązań sieci dróg lokalnych z drogami nadrzędnymi (dotyczy to zwłaszcza dróg krajowych ze znaną wartością SDR).

Powyższe dane są powszechnie dostępne lub wymagają ich pozyskania od wyspecjalizowanych firm. Nie są to jednak wysokie koszty, zwłaszcza w porównaniu do tradycyjnych pomiarów. Istotą podejścia jest podział całego obszaru stanu Indiana na małe jednostki przestrzenne zwane *klastrami*. Jest to działanie relatywnie proste, ponieważ sieć drogowa w stanie Indiana ma charakter ramy z równoległymi odcinkami dróg (rys. 1).



Rys. 1. Fragment sieci drogowej stanu Indiana – okolice West Lafayette

Zasadą podziału jest to, aby na granicy każdego *klastra* były odcinki drogowe o znanej wartości SDR, a wewnątrz znajdował się układ dróg lokalnych. Znajomość wielkości SDR na drogach okalających każdy *klastera* umożliwia wprowadzenie podziału na rejon komunikacyjny, stanowiące o wielkości ruchu generowanego z/do obszaru *klastera*. Wyodrębnia się dwa typy takich rejonów: rejon wewnętrzny, stanowiące generatory ruchu i rejon zewnętrzny, agregujące ruch spoza danego *klastera* (znajomość SDR na zewnętrznym układzie drogowym umożliwia przyjęcie tej wartości jako potencjału ruchotwórczego rejonu zewnętrznego). Na rys. 2 przedstawiono przykładowy *klastera* wraz z zaznaczonymi rejonami zewnętrznymi (trójkąty) i wewnętrznymi (koła) oraz dodatkowo, grubą linią zaznaczono odcinki o znanym SDR (w tym przypadku również we wnętrzu *klastera* są takie odcinki w celu weryfikacji modelu).



Rys. 2. Przykład klastra z zaznaczonymi rejonami zewnętrznymi (trójkąty), wewnętrznymi (koła) i odcinkami o znanym SDR (grubsza linia)

W procesie modelowania bazowano głównie na danych w formacie GIS, dysponując danymi na dwóch poziomach:

- \* model sieciowy układu drogowego stanu Indiana, składający się z 400 000 odcinków z przypisanymi parametrami technicznymi i funkcjonalnymi,
- \* dane popytu – baza danych o wysokiej rozdzielczości, zawierająca informacje:
  - dotyczące mieszkańców, w odniesieniu do poszczególnych gospodarstw domowych. Dane zawierały liczbę mieszkańców w gospodarstwie z uwzględnieniem wieku, płci, szacunkowego dochodu rocznego, typu oraz wartości nieruchomości itp.
  - dotyczące firm, w odniesieniu do nazwy, adresu, kodu SIC (*Standard Industrial Classification*) przypisującego firmę do konkretnej branży, liczby zatrudnionych, dochodu rocznego itp.

Aby pominąć konieczność podziału każdego *klastra* na wewnętrzne rejony komunikacyjne, zdecydowano się dokonać agregacji danych GIS w taki sposób, że każdy rekord z bazy danych został przypisany automatycznie do najbliższego węzła położonego wewnątrz *klastra*. Następnie węzeł ten został potraktowany jako centroida rejonu komunikacyjnego podłączona automatycznie konektorem do sieci. W ten sposób możliwym było przygotowanie sieci w sposób zautomatyzowany, pomijając konieczność podziału obszaru na rejony komunikacyjne.

Po opracowaniu modelu sieciowego i przygotowaniu danych wejściowych do modelu popytu, podjęto dalsze działania mające na celu określenie wartości SDR na drogach lokalnych. Aby uczynić procedurę, postanowiono odnieść poszcze-



gólne etapy pracy do klasycznego modelu czterostadiowego i poczyniono następujące założenia:

- każdy z *klastrów* powinien być na tyle niewielki, aby wielkość ruchu wewnętrznego w obrębie *klastra* była pomijalnie mała. Praktyczna wielkość *klastra* nie przekraczała 5-10 mil,
- rozkład przestrzenny podróży generowanych w obrębie *klastra* będzie rozdzielany w proporcji do potencjału zewnętrznego. Założenie takie oczywiście upraszcza problematykę, lecz w przypadku małych *klastrów* wydaje się uzasadnione a ewentualne błędy pomijalne,
- podział zadań przewozowych – w warunkach amerykańskich pominięcie transportu zbiorowego z pewnością nie wpłynie na wyniki końcowe,
- rozkład ruchu w sieci – prosta procedura wielościeżkowa z programu symulacyjnego.

#### 4. Modelowanie popytu

Zasadniczym elementem proponowanej metodyki jest wyznaczenie wielkości ruchu generowanego przez rejony wewnętrzne. W tym celu zaproponowano model addytywny określający dobową liczbę podróży generowanych przez pojedynczy węzeł (stanowiący formę rejonu wewnętrznego). Model ten składa się z 10 zmiennych (5 dotyczących mieszkańców i 5 dotyczących firm działających wewnątrz *klastra*). Strukturę modelu przedstawia równanie 1:

$$P_i = a * inh_{<24} + b * inh_{25-64}^I + c * inh_{25-64}^{II} + d * inh_{25-64}^{III} + e * inh_{>65} + f * empl_{d1} + g * empl_{d2} + h * empl_{d3} + i * empl_{d4} + j * empl_{d5} \quad (1)$$

gdzie:

$P_i$  – liczba podróży samochodem osobowym generowana przez rejon  $i$  w ciągu przeciętnego dnia roboczego,

$inh_{<24}$  – liczba mieszkańców w rejonie  $i$  w wieku poniżej 24 lat,

$inh_{25-64}^I$  – liczba mieszkańców w rejonie  $i$  w wieku 25-64 lata, ze średnim dochodem poniżej 34 000 \$,

$inh_{25-64}^{II}$  – liczba mieszkańców w rejonie  $i$  w wieku 25-64 lata, ze średnim dochodem w przedziale 35 000 – 99 000 \$,

$inh_{25-64}^{III}$  – liczba mieszkańców w rejonie  $i$  w wieku 25-64 lata, ze średnim dochodem powyżej 100 000 \$,

$inh_{>65}$  – liczba mieszkańców w rejonie  $i$  w wieku powyżej 65 lat,

$empl_{d1}$  – liczba zatrudnionych w rejonie  $i$  w grupie 1: rolnictwo, kopalnie, przedsiębiorstwa budowlane, transportowe, telekomunikacyjne, administracja publiczna,

$empl_{d2}$  – liczba zatrudnionych w rejonie  $i$  w grupie 2: przemysł,

$empl_{d3}$  – liczba zatrudnionych w rejonie  $i$  w grupie 3: handel,

$empl_{d4}$  – liczba zatrudnionych w rejonie  $i$  w grupie 4: usługi,

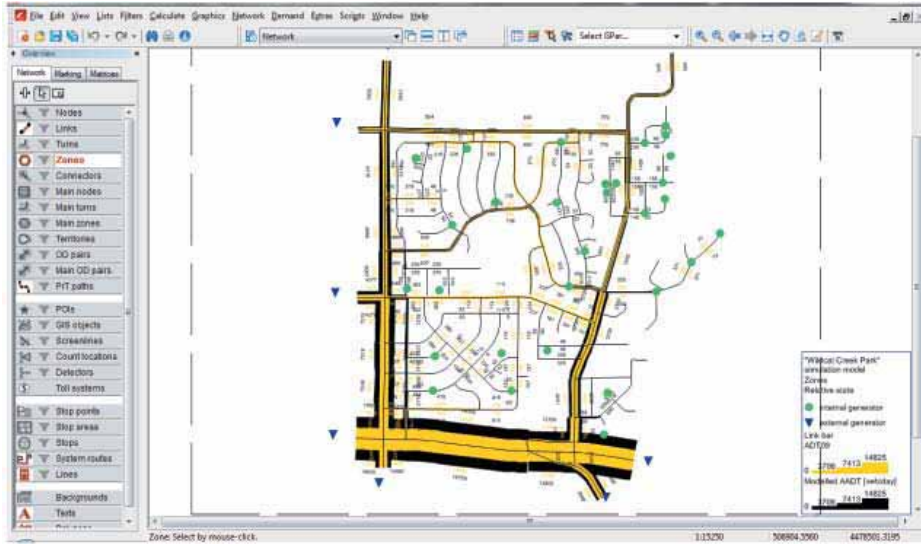
$empl_{d5}$  – liczba zatrudnionych w rejonie  $i$  w grupie 5: szkolnictwo,  
a, b, c, d, e, f, g, h, i, j – parametry modelu.

W tradycyjnym ujęciu parametry modelu można wyznaczyć na podstawie badań ruchliwości prowadzonych np. w ramach Kompleksowych Badań Ruchu. W analizowanym przypadku nie było to oczywiście możliwe, stąd konieczność nieco innego podejścia. Zaproponowano więc zastosowanie metod heurystycznych pozwalających na dobór parametrów tak, aby spodziewane wyniki jakości modelu były zadowalające. Do poszukiwania możliwych rozwiązań zdecydowano się na wykorzystanie algorytmów genetycznych, jako narzędzi do przeszukiwania przestrzeni zbioru alternatywnych rozwiązań (np. [17], [18], [19]). Algorytmy genetyczne charakteryzują się prowadzeniem poszukiwań wychodząc nie z pojedynczego punktu, a z przyjętej przestrzeni rozwiązań oraz stosują probabilistyczne reguły wyboru rozwiązania. Już w połowie lat 70-tych Holland [20] zaproponował algorytm, którego zadaniem było modelowanie procesu ewolucji i od tego czasu algorytmy genetyczne są rozwijane i udoskonalane znajdując coraz szersze zastosowania.

Istota algorytmów genetycznych polega na wytworzeniu populacji rozwiązań w sposób losowy, składającej się z osobników reprezentowanych przez chromosomy. W kroku tym, z całej przestrzeni rozwiązań losuje się zestaw danych, a następnie rozwiązania populacji początkowej poddaje ocenie zgodnie z przyjętymi kryteriami, co pozwala uporządkować osobniki w populacji. Zbyt mała populacja może przyczynić się do utknięcia algorytmu w płytkim minimum, a zbyt duża niepotrzebnie wydłuża proces obliczeniowy, nie gwarantując jednocześnie znalezienia minimum globalnego [21]. Losowy wybór chromosomów zapewnia warunek o ich statystycznej niezależności oraz stanowi wstępną penetrację przestrzeni parametrów. Następnym etapem jest operacja reprodukcji (preselekcji), podczas której chromosomy są porządkowane od najlepiej do najgorzej przystosowanego, a następnie wybierane do tworzenia kolejnej generacji. Po wyborze osobników, następuje proces ewolucji, który polega na zastosowaniu operatorów genetycznych dokonujących rekombinacji genów w chromosomach. Ostatnią operacją genetyczną jest mutacja, polegająca na losowej zamianie stanu pojedynczych bitów chromosomu na przeciwny (dotyczy to zapisu binarnego).

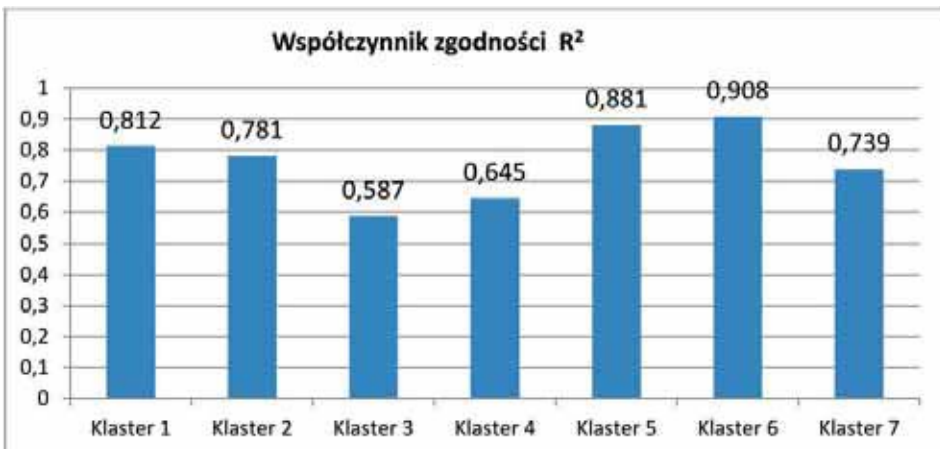
W ramach niniejszych badań problemem jest znalezienie odpowiedniego zbioru parametrów w taki sposób, aby rozwiązanie jak najdokładniej opisywało spodziewany potencjał ruchotwórczy rejonu wewnętrznego. Poszukuje się zatem rozwiązania optymalnego (najlepszego) spełniającego wybrane kryterium: najwyższa możliwa zgodność wyników rozkładu ruchu w modelu symulacyjnym pojedynczego *klastra*, wyrażona współczynnikiem zgodności  $R^2$ . Poszukiwanie parametrów modelu polega więc na przyjęciu losowo ich wartości, wyznaczeniu potencjałów ruchotwórczych, sporządzeniu proporcjonalnej więźby ruchu, dokonania rozkładu tej więźby w sieci i porównaniu wyników modelu z dostępną bazą danych pomiarowych. Etap ten polegał na zautomatyzowanym procesie tworzenia więźby ruchu bazującej na losowo wybranych parametrach modelu i przeprowadzeniu rozkładu

ruchu. Wykorzystano tutaj program Visum i opracowano skrypt w języku Python pozwalający na wykonanie szybkich obliczeń dla każdego zestawu parametrów. Badania były prowadzone na 7 modelach symulacyjnych opracowanych zgodnie z założeniami dla *klastrów*. Wyniki rozkładu ruchu dla przykładowego klastra przedstawiono na rys. 3.



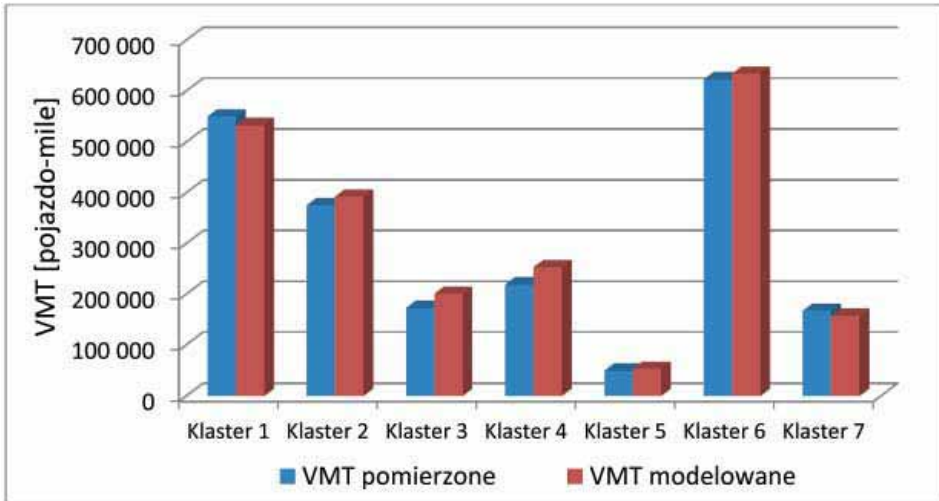
Rys. 3. Przykład sieci drogowej dla jednego z modelowanych klastrów, dla obszaru Tippecanoue

Następnie, dla każdego zestawu parametrów wyznaczono wartość  $R^2$  poprzez porównanie modelowanych wartości natężenia ruchu z dostępnymi wartościami pomiarowymi. Po zastosowaniu algorytmów genetycznych, uzyskano zbiór parametrów dla którego wyniki zgodności modelu z dostępną bazą pomiarową były zadowalające. Na rys. 4 przedstawiono wartości współczynnika zgodności dla każdego z 7 analizowanych klastrów.



Rys. 4. Wyniki analiz zgodności modelu z dostępną bazą danych pomiarowych dla poszczególnych klastrów

Można dostrzec zróżnicowane wartości współczynnika zgodności. Najniższe dotyczą dość rozległych sieci, co może być powodowane zbyt dużymi uproszczeniami dotyczącymi zwłaszcza ruchu wewnętrznego – pominięcie tych podróży w rozległych sieciach prowadzi do osłabienia modelu. Na uwagę zasługuje jednak fakt, iż celem badań było określenie wartości SDR na drogach lokalnych. Iloczyn SDR i długości odcinka pozwala oszacować pracę przewozową w pojazdomilach (*VMT – Vehicle Miles Traveled*) a w tym przypadku, nawet w słabszych *klastrach*, uzyskane wartości pracy przewozowej są bardzo zbliżone do wartości pomierzonych (rys. 5).



Rys. 5. Zestawienie pracy przewozowej wyrażonej w pojazdo – milach (VMT) dla każdej sieci (klastra)

Jest to najważniejsza cecha badanego podejścia, ponieważ znajomość pracy przewozowej stanowi podstawową informację wymaganą do właściwego zarządzania siecią drogową.

Kolejnym krokiem jest zastosowanie metodyki dla całej sieci stanu Indiana. W tym przypadku problem stanowi rozmiar sieci: łącznie zdefiniowano ponad 3,3 tys. *klastrów* pokrywających sieć składającą się z 200 tys. węzłów i ponad 400 tys. odcinków. Jest to zagadnienie złożone i jednym z planowanych sposobów jest automatyzacja procesu polegająca na generowaniu klastra, wysłaniu go do programu Visum, gdzie automatycznie zostanie wygenerowana więźba ruchu dla zadanego zagospodarowania przestrzennego cechującego dany klaster, dokonaniu rozkładu ruchu oraz eksportowi odpowiednich danych SDR do programu Map Info.

## 5. Podsumowanie

Pozyskanie danych na rozległych sieciach drogowych w stanie Indiana jest zagadnieniem bardzo czasochłonnym i kosztownym. W praktyce oznacza to, że wiele hrabstw nie prowadzi tego typu pomiarów, co przyczynia się do niewłaści-

wej polityki zarządzania siecią drogową. Podejmowane próby opracowania modeli wyznaczających wartości SDR lub pracę przewozową były zbyt pracochłonne, jak na zastosowanie w skali całego stanu, a uzyskane tą drogą wyniki nie zawsze były wiarygodne. Stąd próba podejścia do tematu z nieco innej strony, wykorzystując dane w formacie GIS o wysokiej rozdzielczości, narzędzia przeszukiwania heurystycznego, oprogramowanie symulacyjne Visum i program Map Info. Połączenie tych narzędzi, wspomagane językiem programowania VBA lub Python, pozwala stworzyć procedurę wyznaczania pracy przewozowej i SDR w sposób wiarygodny i w pełni zautomatyzowany. Największą zaletą prezentowanej metody jest jednak możliwość opracowania modelu popytu, którego parametry nie wymagają przeprowadzenia wcześniejszych badań ankietowych, jak to ma miejsce w tradycyjnym ujęciu modelowania.

