

POLITECHNIKA KRAKOWSKA  
im. Tadeusza Kościuszki

ANDRZEJ SZARATA

MODELOWANIE  
PODRÓŻY WZBUDZONYCH  
ORAZ TŁUMIONYCH ZMIANĄ STANU  
INFRASTRUKTURY TRANSPORTOWEJ



SERIA INŻYNIERIA LĄDOWA

---

MONOGRAFIA 439

•

KRAKÓW 2013

PRZEWODNICZĄCY KOLEGIUM REDAKCYJNEGO  
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Jan Kazior

PRZEWODNICZĄCY KOLEGIUM REDAKCYJNEGO WYDAWNICTW NAUKOWYCH

Józef Nizioł

REDAKTOR SERII Marek Piekarczyk

REDAKTOR NAUKOWY Andrzej Rudnicki

RECENZENCI Tomasz Ambroziak, Tomasz Szczuraszek

SEKRETARZ SEKCJI Marta Wlazło

OPRACOWANIE REDAKCYJNE Aleksandra Urzędowska

SKŁAD I ŁAMANIE Adam Bania, Krystyna Gawlik

PROJEKT OKŁADKI Jadwiga Mączka

© Copyright by Politechnika Krakowska, Kraków 2013

© Copyright by Andrzej Szarata, Kraków 2013

ISSN 0860-097X

Wydawnictwo PK, ul. Skarżyńskiego 1, 31-866 Kraków; tel.: 12 628 37 25, fax: 12 628 37 60  
e-mail: [wydawnictwo@pk.edu.pl](mailto:wydawnictwo@pk.edu.pl) ☐ [www.wydawnictwo.pk.edu.pl](http://www.wydawnictwo.pk.edu.pl)  
Adres do korespondencji: ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

---

Druk i oprawę wykonano w Dziale Poligrafii Politechniki Krakowskiej.  
Ark. wyd. 8,00.

Zam. 178/2013

Nakład 200 egz.

Cena zł 21,00 z VAT

## Spis treści

1. Wprowadzenie .....	5
2. Stan badań.....	12
2.1. Syntetyczny przegląd metod modelowania podróży .....	12
2.2. Charakterystyka modeli opartych na aktywnościach.....	20
2.3. Rola podróży wzbudzonych i ruchu wzbudzonego w efektywności funkcjonalnej inwestycji infrastrukturalnych.....	21
2.4. Analizy ruchu wzbudzonego jako efekt zmian w pracy przewozowej ...	26
2.5. Rola stopy elastyczności popytu transportowego w analizach podróży wzbudzonych i tłumionych.....	29
2.6. Badania nad zjawiskiem podróży wzbudzonych i tłumionych w oparciu o badania ankietowe .....	36
2.7. Wnioski do badań własnych wynikające z przeglądu dostępnej literatury	41
3. Badania własne nad zjawiskiem podróży wzbudzonych i tłumionych.....	44
3.1. Ogólna charakterystyka przeprowadzonych badań własnych .....	44
3.2. Badania podróży wzbudzonych i tłumionych wynikających z etapów przebudowy Ronda Ofiar Katynia w Krakowie .....	45
3.3. Badania symulacyjne liczby podróży wzbudzonych i tłumionych.....	49
3.4. Badania podróży tłumionych spowodowanych pracami remontowymi na ul. Konopnickiej w Krakowie.....	56
3.5. Badania podróży wzbudzonych przez pasażerów transportu zbiorowego na przykładzie kilku inwestycji związanych z transportem zbiorowym	60
4. Model cząstkowy wyznaczający udział podróży wzbudzonych w transporcie zbiorowym .....	67
4.1. Założenia modelu cząstkowego .....	67
4.2. Elementy teorii zbiorów rozmytych .....	68
4.3. Wnioskowanie rozmyte .....	72
4.4. Struktura modelu cząstkowego.....	73
4.4.1. Blok danych wejściowych – poprzednik reguły wnioskującej...	74
4.4.2. Blok danych wyjściowych – następnik reguły wnioskującej .....	78
4.4.3. Zdefiniowanie reguł wnioskujących.....	79

4.4.4. Wyniki układu wnioskującego.....	83
4.4.5. Aproksymacja powierzchni wynikowej.....	84
4.4.6. Algorytmy genetyczne.....	88
4.4.7. Dobór parametrów funkcji aproksymacyjnej .....	90
5. Modelowanie symulacyjne podróży wzbudzonych i tłumionych uwzględniające czynnik dostępności transportowej .....	95
5.1. Założenia modelu.....	95
5.2. Dostępność transportowa.....	98
5.3. Wyznaczenie wskaźnika dostępności transportowej dla rejonów transportowych .....	102
5.4. Wpływ dostępności transportowej na ruchliwość mieszkańców rejonu transportowego .....	105
5.5. Procedura wyznaczenia podróży wzbudzonych i tłumionych.....	110
6. Przykład wyznaczenia liczby podróży wzbudzonych i tłumionych .....	113
6.1. Wyznaczenie liczby podróży wzbudzonych warunkowanych pojawieniem się nowej inwestycji w infrastrukturę transportu zbiorowego i indywidualnego .....	113
6.2. Modelowanie podróży tłumionych .....	118
7. Podsumowanie .....	121
7.1. Istota badań i zakres wykonanych analiz.....	121
7.2. Wnioski generalne .....	122
7.3. Oryginalne rezultaty pracy.....	124
7.4. Kierunek dalszych badań.....	125
Literatura.....	126
Streszczenia.....	142
Załącznik.....	147

## 1. WPROWADZENIE

Poważnym problemem, zwłaszcza w dużych aglomeracjach miejskich, stają się trudności transportowe związane ze zjawiskiem zatłoczenia dróg i ulic ruchem drogowym. Według raportu Banku Światowego [227] na obszarach miejskich w Polsce żyje obecnie ok. 62% populacji. Uwzględniając fakt posiadania większej liczby samochodów wśród mieszkańców miast w porównaniu do innych obszarów, można stwierdzić, że centrum ruchu ludności koncentruje się na 6% całej powierzchni Polski [227]. Wiele miast wdraża strategię zrównoważonego rozwoju transportu, wpływając na zwiększenie lub przynajmniej utrzymanie udziału miejskiego transportu zbiorowego w podróżach. Problem ten został również dostrzeżony w dokumencie Polityki Transportowej Państwa [127], gdzie jednym z kluczowych zadań jest usprawnianie systemu transportowego w zakresie transportu indywidualnego i zbiorowego w obszarach zurbanizowanych. Jako obszar zurbanizowany rozumie się jednostkę morfologiczną o miejskim charakterze zabudowy i infrastruktury. Według Markowskiego i Marszała [150] obszary zurbanizowane charakteryzują się wyraźnym przekształceniem zabudowy i zagospodarowania związanym z pozarolniczą działalnością gospodarczą lub wynikającym z przyjęcia miejskiego stylu życia i pracy.

Podjęcie działań w kierunku usprawnienia systemu transportowego w obszarach zurbanizowanych staje się niezbędne, ponieważ strefy zatłoczenia transportowego obejmują przede wszystkim odcinki ulic prowadzące do śródmieścia oraz drogi wlotowe oraz wewnętrzne i zewnętrzne obwodnice miasta. Bardzo często podejmowane wielkim wysiłkiem inwestycje drogowe, choć zwiększają przepustowość elementów sieci, poprawiają sytuację tylko w krótkim okresie czasu, przenosząc stany zatłoczenia w inne miejsca. Inwestycje transportowe wpływają na zmiany zachowań transportowych mieszkańców, w tym na ruchliwość, rozkład przestrzenny podróży, podział zadań przewozowych oraz na rozkład ruchu w sieci drogowej i w sieci transportu zbiorowego.

Aby poddać ocenie procesy zachodzące w układzie transportowym miast lub aglomeracji oraz opisać i parametryzować ich funkcjonowanie, stosuje się narzędzia analizy systemowej. **System transportowy** można definiować jako kombinację szeregu współzależnych elementów, generujących popyt na podróże w danym obszarze oraz odpowiadająca mu podaż zaspokajająca powstałe potrzeby transporto-

we (Leszczyński [141]). System transportowy można podzielić na dwa zasadnicze komponenty: **popyt** rozumiany jako liczba podróży generowana lub absorbowana przez dany obszar oraz **подаż** stanowiąca obiekty budowlane, które służą do realizacji zamierzonych podróży (np. układ drogowy, torowiska tramwajowe czy linie kolejowe).

Bardzo ważnym parametrem systemu transportowego jest czas, co wynika z faktu, że system ten podlega większym lub mniejszym zmianom w czasie, zachowując jednocześnie swoje podstawowe właściwości (Jacyna [109]). Stąd możemy mówić o ujęciu statycznym, odwzorowującym system w określonym stanie oraz o ujęciu dynamicznym, odwzorowującym działanie systemu w czasie.

Opis rzeczywistego systemu transportowego jest bardzo trudny z powodu wysokiego stopnia złożoności i występujących współzależności między jego poszczególnymi komponentami, przy uwzględnieniu roli czasu w prowadzonych analizach. Stąd potrzeba budowy modeli matematycznych, stanowiących w stopniu wystarczającym odwzorowanie analizowanego systemu transportowego. **Modele transportowe** stanowią więc zbiór formuł matematycznych opisujący oba komponenty funkcjonującego systemu transportowego (подаż i popyt), uwzględniając jednocześnie występujące między nimi współzależności w czasie. Praktyka planistyczna sieci/systemów transportowych bazuje często na modelach czterostadiowych, które są wykorzystywane w większości miast polskich do działań planistyczno-projektowych oraz do oceny efektywności funkcjonalnej inwestycji infrastrukturalnych. **Inwestycje transportowe** są utożsamiane w ramach niniejszej pracy przede wszystkim z budową dróg oraz urządzeniami technicznymi związanymi z transportem (m.in. linie tramwajowe, pasy autobusowe, linie kolei aglomeracyjnej Budner [29]).

W modelowaniu systemów transportowych, popyt jest wyrażony przez liczbę podróży generowanych, bądź absorbowanych przez dany obszar. **Podróż** to sekwencja przemieszczeń realizowanych jednym lub większą liczbą środków lokomocji, zapewniająca osiągnięcie miejsca określonej aktywności. Konsekwencją odbywania podróży jest obciążanie **ruchem** poszczególnych odcinków sieci transportowej na trasie między źródłem a celem podróży. Jednym z najbardziej istotnych parametrów ruchu jest: w odniesieniu do określonego punktu – natężenie ruchu, natomiast w odniesieniu do odcinka oraz całej sieci – praca przewozowa oraz gęstość ruchu.

Podróż odnosi się do konkretnej osoby – użytkownika systemu transportowego. Zmiana liczby podróży wynika przede wszystkim ze zmian w zakresie czynników sprawczych odbywania podróży, tj. oferowanych aktywności, charakteryzowanych ich rodzajem (czyli funkcją) i intensywnością, zależnych od zagospodarowania przestrzennego. Jednakże zmiana liczby odbywanych podróży może się także dokonywać bez zmian w zagospodarowaniu przestrzennym, a np. przez zmiany w systemie transportowym, obejmujące infrastrukturę oraz parametry oferty przewozowej. Stymulatorem wzrostu liczby podróży może być w szczególności: budowa nowego ciągu ulicy, poszerzenie istniejącej ulicy, przebudowa skrzyżowania

zwiększająca jego przepustowość, budowa linii tramwajowej, zwiększenie częstotliwości kursowania pojazdów transportu zbiorowego. Konsekwencją takich zmian jest przede wszystkim skrócenie czasu trwania potencjalnej podróży, a ogólnie – poprawa standardu podróżowania, m.in. płynności przejazdu. Dodatkowe podróże warunkowane zmianami w systemie transportowym nazywane będą **podróżami wzbudzonymi**. Innymi słowy – są to podróże, których by nie było, gdyby nie zadziałał czynnik sprawczy.

Destymulatorem zmniejszenia liczby podróży może być szczególności: zwężenie jezdni w sposób trwały bądź czasowy w okresie przebudowy skrzyżowania, zmniejszenie częstotliwości kursowania bądź likwidacja bezprzebiegowego połączenia linią transportu zbiorowego. Skutkiem tych zmian jest wydłużenie czasu podróży i pogorszenie warunków podróżowania (potęgujące się zatłoczenie, wydłużenie czasu oczekiwania na pojazd transportu zbiorowego, jazda w tłoku, konieczność przesiadania się itp.). Ubytek podróży wywołany zmianami w systemie transportowym nazywany będzie **podróżami tłumionymi**.

Zmiany w systemie transportowym mogą nie zmieniać liczby realizowanych podróży, lecz tylko ich wybrane atrybuty (Rudnicki [187]). W szczególności może to dotyczyć długości podróży, a przede wszystkim zmiany środka lokomocji w konkretnej podróży, np. rezygnacja z użycia transportu zbiorowego na rzecz samochodu osobowego lub odwrotnie. Jednakże w takich przypadkach nie można mówić o podróżach wzbudzonych, lecz o podróżach przejętych z określonego środka lokomocji do innego. Liczbą podróży wzbudzonych lub tłumionych w podobnych przypadkach byłoby dopiero niezerowe saldo zwiększenia bądź zmniejszenia liczby podróży dokonywanych łącznie – zarówno transportem zbiorowym, jak i indywidualnym (samochód osobowy). W analizach pomijany będzie ruch niezmotoryzowany.

Pojawienie się podróży wzbudzonych bądź tłumionych skutkuje zmianami w obrazie ruchu w sieci (zmiany w natężeniu ruchu, wielkości potoków pasażerskich i pracy przewozowej). Jest to główny, ale nie jedyny czynnik sprawczy tych zmian. Ale zmiany w obrazie ruchu dokonują się także bez zmiany w liczbie realizowanych podróży, lecz jedynie w wyniku zmian niektórych atrybutów podróży, np.: wydłużenie lub skrócenie podróży, zmiana trasy podróży, zmian w liczbie osób w samochodzie. Zmiany te w zależności od ich kierunku można nazywać **ruchem wzbudzonym** bądź **tłumionym**. Podobnie jak w odniesieniu do podróży, zmiany w obrazie ruchu są wywoływane: zmianą parametrów infrastruktury transportowej objawiającej się wzrostem lub spadkiem przepustowości elementów sieci ulic oraz zdolności przewozowej transportu zbiorowego, zwiększeniem lub zmniejszeniem prędkości komunikacyjnej, poprawą lub pogorszeniem płynności ruchu, zmianą w dostępności miejsca postojowego na parkingu, zwiększeniem bądź zmniejszeniem częstości kursowania linii transportu zbiorowego, zmianą w komforcie jazdy w pojeździe transportu zbiorowego.

Zwłaszcza pogarszanie się standardów podróży, spowodowane wyczerpywaniem się przepustowości ciągów drogowych i obniżaniem standardów obsługi (wzrost zatłoczenia wewnątrz pojazdu), może wpływać na redystrybucję podróży w czasie i przestrzeni bez zmiany ich liczby. Skutkuje to zmianą:

- lokalizacji celu podróży,
- środka lokomocji użytego w podróży (np. z samochodu osobowego na transport zbiorowy lub odwrotnie),
- trasy realizacji podróży,
- godzin realizacji podróży.

W efekcie zmieni to obraz ruchu, który – w zależności od punktu sieci transportowej, w którym jest obserwowany – będzie miał różnorodny charakter: ruchu przeniesionego, ruchu tłumionego, a nawet ruchu wzbudzonego.

W wielu przypadkach właśnie zmiany w obrazie ruchu stanowią jedyną przesłankę (bazę danych) do wnioskowania o liczbie podróży wzbudzonych bądź tłumionych, choć należy mieć świadomość wpływu na te terminy innych czynników niż liczba podróży.

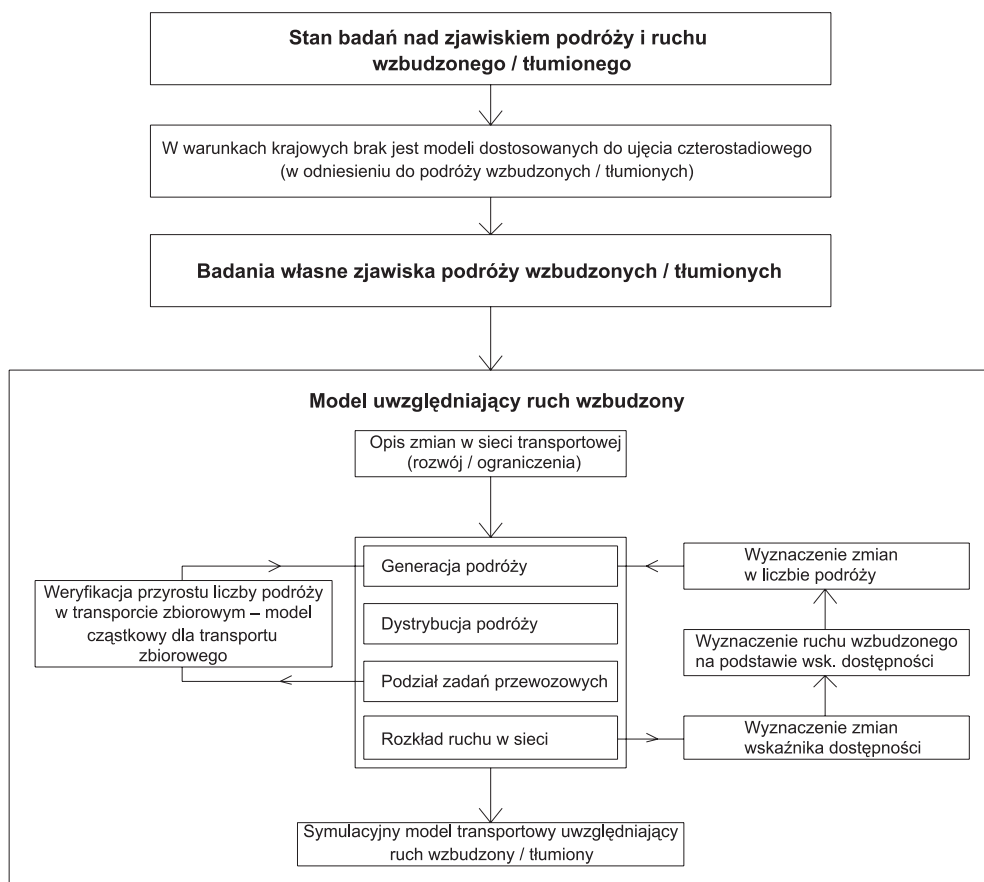
Pojęcie ruchu wzbudzonego silnie związane jest ze zmianą w zagospodarowaniu przestrzennym (np. budowa nowego osiedla, zakładu produkcyjnego czy dużego domu handlowego), co niejako wymusza nowe podróże oraz przyczynia się do realokacji źródeł i celów dotychczasowych podróży. Przykładem może być pojawienie się nowej galerii handlowej, która odbiera klientów konkurencyjnym obiektom. Ten aspekt pojęcia ruchu wzbudzonego nie będzie rozpatrywany w niniejszej dysertacji.

Ważnym aspektem w analizie podróży tłumionych i wzbudzonych jest uwzględnienie motywacji podróży, które są podatne na zmiany. Podróże o charakterze obligatoryjnym (związane z pracą czy szkołą) muszą być zrealizowane i nie można zakładać, że ich liczba się zmniejszy lub zwiększy w związku z rozbudową infrastruktury transportowej. Odm inną kwestią są podróże fakultatywne (związane z zakupami czy wypoczynkiem itp.), których realizacja może być warunkowana poprawą lub pogorszeniem elementów infrastruktury transportowej.

W konsekwencji zmian w systemie transportowym następują zmiany (zmniejszenie lub wydłużenie) czasu podróży: fizycznego (rzeczywistego) bądź subiektywnego, a także kosztu uogólnionego podróży. Stąd propozycja, aby miarę zagregowanego wpływu na generowanie podróży wzbudzonych wyrażać przez wskaźnik dostępności będący odwrotnością fizycznego czasu podróży. Będzie to stanowiło rozwinięcie ujęcia czterostadiowego o moduł uwzględniający podróże wzbudzone poprzez dostosowanie procedur obliczeniowych do warunków krajowych, zgodnie z ogólnie przyjętą metodyką kompleksowych badań ruchu.

Prace badawcze przedstawione w ramach niniejszej pracy zostały zrealizowane wg następującego schematu (rys. 1):





Rys. 1. Schemat realizacji pracy

Podstawowym zadaniem, jaki postawił sobie autor, jest opisanie zjawiska podróży wzbudzonych w taki sposób, aby można było zastosować aparat matematyczny do uzyskania wyników stanowiących element uzupełniający w podejściu czterostadiowym.

### Cel generalny pracy:

Identyfikacja i parametryzacja czynników wpływających na pojawienie się podróży wzbudzonych infrastrukturalnymi inwestycjami transportowymi oraz tłumionych utrudnieniami w ruchu towarzyszącym procesowi wykonywania tych inwestycji oraz stworzenie modelu i procedury, które te wpływy uwzględnią.

### Podstawowa teza pracy:

Głównym czynnikiem wpływającym na liczbę podróży wzbudzonych bądź tłumionych jest zmiana dostępności transportowej wywołana zmianami stanu sieci

transportowej, parametryzowana skróceniem lub wydłużeniem czasu podróży różnymi środkami przewozowymi.

Do realizacji postawionych celów wykorzystano aparat statystyczny, metody wnioskowania rozmytego i algorytmów genetycznych oraz transportowe modele symulacyjne miast.

### **Zakres i treść pracy:**

Praca składa się z ośmiu rozdziałów. W niniejszym rozdziale przedstawiono genezę problematyki, poddano krótkiej charakterystyce przeprowadzone badania własne i analizy oraz przedstawiono syntetycznie zakres pracy.

W **rozdziale drugim** omówiono w sposób syntetyczny proces modelowania podróży i przedstawiono charakterystykę najczęściej stosowanych sposobów modelowania ze szczególnym uwzględnieniem modeli czterostadiowych oraz przedstawiono metody badania podróży wzbudzonych i tłumionych w oparciu o wyniki badań innych autorów. Ponieważ w warunkach krajowych prace nad podróżami wzbudzonymi nie są szeroko prowadzone, skupiono się głównie na wynikach badań prowadzonych w Stanach Zjednoczonych, Australii oraz w krajach Europy Zachodniej. W zakończeniu rozdziału sformułowano podjęte kwestie badawcze rozwijane w ramach niniejszej pracy.

W **rozdziale trzecim** przedstawiono wyniki badań własnych prowadzonych na poligonach badawczych stanowiących wybrane inwestycje transportowe w Polsce. Przeprowadzone badania polegały na pomiarach natężenia ruchu, badaniu ankietowym użytkowników systemu transportowego dla inwestycji związanych z wprowadzeniem ograniczeń w ruchu (remont) oraz oddaniu do eksploatacji nowych inwestycji infrastrukturalnych transportu zbiorowego i indywidualnego. Wyniki ankiet stanowiły podstawę do uproszczonych analiz sieciowych mających na celu kwantyfikowanie podróży wzbudzonych

W **rozdziale czwartym** omówiono strukturę zaproponowanego modelu cząstkowego, wyznaczającego spodziewany przyrost liczby pasażerów w związku z rozbudową systemu transportu zbiorowego. Na podstawie własnych badań ankietowych zaproponowano zastosowanie modelu wnioskowania rozmytego jako narzędzia do wyznaczenia procentowego wzrostu liczby pasażerów w funkcji interwału kursowania nowego połączenia oraz spodziewanych oszczędności czasowych. Model zbudowano na podstawie systemu Mamdaniego z dwoma zmiennymi lingwistycznymi na wejściu i jedną na wyjściu. Efektem zastosowania układu wnioskującego jest wyznaczenie zbioru punktów tworzących powierzchnię, którą następnie aproksymowano. Dobór formuły matematycznej bazował na analogii do zjawisk w mechanice teoretycznej i skutkowało powstaniem równania o 9 parametrach; Do wyboru właściwych parametrów zastosowano metodę przeszukiwania heurystycznego z wykorzystaniem algorytmów genetycznych. Zbudowano algorytm poszukujący optymalnego rozwiązania, a funkcją celu była minimalizacja błędu średniokwadratowego oraz maksymalizacja wskaźnika determinacji (opisującego związek pomiędzy rzeczywi-

stymi pomiarami natężenia ruchu a wartościami modelowanymi). W efekcie uzyskano równanie, które może być zastosowane bezpośrednio do wyznaczenia spodziewanego zwiększenia liczby podróży związanego ze skróceniem czasu podróży.

W **rozdziale piątym** przedstawiono strukturę modelu kwantyfikującego podróże wzbudzone. Model ten bazuje na zdefiniowanym pojęciu wskaźnika dostępności globalnej wyznaczanej dla każdego rejonu transportowego jako odwrotność średniej czasów podróży do pozostałych rejonów ważoną liczbą podróży i udziałem różnych środków transportowych. W rozdziale zdefiniowano pojęcie rezydencjalnej ruchliwości rejonowej, a następnie wykazano związek tego pojęcia ze wskaźnikiem dostępności globalnej. Obliczenia przeprowadzono przy wykorzystaniu transportowych modeli symulacyjnych miast. Wskazano również na iteracyjny charakter obliczeń podróży wzbudzonych.

W **rozdziale szóstym** przedstawiono przykład aplikacji modelu na rzeczywistym przykładzie inwestycji w infrastrukturę transportową dla przypadku analizy podróży tłumionych związanych z ograniczeniami w ruchu drogowym (budowa węzła drogowego) oraz podróży wzbudzonych wynikających z oddania do eksploatacji nowej linii tramwajowej. Wszystkie inwestycje zostały zrealizowane w Krakowie i poddano je szczegółowej analizie polegającej na pomiarach natężenia ruchu i potoków pasażerskich przed i po wdrożeniu inwestycji. Pomiary były uzupełniane wywiadaniami kwestionariuszowymi prowadzonymi pośród pasażerów i kierowców. Do analiz wykorzystano również transportowy model symulacyjny aglomeracji krakowskiej bazujący na pełnym ujęciu czterostadiowym.

**Rozdział siódmy** stanowi podsumowanie pracy, wskazanie najważniejszych wyników oraz ich dyskusję, a także przedstawia kierunki dalszych badań.

## 2. STAN BADAŃ

### 2.1. Syntetyczny przegląd metod modelowania podróży

Potrzeba budowy modeli podróży była dostrzeżona przez planistów już w połowie XIX w., kiedy Carey [31] zaproponował makroskopowy opis problematyki przepływu ludzi i ładunków. Od tego czasu planiści proponują wiele coraz bardziej rozbudowanych modeli bazujących na danych poddanych różnemu poziomowi agregacji. Sto lat później, pracując nad modelami podróży, zaproponowano podejście łączące cztery składowe podróży i od tego czasu modele czterostadiowe rozpoczęły swój rozwój i znalazły szerokie zastosowanie w dziedzinie planowania systemów transportowych (Hensher i Button [97], Garber [66]). W warunkach krajowych prace nad rozwojem modeli podróży były prowadzone m.in. przez Friedberg [62], Gaca i in. [66], Krych [128–132], Lilpop i in. [143], Olszewski, Suchorzewski [163], Podolski [174], Szczuraszek i in. [221, 223], Szczuraszek [225], Zipser [244].

Modele podróży charakteryzują się relatywnie wysokim poziomem agregacji i znacząco upraszczają rzeczywistość z racji swojej istoty podejścia do problemu – bazują bowiem na podróży jako podstawowej jednostce. Proces podejmowania decyzji o podróży wynika głównie z charakteru zagospodarowania przestrzennego i parametrów sieci transportowej. Jednakże pomimo swoich niedoskonałości i licznych uproszczeń modele czterostadiowe wciąż stanowią podstawowy sposób modelowania podróży w polskich miastach. Jest to związane z dostępem do danych wejściowych i ugruntowanym sposobem pozyskiwania wymaganych informacji (np. badania ruchliwości prowadzone w ramach KBR). Podejmowane są próby tworzenia bardziej złożonych modeli (np. Żak i in. [245], Szarata i in. [210]) lub powstają zaawansowane modele (np. Szczuraszek [220]), jednakże ujęcie czterostadiowe jeszcze długo będzie stanowić podstawowe narzędzie w tworzeniu progностycznych modeli symulacyjnych.

W modelach czterostadiowych podstawową jednostką przestrzenną stosowaną w modelowaniu podróży dla aglomeracji jest rejon transportowy. Jest to wyodrębniony obszar stanowiący zagregowane miejsce rozpoczęcia i zakończenia podróży. Dla każdego z rejonów wyznacza się zmienne objaśniające modelowane potencjały ruchotwórcze, takie jak: liczba mieszkańców, miejsc pracy, osób zawodowo czyn-

nych itp. (w praktyce często zachodzi konieczność zgrubnego szacowania wybranych zmiennych). Następnie, uwzględniając wyniki ankietowych badań ruchu prowadzonych w formie wywiadu w losowo dobranej grupie gospodarstw domowych, opracowuje się matematyczne zależności opisujące podróże realizowane w modelowanym mieście.

Oddzielnym elementem jest budowa modelu sieciowego analizowanego obszaru. W modelu tym odwzorowuje się układ drogowo-uliczny, uwzględniając ograniczenia w ruchu (blokowane relacje skrętne, jednokierunkowość itp.) oraz parametryzując poszczególne przekroje, np. podając prędkość w ruchu swobodnym i przepustowość odcinków.

Budując modele sieciowe, bazuje się na teorii grafów (Deo [50], Cascetta [33], Henscher, Button [97], Garber [66]). Graf  $G = (N, L)$  jest definiowany jako zbiór obiektów  $N = \{n_1, n_2, n_3, \dots\}$  zwanych wierzchołkami lub węzłami oraz zbioru par węzłów  $L$  stanowiących odcinki (łuki):

$$L \subseteq N \times N \quad (1)$$

Grafy wykorzystywane do budowy modeli sieciowych są grafami orientowanym, tzn. odcinki posiadają nadany kierunek, a para węzłów je opisująca jest parą orientowaną. Odcinki w grafie reprezentującym system transportowy są wykorzystywane do umożliwienia realizowania podróży pomiędzy rejonami transportowymi i charakteryzują się jednorodnością na całej swojej długości, co jest wyrażone np. prędkością ruchu pojazdów. Węzły stanowią elementy sieci łączące odcinki, np. skrzyżowania, przystanki czy miejsca zmiany parametrów odcinka. W grafie reprezentującym sieć transportową występują ścieżki  $k$ , składające się z kolejnych odcinków łączących węzeł początkowy i końcowy w sieci (odpowiada to podróży źródło – cel, obciążającej sieć drogową). Odcinki są charakteryzowane pojęciem kosztu  $C$  związanego z czasem przejazdu odcinka. Czas ten jest funkcją wielkości potoku ruchu i atrybutów odcinka (np. przepustowości i prędkości w ruchu swobodnym).

Każda ścieżka składająca się z odcinków może mieć wyznaczony czas przejazdu, bazujący na empirycznych zależnościach. Najczęściej stosowaną zależnością wyznaczającą czas przejazdu odcinka  $l$  jest funkcja BPR (opracowana w instrukcji HCM 2000 [100]) opisana równaniem (Cascetta [33]):

$$tr_l(f_l) = \frac{L_l}{v_{0l}} + \gamma_1 \left( \frac{L_l}{v_{cl}} - \frac{L_l}{v_{0l}} \right) \left( \frac{f_l}{Q_l} \right)^{\gamma_2} \quad (2)$$

gdzie:

- $L_l$  – długość odcinka  $l$  [km],
- $v_{0l}$  – prędkość w ruchu swobodnym na odcinku  $l$  [km/h],

- $v_{cl}$  – prędkość średnia na odcinku  $l$  obciążonym ruchem drogowym [km/h],  
 $Q_l$  – przepustowość odcinka  $l$  [poj/h],  
 $f_l$  – natężenie ruchu drogowego na odcinku  $l$  [poj/h],  
 $\gamma_1, \gamma_2$  – parametry funkcji.

Równanie (2) odnosi się do wyznaczenia czasu przejazdu odcinka międzywęzłowego, na który nie ma wpływu ruch z kierunku przeciwnego – np. odcinki dwujezdniowe. Na odcinkach jednojezdniowych na czas przejazdu ma dodatkowo wpływ wielkość potoku ruchu poruszającego się w kierunku przeciwnym. Formuła na czas przejazdu przyjmie następującą postać:

$$tr_l(f_l, f_{l*}) = \frac{L_l}{v_{0l}} + \gamma_1 \left( \frac{L_l}{v_{cl}} - \frac{L_l}{v_{0l}} \right) \left( \frac{f_l + f_{l*}}{Q_{ll*}} \right)^{\gamma_2} \quad (3)$$

gdzie:

- $f_{l*}$  – natężenie ruchu drogowego na kierunku przeciwnym odcinka  $l$  [poj/h],  
 $Q_{ll*}$  – łączna przepustowość odcinka  $l$  (w obu kierunkach) [poj/h],  
 pozostałe oznaczenia jak we wzorze (2).

Jeżeli jednak badany odcinek miejski stanowi element skrzyżowania z sygnalizacją świetlną, wyznaczenie czasu przejazdu jest bardziej złożone. Należy bowiem uwzględnić wpływ sygnalizacji świetlnej na przepustowość grupy pasów ruchu  $Q$  w odcinku  $l$  (Casceta [33], Garber [66], HCM2000 [100]).

$$Q_l = S \cdot \left( \frac{g}{C} \right) \quad (4)$$

gdzie:

- $S$  – natężenie nasycenia grupy pasów jest to maksymalna liczba pojazdów, które mogą przekroczyć dany przekrój w jednostce czasu, podczas efektywnego sygnału zielonego, np. [poj/h],  
 $g$  – efektywna długość światła zielonego [s],  
 $C$  – długość cyklu sygnalizacji świetlnej [s].

Natężenie nasycenia jest wyznaczane jako iloczyn wartości dla warunków idealnych (1900 poj/h) oraz szeregu czynników opisujących charakter odcinka, np. liczba pasów ruchu, współczynniki korygujące wartość natężenia ze względu na szerokość pasów ruchu, udział pojazdów ciężkich, pochylenie niwelety, występowanie parkowania czy pojazdów transportu zbiorowego itp. Jedną z najbardziej znanych

formuł określających czas przejazdu odcinka  $l$  jest wzór *Webstera* (Akcelik i in. [1], Cascetta [33], Garber [66], Gaca i in. [66], Daganzo [45]):

$$tr_l(f_l) = \frac{c(1-g_l)^2}{2\left(1-\frac{f_l}{s_l}\right)} + \frac{\left(\frac{f_l}{Q_l}\right)^2}{2f_l\left(1-\frac{f_l}{Q_l}\right)} - 0,65\left(\frac{Q_l}{f_l^2}\right)^{\frac{1}{3}}\left(\frac{f_l}{Q_l}\right)^{2+g_l} \quad (5)$$

gdzie:

- $S_l$  – natężenie nasycenia odcinka  $l$  [poj/h],
- $Q_l$  – przepustowość grupy pasów odcinka  $l$  [poj/h],
- $g_l$  – efektywna długość światła zielonego na odcinku  $l$  [s],
- $C$  – długość cyklu sygnalizacji świetlnej [s].

W przypadku budowy modelu układu linii transportu zbiorowego bazuje się bądź na układzie drogowym, bądź na oddzielnych połączeniach stanowiących wydzielone odcinki, po których poruszają się pojazdy transportu zbiorowego. Transport zbiorowy jest modelowany przez wskazanie przebiegu konkretnej trasy jako sekwencji odcinków i przystanków, po których porusza się środek transportu (np. autobus) wraz z przypisaniem częstości kursowania lub szczegółowego rozkładu jazdy. Parametrem opisującym przebieg danej trasy jest czas przejazdu odcinka międzyprzystankowego podawany jako wartość pomierzona lub wynikająca z natężenia potoku pojazdów.

Opracowany model sieciowy stanowi podstawę do budowy modelu transportowego bazującego na ujęciu czterostadiowym, które można usystematyzować w następującą sekwencję działań:

**Pierwsze stadium modelowania** – generacja podróży – jest definiowana jako matematyczna zależność łącząca przeciętne natężenie potoku podróży z odpowiadającymi jej charakterystykami danej aktywności oraz modelu podaży (Cascetta [33]):

$$P_{ij}[K_1, K_2, \dots] = d(\mathbf{SE}, \mathbf{T}; \beta) \quad (6)$$

gdzie liczba podróży pomiędzy rejonami  $i, j$  opisanymi charakterystykami  $K_1, K_2, \dots$ , jest wyrażona funkcją wektora  $\mathbf{SE}$  (zmiennych społeczno-ekonomicznych) i wektora  $\mathbf{T}$ , stanowiącego zbiór atrybutów charakteryzujących element podaży. Funkcja popytu uwzględnia również wektor parametrów, kalibrowanych do indywidualnych rozwiązań. W praktycznych zastosowaniach formuła wyznaczająca liczbę podróży –  $P$  generowanych przez rejon transportowy –  $i$  może być opisana równaniem:

$$P_{i,m} = \sum_k (\alpha_k x_{i,m} + \beta) \quad (7)$$

gdzie:

- $P_{i,m}$  – liczba podróży generowanych przez rejon  $i$  dla motywacji  $m$ ,
- $x_{i,m}$  – zmienna objaśniająca, zdefiniowana dla rejonu  $i$  oraz motywacji  $m$  (np. w motywacji dom–praca może to być liczba mieszkańców),
- $\alpha_k, \beta_k$  – parametry modelu kalibrowane do wyników wywiadów w gospodarstwach domowych, oddzielnie dla każdej motywacji.

Rozwarstwienie globalnej liczby podróży na podstawowe motywacje pozwala dodatkowo na analizę liczby podróży wewnątrz każdej z nich i prowadzi do możliwości sprawdzania poziomów ruchliwości mieszkańców. Efektem końcowym będzie zatem zestawienie liczby podróży w poszczególnych motywacjach, przypisanych do rejonów transportowych (sumaryczne wartości liczby podróży rozwarstwione na motywacje pozwalają określić ruchliwość). Funkcja potencjałów ruchotwórczych jest niewrażliwa na zmiany czasu trwania podróży (oznacza to, że skrócenie tego czasu dla danej relacji „źródło–cel” nie generuje dodatkowych podróży).

**Drugie stadium** – rozkład przestrzenny podróży (tj. macierz ruchu) polega na wyznaczeniu macierzy dwuwymiarowej, której elementy odwzorowują wielkość popytu (liczbę podróży) między poszczególnymi rejonami transportowymi. Macierz ta odwzorowuje związki między systemem transportowym a otoczeniem (Żochowska i in. [246]). Metody opracowania macierzy ruchu można podzielić na dwie zasadnicze grupy: modele wskaźnikowe i syntetyczne. Modele wskaźnikowe wykorzystują znane wcześniej zależności (np. macierze historyczne) i na podstawie wyznaczonych wskaźników wzrostu (zmian w potencjałach ruchotwórczych) pozwalają na aktualizację tej macierzy, stosując np. metodę Fratarę (Garber [66]) czy Furnessa (Bell [14]). Druga grupa to metody syntetyczne, w których najczęściej stosowanym jest model grawitacyjny, zakładający, że liczba podróży między rejonami transportowymi jest proporcjonalna do ich potencjałów z uwzględnieniem wpływu odległości (lub czasu podróży) jako funkcji oporu (Garber [66]):

$$T_{i,j} = f(x_{i,j}) \cdot \frac{P_i \cdot A_j}{\sum_j A_j} \quad (8)$$

gdzie:

- $T_{i,j}$  – liczba podróży między rejonami  $i, j$ ,
- $P_i$  – liczba podróży generowanych w rejonie  $i$ ,
- $A_j$  – liczba podróży absorbowanych przez rejon  $j$ ,
- $f(x_{i,j})$  – funkcja oporu, dla której czynnikiem wpływu może być np. koszt podróży między rejonami  $i, j$ . Jako funkcje oporu często stosuje się modele logitowe, uzależniające udział podróży dla poszczególnych relacji źródło–cel w postaci:



$$f(x_{i,j}) = ax_{i,j}^b \exp(cx_{i,j}) \quad (9)$$

gdzie:

$a, b, c$  – parametry modelu kalibrowane dla poszczególnych motywacji podróży.

Inna z metod pozwala określić liczbę podróży międzyrejonowych jako funkcję prawdopodobieństwa zakończenia podróży przy najbliższej nadarzającej się sposobności oraz potencjału absorbującego, który może maleć wraz ze wzrostem odległości do rejonu docelowego – jest to metoda pośrednich możliwości udoskonalona przez Schneidera [193].

Etap rozkładu przestrzennego umożliwia jedynie odwzorowanie realokacji celów podróży związanych ze zmianą dostępności do nich wskutek pojawienia się nowego połączenia, np. skutkiem inwestycji infrastrukturalnych może być pojawienie się podróży wydłużonych w stosunku do sytuacji pierwotnej (Benjamins i in. [19]), lecz nie wpływa na powstawanie podróży wzbudzonych.

**Trzecie stadium** – podział zadań przewozowych – określa, jaka część podróży pieszych będzie realizowana środkami transportu zbiorowego i indywidualnego. Model podziału zadań przewozowych stanowi istotny etap w modelowaniu ruchu, a jego znajomość ma istotne znaczenie dla prowadzenia właściwej polityki transportowej w miastach. Modele podziału zadań przewozowych mają ściśle lokalny charakter, ponieważ opracowane są na podstawie badań ankietowych mieszkańców danego miasta, np. w ramach przeprowadzanego Kompleksowego Badania Ruchu (KBR). Badania uwzględniają zachowania transportowe mieszkańców w zależności od motywacji, odległości czy czasu podróży. W warunkach krajowych najczęściej stosowanym modelem jest model o charakterze logitowym, określający prawdopodobieństwo wyboru danego środka transportu w zależności od przyjętego czynnika wpływu (najczęściej jest to czas podróży poszczególnymi środkami transportu lub iloraz tych wartości) Szarata [216]:

$$U_{kz} = \frac{1}{1 + \alpha \cdot e^{\beta \cdot x}} \quad (10)$$

gdzie:

- $U_{kz}$  – prawdopodobieństwo wyboru transportu zbiorowego jako środka podróży,
- $x$  – iloraz czasów podróży samochodem osobowym i środkami transportu zbiorowego,
- $\alpha, \beta$  – parametry modelu zależne np. od motywacji podróży.

Etap podziału zadań przewozowych pomija aspekt ruchu wzbudzonego. Jednakże np. w układzie drogowym mogą pojawić się dodatkowe podróże pierwotnie dokonywane środkami transportu zbiorowego, a po zrealizowaniu inwestycji drogowej przejęte przez samochód osobowy. Nie są to jednak podróże o charakterze podróży wzbudzonych (w rozumieniu definicji podanych w rozdziale 1).

**Czwarte stadium** – rozkład ruchu w sieci systemu transportowego analizowanego obszaru. Określa on trasy, które będą wybrane przez użytkowników w procesie realizacji podróży wyznaczonych w więźbie ruchu. Wybór trasy stanowiącej sekwencję docinków jest uzależniony od tzw. kosztu odcinka. Koszt ten jest najczęściej parametryzowany czasem podróży, który może być wyznaczony dla pojedynczego odcinka, np. zgodnie z formułami 2,3,5. Jest wiele znanych procedur rozkładu ruchu (Henscher, Button [97], Cascetta [33], Garber [66], Daganzo [45]), m.in.: procedura „wszystko albo nic”, procedura przyrostowa, równowagi użytkownika, stochastyczna, optymalizacji systemu i inne.

Najczęściej stosowane modele bazują na założeniu o zachowaniu równowagi z punktu widzenia użytkownika. Model ten opiera się o pierwszą zasadę Wardropa, zgodnie z którą, w warunkach równowagi sieci, kierowca nie może jednostronnie zredukować swojego kosztu podróży (wyrażonego np. czasem) przez zmianę ścieżki. U podstaw procedury równoważenia jest założenie, że wszystkie wykorzystane ścieżki (dla par źródło–cel) mają ten sam minimalny koszt podróży, a pozostałe, niewykorzystane charakteryzują się wyższym kosztem. Natężenie ruchu pojazdów na odcinku  $a$  można zapisać następująco:

$$V_a = \sum_a \delta_{ijr}^a c_a(V_a) \quad (11)$$

gdzie:

- $V_a$  – natężenie ruchu na odcinku  $a$  [poj/h],
- $\delta_{ijr}^a$  – przyjmuje wartość 1,0, jeżeli odcinek  $a$  znajduje się na ścieżce  $r$  w relacji  $i, j$ , oraz 0,0 w przeciwnym przypadku,
- $c_a(V_a)$  – aktualny koszt przejazdu odcinka na założonym poziomie swobody ruchu, jeżeli  $V_a = 0$  (brak ruchu na odcinku  $a$ ), koszt odpowiada czasowi przejazdu w warunkach swobodnych.

W skali całej sieci stosuje się oprogramowanie matematyczne do rozwiązania problemu rozkładu ruchu jako zagadnienia minimalizacji funkcji celu wyrażonej przez równanie:

$$\min Z\{T\} = \sum_a \int_0^{V_a} c_a(v) dv \quad (12)$$

dla:

$$\sum_r T_{ijr} = T_{ij} \quad (13)$$

oraz

$$T_{ijr} \geq 0 \quad (14)$$

gdzie:

- $T_{ij}$  – łączna liczba podróży między rejonami  $i, j$  [poj/h],
- $T_{ijr}$  – łączna liczba podróży między rejonami  $i, j$ , przypadająca na analizowaną ścieżkę  $r$  [poj/h],

Ograniczenia (13) i (14) zostały wprowadzone, aby mieć pewność, że prowadzone analizy dotyczą tylko interesujących nas rozwiązań, tzn. obliczenia dotyczą tylko ścieżek  $r$  o liczbie podróży większej od zera, dla relacji  $i, j$  wynikających z macierzy liczby podróży (Sheffi [196], Florian i Spess [61]).

Procedury rozkładu ruchu mają cały szereg ograniczeń, przyczyniając się do konieczności umiejętnej interpretacji uzyskanych wyników. Ortuzar i Wilumsen [84] wskazują na najważniejsze ograniczenia dotyczące sieci (nie wszystkie odcinki są uwzględniane w modelu, podróże wewnętrzne w rejonie są ignorowane, źródła i cele podróży są agregowane do jednego punktu w rejonie – centroidy), ograniczenia dotyczące występowania nierealnej wiedzy użytkowników o całej sieci oraz wahaniach w wielkości podróży wynikających z godzin szczytu oraz dni tygodnia (zasada Wardropa uśrednia te zachowania do jednego, modelowanego okresu).

Słabości modeli czterostadiowych nie wpływają znacząco na wyniki końcowe analiz prognostycznych i stąd ich powszechne stosowanie, szczególnie w warunkach krajowych. Jednakże szybki rozwój systemów transportowych, wprowadzenie do powszechnego użytku obszarowych systemów sterowania ruchem czy priorytetów dla transportu zbiorowego spowodowały, że modele czterostadiowe nie są w stanie sprostać coraz większemu zbiorowi danych wejściowych. Jeżeli do tego dodamy aspekty polityki transportowej czy elementy zarządzania mobilnością, dochodzimy do sytuacji, w której model nie jest w stanie uwzględnić realnego wpływu takich miękkich działań na przepływy pasażerskie. Ponadto w klasycznym ujęciu modele czterostadiowe bazują na pojedynczej podróży i nie uwzględniają połączenia występującego między konkretnymi podróżami, np. wyjazd z domu do pracy i z powrotem w takich modelach jest traktowany niezależnie, podczas gdy w rzeczywistości jest to podróż realizowana przez jedną osobę. W efekcie może się zdarzyć, że podróż do pracy będzie realizowana autobusem, a podróż powrotna zostanie przypisana

do transportu indywidualnego (Sivakumar [199]). Próbowano znaleźć rozwiązanie tego problemu w modelach bazujących na dostrzeżonych sekwencjach w podróży miejskich, co prowadziło do modeli operujących pojęciem łańcucha podróży (Adler i in. [1], Lee i in. [139], Zhao i in. [243], Primerano i in. [175], McGuckin i in. [151], Henscher i in. [98], Ye i in. [238], Goulias i in. [74]). Podejście to dzieli podróże na związane z domem i niezwiązane z domem, np. podróż do pracy związana z domem uwzględnia przejazd z domu do pracy i z powrotem (oczywiście to nie tylko wyjazdy do pracy, ale również wyjazdy z domu na zakupy, do szkoły itp.). W strukturze modeli czterostadiowych częstotliwość występowania odpowiednich łańcuchów podróży jest związana z pierwszym stadium modelowania, w kolejnych pojawia się model wyboru celu podróży oraz środka transportu. Ostatni krok to rozkład ruchu w sieci transportowej. Modele te są wciąż dość popularne, lecz mają podobne słabości jak w przypadku modeli bazujących na podróży – wciąż niezbyt dokładnie odwzorowują powiązania między poszczególnymi podróżami. Za przykład niech posłuży podróż z domu do pracy z przerwą na zakupy w drodze powrotnej. W takim przypadku model rozróżni podróż związaną z domem (dom – praca – dom) oraz drugą, nie związaną z domem (Primerano [175]). Ponadto modele takie pomijają podróże związane z podwożeniem innych (np. dzieci do szkoły) oraz nie uwzględniają interakcji domowników na realizowane podróże.