## Bibliografia

- [1] Liu F., Kaiser R., Zekkos M., Allison Ch., 2006, Growth Forecasting of Vehicle Miles of Travel at County and Statewide Levels. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1957, Transportation Research Board of the National Academies, 56–65.
- [2] Jaarsma C.F., van Dijk T., 2002, Financing local rural road maintenance. Who should pay what share and why?, *Transportation Research Part A* 36, 507–524.
- [3] IMAGINE – Improved Methods for the Assessment of the Generic Impact Of Noise in the Environment, 2006, Collection Methods for Additional Data, Demand and Traffic Flow Management (WP2), [www.imagine-project.org](http://www.imagine-project.org), data dostępu: 30/08/2011.
- [4] Office of Highway Policy Information, Federal Highway Administration. Highway Performance Monitoring System Traffic Data for High Volume Routes: best practices and guidelines, <http://www.fhwa.dot.gov/policy/ohpi/hpms/fieldmanual/>, data dostępu: 30/08/2011.
- [5] Federal Highway Administration (FHWA), 1998, Travel Time Data Collection Handbook. FHWA report, chapter 5, ITS Probe Vehicle Techniques, <http://www.fhwa.dot.gov/ohim/handbook/chap5.pdf>, data dostępu: 30/08/2011.
- [6] Memmott, J.L., 1983, Factors that Affect Traffic Growth Rates and Projection of Traffic Volumes for Use in Highway Economic Models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 912, 11-15.
- [7] Xia Q., Zhao F., Chen Z., Shen D., Ospina D., 1999, Estimation of Annual Average Daily Traffic for Nonstate Roads in a Florida County. *Transportation Research Record*, No. 1660, 32-41.

- [8] Seaver, W.L., Chatterjee, A., Seaver, M.L., 2000, Estimation of Traffic Volume on Rural Local Roads. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1719, 121-128.
- [9] Noland, R.B., 2001, Relationships Between Highway Capacity and Induced Vehicle Travel. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 35(1), 47-72.
- [10] Zhong M., Hanson B., 2009. GIS-based travel demand modeling for estimating traffic on low-class roads, *Transportation Planning and Technology*, Vol. 32, No. 5, October 2009, 423-439.
- [11] Sharma S., Lingras P., Xu F., Kilbur P., 2001. Application of Neural Networks to Estimate AADT on Low-Volume Roads. *Journal of Transportation Engineering*, 426-432.
- [12] Boarnet M., Crane R., 2001, The influence of Land use on travel behavior: specification and estimate strategies. *Transportation Research Part A* 35, 823-845.
- [13] Johnston R., de la Barra T., 2000, Comprehensive regional modeling for long-range planning: linking integrated urban models and geographic information systems. *Transportation Research Part A* 34, 125-136.
- [14] Heres-Del-Valle D., Niemeier D., 2011, CO2 emissions: Are land-use changes enough for California to reduce VMT? Specification of a two-part model with instrumental variables. *Transportation Research Part B* 45, 150-161.
- [15] Mohamad D., Sinha K., Kuczek T., Scholer Ch., 1998, Annual Average Daily Traffic Prediction Model for County Roads. *Transportation Research Record*, No. 1617, 69-78.
- [16] Arabas J., Wykłady z algorytmów ewolucyjnych, Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, wydanie 2, Warszawa 2004.
- [17] Tarko, A., 2011, Research Note 7/24/2011. Estimation of Annual Average Daily Traffic and Vehicle-Miles Traveled on Local Roads in Indiana. LTAP Research Project.
- [18] Goldberg E., Algorytmy genetyczne i ich zastosowanie. Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa 2003.
- [19] Haupt L., R., Practical genetic algorithms. John Wiley & Sons, New Jersey, 2004
- [20] Holland J., Adaptation in natural and artificial systems. Ann Arbor, University of Michigan Press, 1975.
- [21] Osowski S., Sieci neuronowe do przetwarzania informacji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2006.



# A TRAFFIC DEMAND MODEL FOR LOCAL ROADS WITH CELLULAR NETWORK DECOMPOSITION AND HIGH-RESOLUTION LAND USE REPRESENTATION

---

**Andrew P. Tarko**

Ph.D., Professor of Civil Engineering, Director of Center for Road Safety, School of Civil Engineering, Purdue University, 550 Stadium Mall Drive, West Lafayette, IN 47907, USA, Phone: 765-494-5027, e-mail: tarko@purdue.edu

---

**Streszczenie.** *Amerykańskie stanowe i lokalne agencje drogowe rozszerzają zarządzanie drogowe w zakresie bezpieczeństwa i infrastruktury na drogi powiatowe i miejskie. Zarządzanie drogami lokalnymi jest szczególnie utrudnione z powodu braku danych o ruchu drogowym. Systematyczne pomiary nie są stosowane z powodu dużej liczby lokalnych odcinków drogowych i związanych z tym wysokich kosztów. Alternatywnym rozwiązaniem wydaje się estymacja ruchu z użyciem modeli ruchu w sieci drogowej.*

*Istniejące regionalne modele ruchu drogowego nie są dostosowane do modelowania ruchu na dużej liczbie dróg lokalnych. Prezentowany artykuł proponuje nowy rodzaj modelu opartego na podziale regionalnej sieci drógówek na klastry w taki sposób, że drogi ze znanymi natężeniami ruchu (drogi krajowe, regionalne oraz niektóre ważniejsze drogi lokalne) stają się granicą rozdzielającą sąsiednie klastry drogowe. Podział sieci drogowej na klastry i zastosowanie upraszczających założeń akceptowalnych dla dróg lokalnych prowadzi do dekompozycji pierwotnego modelu regionalnego na grupę uproszczonych modeli stosunkowo łatwych do kalibracji i implementacji na dużą skalę.*

*Prezentowany artykuł szczegółowo opisuje proponowany model, jego założenia upraszczające oraz kalibrację parametrów modelu w oparciu o znane natężenia ruchu na niektórych drogach lokalnych. Linearyzacja problemu kalibracyjnego jest osiągnięta dzięki uproszczeniom modelu i iteracyjnemu rozwiązywaniu układów równań liniowych.*

*Nowy rodzaj danych o zagospodarowaniu terenu został zastosowany w proponowanym modelu. Te nowe dane stają się dostępne w USA poprzez łączenie danych osobowych z danymi o miejscu zamieszkania, pracy i innych aktywnościach ludzi. Dane te są w formie zdezagregowanej (pojedyncze miejsca zamieszkania i pracy) i zawierają współrzędne geograficzne, co pozwoliło zastosować je w proponowanym modelu.*

**Słowa kluczowe:** *modelowanie podróży, średniodobowe natężenie ruchu, GIS*

## 1. Introduction

Traffic volume information is indispensable in road management systems including congestion, safety, and pavement. This information is also important for road design, maintenance and planning. National and state Departments of Transportation (DOT) have been traditionally collecting traffic volume data on major state-administered roads using permanent and temporary counting stations. During

the past few years, a need for traffic information on local roads at acceptable quality has become evident. Knowledge of the Annual Average Daily Traffic (AADT) on local roads is necessary for efficiently managing local infrastructure to wisely use existing transportation assets, improving traffic safety and programming road improvements. Reasonably complete AADT information allows estimating VMT for counties and townships.

Currently, there is no state-supported program of systematic volume data collection on local roads. The two obvious reasons are:

- 1) Until recently, this need was not obvious or at least not identified.
- 2) Applying the state system of permanent and coverage counting stations seem to be prohibitively expensive and ineffective given the vast mileage of local roads and typically low volumes.

Some local agencies perform vehicles counting in a more or less systematic manner, while other agencies limit their vehicle counting to short term and geographically constrained operations as dictated by current needs of these agencies. The past and current efforts, somewhat uncoordinated and incidental, have generated a wealth of data which although insufficient for systemic analysis of local roads, may perhaps be sufficient for investigating the relationships between traffic volumes, land use, and network characteristics. Such relationships, once known, could become the basis for practical methods of estimating traffic volumes on local roads that had not been included in traffic counting programs.

Several methods have been employed to collect and estimate traffic data for local roads. With respect to traffic data collection, in-situ technologies (pneumatic road tubes, piezoelectric sensors, magnetic loops, etc.) and non-intrusive techniques (manual counts, passive and active infra-red, passive magnetic, microwave radar, ultrasonic and passive acoustic, etc.) have been utilized or tested (Leduc, 2008; Bennett et al., 2005; FHWA, 1998; IMAGINE, 2006; Martin et al., 2003; Schmidt, 2005; USDOT, 2006).

With respect to traffic data estimation for local roads, several methodologies have been utilized, such as correlation coefficients (Talvitie et al., 1980), linear and non-linear regression (Memmott, 1983; Xia et al., 1999), regression clustering (Seaver et al., 2000; Saha and Fricker, 1988), and fixed effect cross-sectional time series (Noland, 2001). These (and other) studies have identified a number of factors that play in the forecasting of ADT or VMT, such as, traffic (historical traffic patterns, traffic districts and zones, changes in road capacity, etc.), roadway characteristics (number of lanes, road functional classification, etc.), socioeconomics (population demographics, education, income, vehicle ownership, employment characteristics, school enrollment, etc.), and geographic characteristics (agriculture, urbanization, housing, commercial and industrial land development, etc.).

None of these methods use the network-based routing vehicles. Our method will use network demand modeling principles which is more reliable than the purely statistical estimation. Model calibration will included fitting trip generation parameters by minimizing the prediction error of AADTs. The next section describes the concept of the model with simplifying assumptions that allow one-step ca-

libration. Then, detailed descriptions of the model and of the efficient estimation procedure follow. Implementation discussion of the model to Indian road network concludes the presentation.

## 2. Concept

This paper presents a new method of estimating AADTs on local roads: rural and urban based on three major inputs:

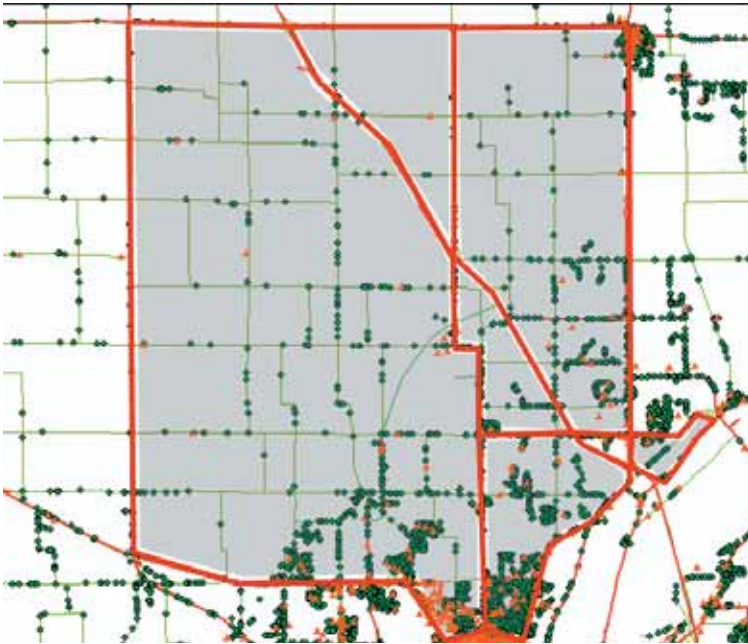
- 1) Known AADTs on major non-local roads.
- 2) Land use including residential, industrial, and commercial development, and
- 3) Local network of roads and its connection with other roads with known AADTs. This database must be supplemented with past traffic counts on local roads to allow calibration of the proposed model.

The entire road network is considered. It includes two types of road segments (links):

1. Major roads with known AADT obtained from direct measurements or from a regional network flow model that focuses on major roads. These roads form a well connected (integrated) system (path can be found between any two nodes of the major road network).
2. Minor (local) roads complement the network of the major roads. The minor roads can be grouped into well-connected cells such that major roads are network cell's boundaries. No major road penetrates a network cell.

Seven example cells were formed on a part of the West Lafayette, Indiana, road network and they are presented in Figure 1. The bold solid lines – major roads with known AADT values - are boundaries of the example cells. A regional road network representation prepared by Metropolitan Planning Organizations (MPOs), such as the Greater Lafayette MPO, may serve as the network of cell boundaries. From that point of view, the proposed road-cell model is a supplement of the regional planning model. The only difference is that the traffic used for estimating the local AADTs is recent (represent the current situation) and consequently, the estimated local AADTs apply to the present. This focus on the present traffic rather than long-term prediction fits well the need for knowing the current local AADTs but also it is consistent with the microscopic land use data that represent the recent or current land development state. There is an intrinsic difficulty in predicting detail land use for remote future.

Dividing the regional road network to cells allows decomposition of the large network into a number of smaller parts and to model local in each cell separately from other cells. The following assumptions are made to simplify the modeling effort and to enable massive implementation of the model to large regional road networks. The assumptions applied to single network cells.



*Figure 1*

1. Minor roads do not experience capacity shortage thus; the interaction between vehicles on these roads is negligible. Travel times depend on the distance, prevailing cruise speeds, and delays caused by traffic control but not by the traffic queues at intersections.
2. Large majority of trips are made for personal purpose by individual travelers (cars, vans, pickups, etc). No truck or public transit traffic is considered.
3. In residential network cells (negligible presence of businesses), the internal (intra-cell) trips are neglected. In the heterogeneous cells with business and residential land use, there is a considerable amount of internal traffic,
4. External trips do not cross the border roads (major roads). They follow the border roads and leave-enter the cell border at one of the corner intersections of the cell's border. Any road classified as minor that has a considerable through traffic at a border intersection must be converted to a major road and the initial cell has to be split accordingly.
5. There are is no through traffic that penetrates the cell. All the trough traffic uses the cell's border roads.

The above assumptions allow two convenient simplifications of the local traffic model:

1. The system-wide (or regional) trips generation and distribution problem can be disaggregated into traffic model in subareas with major roads making the border of the areas and with only minor roads inside these areas. One network cell is considered at a time

2. Traffic assignment inside a network cell neglects the interaction between flows, thus O-D flows can be assigned to the network regardless of the assignment of other flows. This assumption simplifies the traffic flows estimation.

### 3. Model

The following terms are used to describe the proposed road cell model for local roads.

*Network cell* – part of a large network enclosed by major links with known AADTs. These major links are the border of the cell.

*Internal link* – a link (minor road segment) that belongs to the network cell.

*Border link* – a major road segment that belongs to the cell or more precisely to the cell's border.

*External link* – a major or minor road segment that does not belong to the network cell.

*Internal node* – an intersection with all internal legs.

*Border node* – an intersection that has two border legs, other legs are minor and at least one leg is internal.

*Corner node* – an intersection that has two border legs and at least one major external leg (not included in the network cell).

*Trip end* – trip origination or ending at a business or household location.

*Trip generation* – number of trip ends per day associated with a link; businesses and households are assigned to the each link.

*Business type* – retailer, office, school, industrial plant, etc.

*Business size* – business characteristic(s) that determined the traffic generation (number of employees, size of the lot).

*Resident type* – categories by age, gender, salary, etc. with different number of average trip ends generated per day.

*Cruise link time* – travel time between two consecutive nodes not affected by congestion.

*Node delay* – average extra time spent at a node due to a stop sign, red signal, or vehicle queue (the last one only on major roads), specific for each turning movement.

*Link travel time* – a cruise time plus a node delay (movement specific, but averaged for both direction of travel).

*Path* – sequence of links connecting a pair of internal and external nodes or two internal nodes. One pair of nodes may have several alternative routes.

*Path travel time* – a sum of link travel times and node delay along all links included in the path.

*Shortest path* – path with the shortest path travel time between a link and external node.

*Path flow* (or *flow*) – daily number of trips along a path.  
*Volume* – AADT on a link.

A cell has  $N$  nodes and  $J$  links. Links are two-directional as are traffic flows. Any business or a household is assigned to the nearest link. External nodes have assigned external traffic volume equal the total traffic on external links ending at the external nodes. The household includes individuals of various categories (age, gender, etc), as well as business employees of various categories. External traffic is composed of vehicles of various categories (vehicle type, road type, etc.).

***Daily traffic generation at links with households, businesses, and external traffic***

$$TH_l = \sum_{m=1}^M \alpha_m \cdot H_{ml}, \quad l=1, 2..L \quad (1)$$

$$TB_l = \sum_{h=1}^H \beta_h \cdot B_{hl}, \quad l=1, 2..L \quad (2)$$

$$TE_j = \sum_{z=1}^Z \pi_z \cdot E_{zj}, \quad j=1, 2..J \quad (3)$$

$TB_l$  = number of business-generated trip ends at link  $l$ ,  
 $TH_l$  = number of household-generated trip ends at link  $l$ ,  
 $TE_j$  = attraction of external trips to node  $j$ ,  
 $Bb_l$  = business size of category  $b$  at link  $l$ ,  
 $H_{ml}$  = number of residents of category  $m$  at link  $l$ ,  
 $E_{zj}$  = external traffic volume of category  $z$  at node  $j$ ,  
 $\alpha_m, \beta_b, \pi_z$  = model parameters.

***Split of generated traffic***

All traffic is assumed origin-destination.

$$F_{lj} = \frac{(TH_l + TB_k) \cdot TE_j}{\sum_{n=1}^J TE_n} \quad (4)$$

$F_{lj}$  = trips between link  $l$  and external node  $j$ ,  
 $TB_l$  = number of business-generated trip ends at link  $l$ ,  
 $TH_l$  = number of household-generated trip ends at link  $l$ ,  
 $TE_j$  = attraction of external traffic at node  $j$ .

***Shortest path***

The shortest path is the path with the shortest travel time. A link travel time includes the cruise travel time and delay at a node:



$$t_k = \frac{L_k}{V_k} + d_{kt}$$

$t_k$  = travel time along link  $k$ ,

$L_k$  = length of link  $k$ ,

$V_k$  = speed along link  $k$  (depends on the road class),

$d_{kt}$  = average delay (two directions) on link for turning movement  $t$  (straight, left, right for both ends).

The shortest-path travel time between link  $l$  and  $j$  is:

$$t_{lj} = \sum_{k=1}^K r_{ljk} \cdot t_k \quad (5)$$

$t_{lj}$  = travel time along shortest path between link  $l$  and node  $j$ ,

$r_{ljk} = \begin{cases} 1 & \text{if link } k \text{ belongs the shortest path between } l \text{ and } j, \text{ and } l \neq k \\ 0,5 & \text{if link } k \text{ belongs the shortest path between } l \text{ and } j, \text{ and } l = k \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$

$t_k$  = travel time along link  $k$ .

#### ***Traffic assignment to alternative routes***

At this point, all-or-nothing assignment is used for route links, thus all route links on a single shortest path (shortest travel time) is loaded with  $F_{lj}$ , and half assignment is used for origin links, which is loaded with  $F_{lj}/2$ .

#### ***Link volume***

$$F_k = \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J r_{ljk} \cdot F_{lj} \quad (6)$$

#### ***Traffic conservation***

There is no need to conserve traffic at internal nodes (two-way traffic on links).

Traffic conservation constraint at external nodes takes the following form:

$$\sum_{l=1}^L F_{lj} \leq \sum_{z=1}^Z E_{zj} \quad (7)$$

## **4. Model estimation**

The shortest paths between nodes can be obtained at the beginning without consideration of traffic flows thanks to the assumption no. 1. Then, traffic generation parameters can be optimized. The proportional traffic split is optimized using a linear representation and parameters that reflect the effect of various external traffic flows.