## 2.2. Charakterystyka modeli opartych na aktywnościach

Pojawiła się zatem potrzeba innego podejścia do modelowania podróży ukierunkowana raczej na aktywności mieszkańców niż samych podróży, skutkująca rozwojem modeli aktywności (Axhausen i in. [8], Bhat [22], Bhat [21], Ben-Akiva i in. [18], Etterna i in. [58], Fellendorf i in. [59], Hirsh i in. [102], Doherty i in. [52], Jones i in. [115], Hensher i in. [99], Hensher [97]). Już w latach 70. XX wieku dostrzeżono konieczność zrozumienia podróży jako części bardziej złożonego wzorca aktywności (Hensher [99], Chapin [38]). Modele te opierają się na założeniu, że potrzeby transportowe użytkowników systemu transportowego są determinowane przez ich potrzebę do udziału w różnych aktywnościach rozproszonych w czasie i przestrzeni. Aby właściwie modelować potrzeby transportowe, koniecznym jest odpowiednie uwzględnienie aktywności transportowych wszystkich mieszkańców (Sivakumar [199]). Następnie, jeśli weźmiemy pod uwagę, że pojedynczy użytkownik systemu transportowego podejmuje swoje indywidualne decyzje w interakcji z całym systemem, stąd prosta droga do uwzględnienia wpływu innych użytkowników na proces decyzyjny. Podstawowe założenia ujęcia modelowania bazującego na aktywnościach można przedstawić następująco:

- konieczność podróży wynika z chęci zmiany położenia użytkownika systemu, powodowanej zamierzonymi aktywnościami (np. praca, zakupy itp.),

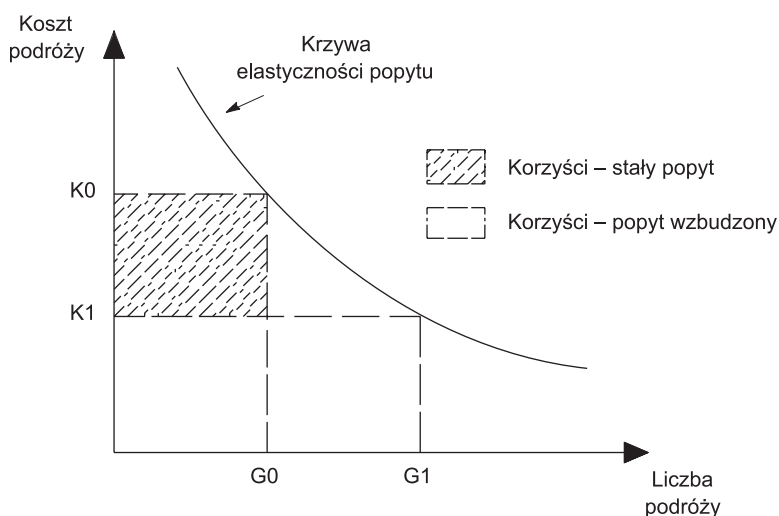
- użytkownik przy wyborze aktywności operuje pewnym ustalonym budżetem (ekwiwalentem czasu, posiadanych środków i uwarunkowaniami społecznymi),
- użytkownik dopasowuje i koordynuje swoje potrzeby z innymi członkami gospodarstwa domowego,
- ograniczeniem dla wyboru danej aktywności będzie dostęp do samochodu (w związku ze współkorzystaniem z niego przez innego członka gospodarstwa), dostęp do systemu transportu publicznego, czas trwania podróży,
- wybór danej aktywności jest determinowany przez czas wyjazdu, czas jej trwania oraz położenia celu podróży.

Konstrukcja zbioru danych wejściowych do modeli aktywności jest zupełnie inna od wcześniejszych zastosowań. W tych modelach wymagany jest dostęp do szczegółowej bazy danych o podróżach realizowanych przez użytkowników. Są one zapisywane w postaci dzienników podróży, w których ankietowany opisuje swoje podróże z dnia poprzedzającego dzień badań w postaci sekwencji przemieszczeń z wyjaśnieniem każdego etapu podróży (Richardson i in. [178], Pas i in. [169]). Odpowiednio skonstruowane badania pozwolą na opracowanie modeli uwzględniających: interakcję członków gospodarstwa domowego (Goulias [75]), opracowania łańcuchów aktywności, stosując najczęściej modele logitowe zagnieżdżone (Ben-Akiva i in. [16], Ben-Akiva i in. [15]) oraz przypisania danych aktywności do czasu ich realizacji (ang. activity scheduling). W tym przypadku możemy wyróżnić trzy poziomy modelowania: modele długo- i średnioterminowe oraz kalendarz dzienny. Doherty (i in.) [52] wykorzystali do tego celu bazę danych dotyczącą podróży realizowanych przez użytkowników systemu w ciągu siedmiu dni, aby określić, kiedy respondenci planowali konkretną aktywność, jak często zmieniali atrybuty przypisane do decyzji związanych z tą aktywnością i z jakiej części aktywności zrezygnowali. Pomimo niewielkiej próby badawczej wnioski wyciągnięte z badań stanowiły podstawę do podobnych analiz, prowadzonych w Niemczech, USA i Kanadzie (Axhausen i in. [8]). Modele oparte na aktywnościach stanowią doskonałe narzędzie uwzględniające wpływ różnych czynników zewnętrznych na decyzję o tym, czy realizować daną podróż, czy z niej zrezygnować. W świetle prowadzonych analiz ruchu wzbudzonego i tłumionego możliwe jest kwantyfikowanie wpływu podaży na wielkość popytu w modelach symulacyjnych.

### **2.3. Rola podróży wzbudzonych i ruchu wzbudzonego w efektywności funkcjonalnej inwestycji infrastrukturalnych**

Rola ruchu wzbudzonego jest dostrzegana nie tylko z punktu widzenia analiz efektywności funkcjonalnej, ale również ekonomicznej. Dotychczasowe podejścia przyczyniają się do pomijania ruchu wzbudzonego w analizach efektywności eko-

onomicznej, co prowadzi do niedoszacowania/przeszacowania tej wartości. Mackie [145] zauważył, że dla wielu analiz praca ze stałym popytem w zupełności wystarcza i nie ma powodu, aby komplikować obliczenia przez wprowadzenie zmiennej wartości popytu. Jednakże brak uwzględnienia ruchu wzbudzonego prowadzi do przeszacowania korzyści w sieciach o wysokim stopniu zatłoczenia transportowego. Zatem dla dużych inwestycji w obszarach zurbanizowanych, na których poziom zatłoczenia drogowego jest zwykle wysoki (autor nie precyzuje jednak granicy, dla której inwestycja jest traktowana jako duża), niezbędne jest wyznaczenie efektywności ekonomicznej uwzględniającej udział ruchu wzbudzonego. Na rysunku 2.1 przedstawiono związek między kosztem podróży a liczbą podróży wzbudzonych.



Rys. 2.1. Związek między kosztem podróży a liczbą podróży (Litman [145])

Uwzględniając powyższą zależność, przedstawiono uproszczoną formułę pozwalającą wyznaczyć całkowite koszty użytkowników związane z daną inwestycją:

$$K_{całk} = \frac{(K_0 - K_1) \cdot (G_0 + G_1)}{2} \quad (15)$$

gdzie:

$K_0, K_1$  – koszt uogólniony podróży, odpowiednio przed i po inwestycji,  
 $G_0, G_1$  – liczba podróży, odpowiednio przed i po inwestycji.

Oczywiście największą trudność stanowi wyznaczenie wartości  $G_0, G_1$ , ale sam fakt dostrzeżenia problemu jest tu istotny. Podróże wzbudzone zostały również

badane z uwzględnieniem modeli symulacyjnych opracowanych dla aglomeracji. Coombe [43] przeprowadził analizy dla Belfastu, Cardiff, Londynu i Norwich, stosując modele transportowe bazujące na klasycznym ujęciu czterostadiowym. Stosując analizę wrażliwości modelu symulacyjnego, Williams, Moore [236] wykazali, że w przypadku jednej z inwestycji w Cardiff (budowa mostu w śródmieściu wraz z 4 kilometrową drogą szybkiego ruchu) różnica w liczbie podróży między ujęciem ze stałym popytem a ujęciem uwzględniającym podróże wzbudzone wynosiła 18% dla horyzontu czasowego +25 lat. Dla drugiego przypadku – model transportowy Belfastu – uwzględniono pełny system transportowy miasta, tzn. łącznie z podziałem zadań przewozowych i wyznaczono efektywność ekonomiczną bazującą na łącznym czasie jazdy wyrażonym dla całej sieci w postaci pojazdogodzin. Uwzględniając trzy scenariusze rozwoju układu drogowego dla dwóch przypadków: z i bez ruchu wzbudzonego, wykazano, że efektywność wariantów z ruchem wzbudzonym jest 6%–10% niższa niż dla przypadku ze stałym popytem. Dla jednego ze scenariuszy była to bardzo istotna informacja, ponieważ jego efektywność (wyznaczona dla stałego popytu) była na granicy opłacalności inwestycji, a uwzględnienie zmiennego popytu przyczyniło się do odrzucenia go w planie inwestycyjnym.

Bardzo interesująca jest analiza wpływu wskaźników elastyczności na różnice w liczbie podróży:

- dla modelu miasta Belfast autorzy opracowania przyjęli wskaźnik elastyczności  $e = -0,5$ , co skutkowało zwiększeniem liczby podróży o 2%, a w analizie efektywności ekonomicznej przełożyło się to na prawie 10% pogorszenia wskaźników,
- dla przypadku części modelu symulacyjnego Londynu, w analizie przyjęto wskaźnik elastyczności  $e = -1,0$ , co zwiększyło liczbę podróży na kordonie o 1%, lecz pogorszyło efektywność ekonomiczną aż o 30%,
- dla Norwich przyjęto wskaźnik elastyczności  $e = -0,5$ , co przełożyło się na zwiększenie liczby podróży o 2,9% i pogorszenie wskaźników ekonomicznych o 20%.

Osiągnięte wartości przyrostu liczby podróży związanych ze zjawiskiem ruchu wzbudzonego są relatywnie niskie, gdy je porównamy z prognozowanymi wielkościami ruchu (wynoszącymi od 23% – Londyn do 55% – Norwich), lecz mają istotny wpływ na wyniki analiz ekonomicznych. Stąd tak duża ich rola w pełnej analizie efektywności inwestycji.

Wagę wpływu podróży wzbudzonych na efektywność inwestycji dostrzegli również Shiftan i in. [197]. Dokonali oni analizy oceny efektywności inwestycji prowadzonych w Izraelu wg procedury „Nohal Prat”. Jest to procedura bazująca na analizie kosztów i korzyści i pozwalająca kwantyfikować korzyści społeczne z projektu. Metoda ta bazuje na modelu czterostadiowym, które charakteryzuje się licznymi słabościami. Jako jedną z nich wskazano sposób prowadzenia analiz uwzględniający



stały popyt. Autor wskazuje na dwa aspekty rozwiązania tego problemu: zastosowanie modeli opartych na aktywnościach (*activity-based models*). Modele te wyznaczają liczbę podróży jako popyt na aktywności realizowany przez mieszkańców, co pozwala lepiej zrozumieć naturę podróży. Drugim elementem zwiększającym jakość opracowanych prognoz jest uwzględnienie pojęcia dostępności definiowanej jako łatwość osiągnięcia celu podróży przez użytkownika systemu i kwantyfikowanej np. czasem podróży. Same miary dostępności są również szeroko omawiane w literaturze, np. Jones [116], a w publikacji Geurs [69] zaproponowano połączenie dostępności i aktywności do oceny wpływu danej inwestycji infrastrukturalnej na warunki ruchu.

Thill, Kim [231] zdefiniowali pojęcie podróży nie jako efektu końcowego, a jedynie środek do zaspokojenia pewnych zamierzonych aktywności użytkowników systemu. Podróż więc jest powiązana ściśle z „łatwością” jej wykonywania, rozumianą jako dostępność. Ortuzar i Wilumsen [164] wskazali na pewien paradygmat towarzyszący budowie modeli transportowych, który mówi, że liczba podróży generowana przez obszar jest niezależna od jego stopnia obsługi transportowej, a nawet od samego występowania infrastruktury! Jedynie niewielka część publikacji zajmuje się powiązaniem wyznaczania popytu, np. w rejonie transportowym jako funkcji dostępności do tego rejonu. Thill poddał analizie szczegółowe wyniki wywiadów w gospodarstwach domowych (w formie Kompleksowych Badań Ruchu) przeprowadzone w Minneapolis (Stany Zjednoczone) oraz model symulacyjny opracowany na potrzeby miasta. Wykazał, że istnieje związek między zdefiniowaną przez niego dostępnością transportową a wielkością podróży generowanych przez wybrany rejon transportowy, co ma ścisły związek z możliwością wyznaczenia wielkości ruchu wzbudzonego.

Headicar [95] zauważył związek między zwiększeniem dostępności a zmianą w popycie na podróż. Przeprowadził efekt otwarcia autostrady M40 na warunki ruchu w równoległych drogach. Duży nacisk został położony na analizę dokumentów planistycznych, dzięki której wskazano na szybki rozwój zabudowy jednorodzinnej, do czego przyczyniło się zwiększenie dostępności transportowej tych obszarów (spostrzeżenia wynikające z badań ankietowych). Początkowo, gdy nowe obszary nie miały planów zagospodarowania przestrzennego, niekontrolowany rozwój obszarów spowodował powstawanie wysokiego poziomu zatłoczenia, dopiero wdrożenie odpowiedniego zarządzania tymi terenami z punktu widzenia gospodarki przestrzennej, pozwoliło na uporządkowanie sytuacji i odpowiednie ukierunkowanie zamierzeń budowlanych. Niebagatelną rolę pełniły tu założenia o podróżach wzbudzonych (przyjęte jako efekt dyskusji ekspertów), który został uwzględniony w analizach ruchowych. Niestety autor nie podaje szczegółów oraz założeń obliczeniowych.

Kluczem do zrozumienia wpływu podróży wzbudzonych w obszarach o mieszanym charakterze zagospodarowania przestrzennego jest pojęcie redystrybucji i generacji podróży. Sperry i in. [202] postawili tezę, że umieszczenie w jednym obszarze kilku par źródło–cel dla podróży zredukuje liczbę przejazdów samocho-



dem na rzecz podróży wewnętrznych, realizowanych środkami niezmotoryzowanymi. Pojawia się wtedy pytanie, czy te wewnętrzne, nowe podróże zastępują wcześniejsze (zmotoryzowane), czy może należy je traktować jako dodatkowe o charakterze wzbudzonym. Do odpowiedzi na te pytania Sperry wykorzystał Legacy Town (Texas) – istniejący obszar, spełniający wymagania dotyczące różnorodności w charakterze zagospodarowania przestrzennego. Na wybranym obszarze przeprowadził badania ankietowe dotyczące deklaracji, pytając mieszkańców o podróże o charakterze podróży wzbudzonych. Wyniki ankiet (liczebność próby to 750 wywiadów, co stanowi ok. 16,5% wszystkich podróży generowanych przez ten obszar) wskazują, że ponad 22% respondentów zrealizowało podróże, które można traktować jako podróże wzbudzone.

Bardzo interesujące wyniki pokazuje analiza pracy przewozowej, gdzie w związku z występowaniem większej liczby podróży wewnętrznych w stosunku do obszaru zaobserwowano niższą wartość pojazdodmíl aż o 14%. Wnioski płynące z badań wskazują, że potencjalne możliwości różnicowania zagospodarowania przestrzennego generują dodatkowe podróże, ale jednocześnie mogą się przyczynić do obniżenia pracy przewozowej przez skrócenie długości podróży.

Hills [101] dokonał uporządkowania pojęć związanych z ruchem wzbudzonym i rozróżnił pojęcie ruchu wzbudzonego (wyrażonego poprzez zwiększenie pracy przewozowej w pojazdokilometrach) od podróży wzbudzonych (związanych ze zwiększeniem częstotliwości podróżowania). Pozwoliło to na uwzględnienie np. wpływu zmian w podziale zadań przewozowych (zwiększających udział transportu indywidualnego) jako ruchu wzbudzonego, a zwiększenie częstotliwości podróżowania – jako podróży wzbudzonych (również generujących ruch wzbudzony). Hills zwrócił również uwagę na znaczenie podróży wzbudzonych w przypadku, gdy zarówno źródło, jak i cel podróży ulegają zmianie. Prowadzi to do niejasnej sytuacji, w której trudniej jest ustalić, co będzie podróżami istniejącymi, a co wzbudzonymi. Rozwiązanie tej kwestii upatruje w analizach porównawczych dla scenariuszy przed i po inwestycji, dla takich samych warunków brzegowych.

W odniesieniu do samego zjawiska ruchu wzbudzonego, już w latach 80. Hall i in. [84] rozpoczęli analizę wskazującą na rolę inwestycji transportowych jako jeden z podstawowych czynników wpływających na nowe formy rozwoju ekonomicznego i wzrostu liczby podróży wzdłuż korytarzy transportowych. Ich badania zbiegły się w czasie z okresem intensywnej rozbudowy podmiejskich centrów handlowych lokalizowanych w pobliżu autostrad w Wielkiej Brytanii. Dostrzeżono wtedy, że centra handlowe oraz usprawnienie/modernizacja układu drogowego wpływa w sposób istotny na zmiany zachowań transportowych mieszkańców przez realokację celów podróży, wydłużenie samych podróży oraz dodatkowe podróże, których wcześniej nie było – czyli ruch wzbudzony. Scott [195] poddał szczegółowej dyskusji zjawisko ruchu wzbudzonego na przykładzie miast Ameryki Północnej (USA i Kanada), gdzie rozbudowa układu drogowego staje się kontrowersyjnym sposobem

na poprawę warunków podróżowania. Kontrowersje wynikają z faktu, iż pozorne zwiększenie przepustowości układu drogowego przez jego rozbudowę prowadzi do wyraźnego zwiększenia liczby podróży realizowanych samochodem. Litman [144] dokonał grupowania różnych typów reakcji, jakie mogą się pojawić po zwiększeniu przepustowości układu drogowego, wskazując na ich efekt na pracę przewozową wyrażoną w pojazdomilach. Wyraźnie wskazano, że dodatkowe podróże o charakterze wzbudzonym przez poprawę warunków przyczyniają się do istotnego zwiększenia pracy przewozowej. Scott podkreślił rolę związku między podażą i popytem jako determinanty ruchu wzbudzonego. Dodatkowa przepustowość jako efekt oddania do użytku nowej drogi (tzn. zwiększenie podaży) redukuje koszt podróży przez zmniejszenie czasów podróży, prowadząc do zwiększenia liczby podróży (tzn. zwiększenia popytu). Dyskusja nad zjawiskiem ruchu wzbudzonego bazuje głównie na danych empirycznych i jest komplikowana przez brak jednoznacznej definicji tego ruchu. Np. Litman [144] definiuje to pojęcie jako całkowicie nowe podróże wynikające wyłącznie ze zwiększenia podaży w sieci transportowej. Z kolei Noland, Lem [160] czy Zhao, He [242] sugerują, że ruch wzbudzony powinien również uwzględniać podróże przejęte przez konkurencyjne systemy transportowe oraz te, które zmieniły trasy przejazdu, wpływając na zwiększenie pracy przewozowej.

## 2.4. Analizy ruchu wzbudzonego jako efekt zmian w pracy przewozowej

Praca przewozowa stanowiąca jeden z parametrów opisujących stan sieci transportowej jest obecna w wielu pracach badawczych nad zjawiskiem ruchu wzbudzonego. Fulton i in. [64] uwzględnili logarytmiczny charakter zmian w pracy przewozowej, proponując następującą formułę matematyczną:

$$\log(VMT_{it,k}) = c + \alpha_i + \beta_t \sum_k \lambda_k \log(X_{it,k}) + \varepsilon_{it} \quad (16)$$

gdzie:

- $VMT_{it,k}$  – praca przewozowa (pojazdomile) dla doby, w obszarze  $i$ , roku prognozy  $t$ , oraz wariantu rozwoju sieci  $k$ ,
- $c$  – stała, kalibrowana dla danej inwestycji,
- $\alpha_i, \beta_t$  – parametry modelu,
- $X_{it,k}$  – wartości zmiennych dla stanu  $i$  oraz horyzontu czasowego inwestycji  $t$  oraz wariantu rozwoju sieci  $k$  (np. dane demograficzne, wskaźnik motoryzacji, praca przewozowa przed inwestycją, koszt uogólniony podróży),

- $\lambda_k$  – waga kosztu czasu podróży,
- $\varepsilon_{it}$  – błąd losowy.

Bazując na zestawie danych pozyskanych dla czterech obszarów (Maryland, North Carolina, Virginia, Baltimore Area), autorzy dokonali kalibracji modelu i wyznaczył spodziewane zmiany w pracy przewozowej powodowane przez wybrane inwestycje drogowe.

Noland, Cowart [161] udowodnili, że istnieje silna korelacja między rozwojem sieci drogowej a wzrostem pracy przewozowej tłumaczonym jako ruch wzbudzony – wyznaczony współczynnik determinacji  $R^2 = 0,89$ . Podobnie jak Roodman [181] i Hansen [89] potwierdzili, że koszt paliwa ma niewielki wpływ na generowany ruch wzbudzony i w analizach można go pominąć. Noland wykazał to, korzystając z doświadczeń Johnstona [114], który zastosował technikę zwaną częściowym dopasowaniem (*partial adjustment*) zastosowaną do wyznaczenia poziomu sprzedaży benzyny w Stanach Zjednoczonych po wprowadzeniu wyraźnej podwyżki cen. Początkowo spowodowało to obniżenie jej sprzedaży, co było wynikiem rezygnacji z części podróży, podczas gdy po okresie ok. dwóch tygodni, użytkownicy powrócili do starych przyzwyczajeń i sprzedaż paliw wróciła do stanu sprzed podwyżki. Podobieństwa w mechanizmie powstawania ruchu wzbudzonego jako efektu poprawy przepustowości pozwoliły na zastosowanie podejścia Nolanda. Wskazano jednak na pewne słabości metody, ponieważ wymagały one przyjęcia założenia, że proces dopasowania zachowań transportowych do nowych warunków będzie niezależny od części zmiennych (np. od liczby mieszkańców, dochodu czy ceny paliw), a zmienną objaśniającą będzie wyłącznie długość sieci drogowej i praca przewozowa.

Zhao, He [242], bazując na doświadczeniach z USA i Europy Zachodniej Noland, Cowart [160], Cervero, Hansen [34], Noland [161], Fulton [64], zastosował równanie (16) do wyznaczenia zmian w pracy przewozowej dla wybranych inwestycji w Chinach. Właściwa kalibracja funkcji wymagała dostępu do bardzo rozbudowanej bazy danych – przedstawiono dane zebrane dla 31 prowincji i miast w Chinach (dane dotyczyły liczby ludności, średniego dochodu, pracy przewozowej i gęstości sieci). Dane zagregowano do 6 grup geograficznych i dla nich prowadzono proces parametryzacji równania (16). Przez dobór parametrów osiągnięto zgodność modelu na poziomie  $R^2 > 0,9$  dla wszystkich grup. Skalibrowany model pozwoli na estymację zmian w pracy przewozowej sieci po zwiększeniu podaży (rozbudowie układu drogowego). Autorzy podkreślają, że model ma charakter lokalny i dla każdej z grup wymaga niezależnej analizy.

Zastosowanie danych panelowych i analiza zmian w pracy przewozowej jest często stosowana do szacowania wielkości ruchu wzbudzonego. Gonzalez, Marrero [72] zaproponował podejście zbliżone do Fultona [64] i Zhao, He [242], wprowadzając jednak nieco inną, zmodyfikowaną formułę:

$$VKT_{it} = \alpha_i + \beta VKT_{it-1} + \lambda_1 LK_{it} + \lambda_2 GDP_{it} + \lambda_3 P_{it} + \lambda_4 L_{it} + \varepsilon_{it} \quad (17)$$

gdzie:

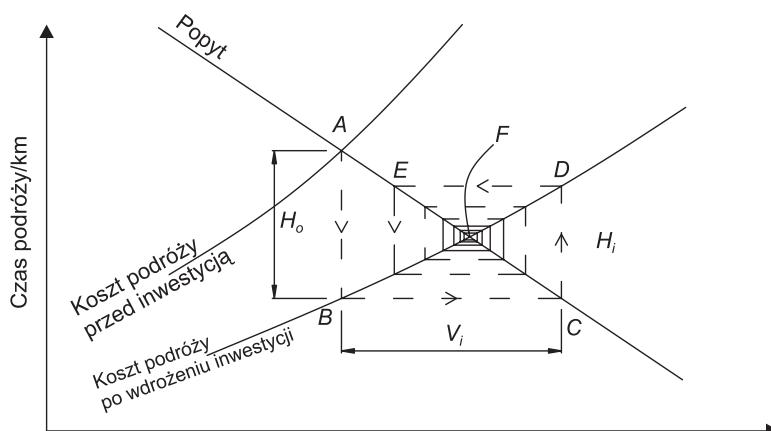
$VKT_{it}$	– praca przewozowa przed inwestycją, dla doby [pojkm],
$VKT_{it-1}$	– praca przewozowa przed inwestycją, dla doby [pojkm],
$\alpha_i$	– parametr modelu,
$LK_{it}$	– całkowita długość sieci drogowej [km],
$GDP_{it}$	– wartość produktu krajowego brutto przypadająca na obszar,
$P_{it}$	– cena paliwa w obszarze,
$L_{it}$	– wskaźnik motoryzacji,
$\beta$	– parametr skalujący wpływ pracy przewozowej przed inwestycją na wielkość ruchu wzbudzonego (przyjmowany w skali 0–1),
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$	– parametry poszczególnych składowych badanej zależności,
$\varepsilon_{it}$	– szacowany błąd losowy.

Autorzy dokonali porządkowania danych dla 16 obszarów w Hiszpanii w latach 1998–2006 i dla tak opracowanych danych panelowych, zastosowali różne procedury kalibracji parametrów równania (17): metodę najmniejszych kwadratów, uogólnioną metodę momentów GMM (Generalized Method of Moments) oraz wewnątrzgrupowy estymator WG (Within Group). Podobnie jak Cervero [35], wykazano, że metoda najmniejszych kwadratów daje akceptowalną wartość szacowanych współczynników. Zwrócono również uwagę na kwestie zbyt dużych wymagań dotyczących samej bazy danych oraz wykazano, że niektóre zmienne nie są istotne w prowadzonych analizach. Wykorzystano tutaj analizy Roodmana [181], który wskazuje na możliwości pominięcia części zmiennych poprzez zastosowanie testu Hansena [89] w ramach prowadzonych analiz GMM.

Hymel i in. [108] w swoich analizach dotyczących ruchu wzbudzonego dla inwestycji drogowych, analizowanego zmianami w pracy przewozowej, uwzględnił więcej zmiennych niż pozostali autorzy. Pod uwagę wzięto nie tylko koszt podróży czy długość sieci drogowej, ale również elementy zatłoczenia w sieci transportowej oraz poprawy/zmian w koszcie podróży związanych ze zmianą efektywności ekonomicznej transportu. Dotyczy to tzw. efektu rykoszetu (ang. *rebound effect*) zdefiniowanego przez Greeninga i in. [76], wg których zmiany w polityce transportowej lub usprawnienia techniczne (np. te, które poprawiają efektywność wykorzystania paliw) obniżające koszt korzystania z taboru wpływają na zwiększenie wykorzystania pojazdów, generując dodatkowe podróże. Połączenie tych mechanizmów pozwoliło na pełniejszy opis zjawiska wzbudzonych podróży w postaci modelu symultanicznie kwantyfikującego oba efekty. Dane wejściowe do modeli bazowały na sprawozdaniach Highway Statistics Summary oraz innych bazach danych wykorzystywanych wcześniej, np. przez Nolanda [161].

## 2.5. Rola stopy elastyczności popytu transportowego w analizach podróży wzbudzonych i tłumionych

Bardzo często w celu wyznaczenia udziału podróży wzbudzonych operuje się parametrem stopnia redukcji kosztów związanych z czasem podróży (np. wyrażonych uogólnionym kosztem podróży). Jednakże należy pamiętać, że pierwotnie wyznaczona wielkość ruchu wzbudzonego zwiększa czas podróży (dodatkowe podróże obciążają sieć drogową, zwiększając stopień nasycenia), wpływając jednocześnie na zmniejszenie wcześniej wyznaczonego udziału podróży wzbudzonych. Jest to zatem proces iteracyjny, mający na celu osiągnięcie równowagi między kosztem podróży a popytem transportowym. Na rysunku 2.2 przedstawiono schematycznie proces równoważenia zachodzący podczas wyznaczania wielkości podróży wzbudzonych.



Rys. 2.2. Graficzne przedstawienie osiągania stanu równowagi między kosztem podróży a popytem transportowym (De Corla-Souza [47])

Punkt A jest początkowym punktem równowagi. Gdy wprowadzimy nową krzywą kosztu podróży, której przebieg wynika z poprawy warunków ruchu po realizacji nowej inwestycji, koszt podróży jest redukowany do wartości B. Jednakże przy takiej wartości kosztu popyt transportowy będzie znacznie wyższy, zwiększony do poziomu reprezentowanego przez punkt C. W tym przypadku popyt jest zbyt wysoki w stosunku do kosztu, więc zwiększenie kosztu przedstawia punkt D. Dla tej ceny popyt powinien być niższy, co przedstawia punkt E. Cała procedura powtarza się aż do osiągnięcia równowagi oznaczonej na wykresie punktem F.

W badaniach przeprowadzonych w San Francisco wykazano niewielką chęć do zmiany zachowań transportowych mieszkańców, gdy efektem inwestycji będą

oszczędności czasowe krótsze niż 15 minut/podróż (Bailly [11]). Przeprowadzone badania związane były z budową nowego odcinka autostrady i wykazały niewielki udział ruchu wzbudzonego związanego z tą inwestycją. W przypadku inwestycji w infrastrukturę transportu zbiorowego (przykładem może być rozbudowa linii metra w Waszyngtonie) zaobserwowano dodatkowe podróże, których wielkość oszacowano na podstawie badań ankietowych na poziomie 13%, Bailey [11]. Ważnym spostrzeżeniem jest długofalowy efekt inwestycji, polegający na wydłużeniu podróży związanym ze zmianą miejsc zamieszkania i pracy w związku z budową nowej linii transportu zbiorowego. Rudnicki [186] poddał szczegółowej analizie wpływ jakości transportu zbiorowego na wielkość popytu na podróże. Przeprowadził badania własne, w których wykazał wpływ dodatkowego przystanku na wielkość potoku pasażerskiego i wskazał przyrost liczby pasażerów (traktowany jako ruch wzbudzony) w związku z pojawieniem się nowego przystanku na ok. 2%. Ważnym czynnikiem jest również częstotliwość kursowania, badana przez Hansena [88], który wyznaczył liczbę obsługiwanych pasażerów  $X$  [pasażerów], w funkcji średniego interwału międzypojazdowego  $\bar{h}$  [min]:

$$X = 4,4 \cdot 10^5 \cdot \bar{h}^{-1,5} \quad (18)$$

Pomimo uzyskanego wysokiego wskaźnika determinacji  $R^2 = 0,7$  model nie ma zastosowania do warunków miejskich, ponieważ zakres zmienności waha się od 40 min do 210 min. Jednakże sam związek między częstotliwością wskazuje na duże znaczenie tego czynnika w wyznaczaniu podróży wzbudzonych/tłumionych. Rudnicki [186] również przedstawił swoją formułę, wiążącą interwał bieżący w potoku autobusów wyrażony natężeniem  $h$  [poj/h] z intensywnością zgłoszeń na przystanek  $\varphi$  [pasażerów]:

$$\varphi = 0,84 - 0,036 \cdot h \quad (19)$$

Podobne badania prowadzili Van Nes i in. [232], którzy znaleźli zależność między liczbą pasażerów a liczbą środków transportu kursujących w ciągu godziny. Zależność ta była wyrażona w postaci **stopy elastyczności popytu** rozumianej jako miara procentowa zmiany popytu na podróże w stosunku do procentowej zmiany czynnika, który wpływa na ten popyt. Wartość stopy elastyczności popytu bliska 0 oznacza brak dodatkowego popytu na podróże pomimo skrócenia czasu przejazdu. Elastyczność popytu przyjmuje często wartości ujemne, ponieważ ilość ruchu zwykle zmniejsza się wraz ze wzrostem kosztu podróży. Dodatkowe podróże pojawiają się już przy bardzo małych wartościach wskaźnika elastyczności. Van Nes, na podstawie analiz pomiarów natężeń potoków pasażerskich, wyznaczył wartość stopy elastyczności popytu wynoszącą od 1,0 dla 2 poj/h do 0,7 przy 10 poj/h.

W tabeli 2.1 przedstawiono wybrane wartości stopy elastyczności popytu wyznaczone przez różnych autorów w odniesieniu do czasu podróży oraz zmian w pracy przewozowej wyrażonej w pojazdokilometrach.

Tabela 2.1

Wybrane wartości stopy elastyczności popytu wg badań różnych autorów

Autor	Obszar analizy	Stopa elastyczności popytu w odniesieniu do czasu podróży*	
Domencich [53]	Boston	−0,82 (pracujący); −1,02 (zakupy)	
SACTRA [204]	Synteza wyników badań w szerszej skali w Wielkiej Brytanii	−0,5 ÷ −1,0	
Dowling [55]		−0,0 ÷ −1,0	
Goodwin [73]		−0,28 ÷ −0,57	
		Stopa elastyczności popytu dla pracy przewozowej (pojazdomile)	
		Efekt krótkoterminowy	Efekt długoterminowy
Goodwin [73]		–	1,0
Hansen i Huang [90]	California Metro Areas	0,43 ÷ 0,91	0,94
Noland i Cowart [160]	California Metro Areas	0,28	0,81 ÷ 1,02
Fulton i in. [64]	Mid-Atlantic Counties	0,13 ÷ 0,43	0,47 ÷ 0,81
Noland [161]	Badania dla 50 stanów	0,23 ÷ 0,51	0,71 ÷ 1,16
Rodier i. in. [179]	Sacramento, Kalifornia	0,4 ÷ 0,8	0,6 ÷ 1,1
Cervero, Hansen [34]	34 miasta w Kalifornii	0,33	0,59
Gonzalez [72]	16 regionów w Hiszpanii	0,11 ÷ 0,17	0,26 ÷ 0,31

\* Stopa elastyczności przyjmuje ujemną wartość, ponieważ zwiększenie czasu podróży redukuje popyt.

Przedstawione wskaźniki są wynikiem badań empirycznych, prowadzonych w związku z rozbudową/modernizacją infrastruktury transportowej, a podróże wzbudzone są efektem zwiększenia przepustowości w obszarze wpływu inwestycji. Duży rozrzut wartości stopy elastyczności może być efektem ram czasowych inwestycji: wyróżniony jest **efekt krótkoterminowy** i **długoterminowy** – reakcja użytkowników początkowo odnosi się tylko do zmian w podziale zadań przewozowych i rozkładzie ruchu na sieć drogową. Dopiero po jakimś czasie następuje zmiana zachowań transportowych związana np. z realokacją źródeł i celów podróży (wynikających ze zmiany miejsca zamieszkania lub miejsca pracy lub zmian w za-



gospodarowaniu przestrzennym). Drugim czynnikiem wpływającym na rozrzut wartości stopy elastyczności jest charakter realizowanych podróży, np. dla ulic miejskich, przenoszących głównie ruch wewnętrzny, wskaźnik elastyczności będzie miał niższą wartość, w porównaniu do dróg, na których odbywają się głównie podróże o charakterze regionalnym czy krajowym.

Najważniejszy zestaw danych pochodził z Texas Transportation Institute i został zebrany przez Schranka i Lomaxa [194], a szacował on poziom zatłoczenia transportowego w 85 obszarach aglomeracyjnych od roku 1982. Stosując model symulacyjny (dla pełnej bazy zmiennych objaśniających), ustalono wartość wskaźnika elastyczności popytu na poziomie 0,023 – dla efektów krótkoterminowego, do 0,082 – dla efektu długoterminowego. Są to wartości znacznie niższe w porównaniu do wyników innych autorów (patrz tabela 2.1). Hymel tłumaczy to faktem znacznie większej liczby zmiennych w modelu oraz wyraźnie dłuższym horyzontem prowadzonych analiz (od roku 1982). Wykazał również zaskakujący efekt relatywnie słabego wpływu poziomu zatłoczenia na wielkość ruchu wzbudzonego. Zaznaczył jednocześnie, że może to być spowodowane wysokim stopniem agregacji danych.

W warunkach krajowych badania elastyczności popytu prowadzone były przez Maj-Łabuz [148], gdzie dla wybranej linii autobusowej w Krakowie weryfikowano wpływ częstotliwości i pojemności taboru na wzrost liczby pasażerów. Wyniki wskazywały, że wzrost częstotliwości kursowania z 3 poj/h do 4 poj/h skutkuje wzrostem potoku o 10%. Nie badano jednak, jaka część dodatkowych podróży stanowi ruch wzbudzony, a jaka wynika ze zmiany środka transportu lub przejścia z innej linii. Ważnym aspektem wpływającym na dodatkowe podróże jest czas podróży. Rudnicki [186] podaje, że w Poznaniu, po oddaniu linii szybkiego tramwaju, wzrost potoku pasażerskiego na obsługiwanej relacji został oszacowany na 7-8%. Podobne wartości można zaobserwować przy okazji innych inwestycji, np. w Londynie oddanie linii autobusowej prowadzonej po wydzielonym pasie (a więc niewrażliwej na warunki ruchu drogowego) zwiększyło potok o 10% (APAS [5]).

W wielu przypadkach wartości stopy elastyczności popytu są szacowane w odniesieniu do wzrostu przepustowości sieci transportowej. DeCorla-Souza i in. [46] zauważa, że zwiększenie przepustowości odcinka autostrady, dla której stopień nasycenia był daleki od osiągnięcia przepustowości, nie wykaże dodatkowych podróży o charakterze ruchu wzbudzonego.

Rodier i in. [179] przeprowadzili szczegółowe analizy ruchu wzbudzonego bazując na wskaźnikach elastyczności popytu zastosowanych do prowadzenia analiz symulacyjnych obszaru Sacramento modelowanej narzędziem MEPLAN (Hunt i in. [107]). Analizie poddane zostały różne scenariusze rozwoju obszaru począwszy od zmian w infrastrukturze transportowej, a skończywszy na zmianach w zagospodarowaniu przestrzennym. Całość analiz była ukierunkowana na parametryzację wpływu ruchu wzbudzonego na pracę układu transportowego przez określenie zmian w pracy przewozowej dla trzech scenariuszy obliczeniowych:



- stan bez zmian w sieci i zagospodarowaniu przestrzennym,
- rozbudowie układu drogowego o dwa korytarze (o łącznej długości 63 mil) lecz bez zmian w zagospodarowaniu przestrzennym,
- pełny scenariusz uwzględniający nowe drogi oraz przewidywany kierunek zmian w demografii, miejscach pracy.

Należy wspomnieć o istotnych z punktu widzenia analiz ruchu wzbudzonego badaniach wrażliwości modelu. Model MEPLAN bazuje na klasycznym ujęciu czterostadiowym i autorzy wyznaczyli udział ruchu wzbudzonego, testując model przez uwzględnienie pełnego ujęcia czterostadiowego ze sprzężeniem zwrotnym odnoszącym się do kosztu uogólnionego podróży (wpływało to na wielkość generowanych podróży). W tabeli 2.2 przedstawiono wyznaczone wartości zmian pracy przewozowej w zależności od poziomu szczegółowości symulacji.

Tabela 2.2

Zmiany w pracy przewozowej (wyrażonej w pojazdomilach, VMT) dla przeprowadzonej analizy wrażliwości gdzie punktem odniesienia jest stan istniejący (Rodier i in. [179])

Komponenty modelu uwzględnione w obliczeniach	Efekt krótkoterminowy	Efekt długoterminowy
Ilościowe zmiany w zagospodarowaniu przestrzennym Rozmieszczenie ludności i miejsc pracy Rozkład przestrzenny Podział zadań przewozowych Rozkład ruchu w sieci	<b>13%</b>	<b>18%</b>
Rozmieszczenie ludności i miejsc pracy Rozkład przestrzenny Podział zadań przewozowych Rozkład ruchu w sieci	<b>11%</b>	<b>17%</b>
Rozkład przestrzenny Podział zadań przewozowych Rozkład ruchu w sieci	<b>6%</b>	<b>10%</b>
Podział zadań przewozowych Rozkład ruchu w sieci	<b>0%</b>	<b>-1%</b>

Przedstawione analizy wyraźnie podkreślają rolę zmian w zagospodarowaniu przestrzennym i konieczność ich uwzględnienia w całym procesie modelowania podróży z powodu możliwości uwzględnienia ruchu wzbudzonego i jego wpływu na warunki ruchu w związku z pojawieniem się nowych inwestycji. Uproszczone analizy pomijają ten aspekt i prowadzą do błędnych wniosków związanych z efektywnością funkcjonalną zamierzeń inwestycyjnych.

Do podobnych wniosków doszedł Cervero [36], który analizował wpływ tych zmian na liczbę podróży na przykładzie wybranych inwestycji w Stanach Zjednoczonych. Wyniki przedstawiał w formie stopy elastyczności popytu, wskazując na

jego znaczenie dla podróży transportem zbiorowym i indywidualnym (tabela 2.3). W badaniach Cervero poddał analizie wpływ charakteru inwestycji na wielkość generowanych podróży w dojazdach do pracy na przykładzie 57 dużych podmiejskich centrów biurowych. W badaniach skupił się na dwóch elementach: obecności innych niż biura obiektów (np. handel) w analizowanej lokalizacji oraz zwiększeniu liczby miejsc parkingowych.

Tabela 2.3

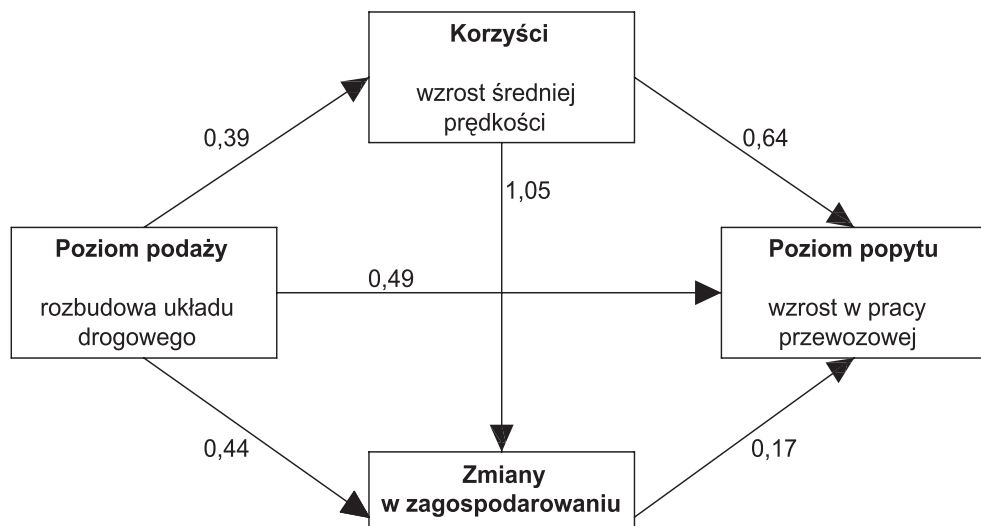
Stopy elastyczności popytu na podróż do pracy w zależności od sposobu zagospodarowania przestrzennego [36]

Badania prowadzone w: Bellevue, Orange County, Dallas, Atlanta, Fairfax County, Minneapolis			
Czynnik wpływu	Transport zbiorowy	Transport indywidualny	Liczba podróży zmotoryzowanych/pracującego
Zróżnicowane zagospodarowanie przestrzenne	-0,02	0,27	-0,06
Dostępność parkingów	0,07	-0,10	0,20

Badania wykazały, że największy wpływ na liczbę podróży mają nie dodatkowe, zróżnicowane pod względem przeznaczenia obiekty, a swoboda w wyborze miejsca do parkowania (dodatkowe parkingi). Na tej podstawie w sposób jednoznaczny wykazał, że polityka parkingowa w Stanach Zjednoczonych ma daleko bardziej znaczący wpływ na zmiany w zachowaniach transportowych niż różnorodność w zagospodarowaniu przestrzennym.

Cervero [35] dostrzegł, że wcześniejsze analizy bazujące na stopach elastyczności pomijają kwestie prędkości w sieci (np. De Corla-Souza, Cohen [46], Noland, Cowart [160], Cervero, Hansen [34]). Zaproponował własne podejście wykorzystujące prędkość w sieci jako pochodną warunków zatłoczenia drogowego. W tym celu opracował układ równań logarytmiczno-linowych uwzględniających szereg zmiennych, takich jak: długość sieci drogowej, pracę przewozową, dochód mieszkańców, zagospodarowanie przestrzenne w korytarzu wzdłuż uwzględnionych dróg oraz średnią wartość prędkości na obszarze analizy. Sam proces kalibracji parametrów równania był podobny jak u innych autorów – została wybrana metoda najmniejszych kwadratów, a dane wejściowe obejmowały pomiary rejestrowane w latach 1980–1994 w stanie Kalifornia. Podejście, podobnie jak pozostałe ujęcia badawcze, nie jest w stanie odseparować właściwego ruchu o charakterze wzbudzonego od podróży przejętych przez dany środek transportu lub podróży wynikających ze zmiany trasy przejazdu. Analizując stopy elastyczności popytu, zastosowano model ścieżkowy, uwzględniający nie tylko zmiany w pracy przewozowej wyrażonej w pojazdomilach, ale również korzyści wynikające ze wzrostu średniej prędkości podróży oraz

zmian w zagospodarowaniu przestrzennym. Najważniejszym wynikiem było jednak powiązanie tych zmiennych między sobą, co pokazuje, jakie efekty może przynieść rozbudowa układu drogowego w każdym z tych elementów. Na rysunku 2.3 przedstawiono wyniki analiz w postaci schematu blokowego:



Rys. 2.3. Wyniki analiz dla modelu ścieżkowego wskazujący na spodziewane wartości stopy elastyczności popytu, uzależnione od relacji występujących między poszczególnymi zmiennymi (wg [35])

Schemat przedstawia związek (opisany stopą elastyczności popytu) między różnymi elementami systemu transportowego poddanymi analizie. Przedstawione zależności mają charakter długoterminowych efektów i przyjmują dość duże wartości, np. 10 % wzrost prędkości generuje wzrost pracy przewozowej w pojazdomilach o 6,4%. Przedstawione wyniki pozwalają odseparować wpływ różnych czynników na zmiany w pracy przewozowej.

Cheung i in. [39] przedstawili analizę niepewności modeli symulacyjnych w ocenie projektów infrastrukturalnych. Jako przykład posłużyła analiza dwóch korytarzy drogowych w Sao Paulo, dla których przeprowadzono analizę w oparciu o niepewność Bayesiana. Badania modelu prowadzono dla dwóch scenariuszy: dla stałego popytu i dla popytu elastycznego. W tym drugim ujęciu dodatkowe podróże były generowane jako efekt zastosowania stałej popytu korygującej wielkość potencjałów ruchotwórczych w związku ze zmianą wartości kosztu uogólnionego podróży. Autorzy dysponowali szczegółowymi pomiarami natężenia ruchu, które wykorzystali do korekty potencjałów. Zdaniem autorów uwzględnienie w analizach podejścia bazującego na elastycznej wartości popytu uzyskuje się wyższe wartości niepewności modelu w porównaniu do modelu ze stałym popytem (dotyczy to zwłaszcza odcinka

drogi na której wprowadzono opłatę za przejazd). Wynika z tego fakt, iż wartość kosztu uogólnionego podróży jest bardziej wrażliwa na szacowanie wartości czasu pasażera dla analiz ze zmiennym popytem niż w przypadku klasycznego ujęcia, nieuwzględniającego ruchu wzbudzonego.

## **2.6. Badania nad zjawiskiem podróży wzbudzonych i tłumionych w oparciu o badania ankietowe**

Badania nad ruchem wzbudzonym są szeroko analizowane w warunkach zagranicznych. Oum [166], Cerwenka [37], Cairns i in. [30], de Corla-Souza i in. [46], Lee i in. [137], Noland i in. [160], Noland R. [161], Cervero, Hansen [34] oraz Fröhlich [63] przedstawiają szerokie analizy modeli szacujących efekt zwiększenia podaży przez rozbudowę sieci drogowej. Wspomniane przykłady traktują ruch wzbudzony jako klasyczny przykład reakcji popytu na usługi transportowe przez zwiększenie przepustowości układu drogowego. Analogiczne badania prowadzone w Szwajcarii przez Aliescha i in. [3], Giacomazzi i in. [70], Güller i in. [79], Sommer i in. [201] przedstawiają wyniki badań nad zjawiskiem podróży wzbudzonych jako następstwa zmian w systemie transportowym kwantyfikowanych przez zdefiniowaną funkcję dostępności transportowej. Analizy miały charakter badań *ex-post* i dotyczyły odpowiednio efektu oddania do użytku odcinka autostrady A7, uruchomienia połączenia kolei regionalnej w obszarze metropolitarnym Zurychu oraz oddania do eksploatacji tunelu kolejowego w prowincji Ticino. Wspomniane analizy miały jednak bardzo ogólny charakter i, jak większość badań typu *ex-post*, wymagają uwzględniania wyników empirycznych, które często są trudne do interpretowania z powodu braku możliwości odseparowania innych czynników zewnętrznych zaburzających pomiar. Autorzy wskazują na bardzo istotną rolę sposobu przeprowadzenia badań, gdzie szczegółowa ocena efektów ruchu wzbudzonego musiałaby być badana przed i po w odniesieniu do tych samych podróży realizowanych przez te same osoby w obu okresach badawczych.

Udział podróży wzbudzonych był badany przez Handy [87] w ramach badań ankietowych prowadzonych wśród mieszkańców Austin (Texas). Pytania dotyczyły ostatnich podróży pieszych w celach fakultatywnych (zakupy, rekreacja) oraz pytano, czy z tych podróży zrezygnowano by, gdyby nie było możliwości dojścia pieszo. Wyniki wskazują, że ponad 67% wybrałoby samochód osobowy jako środek transportu, ok. 20% przesunęłoby podróż na inny termin, a pozostali (ok. 13%) zrezygnowaliby z realizowania tej podróży. Handy interpretował te wyniki w taki sposób, że sama możliwość podróżowania (w tym przypadku przejście piesze) ma znaczący wpływ na generowanie podróży.