### Approach 1

Minimize the sum of AADT estimation error squares by selecting optimal values of the model parameters  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\pi$ .

$$\min_{\{\alpha, \beta, \pi\}} \sum_{k=1}^K (F_k - Q_k)^2 \quad (8)$$

### Approach 2

Interchangeable and iterative solving of two linear sub-problems until convergence is achieved.

#### Sub-problem One

Assume initial values of  $\pi$ s parameters (for example,  $\pi_1 = \pi_2 = \dots = \pi_z = 1$ ). Replacing  $F_{ij}$  in Equation (6) with the RHS of Equation (4) yields:

$$F_k = \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J r_{ijk} \cdot \frac{TE_j}{\sum_{n=1}^J TE_n} \cdot (TH + TB_l) \quad (9)$$

Replacing TH and TB in Equation (9) with the RHSs of Equations (1) and (2) yields:

$$F_k = \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J r_{ijk} \cdot \frac{TE_j}{\sum_{n=1}^J TE_n} \cdot \left( \sum_{m=1}^M \alpha_m \cdot H_{ml} + \sum_{h=1}^H \beta_h \cdot B_{hl} \right) \quad (10)$$

After rearranging Equation (10) the following has been obtained:

$$F_k = \sum_{m=1}^M \alpha_m \sum_{j=1}^J \frac{TE_j}{\sum_{n=1}^J TE_n} \sum_{l=1}^L r_{ijk} \cdot H_{ml} + \sum_{h=1}^H \beta_h \sum_{j=1}^J \frac{TE_j}{\sum_{n=1}^J TE_n} \sum_{l=1}^L r_{ijk} \cdot B_{hl} \quad (11)$$

Simplifying Equation (11) yields:

$$F_k = \sum_{m=1}^M \alpha_m \cdot SH_{mk} + \sum_{h=1}^H \beta_h \cdot SB_{hk} \quad (12)$$

where the total number of residents of category  $m$  who live in the network cell and contribute to AADT in link  $k$  are:

$$SH_{m,k} = \sum_{j=1}^J \frac{TE_j}{\sum_{n=1}^J TE_n} \sum_{l=1}^L r_{ijk} \cdot H_{ml} \quad (13)$$

and the total contribution of businesses of category  $b$  in the network cell to AADT on link  $k$  is represented by:

$$SB_{h,k} = \sum_{j=1}^J \frac{TE_j}{\sum_{n=1}^J TE_n} \sum_{l=1}^L r_{ijk} \cdot B_{hl} \quad (14)$$

Now, the objective function 8 takes a form:

$$\min_{\{\alpha, \beta\}} OF = \sum_{k=1}^K \left( \sum_{m=1}^M \alpha_m \cdot SH_{mk} + \sum_{h=1}^H \beta_h \cdot SB_{hk} - Q_k \right)^2 \quad (15)$$

The solution of this problem exists and can be solved using the necessary condition for the solution:

$$\frac{\partial OF(\alpha, \beta)}{\partial \alpha} = 0$$

$$\frac{\partial OF(\alpha, \beta)}{\partial \beta} = 0$$

and specifically, the system of M equations:

$$\frac{\partial OF}{\partial \alpha_{m_0}} = 2 \sum_{k=1}^K SH_{m_0k} \cdot \left( \sum_{m=1}^M \alpha_m \cdot SH_{mk} + \sum_{h=1}^H \beta_h \cdot SB_{hk} - Q_k \right) = 0 \quad (16)$$

Together with H equations:

$$\frac{\partial OF}{\partial \beta_{h_0}} = 2 \sum_{k=1}^K SB_{h_0k} \cdot \left( \sum_{m=1}^M \alpha_m \cdot SH_{mk} + \sum_{h=1}^H \beta_h \cdot SB_{hk} - V_k \right) = 0 \quad (17)$$

After rearranging, there are M equations ( $m_0 = 1..M$ ):

$$\sum_{m=1}^M \alpha_m \cdot \sum_{k=1}^K SH_{m_0k} \cdot SH_{mk} + \sum_{h=1}^H \beta_h \cdot \sum_{k=1}^K SH_{m_0k} \cdot SB_{hk} = \sum_{k=1}^K SH_{m_0k} \cdot Q_k \quad (18)$$

and H equations ( $b_0 = 1..H$ ):

$$\sum_{m=1}^M \alpha_m \cdot \sum_{k=1}^K SB_{b_0k} \cdot SH_{mk} + \sum_{h=1}^H \beta_h \cdot \sum_{k=1}^K SB_{b_0k} \cdot SB_{hk} = \sum_{k=1}^K SB_{b_0k} \cdot Q_k \quad (19)$$

To enforce non-negative parameters  $\alpha$  and  $\beta$ , an extension of the formulation may be needed.

The solution should be obtained for all links available using all cells at once.

**Sub-problem Two**

The best values of  $\pi$ s will be sought through solving another optimization problem of fitting the AADT estimates to the known values on K links. There may be at least three traffic categories: freeways ( $z=1$ ), non-freeway arterial roads ( $z=2$ ), other roads ( $z=3$ ). Equation (4) introduces non-linear dependence of  $F_{ij}$  on  $TE_j$ , which complicates solving the fitting problem in Equation (15). The formulation may be linearized by proper definition of parameters  $\pi$ .

Let select values of parameters  $\pi$  such that:

$$\sum_{j=1}^J TE_j = \sum_{j=1}^J \sum_{z=1}^Z \pi_z \cdot E_{zj} = \sum_{j=1}^J \sum_{z=1}^Z E_{zj} = E \quad (20)$$

For the simplicity of equations let use the following notation for sums:

$$E = \sum_{j=1}^J \sum_{z=1}^Z E_{zj}$$

and

$$E_z = \sum_{j=1}^J E_{zj}.$$

Only Z-1 parameters  $\pi$  are to be optimized while parameter  $\pi_1$  is set to ensure this equality:

$$\pi_1 = \frac{1}{E_1} \left( E - \sum_{z=2}^Z \pi_z \cdot E_z \right) \quad (21)$$

Inserting the RHS of Equation (21) to Equation (3) and rearranging the terms yields:

$$TE_j = \frac{E_{1j} \cdot E}{E_1} + \sum_{z=2}^Z \pi_z \cdot \left( E_{zj} - \frac{E_{1j} \cdot E_z}{E_1} \right) \quad (22)$$

Using Equation (20) in Equation (4) yields the following new expression for  $F_{ij}$ :

$$F_{ij} = \varepsilon_{1ij} + \sum_{z=2}^Z \varepsilon_{zlj} \cdot \pi_z \quad (23)$$

where:

$$\varepsilon_{1lj} = (TH_l + TB_l) \cdot \frac{E_{1j}}{E_1}$$

$$\varepsilon_{zlj} = \frac{TH_l + TB_l}{E} \cdot \left( E_{zj} - \frac{E_{1j} \cdot E_z}{E_1} \right) \text{ for } z = 2 \dots Z$$

Equation (6) for traffic volume on link k becomes:

$$F_k = \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J r_{ljk} \cdot \left( \varepsilon_{1lj} + \sum_{z=2}^Z \varepsilon_{zlj} \cdot \pi_z \right) \quad (24)$$

And after transformation:

$$F_k = \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J r_{ljk} \cdot \varepsilon_{1lj} + \sum_{z=2}^Z \pi_z \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J r_{ljk} \cdot \varepsilon_{zlj} \quad (25)$$

Simplifying:

$$F_k = SE_{1k} + \sum_{z=2}^Z \pi_z \cdot SE_{zk} \quad (26)$$

Where:

$$SE_{1k} = \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J r_{ljk} \cdot \varepsilon_{1lj} = \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J r_{ljk} \cdot (TH_l + TB_l) \cdot \frac{E_{1j}}{E_1}$$

$$SE_{zk} = \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J r_{ljk} \cdot \varepsilon_{zlj} = \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J r_{ljk} \cdot \frac{TH_l + TB_l}{E} \cdot \left( E_{zj} - \frac{E_{1j} \cdot E_z}{E_1} \right)$$

Similarly to the previous solution for  $\alpha$  and  $\beta$  parameters, solving the fitting problem is equivalent to solving the system Z-1 equations:

$$\frac{\partial OF}{\partial \pi_z} = 0 \text{ for } z = 2 \dots Z$$

Calculating the partial derivatives and simplifying the Z-1 equations gives:

$$2 \sum_{k=1}^K (F_k - Q_k) \cdot SE_{zk} = 0 \text{ for } z = 2 \dots Z$$

Or

$$\sum_{w=2}^Z \pi_w \sum_{k=1}^K SE_{wk} \cdot SE_{zk} = \sum_{k=1}^K SE_{zk} (Q_k - SE_{1k}) \text{ for } z = 2 \dots Z \tag{27}$$

Solving this system of equations for  $\pi$ s yields the optimal values of  $\pi_2, \pi_3 \dots \pi_Z$ . The value of  $\pi_1$  is calculated with Equation (21).

**Iterations**

The sub-problem 1 is solved by assuming values of  $\pi$ s and estimating the parameters  $\alpha$ s and  $\beta$ s, then solving sub-problem 2 for new  $\pi$ s using the obtained parameters  $\alpha$ s and  $\beta$ s. Sub-problems 1 and 2 are kept being solved - each time using the newest values of parameters  $\alpha$ s,  $\beta$ s, and  $\pi$ s - until the consecutives estimates of the estimation error:

$$\sum_{k=1}^K (F_k - Q_k)^2 \tag{28}$$

are not much different from each other.

Summary of the estimation process includes the following major steps:

1. Divide the road network into cells; classify cells as rural or urban.
2. Prepare required data for each cell in a proper format.
3. Determine the shortest paths from internal nodes to corner nodes of each cell.
4. Group cells by type; remaining steps are performed for each group of cells.
5. Calculate the sums SH, SB, and SE needed for solving the system of equations for F.

6. Assume feasible initial  $\pi$  parameters.
7. Using current  $\pi$ s, solve the system of Equations (18) for  $\alpha$  parameters and the system of Equations (19) for  $\beta$  parameters.
8. Using current  $\alpha$ s and  $\beta$ s, solve the system of Equations (27) for  $\pi$  parameters.
9. Stop if convergence conditions satisfied; otherwise repeat p. 7 and p.8.

## 5. Future research and summary

The presented concept and its assumptions were evaluated by Szarata and Tarko (2012) on the Tippecanoe County road network using VISSUM. Thanks to a relatively small size of the network, the genetic algorithm was used to find optimal values of the  $\alpha$  and  $\beta$  parameters. The simplified version of the model did not require optimization of the  $\pi$  parameters.

The next important step is to implement the full version of the method to the Indiana network. The size of the problem is reflected in the number of nodes, links, and cells presented in Table 1. Altogether 3,361 road network cells will be formed from nearly 200 thousand nodes and 400 thousand segments.

Calibration of the model parameters will be base on 501 cells divided into rural and urban cells and including nearly 45 thousand local roads. The full set of parameters will be calibrated through iterative solving of the system of linear equations. Initial tests of the iteration-based optimization indicated quick convergence to the solution.

*Table 1. Size of Indiana road network and calibration subset*

Road and land use component	Number
Household unit	2,167,142
Business unit	186,017
Road intersection	197,192
Road segment	394,399
Road network cell	3,361
Calibration road segment	44,862
Calibration cell (with at least one known local AADT)	501

Model performance in urban cell with possible congested local roads needs particular attention as some of the simplifying assumptions may not hold and the impact of their violation needs to be assessed. There are indications that the model works well for rural roads and for small and medium-size towns with uncongested traffic and relatively small urban road networks.



## Acknowledgement

This project has been funded by the Indiana Local Technical Assistantship Program. I would like to thank Dr. Panagiotis Anastasopoulos for helpful input on the relevant literature, Dr. Mario Romero for providing useful material about the currently underway implementation of the model to Indiana, Mr. Erdong Chen for finding several inconsistencies in the model analytical representation.

## References

- [1] Bennett, C.R., Chamorro, A., Chen C., de Solminihac, H., Flintsch, G.W., 2005. Data Collection Technologies for Road Management, Version 1.0. East Asia Pacific Transport Unit, The World Bank, Washington, D.C., [http://www.road-management.info/reports/user\\_16/2005\\_data\\_collection\\_technologies.pdf](http://www.road-management.info/reports/user_16/2005_data_collection_technologies.pdf), Accessed online: 8/30/2010.
- [2] Federal Highway Administration (FHWA), 1998. Travel Time Data Collection Handbook. FHWA report, chapter 5, ITS Probe Vehicle Techniques, <http://www.fhwa.dot.gov/ohim/handbook/chap5.pdf>, Accessed online: 8/30/2010.
- [3] IMAGINE – Improved Methods for the Assessment of the Generic Impact Of Noise in the Environment, 2006. Collection Methods for Additional Data, Demand and Traffic Flow Management (WP2), [www.imagine-project.org](http://www.imagine-project.org), Accessed online: 8/30/2010.
- [4] Leduc, G., 2008. Road Traffic Data: Collection Methods and Applications. JRC Technical Notes, Institut for Prospective Technological Studies, <http://ftp.jrc.es/EURdoc/JRC47967.TN.pdf>, Accessed online: 8/30/2010.
- [5] Martin, P.T., Feng, Y., Wang, X., 2003. Detector Technology Evaluation, Technical Report, Utah Transportation Center, <http://www.mountainplains.org/pubs/pdf/MPC03-154.pdf>, Accessed online: 8/30/2010.
- [6] Memmott, J.L., 1983. Factors that Affect Traffic Growth Rates and Projection of Traffic Volumes for Use in Highway Economic Models. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 912, 11-15.
- [7] Noland, R.B., 2001. Relationships Between Highway Capacity and Induced Vehicle Travel. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 35(1), 47-72.
- [8] Saha, S.K., Fricker, J.D., 1988. Traffic Volume Forecasting Methods for Rural State Highways. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1203, 10-26.
- [9] Schmidt, M., Giorgi, L., Chevreuril, M., Paulin, S., Turvey, S., Hartmann, M., 2005. GALILEO: Impacts on road transport, JRC-IPTS Technical

- Report EUR 21865, <ftp://ftp.jrc.es/pub/EURdoc/eur21865en.pdf>, Accessed online: 8/30/2010.
- [10] Seaver, W.L., Chatterjee, A., Seaver, M.L., 2000. Estimation of Traffic Volume on Rural Local Roads. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1719, 121-128.
- [11] Szarata and Tarko, 2012. Symulacyjna ocena modelu klastrowego dla stanu Indiana. Proceeding of the Third National Conference on Travel Modeling and Traffic Prediction, Krakow, Poland, 15-16 November, 2012.
- [12] Talvitie, A., Morris, M., Anderson, M., 1980. Assessment of Land-Use and Socioeconomic Forecasts in the Baltimore Region. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 775, 38-42.
- [13] US Department of Transportation (USDOT), 2006. Traffic Detector Handbook: Third Edition, US Department of Transportation, Volume I: <http://www.tfhrc.gov/its/pubs/06108> ; Volume II: <http://www.tfhrc.gov/its/pubs/06139>, Accessed online: 8/30/2010.
- [14] Xia, Q. Zhao, F., Chen, Z., Shen, L.D., Ospina, D., 1999. Estimation of Annual Average Daily Traffic for Non-State Roads in a Florida County. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1660, 32-40.

## WYBRANE PROBLEMY MODELOWANIA ROZKŁADU PRZESTRZENNEGO I CZASU PODRÓŻY NA PRZYKŁADZIE GDAŃSKA<sup>1</sup>

---

### Marcin Zawisza

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

### Krzysztof Maciasz

mgr inż., absolwent Politechniki Gdańskiej, e-mail: krzysztof.maciasz@gmail.com

### Tomasz Budziszewski

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

---

### Krystian Birr

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

### Kazimierz Jamroz

dr hab. inż., adiunkt, Katedra Inżynierii Drogowej Politechniki Gdańskiej, e-mail: k.jamroz@pg.gda.pl

**Streszczenie.** Rozkład przestrzenny jest drugim etapem w budowie czterostopniowego klasycznego modelu podróży, w którym to dokonuje się rozdzielenia podróży pomiędzy rejon transportowe. Na tym etapie modelowania liczbę podróży pomiędzy rejonami wyznacza się najczęściej za pomocą modelu grawitacyjnego. Obecnie w Gdańsku budowany jest nowy transportowy model symulacyjny miasta, oparty na programie VISUM. W artykule przedstawione zostaną problemy, które napotkano podczas prac nad modelem, a także alternatywny sposób podejścia, w którym to najpierw dokonano podziału zadań przewozowych, a następnie rozkładu przestrzennego podróży. W dalszej części przedstawione zostaną doświadczenia w modelowaniu czasu podróży zebrane podczas prac nad modelem, w którym kluczowym aspektem było prawidłowe ustalenie prędkości swobodnych, a także dobór funkcji oporu odcinka opisującej spadek prędkości w miarę wzrostu natężenia ruchu na danym odcinku sieci.

**Słowa kluczowe:** model transportowy, modelowanie podróży, opór przestrzeni, opór odcinka

## 1. Wprowadzenie

Planowanie sieci transportowych wymaga dostępu do odpowiednich narzędzi pozwalających na ocenę funkcjonowania systemu transportowego w mieście, prowadzenie analiz wielkości ruchu czy popytu na podróże oraz ich prognozowanie. Jednym z takich narzędzi jest model podróży, który pozwala odzwierciedlić zachowania występujące w transporcie. Najpopularniejszym podejściem jest czterostopniowe modelowanie ruchu, w którym wyróżnia się następujące etapy: generacja podróży, rozkład przestrzenny ruchu, podział zadań przewozowych oraz rozkład ruchu na sieć. Takie podejście przyświecało autorom, podczas budowy nowego

---

<sup>1</sup> Wkład procentowy poszczególnych autorów: Zawisza M. 20 %, Maciasz K. 20 %, Budziszewski T20 %, Birr K. 20 %, Jamroz K. 20 %

modelu transportowego dla Miasta Gdańska. Proces budowy modelu transportowego jest przedsięwzięciem złożonym, do zbudowania którego potrzebna jest duża ilość informacji pochodzących z różnych źródeł. Liczba oraz jakość danych wykorzystanych do budowy modelu jest jednym z głównych czynników wpływających na jakość modelowania oraz wiarygodność uzyskanych prognoz. W niniejszej pracy przedstawiono wybrane problemy dotyczące rozkładu przestrzennego oraz modelowania czasu podróży na odcinkach ulic.

## 2. Budowa modelu rozkładu przestrzennego podróży

Rozkład przestrzenny podróży jest drugim etapem czterostopniowego modelu transportowego w którym to rozdziela się podróże pomiędzy rejonami transportowymi za pomocą dostępnych algorytmów. W Gdańsku zdecydowano się na wykorzystanie metody grawitacyjnej (wykorzystującej prawo powszechnego ciężenia Newtona) do opisanie kierunków podróżowania mieszkańców [3]. Jednym z kluczowych elementów tej metody jest funkcja oporu przestrzeni, która opisuje nam jaki wpływ ma odległość wykonywanej podróży (często mierzony czasem podróżowania) na prawdopodobieństwo jej wykonania [6]. Prawidłowe wyznaczenie tej funkcji jest głównym czynnikiem mającym wpływ na jakość wynikowego modelu rozkładu przestrzennego. Z tego też powodu zdaniem autorów niezwykle ważna wydaje się być wymiana doświadczeń oraz dobrych praktyk. Pozwoli to na rozszerzenie istniejącej wiedzy z zakresu modelowania rozkładu przestrzennego oraz wypracowanie jednolitego algorytmu gwarantującego poprawność budowanych w przyszłości modeli.

Jednym z istotnych elementów metody grawitacyjnej jest funkcja oporu przestrzeni, która wyznacza nam prawdopodobieństwo wykonania podróży w zależności od jej odległości. Ma ona za zadanie jak najlepiej dopasować rozkład czasu podróży macierzy modelowanej oraz empirycznej.

Do roku 2011 w Gdańsku wykorzystywano model transportowy zbudowany w oparciu o program EMME/2, w którym rozkład przestrzenny charakteryzował się:

- dużą dezagregacją danych w modelowaniu rozkładu przestrzennego,
- implementacją funkcji rozkładu czasu podróży, w modelu grawitacyjnym.

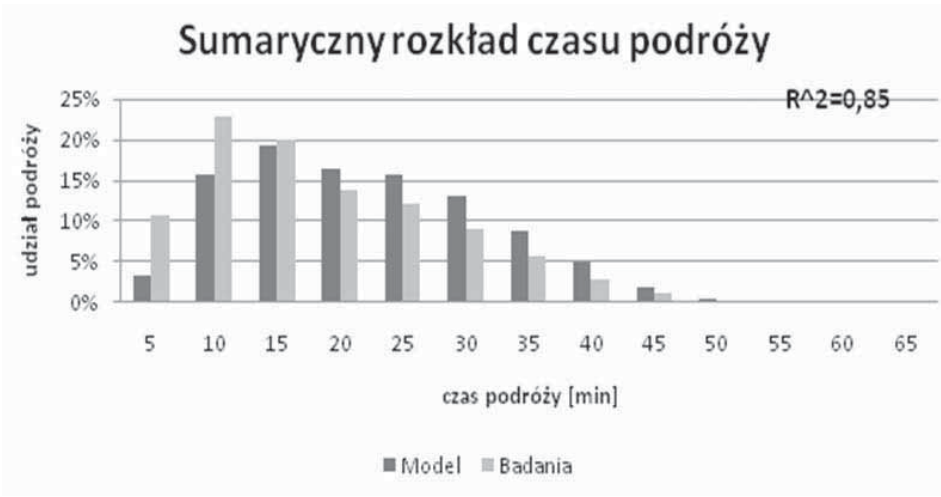
Podczas prac nad modelem zostało stworzonych około 100 modeli rozkładu czasu podróży, które zostały zaaplikowane jako funkcje oporu przestrzeni do modelu grawitacyjnego. Krzywe często były wyznaczone na podstawie kilku punktów empirycznych, przez co posiadały niski stopień współczynnika dopasowania do danych empirycznych.

W roku 2011 w ramach prac nad modelem transportowym został zbudowany od podstaw model rozkładu przestrzennego w oparciu o oprogramowanie VISUM. Wyznaczone zostały 3 funkcje oporu przestrzeni dla łańcuchów motywacji, uzyskując wysoki stopień dopasowania modelu do danych empirycznych.

Tabela 1. Wyznaczone funkcje oporu przestrzeni, oraz dopasowanie dla łańcuchów motywacji

Motywacja	Parametry estymowane			Współczynnik R <sup>2</sup>
	a	b	c	
dom-praca-dom	0,015	0,861	-0,111	0,91
dom-nauka-dom	0,075	0,361	-0,216	0,83
dom-inne-dom-nie związane z domem	0,018	1,395	-,0248	0,71
<b>Macierz sumaryczna</b>				<b>0,85</b>

Źródło: opracowanie własne



Rys.1. Sumaryczny rozkład czasów podróży dla łańcuchów motywacji

Źródło: opracowanie własne

Podczas prac nad modelem zidentyfikowano kilka problemów do których należą między innymi:

- zbyt mała liczba danych empirycznych w niektórych motywacjach,
- problem nie uwzględnienia warunków ruchu panujących na sieci,
- problem z estymacją parametrów funkcji oporu przestrzeni,
- uwzględnienie środka transportu w rozkładzie przestrzennym.

Problem niewystarczającej ilości danych, uniemożliwił wyznaczenie funkcji oporu przestrzeni osobno dla każdej motywacji. Spowodowało to konieczność agregacji danych w łańcuchy motywacji, dla których utworzone zostały funkcje oporu przestrzeni. Zdaniem autorów, warunki ruchu mają duży wpływ na decyzję podejmowaną podczas wyboru celu przemieszczenia. Dotyczy to podróży w motywacjach nie obligatoryjnych (dom-inne, inne-dom, nie związane z domem), dla których istnieje wiele rejonów docelowych mogących zaspokoić daną potrzebę transportową. Obecnie prowadzimy prace, których celem będzie zbadanie, czy uwzględnienie tego czynnika poprawi znacząco wyniki modelu rozkładu przestrzennego oraz czy ta poprawa jest na tyle istotna, że rekompensuje dodatkowy trud w niego włożony.

Problem estymacji parametrów jest związany z etapem generacji, podczas którego zbudowane zostały modele nie uwzględniające podróży wewnątrz rejonowych. Taki charakter modeli generacji wymusza, by punkt (0,0) należał do wykresu funkcji oporu przestrzeni. Wyznaczenie logicznej funkcji spełniającej powyższy warunek jest często bardzo trudne i wymaga kalibracji danych empirycznych. Problem ten można byłoby, zdaniem autorów, rozwiązać poprzez uwzględnienie w modelach generacji podróży wewnątrz rejonowych, dzięki czemu można byłoby zastosować prostsze w estymacji funkcje logitowe.

W celu osiągnięcia jak najlepszego stopnia odwzorowania charakterystyk zachowań transportowych mieszkańców, macierz podróży powinna być wynikiem sumy skalibrowanych macierzy cząstkowych. Takie podejście do modelowania rozkładu przestrzennego pozwala na uwzględnienie czynników, mających wpływ na wybór celu podróży. Najczęściej uwzględnianym elementem jest motywacja podróży, która ma zasadniczy wpływ na chęć odbycia podróży trwającej dany okres czasu. Podczas budowy modelu transportowego postanowiono sprawdzić, czy uwzględnienie dodatkowego czynnika, jakim jest rodzaj środka transportu, będzie miało istotny wpływ na jakość zamodelowanej macierzy podróży. Aby to sprawdzić zamieniono kolejnością 2 i 3 etap modelu czterostopniowego. Znajomość czasu podróży pomiędzy poszczególnymi rejonami transportowymi pozwoliła na wykorzystanie funkcji podziału zadań przewozowych do oszacowania liczby podróży generowanych i absorbowanych w poszczególnych rejonach transportowych. Zbudowano w ten sposób macierze cząstkowe, dla każdego środka transportu i łańcucha motywacji. Zabieg ten spowodował, iż uzyskano bardzo wysokie dopasowanie (powyżej 0,78) w macierzach cząstkowych transportu indywidualnego oraz 0,96 dla macierzy sumarycznej (tablica 2). Dla transportu zbiorowego uzyskano także wysokie współczynniki dopasowania na poziomie od 0,73 do 0,86 dla macierzy cząstkowych, przy czym sumaryczne dopasowanie macierzy dla transportu zbiorowego wyniosło 0,84 (tab. 2). Zastosowanie metody z uwzględnieniem środka transportu na etapie rozkładu przestrzennego spowodowało uzyskanie zdecydowanie wyższego wskaźnika dla sumarycznej macierzy podróży miasta uzyskując dopasowanie na poziomie 0,98 (rys. 2).

Tabela 2. Wyznaczone funkcje oporu przestrzeni, oraz dopasowanie - podejście alternatywne

	Motywacja	Parametry estymowane			Współczynnik R <sup>2</sup>
		a	b	c	
Transport Indywidualny	dom-praca-dom	0,01	0,7	-0,065	0,93
	dom-nauka-dom	0,054	0,178	-0,084	0,78
	dom-inne-dom-nie związane z domem	0,196	0,082	-0,181	0,95
	<b>Macierz sumaryczna</b>				<b>0,96</b>
Transport Zbiorowy	dom-praca-dom	0,012	0,418	-0,046	0,86
	dom-nauka-dom	0,007	1,354	-0,108	0,74
	dom-inne-dom-nie związane z domem	0,013	0,755	-0,067	0,73
	<b>Macierz sumaryczna</b>				<b>0,84</b>

Źródło: opracowanie własne





Rys. 2. Sumaryczny rozkład czasów podróży - podejście alternatywne  
 Źródło: opracowanie własne

### 3. Modelowanie czasu podróży na odcinkach ulic

Rozkład ruchu na sieć transportową jest ostatnim etapem czterostopniowego modelu ruchu. Opiera się on na rozłożeniu danej macierzy podróży na wcześniej przygotowaną sieć. Działanie to wymaga zastosowania odpowiedniego modelu wyboru trasy, który opiera się na określeniu zależności pomiędzy charakterystykami popytu, a charakterystykami podaży w systemie transportowym. Popyt na usługę transportowa przedstawiony jest za pomocą macierzy popytu podróży, pokazującej wielkość potoku ruchu, określonej dla danego środka transportu. Macierz sporządzana jest dla poszczególnych rejonów transportowych i wyznaczana dla określonego okresu, tj. doby bądź godziny szczytu. Podaż przedstawiona jest w postaci przygotowanej sieci transportowej, w której determinowane są czynniki wpływające na ruch pojazdów (prędkość, przepustowość, opłaty drogowe). W miejskich sieciach uliczno - drogowych mamy do czynienia z dużymi wartościami natężeń ruchu, w szczególności w godzinach szczytu porannego i popołudniowego. Tworzą się przeciążenia związane z korkami, niewystarczającą przepustowością wybranych ciągów i skrzyżowań. Z najkrótszych fizycznie połączeń korzysta tak wiele osób, iż czas przejazdu danego odcinka staje się mało atrakcyjny, a wybór dłuższej, okężnej drogi jest realną alternatywą. Wybór drogi alternatywnej zdeterminowany jest poprzez subiektywną analizę czynników dokonywaną przez każdego z uczestników ruchu, należy wśród nich wyszczególnić [9]:

- przewidywany czas podróży na danej trasie,
- długość trasy,
- opłaty drogowe.

Opory należy zdefiniować przed przystąpieniem do rozkładania potoków ruchu na sieć transportową. Wybór odpowiedniej funkcji jest sprawą kluczową, należy zastosować taką, która w sposób najdokładniejszy opisuje zmiany czasu przejazdu

odcinka sieci w miarę wzrostu natężenia ruchu. W wyniku zastosowania funkcji otrzymuje się czasy przejazdów, które stają się podstawą do obliczenia pracy przewozowej dla danego układu transportowego. Pierwsze funkcje oporu powstały w latach 50. ubiegłego wieku. Zazwyczaj były to proste funkcje, często liniowe, których jedyną modelowaną zmienną była odległość [5]. Wiadomo jest, że czas podróży uzależniony jest głównie od prędkości, która powiązana jest w nierozdzielny sposób z natężeniem ruchu na danym odcinku. Rozwój mocy obliczeniowej komputerów umożliwił tworzenie coraz to bardziej skomplikowanych funkcji oporu, wykorzystywanych w komputerowych programach symulacyjnych, w których odwzorowanie rzeczywistej sytuacji ruchowej znacząco się poprawiło.

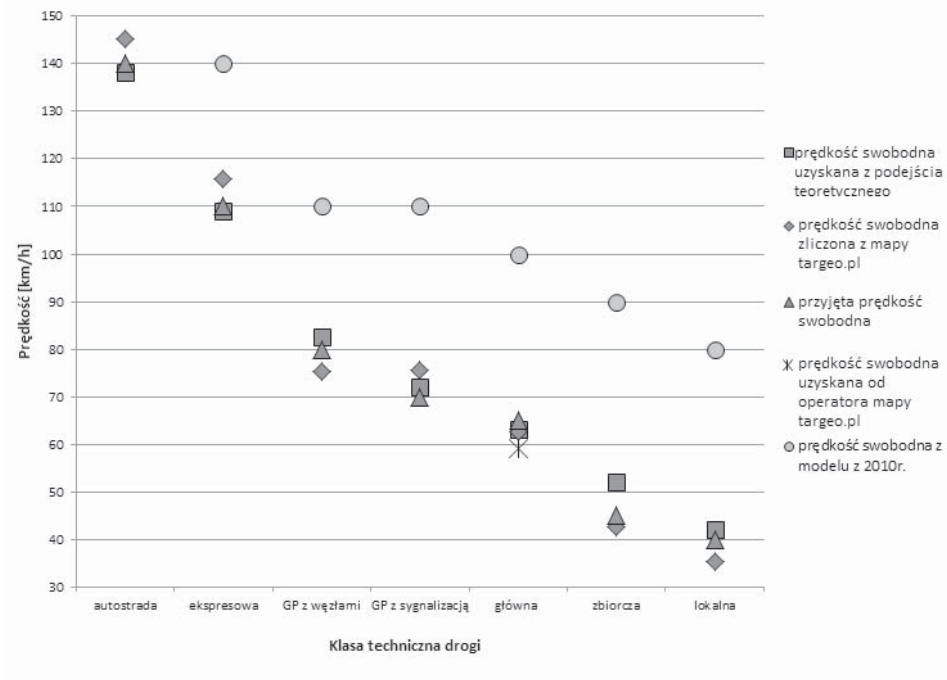
W 2009 roku przeprowadzono w Gdańsku Kompleksowe Badania Ruchu, dzięki czemu możliwe było przystąpienie do budowy nowego, doskonalszego modelu prognostycznego, który pozwolił na wyeliminowanie nieścisłości często pojawiających się podczas budowy modeli prognostycznych. Do najważniejszych z nich można zaliczyć:

- przyjmowanie zawyżonych wartości prędkości swobodnych, w których nie uwzględnia się aktualnej sytuacji ruchowej,
- przyjmowanie mało zrozumiałych krzywych oporu odcinka,
- przyjmowanie zbyt dużej liczby funkcji oporu odcinka,
- zbyt mała ilość danych empirycznych przyjmowanych do kalibracji.

W nowym transportowym modelu symulacyjnym dla miasta Gdańska [1], [4] zbudowanym na bazie programu VISUM zweryfikowano funkcje oporu odcinków. Skorzystano z modeli teoretycznych [8] do określania prędkości swobodnej, zakładających istnienie wzorcowego odcinka ulicy, na którym prędkość korygowana jest poprzez szereg czynników związanych z różnymi przyczynami utrudnień w ruchu, powodującymi obniżenie prędkości. Otrzymane wartości prędkości swobodnej kalibrowano za pomocą danych uzyskanych z różnych źródeł:

- badań własnych prowadzonych przez Katedrę Inżynierii Drogowej Politechniki Gdańskiej, Fundacji Rozwoju Inżynierii Lądowej – dane dotyczące prędkości podróży, prędkości swobodnej i prędkości chwilowych,
- danych pochodzących z firmy Indigo Sp. z o.o. operatora serwisu [mapa.targeo.pl](http://mapa.targeo.pl) - dane dotyczące prędkości nocnej dla głównego ciągu transportowego na odcinku od ul. Piastowskiej, po południową granicę miasta z gminą Pruszcz Gdański,
- danych dotyczących prędkości nocnych publikowanych w ramach serwisu [mapa.targeo.pl](http://mapa.targeo.pl) na poszczególnych ulicach miasta.

Dokonano porównania i analizy wartości pochodzących z poszczególnych metod. Na rys. 3 zaprezentowano zestawienie wartości przyjętych do wyznaczenia prędkości swobodnych w nowo budowanym modelu. Ostatecznie przyjęte prędkości w ruchu swobodnym stanowią średnią z prędkości zliczonych z mapy, prędkości uzyskanych od operatora serwisu [targeo.pl](http://mapa.targeo.pl), a także prędkości obliczonych w wyniku zastosowania modelu teoretycznego.



Rys. 3. Porównanie wartości prędkości swobodnych

Źródło: opracowanie własne

Częstym niedopatrzeniem podczas budowy modeli jest przyjmowanie skomplikowanych funkcji oporu odcinków, zawierających zbyt dużo zmiennych, które nie przekładają się na dokładność odwzorowania spadku prędkości na odcinku drogi w miarę wzrostu natężenia ruchu. Funkcje oporu odcinka należy definiować w jasny i klarowny sposób. Podczas budowy nowego modelu zdecydowano się na użycie funkcji BPR2 często stosowanej i zaimplementowanej w programie VISUM, została ona przedstawiona w klasyczny sposób:

$$t_{cur} = t_0 \cdot (1 + a \cdot sat^b) \quad \text{gdy} \quad sat \leq sat_{crit} \quad (1)$$

$$t_{cur} = t_0 \cdot (1 + a \cdot sat^{b'}) \quad \text{gdy} \quad sat > sat_{crit} \quad (2)$$

gdzie:

$$sat = \frac{q}{q_{max} \cdot c} \quad (3)$$

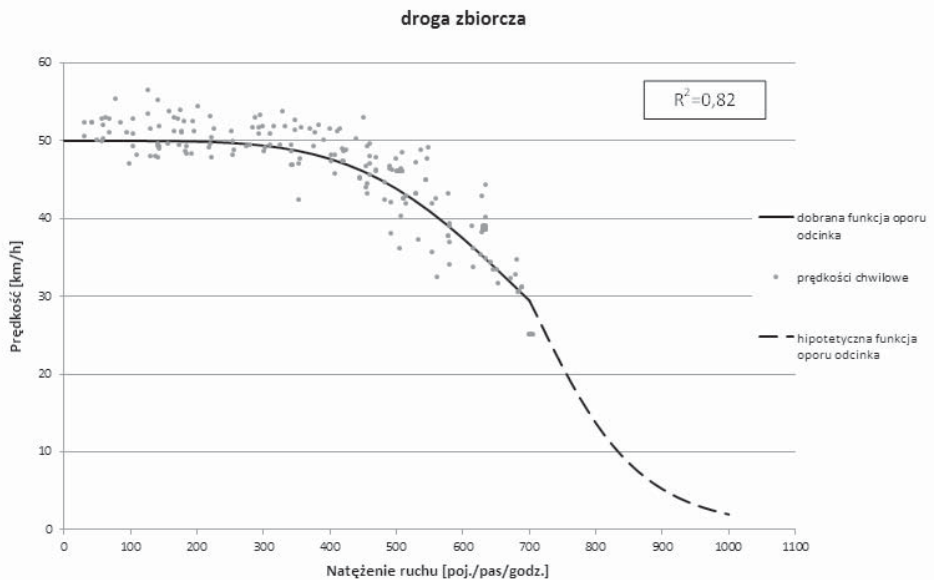
Oznaczenia:

 $t_{cur}$  - czas przejazdu odcinka jednostkowego w sieci obciążonej, $t_0$  - czas przejazdu odcinka jednostkowego w ruchu swobodnym, $q$  - natężenie na odcinku, $q_{max}$  - przepustowość odcinka, $a, b, b', c$  - parametry modelu

$sat$  - nasycenie

$sat_{crit}$  - wartość nasycenia, po osiągnięciu poziomu przepustowości.