Bonsall [25] podjął próbę usystematyzowania pomiarów i badań dotyczących zjawiska ruchu wzbudzonego, traktowanego jako konsekwencja pojawienia się podróży wzbudzonych, dostrzegając różne czynniki wpływu, które muszą być odseparowane, aby możliwe było wyznaczenie całkowitego wzrostu ruchu na odcinku. Według Bonsalla [25] należy zidentyfikować pięć składowych (opisanych równaniem 20) uzasadniających dodatkowy ruch pojawiający się po wdrożeniu inwestycji infrastrukturalnej:

$$E^{lm} = R^{lm} + T^{lm} + M^{lm} + D^{lm} + F^{lm} \quad (20)$$

gdzie:

- $E^{lm}$  – dodatkowy ruch na usprawnionym odcinku  $l$  (np. po modernizacji), w czasie  $t$ , dla środka transportu  $m$ ,
- $R^{lm}$  – wielkość ruchu danym środkiem transportu  $m$ , przejętego przez odcinek  $l$  w czasie  $t$ ,
- $T^{lm}$  – wielkość ruchu danym środkiem transportu  $m$ , przejętego przez odcinek  $l$  w czasie  $t$ , z innego okresu czasu (wcześniejszego lub późniejszego),
- $M^{lm}$  – wielkość ruchu na odcinku  $l$ , który był przejęty z innych środków transportu w czasie  $t$ ,
- $D^{lm}$  – wielkość ruchu danym środkiem transportu  $m$  w czasie  $t$ , wynikająca z realokacji celów podróży, a które to relacje wcześniej nie obciążały odcinka  $l$ ,
- $F^{lm}$  – wielkość ruchu wzbudzonego na odcinku  $l$  (np. po modernizacji), w czasie  $t$ , dla środka transportu  $m$ .

Badania nad wielkością ruchu wzbudzonego powinny być prowadzone w dwóch etapach: przed procesem wdrożenia planowanych zmian oraz po ich wdrożeniu, przy założeniu, że użytkownicy zdążą się „oswoić” z nowym sposobem realizowania podróży. Dla części podróży zmiany te mogą ujawnić się relatywnie szybko (dotyczy to zwłaszcza podróży fakultatywnych), a dla niektórych efekty mogą być dostrzegane dopiero po wielu latach (np. w wyniku zmian miejsca pracy, czy zmiany w zagospodarowaniu przestrzennym). Jako podstawowe narzędzia Bonsall wskazuje badania kordonowe (zapis tablic rejestracyjnych), badania ankietowe w formie wywiadów bezpośrednich oraz pomiary natężenia ruchu w obszarze wpływu inwestycji. Wskazuje, że prawidłowo przeprowadzone badania pozwalają osiągnąć błąd oszacowania  $\pm 4\%$  dla poziomu ufności 0,95.

Analizując opracowane prognozy potoków pasażerskich dla nowych linii kolei aglomeracyjnej, Scherer [192] wskazała na niespójne procedury sporządzania prognoz i ich wpływ na uzyskane wyniki. Przykłady prognozowanych potoków pasażerskich dla wybranych linii wykazywały niedoszacowanie wynikające między innymi z nieuwzględnienia wielkości ruchu wzbudzonego.

Ruch wzbudzony jest definiowany przez Weisa [235] jako zjawisko związane z dodatkowym popytem wynikającym bezpośrednio z poprawy warunków podróży. Autor wskazuje na celowość ujęcia w takich analizach kosztu uogólnionego podróży stanowiącego sumę kosztów ważoną wielkością ryzyka i komfortu, wyrażoną w wartościach monetarnych. Ponieważ zestaw danych niezbędnych do prowadzenia analiz ruchu wzbudzonego jest bardzo duży i wymaga dostępu do rozbudowanej bazy danych, Weis zdecydował się na zastosowanie pseudo panelowych danych jako sposobu uzupełnienia brakujących informacji. Dane pseudopanelowe (ang. *pseudo panel data*) zostały zaproponowane w połowie lat 80. przez Deatona [46], polegają na tym, że dostępna baza danych jest grupowana w tzw. kohorty, dla których wyznaczona wartość średnia jest traktowana jako pojedyncza obserwacja. Dane te są wykorzystywane w przypadku braku informacji, do aproksymowania danych o wirtualnych użytkownikach systemu. Drugim założeniem jest zastosowanie pojęcia dostępności transportowej wg Ben-Akiwy i in. [17], definiowanej jako związek między liczbą ludności w obszarze analizy (np. w rejonie transportowym) a czasem podróży do pozostałych jednostek (rejonów). Jest on definiowany równaniem:

$$A_{i,j} = \left| \ln \left[ \sum_{j=1}^n X_i \cdot f(c_{ij}) \right] \right| \quad (21)$$

gdzie:

- $A_i$  – miara dostępności transportowej [min],
- $X_i$  – liczba mieszkańców w rejonie transportowym  $i$ ,
- $f(c_{ij})$  – funkcja czasu podróży między rejonami transportowymi  $i$  oraz  $j$ .

Zwiększająca się dostępność jest utożsamiana ze zmniejszającą się wartością kosztu uogólnionego podróży i jest traktowana jako wskaźnik weryfikujący hipotezę, że zachowania transportowe reagują na zmiany w uogólnionym koszcie podróży, co zostało wykazane przez autora na poziomie agregowanych danych (zgodnie z teorią danych pseudopanelowych).

W raporcie opracowanym przez SACTRA [204] wskazuje się na jakość sporządzanych prognoz ruchu dla inwestycji drogowych. Zauważono, że dla wielu projektów badanych po ich wdrożeniu, prognozy wskazywały na znacznie niższe wartości natężenia ruchu niż w stanie faktycznym (przeciętnie natężenie ruchu jest większe o ok. 10% od wartości prognozowanych). Rodier, Johnston [180] poddał analizie błędy pojawiające się w różnych prognozach danych objaśniających do modeli symulacyjnych (dotyczy to danych socjoekonomicznych) oraz ich wpływu na wielkość prognozowanego ruchu. Analizy dotyczyły obszaru Sacramento w Stanach Zjednoczonych, dla którego dostępna była szeroka baza danych wejściowych oraz właściwy model symulacyjny MEPLAN [107]. Wyniki badań dowiodły, że ewentualne błędy w dochodzie przypadającym na gospodarstwo domowe lub błędnie osza-

cowane zmiany w cenach paliw nie mają większego wpływu na prognozy ruchu (Rodier, Johnston [180]). Jednakże istotny wpływ mają błędnie oszacowane zmiany w liczbie mieszkańców oraz wzrost liczby miejsc pracy. Na tej podstawie można przyjąć założenie, że błędne wartości prognoz wskazane przez SACTRA pochodzą właśnie z tego typu nieścisłości, co podważa tezę o rozdzielnosci ruchu wzbudzonego i precyzji zmian demograficznych.

Analizy dotyczące ruchu wzbudzonego dotyczą nie tylko podróży generowanych w związku z nowymi inwestycjami w infrastrukturę transportową, ale również z powodu zmian w charakterze zagospodarowania przestrzennego. Sperry i in. [202] skupili się na analizie wpływu zróżnicowanego zagospodarowania przestrzennego na wielkość ruchu wzbudzonego. Zróżnicowane zagospodarowanie przestrzenne jest tam rozumiane jako mieszany charakter obszaru zapewniający zaspokojenie potrzeb mieszkańców w jednym miejscu, tj. poza obszarami mieszkaniowymi pojawiają się obiekty handlowe, usługowe, miejsca pracy itp. W Stanach Zjednoczonych jest to relatywnie nowe zjawisko urbanistyczne, prowadzące do redukcji potrzeb transportowych przez wyraźne skrócenie długości podróży, co pozwala na zwiększenie udziału podróży pieszych czy rowerowych. Prowadzi to jednak do zwiększenia liczby podróży powodowanej obniżeniem kosztu uogólnionego. Zgodnie z charakterem ruchu wzbudzonego usystematyzowanym przez Cervero [35], wzbudzone podróże odnoszą się do redystrybucji celów i związanych z tym mniejszych odległości oraz do tworzenia nowych, wcześniej nie występujących podróży. Taka systematyka umożliwia traktowanie ruchu wzbudzonego jako funkcji kosztu uogólnionego i jak wykazał Crane [44], który opracował koncepcję kwantyfikowania ruchu wzbudzonego dla obszarów o mieszanym charakterze zagospodarowania przestrzennego, zastosowanie podejścia maksymalizacji funkcji użyteczności pozwoliło na powiązanie trzech elementów projektowych (ramowy układ drogowy, elementy uspokojenia ruchu oraz mieszany charakter zagospodarowania przestrzennego) z odpowiednimi miarami transportowymi (liczbę podróży samochodem osobowym, pracę przewozową oraz podział zadań przewozowych). Crane wykazał, że jedynym elementem przyczyniającym się do zmniejszenia liczby podróży jest zastosowanie narzędzi uspokojenia ruchu, natomiast pozostałe elementy (oraz ich kombinacje) mogą zarówno zmniejszyć, jak i zwiększyć liczbę podróży – stoi to w opozycji do powszechnego przekonania, że zmiana ta ma wyłącznie charakter jednostronny, tj. zmniejszenie potrzeb przewozowych.

Badania nad ruchem wzbudzonym są bardzo utrudnione przez brak właściwych danych oraz niemożliwość odseparowania mierzalnych efektów, np. wzrost natężenia ruchu na przekroju drogowym może wynikać z większej liczby podróży, ale również z innych powodów (zmiana środka transportu, zmiana trasy itp.). Bonsall [25] wskazuje na efektywność badań ankietowych ukierunkowanych na kwantyfikowanie ruchu wzbudzonego. Badania takie powinny być prowadzone przed wdrożeniem danej inwestycji oraz po jej oddaniu do użytku, gdy układ transportowy ustabilizuje sytuację ruchową. To, kiedy nastąpi stabilizacja, wynika z cechy, którą bierzemy pod



uwagę: zmiana trasy przez użytkowników następuje bardzo szybko, natomiast zmiany w wyborze celów podróży (zwłaszcza w motywacjach nieobligatoryjnych) jest procesem długotrwałym. Bonsall wskazuje również na wpływ warunków pogodowych, pory roku oraz innych zewnętrznych czynników decydujących o udzielonych odpowiedziach i mających wpływ na końcowe wyniki analiz. Jeżeli weźmiemy prostą sieć i dodamy do niej nowy odcinek, to analiza podróży ukierunkowana na ustalenie poziomu ruchu wzbudzonego powinna uwzględniać następujące etapy oceny:

1. Dowód *prima facie* w postaci większego natężenia ruchu na nowym i starym odcinku;
2. Zmiany w czasie podróży – efekt ten jest dostrzegalny zwłaszcza w przypadku, gdy przed inwestycją warunki ruchu cechowały się wysokim poziomem zatłoczenia;
3. Zmiany w wyborze trasy przejazdu – bez narzędzia symulacyjnego bardzo trudne do oszacowania. Wymagane wtedy jest przeprowadzenie pomiarów natężenia ruchu na alternatywnych ciągach (np. badanie ekranowe czy kordonowe) i wyznaczeni pracy przewozowej w pojazdokilometrach dla wariantu z i bez inwestycji;
4. Zmiana środka transportu – wymaga prowadzenia pomiarów zarówno w pojazdach transportu zbiorowego jak i indywidualnego;
5. Zmiany w celu podróży lub częstotliwości jej realizowania – najtrudniejszy etap analizy. Zmiany te mogą nie być widoczne po przeprowadzeniu pomiarów natężenia ruchu, ponieważ na części odcinków natężenie może się zmniejszyć wskutek rezygnacji części użytkowników z danej lokalizacji (np. supermarketu), ale brakująca liczba samochodów może zostać natychmiast „uzupełniona” przez innych kierowców jadących do innego celu. W efekcie możemy uzyskać prawie takie same wyniki pomiarów, ale dla krótszych podróży i większej ich liczbie.

Stąd bardzo ważną rolę pełnią badania ankietowe relacji źródło–cel prowadzone przed i po wdrożeniu inwestycji. Wyniki wywiadów prowadzone pośród użytkowników systemu mogą jednak zwierać liczne błędy wynikające z niezrozumienia problematyki przez kierowców czy niechęć w udzielaniu odpowiedzi. Stąd Bonsall proponuje prowadzenie badań uzupełniających w postaci zapisu numerów tablic rejestracyjnych na przyjętym kordonie badawczym. Same wywiady powinny stanowić podstawę do korekty więźb ruchu uwzględniających motywacje podróży oraz, o ile to możliwe, różną porę dnia (np. szczyt poranny lub popołudniowy). W przypadku liczebności próby Bonsall sugeruje, że do szacowania udziału ruchu wzbudzonego, w wyjątkowych przypadkach można przyjąć większą wartość błędu oszacowania – nawet do 10% oraz obniżyć poziom ufności do  $1 - \alpha = 0,90$ . Nawet przy takich „luźnych” założeniach wyniki prowadzonych analiz będą wskazywały kierunek zmian i w świetle wysokiej złożoności zjawiska ruchu wzbudzonego jest to dopuszczalne. Jednocześnie podkreśla, że badania nad tym zjawiskiem muszą być kosztowne i gdy

chcemy osiągnąć wyniki wysokiej jakości, zaleca nie przekraczać błędu 4% przy ufności  $1 - \alpha = 0,95$ .

Badania nad zjawiskiem ruchu wzbudzonego były również prowadzone w Holandii, przy okazji otwarcia części obwodnicy Amsterdamu (Kroes i in. [127]). Zespół badawczy dokonał szczegółowej analizy wpływu oddania do użytku fragmentu obwodnicy Amsterdamu, stosując pomiary natężenia ruchu przed i po oddaniu inwestycji oraz przeprowadzając badania ankietowe mieszkańców korzystających z tego odcinka drogi. Badania miały charakter wywiadów telefonicznych i były prowadzone w obu etapach u tych samych osób (liczebność próby to 5000 wywiadów). Pytania dotyczyły źródła i celu podróży, wybranej trasy przejazdu, środka transportu, częstotliwości wykonywania podróży oraz czasu wyjazdu. Bardzo interesujące spostrzeżenia dotyczyły przesunięcia godziny szczytu porannego i popołudniowego. O 8% spadła liczba podróży do pracy realizowanych przed godziną 7, a między 7–9 wzrosła o 16% (jest to efekt dostrzeżony również przez Antoniss'a i in [4]). Gdy uwzględni się wszystkie motywacje, ponad 31% respondentów wskazało na zmianę godziny wyjazdu. Podobnie wysoka wartość charakteryzowała osoby, które zmieniły trasę przejazdu – było to, w zależności od kierunku, od 26% do 34% wskazań. Mierzalnym efektem było wyznaczenie łącznego czasu jazdy wszystkich pojazdów, związanego z tą inwestycją – tu zmiana w pojgodz/dobę była bardzo duża: z 6200 pojgodz/dobę do 3800 pojgodz/dobę (wartość dotyczyła bezpośredniego obszaru wpływu inwestycji). W odniesieniu do zmiany w podziale zadań przewozowych, osiągnięte wartości były bardzo niskie – jedynie 5%, lecz dotyczyło to kierunku zmiany z transportu zbiorowego do samochodu. Wartość ta dotyczy wszystkich motywacji. Dla motywacji związanej z pracą było to 1% więcej na rzecz samochodu, ale uznano tę wartość za pomijalnie małą (porównując to do osiągniętego błędu oszacowania). Wzrost liczby podróży wynosił 3% i nie uznano go za znaczący w odniesieniu do nowej przepustowości układu. Poza ankietami przeprowadzono szczegółowe badania natężenia ruchu drogowego, na podstawie których wykazano, że sumaryczny potok na kordonie wzrósł o 4,5% (porównując stan przed i po oddaniu inwestycji), co jest w zgodzie z wynikami ankiet.

## **2.7. Wnioski do badań własnych wynikające z przeglądu dostępnej literatury**

Badania nad zjawiskiem ruchu wzbudzonego i tłumionego nie były prowadzone w warunkach krajowych, natomiast w Europie (np. Gonzalez, Marrero [72], Hills [101], Coombe [43], Kores [127]), Chinach (Zao, He [242]) czy Stanach Zjednoczonych (np. Nicholson [159], Cervero, Hansen [34], Noland [160]) były wielokrotnie powtarzane i analizowane. Prowadzone badania wskazują na wyraźne trudności jednoznacznej definicji, czym jest podróż wzbudzona oraz jak można separować te

podróże od innych, wynikających np. ze zmiany środka transportu czy przesiadki z innej linii transportu zbiorowego. Kwestie separowalności wpływów, w procesie wyznaczania podróży wzbudzonych, są podstawowym problemem, ponieważ w złożonych systemach transportowych bardzo trudno jest jednoznacznie stwierdzić, jaki jest charakter podróży na nowej inwestycji transportowej. Podkreśla się tutaj rolę modeli symulacyjnych, pozwalających na uwzględnienie separowalności wpływów w prowadzonych analizach.

W przedstawionym przeglądzie literatury widać wyraźnie, że podstawowym narzędziem oceny wielkości ruchu wzbudzonego są badania *ex-post*, polegające na wskazaniu wzrostu lub spadku liczby podróży po wprowadzeniu danej inwestycji. Jest to oczywiście najdokładniejszy sposób oceny inwestycji, lecz niestety nie nadaje się do prac projektowych, gdzie już na etapie inwestycyjnym konieczne jest wyznaczenie faktycznego wpływu danej inwestycji na liczbę podróży.

Zdecydowana większość autorów zajmuje się transportem indywidualnym, co jest zrozumiałe w warunkach amerykańskich, lecz w Europie należałoby się spodziewać większej ilości badań dotyczących transportu zbiorowego. Możliwe, że są one prowadzone, lecz publikacje dotyczą tylko danego kraju (i języka), co powoduje utrudniony dostęp do takiej wiedzy.

Prowadzone analizy w zdecydowanej większości wyznaczają zmiany w pracy przewozowej, będące następstwem zmian w sieci. Nieliczni autorzy dostrzegają jednak możliwość powiązania wielkości popytu z dostępnością transportową wyrażającą stopień powiązania danego obszaru z innymi. Podejmowany jest również wątek badań ankietowych, które mogą stanowić narzędzie wspomagające zastosowanie modeli symulacyjnych i pozwalające na znalezienie odpowiedzi na pytanie dotyczące rzeczywistych podróży wzbudzonych i tłumionych. Bardzo ważną rolę w analizach pełni stopa elastyczności popytu transportowego, lecz wydaje się, że nie jest ona w stanie określić, jaka część dodatkowych podróży będzie stanowiła podróże o charakterze wzbudzonym. Stopa elastyczności popytu pokazuje spodziewany wzrost liczby podróży, uwzględniając jednocześnie podróże wzbudzone oraz przeniesione (z innego środka transportu oraz z innej, konkurencyjnej trasy). Wskaźnik ten jest często wyznaczany jako efekt końcowy inwestycji, co oznacza, że badania są prowadzone po oddaniu jej do eksploatacji. Takie podejście uniemożliwia stworzenie modeli, które można zastosować do nowych inwestycji, będących jeszcze w fazie planowania. Stąd potrzeba opracowania modelu pozwalającego na oszacowanie liczby podróży wzbudzonych dla nowych inwestycji w infrastrukturę transportową.

W warunkach krajowych, przy powszechnym zastosowaniu modeli czterostadiowych (w warstwie popytu niewrażliwych na zmiany czasu podróży), prognozowanie podróży wzbudzonych lub tłumionych bardzo często prowadzone jest na zasadzie szacowania eksperckiego, bazującego na doświadczeniach zachodnioeuropejskich. Jest to działanie obciążone bardzo wysokim błędem i ryzykiem przeszacowania/nie-

doszacowania rzeczywistych efektów wdrożenia danej inwestycji do użytku. Bardzo ważną przesłanką jest również dostęp do wyników badań podróży (prowadzonych w ramach badań ruchliwości), stanowiących podstawowe źródło danych w procesie prognozowania podróży wzbudzonych.

W ramach prac badawczych proponuje się wykorzystanie narzędzi symulacyjnych, wyników badań ankietowych i pomiarów natężenia ruchu prowadzonych przed i po oddaniu danej inwestycji do opracowania narzędzia prognozującego podróże wzbudzone.

### **3. BADANIA WŁASNE NAD ZJAWISKIEM PODRÓŻY WZBUDZONYCH I TŁUMIONYCH**

#### **3.1. Ogólna charakterystyka przeprowadzonych badań własnych**

Przypisanie danej podróży do grupy podróży wzbudzonych czy odrzuconych (np. z powodu trudnych warunków ruchu) wymaga jednoznacznej deklaracji kierowcy czy pasażera. Sama obserwacja zmian w potokach pasażerskich czy natężeniu ruchu jest niewystarczająca, ponieważ brakuje dostatecznych informacji, z jakiego powodu te zmiany nastąpiły. Oddanie inwestycji infrastrukturalnej do użytku najczęściej wiąże się z nadzieją, że przyczyni się ona do rozwiązania trudności transportowych w bezpośrednim jej sąsiedztwie. Panuje bowiem powszechne przekonanie, że jednym z najskuteczniejszych rozwiązań problemu zatłoczenia transportowego w obszarach zurbanizowanych jest przebudowa elementów układu drogowego. Badania dotyczące ruchu wzbudzonego powinny być ukierunkowane na identyfikację zjawiska oraz jego charakterystykę. Łączny wzrost natężenia ruchu drogowego w układzie miejskim po oddaniu transportowej inwestycji infrastrukturalnej do użytku może być tłumaczony na wiele sposobów i nie ma możliwości, aby jednoznacznie stwierdzić, jaka część z tych dodatkowych podróży generuje ruch wzbudzony.

W prowadzonych badaniach własnych skupiono się na analizie ruchu wzbudzonego i tłumionego przez działania dwutorowe – pomiar natężenia ruchu drogowego oraz natężenia potoków pasażerskich dla wybranych inwestycji transportowych. Jako poligon badawczy wybrano inwestycje transportowe (przebudowa dużego węzła drogowego, budowa linii tramwajowej, budowa pasów autobusowych, uruchomienie aglomeracyjnej linii kolejowej). Prowadzone pomiary miały na celu zebranie bazy danych niezbędnych do kalibracji i weryfikacji uzyskanych zależności i modeli.

Ważnym elementem prowadzonych badań własnych jest przeprowadzenie badań ankietowych pośród użytkowników systemu transportowego. Badania te pozwoliły na wyznaczenie udziału spodziewanych podróży wzbudzonych i tłumionych (w zależności od badanej inwestycji) oraz kwantyfikowały wybrane parametry budowanych modeli.

### **3.2. Badania podróży wzbudzonych i tłumionych wynikających z etapów przebudowy Ronda Ofiar Katynia w Krakowie**

Do analiz ruchu wzbudzonego i tłumionego wybrano dużą inwestycję drogową prowadzoną w Krakowie – jest to przebudowa dużego węzła ulicznego (Rondo Ofiar Katynia), położonego w północno-zachodniej części Krakowa i stanowiącego istotny element układu drogowego miasta. Węzeł ten jest wykorzystywany w podróżach o charakterze źródłowym, docelowym, wewnętrznym i tranzytowym. Celem badań była analiza obciążenia ruchem układu ulicznego będącego pod wpływem pojawiających się ograniczeń w ruchu na przebudowywanym rondzie oraz po oddaniu gotowej inwestycji do eksploatacji.

Rondo Ofiar Katynia stanowi węzeł w którym krzyżują się droga krajowa nr 94 z kierunku Olkusza i droga krajowa nr 79 z kierunku Zabierzowa (również z kierunku autostrady A4). Przed przebudową rondo było skrzyżowaniem z wyspą centralną (sterowane sygnalizacją świetlną, stałoczasową) i posiadało trzy pasy na wlotach (wyjątkiem jest tutaj wlot z kierunku Olkusza, gdzie były tylko dwa pasy ruchu). Na rondzie możliwa była realizacja wszystkich relacji skłonnych. Po przebudowie, rondo stanowi trzypoziomowy węzeł prowadzący bezkolizyjne relacje na kierunku wschód–zachód i północ–południe. Rozrząd relacji skłonnych jest prowadzony w poziomie zerowym, w formie skrzyżowania z wyspą centralną, sterowanego sygnalizacją świetlną.

Rondo stanowi istotny węzeł przesiadkowy dla pasażerów transportu zbiorowego, gdzie krzyżują się autobusowe linie miejskie i podmiejskie. Ponadto wokół ronda znajduje się dużo obiektów handlowych generujących ruch (Makro, Ikea). Przebudowa tak istotnego elementu układu drogowego miasta pociągnie za sobą duże utrudnienia w ruchu drogowym i w funkcjonowaniu transportu miejskiego. Z drugiej strony stanowi to bardzo wartościowy poligon badawczy odnoszący się do zmian w zachowaniach transportowych mieszkańców, do opisu których wykorzystano szeroko zakrojone badania ruchu prowadzone w ramach projektu badawczego realizowanego na zlecenie Zarządu Infrastruktury Komunalnej i Transportu w Krakowie (Szarata z zespołem [211]).

#### **Pomiary natężeń ruchu drogowego**

W związku z przebudową Ronda Ofiar Katynia zaproponowano przeprowadzenie pomiarów natężenia ruchu nie tylko na samym rondzie, ale przede wszystkim w jego sąsiedztwie, tworząc kordon pomiarowy. Pomiar został zaplanowany na ulicach, przez które przebiegają potencjalne trasy alternatywne w stosunku do przejazdu przez rondo Ofiar Katynia. Pomiarom objęto łącznie 18 punktów pomiarowych o lokalizacji pokazanej na rys. 3.1.





Rys. 3.1. Lokalizacja punktów pomiarowych w otoczeniu Ronda Ofiar Katynia w Krakowie [211]

Sposób przeprowadzenia pomiarów był zróżnicowany w poszczególnych punktach pomiarowych: na Rondzie Ofiar Katynia przeprowadzono pomiar 24-godzinny, natomiast w pozostałych punktach pomiar trwał od godz. 5.00 do 21.00. Pomiary przekrojowe natężenia ruchu zostały przeprowadzone w trzech seriach odpowiadających różnym etapom przebudowy Ronda:

1. Pomiar „zerowy”, przed wprowadzeniem utrudnień w ruchu;
2. Pomiar pośredni, po wprowadzeniu znacznych utrudnień w ruchu (wprowadzenie po jednym pasie ruchu na wlotach) z eliminacją relacji skrzyżnych w lewo. Relacje te mogły być dokonane na sąsiednich węzłach lub specjalnie do tego celu przygotowanych placach do zawracania;
3. Pomiar końcowy, po oddaniu węzła trzypoziomowego do eksploatacji.

Dzięki tak zaprojektowanemu programowi pomiarów natężenia ruchu, wspomagając się transportowym modelem symulacyjnym aglomeracji krakowskiej, można ocenić wpływ ograniczeń na Rondzie na warunki ruchu panujące w otaczającym



układzie ulicznym, a także ocenić wpływ inwestycji po jej oddaniu do użytku. Do najistotniejszych obserwacji należą: rozciągnięcie okresu szczytu w sąsiednich ulicach, znaczny wzrost natężenia ruchu i pogorszenie warunków przejezdności oraz dwu-, trzykrotny wzrost udziału pojazdów ciężkich w ruchu. Uzyskane wyniki pomiarów ruchu będą wykorzystane do analiz symulacyjnych jako zestaw danych weryfikujących trafność przeprowadzonych symulacji w modelu transportowym aglomeracji krakowskiej.

### Badania ankietowe kierowców

Badania ankietowe zostały przeprowadzone w trzech seriach, zgodnych z pomiarami natężenia ruchu (przed wprowadzeniem ograniczeń, po wprowadzeniu najbardziej uciążliwego etapu ograniczeń oraz po oddaniu inwestycji do użytku). Wywiady zostały przeprowadzone na wlotach do przebudowywanego Ronda Ofiar Katynia w okresie szczytu popołudniowego (w godzinach 14.00–18.00). Formularz ankiety obejmował pytania dotyczące rodzaju pojazdu, początku i końca podróży (wyniki zostały zagregowane do miasta Krakowa, powiatu i województwa krakowskiego, obszaru Polski i zagranicy), motywacji i liczby podróży, ewentualnej zmiany trasy oraz rezygnacji z podróży w związku z utrudnieniami w ruchu. W drugim etapie uwzględniono pytania dotyczące liczby dodatkowych podróży związanych z poprawą warunków ruchu. W ostatnim etapie przeprowadzono analizę statystyczną uzyskanych wyników. Błąd oszacowania dla wskaźnika struktury  $p$  (stanowiącego najważniejszy parametr pozyskany w ramach prowadzonych badań, tj. udział podróży wzbudzonych/tłumionych w całości podróży). Błąd oszacowania przyjętego wskaźnika struktury został wyznaczony w oparciu o następującą zależność (Greń [78]):

$$b = u_{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}} \quad (22)$$

gdzie:

- $b$  – błąd oszacowania wskaźnika struktury stanowiącego udział podróży wzbudzonych/tłumionych,
- $u_{\alpha}$  – wartość współczynnika ufności wyznaczonej z rozkładu normalnego standaryzowanego,
- $p$  – wartość szacowanego wskaźnika struktury,
- $n$  – liczebność próby.

W niniejszych analizach przyjęto poziom ufności  $1 - \alpha = 0,95$ , wtedy  $u_{\alpha} = 1,96$ . Chcąc wyznaczyć błąd oszacowania, przyjmując zasadę największego bezpieczeństwa obliczeń, do wyznaczenia błędu przyjęto najwyższą wartość, którą uzyskano

z trzech kolejnych serii pomiarowych (czyli najbliższy strukturze  $p = 0,50$ , dla której wyznacza się maksymalny błąd szacunku dla nieznanego parametru). Liczebność pozyskanych wywiadów ankietowych wraz z błędem oszacowania została zestawiona w tabeli 3.1:

Tabela 3.1

Uzyskane liczebności prób wraz z błędem oszacowania

Etap ankietowania	Liczebność próby	Błąd oszacowania dla udziału podróży tłumionych/wzbudzonych
Po wprowadzeniu utrudnień w ruchu	540	<b>0,024</b>
Po oddaniu gotowej inwestycji do użytku	355	<b>0,030</b>

Analizując wyniki badań ankietowych, dostrzeżono, że 7,8% ankietowanych wskazywało, że po wprowadzeniu utrudnień w ruchu na Rondzie zrezygnowali z wybranych podróży o charakterze fakultatywnym, realizowanych w przeciętny dzień roboczy. Osoby te należały do grupy mieszkańców Krakowa, mieszkających w sąsiedztwie Ronda i nie mających wyboru trasy przejazdu. Natomiast po oddaniu gotowej inwestycji do użytku 4,9% kierowców wskazało, że w związku z wyraźną poprawą warunków podróży zwiększyli swoją aktywność w postaci większej liczby podróży. W wyniku ankietowania uzyskano bardzo obszerny materiał badawczy, umożliwiający szczegółowe analizy zachowań kierowców na poszczególnych etapach trwania inwestycji.

W odniesieniu do lokalizacji źródeł i celów podróży druga seria pomiarowa prowadzona po wprowadzeniu utrudnień w ruchu ujawniła wyraźną tendencję w zmianie ich położenia. Dotyczy ona zwłaszcza udziału pojazdów ciężarowych z przyczepą. Spadek liczby podróży źródłowych z Krakowa lub powiatu krakowskiego jest w tej grupie kierowców dość znaczący: z 21% w ogóle zarejestrowanych podróży przed wprowadzeniem ograniczeń do 6% ogółu podróży po ich wprowadzeniu. Jest to różnica istotna ze statystycznego punktu widzenia. Podobne tendencje można dostrzec w przypadku analizy celów podróży – udział kierowców z Krakowa i okolic ulega sukcesywnemu zmniejszeniu, ponieważ szukają oni alternatywnych połączeń. Potwierdza to zmniejszający się udział kierowców wskazujących powiat krakowski i województwo małopolskie jako źródło podróży. Pozostali to mieszkańcy Krakowa niemający innej możliwości oraz kierowcy z pozostałej części Polski (i zagranicy) nieposiadający wiedzy o alternatywnych trasach objazdu. Badania ankietowe prowadzone po oddaniu inwestycji do użytku pokazały, że udział podróży źródłowych z Krakowa lub powiatu, realizowanych w dniu roboczym, zbliżył się do stanu sprzed inwestycji i ich udział w ogóle przejeżdżających przez Rondo, wg deklaracji kierowców, był większy o 4,5% w porównaniu do stanu pierwotnego.

Najważniejszym elementem badań było ustalenie udziału kierowców rezygnujących z realizowanych podróży oraz wykazujących dodatkowe podróże. Podczas badań pośrednich, po wdrożeniu ograniczeń ruchu, 7,8% ogółu ankietowanych wskazało, że zrezygnowali z podróży z powodu utrudnień w ruchu, a rezygnacje te dotyczyły podróży o charakterze fakultatywnym. Uwzględniając udział tych podróży w ankietach wynoszący 62%, poziom redukcji liczby podróży realizowanych przez Rondo (uwzględniającej również podróże obligatoryjne) wynosił 4,8%. Jest to oczywiście pewne uproszczenie, ponieważ zakłada się, że w dla każdej relacji źródło–cel realizowanej przez Rondo udział podróży obligatoryjnych jest stały (co nie zawsze jest prawdą), ale uwzględniając dość wysoki poziom uogólnienia w samym modelu symulacyjnym aglomeracji krakowskiej, wydaje się, że to uproszczenie nie będzie miało większego wpływu na wyniki końcowe.

W ostatnim etapie badań (po oddaniu inwestycji do użytku) dostrzeżono bardzo zbliżone proporcje w deklarowanych lokalizacjach źródeł i celów podróży przez respondentów, co może świadczyć o powrocie do przyzwyczajień sprzed przebudowy Ronda. Na pytanie o dodatkowe podróże, których wcześniej nie realizowali, 4,7% ankietowanych wskazało, że w ciągu ostatnich dwóch dni zdarzyło im się wyjechać samochodem w podróż, którą warunkowali płynnym przejazdem do celu, a która przed przebudową nie była realizowana. Uwzględniając taki sam udział podróży fakultatywnych jak w przypadku wcześniejszych obliczeń dotyczących ruchu tłumionego (wynoszący 62%), uzyskano udział 2,9% podróży wzbudzonych w całkowitej więźbie ruchu (oczywiście odnosi się to wyłącznie do podróży realizowanych przez Rondo). Dostrzeżono ponadto pewną prawidłowość dotyczącą zmian w zachowaniach transportowych. Ponad 15% ankietowanych stwierdziło, że wcześniej (tzn. przed przebudową Ronda) korzystali z innych tras, a niecałe 6% wskazało, że zmieniło środek transportu ze zbiorowego na indywidualny. We wcześniejszych etapach nie dostrzeżono istotnych zmian w deklaracjach dotyczących podziału zadań przewozowych.

### **3.3. Badania symulacyjne liczby podróży wzbudzonych i tłumionych**

Ten etap prowadzonych badań pozwolił sprawdzić, jak reaguje model symulacyjny aglomeracji krakowskiej na zmiany w podaży wyrażane trzema scenariuszami obliczeniowymi: przed przebudową Ronda, w trakcie przebudowy (podczas występowania największych utrudnień w ruchu) oraz po oddaniu Ronda do eksploatacji. Niniejszy etap badań dotyczył wyłącznie analiz prowadzonych dla stałej wartości popytu.

W tym celu wykorzystano model transportowy opracowany na podstawie wyników Kompleksowych Badań Ruchu przeprowadzonych w roku 2003 oraz badań strefy aglomeracyjnej z 2007 roku (Szarata [214]). Model ma charakter ogólny i znajduje zastosowanie w analizach strategicznych dotyczących rozbudowy układu komunikacyjnego Krakowa. Model ten został opracowany przy wykorzystaniu programu firmy PTV Vision – Visum 12.0 i składa się z części dotyczącej podaży (parametryzowana sieć drogowa, podział na rejony transportowe oraz przebieg linii transportu zbiorowego) i części dotyczącej popytu transportowego. Modelowanie popytu składało się z czterech zasadniczych etapów, które tworzą klasyczny model czterostadiowy. Na podstawie danych o zagospodarowaniu przestrzennym terenu określono wielkości ruchu rozpoczynającego i kończącego podróże w każdym z rejonów. Wewnątrz Krakowa wydzielono 265 rejonów transportowych i dla każdego z nich wyznaczono odpowiednie zmienne objaśniające (m.in. liczbę mieszkańców, uczniów szkół ponadpodstawowych, studentów, pracujących, miejsc pracy itp.). Ponieważ model odnosi się do godziny szczytu popołudniowego, uwzględniono udział poszczególnych motywacji w tej godzinie.

W części dotyczącej obszaru aglomeracji podział na rejony transportowe został dostosowany do zmiennych objaśniających przyporządkowanych do gmin (w kilku przypadkach wydzielono dodatkowo miasto). Łącznie uzyskano 36 rejonów należących do strefy aglomeracyjnej, a zmienne objaśniające zostały opracowane na podstawie danych Głównego Urzędu Statystycznego. Powiązanie całego modelu miasta i strefy z obszarem zewnętrznym zostało zapewnione przez wprowadzenie rejonów zewnętrznych agregujących ruch wlotowy do konkretnego odcinka w sieci. Łącznie zaproponowano 18 wlotów odpowiadających najważniejszym odcinkom układu zewnętrznego.

Jakość modelu symulacyjnego została określona na podstawie zgodności modelowanych potoków ruchu (w odniesieniu do transportu indywidualnego i zbiorowego) z dostępną bazą danych pomiarowych. Dysponowano łącznie 420 punktami pomiaru natężenia ruchu drogowego, rozmieszczonymi w całej sieci drogowej oraz 480 punktami pomiarowymi dotyczącymi przekrojowych wartości natężenia potoków pasażerskich. Jako punkt pomiarowy rozumie się natężenie ruchu (wyrażone w pasażerach/godzinę oraz pojazdach/godzinę) w odniesieniu do jednego kierunku w przekroju drogowo-ulicznym. W przypadku transportu indywidualnego uzyskano zgodność modelu z bazą pomiarową, określoną współczynnikiem determinacji  $R^2 = 0,80$ , natomiast dla transportu zbiorowego –  $R^2 = 0,83$ .

Wykorzystany model opracowany był do potrzeb weryfikacji transportowych założeń inwestycyjnych Krakowa i miał charakter modelu planistycznego. Oznacza to, że zawiera informacje dotyczące głównych ciągów drogowych i skrzyżowań, natomiast nie obejmuje wszystkich ulic o podrzędnym znaczeniu. Z tego powodu dokonano uzupełnień w modelu sieci, wprowadzając powiązania o znaczeniu lokalnym i doprowadzając schemat organizacji ruchu odwzorowany w modelu do stanu

z dnia pomiarów. Uzupełnienia modelu odnoszą się zwłaszcza do obszaru wpływu realizacji inwestycji, uwzględniając ulice, na których przeprowadzono pomiary przekrojowe. Struktura modelu ruchu uwzględnia trzy poziomy oddziaływania: miasto Kraków, strefę podmiejską oraz powiązania z układem zewnętrznym. Przyjęta budowa modelu umożliwia szczegółową analizę przepływów pojazdów przez Rondo Ofiar Katynia, ze szczególnym uwzględnieniem podróży realizowanych z obszarów podmiejskich oraz podróży dalekich. Porównując wyniki rozkładu ruchu w modelu przed wdrożeniem inwestycji, osiągnięto zgodność modelu z pomiarami własnymi na poziomie  $R^2 = 0,81$ .

Modelowanie etapu związanego z wprowadzeniem ograniczeń w ruchu polegało na zmniejszeniu liczby pasów ruchu z dwóch do jednego na każdym wlocie oraz blokady relacji skrętu w lewo dla każdego z wlotów. Takie utrudnienia w ruchu przyczyniły się do istotnych zmian w wyborze trasy przez użytkownika i spowodowały znaczące zmiany w proporcji obciążeń poszczególnych odcinków. Również w tym przypadku dysponowano pomiarami przekrojowymi własnymi, przeprowadzonymi w odpowiadającym okresie i możliwe było sprawdzenie stopnia zgodności modelu z warunkami rzeczywistymi. Osiągnięty stopień zgodności  $R^2 = 0,80$  jest nieco słabszy od poprzedniego, ale uznano, że jest wystarczający do dalszych analiz.

W ostatnim etapie badawczym po oddaniu inwestycji w postaci węzła trypoziomowego przyjęto wariant modelu transportowego, w którym zezwolono na realizację wszystkich relacji skrętnych na Rondzie oraz zwiększono przepustowość układu drogowego wokół Ronda o 50% w stosunku do stanu sprzed przebudowy (skrzyżowanie z wyspą centralną), co odzwierciedla wyraźną poprawę warunków przejezdności Ronda w odniesieniu do stanu sprzed inwestycji. W tym przypadku rozkład ruchu uległ istotnej zmianie i w wyraźny sposób zostały odciążone lokalne ulice, których rolą jest nie przenoszenie ruchu tranzytowego, a jedynie obsługa obszarów zamieszkania. Zanotowano bardzo wyraźny przyrost w natężeniu ruchu na głównych ciągach drogowych. Zaskakującym jest fakt, iż uzyskano znacznie lepszą zgodność modelu z wynikami prowadzonych pomiarów przekrojowych  $R^2 = 0,91$ , co stanowi przesłankę do stwierdzenia o poprawnej reakcji modelu na wprowadzone zmiany w sieci.

Prowadzone badania stanowiły próbę określenia wpływu utrudnień oraz poprawy warunków ruchu po oddaniu inwestycji do użytku na pracę przewozową. Jest to parametr, który często pojawia się w analizach ruchu wzbudzonego (np. [161], Fulton [64, 242], Gonzalez, Marrero [72]), a jego szacowanie dotychczas odbywało się przez porównanie wyników pomiarów przed i po powstaniu inwestycji infrastrukturalnej. Takie podejście ma jeden zasadniczy problem, mianowicie uniemożliwia oddzielenie czynników wpływu decydujących o ewentualnych zmianach w pracy przewozowej – jej wzrost niekoniecznie może być związany z pojawieniem się nowego połączenia drogowego, a może mieć inne przyczyny (np. otwarcie dużego centrum

handlowego w okolicy, pojawienie się nowych miejsc pracy itp.). Aby umożliwić odseparowanie innych czynników mogących mieć wpływ na liczbę podróży, proponuje się zastosowanie analizy symulacyjnej, w której wielkość i rozmieszczenie potencjałów ruchotwórczych nie ulegnie zmianie dla każdego ze scenariuszy obliczeniowych, a ewentualne zmiany w pracy przewozowej będą wynikały wyłącznie ze zmian w sieci. Jest to istotne z powodu konieczności odseparowania zewnętrznych czynników wpływu. Ponieważ jednak model transportowy nie uzależnia liczby podróży od jakości infrastruktury, konieczne będzie prowadzenie zmian w macierzy podróży polegających na uwzględnieniu wyników badań ankietowych prowadzonych pośród kierowców. W procesie modelowania przyjęto zatem następujące założenia (wg [218]):

- relacje podróży źródło–cel, na które modernizacja Ronda ma największy wpływ, są realizowane przez odcinek ul. Radzikowskiego, prowadzący ruch wlotowy do Krakowa (na tym odcinku prowadzone były badania ankietowe),
- w celu modelowania zredukowanych/wzbudzonych podróży wykorzystano moduł *Flow Bundle* [176] w programie Visum, a korekta liczby podróży będzie się odnosiła tylko do relacji realizowanych przez ul. Radzikowskiego, których dotyczyła ankiet.

Korekta liczby podróży związana z modernizacją Ronda została przeprowadzona w oparciu o uzyskane wyniki badań ankietowych na poszczególnych etapach przebudowy. Deklarowany przez ankietowanych łączny udział podróży odrzuconych w związku z ograniczeniami wynosił 4,8%, natomiast deklarowany przez ankietowanych łączny udział podróży wzbudzonych w związku z oddaniem Ronda do użytku wynosił 2,9%.

Przyjęte podejście do modelowania wymaga opracowania łącznie pięciu scenariuszy obliczeniowych:

- stan przed przebudową Ronda,
- model ze stałym popytem (dla stanu z ograniczeniami w ruchu),
- model ze zredukowanym popytem, związanym z wprowadzeniem ograniczeń w ruchu drogowym,
- model ze stałym popytem (dla stanu po oddaniu inwestycji),
- model z popytem wzbudzonym, związanym z oddaniem Ronda do eksploatacji.

Analizując scenariusze obliczeniowe, należało dokonać korekty modelu sieci polegającej na zmniejszeniu wartości przepustowości i prędkości odcinków wlotowych do Ronda Ofiar Katynia oraz wprowadzenie blokady relacji skrajnych w lewo na rondzie. Dla scenariusza obliczeniowego odnoszącego się do stanu po oddaniu inwestycji parametry te zostały również stosownie zmienione. Do analizy symulacyjnej dla wszystkich scenariuszy dysponowano pomiarami przekrojowymi i możliwym było sprawdzenie stopnia zgodności modelu z warunkami rzeczywistymi.

Należy podkreślić, że analizy zgodności były prowadzone wyłącznie dla bezpośredniego sąsiedztwa inwestycji, a nie dla całego modelu symulacyjnego, więc miały charakter lokalny. Osiągnięty współczynnik zgodności dla każdego ze scenariuszy zestawiono w tabeli 3.2.

Tabela 3.2

Wyniki analiz zgodności modeli z pomiarami natężenia ruchu dla każdego ze scenariuszy obliczeniowych w odniesieniu do godziny szczytu popołudniowego

Nr	Scenariusz obliczeniowy		Współczynnik determinacji $R^2$
1	Stan istniejący		<b>0,81</b>
2	Podróże tłumione	Model ze stałym popytem (dla stanu z ograniczeniami w ruchu)	<b>0,80</b>
3		Model ze zredukowanym popytem, związanym z wprowadzeniem ograniczeń w ruchu drogowym	<b>0,81</b>
4	Podróże wzbudzone	Model ze stałym popytem (dla stanu po oddaniu inwestycji)	<b>0,91</b>
5		Model z popytem wzbudzonym, związanym z oddaniem ronda do eksploatacji	<b>0,94</b>

Analizując scenariusze dla popytu zredukowanego i wzbudzonego, wykorzystano identyczny model podaży, a jedyną różnicę stanowiły wprowadzone korekty macierzy ruchu uwzględniające redukcję oraz zwiększenie liczby podróży. W tych przypadkach uzyskano nieznacznie lepsze wartości współczynnika zgodności w porównaniu do stanu ze stałym popytem. Zaobserwowana niewielka poprawa wynika głównie z większej zgodności natężenia ruchu na wlotach do Ronda.

Opracowane modele symulacyjne dla poszczególnych scenariuszy obliczeniowych wykazują zadowalającą zgodność. Stanowi to przesłankę do bardziej szczegółowych analiz. Wybrano parametr pracy przewozowej w odniesieniu do pojazdokilometrów oraz łączny czas jazdy wyrażony w pojazdogodzinach. Parametry te wyznaczono dla wszystkich scenariuszy obliczeniowych w odniesieniu do całej sieci drogowej modelu (obszar aglomeracji krakowskiej) oraz wybranego zasięgu wpływu inwestycji (rys. 3.2).

Wyniki analiz symulacyjnych dla wszystkich scenariuszy obliczeniowych oraz w odniesieniu do sieci całej aglomeracji zestawiono w tabeli 3.3.





Rys. 3.2. Zasięg modelu sieciowego aglomeracji krakowskiej. Prostokątem zaznaczono obszar wpływu realizacji inwestycji, dla którego dodatkowo wyznaczono pracę przewozową

Tabela 3.3

Łączny czas jazdy i praca przewozowa dla różnych scenariuszy obliczeniowych w całej sieci, w godzinie szczytu popołudniowego

Nr	Scenariusz obliczeniowy		Pojazdogodziny	Pojazdokilometry
1	Stan istniejący		<b>25 200</b>	<b>1 144 300</b>
2	Podróże tłumione	Model ze stałym popytem (dla stanu z ograniczeniami w ruchu)	<b>26 500</b>	<b>1 160 100</b>
3		Model ze zredukowanym popytem, związanym z wprowadzeniem ograniczeń w ruchu drogowym	<b>26 200</b>	<b>1 153 900</b>
4	Podróże wzbudzone	Model ze stałym popytem (dla stanu po oddaniu inwestycji)	<b>25 000</b>	<b>1 144 500</b>
5		Model z popytem wzbudzonym, związanym z oddaniem ronda do eksploatacji	<b>25 400</b>	<b>1 146 200</b>

Analizując zmiany łącznego czasu jazdy wyrażonego w pojazdogodzinach dla scenariuszy dotyczących ograniczeń w ruchu, można zaobserwować jej wzrost w skali całej aglomeracji o ponad 5,1% (w analizach ze stałą liczbą podróży), na-

tomiaś dla zredukowanej macierzy ruchu, uwzględniającej występowanie podróży tłumionych, wartość wzrosła o 3,9%. Uwzględnienie podróży tłumionych przyczynia się zatem do zmniejszenia łącznej straty czasu i nieznacznie zbliża się do stanu sprzed wprowadzeniem utrudnień. Podobną tendencję można dostrzec w łącznym dystansie pokonywanym przez samochody (pojazdokilometry), gdzie zaobserwowany wzrost dla scenariusza z ograniczeniami w ruchu przy niezmiennym popycie wynosi 1,4%, natomiast w przypadku symulacji dla popytu zredukowanego wynosi 0,8%. Dla scenariusza po oddaniu inwestycji do użytku zaobserwowano spadek pracy przewozowej o 0,9% przy stałym popycie, a gdy uwzględniono udział ruchu wzbudzonego sytuacja ruchowa uległa pogorszeniu o 0,7% w porównaniu do stanu przed inwestycją. Pokazuje to, że wyraźna poprawa parametrów układu drogowego wcale nie przynosi spodziewanej poprawy w skali całego miasta – poprawa przepustowości w jednym miejscu powoduje pojawienie się utrudnień w ruchu w kolejnych.

Interesujące wyniki odnoszą się do analizy pracy przewozowej w bezpośrednim sąsiedztwie inwestycji (wg rys. 3.2). Pomimo zmniejszenia się łącznego dystansu pokonanego przez samochody w konsekwencji zmniejszonego natężenia ruchu (o ponad 10 000 pojkm w odniesieniu do godziny szczytu popołudniowego, w wariancie ze stałym popytem), zwiększa się w wyniku rosnącego zatłoczenia łączny czas jazdy w tym rejonie – o 600 pojgodz (tabela 3.4).