Postanowiono zatem znacząco uprościć dobór przyjmowanych krzywych oporu. Zdecydowano się na nie przyjmowanie podziału na obszary funkcyjne miasta (śródmieście, górny taras, dolny taras), ujednoczono podział ze względu na klasę techniczną i przepustowość drogi, przełożyło się to na zrozumiały podział przyjętych funkcji. Kalibracja została wykonana na podstawie badań przeprowadzonych przez Fundację Rozwoju Inżynierii Lądowej, składających się na pomiary prędkości chwilowych na układzie uliczno-drogowym miasta Gdańska, opracowano modele zależności prędkości od natężenia ruchu dla różnych klas ulic występujących w Gdańsku. Pomiary przeprowadzone były w maju 2010 roku podczas dobrych warunków atmosferycznych. Swoim zasięgiem obejmowały ulice o zróżnicowanej klasie technicznej (droga ekspresowa, główna, lokalna, zbiorcza). W celu zbadania i weryfikacji wartości prędkości osiąganey przy maksymalnym natężeniu ruchu na danym jednostkowym odcinku drogi wykorzystano badania symulacyjne za pomocą programu TRANSYT. Uzyskane dane posłużyły do weryfikacji kształtu krzywej oporu, w tym do określenia prędkości panującej przy 100% nasyceniu. Na rys. 4 zaprezentowano przykład dopasowania krzywej oporu odcinka do empirycznych wartości prędkości chwilowych dla drogi zbiorczej. Uzyskano współczynnik  $R^2=0,82$ .



Rys. 4. Dopasowanie krzywej oporu odcinka do wartości empirycznych

Źródło: opracowanie własne

#### 4. Podsumowanie

Zaprezentowane w niniejszym artykule zagadnienia miały za zadanie ukazanie niektórych problemów, które towarzyszą pracy nad budową modeli rozkładu przestrzennego oraz czasu podróży, a także autorskie propozycje autorów w kwestii ich rozwiązania. Przedstawiona w artykule propozycja uwzględnienia dodatkowego czynnika, jakim jest środek transportu, pozwoliła na zdecydowaną poprawę dopasowania wynikowej globalnej macierzy podróży w modelu gdańskim. Jednak przedstawioną relację należałoby skonfrontować z wynikami uzyskanymi w innych miastach Polskich uwzględniających dane podejście.

Do opracowania modeli funkcji oporu odcinka drogi przyjęto także nowatorskie podejście do określenia prędkości swobodnych. Zestawiono wyniki podejścia teoretycznego do wartości empirycznych pochodzących z pomiarów na sieci drogowej, wyników przesyłanych z nawigacji samochodowych. Pozwoliło to na weryfikację przyjętych założeń i podejścia do omawianego zagadnienia. Opracowanie nowych modeli wymagało przeprowadzenia szeregu konsultacji i zabiegów wykorzystujących wiele różnych źródeł danych. Obiecujące wydaje się wykorzystanie w przyszłości wyników pomiarów ruchu realizowanych przez systemy nawigacji pojazdów do szacowania prędkości podróży.

#### Literatura

- [1] Birr K., Maciasz K., Romanowska A., Zawisza M., *Metodyka budowy prognostycznego modelu transportowego na przykładzie Miasta Gdańska*, praca dyplomowa magisterska, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2012.
- [2] *Badania Kompleksowe dla Gdańska*, Biuro Rozwoju Gdańska, Gdańsk 2009.
- [3] Easa S., M., *Urban Trip Distribution in Practice. I: Conventional Analysis*, Journal of Transportation Engineering, 1993.
- [4] 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, Gdańsk 2012.
- [5] Jastrzębski W., *Funkcje oporu odcinka. Transport a rozwój zrównoważony (problemy komunikacji miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego)*, Poznań 2005.
- [6] Lilpop Z., Sidorenko A., Waltz A., *Prognozowanie ruchu miejskiego*, Instytut Kształtowania Środowiska, Warszawa 1983.
- [7] Mendel T., Budziszewski T., *Biuro Rozwoju Gdańska: Kalibracja modelu systemu transportowego miasta gdańska na podstawie kompleksowych badań ruchu*, Gdańsk 2009 i *prognozy ruchu dla stanów planistycznych*, Gdańsk 2009.

- [8] Szczuraszek T., Prędkość pojazdów w warunkach drogowego ruchu swobodnego, Polska Akademia Nauk, Warszawa 2008.
- [9] Żochowska, R., Modelowanie wyboru trasy w gęstych sieciach miejskich, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.



## WPŁYW GĘSTOŚCI PODZIAŁU NA REJONY KOMUNIKACYJNE NA WYNIKI PROGNOZY RUCHU

---

Michał Żądło

mgr inż., Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Oddział w Krakowie, Wydział Studiów, ul. Mogilska 25, 31-542 Kraków, tel. +49-8 12 616 37 30, e-mail: mzado@gddkia.gov.pl

---

**Streszczenie.** *Artykuł pokazuje, że gęstość podziału obszaru analizy na rejony ruchotwórcze ma istotny wpływ na wyniki analiz ruchu. Obliczenia wykonano metodą modelowania w Departamencie Studiów Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad w Krakowie dla 3 wariantów podziału - podział bardzo gęsty (rejony = wsie, osiedla, dzielnice), podział gęsty (rejony = gminy) i podział rzadki (rejony = powiaty). Zbudowano model sieci drogowej obejmujący województwo małopolskie oraz obszary przyległe w sąsiednich województwach, a także na Słowacji. Przeanalizowano 4 inwestycje drogowe: autostradę A4 Kraków - Bochnia, drogę ekspresową S7 Lubień - Rabka, drogę ekspresową S7 Miechów - Kraków oraz obwodnicę Zabierzowa. Wyniki analizy pokazują zbliżone wartości natężeń ruchu dla planowanych inwestycji oraz bardzo duże różnice w natężeniach ruchu na drogach alternatywnych w szerokim obszarze. Powoduje to znaczne różnice w obliczonych pracach przewozowych oraz relacjach skrętnych na węzłach i skrzyżowaniach, a zatem wpływa na wyniki innych analiz – analiz przepustowości, ekonomicznych, środowiskowych, itd. Wykonując prognozę ruchu należy zdawać sobie sprawę, że każde zadanie jest inne i wymaga indywidualnego podejścia. Trzeba zastanowić się, gdzie tak naprawdę są źródła i cele podróży. Czasami wystarczy podział na gminy, czasami trzeba dokonać jeszcze gęstszego podziału rejonów komunikacyjnych - zejść do poziomu wsi, osiedla czy dzielnicy miasta, czyli dokonać podziału gmin i miast na części. Krajowy Model Ruchu, zbudowany z dokładnością powiatów stanowi bazę wyjściową do analiz, niemniej zawsze wymaga dostosowania do konkretnego zadania.*

**Słowa kluczowe:** *prognozowanie ruchu, modele regionalne*

### Wstęp

Departament Studiów Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad (GD-DKiA) zajmuje się m.in. modelowaniem i prognozowaniem ruchu drogowego na sieci dróg krajowych, a także opiniowaniem opracowań dotyczących prognoz ruchu na drogach krajowych, wykonanych przez firmy zewnętrzne na zlecenie GD-DKiA.

Prognozy ruchu są bardzo ważne – stanowią podstawę projektowania elementów drogowych (przekroje dróg, elementy węzłów drogowych), są materiałem wyjściowym do dalszych analiz – analiz przepustowości, analiz efektywności ekonomicznej inwestycji, ocen oddziaływania na środowisko i wielu innych analiz, do

wykonywania studiów wykonalności, przygotowywania materiałów do wniosków o współfinansowanie inwestycji ze środków UE, itd.

W artykule przedstawione zostały wyniki analiz, które pokazują, że gęstość podziału na rejony komunikacyjne ma istotny wpływ na wyniki prognoz ruchu. Obliczenia zostały wykonane w Departamencie Studiów GDDKiA – Wydziale Studiów w Krakowie metodą modelowania, dlatego pokazują nie tylko natężenia ruchu na planowanych nowych drogach, ale także wpływ tych inwestycji na istniejący układ drogowy.

Obliczenia wykonano dla 4 planowanych inwestycji w Małopolsce:

- 1) Autostrada A4 Kraków – Szarów – Bochnia – Tarnów,
- 2) Droga ekspresowa S7 Lubień – Skomielna Biała – Rabka Zdrój,
- 3) Droga ekspresowa S7 Moczydło – Miechów – Widoma – Kraków,
- 4) Obwodnica Zabierzowa w ciągu drogi krajowej nr 79.

Lokalizację tych inwestycji pokazuje rysunek 1.



Rys. 1. Rozpatrywane inwestycje drogowe

### Założenia do prognozy ruchu

- Analiza została wykonana metodą modelowania w programie EMME.
- Model sieci drogowej obejmuje województwo małopolskie wraz z terenami przyległymi (w woj. śląskim, świętokrzyskim i podkarpackim oraz na Słowacji).
- Model obejmuje wszystkie drogi krajowe, wojewódzkie, ważniejsze drogi powiatowe i miejskie.

- Model został skalibrowany do wyników Generalnych Pomiarów Ruchu z roku 2010. Uzyskano bardzo dobrą zgodność modelu z wynikami pomiarów na poziomie  $R^2 = 0,95$ . Odcinki spełniające warunek  $GEH < 5$  stanowią 82% ogółu odcinków sieci.
- Na bazie modelu sieci istniejącej zbudowano modele sieci dla roku 2025, uwzględniające m.in. zmiany w sieci drogowej (nowe inwestycje drogowe) oraz odpowiednie wskaźniki wzrostu ruchu wg metody opartej o wskaźniki wzrostu PKB regionów Polski.
- Obliczenia prognostyczne wykonano dla roku 2025.
- Przewidziano opłaty na autostradach i drogach ekspresowych wg aktualnie obowiązujących stawek w systemie ViaToll oraz opłaty na nowych odcinkach autostrad dla samochodów osobowych i dostawczych w wysokości 0,10 zł/km.

### Rozpatrywane warianty

W analizie rozpatrywano 3 warianty podziału na rejony komunikacyjne:

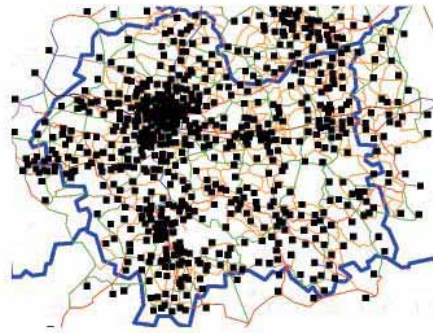
- Wariant 1 – bardzo gęsty podział na rejony (rejony = wsie, osiedla, dzielnice miast).
- Wariant 2 – gęsty podział na rejony (rejony = gminy).
- Wariant 3 – rzadki podział na rejony (rejony = powiaty).

Na rys. 2 pokazano podział na rejony komunikacyjne dla tych 3 wariantów. W pierwszym wariantcie mamy 748 rejony komunikacyjne, w drugim 246 rejonów, w trzecim 55 rejonów.

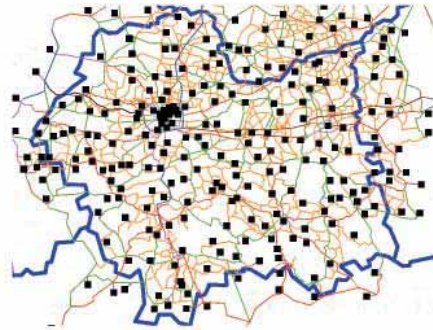
### Wyniki prognozy ruchu dla inwestycji nr 1

Rozpatrywana inwestycja nr 1 to autostrada A4 Kraków – Szarów – Bochnia. Autostrada A4 obecnie dopuszczona jest do ruchu na odcinku od granicy z Niemcami do Szarowa (ok. 20 km na wschód od Krakowa). Odcinek Kraków – Szarów jest bezpłatny dla samochodów osobowych, natomiast jest płatny dla samochodów ciężarowych i autobusów w systemie ViaToll. W budowie są kolejne odcinki A4 Szarów – Bochnia – Tarnów – Rzeszów – granica z Ukrainą. Po wybudowaniu nowych odcinków droga zostanie objęta opłatami dla wszystkich pojazdów na całym odcinku od Krakowa aż do granicy z Ukrainą.

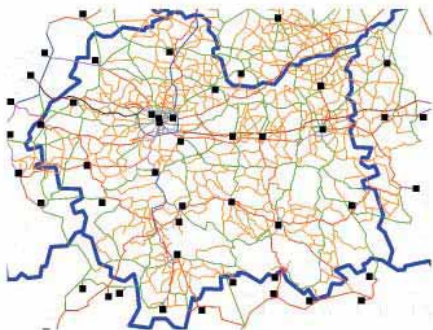
Wyniki prognozy ruchu dla inwestycji nr 1, a także dla sąsiednich dróg dla trzech wariantów podziału na rejony komunikacyjne pokazuje rys. 3 oraz tabela 1.

**WARIANT 1 - BARDZO GĘSTY PODZIAŁ NA REJONY (WSIE, OSIEDLA)**


■ rejony komunikacyjne wsie/osiedla (748)

**WARIANT 2 - GĘSTY PODZIAŁ NA REJONY (GMINY)**


■ rejony komunikacyjne gminy (246)

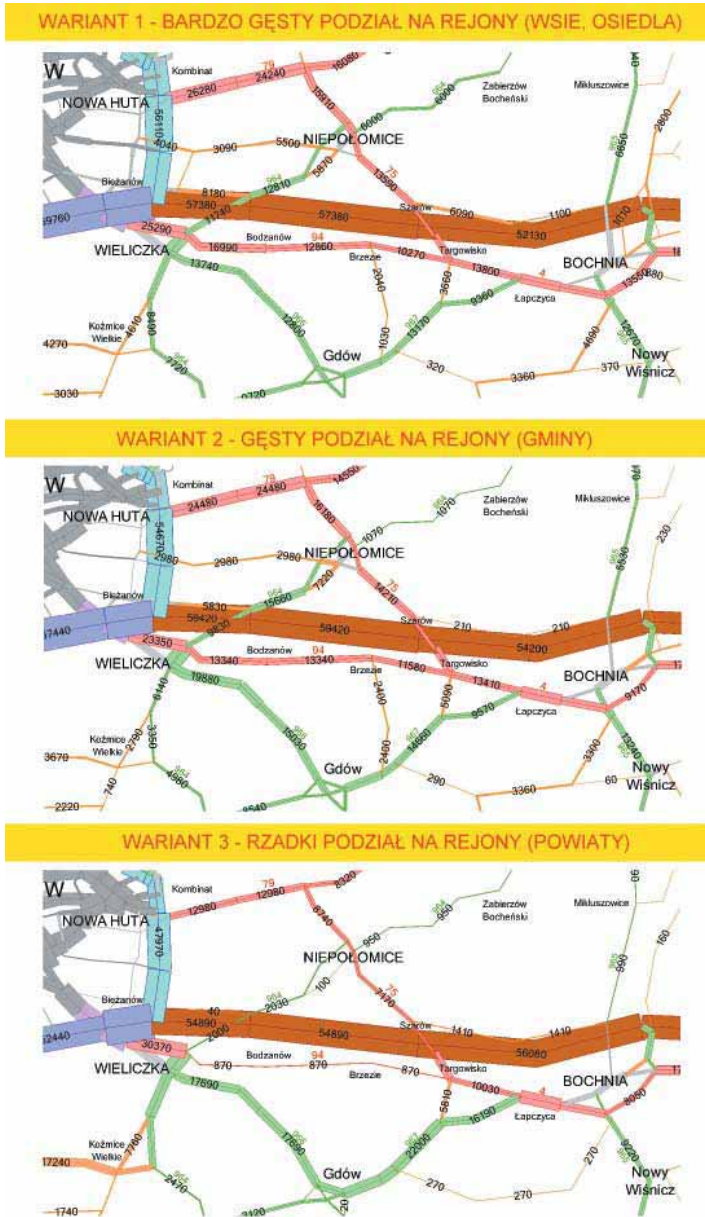
**WARIANT 3 - RZĄDKI PODZIAŁ NA REJONY (POWIATY)**


■ rejony komunikacyjne powiaty (55)

Rys. 2. Podział na rejony komunikacyjne

Uwaga 1. Modele sieci drogowej dla roku 2025 są identyczne dla wszystkich 3 wariantów, jedyną różnicą jest podział na rejony komunikacyjne i podłączenia tych rejonów. Więźby ruchu dla wariantu 1 zostały zagregowane do poziomu gmin (wariant 2) i do poziomu powiatów (wariant 3).

Uwaga 2. Na rysunkach nie pokazano odcinków, na których wyliczone zostało zerowe natężenie ruchu (brak ruchu).



Rys. 3. Prognoza dla autostrady A4 Kraków-Bochnia

Tab.1. Wyniki prognozy ruchu dla autostrady A4 Kraków – Bochnia i dróg sąsiednich

Wyszczególnienie	Natężenie ruchu SDR (poj./dobę)		
	wariant 1	wariant 2	wariant 3
A4 Kraków - Szarów - Bochnia	52130-57380	54200-59420	54890-56080
DK4 Wieliczka - Targowisko - Bochnia	10270-16990	11580-13410	870-10030
DW964 Wieliczka - Niepołomice - Ispina	6000-12810	1070-15660	950-2030

We wszystkich wariantach otrzymano podobne wyniki dla autostrady A4. Natomiast duże różnice występują na drogach alternatywnych do autostrady – drodze krajowej nr 4 oraz drodze wojewódzkiej nr 964. Im większa gęstość rejonów komunikacyjnych, tym wyliczone natężenia ruchu na tych drogach są wyższe.

Warto tutaj zwrócić uwagę na odcinek drogi nr 4 Wieliczka – Targowisko. W wariantach 1 i 2 uzyskano na nim podobne wyniki – kilkanaście tysięcy poj./dobę. Natomiast w wariantcie 3 zaledwie 870 poj./dobę. Jest to wynik mało prawdopodobny, ponieważ już w 2010 roku, przy bezpłatnej autostradzie A4, na tym odcinku było natężenie 6840 poj./dobę. Trudno się spodziewać, że wprowadzenie opłat na autostradzie A4 dla samochodów osobowych spowoduje odpływ prawie całego ruchu z drogi alternatywnej (drogi nr 4) na autostradę. Będzie raczej odwrotnie – część kierowców zrezygnuje z jazdy płatną autostradą i wybierze bezpłatną trasę alternatywną, czyli drogę krajową nr 4. Wobec tego natężenia ruchu na drodze nr 4 powinny wzrosnąć a nie zmaleć.