Tabela 3.4

Praca przewozowa i łączny czas jazdy dla scenariuszy obliczeniowych  
w bezpośrednim sąsiedztwie inwestycji, w godzinie szczytu popołudniowego

Nr	Scenariusz obliczeniowy		Pojazdogodziny	Pojazdokilometry
1	Stan istniejący		<b>2440</b>	<b>87 700</b>
2	Podróże tłumione	Model ze stałym popytem (dla stanu z ograniczeniami w ruchu)	<b>3040</b>	<b>77 800</b>
3		Model ze zredukowanym popytem, związanym z wprowadzeniem ograniczeń w ruchu drogowym	<b>2830</b>	<b>84 100</b>
4	Podróże wzbudzone	Model ze stałym popytem (dla stanu po oddaniu inwestycji)	<b>2280</b>	<b>89 200</b>
5		Model z popytem wzbudzonym, związanym z oddaniem ronda do eksploatacji	<b>2430</b>	<b>88 300</b>

Analizując wyniki symulacji dla scenariusza po oddaniu inwestycji do użytku, można dostrzec podobny mechanizm w zmianie pracy przewozowej jak w przypadku całego miasta. Dla analiz ze stałym popytem łączny czas jazdy wyrażony

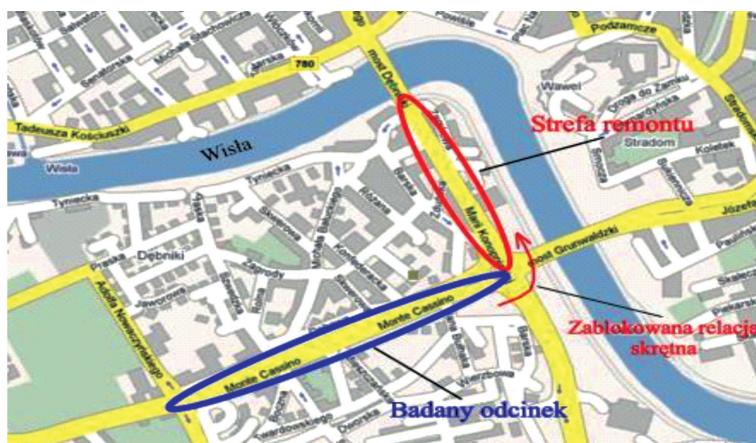
w pojazdogodzinach ulega zmniejszeniu o 190 pojazdogodzin (stanowi to 7%), aby praktycznie wrócić do stanu sprzed inwestycji, gdy uwzględnimy udział ruchu wzbudzonego. Podobnie ma się praca przewozowa w pojazdokilometrach, gdy uwzględnimy ruch tłumiony i wzbudzony wartości są bardziej zbliżone do stanu sprzed inwestycji niż w przypadku analiz ze stałym popytem.

### **3.4. Badania podróży tłumionych spowodowanych pracami remontowymi na ul. Konopnickiej w Krakowie**

Głównym celem badań było wyznaczenie, w jaki sposób wprowadzone ograniczenia w ruchu wpływają na funkcjonowanie systemu transportowego oraz wykazanie, czy i jak uwzględnienie podróży o charakterze podróży tłumionych wpływa na parametry pracy sieci transportowej. Istotą procedury jest przyjęcie liczby odrzuconych podróży w oparciu o badania ankietowe, a następnie określenie ich wpływu na pracę przewozową w transportowym modelu symulacyjnym miasta. Wykorzystano tutaj model transportowy aglomeracji krakowskiej (opisany w rozdziale 3.3) opracowany na podstawie wyników Kompleksowych Badań Ruchu przeprowadzonych w roku 2003 oraz badań strefy aglomeracyjnej z 2007 roku (Szarata i in. [214]).

W celu zbadania wpływu ograniczeń w ruchu na warunki podróży w mieście przeprowadzono badania, których efektem będzie próba wyznaczenia wielkości wpływu utrudnień w podróżowaniu na wybór środka transportu oraz zmiany w warunkach podróżowania transportem indywidualnym (Szarata [218]). Jako poligon badawczy wybrano obszar osiedla Podwawelskiego i dzielnicy Ruczaj w Krakowie, ponieważ w roku 2007 prowadzone były w tej okolicy prace remontowe na ul. Konopnickiej, łączącej wybrane osiedla z centrum miasta. Spowodowało to znaczne utrudnienia w podróżach do centrum w odniesieniu do transportu zbiorowego oraz indywidualnego (rys. 3.3).

Przyczyniła się do tego konieczność wyłączenia skrzyżowania dla samochodów jadących z kierunku ul. Monte Cassino do centrum miasta oraz znaczne utrudnienia w funkcjonowaniu transportu zbiorowego w tym obszarze. Aby zbadać, jak powstałe utrudnienia przyczyniły się do ewentualnych zmian w pracy sieci transportowej (czy w ogóle miały na to wpływ), zdecydowano się na przeprowadzenie badań ankietowych wśród mieszkańców. Badania były prowadzone na przystankach transportu zbiorowego oraz na wybranych parkingach osiedlowych i miały charakter badań preferencji stwierdzonych, które dotyczyły sytuacji zarówno przed, jak i po wprowadzeniu ograniczeń. Badania odnosiły się do podróży pieszych i polegały na przeprowadzeniu wywiadu z osobami oczekującymi na tramwaj oraz z kierowcami wyjeżdżającymi z parkingu i dotyczyły okresu szczytu popołudniowego (wybór okresu badań wynikał z zamierzonego wykorzystania

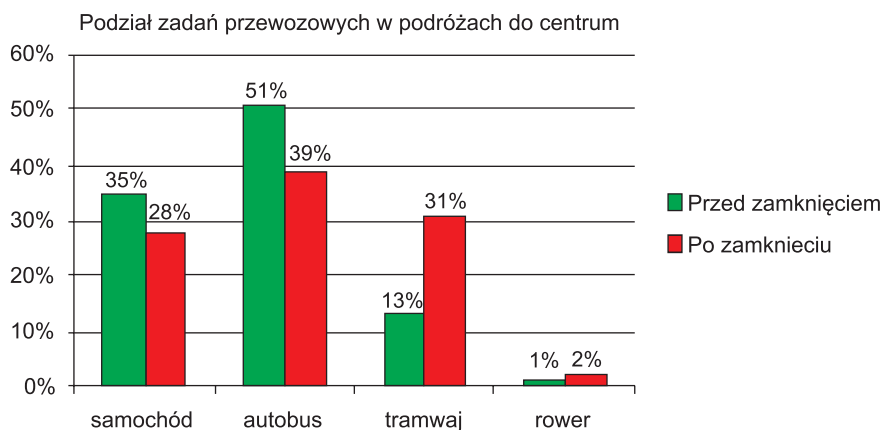


Rys. 3.3. Schemat ideowy badanego obszaru w Krakowie

wyników w modelu symulacyjnym Krakowa, który dotyczy godziny szczytu popołudniowego). Podczas badań uzyskano łącznie 326 ankiet. Ankietowani odpowiadali m.in. na pytanie, jakimi środkami transportu podróżowali przed i po wprowadzeniu ograniczeń w ruchu drogowym (zamknięciu ul. Konopnickiej). Wyniki ankiet zestawiono na rys. 3.4.

W wyniku ograniczenia ruchu można zaobserwować wyraźną zmianę w podziale zadań przewozowych. Nastąpiło zmniejszenie liczby osób podróżujących samochodami osobowymi – spadek udziału tych podróży z 35% (w ogóle podróży pieszych) do 28%. Wprawdzie nie jest to znacząca wartość, ale przy uwzględnieniu niechęci kierowców do pozostawiania swoich samochodów na parkingu wydaje się być bardzo ważnym sygnałem dowodzącym o możliwości oddziaływania na stopień wykorzystania samochodu. Znacznie większy spadek pasażerów został zanotowany w przypadku komunikacji autobusowej, która podobnie jak samochody osobowe wykazywała duże straty czasu – spadek z 51% do 39%. Największy wzrost liczby pasażerów zanotowały linie tramwajowe – ponaddwukrotny wzrost z 13% do 31%. Oznacza to, że komunikacja tramwajowa przejęła pasażerów z samochodów osobowych i autobusów i jest to związane ze znacznie krótszym od innych środków transportu, czasem podróży realizowanych tramwajem. Na pytanie o przyczynę, dla której ankietowani zmienili środek transportu po wprowadzeniu utrudnień, 49% wskazało skrócenie czasu podróży, a 32% wskazało wygodę. Niższy koszt podróży był przyczyną zmian tylko dla 10% ankietowanych.

Kolejne pytania ankiety dotyczyły ewentualnej rezygnacji z podróży oraz częstotliwości ich występowania. Zgodnie z wynikami badań 65% ankietowanych nie zrezygnowało z podróży z powodu wprowadzonych ograniczeń. Wśród pozosta-



Rys. 3.4. Podział zadań przewozowych PRZED i PO wprowadzeniu ograniczeń w ruchu

łych osób, najwięcej wskazań dotyczyło przedziału od 1–2 rezygnacji w tygodniu (23%). 12% respondentów odpowiedziało, że rezygnowało z odbywania podróży codziennie.

Aby określić spodziewany efekt wprowadzenia ograniczeń w ruchu na udział podróży tłumionych, wykorzystano model aglomeracji krakowskiej. W procesie modelowania przyjęto następujące założenia:

1. Relacje skrócone, na które ograniczenia w ruchu mają największy wpływ, są realizowane przez odcinek ul. Monte Cassino (zaznaczony kolorem niebieskim na rys. 3.3). Ponieważ badania ankietowe były prowadzone właśnie w tej okolicy, przyjęto, że uzasadnionym będzie rozszerzenie otrzymanych wyników badań ankietowych na wszystkie podróże w ciągu tej ulicy. Nie jest to w pełni właściwe rozwiązanie, ponieważ wyniki badań ankietowych nie pozwalają na bezpośrednie rozszerzenie próby badawczej na populację, ale dla celów niniejszej analizy wydaje się, że można przyjąć takie uproszczenie;
2. W celu modelowania zredukowanych podróży, wykorzystano moduł *Flow Bundle* w programie Visum [176]. Jest to filtr pozwalający na wydzielenie tych relacji źródło–cel, które są realizowane przez wybrany odcinek (analizowany fragment ul. Monte Cassino);
3. Filtrowane relacje są zapisywane w postaci dodatkowej macierzy zawierającej wszystkie podróże źródło–cel realizowane przez wybrany odcinek sieci oraz macierzy zawierającej pozostałe podróże. Dalsze analizy będą się odnosiły do redukcji podróży zawartych w dodatkowej macierzy ruchu;
4. Redukcja podróży związana z wprowadzeniem ograniczeń została przeprowadzona w oparciu o uzyskane wyniki badań ankietowych. Stwierdzony przez respondentów, łączny udział podróży odrzuconych w związku z ogranicze-

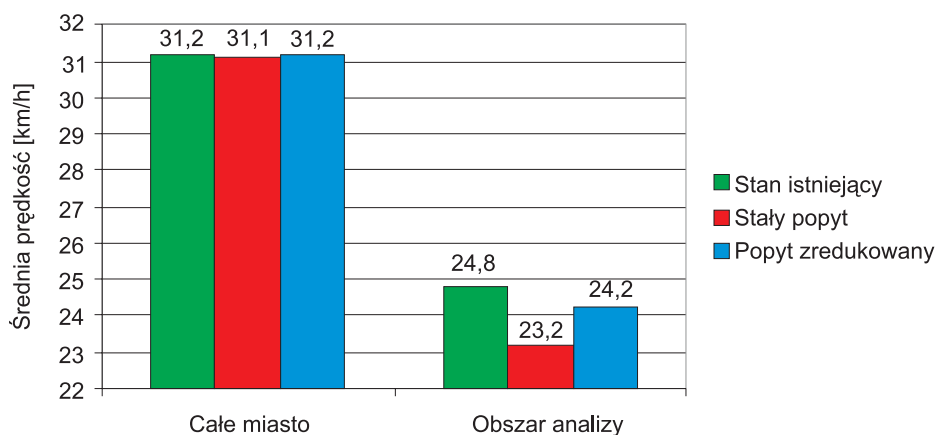
niami, wynosił 12% (wg ankiet, były to podróże fakultatywne, których udział w łącznej macierzy podróży wynosił 62%, zgodnie z wynikami badań KBR dla Krakowa). Uwzględniając udział podróży fakultatywnych oraz podział zadań przewozowych, wyznaczono całkowity wskaźnik redukcji podróży wynoszący 7,4%.

Do analiz przyjęto 3 scenariusze obliczeniowe:

- stan istniejący – przypadek bez wprowadzenia utrudnień w ruchu,
- popyt niezmienny – wprowadzono zmiany w sieci, lecz pozostawiono więźbę ruchu taką samą jak w scenariuszu bazowym (bez występowania ruchu tłumionego),
- popyt zredukowany – sieć uliczna z wprowadzonymi zmianami oraz zredukowaną macierzą ruchu (zgodnie z opisanymi założeniami).

Przyjęte scenariusze obliczeniowe zostały odwzorowane w modelu symulacyjnym. Ocenie poddano wybrane parametry sieci, tj. średnią prędkość w sieci oraz łączny czas jazdy wyrażony w pojazdogodzinach. Aby podkreślić lokalny charakter oddziaływania, wybrane parametry wyznaczono dodatkowo dla mniejszego obszaru wpływu obejmującego sąsiednie ulice. W przypadku średniej prędkości w sieci (rys. 3.5) zauważono nieznaczne zmiany pracy przewozowej w skali całego miasta – wartość jest praktycznie taka sama, zwłaszcza w odniesieniu do macierzy uwzględniającej ruch tłumiony. W przypadku przyjętego obszaru wpływu można zaobserwować większy spadek prędkości dla niezmiennionej więźby ruchu (6,9%) niż dla więźby uwzględniającej ruch tłumiony (2,5%).

Porównując scenariusz ze stałym popytem do scenariusza bez ograniczeń w ruchu, można zauważyć, że łączny czas jazdy wyrażony w pojazdogodzinach zwiększa się w skali całego miasta o 1,5%, natomiast uwzględniając podróże tłumione,



Rys. 3.5. Wyznaczona prędkość średnia w sieci dla przyjętych scenariuszy obliczeniowych [km/h]



utrzymuje się praktycznie na tym samym poziomie. Dla obszaru wpływu, wzrost łącznego czasu jazdy w porównaniu do scenariusza bez ograniczeń jest oczywiście znacznie większy i wynosi 17,7% dla stałego popytu, a dla więźby zredukowanej 6,3%. Znaczący wzrost pracy przewozowej jest wynikiem wprowadzenia na remontowanych odcinkach ograniczeń w przepustowości i prędkości. W prezentowanym podejściu wpływ inwestycji (ograniczenia w ruchu) uwzględniał przylegający układ ulic, gdzie najbardziej odczuwane są uciążliwości związane z przebudową głównego ciągu drogowego.

Podróże tłumione mają zwykle charakter czasowy, związany z chwilowym ograniczeniem ruchu wynikającym z remontu lub przebudowy ulicy. Oszacowanie wielkości ruchu wzbudzonego/tłumionego ma charakter iteracyjny (związany jest z rezerwami przepustowości), a podejście symulacyjne pozwoli na wyznaczenie oczekiwanego stanu równowagi sieci, zgodnie z prawem Wardropa. Porównując wyniki symulacji, można zauważyć zbliżone wartości pracy przewozowej dla scenariuszy „Stan istniejący” i „Popyt zredukowany”. Do podobnych wniosków doszli Ortuzara i Wilumsen [164], którzy wyraźnie zaznaczają, że poziom zatłoczenia transportowego stabilizuje się, gdy popyt na podróże przekłada się na osiągnięcie przepustowości układu transportowego, a czas podróży wzrasta sposób istotny w porównaniu do warunków przeciętnych.

### **3.5. Badania podróży wzbudzonych przez pasażerów transportu zbiorowego na przykładzie kilku inwestycji związanych z transportem zbiorowym**

#### **Badania ankietowe dotyczące zmian w zachowaniach transportowych pasażerów**

Prowadzone badania nad ruchem wzbudzonym wymagają dogłębnych analiz zachowań transportowych pasażerów korzystających z układu transportowego miasta. Wydaje się, że analizy te można prowadzić jedynie w formie badań ankietowych polegających na rejestrowaniu rzeczywistych zachowań użytkowników (ankiety miały charakter badań deklaracji stwierdzonych i nie odnosiły się do hipotetycznych reakcji na pewne zmiany, ale dotyczyły rzeczywistych decyzji podejmowanych przez pasażerów w odniesieniu do towarzyszących inwestycji). Badania ankietowe przeprowadzono łącznie w pięciu lokalizacjach, obejmując różne środki transportu (tramwaj, kolej aglomeracyjna, autobusy na wydzielonych pasach) w pięciu różnych miejscach w Polsce (Kraków, Gdańsk, Warszawa, Legionowo i Góra Kalwaria). Wyniki badań ankietowych posłużą do kalibracji modelu, który będzie umożliwiał szacowanie wielkości ruchu wzbudzonego dla nowych inwestycji w infrastrukturę transportu publicznego.



Aby wyeliminować ryzyko popełnienia błędu pomiaru związanego z nieprawidłową konstrukcją narzędzia badawczego, w oparciu o wstępnie opracowany kwestionariusz przeprowadzono badania pilotażowe mające na celu weryfikację przyjętych pytań pod kątem ich zrozumienia. Prowadzący badanie pilotażowe ankietery (wcześniej odpowiednio przeszkoleni) byli odpowiedzialni za zebranie uwag i wątpliwości respondentów, które mogły pojawiać się podczas prowadzenia wywiadu. Ankietery mieli również zadanie upewnić się, czy pytania są zrozumiałe, a proponowane odpowiedzi wyczerpują wszystkie możliwe opcje. W efekcie zebranych informacji etap ten pozwolił wprowadzić wymagane korekty narzędzia i tym samym zminimalizować ryzyko popełnienia błędu pomiarowego. W drugim, zasadniczym etapie badań, skorygowane pytania kwestionariusza posłużyły jako podstawa do opracowania formularzy ankietowych oddających specyfikę każdej z analizowanych lokalizacji.

Ponieważ problem podróży wzbudzonych lub tłumionych nie był dotychczas dogłębnie badany w warunkach krajowych i nie jest dostępna metodyka tego typu pomiarów, badania należało zaprogramować indywidualnie, tworząc własny formularz ankietowy (w załączniku). Oprócz kwestionariusza przygotowano odpowiednie wyjaśnienia i instrukcje dla ankietów. Formularz zawierał zestaw pytań dotyczący podstawowych atrybutów podróży, częstotliwości ich realizowania, czasu podróży przed i po wprowadzeniu zmian w korytarzu transportowym (np. pojawienie się nowej linii czy skrócenie czasu podróży) oraz wartościowania wybranych zmiennych w formie lingwistycznej (informacje konieczne do budowy modelu rozmytego).

Badania ankietowe zostały przeprowadzone dla 5 wybranych lokalizacji:

1. Kraków: nowa linia tramwajowa łącząca Rondo Grzegórzeckie z ul. Golińkowska. Linia została oddana do użytku 18 listopada 2010 i stanowi najnowszą inwestycję poddaną analizie. Badania były tu prowadzone w dwóch terminach – tuż po oddaniu inwestycji do użytku (30 listopada 2010) oraz rok po oddaniu (24 listopada 2011);
2. Legionowo: linia kolejowa w kierunku Warszawy, oddana do użytku 1 marca 2010 r. Wskutek zmian do rozkładu jazdy dodano 37 połączeń. Badania przeprowadzono 30 listopada 2010;
3. Góra Kalwaria: 1 czerwca 2009 została oddana do użytku linia kolei aglomeracyjnej w kierunku Warszawy, zwiększając częstotliwość kursowania, przez co stanowi istotną alternatywę w wyborze środka transportu. Badania przeprowadzono 25 listopada 2010;
4. Warszawa: 1 października 2009 r. oddano do użytku nowe pasy autobusowe w ciągu trasy Łazienkowskiej, skracając czas jazdy autobusów. Badania przeprowadzono 24 listopada 2010;
5. Gdańsk: nowa linia tramwajowa na osiedle Chełm oddana do użytku w grudniu 2009 r. Badania przeprowadzono 17 listopada 2010.

Na podstawie przygotowanego kwestionariusza przeprowadzono badania dla każdej z wybranych inwestycji. Aby ocenić wiarygodność uzyskanych wyników badań ankietowych, wykorzystano formułę do wyznaczania błędu oszacowania

wskaźnika struktury (wzór 22). W obliczeniach (prowadzonych na poziomie ufności 0,95) uwzględniono uzyskaną wartość udziału podróży wzbudzonych na poziomie  $p = 0,090$ . Wielkości błędu oszacowania udziału ruchu wzbudzonego w wyniku wdrożenia poszczególnych inwestycji przedstawiono w tabeli 3.5.

Tabela 3.5

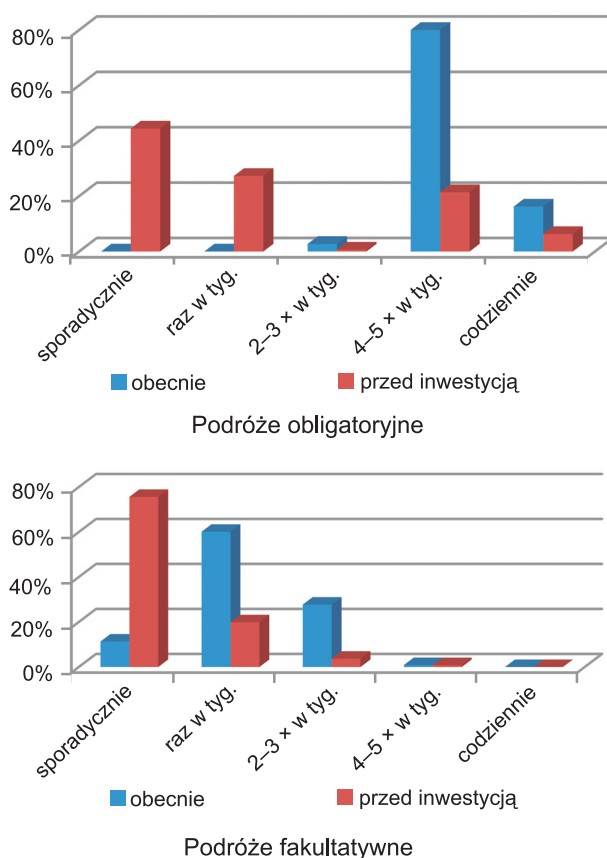
Liczebności prób w poszczególnych lokalizacjach,  
wraz z błędem oszacowania wskaźnika struktury

Miejsce prowadzenia badań ankietowych	Liczebność próby	Błąd oszacowania wskaźnika struktury
Kraków (termin I, miesiąc po oddaniu inwestycji)	648	<b>3,9%</b>
Kraków (termin II, rok po oddaniu inwestycji)	650	<b>3,9%</b>
Legionowo	795	<b>3,5%</b>
Góra Kalwaria	524	<b>4,2%</b>
Warszawa	240	<b>6,3%</b>
Gdańsk	414	<b>4,8%</b>
Średnioważony błąd oszacowania udziału podróży wzbudzonych	3271	<b>4,1%</b>

Błąd oszacowania udziału podróży wzbudzonych w całej próbie badawczej, ważony liczebnościami poszczególnych prób cząstkowych, wynosi 4,14% i można go uznać za satysfakcjonujący.

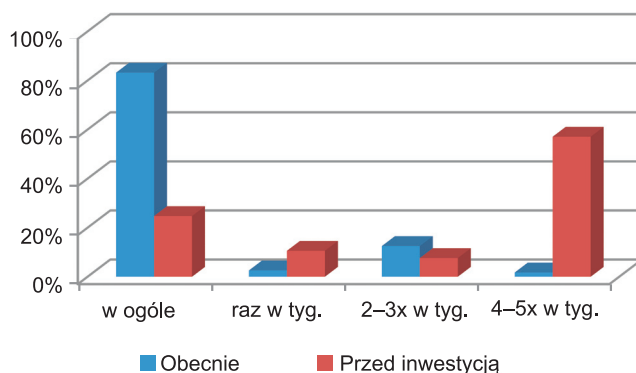
Uzyskane wartości błędów oszacowania wskaźnika struktury oscylują głównie wokół wartości 4% (najniższą jest próba z Warszawy). Badania w każdej z lokalizacji zostały przeprowadzone w podobnym okresie i przez tę samą grupę ankietowników (poza badaniami w Krakowie). Ma to duże znaczenie, gdyż zadawanym pytaniom towarzyszyły podobne wyjaśnienia i komentarze ankietowników. Ponadto badania były przeprowadzane na przystankach i wewnątrz pojazdów – pasażerowie chętnie odpowiadali na pytania, ponieważ dysponowali czasem na rozmowę z ankietorem.

Pierwsza część ankiety dotyczyła częstotliwości podróżowania dla dwóch typów podróży: obligatoryjnych (związanych z pracą i nauką) oraz fakultatywnych, traktowanych jako pozostałe podróże (zakupy, rekreacja, odwiedziny itp.). Respondent odpowiedział, z jaką częstotliwością podróżuje po otwarciu linii oraz w warunkach przed jej uruchomieniem. Dostrzeżono, że ankietowani wskazywali wyraźny wzrost podróży związany z nowym połączeniem (pytanie było zadawane w taki sposób, aby podkreślić wyłącznie rolę nowego środka transportu). Analizując wyniki ankiet, zauważono wyraźną tendencję wzrostową liczby podróży lub częstszego korzystania z nowego połączenia w codziennych relacjach. Jako przykład przedstawione zostaną wyniki dla badań przeprowadzonych na połączeniu w kierunku Góry Kalwarii (rys. 3.6).



Rys. 3.6. Udział wskazań dotyczący częstotliwości podróży fakultatywnych i obligatoryjnych dla stanu przed i po wdrożeniu inwestycji – przykład linii kolei aglomeracyjnej w kierunku Góry Kalwarii

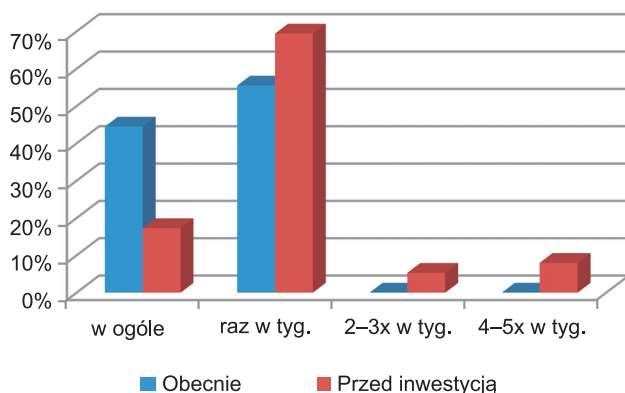
W obu przypadkach widać wpływ nowego połączenia na częstotliwość realizowanych podróży. W odniesieniu do podróży obligatoryjnych duży udział podróży realizowanych przed inwestycją odnosił się do sporadycznego przejazdu. Po zwiększeniu oferty przewozowej wyraźnie wzrósł udział podróży odbywanych 4–5 razy w tygodniu (z 19% do 78%). W przypadku podróży fakultatywnych można zauważyć, iż przed inwestycją dominowały podróże sporadyczne (ponad 70% wskazań), a po wdrożeniu inwestycji znacznie częściej wskazuje się na podróże raz w tygodniu (prawie 60%). Widać wyraźnie, jak zmieniły się zachowania pasażerów w związku z poprawą jakości powiązania transportowego. Uzupełnieniem tych spostrzeżeń są wyniki odpowiedzi na pytanie, jaki jest wpływ tej inwestycji na podział zadań przewozowych. Jedno z pytań dotyczyło korzystania z innych niż transport zbiorowy środków transportu na tej trasie w odniesieniu do częstotliwości podróżowania.



Rys. 3.7. Udział wskazań dotyczący częstotliwości wyboru innych środków transportu w podróżach obligatoryjnych dla stanu przed i po wdrożeniu inwestycji – przykład linii kolei aglomeracyjnej w kierunku Góry Kalwarii

Na rysunku 3.7 przedstawiono wyniki odpowiedzi na pytanie dotyczące wyboru innych środków transportu (samochodu osobowego) przed i po wdrożeniu inwestycji.

W związku z pojawieniem się nowego, atrakcyjnego połączenia znacznie zmniejszyła się liczba podróży realizowanych innymi środkami transportu niż miało to miejsce przed wdrożeniem inwestycji. Największe zmiany dotyczą częstych podróży (4–5 × w tygodniu) oraz całkowitej rezygnacji z podróżowania konkurencyjnymi środkami transportu. Oczywiście zmiany te nie dotyczą wyłącznie rezygnacji z samochodu osobowego, ale również przejścia od innych przewoźników transportu zbiorowego (rys. 3.8).



Rys. 3.8. Udział wskazań dotyczący częstotliwości wyboru innych środków transportu w podróżach fakultatywnych dla stanu przed i po wdrożeniu inwestycji – przykład linii kolei aglomeracyjnej do Góry Kalwarii

W przypadku podróży fakultatywnych obserwujemy istotny wzrost rezygnacji z innego środka transportu (z 15% do 43%). Wzrost wskazań całkowitej rezygnacji z innych niż transport zbiorowy środków transportu oznacza *de facto* bardzo korzystną zmianę w podziale zadań przewozowych. Dla pozostałych przedziałów (częstotliwości wyboru innego środka transportu) dostrzec można pozytywną tendencję zmian w kierunku niższego udziału innych sposobów podróżowania.

Przedstawione powyżej wyniki badań dotyczą jedynie przypadku jednej z analizowanych linii, lecz dla pozostałych obszarów objętych badaniami kierunki zmian są podobne.

Jednakże z punktu widzenia analiz wielkości ruchu wzbudzonego wyniki te nie mają kluczowego znaczenia, a mogą być wykorzystane do sprawdzenia ogólnych tendencji występujących w związku z pojawieniem się nowego powiązania transportowego. Najważniejsze wyniki badań dotyczą stwierdzeń ankietowanych o dodatkowych podróżach związanych z pojawieniem się nowego połączenia. Bardzo interesujące wyniki otrzymujemy, gdy sprawdzimy, jak ankietowani łączyli stwierdzenia dotyczące dodatkowych podróży z własną oceną czasu podróży (pytanie odnosiło się do oceny, czy czas podróży uległ odczuwalnemu skróceniu, czy nie). Dostrzeżono tutaj wyraźną zależność między skróceniem czasu, a dodatkowymi podróżami, których w sytuacji pierwotnej (bez inwestycji) nie było. Wysoka wartość współczynnika determinacji ( $R^2 = 0,91$ ) potwierdza istnienie związku łączącego skrócenie czasu przejazdu z dodatkowymi podróżami.

### **Wyniki badań dla linii tramwajowej w Krakowie**

W przypadku linii tramwajowej na osiedle Golikówka w Krakowie możliwe było przeprowadzenie badań w dwóch etapach, tj. po jednym miesiącu od uruchomienia linii oraz po jednym roku jej funkcjonowania. Wykonanie drugiego pomiaru, tzw. *follow-up* wg tych samych założeń metodycznych oraz w oparciu o identyczny kwestionariusz badawczy, umożliwiło porównanie wyników obu etapów badania. Na tej podstawie można sprawdzić, w jakim tempie zmieniały się i utrwały nowe zachowania transportowe użytkowników transportu zbiorowego, w zależności od czasu, jaki upłynął od wprowadzonej zmiany. Bardzo charakterystyczna jest wyraźna zmiana w udziale odpowiedzi dotyczących skrócenia czasu podróży wskutek otwarcia nowej linii tramwajowej. Po roku od jej oddania wyraźnie wzrósł udział osób, dla których ta linia nie wpłynęła na odczuwalne skrócenie czasu podróżowania – negatywnych odpowiedzi było ok. 5% w roku 2010 i prawie 20% w roku 2011. Warte podkreślenia jest również wyraźna różnica między dodatkowymi podróżami związanymi z pojawieniem się nowej linii tramwajowej – pomimo prawie 90% udziału odpowiedzi związanych z odczuwalnym skróceniem czasu podróży, natomiast tylko 22% ankietowanych stwierdziło, że częściej podróżuje. W roku 2011, a więc w rok po oddaniu inwestycji tramwajowej, pomimo spadku liczby osób deklarujących odczuwalne skrócenie czasu podróży, bardzo wyraźnie wzrósł udział osób deklarujących realizację dodatkowych podróży, aż do 50%.

Proces badania ruchu wzbudzonego jest bardzo złożony. Trudno jest bowiem wyodrębnić dodatkowe podróże wynikające z faktu pojawienia się inwestycji spośród ogólnej liczby pasażerów na nowym ciągu komunikacyjnym (część pasażerów została przejęta z innych środków transportu zbiorowego, a część przeszła z transportu indywidualnego). Do tego dochodzi efekt synergii inwestycji, czyli wzmocnienia jej roli wskutek sprawnego połączenia z systemem transportowym i wskutek tego otrzymujemy skomplikowany układ wzajemnych zależności, którego elementem jest również wpływ podróży wzbudzonych. Odseparowanie ruchu wzbudzonego może być dokonane przez właściwie zaprogramowany proces badawczy, bazujący na analizie zachowań transportowych pasażerów i określony na podstawie badań preferencji stwierdzonych.

Pojawienie się nowego środka transportu (lub wyraźna poprawa warunków podróży) wpływa pozytywnie na zwiększenie liczby dodatkowych podróży. We wszystkich badanych inwestycjach zarejestrowano znaczny wzrost podróży realizowanych przez pasażerów, związany bądź ze skróceniem czasu jazdy (autobusy poruszające się po wydzielonych pasach autobusowych w Warszawie), bądź ze zwiększeniem częstotliwości kursowania (kole aglomeracyjna z Legionowa i Góry Kalwarii), a także całkowicie nowe, szybkie połączenie tramwajowe (Gdańsk, Kraków). Szczególnie wartościowe wyniki uzyskano podczas badań przeprowadzonych na nowej linii tramwajowej w Krakowie, ponieważ badania te prowadzono tam po oddaniu i po rocznym czasie eksploatacji linii tramwajowej. Wykazano w ten sposób dynamikę zmian i potwierdzono, że istnieje znaczna różnica w odpowiedziach udzielanych we wstępnym okresie funkcjonowania inwestycji i po upływie roku.

Wyniki prowadzonych badań ankietowych stanowią podstawę do budowy autorskiego modelu estymującego udział ruchu wzbudzonego. Model ten bazuje na układzie wnioskowania rozmytego i wykorzystuje szereg zależności o charakterze uogólnionym, wyrażanym potocznymi formami lingwistycznymi, tj. duże skrócenie czasu podróży, mały wzrost liczby podróży itp. Stąd w analizie wyników badań ankietowych sporo odwołań bazujących na nieprecyzyjnych określeniach.

## **4. MODEL CZĄSTKOWY WYZNACZAJĄCY UDZIAŁ PODRÓŻY WZBUDZONYCH W TRANSPORCIE ZBIOROWYM**

### **4.1. Założenia modelu cząstkowego**

W warunkach krajowych efektywność funkcjonalna inwestycji w rozwój infrastruktury transportu zbiorowego jest oceniana w oparciu o klasyczne modele czterostadiowe, nieuwzględniające występowania podróży wzbudzonych. Korzystając z przeprowadzonych badań własnych oraz doświadczeń autorów prowadzących badania za granicą, można opracować narzędzie pozwalające na estymację udziału podróży wzbudzonych związanych z rozwojem systemu transportu zbiorowego.

Bardzo ważną cechą dostępnych danych i procedur związanych z podróżami wzbudzonymi jest ich nieprecyzyjny charakter, ponieważ zjawisko to jest problemem bardzo złożonym i trudnym w opisie. Bardzo często, w decyzji dotyczącej podjęcia dodatkowej podróży, główną rolę pełnią emocje użytkownika systemu, a nie zimna kalkulacja, która w postaci teorii użyteczności jest wykorzystywana do modelowania indywidualnych decyzji transportowych. Zakłada się w niej, że użytkownik podejmuje racjonalne decyzje, minimalizując swój koszt uogólniony podróży (Avineri [7]). Takie postawienie sprawy utrudnia proces badawczy zjawiska, ponieważ respondenci nie zawsze są w stanie sprecyzować powodów, dla których np. częściej podróżują. Pojęcie częstszych podróży jest samo w sobie nieprecyzyjne i trudne do uchwycenia przez użytkownika (stąd w samym formularzu ankiety (w załączniku) nie ograniczono ogólnych sformułowań, co przyczyniło się do większego zrozumienia pytania i udzielenia właściwej odpowiedzi). Ważnym aspektem przeprowadzonych badań (rozdział 3) jest wartościowanie oszczędności czasu oraz do wartościowania częstotliwości kursowania linii transportu zbiorowego. Dla przeciętnego pasażera operowanie wartością częstotliwości kursowania jest znacznie trudniejsze od potocznego sformułowania. Oczywiście można podjąć próbę matematycznej precyzji w parametryzacji korzyści, np. z funkcjonowania nowej linii tramwajowej przez zestaw wskaźników przedstawionych w formie pytań szczegółowych o ilościowym charakterze. Jednakże w takim przypadku mogłoby się zdarzyć pominięcie



istotnych kwestii przez utrudnienie respondentowi odpowiedzi na zadane pytanie (należy pamiętać, że badania były prowadzone nie pośród ekspertów, a pasażerów, najczęściej nieznających specyfiki funkcjonowania systemu transportowego).

Avineri [7] sprawdził możliwość zastosowania rozmytości w modelowaniu popytu jako element opisujący sposób postrzegania korzyści przez użytkowników w procesie podejmowania decyzji o podróży. Natomiast Park i in. [168] wskazali, że zaletą zbiorów rozmytych jest praca z naturalnym językiem, znacznie łatwiejszym do zrozumienia przez przeciętnego użytkownika systemu transportowego niż precyzyjny język matematyczny.

Przyjmuje się więc, że opis parametrów będzie miał charakter niejednoznaczny i nieprecyzyjny, co z kolei predestynuje zagadnienie do zakwalifikowania go jako pojęcie rozmyte i **uzasadnia zastosowanie logiki rozmytej** w dalszym procesie modelowania.

## 4.2. Elementy teorii zbiorów rozmytych

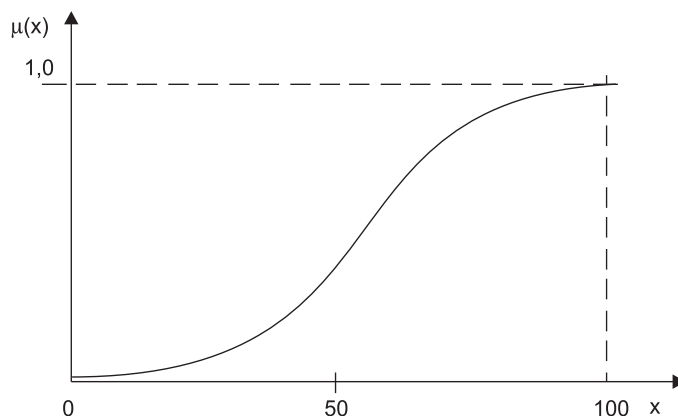
W tradycyjnej logice dwuwartościowej dany element albo może należeć do zbioru, albo nie. Nie ma możliwości opisanie elementów należących częściowo do jednego lub drugiego zbioru. Problem ten staje się wyraźny zwłaszcza w sytuacji, kiedy do opisanie pewnej zależności wykorzystujemy pojęcia lingwistyczne, np. „mały”, „duży” (Kosiński i in. [124]). Zadeh [240] zaproponował pojęcie zbioru rozmytego, przedstawionego jako zbiór par:

$$A = \{(\mu_A(x), x)\} \quad (23)$$

gdzie:  $\mu_A: X \rightarrow [0, 1]$  jest funkcją przynależności, która każdemu elementowi  $x$  z przestrzeni  $X$  przyporządkowuje stopień przynależności do danego zbioru rozmytego: od nieprzynależności ( $\mu_A(x) = 0$ ), przez przynależność częściową ( $0 < \mu_A(x) < 1$ ), do całkowitej przynależności ( $\mu_A(x) = 1$ ).

Jak widać, oprócz alternatywy „przynależność – nieprzynależność”, charakterystycznej dla zbioru konwencjonalnego, występują przypadki przynależności częściowej. Teoria zbiorów rozmytych jest więc teorią klas, w których przejście od przynależności do nieprzynależności nie ma charakteru skokowego, a jest stopniowe (Kacprzyk [119]). Pojęcie zbioru rozmytego może służyć do formalnego ujmowania i ilościowego wyrażania pojęć nieostrych i niejednoznacznych. Niech przykładem będzie pojęcie „duża liczba”. Każde pojęcie rozmyte musi mieć określony obszar rozważań, relatywizujący lingwistyczne pojęcia odbierane przez człowieka. Dla obszaru rozważań  $X [0, 100]$  funkcja przynależności pojęcia „duża liczba” może

wyglądać zgodnie z rys. 4.1 (Kacprzyk [119]). Jak można zauważyć, z określaniem kształtu funkcji przynależności związany jest również pewien subiektywizm oceny związany z indywidualnym postrzeganiem rzeczywistości.



Rys 4.1. Przykład funkcji przynależności dla pojęcia „duża liczba” (Kacprzyk [119])

Podjęmowanie decyzji w warunkach rozmytości może opierać się na procesie przybliżonego rozumowania, bazującego na elementach logiki rozmytej Kacprzyk [118], *Matlab* [65], Rutkowska [188], Terano [226], Jones [117], Driankov [56]. W niniejszej dysertacji przyjęto następującą implikację dla rozmytego zdania warunkowego:

**IF**  $P$  jest  $A1$  **AND/OR**  $Q$  jest  $A2$  **THEN**  $R$  jest  $A3$

gdzie:

- $P, Q, R$  – oznaczają wybrane pojęcia (zmienne lingwistyczne), np. „iloraz czasu podróży”, „udział w podróżach”;
- $A1, A2, A3$  – zbiór terminów lingwistycznych wraz z odpowiadającym im funkcjom przynależności;
- AND/OR/THEN** – operacje mnogościowe na funkcjach przynależności.

Warunki odpowiadające danym wejściowym nazywa się poprzednikiem reguły, natomiast warunki odpowiadające danym wyjściowym nazywa się następnikiem reguły (Driankov [56]). Do podstawowych operacji na zbiorach rozmytych należą:

- a) Suma (mnogościowa) zbiorów rozmytych  $P, Q$ , należących do tej samej przestrzeni rozważań, definiowana jest jako:

$$\mu_{P+Q}(x) = \mu_P(x) \vee \mu_Q(x) \quad (24)$$

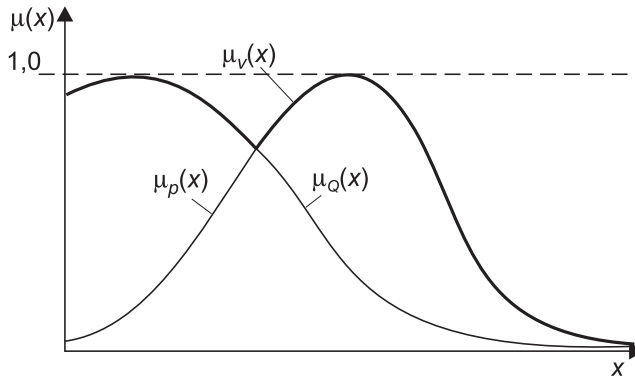
przy czym pojęcie sumy zbiorów rozmytych odpowiada spójnikowi „lub” – OR. Operację tę nazywa się również operacją max [65].

- b) Przecięcie zbiorów rozmytych  $P$ ,  $Q$ , należących do tej samej przestrzeni rozważań – definiowana jest jako:

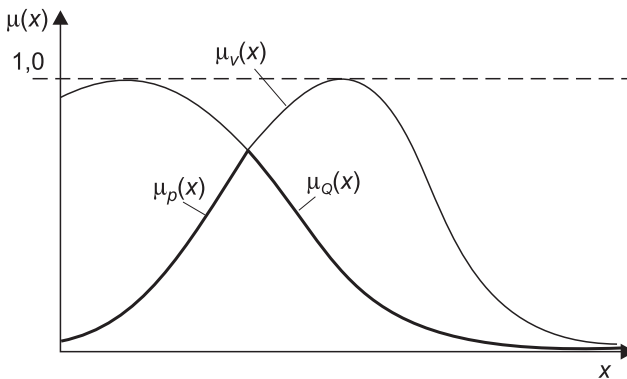
$$\mu_{P+Q}(x) = \mu_P(x) \wedge \mu_Q(x) \quad (25)$$

przy czym pojęcie przecięcia zbiorów rozmytych odpowiada spójnikowi „i” – AND. Operację tę nazywa się również operacją MIN [65]. Przecięcie zbiorów rozmytych jest również wykorzystywane do opisu procesu implikacji – THEN, w regułach wnioskowania.

Graficzne wyjaśnienie istoty operacji mnogościowych przedstawiono na rys. 4.2 i 4.3.



Rys. 4.2. Istota operacji mnogościowych: suma dwóch zbiorów rozmytych (Kacprzyk [119])



Rys. 4.3. Działanie operacji mnogościowych: przecięcie dwóch zbiorów rozmytych (Kacprzyk [119])

Kolejną ważną definicją, wykorzystaną w niniejszym opracowaniu, będzie pojęcie normalizacji zbioru rozmytego. Jeżeli wysokość zbioru rozmytego  $h(A)$  (definiowana jako  $h(A) = \bigvee_{x \in X} \mu_A(x)$ ,  $h(A) \in [0, 1]$ ) jest mniejsza od 1,0, w takim przypadku zbiór  $A$  nazywamy zbiorem subnormalnym. Z każdego zbioru subnormalnego możemy otrzymać zbiór normalny za pomocą operacji normalizacji:

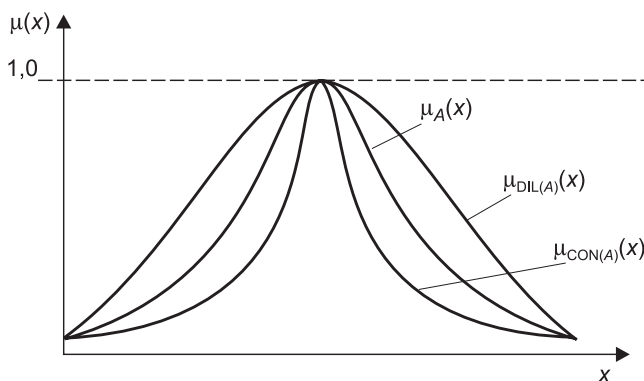
$$\mu_{A^N}(x) = \frac{\mu_A(x)}{h(A)}, \quad \forall x \in X \quad (26)$$

W niniejszej pracy wykorzystane będą również operacje potęgowe na zbiorach rozmytych. Specjalnymi przypadkami takich operacji będzie operacja koncentracji zbioru rozmytego ( $A$ ), oznaczana  $CON$ , a definiowana jako:

$$\mu_{CON(A)}(x) = (\mu_A(x))^2 \quad (27)$$

Druga operacją jest operacja rozcieńczania zbioru rozmytego (rys. 3.14), oznaczana  $DIL$ , a definiowana jako:

$$\mu_{DIL(A)}(x) = (\mu_A(x))^{0,5} \quad (28)$$



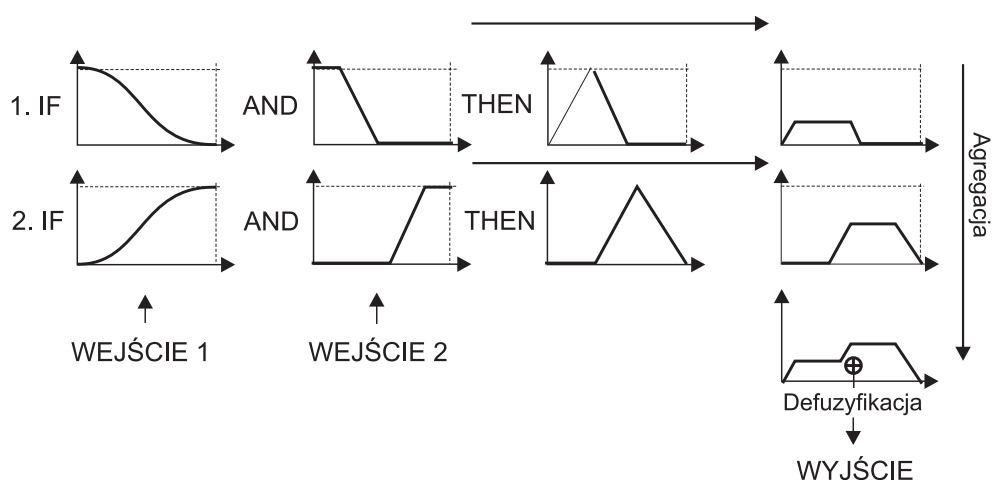
Rys. 4.4. Działanie operacji rozcieńczania i koncentracji zbiorów rozmytych (Kacprzyk [119])

Operacje te odgrywają dużą rolę w semantyce zmiennych lingwistycznych. Wnioskowanie rozmyte opiera się na operacjach mnogościowych, wykonywanych na odpowiednio dobranych funkcjach przynależności. Cały proces wnioskowania będzie opracowany przy pomocy programu *Matlab* z nakładką do zbiorów rozmytych.

### 4.3. Wnioskowanie rozmyte

Proces wnioskowania rozmytego polega na powiązaniu odpowiednimi regułami danych wejściowych oraz oczekiwanych wyników. W ramach niniejszej pracy zdecydowano się wykorzystać narzędzie jakie jest dostępne w pakiecie *Matlab* [65] – nakładkę Fuzzy, w której są dostępne dwa sposoby modelowania procesu wnioskowania: system Sugeno (Sugeno i in. [207]) i system Mamdani (Mamdani [147]). System Sugeno przewiduje do odwzorowania danych wyjściowych funkcję stałą lub liniową, co ogranicza możliwość opisu zjawisk natomiast w przypadku modelu Mamdaniego możliwe jest zastosowanie również funkcji nieliniowych (np. Gaussa). Działanie systemu Mamdaniego składa się z pięciu etapów (Mamdani [147]):

1. Definicja danych wejściowych oraz przyporządkowanie ich do określonego zbioru rozmytego przy pomocy zdefiniowanej funkcji przynależności (określenie poprzednika reguły);
2. Jeżeli dane wejściowe opisane są przez więcej niż jeden zbiór rozmyty, należy ustalić odpowiednią składnię warunków przy pomocy spójników AND lub OR;
3. Przygotowanie reguł wnioskujących i przyporządkowanie im operatora implikacji THEN (określenie następnika reguły). Każda reguła może mieć przypisaną wagę. Jeżeli waga przyjmie wartość 1,0, oznacza to, że reguły są traktowane jednakowo podczas procesu implikacji. Zmniejszenie wagi wiąże się ze zmniejszeniem wpływu danej reguły na końcowy wynik implikacji;
4. Agregacja wyników wnioskowania. Jako zbiór wyjściowy w procesie wnioskowania otrzymuje się funkcję przynależności przypisaną każdej regule.