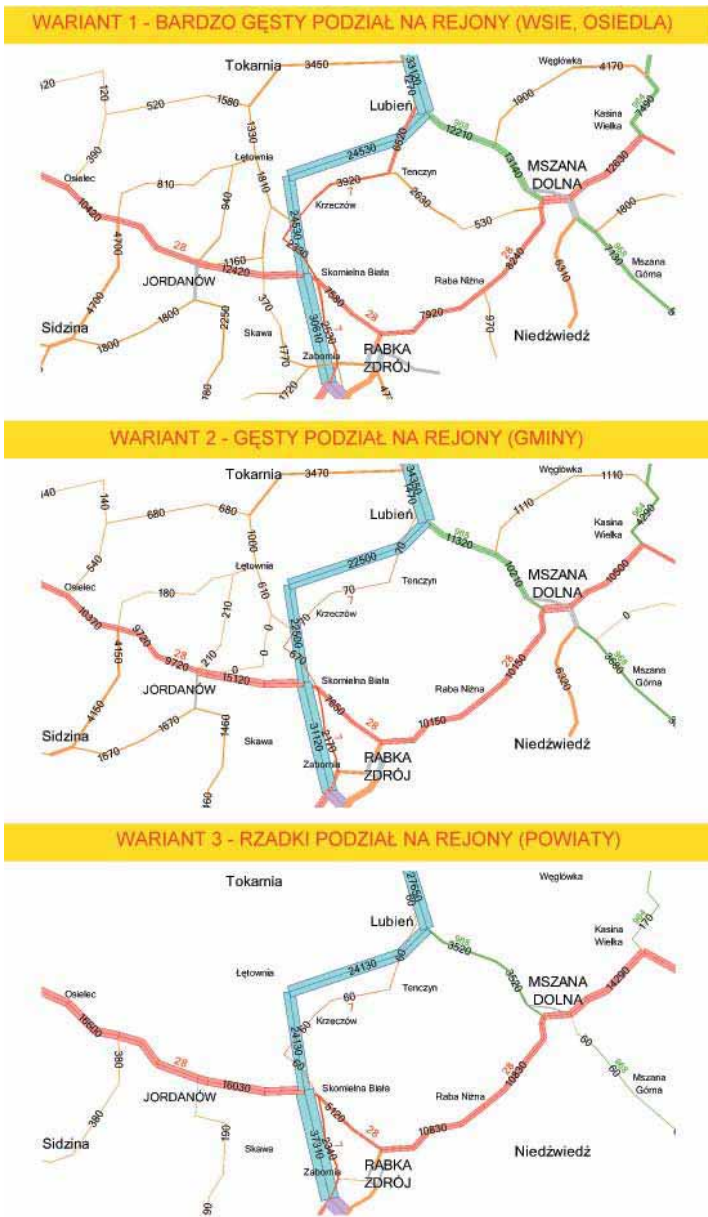
Dla inwestycji nr 1 wyniki prognozy znacznie się różnią w zależności od tego, jaki podział na rejonny został przyjęty. Wyniki analizy dla samej inwestycji są zbliżone, ale dla pozostałych dróg zupełnie inne. Wyniki uzyskane w wariantach 1 i 2 są zadowalające. Natomiast w wariantcie 3 (mała gęstość rejonów komunikacyjnych) wyniki są wątpliwe.

### **Wyniki prognozy ruchu dla inwestycji nr 2**

Rozpatrywana inwestycja nr 2 to droga ekspresowa S7 Lubień – Skomielna Biała – Rabka Zdrój, czyli przedłużenie istniejącej ekspresowej Myślenice – Lubień. Wyniki prognozy ruchu dla inwestycji nr 2 dla trzech wariantów podziału na rejonny komunikacyjne pokazuje rysunek 4 oraz tabela 2.

We wszystkich wariantach otrzymano podobne wyniki dla drogi ekspresowej S7. Natomiast duże różnice występują na drogach alternatywnych – drodze krajowej nr 7 oraz drodze wojewódzkiej nr 968. Im mniejsza gęstość rejonów komunikacyjnych, tym natężenia na tych drogach są niższe. W wariantach 2 i 3 na odcinku istniejącej drogi krajowej nr 7 Lubień – Tenczyn – Krzeczów uzyskano zaledwie 60-70 poj./dobę. Tymczasem droga nr 7 prowadzi przez tereny zabudowane wsi Lubień, Tenczyn i Krzeczów, leżących na terenie gminy Lubień (gmina Lubień rozciąga się na całej trasie od Lubnia do Skomielnej Białej). Wobec tego samego ruchu lokalnego powinno być więcej. Poza tym należy się spodziewać na drodze krajowej nr 7 również dodatkowego ruchu samochodów ciężarowych, które z powodu opłat na drodze ekspresowej S7 wybrały przejazd drogą krajową nr 7.





Rys. 4. Prognoza dla ekspresowej S7 Lubień-Rabka

Tab.2. Wyniki prognozy ruchu dla ekspresowej S7 Lubień – Rabka Zdrój i dróg sąsiednich

Wyszczególnienie	Natężenie ruchu SDR (poj./dobę)		
	wariant 1	wariant 2	wariant 3
S7 Lubień – Skomielna Biała – Rabka	24530-30610	22500-31120	24130-37310
DK7 Lubień – Skomielna Biała – Rabka	2330-6520	70-2170	60-2340
DW968 Lubień – Mszana Dolna	12210-13140	10210-11320	3520

Warto również zwrócić uwagę na drogę wojewódzką nr 968 Lubień – Mszana Dolna. W wariantach 1 i 2 otrzymano tutaj natężenia ruchu ok. 11-12 tys. pojazdów. Natomiast w wariantcie 3 zaledwie 3520 poj./dobę. Jest to wynik wątpliwy. Już w roku 2010 na tym odcinku było 8370 poj./dobę (ponad 2 razy więcej). Jest mało prawdopodobne, że droga ekspresowa przejmie aż tak dużą część ruchu z tej drogi, ponieważ tak naprawdę nie jest to droga alternatywna do ekspresowej – prowadzi w innym kierunku – południowo-wschodnim – w kierunku Limanowej i Nowego Sącza. Poza tym, w wariantcie 3 na wielu drogach lokalnych uzyskano ruch zerowy.

Dla inwestycji nr 2 wyniki prognozy znacznie się różnią w zależności od tego, jaki podział na rejony przyjęto. Wyniki analizy dla samej inwestycji są zbliżone, ale dla pozostałych dróg zupełnie inne. Mała gęstość podziału na rejony (wg powiatów) daje w tym przypadku bardzo wątpliwe wyniki analizy. Niestety większa gęstość (podział wg gmin) również nie daje satysfakcjonujących wyników, ponieważ nie uwzględnia ruchu wewnętrznego w gminie Lubień (Lubień – Tenczyn – Krzeczów – Skomielna Biała), który po oddaniu do ruchu drogi ekspresowej S7 będzie stanowić główną klientelę istniejącej drogi krajowej nr 7. Najbardziej prawdopodobne wyniki daje wariant 1 – bardzo gęsty podział na rejony (wg wsi, osiedli).

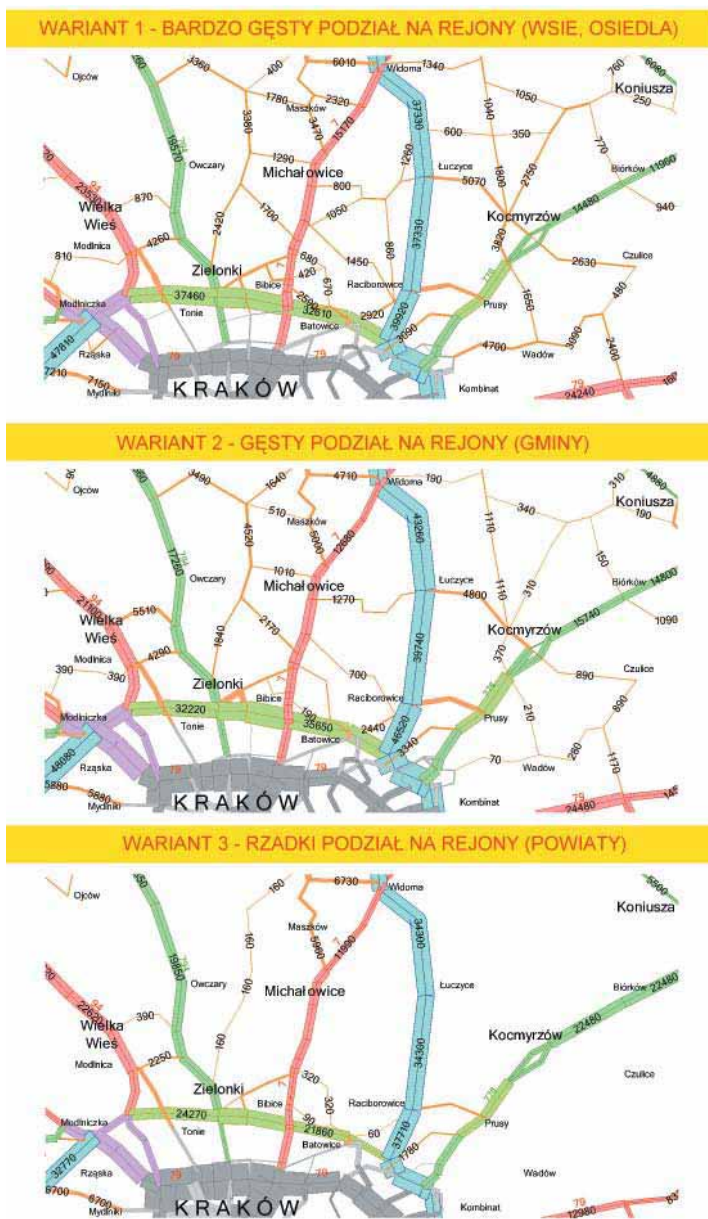
### Wyniki prognozy ruchu dla inwestycji nr 3

Rozpatrywana inwestycja nr 3 to droga ekspresowa S7 na północ od Krakowa (odcinek Moczydło – Miechów – Widoma – Kraków). Wyniki prognozy dla tej inwestycji, a także dla sąsiednich dróg dla trzech wariantów podziału na rejony komunikacyjne pokazuje rysunek 5 oraz tabela 3.

We wszystkich wariantach otrzymano podobne wyniki dla drogi ekspresowej S7. Dla istniejącej drogi krajowej nr 7 również wyniki są podobne, przy czym najwyższe w przypadku wariantu 1. W wariantcie 3 uzyskano zerowy ruch na większości dróg lokalnych.

Warto tutaj zwrócić uwagę na północną obwodnicę Krakowa. Natężenia ruchu na niej są bardzo zbliżone w wariantach 1 i 2 (32000-37000 poj./dobę), natomiast w wariantcie 3 znacznie mniejsze (22000-24000 poj./dobę).

W strefie aglomeracji ruch lokalny ma istotne znaczenie. Można się spodziewać, że mieszkańcy podkrakowskich miejscowości skorzystają z nowej drogi ekspresowej S7 w dojazdach do Krakowa. Dlatego wyniki dla wariantu 1 (bardzo gęsty podział na rejony) są najbardziej prawdopodobne. Satysfakcjonujące wyniki uzyskano również w wariantcie 2. Natomiast wyniki uzyskane w wariantcie 3 są wątpliwe.



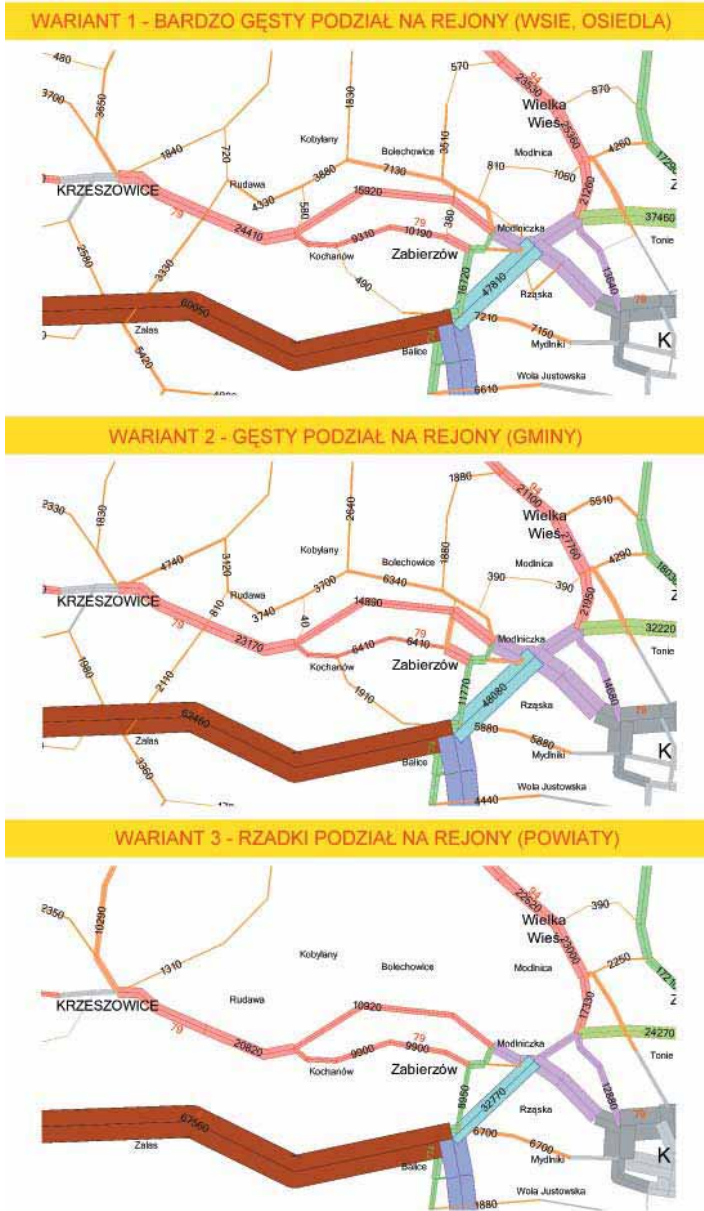
Rys. 5. Prognoza dla ekspresowej S7 Lubień-Rabka

Tab.3. Wyniki prognozy ruchu dla ekspresowej S7 Widoma – Kraków i dróg sąsiednich

Wyszczególnienie	Natężenie ruchu SDR (poj./dobę)		
	wariant 1	wariant 2	wariant 3
S7 Widoma – Łuczycze – Kraków	37330-39920	39740-46520	34300-37710
DK7 Widoma – Michałowice – Kraków	15170	12680	11990
DP Słomniki – Kocmyrzów	1040-1800	1110	0
Północna obwodnica Krakowa	32610-37460	32220-35650	21860-24270

### Wyniki prognozy ruchu dla inwestycji nr 4

Rozpatrywana inwestycja nr 4 to obwodnica Zabierzowa w ciągu drogi krajowej nr 79. Wyniki prognozy ruchu dla tej inwestycji, a także dla sąsiednich dróg dla 3 wariantów podziału na rejony pokazuje rysunek 6 oraz tabela 4.



Rys. 6. Prognoza dla obwodnicy Zabierzowa

Tab.4. Wyniki prognozy ruchu dla obwodnicy Zabierzowa w ciągu DK79 i dróg sąsiednich.

Wyszczególnienie	Natężenie ruchu SDR (poj./dobę)		
	wariant 1	wariant 2	wariant 3
DK79 obwodnica Zabierzowa	15920	14890	10920
DK79 „stara” droga przez Zabierzów	9310-10190	6410	9900
DP Rudawa – Kobylany – Modliczka	3880-7130	3700-6340	0
A4 Chrzanów – Balice	60050	62460	67560

W wariantach 1 i 2 uzyskano podobne wyniki dla obwodnicy Zabierzowa. Różnice występują w przypadku pozostałych dróg – im większe zagęszczenie rejonów komunikacyjnych, tym większe natężenia ruchu na drogach lokalnych oraz istniejącej drodze krajowej nr 79 przez Zabierzów.

W wariantcie 3 uzyskano ciekawy rozkład – prawie taki sam ruch na obwodnicy Zabierzowa i na drodze istniejącej przez Zabierzów. Jest to mało prawdopodobne, ponieważ Zabierzów nie jest dużym ośrodkiem ruchotwórczym – centrum gminy (wieś Zabierzów) zamieszkuje około 6 tys. mieszkańców, pozostali mieszkańcy gminy mieszkają w okolicznych wsiach w innych częściach gminy. Poza tym w wariantcie 3 uzyskano zerowy ruch na drogach lokalnych.

Warto zwrócić uwagę na równoległą do przedmiotowej inwestycji autostradę A4. Im mniejsze zagęszczenie rejonów komunikacyjnych tym wyliczone natężenie ruchu na autostradzie jest większe.

W analizowanym przypadku zadowalające wyniki uzyskano w wariantach 1 i 2. W wariantcie 3 wyniki analizy są wątpliwe.

## Podsumowanie

Przedstawione obliczenia pokazują, że sposób podziału obszaru analizy na rejon-y ruchotwórcze ma istotny wpływ na wyniki analiz ruchu. Co prawda dla samych przedmiotowych inwestycji uzyskano podobne wyniki, ale dla sąsiednich dróg wyniki analizy diametralnie się różnią, co powoduje znaczne różnice w pracach przewozowych, czy relacjach skrzyżowanych na węzłach i skrzyżowaniach. A więc ma wpływ na wyniki dalszych analiz – ekonomicznych, środowiskowych i innych, czy też na projektowanie elementów drogowych.

Każde zadanie jest inne i wymaga indywidualnego podejścia. Czasami wystarczy podział na gminy, czasami trzeba dokonać jeszcze gęstszy podział rejonów komunikacyjnych – zejść do poziomu wsi, osiedla czy dzielnicy miasta, czyli dokonać podziału gmin i miast na części. Krajowy Model Ruchu, zbudowany z dokładnością powiatów stanowi bazę wyjściową do analiz, niemniej zawsze wymaga dostosowania do konkretnego zadania. GDDKiA wymaga, żeby w analizach ruchu wykonywanych na jej zlecenie, w sąsiedztwie planowanych inwestycji stosowano gęstość podziału rejonów ruchotwórczych przynajmniej na poziomie gminy. Ma to uzasadnienie, co pokazał niniejszy artykuł.



## STRESZCZENIA ANGIELSKIE ARTYKUŁÓW

Jadwiga Brzuchowska, Jerzy Sławski

### ANALYSIS OF SPATIAL DISTRIBUTION OF HOME BASE – SCHOOL TRIPS IN WROCLAW

**Summary.** Among new data sources allowing for analysis of spatial behaviour of society, the database resources that come out in the process of e-administration implementation become an important group. Thanks to existence of referential data base resources can be geocoded. In the presented research address database in Spatial Information System of UM Wrocław as well as population registry and electronic school admission system have been used.

Spatial distribution of home based – school trips of secondary and high schools in Wrocław have been analysed in the research. The parameters of the trip distribution models have been estimated and fit of the derived models have been assessed. Two fundamental trip distribution models have been researched: gravity model and “intervening opportunities” model. Two versions of the gravity model have been taken into account: one with hyperbolic function of trip cost and exponential function. In the majority of analysed cases, gravity models reproduce empirical data better than “intervening opportunities” model. However in case of schools located in the areas of high diverse of population density, or near to strong spatial barriers, “intervening opportunities” model much better fits to the data. Simplicity of the model and repeatability of the values of its basic parameter, is the advantage of the “intervening opportunities” model.

**Keywords:** home base – school trips, gravity model, “intervening opportunities” model, model estimation, regression analysis



Mariusz Dudek

## FOREIGN EXPERIENCES IN TRAFFIC MODELING FOR LEISURE RELATED TRAFFIC

**Summary.** There is a review of literature on traffic modeling for leisure related traffic in the paper. Up to now this problem is not explored in details. In existing models leisure related traffic is only included on very limited level. On the other hand the research run in Germany and Switzerland revealed that leisure related traffic constitute 1/4 of travel in ordinary workday and majority of them in any holiday. The results of research concerning time and area distribution of travel connected with activities in leisure time have been presented and some factors influencing on parameters have been specified. The numerous factors related to specificity of each country (e.g. in Poland - possibility of shopping on each day of week), and also to individual cities and towns have been shown. Basing on models for German and Swiss conditions, the necessity of taking into account, in models worked out for Polish condition, some social and economic factors have been established.

**Key words:** traffic modelling, leisure related traffic

Tomasz Dybicz

## TRAFFIC FORECASTS REQUIREMENTS PROPOSAL FOR THE NATIONAL TRAFFIC MANAGEMENT SYSTEMS

**Summary.** One of the major projects that the GDDKiA intends to implement in the coming years is the construction of the National Traffic Management System (KSZR). This system will be implemented on all motorways and expressways and other roads that are included in the electronic toll collection system. One of the main functions of the system will be execution of on-line traffic management. For that main purpose there will be a need for constant short-term traffic forecasts preparations.

The dilemmas associated with the process of requirements preparation for analysis and forecasting in the National Traffic Management System have been described and characterized in the paper. The final version of developed requirements has been also given.

**Keywords:** traffic modelling, traffic forecasts, traffic management.

Tomasz Dybicz, Wojciech Suchorzewski

## TRAFFIC MODELLING FOR SHORT-TERM TRAFFIC FORECASTS

**Summary.** The traffic modelling for on-line traffic management has been considered in this paper. This task is one of the biggest challenges for specialists in traffic modelling. The functions of traffic models, which are used in the short-term traffic forecasts, and their categories have been presented. It contains also review of the results of studies performed on the effects of VMS message content on the drivers behaviour. One example of the application of VMS module in Paramics used for traffic management on the ring road in of one Dutch cities has been described. There are presented two concepts of traffic forecasting that enable including VMS messages impact on the of traffic assignment.

**Keywords:** traffic modelling, traffic forecasts, traffic management

Aleksandra Faron

## INFLUENCE OF THE INTENSITY DEVELOPMENT ON THE PUBLIC TRANSPORT SHARE IN TRAFFIC GENERATED – MODEL CASE

**Summary.** Land use planning has a huge impact on reduction of the motorized congestion. This process should provide sustainability in land use planning, but also should improve transport efficiency and minimize transport needs in areas. All transport and spatial development procedures should be integrated. An attractive public transport in areas, where population density is very high, could has an impact on transport behaviours among citizens and increase modal split for individual transport in cities.

**Keywords:** travel modelling, land use planning, intensity of the development, accessibility to the public transport

Christoph Glogowski, Tadeusz Zipser

## FORMS AND CHARACTERISTICS OF INTERVENING OPPORTUNITIES PARAMETERS FOR WORK BASED TRAVELS IN AGGLOMERATIONS

**Summary.** The intervening opportunities model operates with a parameter – the stable contact selectivity. Since the selectivity constitutes the density of the probability of acceptance it may be sensitive also to the opportunities clustering in extremely attractive areas. The modification is based on certain regularities observed in cumulative distribution diagrams of actual trips plotted on the coordinative basis of the number of possible destinations and not of the covered distance. These regularities are concerned with the diagram concavity. The position of which correlates very often with the area of agglomeration core. Detailed analysis of regularities led to the hypothesis: the distribution of the probability of opportunity acceptance lying in a defined position is the convolution of two distributions of probability. One distribution concerning the probability of acceptance itself is the negative exponential distribution. The second probability distribution is a uniform one and has to be responsible for the decrease of the acceptance.

This form of the model allowed us to obtain a very good representation of the real situation. Some types of existing configurations of convolution distribution were stated on the basis of observations made in Wrocław and Frankfurt/Main and Kassel. The adequate interpretation of the reason for the diversity is actual goal of investigation.

**Keywords:** intervening opportunities, convolution model, trip distribution, modelling parameters

Kazimierz Jamroz, Jacek Oskarbiński, Lucyna Gumińska, Wojciech Kustra

## APPLICATION OF MULTI-LEVEL TRAFFIC MODEL FOR THE TRISTAR SYSTEM

**Summary.** Conditions of variable traffic demand imply the need to obtain updated information on the functioning of the transport system in order to allow the optimization of transport processes. At the same time due to dynamic changes in the structure of the transport systems and spatial development as well as the considerable cost of traffic and transport behaviour studies, it is advisable to use the Intelligent Transport Systems for data acquisition, allowing for regular updating of models of transport systems, including planning purposes. The idea of building a multi-level traffic model, taking into account the use of Intelligent

Transport Systems, which would be used to power the traffic model with traffic parameters data from detection systems has been presented in the paper. The combination of a multi-level model and Transport Planning System, which is implemented under the TRISTAR, allows to the use of data from automatic measurements of traffic in the area of the transportation management operations, as well as planning analyses. In addition, it has been briefly described in the paper a number of tools (packages) for modelling of transport processes. Due to the fact that the various packages and programs described in this paper have features that stand out and make them useful for different purposes, it makes sense to use a wide range of software to complement and support the process of designing, planning and management at different levels and planes. It is also necessary to develop new applications, models and tools that will help to improve and extend the applicability and scope of the data obtained automatically.

**Keywords:** traffic control, traffic modelling, modelling tools, multi-level model

Andrzej Krych

## MODULAR SYSTEM COMPONENTS FOR TRANSPORT ANALYSIS –OUTLINE OF THE MOSTAR PROJECT

**Summary.** A brief, synthetic diagnosis of the national practice for travel modelling and traffic analysis was outlined. The proposed solution involves establishing a technological network cluster, serving the development of methods for traffic modelling, forecasting and simulation. The structure and the two main objectives of the Project were proposed. The goals of the Project include building a multilevel, general traffic model based on the commonly available data sets (as the synthetic model) and integrating the operating and planning systems and databases used in traffic analysis, planning and management. The development process should be inspired by the creation of a data Library and Information component, and by addressing subsequent niche issues in research, leading to the achievement of the Project objectives. The Project has a modular structure, which, apart from the Library and Information components, comprises Integrators, that is, modules which, through niche subjects, aggregate the Cluster resources into a system. The success of the Project depends on cooperation with several institutions of higher learning, consulting and design offices and public administration units dealing with transport planning and management. A three-phase development process and the SWOT analysis for the Project were outlined.

**Key words:** travel modelling, traffic analysis, innovations, technological network cluster

Andrzej Krych, Marek Cejrowski, Szymon Fierek, Mariusz Kaczmarek, Andrzej Maćkowiak, Karsten McFarland, Jacek Thiem, Jacek Żak

## MULTILEVEL SYNTHETIC STRUCTURES VS. DEDICATED STRUCTURES IN THE MODELLING AND FORECASTING OF TRAFFIC FLOW

**Summary.** The article presents the key issues related to the national practice of traffic research and modelling. Significant differences between the results of representative studies and measurement results are identified, as well as the impact of incoming traffic from suburban areas and transit traffic along the national road network. Differences between the application of models on the national and agglomeration level in the forecasting of traffic along the designed national roads within the agglomeration outskirts constitute an additional problem. The problem with the multilevel approach is based mainly on a simplified formula of internal traffic at a higher level in relation to external traffic at a lower level and inconsistency of matrix structure. A tendency for the development of theories and instruments for data gathering and processing in the traffic modelling process, with emphasis drawn to their focus on area-dedicated modelling has been outlined. The analysis of the development of modelling theories points to the potential use of category analyses, as well as activity and land-use models to overcome the problem with representative household studies. Examples and descriptions of past attempts to present a synthetic traffic model for small and medium-size towns are provided.

The diagnosis of the problems associated with travel research forces one to verify the conventional approach of dedicated structures and strong horizontal limitations, and to search for solutions in formulating generalized, unconventional methods for travel modelling, and goods carriage based on mobility laws dependent on the physical, economic, transport and cultural characteristics of the area's surroundings. Synthetic modelling is a process, which through research and experiments would lead from standardized dedicated models, partially dedicated synthetic models to a multilevel, universal synthetic model based on the generalized theory of mobility. These elements are believed to be important in the development of practice and theory through mutual verification.

**Keywords:** travel modelling, traffic research, traffic models, ITS

Aleksandra Romanowska, Kazimierz Jamroz, Tomasz Budziszewski

## TRIP GENERATION MODELING PROBLEMS: A CASE STUDY OF GDANSK (POLAND)

**Summary.** One of the fundamental data, that is necessary for urban transport system planning is information about number of trips made in the analysed area. The data mostly are derived from simulation of transportation models. One of the significant components and the first stage of most commonly used, classical four-step model is trip generation modelling, which involves usually mathematical modelling of trips generated and absorbed in particular traffic analysis zones (TAZ) according to demographic, spatial or transport characteristics of the TAZ's. Classical approach to trip generation modelling involves construction of regression models for individual motivations based on primary variables: population, number of workplaces and number of places in schools. The aim of this paper is to present different approach to trip generation modelling, applied in "Simulation transportation model of Gdansk". Applied models take into account the impact of additional demographic, socio-economic and spatial variables which allow to include the differences in TAZ's development.

**Keywords:** urban transport model, trip generation, production and attraction of trips, four-step model.

Piotr Rosik, Marcin Stępniaak

## TRAVEL LENGTH IN THE FORECASTING OF POTENTIAL ROAD ACCESSIBILITY CHANGES ON CASE OF TWO A2 MOTORWAY SECTIONS

**Summary.** The purpose of this paper is to present the research results on potential accessibility at the community level. The potential road accessibility index of the communes was obtained by summing up the three following components: inner potential, national potential and external (international) potential. The index allows to perform a simulation of changes in accessibility resulting from particular infrastructure investments. Simulation was carried out basing on the case of two sections of the A2 motorway: *Lodz North - Warsaw* and *Swiecko - Nowy Tomysl*. The changes in potential road accessibility of the municipalities were shown at national and international levels. Forecasting the changes in accessibility aims at identifying the priorities for implementation of individual sections of the road network in terms of their relevance to changes in the accessibility at different levels of the analysis. A special role is assigned to the assumed journey duration,



which is differentiated by selecting appropriate parameters of the spatial resistance function. For the exponential function used in the paper a division into short ( $\beta = 0.02$ ) and long ( $\beta = 0.005$ ) travel was applied. A research method implemented in the article in the form of potential accessibility offers great evaluation possibilities for both ex-post and ex-ante assessment. With the application of the potential model it is possible to compare the road network sections in terms of changes in accessibility depending on trip length, spatial scope of the study, and what was not the subject of this article, from the destination attractiveness point of view as well as the type and mode of transport or travel motivation .

**Keywords:** potential accessibility, accessibility simulation, A2 motorway, travel length, spatial scope

Andrew P. Tarko, Andrzej Szarata

## MODELLING TRAFFIC VOLUMES ON LOCAL ROADS IN INDIANA

**Summary.** A method of estimating the travel demand and vehicle miles travelled in large regions including local roads has been presented in the paper. The model calibration and evaluation has been presented on case of parts of Indiana. In the traditional approach, a network demand model includes properly calibrated traffic generation components applied to Traffic Analysis Zones and traffic exchange relationships between these zones calibrated based on household survey results. The authors have attempted to calibrate a model that does not use the household survey but, instead, uses carefully chosen exploratory variables. The model is founded on a number of simplifying assumptions allowed by disaggregation of a large regional road network into much smaller parts called clusters. The network demand estimation could be then conducted for each cluster separately. The traffic generation parameters have been fitted with a heuristic search method (genetic algorithm) and the values of exploratory variables (number of residents, employees, etc.) have been obtained from microscopic GIS data. The calibrated model have been evaluated by comparing the estimated daily traffic volumes with the values obtained from vehicle counting. The model assumptions and the results obtained for a sample part of the road network have been presented in this paper.

**Keywords:** demand modelling, ridership, genetic algorithm, local roads

Andrew P. Tarko

## A TRAFFIC DEMAND MODEL FOR LOCAL ROADS WITH CELLULAR NETWORK DECOMPOSITION AND HIGH-RESOLUTION LAND USE REPRESENTATION

**Summary.** Public agencies in USA expand their safety and asset management systems to local roads in cities and counties. Managing these roads is seriously hindered by the lack of traffic measurements due to the size of the network and costs of the measurements. Another option is to estimate the local traffic by utilizing traffic flow network models.

This paper proposes a novel model based on division of a regional road network into cells such that each cell's boundary is made of major roads with known traffic volumes. Under certain simplifying assumption plausible for local roads, the vast modelling problem is disaggregated to manageable sub-problems.

The paper presents detail description of the model, its assumptions, and an iteration-based estimation of traffic generation and distribution parameters. The estimation procedure is further simplified by the linear form of most relationship that allowed a quadratic optimization problem applied to disaggregate land use data. This new type of data includes geo-coded household and business data obtained by private companies through linking commercial and public records.

**Keywords:** demand modelling, annual average daily Traffic, GIS data

Marcin Zawisza, Krzysztof Maciasz, Tomasz Budziszewski, Krystian Birr, Kazimierz Jamroz

## SOME PROBLEMS OF TRIP DISTRIBUTION AND TRAVEL TIME MODELLING ON CASE OF GDANSK

**Summary.** Trip distribution is a second of the four-step model, in which the trips are assigned to the transportation zones mostly using gravity model. Presently in Gdansk, the new transport model is being built in the VISUM program. In this article not only the encountered problems has been shown but also an alternative approach for the trip distribution problem in which the mode choice step had been switched before the trip distribution. In the next point, the experience acquired in the trip time modelling, which included the problem of the time losses on the intersections has been presented. The experience in the modelling of travel time, collected during the work on the model, which has been a key aspect to de-

termine the correct free flow speed, as well as the choice of the section describing the volume delay function describing the increase of the speed of traffic on a given network segment have been shown.

**Keyword:** transport model, trip modelling, friction factor, volume delay function

Michał Żądło

## INFLUENCE OF TRAFFIC ZONES DENSITY ON RESULTS OF TRAFFIC FORECASTS

**Summary.** It has been shown in the paper that split of the area into traffic zones has an influence on results of traffic analysis. General Directorate of National Roads and Motorways, which is the road administration for main roads in Poland, includes Road Network Development Department. The Department is responsible for traffic modelling and traffic forecasts. A few network models have been created for Malopolska region there. The models were prepared for 3 levels of zones density – high, medium and low. The scenario of network development had also been applied due to the General Plan for National Network Development, consisted of four planned investments: one section of A4 motorway, two sections of S7 expressway and one bypass of a town. The results of these analysis are interesting. While density of zones has small influence on traffic volumes on considered road sections, it has significant influence on traffic volumes on the other roads in the adjacent area. This causes different trip distribution, deriving different ridership, different turns on intersections. It determines results of further analysis of the capacity of road elements, economic and environmental evaluations, etc. Therefore, every network model should be created very carefully, considering where there are real origins and destinations of trips within the area.

**Keywords:** traffic forecasts, regional models

## 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 *ghost authorship* (*bonorary 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, włącznie z instytucji naukowo-badawczych, stowarzyszeń i innych podmiotów („*financial disclosure*”).
4. Redakcja dokumentuje wszelkie przejawy nierzetelności naukowej, zwłaszcza łamanie i naruszanie 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 przysyłać 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.

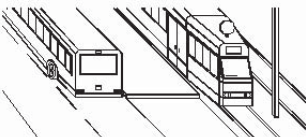
SPONSORZY KONFERENCJI



the mind of movement



ARUP



Pracownia Planowania Układów Komunikacyjnych  
**SYSTEM**

Marek Bauer, Andrzej Szarata, spółka cywilna



**INFORMACJE  
FIRM  
PRZEDSIĘBIORSTW  
I ORGANIZACJI**

## **Publikacje**

### **Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji RP**

#### **Oddziału w Krakowie:**

- 1 Modernizacja Alej Trzech Wieszców w Krakowie. Problem techniczny i ekonomiczny (1983, s. 132)
- 2 Informatyka na usługach Służby Ruchu na przykładzie Południowej DOKP (1983, s. 42)
- 3 Wykorzystanie materiałów miejscowych dla potrzeb drogownictwa w Makroregionie Południowo-Wschodnim Polski (1983, s. 63)
- 3 bis Program doraźnych przedsięwzięć dla usprawnienia komunikacji w Tarnowie (1983, s. 36)
- 4 Modelowanie sieci transportu kolejowego (1983, s. 217)
- 5 Trasa Zwierzyniecka. Problem planistyczny, techniczny i ekologiczny (1984, s. 133)
- 6 Trasa Zwierzyniecka. Problem planistyczny, techniczny i ekologiczny. Część II (1984, s. 148)
- 7 Betony cementowe w budownictwie drogowym i mostowym (1985, s. 84)
- 8 Problemy komunikacyjne Krakowa. Organizacja ruchu w Śródmieściu (1985, s. 131)
- 9 Stan aktualny i kierunki badań w zakresie zastosowań informatyki w transporcie kolejowym (1986, s. 118)
- 10 Nowe technologie w budownictwie drogowym (1987, s. 92)
- 11 Prognozowanie przewozów. Metody i zastosowania (1987, s. 31)
- 12 Zastosowanie informatyki w kolejowym transporcie wewnątrzzakładowym (1987, s. 156)
- 12 bis Zastosowanie informatyki w kolejowym transporcie wewnątrzzakładowym. Część II (1987, s. 154)
- 13 III Dni Technika Okręgu Dróg Publicznych w Krakowie (1988, s. 228)
- 14 Wykorzystanie badań laboratoryjnych do sterowania jakością robót drogowych (1988, s. 123)
- 15 Zastosowanie informatyki w kolejowym transporcie wewnątrzzakładowym (1989, s. 207)
- 16 IV Dni Technika Okręgu Dróg Publicznych w Krakowie (1989, s. 203)
- 17 Racjonalizatorzy SITK na rzecz Miasta Krakowa (1989, s. 30)
- 18 V Dni Technika Okręgu Dróg Publicznych w Krakowie (1990, s. 174)
- 19 VI Dni Technika Okręgu Dróg Publicznych w Krakowie (1991, s. 88)
- 20 Problemy mostownictwa w regionie Krakowskim (1992, s. 135)
- 21 Transport i budownictwo komunikacyjne w problematyce naukowej i technicznej krakowskiego środowiska SITK (1992, s. 388)
- 22 Transport i budownictwo komunikacyjne w problematyce naukowej i technicznej krakowskiego środowiska SITK (1992, s. 322)
- 23 Informatyka w kolejnictwie (1992, s. 178)
- 24 Modelowanie procesów przewozowych i ładunkowych w transporcie (1992, s. 376)
- 25 Racjonalizacja zużycia energii w procesie przewozowym PKP (1993, s. 240)
- 26 Ochrona zabytków techniki, przemysłu i sztuki inżynierskiej (1993, s. 262)
- 27 Zastosowanie informatyki w kolejowym transporcie wewnątrzzakładowym (1993, s. 208)
- 28 Problemy zarządzania transportem (1993, s. 228)
- 29 Diagnostyka nawierzchni szynowej i podtorza (1993, s. 150)
- 30 Obsługa komunikacyjna w obszarach zurbanizowanych w Polsce (1994, s. 240)
- 31 Transport kombinowany – uwarunkowania i możliwości (Zeszyt Naukowo-Techniczny 1, 1994, s. 260)
- 32 Polityka transportowa w miastach Środkowej i Wschodniej Europy w okresie transformacji (Zeszyt Naukowo-Techniczny 2, 1994, s. 500)
- 33 Działalność Oddziału Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie w latach 1990-1993 (sprawozdanie kadencyjne) (Materiały Różne 1, 1994, s. 144)
- 34 Współpraca PKP z bocznkami kolejowymi (Zeszyt Naukowo-Techniczny 3, 1994)
- 35 Polityka transportowa w miastach Środkowej i Wschodniej Europy w okresie transformacji (Zeszyt Naukowo-Techniczny 4, 1995, s. 242)
- 36 Polityka parkingowa w miastach (Zeszyt Naukowo-Techniczny 5, 1995, s. 212)