Rys. 4.5. Graficzna interpretacja struktury układu wnioskowania rozmytego (Szarata [216])

Proces agregacji polega na złożeniu otrzymanych funkcji przynależności jako ich sumy mnogościowej (operacja max). Otrzymujemy w ten sposób jedną funkcję rozmytą;

5. Proces defuzyfikacji. Polega on na podaniu jednej wartości wyjściowej (nierozmytej) wyznaczonej na podstawie zbioru rozmytego. Najbardziej znaną metodą defuzyfikacji jest metoda centroidy, czyli środka ciężkości (Park i in. [168]), w której za wartość wyjściową przyjmuje się liczbę odpowiadającą położeniu środka ciężkości powierzchni pod wykresem funkcji zagregowanej.

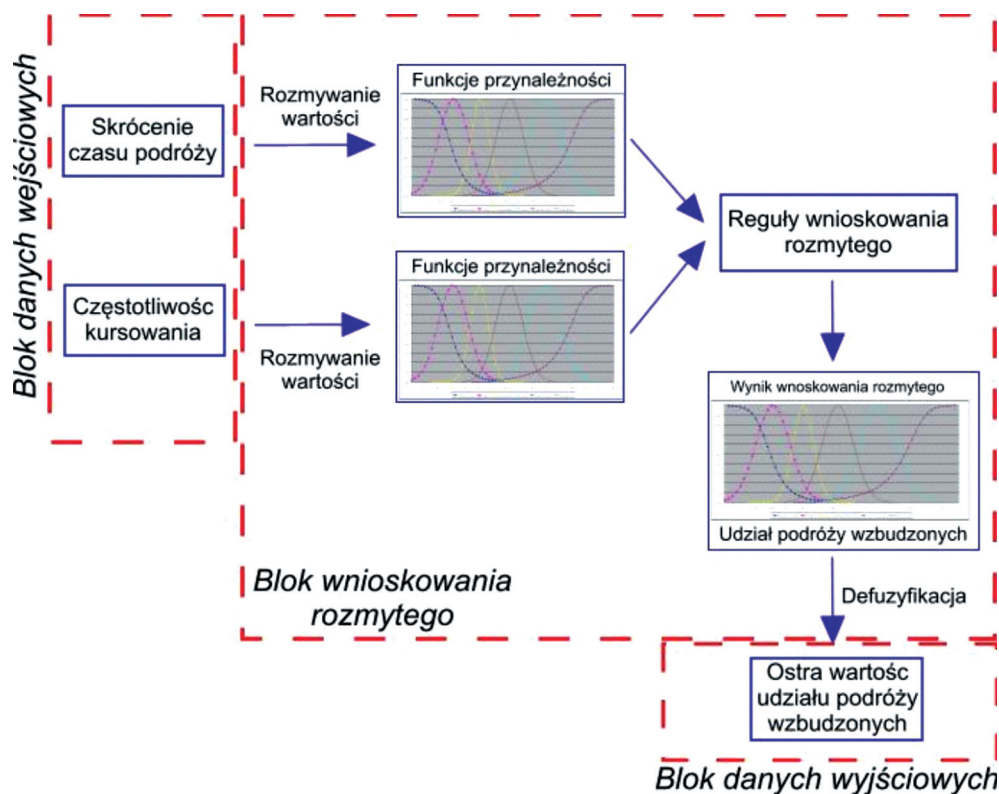
Strukturę układu wnioskowania rozmytego graficznie przedstawiono na rysunku 4.5.

#### 4.4. Struktura modelu cząstkowego

Do budowy modelu wnioskowania rozmytego należy zdefiniować blok danych wejściowych (jakimi zmiennymi dysponujemy) oraz wyjściowych (dane, jakie oczekujemy). Analizy ruchu wzbudzonego prowadzone w ramach niniejszej dysertacji opierają się w głównej mierze na dostępnych modelach transportowych miast stanowiących podstawową bazę danych. Ponadto, ponieważ model wnioskowania rozmytego stanowi oddzielny moduł w procesie modelowania podróży wzbudzonych, struktura modelu cząstkowego powinna spełniać wymagania kompatybilności z dostępnym zestawem danych, co częściowo determinuje przyjęte rozwiązania.

Oceniając nową linię transportu zbiorowego i jej wpływ na decyzje podejmowane przez użytkowników systemu, najłatwiej opisać ją dwoma parametrami (traktowanymi jako czynniki sprawcze podróży wzbudzonych): skróceniem czasu podróży oraz zmianą częstotliwości kursowania. Są to wartości najłatwiej dostrzegalne przez pasażerów jednocześnie łatwe do pozyskania w modelu transportowym miasta. W dalszej części pracy cecha zmiany częstotliwości kursowania dla lepszej czytelności będzie reprezentowana przez samą częstotliwość wyrażoną w minutach (wynika to z prowadzonych badań ankietowych, opisanych w rozdziale 3, gdzie respondenci określali taką wartość jako średni odstęp obsługi liniami transportu zbiorowego).

Wcześniej wykazywano, że ostre wartości nie odpowiadają charakterowi rzeczywistych procesów podejmowania decyzji przez pasażera, jednak mogą stanowić punkt wyjścia w analizach rozmytych. Prowadzone badania ankietowe (rozdział 3) były ukierunkowane na pozyskanie informacji od pasażerów umożliwiającej rozmycie ostrych wartości pochodzących z modeli symulacyjnych. Oczekiwania, jakie miałyby spełnić model cząstkowy, skupiają się w zasadzie na uzyskaniu jednej informacji – jaki może być udział podróży wzbudzonych, związanych z pojawieniem się



Rys. 4.6. Schemat blokowy układu wnioskującego

danej inwestycji w infrastrukturę transportu zbiorowego. Udział ten powinien być ustalony jako wartość procentowa wzrostu liczby podróży z danego rejonu transportowego, co pozwoli na jego aplikację do modeli transportowych. Zastosowanie procentowego wzrostu ma jeszcze jedną zasadniczą zaletę – w przypadku obszarów nieurbanizowanych, w których potencjał ruchotwórczy jest niewielki, również udział podróży wzbudzonych będzie, w wartościach bezwzględnych, niewielki. Wyklucza to sytuację, w której pojawienie się linii tramwajowej, przekraczającej stosunkowo słabo zamieszkałe rejonu wygeneruje tam podróże wzbudzone. Struktura modelu przyjmie więc następujący układ (rys. 4.6).

#### 4.4.1. Blok danych wejściowych – poprzednik reguły wnioskującej

Dane wejściowe składają się z dwóch zmiennych lingwistycznych: skrócenie czasu podróży (o przyjętej nazwie *skrócenie*) oraz częstotliwości kursowania taboru (o przyjętej nazwie *częstotliwość*). Każda ze zmiennych przyjmuje terminy umoż-



liwiający pozycjonowanie ostrych wartości wejściowych. Zbiór terminów zmiennej skrócenie przyjmie następującą postać:

$$\text{skrócenie} = [„małe”; „średnie”; „duże”; „bardzo duże”]$$

Natomiast terminy dla zmiennej częstotliwość, przyjmują postać:

$$\text{częstotliwość} = [„bardzo niska”; „niska”; „przeciętna”; „wysoka”; „bardzo wysoka”]$$

Najważniejszym elementem układu wnioskującego jest kształt funkcji przynależności (Medasani i in. [152]). Ich rolą jest określenie, w jakiej części dana ostra wartość należy do zbioru opisanego konkretnym terminem (w analizie rozmytej dany element może przynależeć do zbioru w stopniu częściowym). Sposobów doboru kształtu funkcji przynależności jest bardzo dużo: metoda histogramów (Medasani i in. [152]), teoria możliwości Zadeha (Zadeh [241]), teoria sieci neuronowych z propagacją wsteczną (Jang i in. [112]), samodostrajająca się mapa cech (Chih-Chung i in. [40]), metoda wiarygodnych sieci neuronowych (Plausible Neural Network) Kuo-chen i in. [135] i inne. Teoria zbiorów rozmytych powinna odzwierciedlać naturalne procesy, jakie obserwujemy w otaczającym nas systemie transportowym (Bilgic i in. [23]). Teoria ta musi więc korespondować z doświadczeniami, jakie mają użytkownicy systemu. W tym celu próbuje się opracować metody doboru kształtu funkcji bazujące na wynikach badań ankietowych prowadzonych pośród ekspertów lub użytkowników systemu (Ross [184], Szarata [209]). Takie intuicyjne funkcje jest bardzo trudno opracować, ponieważ ich znaczenie i sens semantyczny nie są jednoznaczne (Baran [12]). Najprostsze kształty funkcji przynależności to funkcje trójkątne (np. Sassanelli [191], Avineri [7]) lub trapezoidalne (np. Rudnicki [186], Lee [138]), Kikuchi [120]). Hanaoka i in. [86] przedstawili procedurę bazującą na ocenach eksperckich, które stanowią podstawę do budowy kształtu funkcji przynależności jako wynik analizy regresji, stosując kształt trójkątny funkcji przynależności. Podobnie Baas i in. [9] zaproponowali, aby parametry trójkątnej (i pośrednio trapezoidalnej) funkcji przynależności wyznaczać jako minimalną, średnią oraz maksymalną ocenę ekspertów:

$$a_j = \min_i \{x_{i,j}\} \quad (29)$$

$$b_j = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_{i,j} \quad (30)$$

$$c_j = \max_i \{x_{i,j}\} \quad (31)$$

gdzie:

- $a_j, b_j, c_j$  – wartość minimalna, średnia i maksymalna ocen ekspertów,
- $x_{(i,j)}$  – ocena eksperta  $i$  dla parametru  $j$ ,
- $n$  – liczba ocen eksperckich.

Jednakże wadą powyższego sposobu jest bardzo duży wpływ ocen skrajnych na wyniki końcowe. Ma to duże znaczenie zwłaszcza w przypadku dużej liczby ankiet. Ponadto trójkątny kształt funkcji znacznie upraszcza problem przynależności między wartością średnią a maksymalną/minimalną. Aby zredukować wpływ skrajnych odpowiedzi na kształt funkcji, proponuje się wykorzystać funkcje dzwonową, bazującą na równaniu krzywej Gaussa:

$$f(x, \delta, c) = e^{\frac{-(x-c)^2}{2\delta^2}} \quad (32)$$

gdzie:  $\delta$ ,  $c$  są parametrami funkcji, odpowiednio odchyleniem standardowym oraz wartością średnią.

Krzywa Gaussa jest symetryczna, co ma jeszcze jedną zaletę: Driankov [56] wykazał, że symetryczność funkcji przynależności ma istotny wpływ na proces defuzyfikacji, w którym wartości rozmyte sprowadza się do jednej ostrej wartości (odnosi się to zwłaszcza do następnika reguły wnioskującej). W przypadku skrajnych terminów (np. „małe skrócenie”) funkcja Gaussa nie znajduje zastosowania, ponieważ terminy te charakteryzują się przyjmowaniem wartości 1,0 dla wszystkich elementów poniżej lub powyżej wartości średniej. W tym celu wykorzystano funkcje jednostronnie otwarte typu sigmoidalnego (oznaczenia jak wyżej):

$$f(x, \delta, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}} \quad (33)$$

Parametry funkcji przynależności wyznaczono na podstawie badań ankietowych pasażerów transportu zbiorowego przeprowadzonych w ramach badań na udziałem podróży wzbudzonych na liniach tramwajowych i autobusowych (rozdział 3). Jedno z pytań dotyczyło przypisania przez pasażera wartości skrócenia czasu podróży do jednego terminu opisującego zmienne lingwistyczne *skrócenie* i *częstotliwość*. Pasażerowie podawali liczbowo, ile minut oznacza dla nich np. małe skrócenie czasu podróży lub niska częstotliwość kursowania. Do analiz przyjęto łącznie odpowiedzi z 1753 prawidłowo wypełnionych ankiet (pozostała część ankiet nie zawierała odpowiedzi na to pytanie, lub odpowiedzi były niekompletne). W wyniku analizy odpowiedzi udzielonych przez respondentów wyznaczono wartość średnią i odchylenie standardowe z ocen poszczególnych terminów, stanowiące żądane parametry funkcji przynależności – tabela 4.1.

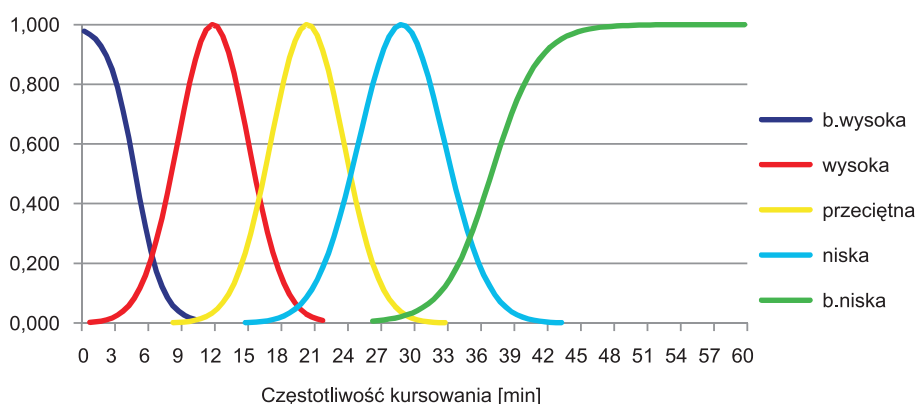
Tabela 4.1

Parametry funkcji przynależności na podstawie badań preferencji pasażerów

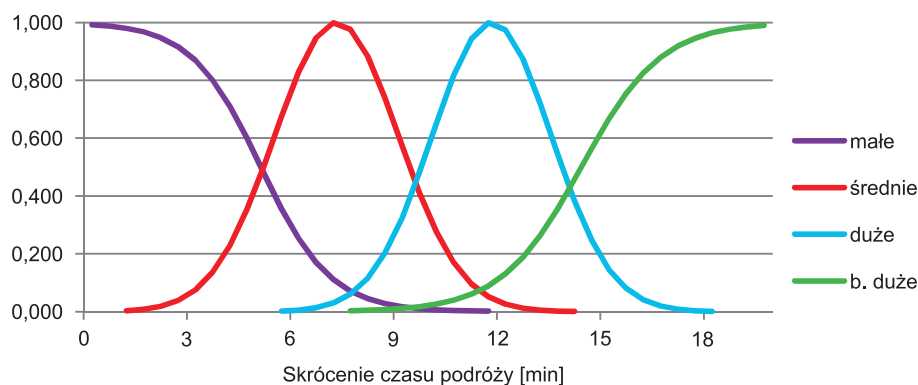
Skrócenie			Częstotliwość		
termin	$c$ [min]	$\delta$ [min]	termin	$c$ [min]	$\delta$ [min]
„małe”	5,4	-0,992*	„bardzo niska”	37,2	0,471
„średnie”	7,6	1,802	„niska”	29,1	3,867
„duże”	12,1	1,733	„przeciętna”	20,6	3,284
„bardzo duże”	14,7	0,863	„wysoka”	12,1	3,181
			„bardzo wysoka”	5,1	-0,823*

\* Ujemna wartość wskazuje kierunek otwarcia jednostronnego funkcji przynależności.

Opracowane funkcje przynależności zestawiono graficznie na rysunkach 4.7 i 4.8.



Rys. 4.7. Kształty funkcji przynależności dla zmiennej lingwistycznej częstotliwość



Rys. 4.8. Kształty funkcji przynależności dla zmiennej lingwistycznej skrócenie

#### 4.4.2. Blok danych wyjściowych – następnik reguły wnioskującej

Następnik reguły wnioskującej stanowi najważniejszy element w układzie wnioskującym z punktu widzenia oczekiwanych wyników. Zawiera on bowiem informacje wyjściowe, jakie będą stanowiły podstawę do oceny wielkości ruchu wzbudzonego. Sposób doboru kształtu funkcji przynależności dla następni-ka reguły różni się od sposobu dotyczącego poprzednika reguł wnioskujących. Udział podróży wzbudzonych nie był przedmiotem badań ankietowych, ponieważ pasażerowie nie wiedzą, jaką wartość może przyjmować. Zdecydowano wykorzystać wyniki badań eksperckich dotyczących innego problemu – podziału zadań przewozowych modelowanych za pomocą układu wnioskowania rozmytego (Szarata [216]). Metoda wnioskowania rozmytego ma charakter metody intuicyjnej, oczekiwane wyniki również powinny odnosić się do intuicyjnej oceny udziału podróży wzbudzonych. Ross [184] wskazuje na intuicję jako jedno ze sposobów kształtowania funkcji przynależności. W niniejszej pracy postanowiono wykorzystać doświadczenie pochodzące z prac nad modelowaniem podziału zadań przewozowych i połączyć to w wynikami badań nad udziałem ruchu wzbudzonego.

Podobnie jak w badaniach nad modelowaniem podziału zadań przewozowych (Szarata [216]) całą skalę spodziewanych udziałów podróży wzbudzonych podzielono na 5 części i przyjęto następujące terminy opisujące zmienną lingwistyczną *udział*:

$$udział = \{ „bardzo mały”; „mały”; „przeciętna”; „duży”; „bardzo duży” \}$$

Funkcje przynależności opisujące każdy z przyjętych terminów powinny być rozmieszczone w obszarze rozważań obejmującym spodziewane wartości udziału podróży wzbudzonych. Przy uwzględnieniu doświadczeń z Wielkiej Brytanii (Goodwin [73], SACTRA [204], Dowling [55]) czy w Hiszpanii (Gonzalez, Marrero [72]) udział podróży wzbudzonych nie przekracza 10–11% w ogóle realizowanych podróży. Stąd obszar rozważań ograniczono przedziałem  $\langle 0; 12 \rangle \%$ . Jako kształt funkcji przynależności przyjęto kształty funkcji stosując funkcje sigmoidalne dla skrajnych terminów i funkcję Gaussa dla pozostałych. Posiłkowano się tutaj wynikami badań nad modelowaniem podziału zadań przewozowych (Szarata [216]), gdzie opracowano identyczny układ funkcji przynależności odnoszący się jednak do udziału podróży transportem zbiorowym. Przez analogię przyjęto zatem ten sam układ funkcji, jednakże rozmieszczając je w przestrzeni rozważań  $\langle 0; 12 \rangle \%$ , co pozwoliło wyznaczyć parametr  $c$ . Następnie przejęto parametr  $\delta$ . W tabeli 4.2 zestawiono parametry funkcji przynależności dla terminów.

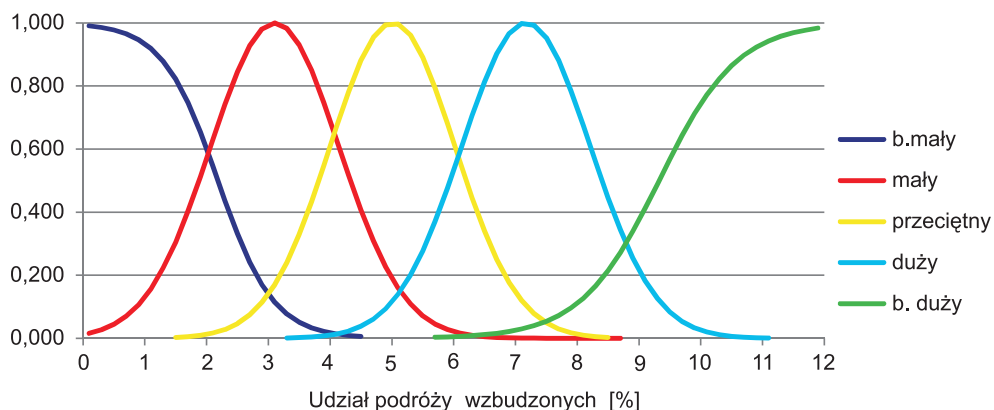
Opracowane funkcje przynależności zestawiono graficznie na rysunku 4.9.

Tabela 4.2

Parametry funkcji przynależności dla następnika reguł wnioskujących – udział podróży wzbudzonych w ogóle podróży (wg Szarata [216])

termin	$c$ [%]	$\delta$ [%]
„bardzo mały”	2,3	–2,231
„mały”	3,2	1,041
„przeciętny”	5,1	1,013
„duży”	7,3	1,044
„bardzo duży”	9,4	1,575

\* Ujemna wartość wskazuje kierunek otwarcia jednostronnego funkcji przynależności.



Rys. 4.9. Kształt funkcji przynależności dla zmiennej lingwistycznej *udział*

#### 4.4.3. Zdefiniowanie reguł wnioskujących

Kolejnym elementem układu wnioskowania rozmytego jest blok reguł wnioskowania. Składa się on z układu reguł typu IF...THEN. Semantykę reguł opracowuje się, wykorzystując spójnik AND lub OR w poprzedniku reguł wnioskujących (Ross [184]). Metoda ta została nazwana Intersection Rule Configuration (IRC) przez Comba i in. [42], ponieważ proces oddziaływania połączony reguł poprzednika wpływa na wynik całego układu wnioskującego. Formalnie liczba możliwych reguł może być wyznaczona jako iloczyn liczby terminów wszystkich zmiennych lingwistycznych. W badanym przypadku będzie to  $R = 4 \cdot 5 \cdot 5$ , co daje 100 możliwych reguł wnioskujących. Jednakże pośród tak dobranych reguł pojawią się mniej prawdopodobne lub wręcz pozbawione logiki, np.

IF częstotliwość jest „bardzo niska” AND skrócenie jest „małe” THEN udział jest „bardzo duży”

W przypadkach bardzo rozbudowanych układów wnioskujących liczba reguł może sięgnąć wielu tysięcy, więc dostępne są metody zmniejszania bazy reguł, np. metoda Comba [42] czy metoda dekompozycji wartości (SVD) zaproponowana przez Yam [237]. Terano [226] wskazuje na możliwość zastosowania heurystyki do poszukiwania właściwego układu reguł wnioskujących, natomiast Devore [51] wyznaczył liczbę reguł, która jest wystarczająca do prawidłowego funkcjonowania układu wnioskującego. Nazwano ją regułą  $k$ -krotną, gdzie liczba reguł stanowi iloczyn liczby terminów przypisanych wyłącznie do poprzednika reguły. W analizowanym przypadku będzie to 5 (liczba terminów dla zmiennej częstotliwość)  $\times$  4 (liczba terminów dla zmiennej skrócenie), co daje 20 reguł wnioskujących:

1. IF(częstotliwość jest „b. niska”)AND(skrócenie jest „małe”)THEN(udział jest „b. mały”)
2. IF(częstotliwość jest „b. niska”)AND(skrócenie jest „średnie”)THEN(udział jest „b. mały”)
3. IF(częstotliwość jest „b. niska”)AND(skrócenie jest „duże”)THEN(udział jest „mały”)
4. IF(częstotliwość jest „b. niska”)AND(skrócenie jest „b. wysokie”)THEN(udział jest „średni”)
5. IF(częstotliwość jest „niska”)AND(skrócenie jest „małe”)THEN(udział jest „mały”)
6. IF(częstotliwość jest „niska”)AND(skrócenie jest „średnie”)THEN(udział jest „mały”)
7. IF(częstotliwość jest „niska”)AND(skrócenie jest „duże”)THEN(udział jest „duży”)
8. IF(częstotliwość jest „niska”)AND(skrócenie jest „b. wysokie”)THEN(udział jest „duży”)
9. IF(częstotliwość jest „przeciętna”)AND(skrócenie jest „małe”)THEN(udział jest „mały”)
10. IF(częstotliwość jest „przeciętna”)AND(skrócenie jest „średnie”)THEN(udział jest „średni”)
11. IF(częstotliwość jest „przeciętna”)AND(skrócenie jest „duże”)THEN(udział jest „duży”)
12. IF(częstotliwość jest „przeciętna”)AND(skrócenie jest „b. duże”)THEN(udział jest „b. duży”)
13. IF(częstotliwość jest „wysoka”)AND(skrócenie jest „małe”)THEN(udział jest „średni”)
14. IF(częstotliwość jest „wysoka”)AND(skrócenie jest „średnie”)THEN(udział jest „duży”)
15. IF(częstotliwość jest „wysoka”)AND(skrócenie jest „duże”)THEN(udział jest „duży”)
16. IF(częstotliwość jest „wysoka”)AND(skrócenie jest „b. duże”)THEN(udział jest „b. duży”)
17. IF(częstotliwość jest „b. wysoka”)AND(skrócenie jest „małe”)THEN(udział jest „średni”)
18. IF(częstotliwość jest „b. wysoka”)AND(skrócenie jest „średnie”)THEN(udział jest „duży”)
19. IF(częstotliwość jest „b. wysoka”)AND(skrócenie jest „duże”)THEN(udział jest „b. duży”)
20. IF(częstotliwość jest „b. wysoka”)AND(skrócenie jest „b. duże”)THEN(udział jest „b. duży”)

Układ wnioskowania rozmytego polega na składaniu odpowiednich funkcji przynależności ze sobą przy zastosowaniu odpowiednich procedur odpowiadających spójnikom zastosowanym w regułach wnioskujących. Następnie funkcje wynikowe dla każdej z reguł są agregowane, co polega na kolejnym składaniu funkcji aż do osiągnięcia pojedynczego wykresu. Efektem zastosowania układu wnioskującego jest więc funkcja wynikowa, której kształt zależy od aktywowanych reguł (poprzez wprowadzenie zmiennych wejściowych) wiążących odpowiednie funkcje przynależności (Szarata [216]).

Ostatnim etapem obliczeń jest wyostrenie wyniku w procesie defuzyfikacji (antyrozmycia). W literaturze znane jest wiele sposobów opisujących proces defuzyfikacji. Ross [184] podaje 7 sposobów, uzależniając wybór właściwej od charakteru problematyki, do której wnioskowanie rozmyte zostało zastosowane. Jednakże najczęściej stosowanymi procedurami są (wg Driankova [56], Kacprzyka [118], Piegata [173], Radziszewskiej [177]):

1. Metoda środka ciężkości (w *Matlabie* nazwana metodą centroid [65]). Polega ona na wyznaczeniu położenia punktu geometrycznego środka ciężkości na wykresie wynikowym. Wartość wyostrzona  $x_{ostre}$  może być wyznaczona ze wzoru:

$$x_{ostre} = \frac{\int_{x_{min}}^{x_{max}} x \cdot \mu_a(x) dx}{\int_{x_{min}}^{x_{max}} \mu_a(x) dx} \quad (34)$$

gdzie:

$\mu_a(x)$  – jest funkcją wynikową układu wnioskującego.

2. Metoda symetrycznej powierzchni (w *Matlabie* nazwana **bisector** [65]). Polega na wyznaczeniu takiej wartości  $x_{ostre}$ , aby pola powierzchni pod wykresem funkcji wynikowej po obu stronach tej wartości były równe:

$$\int_{x_{min}}^{x_{ostre}} \mu(x) dx = \int_{x_{mostre}}^{x_{max}} \mu(x) dx \quad (35)$$

3. Metoda najmniejszej z wartości maksymalnych (w *Matlabie* nazwana **som** [65]). W metodzie tej wyznacza się najmniejszą wartość  $x_{ostre}^{min}$ , dla której wynikowa funkcja przynależności przyjmuje wartość maksymalną:

$$x_{ostre}^{min} = \min \{x \in [x_{min}, x_{max}] : \mu_a(x) = \max_{xp} \{\mu_a(xp)\}\} \quad (36)$$

4. Metoda największej z maksymalnych (w *Matlabie* nazwana **lom** [65]). W metodzie tej wyznacza się największą wartość  $x_{ostre}^{max}$ , dla której wynikowa funkcja przynależności przyjmuje wartość maksymalną:

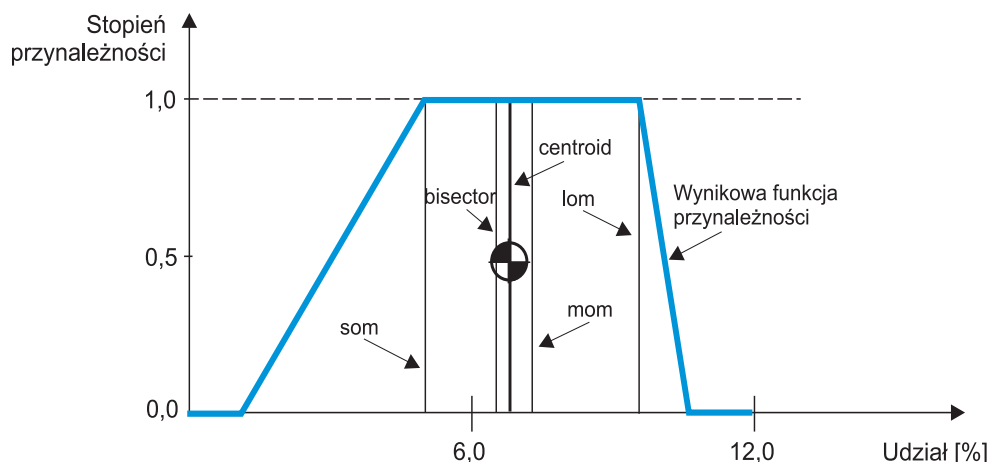
$$x_{ostre}^{max} = \max \{x \in [x_{min}, x_{max}] : \mu_a(x) = \max_{xp} \{\mu_a(xp)\}\} \quad (37)$$



5. Metoda średniego maximum (w *Matlabie* nazwana ***mom*** [65]). Wyznacza się tutaj wartość  $x_{ostre}$  jako średnią z zakresu, dla którego funkcja przynależności  $\mu_a(x)$  przyjmuje wartość maksymalną:

$$x_{ostre} = \frac{x_{ostre}^{\max} + x_{ostre}^{\min}}{2} \quad (38)$$

Graficznie metody defuzyfikacji można czytelnie przedstawić na schemacie (rys. 4.10).



Rys. 4.10. Graficzna prezentacja metod defuzyfikacji na przykładzie zmiennej lingwistycznej *udział*, opisującej udział podróży wzbudzonych

Wybór metody defuzyfikacji jest złożonym problemem i nie ma jednego przepisu wskazującego na wady lub zalety danej metody. Jest ona uzależniona od rangi i charakteru badanego problemu. Hellendoorn i in. [96] opracowali listę pięciu kryteriów, jakimi należy się kierować przy wyborze metody defuzyfikacji:

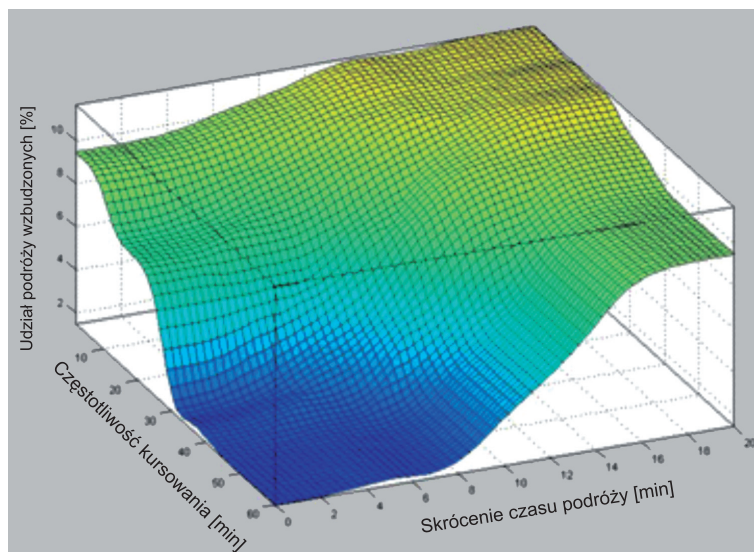
- Zapewnienie ciągłości uzyskanych wyników, tzn. niewielka zmiana w danych wejściowych, nie powinna przyczyniać się do istotnych zmian na wyjściu. Jest to wyraźnie widoczne w przypadku wyboru skrajnych metod (***som*** lub ***lom***);
- Utrzymanie jednoznaczności w wynikach, czyli metoda powinna proponować jedno rozwiązanie. To kryterium dotyczy głównie metody defuzyfikacji polegającej na określeniu środka ciężkości największego obszaru pod wykresem. Metoda ta nie była tu omawiana, ponieważ dotyczy dwumodalnych funkcji wynikowych, których nie wykorzystano w ramach prowadzonych badań własnych;

- Uzyskanie prawdopodobnych wyników, co oznacza, że wartość powinna znajdować się na środku powierzchni znajdującej się pod wykresem wynikowej funkcji przynależności o osiągnięć wysoką wartość przynależności;
- Uproszczenia obliczeniowe – metody *lom*, *mom* czy *som* są szybsze obliczeniowo od metody *centroid*. Jednakże niniejsze kryterium nie ma zastosowania przy wykorzystaniu komputerów o dużych mocach obliczeniowych;
- Można dostosować metody do analizowanego problemu, bazując na doświadczeniu. Jest to bardzo ogólne kryterium i wymaga od operatora podjęcia decyzji w przypadku, gdy wcześniejsze kryteria nie rozstrzygają wyboru.

Uwzględniając powyższe kryteria oraz charakter funkcji wynikowych (funkcje jednomodalne o charakterze przedstawionym na rys. 4.4), przyjęto metodę *centroid* jako wynik prowadzonych analiz.

#### 4.4.4. Wyniki układu wnioskującego

Uruchomienie układu wnioskującego powoduje wygenerowanie zbioru wyników dla wszystkich możliwych kombinacji danych. Oznacza to, że program tworzy przestrzeń rozwiązań dla wszystkich zmiennych wejściowych (tzn. częstotliwość



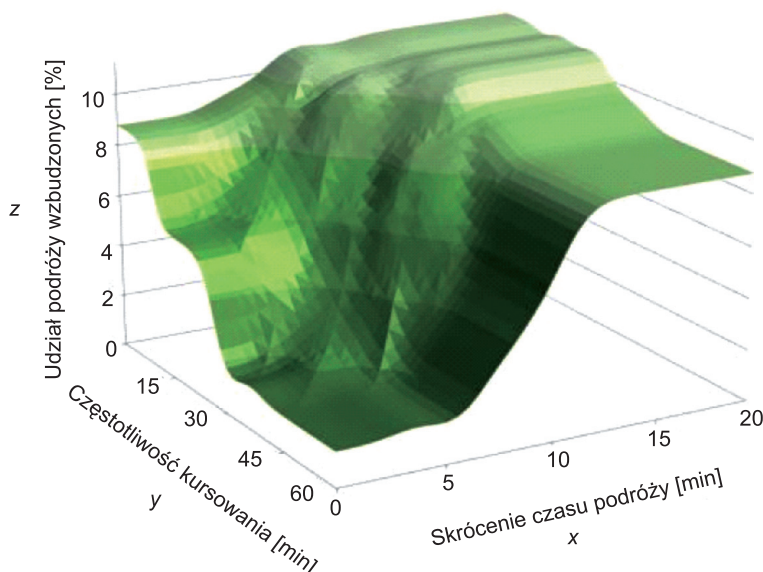
Rys. 4.11. Powierzchnia wynikowa układu wnioskowania rozmytego dla określenia udziału podróży wzbudzonych związanych z nową inwestycją infrastrukturalną (z wykorzystaniem oprogramowania *Matlab*)

i skrócenie), co pozwala na całościową ocenę działania układu. Wnioskowanie rozmyte bazuje na doświadczeniach eksperckich i dostęp do pełnego zbioru rozwiązań umożliwia przeprowadzenie intuicyjnej oceny (zbliżonej charakterem do analizy wrażliwości) uzyskanych wyników. Zbiór rozwiązań w przypadku opracowanego modelu tworzy powierzchnię, którą można przedstawić w trójwymiarowym układzie przestrzennym (rys. 4.11).

Uzyskana powierzchnia przedstawia związek między poziomem skrócenia czasu podróży związanego z pojawieniem się nowej inwestycji w infrastrukturę transportu zbiorowego (np. linia tramwajowa), częstotliwością kursowania taboru a wielkością spodziewanego ruchu wzbudzonego. Dodatkowe podróże zwiększają potencjał ruchotwórczy i dotyczą rejonów transportowych, które są obsługiwane przez nowe połączenie.

#### 4.4.5. Aproksymacja powierzchni wynikowej

Aby model był możliwy do aplikacji, podjęto próbę matematycznego opisu powierzchni wynikowej. W tym celu (przy pomocy programu autorskiego zaimplementowanego w *Matlabie*) wygenerowano zbiór wyjściowy współrzędnych punktów tworzących powierzchnię wynikową (rys. 4.12).



Rys. 4.12. Wykres powierzchni wynikowej układu wnioskującego na podstawie wygenerowanego w programie *Matlab* zbioru punktów

Proces aproksymacji uzyskanej powierzchni przy pomocy równania nie jest jednoznacznie określony i nie ma przepisu pozwalającego na szybki dobór właściwej formuły (Yi i in. [239]). Stąd w przedmiotowym problemie, posłkowano się pewnymi analogiami do mechaniki klasycznej. Przyjęto, że oś  $x$  będzie oznaczała **skrócenie czasu podróży**, oś  $y$  dotyczy **częstotliwości kursowania**, natomiast oś  $z$  oznacza **udział podróży wzbudzonych**.

Zaobserwowano, że przekrój przez rozważaną powierzchnię, płaszczyznami  $x = 0$  lub  $y = 0$ , swoim kształtem zbliżony jest do linii ugięcia belki na sprężystym podłożu. Dlatego poszukiwanie funkcji opisującej uzyskana na podstawie badań powierzchnię rozpoczęto od wzoru na linię ugięcia belki. Założenia dotyczące belki na sprężystym podłożu sformułował w roku 1867 Winkler (Piechnik [172]). Wykorzystując podstawowe zależności z wytrzymałości materiałów oraz założenia winklerowskie, otrzymujemy równanie różniczkowe, liniowe, czwartego rzędu o stałych współczynnikach:

$$w^{(IV)}(x) + 4\alpha^2 w(x) = \frac{q(x)}{EJ} \quad (39)$$

gdzie:

$w(x)$  – przemieszczenie pionowe belki.

Rozwiązaniem równania niejednorodnego (39) jest całka (40) w której  $w_0(x)$  jest całką szczególną:

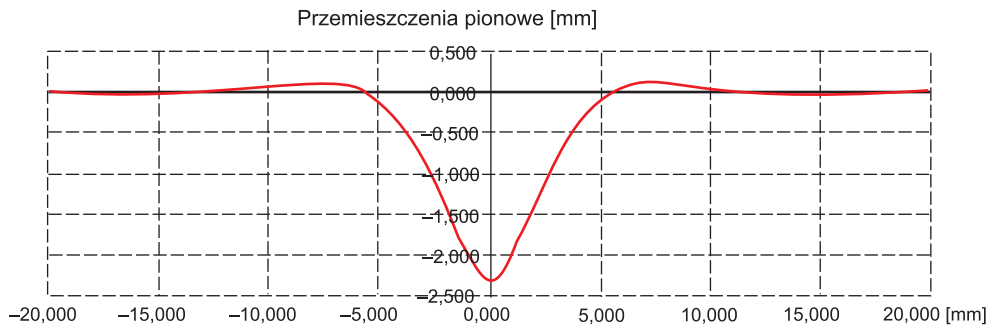
$$w(x) = w_0(x) + e^{-\alpha x} (A \sin \alpha x + B \cos \alpha x) + e^{\alpha x} (C \sin \alpha x + D \cos \alpha x) \quad (40)$$

Przy odpowiednich założeniach oraz mając warunki brzegowe obliczamy stałe całkowania i otrzymujemy wzór na linię ugięcia belki (41). Poniższy wzór obowiązuje dla  $x > 0$ .

$$w(x) = A e^{-\alpha x} (\sin \alpha x + \cos \alpha x) \quad (41)$$

Przykładowy wykres uzyskanej funkcji przedstawia rys. 4.13.

Uzyskany wzór składa się z dwóch czynników: 1) falowego – który jest sumą dwóch funkcji trygonometrycznych sinus i cosinus oraz 2) tłumiącego – funkcja wykładnicza. Stała  $A$  jest tutaj odpowiedzialna za maksymalną amplitudę, natomiast stała  $\alpha$  – w przypadku belki na sprężystym podłożu występuje w obydwu czynnikach; falowym i tłumiącym. W czynniku tłumiącym stała  $\alpha$  decyduje o szybkości tłumienia fali i można go w przybliżeniu wyznaczyć ze wzoru na logarytmiczny dekrement tłumienia (Bronsztajn i in. [27]). Wzór (40) naturalnie obowiązuje tylko



Rys. 4.13. Przemieszczenia pionowe belki na sprężystym podłożu

w układzie współrzędnych  $XY$ . Aby uzyskać wykres przestrzenny w układzie  $XYZ$ , otrzymany wzór rozszerzamy o czynniki, różniące się tylko argumentem  $y$ . Po dodaniu tych czynników otrzymujemy (42):

$$z(x, y) = \alpha e^{-\beta x} (\sin(\beta x) + \cos(\beta x)) \cdot e^{-\beta y} (\sin(\beta y) + \cos(\beta y)) \quad (42)$$

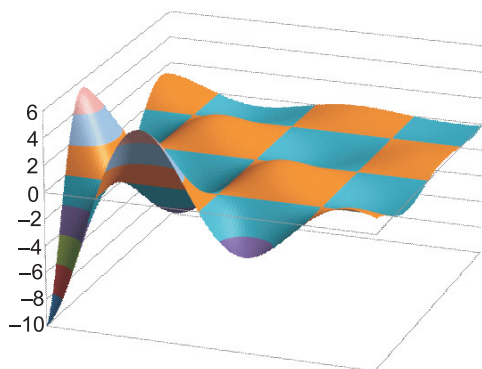
Po prostych przekształceniach, wykorzystując tożsamości trygonometryczne, uzyskujemy poniższą zależność (43).

$$z(x, y) = \alpha e^{-\beta(x+y)} (\sin(\beta(x+y)) + \cos(\beta(x-y))) \quad (43)$$

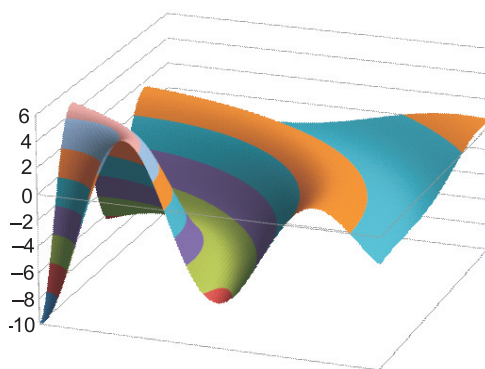
Argumentem funkcji sinus jest wyrażenie  $(x+y)$ , natomiast argumentem funkcji cosinus jest  $(x-y)$ . Funkcje  $z = x+y$  oraz  $z = x-y$  to równania płaszczyzn, które dla ustalonego stworzą w układzie współrzędnym dwie proste przecinające się pod kątem prostym. Wykresem funkcji (43) jest powierzchnia przypominająca szachownicę – amplitudy fal są na przemian raz skierowane w kierunku dodatnim, a raz w kierunku ujemnym, co widać na rys. 4.14 – nie jest to dobre rozwiązanie.

Wprowadzając argument  $\sqrt{x^2 + y^2}$  w miejsce poprzednich, otrzymujemy wzór (44) którego wykresem jest zanikająca fala w kształcie okręgów, rys. 4.15.

Patrząc na charakter rozważanej powierzchni, można zrezygnować (we wzorze (44)) w czynniku falowym ze składnika sinus. Nie spowoduje to żadnych strat w dopasowaniu obydwu powierzchni (teoretycznej i empirycznej), będzie natomiast dużym uproszczeniem. Z uwagi na usytuowanie rozważanej powierzchni w układzie współrzędnym (minimum nie znajduje się w punkcie  $x = 0, y = 0$ ) należy dokonać jeszcze operacji odbicia i przesunięcia wykresu funkcji względem



Rys. 4.14. Kształt aproksymowanej powierzchni dla argumentu funkcji sinus i cosinus:  $x + y$



Rys. 4.15. Kształt powierzchni dla argumentu funkcji sinus i cosinus:  $\sqrt{x^2 + y^2}$

osi OX. Ponadto wprowadzono więcej parametrów, aby dopasować kształt funkcji do wymaganej powierzchni. Ostatecznie otrzymano funkcję, którą przedstawia poniższa formuła (45):

$$z(x, y) = \alpha e^{\beta(60-x)+\gamma y} \cdot \cos\left(\delta \sqrt{\frac{(60-x)^2}{\varsigma} + \frac{y^2}{\eta}}\right) + \theta \quad (45)$$

gdzie parametr:

- $\alpha$  – decyduje o maksymalnej amplitudzie,
- $\beta, \gamma$  – zwiększają lub zmniejszają szybkość tłumienia fali,
- $\delta$  – decyduje o długości fali,
- $\zeta$  i  $\eta$  – zmieniają kształt fali z okrągłej na eliptyczną,
- $\theta$  – dodatkowa stała umożliwiająca przesuwanie całej powierzchni w kierunku pionowym.

Zaproponowana funkcja zawiera zestaw 7 parametrów, których wartości zdecydować o stopniu dopasowania powierzchni do wygenerowanego zbioru punktów (rys. 4.12). Zestaw parametrów jest liczny i nie ma możliwości doboru ich wartości metoda losową, przez „ręczne” dopasowanie wartości i porównywanie uzyskanych tą drogą wykresów. Zadanie polega bowiem na przeszukiwaniu nieskończonej przestrzeni rozwiązań (przez rozwiązanie rozumie się zestaw wszystkich wartości parametrów) w poszukiwaniu rozwiązania optymalnego.

#### 4.4.6. Algorytmy genetyczne

Do poszukiwania możliwych rozwiązań zdecydowano się na wykorzystanie algorytmów genetycznych jako narzędzia do przeszukiwania przestrzeni zbioru alternatywnych rozwiązań (Arabas [6], Goldberg [71], Gwiazda [83], Haupt [94], Michalkiewicz [153], Mitchell [154]). Algorytmy genetyczne zostały wykorzystane do wielu celów badawczych, wskazując swą przydatność. Gulsen i. in. [80] dokonali aproksymacji parametrów równania nieliniowego, natomiast Yi i in. [239] zastosowali algorytmy do dopasowania kształtu powierzchni. Huang i in. [105], bazując na modelu symulacyjnym opracowanym w programie TRANSIMS, przeprowadzili proces kalibracji więźby ruchu, wykorzystując pomiary przekrojowe i zaprojektowany algorytm genetyczny. Ng i in. [157] zastosowali algorytmy do analizy regresji popytu na usługi budowlane.

Algorytmy genetyczne charakteryzują się prowadzeniem poszukiwań, wychodząc nie z pojedynczego punktu, a z przyjętej przestrzeni rozwiązań oraz stosując probabilistyczne reguły wyboru rozwiązania. Już w połowie lat 70. Holland [103] 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 tym kroku, 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. Wielkość populacji jest uzależniona od liczby optymalizowanych parametrów i jest do niej proporcjonalna (Osowski [165]). 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. Losowy wybór chromosomów zapewnia warunek o ich statystycznej niezależności oraz stanowi wstępną penetrację przestrzeni parametrów. Następny etap to operacja reprodukcji (preselekcji), podczas której chromosomy są porządkowane od najlepiej do najgorzej przystosowanego, a następnie wybierane do tworzenia kolejnej generacji. Proces ten nazywa się selekcją i może być przeprowadzony na wiele sposobów:

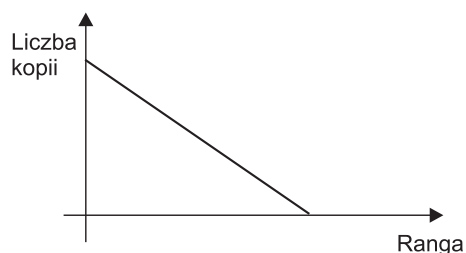
- **Metoda koła ruletki** – przez analogię do ruletki, każdemu osobnikowi przypisuje się prawdopodobieństwo  $p_i$  jego wylosowania, dla wartości funkcji przystosowania  $f(i)$ , zgodnie z równaniem:

$$p_i = \frac{f(i)}{\sum_{i=1}^n f(i)} \quad (46)$$



Takie podejście oznacza, że im lepsze dopasowanie, tym wyższy poziom prawdopodobieństwa, że dany osobnik będzie częściej uczestniczył w dalszym procesie krzyżowania;

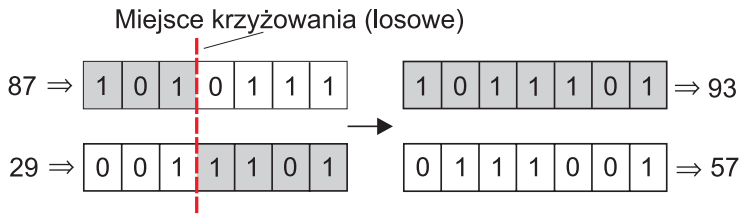
- **Selekcja rankingowa** – polega na sortowaniu osobników w kolejności od najlepszego do najgorszego, a następnie przypisuje się liczbę zwaną rangą, która oznacza jego pozycję na liście. W procesie reprodukcji osobnik z wyższym numerem rangi wprowadzany jest częściej niż ten o niższej randze. Oznacza to, że wyższa ranga zwiększa szanse na udział danego osobnika w krzyżowaniu – rys. 4.16;
- **Selekcja turniejowa** – w której populację dzieli się w sposób losowy na szeregi dowolnie licznych grup, a następnie z każdej z grupy wybierany jest osobnik, który bierze udział w krzyżowaniu;
- **Selekcja progowa** – w której funkcja prawdopodobieństwa wyboru osobnika ma postać progu parametryzowanego wskaźnikiem nacisku selektywnego (Arabas [6]), po przekroczeniu którego osobnik jest brany pod uwagę w procesie krzyżowania.



Rys. 4.16. Przykładowa zależność między wartością rangi, a liczbą kopii w procesie reprodukcji (Arabas [6])

W ramach prowadzonych analiz wybrano metodę koła ruletki, ponieważ znajduje ona zastosowanie w wykorzystanym oprogramowaniu Evolver [167]. Po wyborze osobników następuje proces ewolucji, który polega na zastosowaniu operatorów genetycznych dokonujących rekombinacji genów w chromosomach. Chromosomy (zapisane najczęściej w postaci binarnej) ulegają rozcięciu w losowo wybranych do krzyżowania miejscach oraz ponownym złożeniu w nowy element. Holland [103] zaproponował operator krzyżowania polegający na podzieleniu wektorów „rodziców” i wymianie jednej ze stron między sobą. Jest to metoda krzyżowania jednopunktowego. Ten sam proces można przetwarzać dla kilku miejsc podziału chromosomu, wtedy mówimy o krzyżowaniu wielopunktowym. Przykład krzyżowania dwóch liczb przedstawiono na rys. 4.17.

Krzyżowanie jest traktowane jako kluczowy operator algorytmu genetycznego (Korbicz i in. [123]. Zachowuje on bowiem korzystne geny dotychczasowych chromosomów potomnych i jest w stanie utworzyć chromosom potomny odległy od chromosomów wyjściowych (pojęcie odległości dotyczy przestrzeni argumen-



Rys. 4.17. Przykład krzyżowania jednopunktowego

tów funkcji dopasowania). Ostatnią operacją genetyczną jest mutacja, polegająca na losowej zamianie stanu pojedynczych bitów chromosomu na przeciwny (dotyczy to zapisu binarnego). Mutacja jest niezbędnym czynnikiem, ponieważ wprowadza do operacji krzyżowania potencjalnie obiecujący materiał genetyczny i zabezpiecza algorytm przed przedwczesnym zakończeniem (Osowski [165], Korbicz i in. [123]). Mutacja z racji swojego charakteru niszczy w sposób losowy chromosomy już przystosowane i dlatego jej stosowanie musi być ściśle kontrolowane. W literaturze można znaleźć sugerowany zakres mutacji – od 1 do 5% bitów w całej populacji chromosomów (Osowski [165], Michalkiewicz [153], Goldberg [71]).

#### 4.4.7. Dobór parametrów funkcji aproksymacyjnej

Do wyznaczenia parametrów funkcji opracowano własną procedurę bazującą na założeniach teorii algorytmów genetycznych. Przedstawione w rozdziale 4 założenia nie narzucają zbyt wielu ograniczeń (Korbicz i in. [123]), a dowolność metod selekcji, mutacji, krzyżowania i in. powoduje, że w zasadzie nie ma jednego uniwersalnego przepisu zawierającego stały zbiór parametrów decydujących o skuteczności bądź jakości algorytmu genetycznego. Wprowadzenie czynnika losowego na każdym z etapów działania algorytmu powoduje, że uzyskane wyniki są niepowtarzalne. Ta elastyczność w strukturze powoduje, że można zastosować algorytmy genetyczne do wielu dziedzin i szerokiego spektrum problematyki. W ramach niniejszej dysertacji wykazano, jaką formułą matematyczną można opisać wynik układu wnioskującego. Problemem jest znalezienie odpowiedniego zbioru parametrów w taki sposób, aby rozwiązanie jak najdokładniej opisywało zbiór punktów wyrażający udział podróży wzbudzonych (rys. 4.12). Poszukuje się zatem rozwiązania optymalnego (najlepszego), spełniającego wskazane kryterium: najlepsze dopasowanie powierzchni aproksymowanej równaniem  $f(x)$ . Zadanie optymalizacji polega na znalezieniu takiego  $x^* \in D$ , że (Arabas [6]):

$$x^* = \arg \min_{x \in D} f(x) \quad (47)$$

Problem optymalizacji dąży do uzyskania największych korzyści z punktu widzenia przyjętego kryterium, zapisanego w postaci funkcji celu. W analizowanym przypadku jako funkcję celu przyjęto współczynnik zgodności wyznaczony na podstawie korelacji Pearsona wyznaczonej wg zależności (wg [78]) i oczekuje się, aby jego wartość była możliwie najbliższa 1,0:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (z_{r,i} - \bar{z}_r)(z_{a,i} - \bar{z}_a)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (z_{r,i} - \bar{z}_r)^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (z_{a,i} - \bar{z}_a)^2}} \quad (48)$$

gdzie:

- $z_{r,i}$  – wartości udziału podróży wzbudzonych wyznaczonych wg modelu rozmytego,
- $z_{a,i}$  – wartości udziału podróży wzbudzonych wyznaczonych z równania aproksymowanej powierzchni,
- $\bar{z}_r$  – wartości średnia udziału podróży wzbudzonych dla danych z modelu rozmytego,
- $\bar{z}_a$  – wartości średnia udziału podróży wzbudzonych dla danych uzyskanych z aproksymowanej powierzchni,
- $n$  – liczebność próby – liczba wygenerowanych punktów.

Takie postawianie warunku nie chroni jednak przed sytuacją, w której przyjęte wartości parametrów równania utworzą identyczną powierzchnię, jednakże położoną w innej części przestrzeni, co przyczyni się do wyznaczenia błędnych wartości udziału ruchu wzbudzonego (teoretycznie jest to możliwe i wtedy współczynnik zgodności przyjmie wartość 1,0). Z tego powodu zdecydowano się na przyjęcie drugiego warunku, w którym zakłada się równoczesną minimalizację błędu średniokwadratowego RMSE:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_{r,i} - z_{a,i})^2}{n}} \quad (49)$$

Do obliczeń parametrów zastosowano program Evolver [167] stanowiący nakładkę na program Excel. Evolver wykorzystuje procedury algorytmów genetycznych do poszukiwania optymalnych rozwiązań. Konieczne jest zdefiniowanie problemu (w tym przypadku będzie to parametryzacja funkcji aproksymującej zadaną powierzchnię) oraz podanie warunku optimum. W arkuszu kalkulacyjnym przygotowano odpowiednie dane wejściowe (stanowiące możliwe wartości zmiennych częstotliwość oraz skrócenie) oraz wprowadzono funkcję (równanie 46) stanowiącą poszukiwaną postać powierzchni. Całość obliczeń miała charakter iteracyjny, ukie-

runkowany na znalezienie najlepszego dopasowania parametrów, poprzez przeszukiwanie całej przestrzeni rozwiązań. Znaczenie matematyczne każdego z parametrów pozwoliło na wstępne oszacowanie przedziałów, w których znajdować się będzie poszukiwane rozwiązanie. Na wszelki wypadek rozszerzono przedziały, aby w procesie przeszukiwania algorytmami genetycznymi wprowadzić słabsze osobniki. Rozwiązania znajdujące się poza tymi przedziałami nie będą rozpatrywane. W modelu poszukuje się łącznie 7 parametrów, które mieszczą się w założonych granicach (tabela 4.3).

Tabela 4.3

Graniczne wartości przedziałów, z których były losowane parametry do procedury poszukiwania rozwiązania optymalnego

parametr	min	max	parametr	min	max
$\alpha$	0,00	8,00	$\zeta$	0,00	20,00
$\beta$	-1,00	0,00	$\eta$	0,00	20,00
$\gamma$	-1,00	1,00	$\theta$	-10,00	10,00
$\delta$	0,00	4,00			

Opracowany model poszukiwania rozwiązania optymalnego wymagał przyjęcia wartości podstawowych parametrów algorytmu genetycznego. W pierwszym podejściu przyjęto założenie o wygenerowaniu 80 osobników biorących udział w algorytmie (Osowski [166]) sugeruje, aby liczba osobników wynosiła 30–100). Następnie przyjęto parametr krzyżowania (*crossover rate*) na poziomie 0,6, co oznacza prawdopodobieństwo przyjęcia 60% genów od jednego z rodziców i 40% od drugiego. Ostatni element to poziom mutacji (*mutation rate*) określający prawdopodobieństwo wprowadzenia zmutowanego genu do potomstwa. Wyższe wartości oznaczają, że więcej potomstwa będzie miało losowo zamienione geny (wartość 1,0 spowoduje, że wszystkie geny ulegną mutacji, a program będzie generował losowe rozwiązania). W badaniach przyjęto wartość 0,04.

Należy podkreślić fakt, iż algorytmy genetyczne są narzędziem poszukującym rozwiązania w praktycznie nieograniczonym zbiorze możliwości. Duży wpływ na wynik końcowy będzie miało miejsce, z którego rozpoczynamy poszukiwania oraz zmiany wartości parametrów mutacji i krzyżowania. Oznacza to, że nigdy nie ma pewności, czy rozwiązanie, które znaleziono, będzie dotyczyło minimum lokalnego czy globalnego. W przedmiotowym problemie poszukuje się funkcji, która możliwie najdokładniej opisze przestrzeń rozwiązań scharakteryzowaną zbiorem punktów tworzących pewną płaszczyznę (rys. 4.13), co pozwala sprawdzić jakość obliczeń i ogranicza w pewnym sensie zbiór rozwiązań. Nie ma konieczności wymogu pełnej zgodności modelu ze zbiorem punktów, ponieważ zbiór ten stanowi efekt zastosowania

wania układu wnioskowania rozmytego, co samo w sobie jest uogólnieniem problemu. Jednocześnie nie oznacza to zupełnej dowolności.

Poszukując najlepszego rozwiązania, przeprowadzono kilkanaście eksperymentów obliczeniowych, zmieniając rozwiązania początkowe, poziom mutacji czy wskaźnik krzyżowania. W efekcie osiągnięto 319 500 rozwiązań, dla których najlepszym był następujący zestaw parametrów (tabela 4.4):

Tabela 4.4

Wyniki zastosowania algorytmu genetycznego dla poszukiwania parametrów równania (48)

Parametr	Wartość	Parametr	Wartość
$\alpha$	-6,58	$\zeta$	7,54
$\beta$	0,00	$\eta$	0,44
$\gamma$	-0,03	$\theta$	6,58
$\delta$	0,09		

Jakość uzyskanych wyników można scharakteryzować dwoma parametrami: współczynnikiem zgodności, który w tym przypadku wynosi  $R^2 = 0,97$  oraz wartości błędu średniokwadratowego  $RMSE = 4,13$ . Porównanie powierzchni uzyskanej jako wynik wnioskowania rozmytego z powierzchnią opisaną aproksymowanym równaniem przedstawiono na rysunku 4.18.

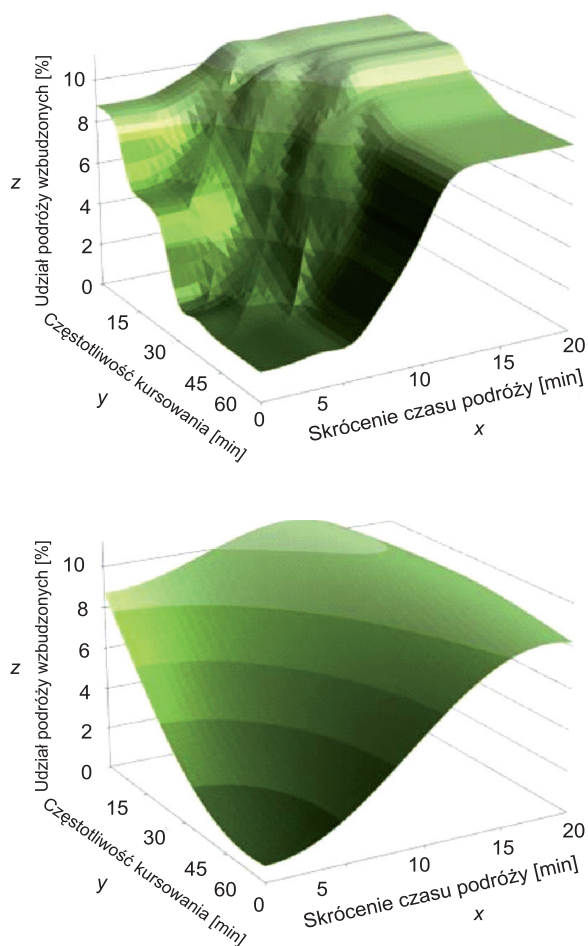
Równanie opisujące związek między skróceniem czasu podróży i częstotliwością kursowania taboru a spodziewanym udziałem podróży wzbudzonych w potoku pasażerskim obciążającym korytarz transportowy z nową inwestycją w transport zbiorowy będzie wyglądał następująco:

$$I_{PuT} = -6,58e^{-0,03 \cdot s} \cdot \cos \left( 0,09 \cdot \sqrt{\frac{(60-c)^2}{7,54} + \frac{s^2}{0,44}} \right) + 6,58 \quad (50)$$

gdzie:

- $I_{PuT}$  – spodziewany udział ruchu wzbudzonego dla danej relacji [%],
- $s$  – skrócenie czasu podróży [min],
- $c$  – częstotliwość kursowania linii [min].

Zakres stosowania formuły jest ograniczony do wartości częstotliwości (wyrażanej średnim odstępem usługi 1,5–60 minut) i spodziewanego skrócenia czasu podróży (0–20 minut). Interpretując znaczenie wzoru, należy podkreślić jego umowny charakter, wskazujący na spodziewany **przyrost potoków pasażerskich** na nowej linii. Zależność powstała na podstawie badań przeprowadzonych pośród użytkowników



Rys. 4.18. Porównanie powierzchni uzyskanej z układu wnioskującego (u góry) z powierzchnią aproksymowaną równaniem (50)

ków nowych inwestycji w infrastrukturę transportu zbiorowego i oddaje zachowania pasażerów użytkujących nowy środek transportu. Z tego powodu bezprzedmiotowym jest stosowanie wzoru dla istniejących parametrów danej linii, ponieważ wtedy nie ma ruchu wzbudzonego. Mówimy o nim wyłącznie w przypadku pojawienia się nowego, wcześniej nie istniejącego rozwiązania.

Należy podkreślić fakt, iż przedmiotowa zależność nie uwzględnia zmian w zagospodarowaniu przestrzennym oraz innych czynników i stanowi jedynie wskazanie górnej granicy, jaką może osiągnąć przyrost podróży wzbudzonych w transporcie zbiorowym. Można stosować tę zależność do szacunkowego wyznaczenia podróży wzbudzonych, lecz należy pamiętać, że pełna analiza wymaga uwzględnienia podejścia bazującego na dostępności transportowej.

## **5. MODELOWANIE SYMULACYJNE PODRÓŻY WZBUDZONYCH I TLUMIONYCH UWZGLĘDNIAJĄCE CZYNNIK DOSTĘPNOŚCI TRANSPORTOWEJ**

### **5.1. Założenia modelu**

W warunkach krajowych modele transportowe są tworzone z wykorzystaniem ujęcia czterostadiowego. Konsekwencją takiego działania jest brak możliwości uwzględniania ruchu wzbudzonego w analizach efektywności funkcjonalnej inwestycji infrastrukturalnych. Jak wykazano w rozdziale 2, modele te są niewrażliwe na zmiany czasów podróży w kontekście generowania dodatkowych podróży, co prowadzi do działań na stałej wartości popytu. Podstawowym celem niniejszej dysertacji jest rozwinięcie i udoskonalenie procedury czterostadiowej w taki sposób, aby uwzględniała zmiany w popycie będące efektem poprawy bądź pogorszenia warunków podróżowania. Decyzja o tym, czy potencjalną podróż realizować czy nie, zależy od bardzo wielu czynników (np. stopnia aktywności zawodowej, poziomu dochodu, motywacji podróży, dostępności do środków transportu, osobistych upodobaniach i in.), z których większość nie jest kwantyfikowalna ilościowo, np. z powodu braku danych (w tym poziom dochodu gospodarstwa domowego, który jest informacją niechętnie ujawnianą) lub z powodu jej jakościowego charakteru (np. osobiste upodobania).

Modele matematyczne zachowań transportowych powstają przy użyciu nowoczesnego oprogramowania (Visum, Emme/3, Cube i in.) i pozwalają na wyznaczanie całej palety parametrów charakteryzującej funkcjonowanie sieci transportowej. Połączenie danych wejściowych modeli sieciowych oraz zależności matematycznych opracowanych na podstawie wyników KBR umożliwia szczegółowe prace nad udoskonaleniem i rozwinięciem modeli czterostadiowych w kierunku uwzględnienia wpływu zmian w sieci na wielkość popytu. Pomimo swoich słabości, modele czterostadiowe znajdują szerokie zastosowanie w analizach planistycznych inwestycji infrastrukturalnych z powodu swojej prostoty oraz przede wszystkim z powodu dostępu do danych koniecznych do tworzenia i kalibracji modelu (wyniki KBR, dane



statystyczne i urbanistyczne itp.). Ponadto wyniki analiz prowadzonych na takich modelach są całkowicie wystarczające do podejmowania decyzji strategicznych przez decydentów. Wdrażanie modeli dynamicznych czy bazujących na analizie aktywności (np. łańcuchy podróży) wydaje się niekonieczne do takich celów z powodu dużej złożoności (a co za tym idzie – pracochłonności). W warunkach krajowych większość dużych miast badających efektywność rozwoju systemu transportowego dysponuje modelami opracowanymi w strukturze czterostadiowej. Pozwala to na porównywanie wyników i stanowi doskonałą bazę do prowadzenia prac badawczych, w tym udoskonalień w procedurach obliczeniowych.

Prowadząc badania ankietowe pośród użytkowników systemu, dostrzeżono pewien mechanizm, który wpływa na wzbudzenie lub tłumienie potrzeb transportowych – są to, ogólnie ujmując, warunki podróży. Ich pogarszanie (np. skutek ograniczenia ruchu związanego z remontem) lub poprawa (np. skutek otwarcia nowej ulicy czy nowej linii tramwajowej) wpływają na decyzje transportowe pasażerów. Kierunek tych decyzji jest oczywisty: rezygnacja z podróży w przypadku znaczących ograniczeń i dodatkowe podróże w przypadku poprawy parametrów sieci transportowej (decyzje te dotyczą głównie podróży o charakterze fakultatywnym). Należy tu rozróżnić zmiany w zachowaniach transportowych objawiające się przepływem międzygałęziowym środków transportu oraz zmiany w położeniu celów podróży (np. zmiana sklepu na łatwiejszy w dojeździe) od całkowicie nowych lub odrzuconych podróży.

Modele czterostadiowe budowane są w programach symulacyjnych, które pozwalają na parametryzację pracy sieci i ocenę warunków ruchu w skali całego miasta. Oznacza to, że można poszukiwać związków przyczynowo-skutkowych i testować ich wpływ na warunki ruchu w modelach transportowych. Należy również pamiętać o wysokim poziomie agregacji i licznych uproszczeniach znajdujących się w takich modelach, co wpływa na sposób prowadzonych analiz oraz dokładność wyników.

Badania nad zjawiskiem podróży wzbudzonych prowadzone będą na trzech modelach symulacyjnych miast opracowanych zgodnie z zasadami ujęcia czterostadiowego. Efektem końcowym jest uogólniony model podaży i popytu, skalibrowany do wyników pomiarów przekrojowych (zarówno w transporcie zbiorowym, jak i indywidualnym). Do analiz zostanie wykorzystany zestaw modeli transportowych miast polskich składający się z:

- modelu podaży stanowiących odwzorowanie sieci transportowej miasta opracowany w programie Visum, zawierający kompletny zapis (sparametryzowany i kalibrowany) sieci drogowo-ulicznej oraz sieci transportu zbiorowego,
- modelu popytu, wyrażonego przez macierze podróży, kalibrowane do pomiarów natężenia ruchu dla stanu istniejącego sieci,
- wartości zmiennych objaśniających modele popytu, w rozbiciu na rejony transportowe,
- wyników wywiadów w gospodarstwach domowych w postaci bazy danych.

O wyborze miast do badań decydowała aktualność badań ruchu oraz dostęp do bazy zmiennych objaśniających i do zakodowanych pełnych wyników wywiadów w gospodarstwach domowych (wymagana była baza danych o osobach a nie tylko podróżach). Podstawowe informacje o przeprowadzonych badaniach w poszczególnych miastach zestawiono w tabeli 5.1.

Tabela 5.1

Podstawowe informacje o przeprowadzonych badaniach w poszczególnych miastach

Lp.	Miasto	Rok badań ruchu	Liczba mieszkańców (tys.)	Liczba rejonów transportowych	Liczebność próby (liczba wywiadów)
1	Kraków	2010	760	321	19 430
2	Gdańsk	2011	460	183	11 900
3	Płock	2009	126	42	1345

Wybrane modele transportowe miast charakteryzują się wysokim stopniem różnicowania, reprezentując różne wielkości miast i rozmiary sieci transportowej.

Istotą prowadzonych badań było znalezienie związku między czasem podróży, a liczbą podróży generowanych przez rejon transportowy, przy czym nie wiązano się z podróżami pozyskanymi z modelu symulacyjnego (a więc całkowitej liczby podróży), a bazowano na podróżach pochodzących bezpośrednio z wywiadów w gospodarstwach domowych. Powiązano liczbę zarejestrowanych, rzeczywistych podróży oraz wyznaczoną ruchliwość mieszkańców ze zdefiniowaną dostępnością transportową do rejonu transportowego i wykazano, że istnieje statystycznie istotny związek między tymi zmiennymi. W prowadzonych badaniach przyjęto następujące założenia:

1. Analizy dotyczyły godziny szczytu popołudniowego, w którym dominują podróże o charakterze fakultatywnym, szczególnie podatne na wzbudzenie bądź tłumienie;
2. Analizy dotyczą wyłącznie podróży wewnętrznych, nie uwzględniają podróży docelowych/źródłowych z powodu braku wyników badań ankietowych w obszarach podmiejskich w większości miast;
3. Nie rozwarstwiano podróży na motywację, aby nie zmniejszać liczebności prób w procesie poszukiwania zależności statystycznych (analizy regresji). Jest to oczywiście istotne uproszczenie, lecz niezbędne z punktu widzenia późniejszego zastosowania. Wszystkie modele posiadają bowiem wyłącznie całkowitą macierz podróży wewnętrznych i nie są dostępne cząstkowe macierze więzby podróży, a tylko macierze sumaryczne;

4. Zakłada się, że wpływ na liczbę podróży stwierdzonych przez respondentów w trakcie wywiadów prowadzonych w gospodarstwach domowych może mieć czas podróży z rejonu, wyrażony wskaźnikiem dostępności transportowej. Wskaźnik dostępności transportowej rejonu uwzględnia średnioważony czas podróży dokonywanych zarówno samochodem osobowym, jak i transportem zbiorowym. Uzasadnienie tego założenia jest takie, że osoby rozpoczynające podróż w rejonach dobrze skomunikowanych będą to robiły częściej od osób rozpoczynających podróż w obszarach o trudniejszych warunkach podróżowania (np. wysoki poziom zatłoczenia, brak sprawnego transportu zbiorowego itp.).

## 5.2. Dostępność transportowa

Dostępność transportowa (ang. *accessibility*) jest podstawowym parametrem wykorzystywanym w analizach przestrzennych i jest definiowana jako „produkt” systemu transportowego determinujący korzystność lokalizacji danego obszaru (np. rejonu transportowego) względem innych (Spiekermann i in. [203]). Należy odróżnić pojęcie dostępności od osiągalności (ang. *availability*), które jest uwarunkowane możliwościami osób związanymi z kosztami zakupu usługi, przez co nie jest ona dostępna dla wszystkich użytkowników. Dostępność zakłada więc powszechność, czyli bezwarunkowe korzystanie z usługi transportowej (Komornicki i in. [122]). Najczęściej spotykanym podejściem w badaniu dostępności transportowej jest analiza dostępności potencjałowej (Rosik [182]). Uwzględnia ona komponenty zagospodarowania przestrzennego oraz komponent transportowy (Geurs i in. [69], Sierpiński [198]). Podstawową cechą tak definiowanej dostępności jest to, że atrakcyjność celu podróży wzrasta wraz z wielkością potencjału ruchotwórczego (atrakcji) i maleje w miarę wydłużania się odległości (mierzonej czasem, dystansem lub miarami ekonomicznymi).

Dostępność jest definiowana na wiele sposobów. W klasycznym ujęciu zaproponowanym przez Hansena [91] i rozwiniętym m.in. przez Harrisa [93] dostępność  $X_i$  w rejonie transportowym  $i$  jest definiowana następująco:

$$X_i = \sum_{j=1}^n D_j \cdot f(c_{ij}) \quad (51)$$

gdzie:

- $D_j$  – atrakcyjność rejonu  $j$ ,
- $f(c_{ij})$  – funkcja oporu przestrzeni, wyrażająca wpływ odległości lub czasu podróży na liczbę podróży między rejonami  $i, j$ .

Model klasyczny łączy więc elementy popytu (jako potencjał ruchotwórczy rejonu transportowego) z czynnikiem wynikającym z podaży systemu, wyrażonym oporem przestrzeni, czyli długością podróży lub częściej – czasem podróży (Rosik, Szuster [183]). W analizach transportu pasażerskiego dostępność transportową najczęściej definiowano jako odległość między miejscem zamieszkania a punktem, z którego można rozpocząć podróż środkami transportu zbiorowego, np. przystanek autobusowy (Madeyski i in. [146]). Taka definicja dostępności nie oddawała rzeczywistej jej istoty i wyklucza jej zastosowania do oceny stopnia stymulacji podróży. Dostępność wyraża zatem łatwość, z jaką można dotrzeć do celu podróży (Bryniarska i in. [28]). Dostępność wyrażona przez czas odpowiada potrzebom modelowania potencjałów ruchotwórczych.

Van Wee i in. [233] wskazują na bardzo zróżnicowane parametry dostępności oraz ich znaczenie w interpretacji zmian w warunkach podróżowania. Dzieli wskaźniki dostępności transportowej na trzy podstawowe grupy:

- wskaźniki związane z infrastrukturą (średnia prędkość, praca przewozowa itp.);
- wskaźniki związane z szeroko pojętymi aktywnościami podróży (np. liczba miejsc pracy do osiągnięcia w założonym czasie z danego rejonu);
- wskaźniki mieszane.

Zaproponowana formuła, pozwala wyznaczyć dostępność danego rejonu transportowego do miejsc pracy przy założonym czasie  $T < T_{\max}$ :

$$Acc_{Jobs\ i(T < T_{\max})} = \sum_{j=1}^{j=n} \frac{Jobs_j}{T_{ij}^{\alpha}} \cdot \frac{\left( \sum_{k=1}^{k=n} \frac{\left( \frac{Jobs_k \cdot Lf_k}{Lf_k} \right)}{T_{jk}^{\alpha}} \right)}{\sum_{k=1}^{k=n} \left( \frac{Lf_k}{T_{jk}^{\alpha}} \right)} \quad (52)$$

gdzie:

- |                               |   |
|-------------------------------|---|
| $Acc_{Jobs\ i(T < T_{\max})}$ | – dostępność do miejsc pracy w rejonie transportowym $i$ , dla czasu podróży mniejszego od $T_{\max}$ , |
| $Jobs_j$                      | – liczba miejsc pracy w rejonie $j$ ,   |
| $Jobs_k$                      | – liczba miejsc pracy w rejonie $k$ ,   |
| $T_{ij}^{\alpha}$             | – czas podróży między rejonami $i, j$ ,   |
| $T_{ik}^{\alpha}$             | – czas podróży między rejonami $j, k$ ,   |
| $Lf_k$                        | – wielkość rynku pracy w rejonie $k$ ,  |
| $Lf_j$                        | – wielkość rynku pracy w rejonie $j$ ,  |
| $\alpha$                      | – parametr funkcji oporu (zaproponowano $\alpha = 2$ ).   |

Parametr ten może być traktowany jako miara dostępności do aktywności związanych z pracą, uwzględnia parametry funkcjonalne sieci, jednakże nie odnosi się bezpośrednio do poszczególnych środków transportu oraz nie wiąże wskaźnika ze spodziewaną liczbą podróży. Podobną tematyką zajął się Levinson [141], który badał wpływ dostępności do miejsc pracy na zmiany w zagospodarowaniu przestrzennym oraz wykazał statystycznie istotne związki między liczbą podróży a zdefiniowaną dostępnością.

Wskazuje się, że zmiany w dostępności mogą przyczyniać się do powstawania całego szeregu różnych interakcji między elementami systemu transportowego. Koźlak [125], Salomon, Mokhtarian [190] wskazują wprost na wyraźny związek między poziomem modernizacji infrastruktury transportowej, który wpływa na generowanie większych potoków. Podobnie Geurs i in. [68] podkreślają rolę miar dostępności i ich wpływu na zmiany w systemie transportowym. Są to zmiany pośrednie, wynikające również z charakteru zagospodarowania przestrzennego, który implikuje zmiany w obciążeniu systemu transportowego. Wprowadzenie kwestii dostępności w analizach popytu nie jest rzeczą nową (np. Botes i in. [26], Litman [142]), ale występuje to raczej jako wskazanie kierunków badań. Mondschein i in. [155] wskazują, że wątek dostępności transportowej związanej z poziomem zatłoczenia transportowego nie jest badany szczegółowo. Jednym z autorów zajmujących się tą tematyką jest Casas [32], która wyraźnie podkreśla związek pomiędzy dostępnością transportową a poziomem zatłoczenia, przy czym zaznacza, że wpływ ten związany jest z wielkością popytu na podróże. W prowadzonych badaniach wybierano grupę ochotników i na podstawie ich rzeczywistych zachowań testowano różne scenariusze wpływu poziomu zatłoczenia na decyzję o podróży. Wyniki badań wskazują na istnienie silnego związku między poziomem zatłoczenia a wyborem celu podróży. Większość uczestników badania nie rezygnowała z podróży, a jedynie szukała innej trasy lub alternatywnego celu (np. inna siłownia bądź kino). Niestety badania były prowadzone na małej próbie (83 osoby) i wyciągnięcie szerszych wniosków było niemożliwe. Mondschein i in. [155] w swoich badaniach poddali szczegółowej analizie zależność między dostępnością transportową a poziomem zatłoczenia transportowego. Wykazali, że ten związek nie ma charakteru liniowego (wzrost zatłoczenia skutkuje zmniejszeniem dostępności transportowej), lecz przedstawia bardziej złożoną zależność. Wskazują na trzy główne komponenty tej zależności: 1) zatłoczenie przyczynia się do obniżenia ruchliwości osobistej, co w efekcie redukuje dostępność transportową; 2) zatłoczenie jest ściśle powiązane ze zwiększoną dostępnością oraz 3) wpływa poznawczo na wybory alternatywnych celów podróży przez użytkownika. Badania prowadzono na próbie prawie 6000 wywiadów uzyskanych w gospodarstwach domowych w Kalifornii i wykazano zależność między poziomem zatłoczenia wyrażonym średnim stopniem nasycenia (iloraz natężenia ruchu i przepustowości ulicy) w rejonie a przeciętną liczbą podróży realizowanych przez respondentów w ciągu dnia. W tabeli 5.2 przedstawiono wyniki badań.

Wyniki badań zależności między długością podróży a poziomem nasycenia ruchem [155]

Rejony ze średnią liczbą podróży mniejszą niż 4 w ciągu doby/mieszkańca		
<i>Podróże</i>	<i>Średnia długość</i>	<i>Średni poziom nasycenia</i>
Krótkie	< 6,0 km	0,84
Dłgie	> 6,0 km	0,76
Rejony ze średnią liczbą podróży większą niż 4 w ciągu doby/mieszkańca		
<i>Podróże</i>	<i>Średnia długość</i>	<i>Średni poziom nasycenia</i>
Krótkie	< 6,0 km	0,77
Dłgie	> 6,0 km	0,69

W tabeli widać, że poziom nasycenia jest związany z długością realizowanej podróży w powiązaniu ze średnią liczbą podróży realizowaną przez mieszkańców, co może stanowić przesłankę do dalszych prac nad estymacją tej zależności.

Thill i Kim [231] przedstawili szczegółowe analizy statystyczne wskazujące na silne związki między liczbą podróży a dostępnością transportową rejonów transportowych. W pracy tej bazowano na wynikach badań ankietowych prowadzonych w gospodarstwach domowych w Minneapolis (USA), na podstawie których wykazano (analizując poszczególne motywacje podróży) statystyczne zależności zdefiniowanej dostępności i ruchliwości mieszkańców. Dostępność w rejonach miejskich definiuje się tam jako opór przestrzeni wpływający na osiągnięcie zamierzonego celu.

Pojęcie dostępności transportowej jest również wykorzystywane do budowy modeli symulacyjnych jako alternatywa do ujęcia czterostadiowego bądź modeli aktywności (np. Bernardin [20], Geurs i in [68], Casas [32], Huang i in. [106], Kwan i in [136], Salomon, Mokhtarian [190]). Pojęcie dostępności jest wykorzystywane do analiz popytu i uwzględniane w budowie więzby podróży pojawienia się nowych celów podróży. Największą zaletą jest jednak układ modelu, który nie ma charakteru następujących po sobie etapów (jak w modelu czterostadiowym), a reakcja na zmiany w systemie transportowym może nastąpić w dowolnym momencie. Bernardin [20] zauważa, że taki sposób budowy modelu umożliwia kwantyfikowanie wpływu poziomu zatłoczenia na liczbę podróży oraz analizy ruchu wzbudzonego, co potwierdza związek między dostępnością transportową a liczbą podróży generowanych przez dany obszar. Do podobnych wniosków doszli Huang i in. [106], stosując wskaźnik dostępności do szacowania potoków pasażerskich na przystankach. Wykorzystali w tym celu zestaw zmiennych objaśniających (liczbę mieszkańców, miejsc pracy itp.) zestawionych w formacie GIS i, stosując własną formułę na dostępność, określili liczbę spodziewanych pasażerów w zależności od wybranych parametrów kursowania linii transportu zbiorowego. Podobne badania prowadzili: Rudnicki [186], Hansen [88], Van Nes [232], Maj-Łabuz [148].

Przegląd dotychczasowych wyników badań wskazuje na ogromny potencjał wykorzystania pojęcia dostępności transportowej. Jest ona definiowana w bardzo różny sposób, lecz ogólne założenie zaproponowane przez Hansena w 1959 roku [91] jest wciąż aktualne. Ponadto wykazano, że wielu autorów dostrzega i udowadnia istotny wpływ dostępności transportowej na liczbę podróży generowanych w danym obszarze i co więcej, wiąże zmiany dostępności wynikające np. z modernizacji lub przebudowy elementów systemu transportowego z liczbą podróży (np. Mondschein i in. [155], Koźlak [125], Casas [32]). Ta elastyczność w kształtowaniu pojęcia dostępności oraz szeroki wachlarz zastosowań pozwala dostrzec możliwość wykorzystania tego parametru do modelowania wielkości ruchu wzbudzonego.

### 5.3. Wyznaczenie wskaźnika dostępności transportowej dla rejonów transportowych

W modelowaniu podróży wzbudzonych wykorzystywany będzie związek między stopniem dostępności transportowej rejonu a poziomem ruchliwości mieszkańców, bazując na analizach symulacyjnych oraz wynikach badań ankietowych prowadzonych w ramach Kompleksowych Badań Ruchu w wybranych miastach. Dostępność transportowa będzie przedstawiona jako parametr charakteryzujący rejon transportowy definiowany jako odwrotność średniego czasu podróży między wszystkim rejonami transportowymi, ważonego odpowiadającą im liczbą podróży. Takie podejście pozwala zminimalizować wpływ na wartość parametru dostępności mało istotnych rejonów (z punktu widzenia liczby generowanych podróży) i zwiększyć wpływ rejonów, które stanowią istotne generatory ruchu w sieci miejskiej – np. obszary silnie zurbanizowane czy uprzemysłowione.

Na dostępność rejonu transportowego wpływa międzyrejonowy czas podróży z uwzględnieniem środka transportu:

$$A_{i, PuT} = \frac{\sum_j T_{ij}^{PuT}}{\sum_j (t_{ij,t}^{PuT} \cdot T_{ij}^{PuT})} \quad (53)$$

gdzie:

- $A_{i, PuT}$  – wskaźnik dostępności rejonu transportowego  $i$  środkami transportu zbiorowego [ $\text{godz}^{-1}$ ],
- $t_{ij,t}^{PuT}$  – czas podróży transportem zbiorowym między rejonami  $i$  oraz  $j$  dla okresu analizy  $t$  [godz],
- $T_{ij}^{PuT}$  – liczba podróży między rejonami  $i$  oraz  $j$  realizowana środkami transportu zbiorowego.



$$A_{i,PrT} = \frac{\sum_j T_{ij}^{PrT}}{\sum_j (t_{ij,t}^{PrT} \cdot T_{ij}^{PrT})} \quad (54)$$

gdzie:

- $A_{i,PrT}$  – wskaźnik dostępności rejonu transportowego  $i$ , środkami transportu indywidualnego [godz<sup>-1</sup>],
- $t_{ij,t}^{PrT}$  – czas podróży transportem indywidualnym między rejonami  $i$  oraz  $j$ , dla okresu analizy  $t$  [godz],
- $T_{ij}^{PrT}$  – liczba podróży między rejonami  $i$  oraz  $j$  realizowana środkami transportu indywidualnego.

Przedstawione ujęcie wyznacza wskaźnik dostępności transportowej w odniesieniu do każdego ze środków transportu oddzielnie. Aby uzyskać jeden wskaźnik, uwzględniający oba środki transportu, podjęto próbę agregacji wyników i opracowania jednego wspólnego wskaźnika globalnego, uwzględniającego oba środki transportu. Również tutaj posłużono się wartością średnią wyznaczonych dostępności (wg formuł 53 i 54) ważoną udziałem poszczególnych środków transportu w podróżach realizowanych do badanego rejonu transportowego.

$$D_i = \frac{A_{i,PuT} \cdot U_{i,PuT} + A_{i,PrT} \cdot U_{i,PrT}}{U_{i,PuT} + U_{i,PrT}} \quad (55)$$

gdzie:

- $D_i$  – wskaźnik dostępności globalnej rejonu  $i$  [godz<sup>-1</sup>],
- $A_{i,PuT}$  – wskaźnik dostępności rejonu transportowego  $i$  środkami transportu zbiorowego, wyznaczony zgodnie z formułą (53),
- $A_{i,PrT}$  – wskaźnik dostępności rejonu transportowego  $i$  środkami transportu indywidualnego, wyznaczony zgodnie z formułą (54),
- $U_{i,PuT}$  – liczba podróży realizowanych transportem zbiorowym dla rejonu transportowego,
- $U_{i,PrT}$  – liczba podróży realizowanych transportem indywidualnym dla rejonu transportowego.

Wszystkie dane konieczne do wyznaczenia wskaźnika dostępności globalnej zostały wyznaczone bezpośrednio z transportowych modeli symulacyjnych (wymienionych w tabeli 5.1). Czas podróży wyznaczono dla:

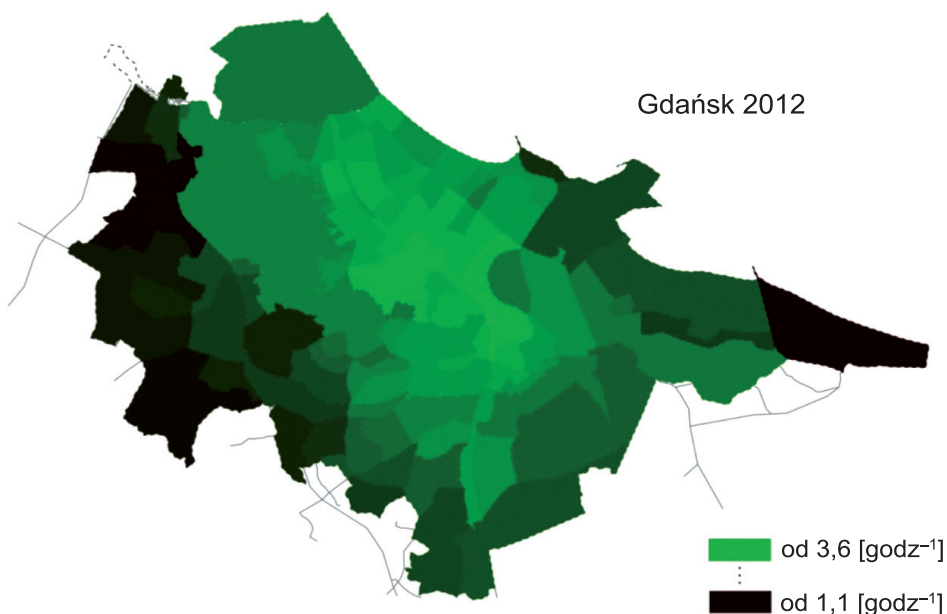
1. Transportu indywidualnego jako suma składników poszczególnych etapów podróży, tj. czasu dojścia do samochodu, czasu odejścia oraz czasu przejazdu w sieci – czas ten jest funkcją natężenia ruchu i przepustowości charakteryzu-

jącej przekrój uliczny. Program symulacyjny Visum wyznacza prędkość przejazdu odcinków sieci oraz generuje automatycznie żądane macierze czasów połączeń;

2. Transportu zbiorowego – jest to czas podróży pasażera środkami transportu zbiorowego (tramwaj, autobus, kolej itp.) uwzględniający wszystkie etapy realizowania podróży (rys. 5.1).



Rys. 5.1. Sekwencja przemieszczeń tworzących podróż realizowaną środkami transportu zbiorowego (Szarata [216])



Rys. 5.2. Graficzne przedstawienie wyznaczonego wskaźnika dostępności globalnej do rejonów transportowych na przykładzie Gdańska [godz<sup>-1</sup>]

W transportowym modelu symulacyjnym Gdańska (Jamroz z zespołem [112]) wyznaczono macierze czasów podróży realizowanych środkami transportu zbiorowego i indywidualnego, a następnie stosując równania (53), (54) i (55), uzyskano wartości wskaźnika dostępności globalnej dla każdego z rejonów transportowych. Graficznie można to przedstawić w postaci odmiennej gradacji koloru odpowiadającej wartości wskaźnika dostępności globalnej wg zasady – im ciemniejszy kolor, tym gorsza dostępność. Wynik analizy dostępności dla Gdańska przedstawiono na przedstawiono na przykładzie modelu Gdańska (rys. 5.2).

Jasne plamy w centrum miasta to rejonu transportowe o wyższej wartości wskaźnika dostępności globalnej w porównaniu do rejonów zachodnich, gdzie dostępność jest znacznie niższa. Przedstawiony model dostępności globalnej stanowi parametr zagregowany, odnoszący się nie tylko czasów podróży między rejonami, lecz także uwzględnia wagę danego połączenia z punktu widzenia popytu. Oznacza to, że relacje źródło–cel, które mają niską wartość czasów podróży przy małej wartości popytu, nie wpływają znacząco na wartość globalną wskaźnika, ponieważ ich rola jest pomniejszana przez wagę, którą stanowi właśnie liczba podróży w modelu transportowym.

#### **5.4. Wpływ dostępności transportowej na ruchliwość mieszkańców rejonu transportowego**

Badając podróże wzbudzone, przyjmuje się, że jednym z czynników sprawczych tych podróży może być związek pomiędzy liczbą podróży generowanych w rejonie transportowym a systemem transportowym obsługującym ten rejon. Proponowany w rozdziale 5.3 wskaźnik dostępności globalnej może być traktowany jako miara charakteryzująca rejon transportowy, przy czym stawia się tezę, że wzrost wartości wskaźnika rejonowej dostępności globalnej skutkuje wzrostem liczby podróży generowanych o absorbowanych przez ten rejon. Przyrost liczby tych podróży to podróże wzbudzone. Badania innych autorów potwierdzają istnienie tej zależności (Mondschein i in. [155], Thill i Kim [231], Koźlak [126], Casas [32]).

Jednym z parametrów kwantyfikujących liczbę podróży realizowanych w miastach jest wskaźnik ruchliwości. Wyraża on przeciętną liczbę podróży realizowaną przez mieszkańca w ciągu doby. Wskaźnik ruchliwości jest wyznaczany na podstawie wywiadów w gospodarstwach domowych prowadzonych w ramach Kompleksowych Badań Ruchu. Wskaźnik ten odnosi się więc do wszystkich podróży tej osoby, tworzących tzw. łańcuch podróży, udostępniających w cyklu dobowym kolejne realizowane przez mieszkańca aktywności, np. dom – praca – zakupy – rekreacja – dom. Oznacza to, że wskaźnik ruchliwości uwzględnia również podróże

realizowane pomiędzy innymi rejonami transportowymi niż rejon, w którym znajduje się analizowane gospodarstwo domowe i jako taki nie jest przydatny w niniejszych analizach. Stąd pojawiła się potrzeba zdefiniowania parametru określającego ruchliwość osób w rejonie transportowym wyrażoną liczbą podróży rozpoczynanych lub kończonych w tym rejonie – proponuje się nazwać ten parametr **rezydencjalną ruchliwością rejonową**. Do analiz wybrano zatem podróże w motywacjach wyłącznie związanych z domem.

W prowadzonych analizach statystycznych wykorzystano program Statgraphics Centurion XV [205], w którym przeprowadzono analizy regresji dla wybranych miast i wyznaczono współczynnik korelacji między zdefiniowanym globalnym wskaźnikiem dostępności a rezydencjalną ruchliwością rejonową, wyznaczoną na podstawie wywiadów w gospodarstwach domowych. Uzyskane wyniki wskazują na pewną prawidłowość, pozwalającą stwierdzić, że ta zależność istnieje na statystycznie istotnym poziomie.

Pierwszym miastem poddanym analizie jest Kraków. Wykorzystano tutaj wyniki pochodzące z Kompleksowych Badań Ruchu przeprowadzonych w roku 2003 [171] oraz stworzony na tej podstawie transportowy model symulacyjny aglomeracji krakowskiej. W ramach KBR dla Krakowa przeprowadzono 6830 wywiadów w gospodarstwach domowych (ponad 19 400 osób) oraz zidentyfikowano ponad 40,3 tys. podróży. Aby wyznaczyć rezydencjalną ruchliwość rejonową, wydzielono te podróże, które są związane ze wszystkimi motywacjami powiązаныmi z domem. Przy uwzględnieniu liczby osób ankietowanych w danym rejonie oraz podróży wyłącznie związane z domem możliwe było wyznaczenie rezydencjalnej ruchliwości rejonowej. Pominięcie motywacji niezwiązanych z domem, a realizowanych pomiędzy innymi rejonami, pozwala na uwzględnienie rzeczywistym podróży związanych z konkretnym rejonem transportowym. Udział podróży nie związanych z domem wynosi zaledwie 11%.

Następny krok to wyznaczenie wskaźnika dostępności globalnej, odnoszącego się do każdego rejonu transportowego. Posiłkowano się tutaj transportowym modelem symulacyjnym aglomeracji krakowskiej, w którym wyznaczono macierze czasów podróży dotyczące powiązań między rejonami transportowymi oraz, uwzględniając liczbę podróży z macierzy źródło–cel (oddzielnie dla każdego ze środków transportu), wyznaczono wartości wskaźnika dostępności globalnej. Wskaźnik ten dotyczył godziny szczytu popołudniowego odwzorowującego najgorsze warunki ruchu panujące w sieci drogowej. Należy zaznaczyć, że prowadzone analizy dotyczyły wyłącznie podróży wewnętrznych w Krakowie, a obszar aglomeracji stanowił jedynie uzupełnienie obciążenia ruchem sieci drogowej.

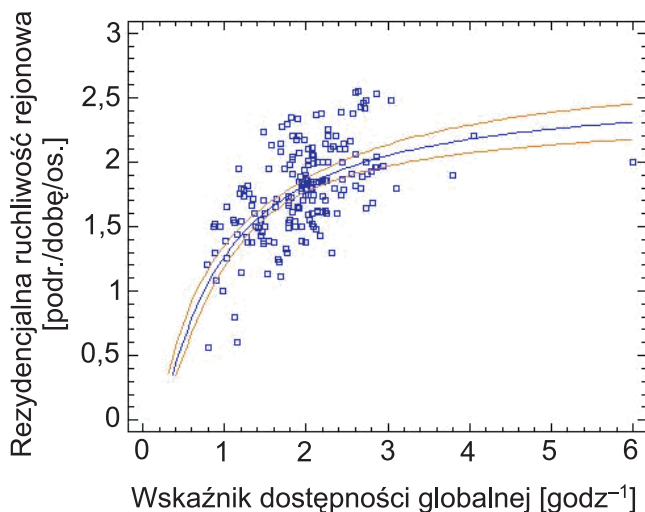
Uzyskane wyniki posłużyły do estymacji regresji prostej (liniowej i nieliniowej), która pozwoli opisać i ocenić zależność zachodzącą między analizowanymi wskaźnikami. Najlepsze dopasowanie modelu do danych uzyskano w przypadku modelu wykładniczego o postaci:

$$r_{i,KR} = e^{\left(0,96 - \frac{0,72}{D_{i,KR}}\right)} \quad (56)$$

gdzie:

- $r_{i,KR}$  – rezydencjalna ruchliwość rejonowa w rejonie  $i$  wyznaczona dla Krakowa [podr./dobę/os.],
- $D_{i,KR}$  – wskaźnik dostępności globalnej rejonu  $i$  w Krakowie [ $\text{godz}^{-1}$ ].

Opracowany model jest statystycznie istotny na poziomie istotności 0,05, co oznacza, że kształt i parametry funkcji zostały trafnie dopasowane do danych empirycznych. Na rysunku 5.3 przedstawiono wykres dopasowanej funkcji regresji na tle zbioru punktów, których współrzędne stanowią wartości zmiennych: objaśniającej i objaśnianej.



Rys. 5.3. Zależność dla Krakowa rezydencjalnej ruchliwości rejonowej od wskaźnika dostępności globalnej rejonu transportowego

Wyniki przeprowadzonej analizy wskazują, że istnieje statystycznie istotny związek pomiędzy rezydencjalną ruchliwością rejonową a wskaźnikiem dostępności globalnej. Dla wybranego kształtu funkcji i wartości jej parametrów uzyskano wartość współczynnika determinacji wynoszący  $R^2 = 0,44$ , co oznacza, że model opisuje w 44% wpływ wskaźnika dostępności. Na rysunku 5.3 kolorem czerwonym zaznaczono także 95% obszar ufności dla uzyskanej krzywej regresji.