- 37 Problemy administracyjne, techniczne i prawne w utrzymaniu dróg lokalnych miejskich (Zeszyt Naukowo-Techniczny 6, 1995, s. 164)
- 38 Ochrona środowiska w transporcie i budownictwie komunikacyjnym (Zeszyt Naukowo-Techniczny 7, 1995, s. 340)
- 39 Tradycja i przyszłość komunikacji zbiorowej w Polsce (Zeszyt Naukowo-Techniczny 8, 1995, s. 302)
- 40 Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne Sp. z o.o. w Krakowie – wczoraj – dziś – jutro (Materiały Różne 2, 1995, s. 136)
- 41 Gospodarka energią i paliwami w przedsiębiorstwie PKP (Zeszyt Naukowo-Techniczny 9, 1995, s. 214)
- 42 Obsługa transportowa aglomeracji miejskich i ruchu lokalnego (Zeszyt Naukowo-Techniczny 10, 1996, s. 244)
- 43 Problemy transportu i inżynierii lądowej w działalności naukowej i technicznej krakowskiego środowiska SITK (Monografia 2, 1996, s. 360)
- 44 Na transportowym szlaku – zbiór wybranych tekstów piosenek (Materiały Różne 3, 1996, s. 212)
- 45 Problemy transportowe związane z organizacją zimowych igrzysk olimpijskich w 2006 roku (Zeszyt Naukowo-Techniczny 11, 1996, s. 256)
- 46 Utrzymanie komunikacyjnych obiektów inżynierskich (Zeszyt Naukowo-Techniczny 12, 1996, s. 124)
- 47 Polityka parkingowa w miastach (Zeszyt Naukowo-Techniczny 13, 1996, s. 168)
- 48 Rozwój komunikacji a ochrona dziedzictwa kulturowego (Zeszyt Naukowo-Techniczny 14, 1996, s. 286)
- 49 Mieczysław Barbacki. 1000 lat krakowskich dróg – dzieje i uwarunkowania rozwoju systemu komunikacji w Krakowie (Monografia 3, 1996, s. 208)
- 50 Metody oceny i kontroli funkcjonowania komunikacji zbiorowej (Zeszyt Naukowo-Techniczny 15, 1996, s. 240)
- 51 Zarządzanie publicznym transportem zbiorowym w miastach (Zeszyt Naukowo-Techniczny 16, 1997, s. 254)
- 52 Nowoczesne technologie w budownictwie drogowym (Zeszyt Naukowo-Techniczny 17, 1997, s. 188)
- 53 Osiągnięcia i problemy transportu wewnątrzzakładowego (Zeszyt Naukowo-Techniczny 18, 1997, s. 148)
- 54 Prezentacja autobusów komunikacji miejskiej zasilanych gazem ziemnym – konstrukcja i eksploatacja (Zeszyt Naukowo-Techniczny 19, 1997, s. 80)
- 55 Transport kombinowany (Zeszyt Naukowo-Techniczny 20, 1997, s. 260)
- 56 Problemy zarządzania i utrzymania dróg na obszarach gmin (Zeszyt Naukowo-Techniczny 21, 1997, s. 192)
- 57 Gospodarka energią i paliwami w przedsiębiorstwie PKP (Zeszyt Naukowo-Techniczny 22, 1997, s. 220)
- 58 Marian Szeliński. Oddział krakowski Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w latach 1946-1995. Zarys działalności (Monografia 4, 1998, s. 320)
- 59 Sprawozdanie z działalności Oddziału SITK w Krakowie w kadencji 1994-1997 (Materiały Różne 4, 1998, s. 44)
- 60 Gaz ziemny jako paliwo do napędu pojazdów – stan obecny i perspektywy rozwoju (Zeszyt Naukowo-Techniczny 23, 1998, s. 104)
- 61 Polityka parkingowa w miastach (Zeszyt Naukowo-Techniczny 24, 1998, s. 244)
- 62 Kierunki rozwoju komunikacji tramwajowej w Polsce (Zeszyt Naukowo-Techniczny 25, 1998, s. 194)
- 63 Nowe technologie w utrzymaniu ulic (Zeszyt Naukowo-Techniczny 26, 1998, s. 112)
- 64 Sterowanie ruchem w miejskiej komunikacji zbiorowej (Zeszyt Naukowo-Techniczny 27, 1998, s. 296)
- 65 Komputerowe systemy kierowania ruchem na sieci kolejowej PKP (Zeszyt Naukowo-Techniczny 28, 1998, s. 348)
- 66 Na transportowym szlaku II – zbiór wybranych tekstów piosenek (Materiały Różne 5, 1999, s. 268)
- 67 Inżynierowi Ernestowi Malinowskiemu w setną rocznicę śmierci (Monografia 4, 1999, s. 132)

- 68 Informatyka w Przedsiębiorstwie Polskie Koleje Państwowe (Zeszyt Naukowo-Techniczny 29, 1999, s., 400)
- 69 Ochrona zabytków i muzealnictwo w komunikacji (Zeszyt Naukowo-Techniczny 30, 1999, s. 168)
- 70 Doświadczenia w zakresie eksploatacji autobusów zasilanych gazem ziemnym (Zeszyt Naukowo-Techniczny 31, 1999, s. 92)
- 71 Andrzej Rudnicki. Jakość komunikacji miejskiej (Monografia 5, 1999, s. 384)
- 72 Problemy techniczne i jakościowe związane z eksploatacją torów kolejowych (Zeszyt Naukowo-Techniczny 32, 1999, s. 144)
- 73 Kompleksowe badania ruchu w Katowicach i Siemianowicach Śląskich – synteza wyników (Monografia 6, 1999, s. 128)
- 74 Obsługa klientów PKP z wykorzystaniem systemu kierowania przewozami i zarządzania (SKPZ) (Zeszyt Naukowo-Techniczny 33, 1999, s. 176)
- 75 Materiały Seminarium Targów Drogownictwa DROGPOL'2000 (Zeszyt Naukowo-Techniczny 34, 2000, s. 104)
- 76 Problematyka osuwisk w budownictwie komunikacyjnym (Zeszyt Naukowo-Techniczny 35, 2000, s. 306)
- 77 Transport w rozwoju regionów (Zeszyt Naukowo-Techniczny 36, 2000, s. 482)
- 78 Problemy ochrony zabytków komunikacyjnych (Zeszyt Naukowo-Techniczny 37, 2000, s. 282)
- 79 Polityka parkingowa w miastach (Zeszyt Naukowo-Techniczny 38, 2000, s. 210)
- 80 Metoda budowy baz danych o drogowym ruchu miejskim (Monografia 7, 2000, s. 112)
- 81 Transport 2000 - Kongres SITK Kraków - Zakopane 14-16.IX.2000 - Referaty Kongresowe (Zeszyt Naukowo-Techniczny 39, 2000, s. 444)
- 82 Polityka transportowa państwa na lata 2000-2015 dla zrównoważonego rozwoju (Monografia 8, 2000, s. 108)
- 83 Aktualne problemy zarządzania drogami (Zeszyt Naukowo-Techniczny 40, 2000, s. 108)
- 84 Miejsce diagnostyki infrastruktury kolejowej w nowej strukturze organizacyjnej kolei (Zeszyt Naukowo-Techniczny 41, 2000, s. 294)
- 85 Kolejarz z uśmiechem. Oprac. Jerzy Hydzik (Materiały Różne 6, 2000, s. 84)
- 86 Nowoczesne metody zarządzania pasażerskim transportem zbiorowym (Zeszyt Naukowo-Techniczny 45, 2001, s. 296)
- 87 XV Dni Technika w Oddziale Południowo-Wschodnim GDDP w Krakowie (Zeszyt Naukowo-Techniczny 42, 2001, s. 232)
- 88 Bezpieczeństwo na drogach (Zeszyt Naukowo-Techniczny 43, 2001, s. 154)
- 89 Projekt połączeń kolejowych Kraków-Muszyna/Zakopane (Zeszyt Naukowo-Techniczny 44, 2001, s. 76)
- 90 Polityka transportowa państwa na lata 2001-2015 dla zrównoważonego rozwoju (Monografia 9, 2001, s. 154)
- 91 Finansowanie drogownictwa i przygotowanie inwestycji (Zeszyt Naukowo-Techniczny 45, 2001, s. 180)
- 92 Badania procesów przewozowych wspomagające zarządzanie transportem zbiorowym w miastach (Zeszyt Naukowo-Techniczny 46, 2002, s. 466)
- 93 Problemy związane z zarządzaniem pasem drogowym w świetle obowiązujących przepisów prawnych (Zeszyt Naukowo-Techniczny 47, 2002, s.184)
- 94 Sprawozdanie z działalności Oddziału SITK w Krakowie w kadencji 1998-2001 (Materiały Różne 7, 2002, s. 124)
- 95 Koordynacja działań różnych służb w sytuacjach nadzwyczajnych zdarzeń na drogach (Zeszyt Naukowo-Techniczny 48, 2002, s. 108)
- 96 XVI Dni Technika w Oddziale Południowo-Wschodnim GDDP w Krakowie (Zeszyt Naukowo-Techniczny 49, 2002, s. 240)

- 97 Aktualne osiągnięcia budownictwa mostowego w Polsce (Zeszyt Naukowo-Techniczny 50, 2002, s. 254)
- 98 Krajowy zarobkowy przewóz osób i rzeczy (Monografia 10, 2002, s. 592)
- 99 Międzynarodowy zarobkowy przewóz osób i rzeczy (Monografia 11, 2002, s. 280)
- 100 Historia i ochrona zabytków w transporcie (Zeszyt Naukowo-Techniczny 51, 2002, s. 440)
- 101 Problematyka powodziowa w mostownictwie (Zeszyt Naukowo-Techniczny 52, 2002, s. 268)
- 102 Nowoczesne technologie i systemy usprawniające zarządzanie w transporcie kolejowym (Zeszyt Naukowo-Techniczny 53, 2002, s. 442)
- 103 Integracja systemów zarządzania przedsiębiorstwami komunikacyjnymi z uwzględnieniem wymogów norm ISO (Zeszyt Naukowo-Techniczny 54, 2002, s. 276)
- 104 Krajowy zarobkowy przewóz osób i rzeczy (Monografia 12, 2003, s. 636)
- 105 XVII Dni Technika w Oddziale Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad w Krakowie (Zeszyt Naukowo-Techniczny 55, 2003, s. 276)
- 106 Polityka parkingowa w miastach (Zeszyt Naukowo-Techniczny 56, 2003, s. 388)
- 107 Miejsce polskich przewoźników w europejskim systemie transportowym po integracji z Unią Europejską (Zeszyt Naukowo-Techniczny 57, 2003, s. 152)
- 108 Regulacje prawne w Unii Europejskiej w zakresie publicznego transportu pasażerskiego (Zeszyt Naukowo-Techniczny 58, 2003, s. 488)
- 109 Nowoczesne technologie i systemy zarządzania w kolejnictwie (Zeszyt Naukowo-Techniczny 59, 2003, s. 304)
- 110 Bezpieczeństwo ruchu drogowego (Zeszyt Naukowo-Techniczny 60, 2004, s. 136)
- 111 Polski przemysł i zaplecze naprawcze transportu kolejowego w warunkach konkurencji na europejskim rynku kolejowym (Zeszyt Naukowo-Techniczny 61, 2004, s. 168)
- 112 Odwodnienie dróg i ulic a ekologia - prawo, projektowanie, wykonawstwo (Zeszyt Naukowo-Techniczny 62, 2004, s.328)
- 113 Aktualne problemy regionalnego transportu pasażerskiego w Polsce (Zeszyt Naukowo-Techniczny 63, 2004, s. 232)
- 114 XVIII Dni Technika w Małopolsce (Zeszyt Naukowo-Techniczny 64, 2004, s. 208)
- 115 Zarządzanie ruchem na drogach - prawo, projektowanie, wykonawstwo (Zeszyt Naukowo-Techniczny 65, 2004, s. 340)
- 116 Krajowy zarobkowy przewóz osób i rzeczy (Monografia 13, 2004, s. 716)
- 117 Nowoczesne technologie i systemy zarządzania w kolejnictwie (Zeszyt Naukowo-Techniczny 66, 2004, s. 320)
- 118 Projektowanie i zarządzanie drogami - zasady, dobre praktyki, efektywność (Zeszyt Naukowo-Techniczny 67, 2005, s. 418)
- 119 Aktualne problemy regionalnego transportu pasażerskiego w Polsce (Zeszyt Naukowo-Techniczny 68, 2005, s.280)
- 120 Łódzkie Forum Regionalne Transportu Publicznego (Zeszyt Naukowo-Techniczny 69, 2005, s. 142)
- 121 Technologie naprawy toru kolejowego z zastosowaniem nowoczesnych maszyn – XX-lecie Zakładu Maszyn Torowych w Krakowie (Zeszyt Naukowo-Techniczny 70, 2005, s.192)
- 122 Zabytkowe obiekty techniki transportowej (Zeszyt Naukowo-Techniczny 71, 2005, s. 268)
- 123 XX Małopolskie Dni Technika (Zeszyt Naukowo-Techniczny 72, 2005, s. 226)
- 124 Nowoczesne technologie i systemy zarządzania w kolejnictwie (Zeszyt Naukowo-Techniczny 73, 2005, s. 332)
- 125 Zabytki transportu - potencjał kulturowy i turystyczny (Zeszyt Naukowo-Techniczny 74, 2005, s. 266)
- 126 Sprawozdanie z działalności Oddziału SITK w Krakowie w kadencji 2002-2005 (Materiały Różne 8, 2006, s. 176)
- 127 Krajowy transport drogowy (Monografia 14, 2006, s. 716)
- 128 Wybrane problemy funkcjonowania systemów transportowych w rejonie Tarnowa (Zeszyt Naukowo-Techniczny 75, 2006, s. 120)

- 129 Międzynarodowy transport drogowy (Monografia 15, 2006, s. 396)
- 130 Dzieje i perspektywy kolei w Nowym Sączu (Zeszyt Naukowo-Techniczny 76, 2006, s. 124)
- 131 Odwodnienie dróg i ulic a ekologia - prawo, projektowanie, wykonawstwo (Zeszyt Naukowo-Techniczny 77, 2006, s. 188)
- 132 Nowoczesne technologie i systemy zarządzania w kolejnictwie (Zeszyt Naukowo-Techniczny 78, 2006, s. 420)
- 133 Inwestycje w drogownictwie - przygotowanie, realizacja i nadzór (Zeszyt Naukowo-Techniczny 79, 2007, s. 324)
- 134 Polityka parkingowa w miastach (Zeszyt Naukowo-Techniczny 80, 2007, s. 266)
- 135 Technika w transporcie - historia i zabytki (Zeszyt Naukowo-Techniczny 81, 2007, s. 520)
- 136 Nowoczesne technologie i systemy zarządzania w kolejnictwie (Zeszyt Naukowo-Techniczny 82, 2007, s. 300)
- 137 Zarządzanie jakością pasażerskiego transportu zbiorowego (Zeszyt Naukowo-Techniczny 83, 2007, s. 370)
- 138 Krajowy transport drogowy (Monografia 16, 2008, s. 768)
- 139 Wiersze Władysława Dobrzańskiego - Tomik Jubileuszowy (Materiały Różne 9, 2008, s. 56)
- 140 Problemy transportu związane z organizacją mistrzostw Europy w piłce nożnej EURO 2012 (2008, s. 186)
- 141 Odwodnienie dróg i ulic a ekologia - prawo, projektowanie, wykonawstwo (Zeszyt Naukowo-Techniczny 85, 2008, s. 328)
- 142 Nowoczesne technologie i systemy zarządzania w kolejnictwie (Zeszyt Naukowo-Techniczny 86, 2008, s. 356)
- 143 XXII Małopolskie Dni Technika - Zarządzanie siecią drogową (Zeszyt Naukowo-Techniczny 87, 2009, s. 154)
- 144 Problematyka osuwisk w budownictwie komunikacyjnym (Zeszyt Naukowo-Techniczny 88, 2009, s. 470)
- 145 Międzynarodowy transport drogowy (Monografia 17, 2009, s. 408)
- 146 Projektowanie i zarządzanie drogami - zasady, dobre praktyki, efektywność (Zeszyt Naukowo-Techniczny 89, 2009, s. 360)
- 147 System dopłat do publicznego transportu zbiorowego w komunikacyjnych związkach komunalnych w Polsce (Monografia 18, 2009, s. 248)
- 148 Modelowanie podróży i prognozowanie ruchu (Zeszyt Naukowo-Techniczny 90, 2009, s.320)
- 149 Nowoczesne technologie i systemy zarządzania w kolejnictwie (Zeszyt Naukowo-Techniczny 91, 2009, s. 676)
- 150 Sprawozdanie z działalności Oddziału SITK w Krakowie w kadencji 2006-2009 (Materiały Różne 10, 2010, s. 168)
- 151 Projektowanie rond - doświadczenia i nowe tendencje (Zeszyt Naukowo-Techniczny 92, 2010, s. 364)
- 152 Kompleksowe badania ruchu - teoria i praktyka - doświadczenia miast polskich (Zeszyt Naukowo-Techniczny 93, 2010, s. 212)
- 153 Modelowanie podróży i prognozowanie ruchu (Zeszyt Naukowo-Techniczny 94, 2010, s. 404)
- 154 Nowoczesne technologie i systemy zarządzania w kolejnictwie (Zeszyt Naukowo-Techniczny 95, 2010, s. 694)
- 155 Wyniki badań systemów publicznego transportu zbiorowego w wybranych miastach (Monografia 19, 2010, s. 344)
- 156 Krajowy transport drogowy (Monografia 20, 2011, s. 884)
- 157 Na transportowym szlaku. Zbiór wybranych tekstów piosenek (Materiały Różne 11, 2011, s. 208)
- 158 Nowoczesne technologie i systemy zarządzania w transporcie szynowym (Zeszyt Naukowo-Techniczny 96, 2011, s. 706)



Poszczególne Zeszyty Naukowo-Techniczne można kupić  
w Biurze Oddziału SITK RP w Krakowie,  
ul. Siostrzana 11, 30-804 Kraków,  
tel. (012) 658-93-72, 658-93-74, fax 659-00-76,  
e-mail: [krakow@sitk.org.pl](mailto:krakow@sitk.org.pl)