Podobne analizy zostały przeprowadzone dla Gdańska, w którym w roku 2009 przeprowadzono Kompleksowe Badania Ruchu wykorzystane do opracowania mo-

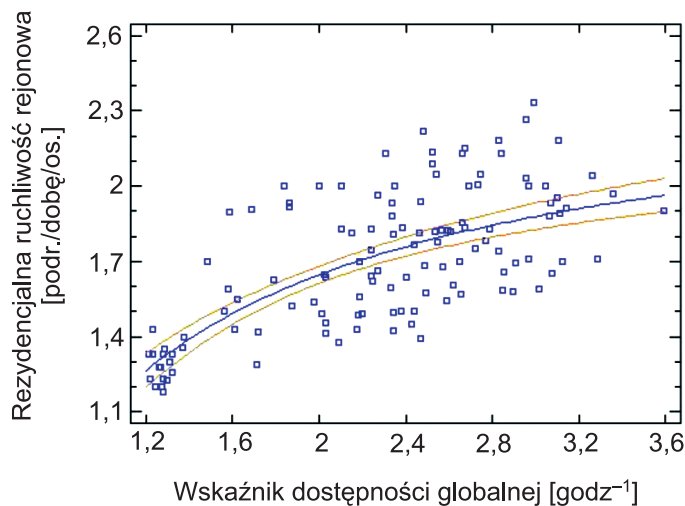
delu symulacyjnego miasta (Jamroz z zespołem [112]). Podstawę dalszych analiz stanowi baza danych zawierająca informacje o 21,5 tys. podróży. Stosując identyczną procedurę jak opisano w analizach dla Krakowa i bazując na transportowym modelu symulacyjnym Gdańska, wyznaczono wskaźniki dostępności globalnej dla każdego z rejonów wewnętrznych w modelu transportowym. Następnie wyłączono podróże niezwiązane z domem (stanowiły one 9,6% ogółu podróży), a dla pozostałych podróży wyznaczono ruchliwość rezydencjalną rejonu transportowego. Ponownie najlepsze dopasowanie modelu do danych empirycznych uzyskano dla modelu wykładniczego o postaci (równanie 57):

$$r_{i,GD} = e^{\left(0,95 - \frac{0,71}{D_{i,GD}}\right)} \quad (57)$$

gdzie:

- $r_{i,GD}$  – rezydencjalna ruchliwość rejonowa w rejonie  $i$  wyznaczona dla Gdańska [podr./dobę/os.],
- $D_{i,GD}$  – wskaźnik dostępności globalnej rejonu  $i$  w Gdańsku [ $\text{godz}^{-1}$ ].

Model jest statystycznie istotny na poziomie istotności 0,05. Na rysunku 5.4 przedstawiono wykres dopasowanej funkcji regresji.



Rys. 5.4. Zależność dla Gdańska rezydencjalnej ruchliwości rejonowej od wskaźnika dostępności globalnej rejonu transportowego

Dla wybranego kształtu funkcji i wartości jej parametrów uzyskano wartość współczynnika determinacji, który wynosi  $R^2 = 0,58$ . Na rysunku 5.4 kolorem czerwonym zaznaczono także 95% obszar ufności dla uzyskanej krzywej regresji.

Kolejne miasto poddane analizie to Płock. Kompleksowe Badania Ruchu zostały tam przeprowadzone w roku 2008 i efektem tych prac było powstanie transportowego modelu symulacyjnego miasta (Thiem i in. [229]). W ramach badań w gospodarstwach domowych uzyskano łącznie informacje o 2,6 tys. podróży stanowiące dane wejściowe do dalszych analiz prowadzonych identycznie jak w poprzednim przypadku. Równanie regresji opisujące poszukiwaną zależność przedstawia się następująco (równanie 58):

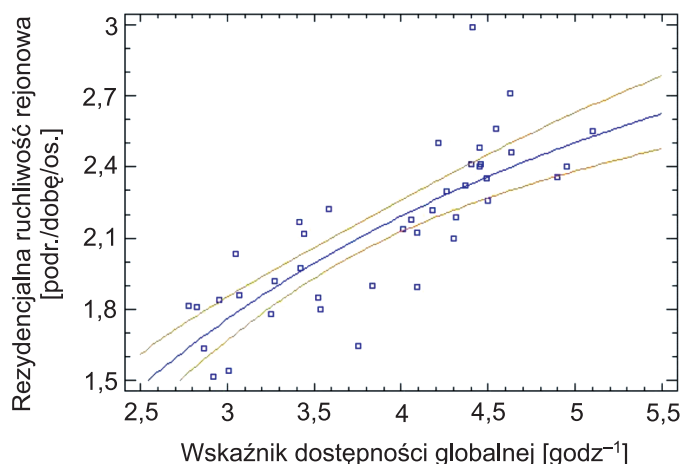
$$r_{i,PL} = e^{\left(1,46 - \frac{2,65}{D_{i,PL}}\right)} \quad (58)$$

gdzie:

- $r_{i,PL}$  – rezydencjalna ruchliwość rejonowa w rejonie  $i$  wyznaczona dla Płocka [podr./dobę/os.],
- $D_{i,PL}$  – wskaźnik dostępności globalnej rejonu  $i$  w Płocku [ $\text{godz}^{-1}$ ].

Model jest statystycznie istotny na poziomie istotności 0,05. Na rysunku 5.5 przedstawiono wykres dopasowanej funkcji regresji na tle zbioru punktów, których współrzędne stanowią wartości zmiennej objaśniającej i objaśnianej.

Dla wybranego kształtu funkcji i wartości jej parametrów uzyskano wartość współczynnika determinacji wynoszący  $R^2 = 0,59$ . Na rysunku 5.5, kolorem czerwonym zaznaczono także 95% przedział ufności dla uzyskanej krzywej regresji.



Rys. 5.5. Zależność dla Płocka rezydencjalnej ruchliwości rejonowej od wskaźnika dostępności globalnej rejonu transportowego



Chociaż uzyskane wartości współczynnika determinacji wskazują na występowanie także innych niż dostępność czynników wpływających na wielkość rezydencjalnej ruchliwości rejonowej, to uzyskane modele mogą stanowić podstawę do dalszej prowadzonych analiz.

### 5.5. Procedura wyznaczenia podróży wzbudzonych i tłumionych

Wprowadzenie do eksploatacji nowej linii tramwajowej czy nowego odcinka ulicy skutkuje skróceniem czasu podróży między wybranymi relacjami. Casy te są łatwe do wyznaczenia przy wykorzystaniu modeli transportowych miast i odnoszą się do tych relacji źródło–cel, których użytkownicy są bezpośrednimi beneficjentami inwestycji. Skrócenie czasu podróży będzie miało wpływ na wartość wskaźnika dostępności globalnej danego rejonu transportowego, wpływając na jej zwiększenie. Możliwy jest również scenariusz pogorszenia dostępności spowodowany np. zmniejszeniem przepustowości przekroju ulicy w skutek np. wyłączenia z ruchu pasa jezdni ruchu w okresie jej przebudowy.

Procedura wyznaczenia liczby podróży wzbudzonych/tłumionych powinna być przeprowadzona wg następującego algorytmu postępowania:

1. Wyznaczenie **wskaźnika dostępności globalnej** dla każdego rejonu transportowego, na podstawie modelu symulacyjnego analizowanego miasta dla dwóch przypadków: wariantu przed inwestycją i wariantu z analizowaną inwestycją. Do tego celu należy skorzystać ze wzorów (53), (54) i (55), które można sprowadzić do następującej zależności:

$$D_i = \frac{\sum_j T_{ij}^{PuT}}{\sum_j (t_{ij,t}^{PuT} \cdot T_{ij}^{PuT})} \cdot U_{i,PuT} + \frac{\sum_j T_{ij}^{PrT}}{\sum_j (t_{ij,t}^{PrT} \cdot T_{ij}^{PrT})} \cdot U_{i,PrT} \quad (62)$$

$$U_{i,PuT} + U_{i,PrT}$$

gdzie:

- $D_i$  – wskaźnik dostępności globalnej rejonu  $i$  [godz<sup>-1</sup>],
- czas podróży transportem zbiorowym między rejonami  $i, j$  dla okresu analizy  $t$  [godz],
- $t_{ij,t}^{PuT}$  – liczba podróży między rejonami  $i, j$  realizowana środkami transportu zbiorowego,
- $T_{ij}^{PuT}$  – czas podróży transportem indywidualnym między rejonami  $i, j$ , dla okresu analizy  $t$  [godz],
- $t_{ij,t}^{PrT}$  – liczba podróży między rejonami  $i, j$  realizowana środkami transportu indywidualnego,

$U_{i,PuT}$  – liczba podróży realizowanych transportem zbiorowym dla analizowanego rejonu transportowego,

$U_{i,PrT}$  – liczba podróży realizowanych transportem indywidualnym dla analizowanego rejonu transportowego;

2. Wyznaczenie spodziewanego przyrostu liczby podróży w każdym z rejonów transportowych w oparciu o zmiany **rezydencjalnej ruchliwości rejonowej**:

$$Ir_{i,m} = \left[ \frac{r_{i,m}^{WI}}{r_{i,m}^{W0}} - 1 \right] \cdot 100\% \quad (63)$$

gdzie:

$Ir_{i,m}$  – procentowy wzrost / spadek liczby podróży w rejonie  $i$  dla miasta  $m$  (udział podróży wzbudzonych lub tłumionych),

$r_{i,m}^{WI}$  – wskaźnik rezydencjalnej ruchliwości rejonowej w rejonie  $i$  wg formuły dla miasta  $m$  w wariancie inwestycyjnym (równania (56) lub (57) lub (58)),

$r_{i,m}^{W0}$  – wskaźnik rezydencjalnej ruchliwości rejonowej w rejonie  $i$  wg formuły dla miasta  $m$  w wariancie bezinwestycyjnym (równania (56) lub (57) lub (58));

3. Obliczenie nowych wartości potencjałów ruchotwórczych w rejonach transportowych dla których korekta liczby podróży wynikać będzie z innej niż pierwotnie wartości wskaźnika dostępności globalnej;
4. Zastosowanie pełnej procedury czterostadiowej wg dostępnego transportowego modelu symulacyjnego miasta:
  - a) wyznaczenie nowej macierzy podróży, bazującej na dostępnym modelu grawitacyjnym (kalibrowanym indywidualnie dla poszczególnych miast),
  - b) zastosowanie modelu podziału zadań przewozowych, mającego na celu rozdzielenie całkowitej więźby ruchu zmotoryzowanego na środki przewozowe,
  - c) przeprowadzenie procedury rozkładu ruchu na sieć drogowo-uliczną, pozwalającego na uwzględnienie zmian w natężeniach ruchu na wybór ze trasy przejazdu środków transportu indywidualnego;
5. Efektem przedstawionej procedury, który dociąży lub odciąży system transportowy, będzie większa (lub mniejsza) liczba podróży. Zatem po uwzględnieniu podróży wzbudzonych bądź tłumionych, konieczne jest powtórzenie procedury z punktów 1–4, a kolejne wyznaczenie wskaźnika dostępności globalnej będzie skutkować ponowną zmianą jego wartości, co prowadzi do zmniejszenia lub zwiększenia liczby podróży. Ten krok po raz kolejny wygeneruje pewne rezerwy w układzie, które wymagać będą przeliczenia dostęp-

ności i zwiększenia liczby podróży wzbudzonych. Gdy spełniony jest warunek iteracyjny, obliczenia udziału ruchu wzbudzonego mogą być zakończone, ponieważ układ osiąga poziom równowagi:

$$|P_n - P_{n-1}| \leq \min[\alpha \cdot \max(P_n, P_{n-1}), \beta] \quad (65)$$

gdzie:

- $P_n$  – sumaryczna liczba podróży generowanych przez rejony transportowe,
- $n$  – numer iteracji,
- $\alpha$  – parametr skalujący,  $\alpha = 0,005$ , odpowiada 0,5% zmianie całkowitej liczby podróży,
- $\beta$  – parametr graniczny. Wartość ta stanowi umowną granicę, po przekroczeniu której obliczenia iteracyjne ruchu wzbudzonego zostaną zatrzymane i może być przyjmowana uznaniowo.

Iteracyjny charakter procesu wyznaczania liczby podróży wzbudzonych i tłumionych niesie jednak za sobą pewne niebezpieczeństwo. O ile czas podróży samochodem osobowym jest zmienny i zależy od liczby podróży w więźbie ruchu, o tyle w przypadku podróży transportem zbiorowym czas przejazdu w modelach transportowych już nie zależy od liczby pasażerów. Oznacza to, że przedstawiony model nie kontroluje przyrostu pasażerów na nowych liniach transportu zbiorowego. W rzeczywistości często zwiększenie potoku pasażerskiego przekłada się na zwiększenie częstotliwości kursowania pojazdów transportu zbiorowego, co skraca czas oczekiwania i w konsekwencji czas podróży. Aby zaradzić temu problemowi, proponuje się wyznaczenie górnej granicy w ruchu wzbudzonym na inwestycjach w transport zbiorowy, jako maksymalnej wartości całkowitego przyrostu liczby podróży (rozdział 4).

## 6. PRZYKŁAD WYZNACZENIA LICZBY PODRÓŻY WZBUDZONYCH I TLUMIONYCH

### 6.1. Wyznaczenie liczby podróży wzbudzonych warunkowanych pojawieniem się nowej inwestycji w infrastrukturę transportu zbiorowego i indywidualnego

W celu sprawdzenia, jak opracowane zależności dotyczące wyznaczania rezydencjalnej ruchliwości rejonowej (równanie 63) wpłyną na zmiany w potencjałach ruchotwórczych, zdecydowano się na wykorzystanie transportowego modelu symulacyjnego aglomeracji krakowskiej (scharakteryzowanego w rozdziale 3.3). Model uwzględnia wtórny podział zadań przewozowych i umożliwia analizy przepływów pasażerów pomiędzy środkami transportu zbiorowego i indywidualnego. W transportowym modelu symulacyjnym przygotowano układ procedur obliczeniowych w taki sposób, aby wszelkie parametry wymagane do wyznaczenia niezbędnych zmienionych (np. wskaźnik dostępności globalnej) obliczały się automatycznie, uwzględniając reakcję modelu na zmiany w sieci transportowej (podział zadań przewozowych oraz rozkład macierzy podróży w sieci był wyznaczany w każdej procedurze obliczeniowej). Ponadto dysponuje się rozbudowaną bazą danych pomiarowych oraz wyników badań ankietowych prowadzonych w sąsiedztwie tych inwestycji, więc możliwe będzie porównanie wyników prowadzonych analiz symulacyjnych z dostępnymi danymi.

Na potrzeby analizy wpływu inwestycji w transporcie zbiorowym na wielkość ruchu wzbudzonego wybrano budowę linii tramwajowej w Krakowie (na docinku Rondo Grzegórzeckie – ul. Golikówka). Korzystając z transportowego modelu aglomeracji krakowskiej, przygotowano trzy scenariusze obliczeniowe:

- *Stan przed oddaniem inwestycji do użytku.* W tym przypadku odwzorowano przebieg linii autobusowych kursujących przed powstaniem linii tramwajowej. Do weryfikacji modelu skorzystano z 12 punktów pomiarowych odnoszących się do potoków pasażerskich, położonych w sąsiedztwie inwestycji. Poziom zgodności modelu dla transportu zbiorowego wyniósł  $R^2 = 0,76$ , co uznano za wartość akceptowalną.

- *Stan po oddaniu linii tramwajowej*, w którym odwzorowano przebieg linii wraz z korektą linii autobusowych, zgodnie ze stanem faktycznym. Analizy były tu prowadzone przy założeniu **stałego popytu** na podróże. W tym przypadku, poziom zgodności modelu dla transportu zbiorowego dla 12 punktów pomiarowych wyniósł  $R^2 = 0,84$ , co uznano za wartość akceptowalną.
- *Stan po oddaniu linii tramwajowej*, uwzględniający **popyt wzbudzony**.

Wybór tej inwestycji był podyktowany jeszcze jedną zasadniczą przesłanką – linia tramwajowa została poddana szczegółowej analizie polegającej na prowadzeniu badań ankietowych i wyznaczeniu udziału podróży wzbudzonych na podstawie rzeczywistych odpowiedzi użytkowników systemu (rozdział 3).

Przedmiotowa inwestycja charakteryzuje się przede wszystkim budową nowej linii tramwajowej do osiedli, które w stanie pierwotnym były obsługiwane wyłącznie przez komunikację autobusową. Ponadto były one skomunikowane układem ulicznym o niskiej przepustowości, co powodowało wysoki poziom zatłoczenia w obszarze. W ramach tej inwestycji dodano również dwujezdniową ulicę o wysokich parametrach przepustowości (rys. 6.1).

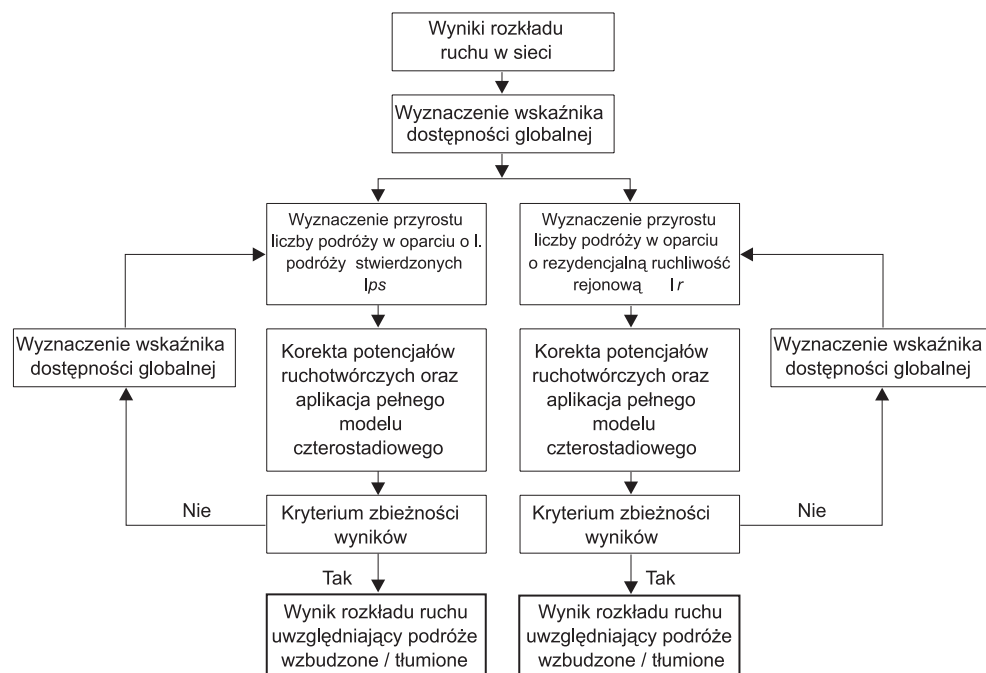


Rys. 6.1. Nowa linia tramwajowa poddana analizie (fot. autor)

Procedura obliczeniowa ma charakter iteracyjny, uwzględniający podział zadań przewozowych przez przejmowanie pasażerów przez konkurencyjne systemy transportowe. Ma to duże znaczenie, ponieważ nowej linii tramwajowej towarzyszy ulica o wysokiej przepustowości, przyczyniająca się do osłabienia efektywności inwestycji tramwajowej.

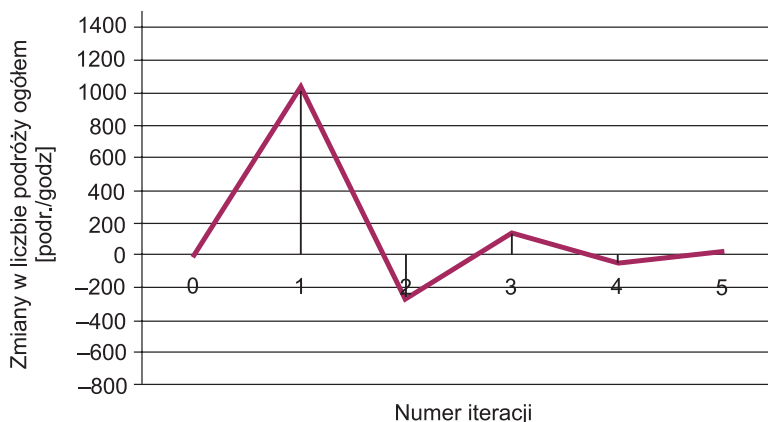
Po wyznaczeniu wskaźników dostępności globalnej dla stanu sieci przed i po wdrożeniu inwestycji określono spodziewane zmiany w potencjałach ruchotwórczych i przeliczono więźbę ruchu, uwzględniając dwa sposoby wyznaczenia zmian w potencjałach: przyrost bazujący na zmianach liczby podróży zarejestrowanych oraz zmianach w rezydencjalnej ruchliwości rejonowej. Po zastosowaniu podziału zadań przewozowych poddano kontroli potencjały ruchotwórcze dla transportu zbiorowego, sprawdzając, czy wzrost nie był zbyt wysoki. Posłużono się tutaj modelem cząstkowym (rozdział 4), mającym na celu określenie spodziewanego poziomu podróży wzbudzonych na liniach transportu zbiorowego. Wybrano rejony transportowe położone w pobliżu pętli tramwajowej na Golikówce i rejon w centrum miasta, tworząc korytarz transportowy poddany szczegółowej analizie. Dla korytarza, którym można realizować podróże między wybranymi rejonami a rejonem centrum, na podstawie modelu transportowego wyznaczono średni czas podróży przed inwestycją (41 minut) i po inwestycji (29 minut). Skrócenie czasu podróży wynosiło więc 12 minut. Przyjęto częstotliwość kursowania taboru na nowoodrodzonej linii tramwajowej na poziomie 15 minut i spodziewany udział podróży wzbudzonych dla korytarza transportowego (wg zależności 50) wynosi 9,3%.

Ponieważ wyznaczona wartość graniczna nie została przekroczona dla żadnego z rejonów transportowych, dalsze analizy prowadzono wyłącznie w oparciu o model bazujący na wskaźniku dostępności globalnej. Procedurę postępowania przedstawiono na rysunku 6.2.



Rys. 6.2. Kolejność postępowania w procedurze wyznaczania podróży tłumionych/wzbudzonych

Przedstawiona procedura ma charakter iteracyjny i wymaga kilkakrotnego powtórzenia obliczeń. Powodem tego jest fakt, iż poprawa warunków podróżowania (przez rozbudowę infrastruktury transportowej) przyczynia się do zmniejszenia czasów podróży wyrażanych wskaźnikiem dostępności globalnej, co prowadzi do przyrostu liczby podróży. Zwiększona liczba podróży powoduje ponownie dodatkowe obciążenie układu transportowego i prowadzi do korekty wskaźnika dostępności globalnej. Po każdej iteracji wyznaczono zmiany w całkowitej liczbie podróży w modelu transportowym aglomeracji krakowskiej. Na rysunku 6.3 przedstawiono graficznie zmiany w liczbie podróży uzyskane po każdej iteracji obliczeniowej.



Rys. 6.3. Zmiany w całkowitej liczbie podróży uzyskane po kolejnych krokach iteracyjnych

Zastosowanie modelu wyznaczającego wielkość podróży wzbudzonych przyczyniło się do zmian w potencjałach ruchotwórczych. Przedstawione wyniki odnoszą się do jednej godziny szczytu popołudniowego i zostały osiągnięte po sześciu iteracjach obliczeniowych (tabela 6.1).

Tabela 6.1

Liczba podróży dla całego modelu aglomeracyjnego

	Liczba podróży [podr./godz.]		
	transport indywidualny	transport zbiorowy	razem
Przed inwestycją	112 393	81 467	193 860
Po oddaniu inwestycji – popyt niezmienny	112 422	81 440	193 860
Po oddaniu inwestycji – podróże wzbudzone Wyznaczone wg procedury bazującej na zmianach rezydencjalnej ruchliwości rejonowej	112 912	81 823	194 735



Zaskakujący może wydawać się spadek pasażerów w transporcie zbiorowym po oddaniu linii tramwajowej do eksploatacji. Wynika on z faktu, iż równolegle oddano sprawne połączenie drogowe do centrum i tramwaj nie jest tak konkurencyjny wobec samochodu jak być powinien. Gdy uwzględnimy podróże wzbudzone, łącznie liczba podróży w aglomeracji wzrosła o 875 podróży w godzinie szczytu popołudniowego, jednakże transport indywidualny przejął 60% tych podróży.

Po poddaniu analizie wyników symulacji dla transportu zbiorowego, przepływy pasażerskie wewnątrz środków transportu zbiorowego (tramwaj i autobus) przedstawiają się następująco (tabela 6.2).

Tabela 6.2

Wyniki pracy przewozowej i łącznego czasu jazdy wyznaczone na podstawie wyników symulacji przeprowadzonych w transportowym modelu aglomeracji krakowskiej dla autobusów i tramwajów.

Wyniki dotyczą całej aglomeracji oraz jednej godziny szczytu popołudniowego

	Wariant	Pasażero- kilometry	Zmiana do stanu istniejącego	Pasażero- godziny	Zmiana do stanu istniejącego
Autobus	przed inwestycją	250 600	—	16 900	—
	po inwestycji – popyt stały	243 400	97,1%	16 400	97,0%
	po inwestycji – popyt wzbudzony liczony wg metody <b>rezydencjalnej ruchliwości rejonowej</b>	244 100	97,4%	16 500	97,6%
Tramwaj	przed inwestycją	197 700	—	11 500	—
	po inwestycji – popyt stały	205 300	103,8%	11 800	102,6%
	po inwestycji – popyt wzbudzony liczony wg metody <b>rezydencjalnej ruchliwości rejonowej</b>	206 400	104,4%	11 900	103,5%

Należy wziąć pod uwagę stały popyt, zmiany pracy przewozowej i łącznego czasu jazdy są zgodne z oczekiwaniami – spadek w przypadku autobusów i wzrost w przypadku tramwajów. Jednakże, gdy uwzględnimy podróże wzbudzone wyznaczone w oparciu o zmiany rezydencjalnej ruchliwości rejonowej, spadek pracy przewozowej w autobusach jest nieco niższy w porównaniu do analiz ze stałym popytem (o 700 pasażerokilometrów w odniesieniu do godziny szczytu popołudniowego), natomiast w przypadku tramwajów wzrost pasażerokilometrów w stosunku do analiz ze stałym popytem wynosi 1100.

W obu systemach transportowych łączny czas jazdy wyrażony w pasażerogodzinach jest wyższy o 100 [pasgodz.] w odniesieniu do analiz ze stałym popytem, bez względu na sposób wyznaczenia wielkości podróży wzbudzonych.

Zgodność modelu uwzględniającego podróże wzbudzone z pomiarami przekrojowymi była wyższa od wariantu ze stałym popytem i wynosiła  $R^2 = 0,88$ . Analizując wzrost poziomu zgodności modelu transportowego z bazą danych pomiarowych, warto zwrócić uwagę na fakt, iż w każdym przypadku zgodność modeli z rzeczywistymi pomiarami była wyższa, gdy uwzględniano występowanie podróży wzbudzonych w porównaniu do analiz prowadzonych ze stałym popytem. Nie są to istotne różnice, lecz warte odnotowania, ponieważ wskazują, że analizy dla stałego popytu wpływają na słabsze wyniki jakości modeli transportowych.

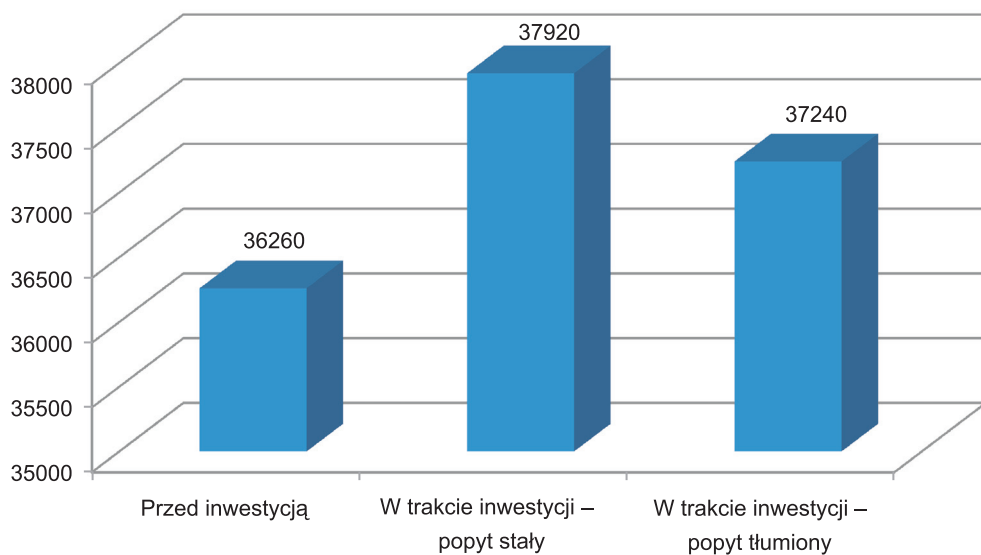
## 6.2. Modelowanie podróży tłumionych

W niniejszym rozdziale przedstawiona zostanie aplikacja procedury wyznaczania udziału podróży tłumionych związanych z wprowadzeniem znacznych utrudnień w ruchu, omówiona na przykładzie dużej inwestycji krakowskiej związanej z przebudową Ronda Ofiar Katynia. W pierwszym kroku do transportowego modelu symulacyjnego aglomeracji krakowskiej wprowadzono wyniki pomiarów przekrojowych prowadzonych przed ograniczeniami w ruchu i sprawdzono zgodność modelu w bezpośrednim sąsiedztwie tej inwestycji. Uzyskano współczynnik zgodności równy  $R^2 = 0,93$ . W kolejnym etapie do modelu wprowadzono faktyczne ograniczenia w ruchu (zamknięcie relacji skrajnych w lewo na Rondzie oraz ograniczenie przepustowości wlotów do Ronda z dwóch do jednego pasa ruchu). Dokonano rozkładu ruchu uwzględniającego podział zadań przewozowych i po raz kolejny sprawdzono współczynnik zgodności – tym razem  $R^2 = 0,84$ , co jest wynikiem słabszym od zgodności modelu przed wprowadzeniem ograniczeń w ruchu, lecz wciąż na akceptowalnym poziomie. W analizach przy stałym popycie można się spodziewać zmian w podziale zadań przewozowych i tak też się stało – łączna liczba pasażerów transportu zbiorowego w skali całego modelu wzrosła o 315 podróży w godzinie szczytu popołudniowego. Wiąże się to z pogorszeniem warunków ruchu dla transportu indywidualnego i przejęciem części podróży przez transport zbiorowy. W przypadku tej inwestycji są to zmiany bardzo małe, wynoszące zaledwie 0,4% całkowitej liczby podróży. W analizach ze stałym popytem liczba pojazdów w sieci jest więc stała, a konsekwencją pogorszenia warunków podróży jest zmiana w pracy przewozowej, najwyraźniej widoczna w przypadku pojazdogodzin: wzrost w skali całego modelu aglomeracyjnego o prawie 5%.

Kolejny krok to wyznaczenie udziału podróży tłumionych. W tym celu wyznaczono parametr dostępności transportowej (zgodnie z procedurą przedstawioną w rozdziale 5) dla każdego z rejonów dla obu stanów – przed i po wprowadzeniu ograniczeń. Następnie wyznaczono zmiany we wskaźniku dostępności globalnej (zgodnie z równaniem (62)), co pozwoliło na określenie zmian w potencjałach ru-

chotwórczy rejonów transportowych. W tym przypadku całość obliczeń powtórzono trzykrotnie, przy czym już po drugiej iteracji układ osiągnął stabilność (kryterium zbieżności wyników) i zmiany w potencjałach były pomijalnie małe.

W wyniku zastosowania opracowanej procedury obliczeniowej związanej z wyznaczaniem liczby podróży zarejestrowanych uzyskano wariant modelu transportowego zawierający skorygowane wielkości potencjałów ruchotwórczych. Zmiany dotyczyły rejonów położonych w sąsiedztwie Ronda, czyli tych, które odczuły bezpośrednio efekty wprowadzonych utrudnień w ruchu wyrażone zmianą w parametrze dostępności transportowej. Wyznaczony obszar zawiera 22 rejonów transportowych, w których liczba podróży łącznie zmniejszyła się z 11 268 podróży/godz. do 10 670 podróży/godz., co daje spadek 5,6%. Jest to wartość porównywalna z wynikami ankiet (rozdział 3), gdzie deklarowany spadek wynosił 4,8%. Przy uwzględnieniu zmniejszonej liczby podróży w modelu wyniki rozkładu ruchu wykazują większą zgodność z pomiarami niż w przypadku analiz dla stałego popytu i współczynnik zgodności wynosi  $R^2 = 0,88$ , co może prowadzić do wniosku, że model lepiej oddaje rzeczywiste warunki ruchu w sieci. Interesujące wyniki można dostrzec, poddając analizie zmiany łącznego czasu jazdy, wyrażonego w pojazdogodzinach (rys. 6.4).



Rys. 6.4. Łączny czas jazdy (pojazdogodziny) w skali całej aglomeracji dla trzech scenariuszy obliczeniowych

Zmiany w łącznym czasie jazdy wskazują, że układ drogowy wpłynął na liczbę generowanych podróży, co przełożyło się na zmniejszenie obciążenia sieci. Należy podkreślić kierunek zmian, prawie taki sam jak w przypadku wyników badań wła-

snych – reakcja sieci na występowanie podróży tłumionych (tabela 3.3) wskazuje na wzrost pracy przewozowej o 5,2% w przypadku popytu stałego (4,6% dla analiz bazujących na modelu podróży tłumionych) i o 4,0% (2,7% dla analiz bazujących na modelu podróży tłumionych) w przypadku popytu tłumionego. Większe wartości zmian w łącznym czasie jazdy wynikają z charakteru prowadzonych prac – w przypadku analizy bazującej wyłącznie na ankietach uzyskane informacje przełożono na zmiany potencjałów dla kilku rejonów, natomiast w przypadku analiz prowadzonych w oparciu o model własny, zmiany dotyczyły nie tylko otoczenia, ale całego modelu aglomeracyjnego oraz uwzględniały wpływ podziału zadań przewozowych. Uzyskane wyniki wskazują, że model reaguje w sposób bardzo zbliżony do warunków odwzorowanych na podstawie ankiet i wskazuje na jego przydatność w tego typu analizach.

## 7. PODSUMOWANIE

### 7.1. Istota badań i zakres wykonanych analiz

Zjawisko podróży wzbudzonych towarzyszy wszystkim inwestycjom w infrastrukturę transportową i jest na tyle słabo zbadane, że nie jest uwzględniane w metodach prognozowania ruchu. O ile możliwe jest ujęcie w zaawansowanych modelach bazujących na aktywnościach podróży, o tyle w przypadku ujęcia czterostadiowego, powszechnie stosowanego w Polsce, nie jest możliwa jego kwantyfikacja (modele czterostadiowe nie są wrażliwe na czynnik czasu podróży jako determinanty generacji podróży). Rozbudowa modelu czterostadiowego o moduł uwzględniający wpływ zmian wartości czasu podróży na liczbę dodatkowo generowanych podróży stanowi podstawę do opracowania procedury przełamującej ograniczenia wynikające z założenia stałego popytu, czyli niereagujące na zmiany w szeroko rozumianej sprawności sieci transportowej. W dostępnych wynikach badań nad zjawiskiem podróży wzbudzonych dominują analizy *ex ante/ex post*, polegające na porównywaniu zmian w pracy przewozowej bądź potokach pasażerskich w stanach przed i po oddaniu danej inwestycji (*ex post* to tylko badania „po fakcie”). Badania te wykazywały występowanie ruchu wzbudzonego, nie pochodzącego od zmian w podziale zadań przewozowych bądź wynikających ze zmiany przez użytkownika trasy przejazdu, lecz związanego z pojawieniem się dodatkowych podróży, wskutek poprawy warunków podróży. Badania nad zjawiskiem podróży wzbudzonych nie są prowadzone na szeroką skalę i nie stworzono satysfakcjonujących modeli kwantyfikujących to zjawisko. Na przeszkodzie stoi głównie problem separowalności wpływów – nie można jednoznacznie stwierdzić sprawczej przyczyny wzrostu ruchu. Podróże wzbudzone poprawą stanu infrastruktury transportowej mogłyby być tylko jedną z przyczyn. Pojawienie się dodatkowych podróży wiązano bardziej ze zmianami w zagospodarowaniu przestrzennym czy z czynnikami społeczno-gospodarczymi niż z poprawą dostępności do systemu transportowego. Bardzo często, podróże wzbudzone i w konsekwencji pojawienie się ruchu wzbudzonego jest kwantyfikowane stopą elastyczności popytu wyrażającą skutki zmian w podaży wywołane realizowanymi inwestycjami. Jednakże takie podejście to raczej efekt badania objawów niż poszukiwania przyczyny.

W ramach niniejszej pracy sprawdzon, jak podróże wzbudzone są postrzegane przez użytkowników, oraz w jaki sposób są analizowane przez badaczy w literaturze światowej. Wykazano związek między dostępnością transportową rejonu transportowego a liczbą podróży i na tej podstawie opracowano model pozwalający kwantyfikować wielkość podróży wzbudzonych związanych z inwestycjami infrastrukturalnymi.

Dla linii transportu zbiorowego opracowano autonomiczny model wskazujący, o ile może wzrosnąć potok pasażerski w korytarzu transportowym związany z nową inwestycją. Ponieważ zjawisko podróży wzbudzonych ma niejednoznaczny charakter, model oparto o układ wnioskowania rozmytego, a wyniki aproksymowano przy wykorzystaniu algorytmów genetycznych. W efekcie uzyskano równanie pozwalające na wyznaczenie liczby dodatkowych podróży związanych z pojawieniem się nowego połączenia. Model ostateczny został poddany częściowej weryfikacji na rzeczywistych inwestycjach i wykazał wysoką zgodność ze stanem rzeczywistym.

## 7.2. Wnioski generalne

1. Zjawiska podróży wzbudzonych i tłumionych są obecne w pracach badawczych prowadzonych za granicą, lecz odnoszą się one do analiz *ex post*, co utrudnia wykorzystanie tych badań dla prognozowania ruchu inwestycji w fazie planowania i projektowania;
2. Procedura kwantyfikowania podróży wzbudzonych lub tłumionych, w głównej mierze bazuje na obserwowanych w przekrojach ulic zmianach w natężeniu ruchu drogowego oraz zmianach w wielkości potoków pasażerskich, na ogół posiłkując się bazami danych pochodzących z kompleksowych badań ruchu;
3. Jednym z narzędzi pozyskiwania informacji o podróżach wzbudzonych i tłumionych są bezpośrednie wywiady kwestionariuszowe, przeprowadzone wśród ogółu użytkowników systemu transportowego, co pozwala między innymi wnikać w przyczynę ich powstawania. Przeciętny użytkownik ma często problem ze zrozumieniem pytania lub z udzieleniem właściwej odpowiedzi;
4. Według prowadzonych badań kwestionariuszowych użytkowników systemu transportowego 4–6% respondentów wskazywało, że zdarzyło się im częściej wyjeżdżać z powodu odczuwalnie lepszych warunków podróżowania, a 5–7% wskazało, że rezygnowali z części podróży z powodu znacznych utrudnień w ruchu;
5. Zmiany w atrybutach podróży powodowane pojawieniem się nowej inwestycji transportowej mogą mieć wieloraki charakter: zmiana trasy przez użytkownika, zmiana środka transportu, zmiana celu podróży, rezygnacja z podróży lub pojawienie się dodatkowej podróży. Możliwe jest odseparowanie tych wpływów przez zastosowanie dla obszaru analizy modeli makrosymulacyjnych;

6. Badania własne wykazały, iż zmieniające się warunki ruchu panujące w sieci drogowej (wyrażane poziomem zatłoczenia transportowego) wpływają na rezygnację bądź wzbudzenie potrzeb transportowych. Przekłada się to na mniejsze lub większe (w zależności od charakteru podróży: wzbudzonych lub tłumionych), w porównaniu do analiz przy założeniu stałego popytu, zmiany w efektywności funkcjonalnej analizowanych inwestycji;
7. W przypadku wprowadzenia istotnych ograniczeń w ruchu (np. remont lub przebudowa skrzyżowania) warunki ruchu uzyskane z zastosowania modelu symulacyjnego nie ulegają pogorszeniu w takim stopniu, jak w przypadku analiz z niezmiennym popytem. Natomiast po wprowadzeniu inwestycji do użytkowania spodziewane korzyści funkcjonalne są niższe, gdyż wzbudzony dodatkowy ruch może wpłynąć na pogorszenie warunków ruch;
8. Na podstawie wyników badań własnych (potwierdzających wyniki badań innych autorów) wykazano, że istnieje potencjalny związek między przewidywanym czasem podróży a gotowością do jej realizacji bądź odrzucenia. Stanowi to podstawową przesłankę do budowy modeli predykcji liczby podróży wzbudzonych bądź tłumionych;
9. Zaproponowany wskaźnik dostępności globalnej jako odwrotność średniego czasu podróży z badanego rejonu do pozostałych rejonów transportowych, ważonym liczbą podróży i udziałem poszczególnych środków transportu, pozwala na wartościowanie zmian związanych z efektami prowadzonych inwestycji infrastrukturalnych w skali miasta oraz w skali rejonów transportowych;
10. Za parametr wyrażający wpływ dostępności transportowej na liczbę podróży wzbudzonych oraz tłumionych można przyjąć **rezydencjalny wskaźnik ruchliwości rejonowej**, stanowiący przeciętną liczbę podróży generowanych w ciągu doby przez mieszkańca, odbywanych wyłącznie z rejonu jego zamieszkania (uwzględniano wszystkie podróże związane z domem);
11. Istnieją statystycznie istotne związki pomiędzy wskaźnikiem dostępności globalnej (zmienna objaśniająca) a wskaźnikiem rezydencjalnej ruchliwości rejonowej (zmienna objaśniana). Badane zależności osiągnęły współczynnik determinacji  $R^2 = 0,44$  dla analiz prowadzonych w modelu transportowym aglomeracji krakowskiej,  $R^2 = 0,58$  dla analiz prowadzonych w modelu transportowym Gdańska oraz  $R^2 = 0,59$  dla analiz prowadzonych dla Płocka;
12. Estymowane zależności wykorzystane do opisu zjawiska podróży wzbudzonych jako zmiany funkcji dostępności globalnej, spowodowanej pojawieniem się nowej inwestycji infrastrukturalnej, umożliwiają oszacowanie zmian w potencjałach ruchotwórczych rejonów transportowych;
13. Pełna aplikacja modelu czterostadiowego, w tym obejmująca opracowane modele własne, pozwala wykazać wpływ zwiększenia liczby podróży wywołanych nową inwestycją transportową na parametry pracy sieci transportowej. Nowa



inwestycja transportowa wpływa ponadto na rozkład przestrzenny podróży, wybór środka transportu oraz wybór trasy przejazdu i możliwe jest odseparowanie tych wpływów od podróży wzbudzonych/tłumionych;

14. Przez aplikację zależności związanych z rezydencjalną ruchliwością rejonową, możliwe jest wprowadzenie korekty do liczby podróży generowanych przez rejon transportowy, przy czym zmiana liczby podróży będzie tym większa, im bardziej nowa inwestycja transportowa będzie zwiększać wskaźnik dostępności transportowej. Jest to zgodne z intuicyjną interpretacją modelu grawitacyjnego, określającego międzyrejonowe liczby podróży dla różnych czasów podróży realizowanych w korytarzu analizowanej inwestycji;
15. Iteracyjny proces korygowania liczby podróży jest kontrolowany przez obserwowanie zmiany wskaźnika dostępności globalnej. Niezbędne jest kilkukrotne powtórzenie procedury obliczeniowej, śledząc za każdym razem zmiany w wartości dostępności globalnej. Można to wyjaśnić następująco: pojawienie się nowej inwestycji przyczyni się do zwiększenia podaży, co skutkuje skróceniem czasów podróży realizowanych w korytarzu tej inwestycji. To wpłynie na zwiększenie wskaźnika dostępności globalnej i w efekcie wzrośnie liczba podróży. Ponieważ model czterostadiowy symuluje obciążenia sieci transportowej, to kolejne wyznaczenie wskaźnika dostępności globalnej wykaże pogorszenie warunków ruchu i konieczność kolejnej korekty liczby podróży. Obliczenia należy prowadzić tak długo, aż osiągnięta zostanie stan braku przyrostu podróży w kolejnej iteracji.

## 7.4. Oryginalne rezultaty pracy

Do oryginalnych rezultatów pracy można zaliczyć:

- poddanie szczegółowym badaniom zjawisko podróży wzbudzonych i tłumionych,
- zastosowanie modeli symulacyjnych do kompleksowej oceny wpływu zmian w podaży (stan infrastruktury transportowej) na popyt (liczba realizowanych podróży),
- wykorzystanie układu wnioskowania rozmytego do wyznaczenia spodziewanego udziału podróży wzbudzonych uruchomieniem nowej linii transportu zbiorowego,
- sformułowanie wskaźnika dostępności globalnej rejonu transportowego jako syntetycznego miernika wpływu na liczbę podejmowanych podróży,
- znalezienie statystycznie istotnego związku między wskaźnikiem dostępności globalnej a rezydencjalną ruchliwością transportową przypisaną do rejonu transportowego,

- znalezienie statystycznie istotnego związku między wskaźnikiem dostępności globalnej a liczbą podróży zadeklarowanych w rejonie transportowym,
- opracowanie metody i procedury wyznaczania liczby podróży tłumionych procesami wykonawczymi inwestycji transportowych oraz podróży wzbudzonych – po oddaniu inwestycji do ruchu.

#### **7.4. Kierunki dalszych badań**

Przedstawione w pracy badania i ich analizy nie wyczerpują zagadnienia modelowania ruchu wzbudzonego. Przyjęte uproszczenia w procesie modelowania powodują, że kwestie generowania dodatkowych podróży powinny być poddane dalszym analizom, uwzględniającym:

- wpływ motywacji podróży w generowaniu/tłumieniu ruchliwości mieszkańców,
- udział podróży niezmotoryzowanych i ich rola w procesie powstawania ruchu wzbudzonego,
- analizowanie podróży wzbudzonych i tłumionych w modelach aktywności i w ujęciu łańcuchów podróży.

## Literatura

- [1] Adler T., Ben-Akiva M., *A theoretical and Empirical model of trip chaining behavior*, Transportation Research, Vol. 13B, 1979, 243-257.
- [2] Akcelik R., Besley M., Roper R., *Fundamental relationship for traffic flows at signalized intersections*, ARRB Transport Research Ltd., Research Report, ARR 340, 1999.
- [3] Aliesch B., Sauter J., Kuster J. *Räumliche Auswirkungen des Vereinatunnels: Eine ex-post Analyse*, ARE, Bern 2006.
- [4] Antonisse R., Bexelius S., Kroes E., *Return to the peak*, Paper presented at the Public Transport Research Centre, Summer Annual Meeting in Bath, 1987.
- [5] APAS, Transport Research, Urban Transport: Effectiveness of measures influencing the level of public transport use in urban areas, Office for official Publications of the European Communities Brussels, 1997.
- [6] Arabas J., *Wykłady z algorytmów ewolucyjnych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, wyd. 2, Warszawa 2004.
- [7] Avineri E., *The Fuzzy Meaning of Reference-Based Perceptions in Travel Choice Modeling*, 89th Transportation Research Board Annual Meeting, November 2009.
- [8] Axhausen K., Garling T., *Activity Based Approaches to Travel Analysis: Conceptual Framework, Models and Research Problems*, Transportation Review, Vol. 12, 1992, 323-341.
- [9] Baas S., Kwakernaak H., *Rating and Ranking of Multiple Aspects Alternatives Using Fuzzy Sets*, Automatica, Vol. 13, 1977, 47-58.
- [10] Bahke E., *Systemy transportowe dziś i jutro*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1977.
- [11] Bailly H., *Assessing the issue of induced travel: a briefing on evidence and implications from the literature*, Washington Metropolitan Council of Governments, July 2000.
- [12] Baran P., *Kształt funkcji przynależności a rozwiązanie zagadnienia rozmytego programowania dynamicznego*, Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego, nr 415, Prace Katedry Ekonometrii i Statystyki nr 16, Szczecin 2005, 5-16.

- [13] Bauer M., Szalkowski M., *Opracowanie studium remarszrutyzacji układu linii transportu miejskiego w Krakowie*, Politechnika Krakowska oraz Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji Oddział w Krakowie, Kraków 2011.
- [14] Bell M., *The estimation of junction turning volumes from traffic counts: The role of prior information*, Traffic Engineering Control, 25(5), 1984, 279-283.
- [15] Ben-Akiva M., Bowman J., Gopinath D., *Travel demand model system for the information era*, Transportation, Vol. 23 (3), 1996, 241-266.
- [16] Ben-Akiva M., Bowman J., *Integration of an activity-based model system and a residential location model*, Urban Studies, Vol. 35 (7), 1998, 1131-1153.
- [17] Ben-Akiva M., Lerman S., *Discrete choice analysis: Theory and application in travel demand*, Cambridge: MIT Press, 1985.
- [18] Ben-Akiva M., Bowman J., *Activity-based disaggregate travel demand model system with daily activity schedules*, Paper presented at the EIRASS Conference on Activity-Based Approaches: Activity Scheduling and the Analysis of Activity patterns, Eindhoven 1995.
- [19] Benjamins M., van Nes R., *Multimodal travel choice modeling: a supernetwork approach*, 81st Transportation Research Board Annual Meeting, 2002.
- [20] Bernardin V., *An Accessibility-based approach to travel demand forecasting: a new alternative to four step and activity based methods*, 87th Transportation Research Board Annual Meeting, January 2008.
- [21] Bhat C., Guo J., Srinivasan S., Sivakumar A., *Comprehensive Econometric Microsymulator for Daily Activity Travel Patterns*, Transportation Research Record, Vol. 1894, 2004, 57-66.
- [22] Bhat C., Guo J., Srinivasan S., Sivakumar A., *Guidebook on Activity Based Travel Demand Modeling for Planners*, Product 4080-P3, Texas Department of Transportation, October 2003.
- [23] Bilgic, T., Turksen, I., *Measurement of membership functions: theoretical and empirical work*, [in:] H. Prade D. Dubois and H.J. Zimmermann, editors, *International Handbook of Fuzzy Sets and Possibility Theory*, Kluwer Academic, Norwell, MA, 1998.
- [24] Blundell R., Bond S., Windmeijer F., *Estimation in Dynamic Panel Data Models: Improving on the Performance of the Standard GMM estimators*, The Institute for Fiscal Studies, IFS Working Papers, W 00/12, London 2000.
- [25] Bonsall P., *Can induced traffic be measured by surveys?*, Transportation, 23, 1996, 17-34.
- [26] Botes F., Pienaar W., *A Methodological Framework for Measuring the Economic Benefits of Generated Traffic due to Improvements in Transport Accessibility by means of an Increase in Economic Land Value*, 83th Transportation Research Board Annual Meeting, January 2004.

- [27] Bronsztejn I.N., Siemiendajew K.A., *Matematyka poradnik encyklopedyczny*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2004, 113, 114.
- [28] Bryniarska Z., Starowicz W., *Wyniki badań systemów publicznego transport zbiorowego w wybranych miastach*, Monografia SITK O/Kraków, nr 19, Zeszyt 155, Kraków 2010.
- [29] Budner W., *Lokalizacja przedsiębiorstw. Aspekty ekonomiczno-przestrzenne i środowiskowe*, Akademia Ekonomiczna w Poznaniu, Poznań 2006.
- [30] Cairns S., Hass-Klau C., Goodwin P., *Traffic impact of highway capacity reductions: assessment of the evidence*, ERSC Transport Studies Unit, UCL, London 1998.
- [31] Carey H.C., *Principles of Social Science*, Lippincott, Philadelphia 1859.
- [32] Casas I., *Evaluating the importance of accessibility to congestion response Using a GIS-based Simulator*, Journal of Geographical Systems, Vol. 5, 2003, 109-127.
- [33] Cascetta E., *Transportation Systems Engineering: Theory and Methods*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2001.
- [34] Cervero R., Hansen M., *Induced travel demand and induced road investment: a simultaneous equation analysis*, Journal of Transport Economics and Policy, 36, 2002, 469-490.
- [35] Cervero R., *Road expansion, urban growth and induced travel: a path analysis*, Journal of American Planning Association, Vol. 69, No. 2, 2003, 145-163.
- [36] Cervero R., *The Built Environment and Travel: Evidence from the United States*, European Journal of Transport and Infrastructure Research, 3, No. 2, TU Delft, 2003, 119-137.
- [37] Cerwenka P., *Neuverkehr – Realität oder Phantom?*, Zeitschrift für Verkehrswissenschaft, 67, 286-326.
- [38] Chapin F., *Free-time activities and the quality of urban life*, Journal of the American Institute of Planners, Vol. 37, 1971, 411-417.
- [39] Cheung K., Polak J., *A Bayesian Approach to Modelling Uncertainty in Transport Infrastructure Project Forecasts*, 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., 2010.
- [40] Chih-Chung Y., Bose N., *Generating fuzzy membership function with self-organizing feature map*, Pattern Recognition Letters 27, 2006, 356-365.
- [41] Chodak G., Kwaśnicki W., *Zastosowanie algorytmów genetycznych w prognozowaniu popytu*, Gospodarka Materialowa i Logistyka, nr 4, 2002, 2-7.
- [42] Combs W., Andrews J., *Combinatorial Rule Explosion Eliminated by a Fuzzy Rule Configuration*, IEEE Trans. Fuzzy Syst., Vol. 6, No. 1, 1998, 1-11.
- [43] Coombe D., *Induced traffic: what do the transportation models tell us?*, Transportation, 23, 1996, 83-101.

- [44] Crane R., *On Form versus Function: Will the New urbanizm reduce Traffic, Or Increase It?*, Journal of Planning Education and Research, Vol. 15, 1996, 117-126.
- [45] Daganzo C., *Fundamentals of Transportation and Traffic Operations*, Pergamon, 1997.
- [46] Deaton A., *Panel data from time series of cross secitions*, Journal of Econometrics, 30, 1985, 109-126.
- [47] De Corla-Souza P., Cohen H., *Estimating induced travel for evaluation of metropolitan highway expansion*, Transportation 26, 1999, 249-262.
- [48] De Corla-Souza P., *Estimating induced travel, emissions and benefits in highway corridor analysis*, Transportation Research Board, Washington D.C., 1999.
- [49] De Corla-Souza P., *Accounting for induced travel in evaluation of metropolitan highway expansion*, preprint for 77th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., 1998.
- [50] Deo N., *Teoria grafów i jej zastosowania w technice i informatyce*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1980.
- [51] Devore J., *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*, 4th edition, Duxbury Press, Belmont, CA, 1995.
- [52] Doherty S., Axhausen K., *A conceptual model of the weekly household activity-travel scheduling process*, Network on the European Communications and Transport Activities Research Euroconference, Tel Aviv, April 1998.
- [53] Domencich T., *Estimation of urban passenger travel behavior: An economic demand model*, Highway research Record 238, Highway Research Board, 1969.
- [54] Douglas B., *Induced traffic and induced demand in benefit – cost analysis*, U.S. Department of Transportation Volpe National Transportation Systems Center Cambridge, Massachusetts 1998.
- [55] Dowling R., Colman S., *Effects of increased highway capacity: Results of a household behavior survey*, Transportation Research Circular, No. 48, 1998.
- [56] Driankov D., *Wprowadzenie do sterowania rozmytego*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1996.
- [57] Ducca F., *Exploring Influence of Urban Form on Travel and Energy Consumption: Tour-Based or Trip-Based Analysis?*, Transportation Research board, washington d.C., 2012, Warszawa 1996.
- [58] Ettema D., Borgers A., Timmermans H., *Simulation model of activity scheduling, behavior*, Transportation Research Record, Vol. 1413, 1993, 1-11.
- [59] Fellendorf M., Haupt T., Heidl U., Scherr W., *PTV vision: activity-based demand forecasting in daily practice*, [in:] *Activity-Based Approaches to Travel Analysis*, Elsevier Science Ltd., New York 1997, 55-71.

- [60] Ferris M., Meeraus A., Rutherford T., *Computing Wardropian Equilibria in a Complementarity Framework*, Optimization Method & Software, Vol. 10, 1999, 669-685.
- [61] Florian M., Spiess H., *The convergence of diagonalization algorithms for asymmetric network equilibrium problems*, Transportation Research B, 16(6), 1982, 477-484.
- [62] Friedberg J., *Modele generacji rozkładu przestrzennego ruchu w warunkach małych i średnich miast polskich*, IKŚ, Kraków 1979.
- [63] Fröhlich P., *Induced traffic: Review of the explanatory models*, 3rd Swiss Transport Research Conference, Ascona, March 2003.
- [64] Fulton L., Noland R., Meszler D., Thomas J., *A statistical analysis of induced travel effects in the US Mid-Atlantic region*, 79th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2000.
- [65] Fuzzy logic toolbox, User Guide, version 2, The Math Works Inc., 2000.
- [66] Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M., *Inżynieria ruchu drogowego*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2008.
- [67] Garber N., *Traffic and Highway Engineering*, Third Edition, University of Virginia, Thomson Learning, Pacific Groove, 2002.
- [68] Geurs K., van Wee B., *Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions*, Journal of Transport Geography, Vol. 12, 2004, 127-140.
- [69] Geurs K.T., Ritsema van Eck J.R., *Accessibility measures: Review and application*, RIVM, The National Institute of Health and Environment, 2001.
- [70] Giacomazzi F., Clerici R., Marti P., Rudel R., Brugnoli G., Passardi-Gianola L., *Räumliche Auswirkungen der Verkehrsinfrastrukturen in der Magadinoebene: Eine ex-post Analyse*, ARE, Bern 2004.
- [71] Goldberg E., *Algorytmy genetyczne i ich zastosowanie*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003.
- [72] Gonzalez R., Marrero G., *Induced road traffic in Spanish regions: A dynamic panel data model*, Transportation Research Part A, 46, 2012, 435-445.
- [73] Goodwin P., *Empirical evidence of induced traffic, a review and synthesis*, Transportation 23, 1996, 35-54.
- [74] Goulias K., Pendyala R., Kitamura R., *Practical method for the estimation of trip generation and trip chaining*, Transportation Research Record, Vol. 1285, 1989, 47-56.
- [75] Goulias, K., *Multilevel analysis of daily time use and time allocation to activity types accounting for complex covariance structures using correlated random effects*, 9th International Conference on Travel Behaviour Research, Goldcoast, Juli 2005.
- [76] Greening I., Greene D., Difiglio C., *Energy efficiency and consumption – the rebound effect – a survey*, Energy Policy, 28 (6-7), 2000, 389-401.



- [77] Gregorowicz J., Trybuś P., *Wykonanie pomiarów wraz z analizą ruchu – w związku z otwarciem wschodniej obwodnicy miasta Bielsko-Biała*, materiały niepublikowane, Katowice–Bielsko-Biała, grudzień 2011.
- [78] Greń J., *Statystyka matematyczna: podręcznik programowy*, Warszawa 1987.
- [79] Güller P., Schenkel W., De Tomassi R., Otterli D., *Räumliche Auswirkungen der Züricher S-Bahn: Eine ex-post Analyse*, ARE, Bern 2004.
- [80] Gulsen M., Smith A., Tate D., *A genetic algorithm approach to curve fitting*, International Journal of Production Research, Vol. 33, No. 7, 199, 1911-1923.
- [81] Gutenbaum J., *Modelowanie matematyczne systemów*, PWN, Warszawa 1978.
- [82] Gwiazda T., *Algorytmy genetyczne Kompendium, t. 1, Operator krzyżowania dla problemów numerycznych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2009.
- [83] Gwiazda T., *Algorytmy genetyczne kompendium, t. I, Operator krzyżowania dla problemów numerycznych*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 2007.
- [84] Hall P., Breheny M., McQuail R., Hart D., *Western sunrise: The Genesis and Growth of Briatin's High-Tech Corridors*, Allen & Unwin, London 1987.
- [85] Hall R., *Handbook of transportation Science*, Second Edition, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 2003.
- [86] Hanaoka S., Kunadhamraks P., *Multiple Criteria and Fuzzy Based Evaluation of Logistics Performance for Intermodal Transportation*, Journal of Advanced Transportation, Vol. 43, No. 2, 2007, 123-153.
- [87] Handy S., *Urban Form and Pedestrian Choices: Study of Austin Neighborhoods*, Transportation Research Record: Journal of transportation Research Board, No. 1552, Washington 1996, 135-144.
- [88] Hansen Ch., *Improvement and rationalizations of bus service in rural areas of Denmark*, Transportation Research, Vol. 22A, No. 1, 1988.
- [89] Hansen L., *Large sample properties of generalized method of moments estimators*, Econometria, Vol. 50, 1982, 1029-1054.
- [90] Hansen M., Huang Y., *Road supply and traffic in California urban areas*, Transportation Research Part A, No. 31, 1997.
- [91] Hansen W., *How accessibility shapes land use*, Journal of the American Institute of Planners, 25, 1959, 73-76.
- [92] Hanson S., Schwab M., *Accessibility and intraurban travel*, Environment and planning part A, Vol. 19, 1987, 735-748.
- [93] Harris B., *Accessibility: Concepts and applications*, Journal of Transportation and Statistics, 4, 2001, 15-30.
- [94] Haupt L.R., *Practical genetic algorithms*, John Wiley & Sons, New Jersey 2004.

- [95] Headicar P., *The local development effects of major new roads – M40 case study*, Transportation, 23, 1996, 55-69.
- [96] Hellendoorn H., Thomas C., *Defuzzification in fuzzy controllers*, Intelligent Fuzzy Systems, Vol. 1, 1993, 109-123.
- [97] Hensher D., Button K., *Handbook of Transport Modelling*, Pergamon, Elsevier Ltd, Oxford 2005.
- [98] Hensher D., Reyes A., *Trip Chaining as a Barrier to the Propensity to Use Public Transport*, Transportation, No. 27, Vol. 4, 2000, 341-361.
- [99] Hensher D., Stopher P., *Behavioural Travel Modelling*, Croom Helm, London 1979.
- [100] Highway Capacity Manual, Transportation Research Board, Special Report 209, Bureau of Public Roads, Washington D.C., 2000.
- [101] Hills P., *What is induced traffic?*, Transportation, 23, 1996, 5-16.
- [102] Hirsh M., Prashker J., Ben-Akiva M., *Dynamic Model of Weekly Activity Pattern*, Transportation Science, Vol. 20, 1986, 24-36.
- [103] Holland J., *Adaptation in natural and artificial systems*, Ann Arbor, University of Michigan Press, 1975.
- [104] <http://www.fhwa.dot.gov/steam/doc.htm>
- [105] Huang S., Sadek A., Casas I., Guo L., *Calibrating travel demand in large scale micro-simulation models with genetic algorithms: a TRANSIMS model case study*, Transportation Research Board, Washington D.C., 2010.
- [106] Huang Z., Ding Y., Li J., *A GIS-based Accessibility Modelling Process for Estimating Transit Travel Demand*, Proceedings of International Conference on Management and Service Science, Beijing 2009.
- [107] Hunt J., Echenique M., *Experiences in the application of the MEPLAN framework for land use and transportation interaction modeling*, Proceedings of the 4th National Conference on the Application of Transportation Planning Methods, Daytona Beach, Florida, May 1993, 723-754.
- [108] Hymel K., Small K., Van Dender K., *Induced demand and rebound effects in road transport*, Transportation Research Part B, 44, 2010, 1220-1241.
- [109] Jacyna M., *Modelowanie i ocena systemów transportowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
- [110] Jacyna M., *Modelowanie wielokryterialne w zastosowaniu do oceny systemów transportowych*, Prace naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport, z. 47, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2001.
- [111] Jacyna M., *Modelowanie i ocena systemów transportowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
- [112] Jamroz K. z zespołem, *Transportowy model symulacyjny Miasta Gdańska, etap I*, Biuro rozwoju Gdańska/Fundacja Rozwoju Inżynierii Lądowej, (materiały niepublikowane), Gdańsk 2012.

- [113] Jang J., Sun C., *Functional equivalence between radial basis functions and fuzzy inference systems*, Institute of Electrical Electronics Engineers, IEEE transactions on Neural Networks, Vol. 4, 1993, 156-159.
- [114] Jaspers, Niebieska księga, Sektor transportu publicznego, Nowe wydanie, wrzesień 2008.
- [115] Johnston J., *Econometric methods*, McGraw-Hill, New York 1984.
- [116] Jones P., Koppelman F., Orfeuil J., *Activity analysis: state of the art and future directions in Developments in Dynamic and Activity-Based Approaches to Travel Analysis*, Aldershot, England, 1990, 34-55.
- [117] Jones S.R., *Accessibility Measures: a literature review*, European Journal of Transport and Infrastructure Research, LR 967, Crowthome 1981.
- [118] Kacprzyk J., *Wieloetapowe podejmowanie decyzji w warunkach rozmytości*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1983.
- [119] Kacprzyk J., *Zbiory rozmyte w analizie systemowej*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1986.
- [120] Kaczmarczyk S., *Badania marketingowe – metody i techniki*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2003.
- [121] Kikuchi S., *Constructing Transit Origin-Destination Tables from Fragmented Data*, 90th Transportation Research Board Annual Meeting, November 2010.
- [122] Kim H., Kwan M., *Space-time accessibility measures: A geocomputational algorithm with a focus on the feasible opportunity set and possible activity duration*, Journal of Geographical Systems, 2003.
- [123] Komornicki T., Śleszyński P., Pomianowski W., Rosik P., Siłka P., Stępiak M., *Opracowanie metodologii liczenia wskaźnika międzygałęziowej dostępności transportowej terytorium Polski oraz jego oszacowanie*, raport dla Ministerstwa Rozwoju Regionalnego, Polska Akademia Nauk, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania, materiały niepublikowane, Warszawa 2008.
- [124] Korbicz J., Obuchowicz A., Uciński D., *Sztuczne sieci neuronowe, podstawy i zastosowania*, Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa 1994.
- [125] Kosiński W., Prokopowicz P., *Algebra liczb rozmytych*, Dział Naukowy, Matematyka Stosowana, nr 5, 2004.
- [126] Koźlak A., *Ekonomika transportu. Teoria I praktyka gospodarcza*, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk 2008.
- [127] Kroes E., Daly A., Gunn H., van der Hoorn T., *The opening of the Amsterdam Ring Road. A case study of short-term effects of removing a bottleneck*, Transportation, 23, 1996, 71-82.
- [128] Krych A., *Modularne komponenty systemowe dla potrzeb analiz transportowych – zarys projektu*, [w:] *Modelling 2012*, Materiały III Ogólnopolskiej Konferencji Naukowo-technicznej „Modelowanie podróży i prognozowanie ruchu”, Politechnika Krakowska, Kraków 2012.

- [129] Krych A., *Predykcja natężeń ruchu samochodowego na wlotach średnich miast*, [w:] *Badania i modelowanie ruchu w planowaniu komunikacyjnym*, Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej, SITK, Kraków–Muszyna 1985, 135-174.
- [130] Krych A., *Transport publiczny w dualnym zadaniu transportowym*, Materiały VIII Konferencji Naukowo-Technicznej „Problemy Komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego”, SITK RP, Poznań 2011, 89-112.
- [131] Krych A., *Podział ruchu na wlotach drogowych średnich miast*, Transport Miejski, nr 4, 1973.
- [132] Krych A., *Proces urbanizacji a poziom zatłoczenia motoryzacyjnego*, Materiały II Konferencji Naukowo-Technicznej „Problemy Komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego”, SITK RP, Poznań 1999, 155-165.
- [133] Krystek R., Suchorzewski W., Brzeziński A., Friedberg J., *Polityka Transportowa Państwa na lata 2006–2025*, Ministerstwo Infrastruktury, Warszawa 2005.
- [134] Książek A., *Analiza wprowadzenia strefy ruchu uspokojonego w centrum miasta Bielska-Białej przy użyciu narzędzi symulacyjnych*, praca magisterska, Politechnika Krakowska, Kraków 2011.
- [135] Kulikowski R., *Analiza Systemowa i jej zastosowanie*, PWN, Warszawa 1977.
- [136] Kuo-chen L., Dar-jen Ch., *Fuzzy Membership Function Elicitation using Plausible Neural Network*, Proceedings of the 2006 International Conference on Artificial Intelligence, ICAI 2006, Las Vegas, Nevada, USA, June 26–29, 2006, Vol. 1, 2006.
- [137] Kwan M., Murray A., O’Kelly M., Tiefelsdorf M., *Recent advances in accessibility research: Representation, methodology and applications* Journal of Geographical Systems, Vol. 5, 2003, 129-138.
- [138] Lee D., Klein L., Camus G., *Induced traffic and induced demand*, Transportation Research Record 1659, 1999, 68-75.
- [139] Lee D., Lee Ch., Pietrucha M., *Evaluation of Driver Satisfaction of travel Information on Variable Message Signs Using Fuzzy Aggregation*, Journal of Advanced Transportation, Vol. 42, No. 1, 2007, 5-22.
- [140] Lee M., Chung J-H., McNally M., *An Empirical Investigation of the Underlying Behavioral Processes of Trip Chaining*, Institute of Transportation Studies University of California, 2002.
- [141] Leszczyński J., *Modelowanie systemów i procesów transportowych*, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1990.
- [142] Levinson D., *Accessibility and the journey to work*, Journal of Transport Geography, Vol. 6, 1998, 11-21.
- [143] Lilpop Z., Sidorenko A., Waltz A., *Prognozowanie ruchu miejskiego*, IKŚ, Warszawa 1983.

- [144] Litman T., *Evaluating Accessibility for Transportation Planning, Measuring People's Ability To Reach Desired Goods and Activities*, 87th Transportation Research Board Annual Meeting, January 2008.
- [145] Litman T., *Generated Traffic: Implications for transport planning*, Institute of Transportations Engineering Journal, 71, 2001, 38-47.
- [146] Mackie P., *Induced traffic and economic appraisal*, Transportation, 23, 1996, 103-119.
- [147] Madeyski M., Lisowska E., Morawski W., *Transport, rozwój i integracja*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1978.
- [148] Maj-Łabuz K., *Analiza potoków pasażerskich na linii 104*, Dział Organizacja Przewozów i Badań Rynku MPK S.A., materiały niepublikowane, Kraków 1998.
- [149] Mamdani E.H., *Applications of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis*, IEEE Transactions on Computers, Vol. 26, No. 12, 1977, 1182-1191.
- [150] Markowski T., Marszał T., *Metropolie, obszary metropolitalne, metropolizacja: problemy i pojęcia podstawowe*, Komitet Przestrzennego Zagospodarowania Kraju PAN, Warszawa 2006.
- [151] Mazur M., *Pojęcie systemu i rygor ich stosowania*, Postepy Cybernetyki, z. 2, 1987.
- [152] McGuckin N., Zmud J., Nakamoto Y., *Trip-Chaining Trends in the United States: Understanding Travel Behaviour for Policy Making*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1917, 2005, 199-204.
- [153] Medasani S., Kim J., Krishnapuram R., *An overview of membership function generation techniques for pattern recognition*, Internat. J. Approx. Reason., 19, 1998, 391-417.
- [154] Michalkiewicz Z., *Algorytmy genetyczne + struktury danych = program ewolucyjne*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1996.
- [155] Mitchell M., *An introduction to genetic algorithms (complex adaptive systems)*, The MIT Press, London 1998.
- [156] Mondschein A., Brumbaugh S., Taylor B., *Congestion and Accessibility: What's the Relationship?*, 88th Transportation Research Board Annual Meeting, 2009.
- [157] Monkiewicz S. z zespołem, *Warszawskie Badania ruchu 2005*, BPRW S.A., Warszawa 2005.
- [158] Ng T., Skitmore M., Wong K., *Using genetic algorithms and linear regression analysis for private housing demand forecast*, Building and Environment, No. 43, 2008, 1171-1184.
- [159] Nicholson W., *Microeconomic Theory: Basic Principles and Extensions*, Eighth Edition. South-Western, Thomas Learning, 2002.



- [160] Noland R., Cowart W., Analysis of metropolitan highway capacity and the growth in vehicle miles of travel, *Transportation* 27, 2000, 363-390.
- [161] Noland R., Lem L., *A review of the evidence for induced travel and changes in transportation and environmental policy in the US and the UK*, Transportation Research part D: Transport and Environment, 7, 2002, 1-26.
- [162] Noland R., *Relationship between highway capacity and induced vehicle travel*, Transportation Research part A, 35, 2001, 47-72.
- [163] Olszewski P., Suchorzewski W., *Samochód w śródmieściu*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1983.
- [164] Ortuzar J., Willumsen L., *Modelling transport*, 3rd Edition. Wiley, New York 2009.
- [165] Osowski S., *Sieci neuronowe do przetwarzania informacji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006.
- [166] Oum T., *Alternative demands and their elasticity estimates*, Journal of Transport Economics and Policy, 33, 1992, 139-154.
- [167] Palisade Corporation, Guide to Using Evolver. The Genetic Algorithm Solver for Microsoft Excel, version 5.5, Ithaca 2009.
- [168] Park Y.S., Manli E., Hope M., Sokolov V., Ley H., *Fuzzy Rule-base Approach for Evacuation Trip Demand Modeling*, 90th Transportation Research Board Annual Meeting, November 2010.
- [169] Pas E., Harvey A., *Time use research and travel demand analysis modelling*, Stopher P., Lee-Gosselin M. (Eds.), Understanding Travel Behaviour in an Era of Change, Pergamon, Oxford 1997, 315-338.
- [170] Paszkowski S., *Podstawy teorii systemów i analizy systemowej*, Wydawnictwo WAT, Warszawa 1999.
- [171] PBS DGA, Kompleksowe Badanie Ruchu 2003 w Krakowie, materiały niepublikowane, Sopot 2004.
- [172] Piechnik S., *Wytrzymałość Materiałów dla wydziałów budowlanych*, PWN, Warszawa–Kraków 1980, 328-332.
- [173] Piegat A., *Modelowanie i sterowanie rozmyte*, Wydawnictwo EXIT, Warszawa 2003.
- [174] Podoski J., *Transport w miastach*, WKiŁ, Warszawa 1985.
- [175] Primerano F., Taylor M., Pitaksringarn L., Tisato P., *Defining and Understanding Trip chaining Behavior*, Transportation, Vol. 35, No. 1, 2008, 55-72.
- [176] PTV Vision: Visum 12 basics. Manual, PTV AG, Karlsruhe 2011.
- [177] Radziszewska-Zielina E., *Badania relacji partnerskich przedsiębiorstw budowlanych*, Monografia 384, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2010.
- [178] Richardson A., Ampt E., Meyburg A., *Survey Methods for Transport Planning*, Eucalyptus Press, Melbourne 1995.

- [179] Rodier C., Abraham J., Johnston R., Hunt J., *Anatomy of induced travel using an integrated land use and transportation model in Sacramento Region*, 80th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., 2001.
- [180] Rodier C., Johnston R., *Uncertain socioeconomic projections used in travel and emissions models: could plausible errors result in air quality nonconformity?*, paper No. 01-2575, presented at the 80th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2001.
- [181] Roodman D., *A Note on The Theme of Too Many Instruments*, Oxford Bulletin of Economics and Statistics, 71, 2009, 135-158.
- [182] Rosik P., *Dostępność lądowa przestrzeni Polski w wymiarze europejskim*, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania, Polska Akademia Nauk, Warszawa 2012.
- [183] Rosik P., Szuster M., *Rozbudowa infrastruktury transportowej a gospodarka regionów*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2008.
- [184] Ross T., *Fuzzy Logic with Engineering Application*, Second edition, John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex, 2004.
- [185] Rudnicki A. z zespołem, *Zintegrowany system transportu szynowego w aglomeracji i we Wrocławiu – Etap I, część A – plan generalny rozwoju transportu szynowego*, Kraków – Warszawa, luty 2007.
- [186] Rudnicki A., *Jakość komunikacji miejskiej*, Monografia Nr 5 oddziału SITK w Krakowie (zeszyt 71), Kraków 1999.
- [187] Rudnicki A., *Przyczynek do wartościowania atrybutów podróży w miejskim transporcie zbiorowym*, Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczypospolitej Polskiej, Oddział w Krakowie; seria Materiały Konferencyjne nr 2(98)/2012 „Modelowanie podróży i prognozowanie ruchu”.
- [188] Rutkowska D., *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i zbiory rozmyte*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1997.
- [189] Sacramento Area Council of Governments (1998) Regional Housing, Population and Employment Projections, Sacramento, California 1998.
- [190] Salomon I., Mokhtarian P.L., *What happens when mobility-inclined market segments face accessibility-enhancing policies*, Transportation Research D, 3(3) 1998, 129-140.
- [191] Sassanelli D., *Parking demand assignment by means of possibility theory based procedure*, Archives of Transport, Vol. 14, Warsaw 2002.
- [192] Scherer M., *Is light rail more attractive to users than bus transit? Arguments based on cognition and rational choice*, Transportation research Board Annual Meeting, 2010.
- [193] Schneider M., *Gravity models and trip distribution theory*, Papers and Proceedings of the Regional Science Association V, 1959, 51-56.



- [194] Schrank D., Lomax T., *The 2004 Urban Mobility Report*, Texas Transportation Institute, College Station, 2004.
- [195] Scott D.M., *Overcoming traffic congestion. A Discussion of Reduction Strategies and Behavioral Responses from a North American Perspective*, European Journal of Transport and Infrastructure Research, 2, No. 3/4, 2002, 317-338.
- [196] Sheffi Y., *Urban Transportation Networks*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1985.
- [197] Shiftan Y., Ben-Akiva M., de Jong G., Hakkert Sh., Simmonds D., *Evaluation of Externalities in Transport Projects*, European Journal of Transport and Infrastructure Research, 2, No. 3/4, TU Delft, 2001, 285-304.
- [198] Sierpiński G., *Miary dostępności transportowej miast i regionów*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Transport, z. 66, 2010, 91-96.
- [199] Sivakumar A., *Modelling Transport: A Synthesis of Transport Modelling Methodologies*, Imperial College, London 2007.
- [200] Sobczyk W., *Dostępność komunikacyjna w układach osadniczych miast*, Komitet Badań Rejonów Uprzemysławianych, Polska Akademia Nauk, PWN, Warszawa 1985.
- [201] Sommer H., Walter F., Widmer P., Buhl T., *Wirkungsketten Verkehr – Wirtschaft*, report to the Federal Roads Office, Bern 2004.
- [202] Sperry B., Burris M., Dumbaugh E., *A case study of induced trips at mixed-use developments*, 89th Transportation Research Board Annual Meeting, November 2009.
- [203] Spiekermann K., Aalbu H., *European Accessibility and Peripherality: Concepts, Models and Indicators*, Nordregio, Stockholm 2002.
- [204] Standing Advisory Committee on Trunk Road Assessment (SACTRA), *Trunk Roads and the Generation of Traffic*, Conducted for the Department of transport, London 1994.
- [205] Statistical Graphic Corporation, “Statgraphics Plus Manual”, ver. 5.1, International Professional, 2001.
- [206] Steenbrink P., *Optymalizacja sieci transportowych*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1978.
- [207] Sugeno M., *Fuzzy measures and fuzzy integrals: a survey*, (M.M. Gupta, G.N. Saridis and B.R. Gaines, editors) Fuzzy Automata and Decision Processes, North-Holland, NY 1977, 89-102.
- [208] Szarata A., *Badania ankietowe dotyczące zjawiska ruchu wzbudzonego w podróżach transportem zbiorowym*, Drogi – Budownictwo infrastrukturalne, 6, 2012, 36-46.
- [209] Szarata A., *Defining share of Park and Ride trips using Fuzzy Inference System*, 11th Euro Working Group of Transportation conference, Bari, 27–29 September 2006.

- [210] Szarata A. z zespołem, *Budowa modelu symulacyjnego województwa małopolskiego*, materiały niepublikowane, Politechnika Krakowska, Kraków 2013.
- [211] Szarata A. z zespołem: *Analiza warunków ruchu w okresie przebudowy Ronda Ofiar Katynia*, projekt realizowany na zlecenie ZIKIT Kraków przez Politechnikę Krakowską, Kraków, czerwiec 2010.
- [212] Szarata A., *Simulation analysis of CO<sub>2</sub> emission for different land use development schemes*, Archives of Transport, Vol. 24, issue 4, Warszawa 2012.
- [213] Szarata A., *Aktualizacja modelu symulacyjnego aglomeracji poznańskiej wraz z prognozami*, Urząd Miasta Poznania, materiały niepublikowane, Kraków 2009.
- [214] Szarata A., *Budowa modelu symulacyjnego aglomeracji Krakowskiej, w ramach Studium Uwarunkowań i Kierunków Zagospodarowania Przestrzennego miasta Krakowa*, materiały niepublikowane, Kraków 2008.
- [215] Szarata A., *Modelowanie ruchu tłumionego w ujęciu symulacyjnym*, Konferencja Naukowo-Techniczna „Modelowanie podróży i prognozowanie ruchu”; Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczypospolitej Polskiej Oddział w Krakowie; seria: Materiały konferencyjne, nr 94 (Zeszyt 153), Kraków 2010, 169-282.
- [216] Szarata A., *Ocena efektywności funkcjonalnej parkingów przesiadkowych (P+R)*, rozprawa doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 2005.
- [217] Szarata A., *Podział zadań przewozowych – przegląd modeli oraz zastosowanie wnioskowania rozmytego*, Materiały Konferencyjne; VI Konferencja Naukowo-Techniczna z cyklu: „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego – Nowoczesny transport publiczny w obszarach zurbanizowanych”, 2007.
- [218] Szarata A., *Wpływ efektywności ograniczeń w ruchu drogowym na kształtowanie popytu*, Materiały Konferencyjne; VI Konferencja Naukowo-Techniczna „Logistyka, systemy transportowe, bezpieczeństwo w transporcie – LogiTrans”, Prace Naukowe Transport, nr 1/27/2009, Szczyrk 2009.
- [219] Szarata A., Żygłowicz J., *Dynamiczne modele podróży*, Materiały Konferencyjne; VIII Konferencja Naukowo-Techniczna z cyklu: „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego – Nowoczesny transport publiczny w obszarach zurbanizowanych”, 2011, 42-51.
- [220] Szczuraszek T. z zespołem, *Model transportowy Bydgoszczy*, materiały niepublikowane, t. II, Bydgoszcz 2011.
- [221] Szczuraszek T., Bebym G., Chmielewski J., Kempa J., *Kompleksowe badania i analizy niezbędne do wyznaczenia kierunków rozwoju sieci drogowej miasta*, Transport Miejski i Regionalny, 10/2007.
- [222] Szczuraszek T., Chmielewski J., Kempa J., Bebym G., *Zachowania komunikacyjne osób w obszarze miasta*, Drogi i Mosty, 1/2005.

- [223] Szczuraszek T., Kempa J., Bebyn J., Chmielewski J., *Transport behaviours of inhabitants in big and medium cities of Poland*, International conference „Modeling and management in Transportation”, Kraków–Poznań, Poland 1999.
- [224] Szczuraszek T., *Prognozowane liczby podróży absorbowanych przez miasto, Drogi i Mosty*, 1/2009.
- [225] Szczuraszek T., *Prognozowanie liczebności grup osób jednorodnych zachowań komunikacyjnych dla analiz potrzeb transportowych miasta*, Transport Miejski i Regionalny, 2009.
- [226] Terano T., *Applied Fuzzy Systems*, AP Professional, London 1994.
- [227] The World Bank, Polska, Dokument dotyczący polityki transportowej. W kierunku zrównoważonego rozwoju transportu lądowego, Report Nr 59715-PL, luty 2011.
- [228] Thiem J. z zespołem, *Studium komunikacyjne gminy miejskiej Sosnowiec*, Biuro Inżynierii Transportu, SMG KRC Poland Media S.A., materiały niepublikowane, Poznań 2009.
- [229] Thiem J. z zespołem, *Studium Transportowe i bezpieczeństwa transportu w mieście Płocku*, Etap I, Kompleksowe Badania Ruchu, Biuro Inżynierii Transportu, (materiały niepublikowane) Poznań 2008.
- [230] Thiem J., Hanelik M. z zespołem, *Kompleksowe Badania Ruchu – Wrocław 2010*, Biuro Inżynierii Transportu, Pentor Research International S.A., materiały niepublikowane, Poznań 2011.
- [231] Thill J.-C., Kim M., *Trip making, induced travel demand and accessibility*, Journal of Geographical Systems, 7, 2005, 229-248.
- [232] Van Nes R., Hamerslag R., Immers B., *Design of public transport network*, National Research Council, Transportation Research Board, 1988.
- [233] van Wee B., Hagoort M., Annema J., *Accessibility measures with competition*, Journal of Transport Geography, 9, 2001, 199-208.
- [234] Wardrop J., *Some theoretical aspects of road traffic research*, Proceedings, Institute of Civil Engineers, Vol. 1, 1952, 325-362.
- [235] Weis C., Axhausen K.W., *Induced travel demand: Evidence from a pseudo panel data based structural equations model*, Research in Transportation Economics 25, 2009, 8-18.
- [236] Williams H., Moore L., *The appraisal of highway investments under fixed and variable demand*, Journal of Transport Economics and Policy, 24, 1990, 61-81.
- [237] Yam Y., *Fuzzy Approximation via Grid Point Sampling and Singular Value Decomposition*, IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. – Part B: Cybernetics, Vol. 27, No. 6, 1997, 933-951.
- [238] Ye X., Pendyala R., Gottardi G., *An Exploration of the Relationship between Mode Choice and Complexity of Trip Chaining Patterns*, Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 41, No. 1, 2007, 96-113.

- [239] Yi P, Wei X., Zhao T., *GA-Based Creative Shape Design Method Integrating Surface Fitting and Generating*, Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, Chongqing, 2008.
- [240] Zadeh L., *Fuzzy sets*, Information and Control, Vol. 8, 1965, 338-353.
- [241] Zadeh L., *Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility*, Fuzzy Sets and System, 1, 1978, 3-28.
- [242] Zhao S., He N., *Elasticity based Model Applies in the Forecasting of Highway Induced Traffic*, Journal of Transportation Systems Engineering and Information technology, Vo. 11, Issue 3, 2011, 1-7.
- [243] Zhao Z., Chua G., Zhao J., *Evolution of Trip Chaining Patterns in London from 1991 to 2010*, Innovations in Travel Modelling Conference, Tampa 2012.
- [244] Zipser T., *The Model of Intervening Opportunities in Theory and Practice of Territorial Arrangement*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1990.
- [245] Żak J. z zespołem, *Koncepcja modelu ruchu dla aglomeracji poznańskiej*, Politechnika Poznańska, Poznań 2013.
- [246] Żochowska R., Karoń G., Macioszek E., *Wyznaczanie macierzy podróży w sieciach miejskich – klasyfikacja i przegląd metod*, Konferencja Naukowo-Techniczna „Modelowanie podróży i prognozowanie ruchu”; Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej Oddział w Krakowie, seria: Materiały konferencyjne, nr 94 (Zeszyt 153), Kraków 2010.

## Streszczenie

Podróże wzbudzone stanowią nieodłączną konsekwencję zrealizowania nowych inwestycji infrastrukturalnych. Są one definiowane jako dodatkowe podróże (wcześniej odrzucane z powodu nieakceptowalnych warunków podróży), które powstają jako następstwo poprawy warunków podróży. Podobny mechanizm odnosi się do podróży tłumionych, które definiuje się jako podróże odrzucone z powodu pojawienia się istotnych utrudnień w ich realizacji (np. remont lub przebudowa elementu infrastruktury transportowej). Zjawisko podróży tłumionych i wzbudzonych jest bardzo często pomijane w analizach efektywności funkcjonalnej inwestycji transportowych, ponieważ brak jest modeli prognozujących liczbę tych podróży. W Polsce nie prowadzi się w zasadzie badań nad tym zjawiskiem, natomiast w krajach Europy Zachodniej i USA nurt ten jest poddany szerokim badaniom. Jednakże wyniki tych badań mają ograniczone zastosowanie, ponieważ dotyczą odmiennych warunków i są badaniami *ex post* odnoszącymi się do konkretnej inwestycji.

Jako poligon badań nad zjawiskiem podróży wzbudzonych i tłumionych wybrano kilka inwestycji transportowych: przebudowę ważnego węzła drogowego w Krakowie, budowę linii tramwajowych w Krakowie i Gdańsku, wprowadzenie do eksploatacji pasów autobusowych w Warszawie oraz jednej linii kolei aglomeracyjnej w Warszawie. Prowadzone badania miały dwójaki charakter: dotyczyły wywiadów kwestionariuszowych pośród użytkowników systemu transportowego przed i po wdrożeniu inwestycji oraz szczegółowych pomiarów natężenia ruchu drogowego i potoków (również przed i po wdrożeniu). Uzyskane wyniki stanowią podstawę do budowy i kalibracji poszukiwanych modeli.

W oparciu o wyniki badań innych autorów usystematyzowano model czterostadiowy oraz przedstawiono metody badania podróży wzbudzonych i tłumionych. Pozwoliło to na ujęcie kwantyfikujące wielkość podróży wzbudzonych i tłumionych w postaci modelu cząstkowego, wyznaczającego spodziewany przyrost liczby pasażerów w wyniku rozbudowy systemu transportu zbiorowego. Zastosowano model wnioskowania rozmytego jako narzędzia do wyznaczenia procentowego wzrostu liczby pasażerów w funkcji interwału kursowania nowego połączenia komunikacyjnego oraz spodziewanych oszczędności czasu pasażerów. Model zbudowano na podstawie systemu Mamdaniego z dwoma zmiennymi lingwistycznymi na wejściu i jedną na wyjściu. W efekcie zastosowania układu wnioskującego uzyskano zbiór punktów tworzących powierzchnię, którą następnie aproksymowano, stosując metodę przeszukiwania heurystycznego z wykorzystaniem algorytmów genetycznych do doboru parametrów równania. W ten sposób uzyskano formułę matematyczną, która może być zastosowana bezpośrednio do wyznaczenia spodziewanego zwiększenia liczby podróży realizowanych transportem zbiorowym, powodowanych skróceniem czasu podróży.

Przedstawiono strukturę modelu kwantyfikującego podróże wzbudzone. Model ten bazuje na zdefiniowanym pojęciu wskaźnika dostępności globalnej wyznaczonej dla każdego rejonu transportowego jako odwrotność średniej czasów podróży do pozostałych rejonów ważoną liczbą podróży i udziałem różnych środków transportowych. Zdefiniowano pojęcie rezydencjalnej ruchliwości rejonowej, a następnie wykazano jej związek ze wskaźnikiem dostępności globalnej.

Opracowaną metodę zastosowano do wyznaczenia liczby podróży wzbudzonych i tłumionych na rzeczywistych zrealizowanych przykładach inwestycji transportowych dla przypadku: podróży tłumionych powodowanych ograniczeniami w ruchu drogowym (budowa węzła drogowego) oraz podróży wzbudzonych wynikających z oddania do eksploatacji nowej linii tramwajowej.

## MODELLING OF INDUCED AND SUPPRESSED TRIPS RESULTING BY CHANGES IN A TRANSPORT INFRASTRUCTURE

### Summary

Induced trips raised an inherent consequence of the realization of new transport infrastructure investments. Induced trips are defined as an additional trips (previously rejected due to the unacceptable travel conditions), which arise as a consequence of improved travel conditions. A similar mechanism applies to suppressed trips, which are defined as trips declined due to the occurrence of significant impediments (eg, refurbishment or reconstruction of transport infrastructure elements). The phenomenon of suppressed and induced trips is very often overlooked in the analysis of the functional efficiency of transport investments, because there are lack of models predicting the quantity of these trips. In Poland, the study of this issue are not conducted, while in Western Europe and the U.S., this trend is subjected to extensive testing. However, the results of these studies are limited in application, as they relate to different conditions and are *ex post* studies related to a particular investment.

For the purpose of induced/suppressed trip estimation, it was selected a few of transport investments: the reconstruction of a major road junction in Krakow, the construction of new tram lines in Krakow and Gdansk, implementation of bus lanes in Warsaw and one suburban railway line in Warsaw. The studies were twofold: questionnaire interviews among the users of the transport system before and after the implementation of the investment and detailed measurements of traffic and passenger volume (including before and after implementation). The results of the survey state the basis for the construction and calibration of proposed models.



Based on the results of other authors, it was systematized four stage model and proposed methods for the study of the induced and suppressed trips. This allowed the recognition of quantifying the quantity of induced and suppressed trips as a partial model, outlining the expected increase in the number of passengers as a result of the development of public transport system. It was applied the model of fuzzy inference system, as a tool to estimate the percentage increase in the number of passengers volume as a function of headway of a new public transport connection and the expected passengers time savings. The model built on the basis of two linguistic variables as an input and one as an output. As a result, it was obtained a set of points, comprising a surface which was then approximated using a heuristic search method based on genetic algorithm for selecting the parameters of the equation. Thus, it was proposed the mathematical formula, which could be used directly to determine the expected increase in the number of trips undertaken by public transport and caused by the shortening of travel time.

It was proposed the whole structure of the model, which quantifies induced and suppressed trips. This model is based on the concept of a defined global accessibility factor defined for each transport zone as the inverse of the average travel times to other zones, weighted by the number of trips and share of the different modes of transport. It was also defined residential mobility rate and then it was proven its relationship with global accessibility factor.

The developed algorithm was used to determine the number of induced and suppressed trips on real examples of transport investment for the case: suppressed trips caused by the impediments in road traffic (construction of a road junction) and induced trips resulting from implementation of the new tram line.

## MODELLIERUNG INDUZIERTER UND DER REDUZIERTER VERKEHRE IN ABHÄNGIGKEIT DES ZUSTANDS DER VERKEHRSINFRASTRUKTUR

### Z u s a m m e n f a s s u n g

Im Rahmen einer Realisierung von neuen Infrastruktur Investitionen ist induzierter Verkehr ist eine grundlegende Konsequenz. Induzierter Verkehr ist neuer, zusätzlicher Verkehr, der als Ergebnis von Nachfrageänderungen in Folge von Änderungen des Verkehrsangebots entsteht. Derlei Änderungen können sich zudem verkehrsreduzierend auswirken, sofern Änderungen (z.B. Optimierungen durch Instandsetzung von Verkehrsinfrastruktur) des Verkehrsangebots zu verkürzten Wegen oder gar zu einem Wegfall von Verkehrsrelationen führen. Induzierter Verkehre und Verkehrsreduzierungen sind in der Analyse von Leistungsfähigkeiten sehr oft ausgeklammert, da es an Modellen zur Abschätzung dieser Verkehre mangelt. Bisher existieren in Polen keine Untersuchungen dieser Prozess. Sie sind allerdings in Westeuropa und USA bereits



umfassend analysiert worden. Diese Untersuchungen haben für Polen eine nur begrenzte Relevanz, da sie vor dem Hintergrund sehr unterschiedlicher Randbedingungen durchgeführt wurden. Dabei wurden diese Untersuchungen als ex post Analysen für einzelne konkrete Investitionen durchgeführt.

Einige Verkehrsinvestitionen wurden als Untersuchungsfeld für reduzierte und induzierte Verkehre ausgewählt: der Umbau eines zentralen Straßenknotens in Krakau, Bau von Straßenbahnlinien in Danzig und Krakau, Inbetriebnahme von Busfahrstreifen in Warschau und Maßnahmen im Rahmen einer Stadtbahnlinie in Warschau.

Die durchgeführten Untersuchungen bestanden aus 2 fachlichen Schwerpunkten: zum einen waren dies Befragungen von Nutzern des Verkehrssystems „vor“ und „nach“ der Realisierung der Investitionsmaßnahmen und genaue Messungen von Verkehrsmengen und Fahrgastströmen (ebenfalls „vor“ und „nach“ den Maßnahmen). Aufgrund der erzielten Ergebnisse wurden die jeweiligen Verkehrsmodelle kalibriert und über die einzelnen Maßnahmen entschieden.

Auf den Grundlagen von Untersuchungen unterschiedlicher Autoren wurde das 4-Stufen Modell systematisch analysiert und Untersuchungsmethoden für induzierte und reduzierte Verkehre dargestellt. Dieses Vorgehen ermöglichte eine Quantifizierung des Ausmaßes der induzierten und reduzierten Verkehre in einem Teilmodell, welches die Anzahl der Fahrgäste in Folge eines Ausbaus des öffentlichen Personennahverkehrssystems (ÖPNV) abschätzt. Für die Berechnung einer Veränderung der Fahrgastzahlen in Abhängigkeit von Zugfolgezeit für neue Verkehrsrelationen und einer verkürzten Reisezeit wurde Fuzzylogik als Instrument angewandt. Dieses Modell wurde unter Anwendung eines Mamdani-Systems mit zwei sprachlichen Eingangsvariablen und mit einer Ausgabedatei erstellt. Im Ergebnis der Anwendung des Schlussfolgerungssystems erhält man eine Datensammlung von Punkten in Form einer Fläche, die durch Anwendung der Methode einer heuristischen Abtastung und genetischen Algorithmen zur Auswahl der Gleichungsparameter approximiert wurde. Durch diesen Ansatz erhält man mathematische Formeln, die zu einer Schätzung der Veränderung der erwarteten Fahrgastströme aufgrund einer reduzierten Reisezeit angewendet werden können. Weiterhin beschrieb man die Struktur eines Modells zur Qualifizierung des induzierten Verkehrs.

Dieses Modell basiert auf definierten Kennziffern der globalen Erreichbarkeit. Diese sind für jeden Verkehrsbezirk als Kehrwert der durchschnittlichen Reisezeit in Relation zu allen übrigen Verkehrsbezirken unter Berücksichtigung der Größe des Verkehrsstroms und der Verkehrsmittelwahl berechnet. Dabei konnte ein Zusammenhang zwischen einer definierten angenommenen Einwohnerkennziffer des spezifischen Verkehrsaufkommens und mit Kennziffern der globalen Erreichbarkeit nachgewiesen werden.

Die beschriebenen Methoden wurden zur Schätzung der induzierten und reduzierten Verkehre anhand realer Beispiele von Verkehrsinvestitionsmaßnahmen angewandt: dabei wurden reduzierte Verkehre durch Begrenzungen im Straßenverkehr (z.B. Umbau eines Straßenknotens) verursacht und induzierte Verkehre durch Inbetriebnahme einer Straßenbahnlinie.



## **ZALĄCZNIK**



Formularz ankietowy – przykład dla jednego z poligonów badawczych w Krakowie.

### **Objaśnienia do ankiety - Kraków**

<b>M1: Płeć</b> 1 – kobieta, 2 – mężczyzna;			
<b>M2: Wiek:</b> zaznacz szacunkowo, w razie wątpliwości dopytaj: 1: Poniżej 25 lat; 2: 25-40 lat; 3: 40-60 lat; 4: Pow. 60 lat;			
<b>M3. Czy jest Pan(i):</b> 1 - osobą pracującą 2 - studentem/ uczniem/ 3 - osobą niepracującą			
<b>P1.</b> Proszę powiedzieć jak często odbywa Pan(i) podróże na tej trasie ( <i>tramwajem/ autobusem/ samochodem</i> ) w celach związanych z pracą lub nauką?		<b>P2.</b> A jak to było przed uruchomieniem linii tramwajowej?	
0: w ogóle 1. sporadycznie, brak reguły 2: raz w tygodniu lub rzadziej 3: 2 – 3 razy w tygodniu 4: 4 – 5 razy w tygodniu 5: codziennie,		0: w ogóle 1. sporadycznie, brak reguły 2: raz w tygodniu lub rzadziej 3: 2 – 3 razy w tygodniu 4: 4 – 5 razy w tygodniu 5: codziennie,	
<b>P3.</b> Proszę powiedzieć jak często odbywa Pan(i) podróże na tej trasie ( <i>tramwajem/ autobusem/ samochodem</i> ) w innych celach, niż związane z pracą lub nauką (odwiedzić kogoś, na zakupy, itd.)?		<b>P4.</b> A jak to było przed uruchomieniem linii tramwajowej?	
0: w ogóle 1. sporadycznie, brak reguły 2: raz w tygodniu lub rzadziej 3: 2 – 3 razy w tygodniu 4: 4 – 5 razy w tygodniu 5: codziennie,		0: w ogóle 1. sporadycznie, brak reguły 2: raz w tygodniu lub rzadziej 3: 2 – 3 razy w tygodniu 4: 4 – 5 razy w tygodniu 5: codziennie,	
<b>P5.</b> Proszę jeszcze powiedzieć czym najczęściej poruszał się Pani/Pan <b>po</b> uruchomieniu linii tramwajowej?		<b>P6.</b> A jak to było <b>przed</b> uruchomieniem linii tramwajowej?	
0: pieszo 1. rowerem 2: samochodem jako pasażer 3: samochodem jako kierowca 4: autobusem / Telebusem 5: tramwajem		0: pieszo 1. rowerem 2: samochodem jako pasażer 3: samochodem jako kierowca 4: autobusem / Telebusem 5: .....	
<b>P7.</b> Proszę powiedzieć jeszcze, czy w ciągu ostatniego <i>miesiąca</i>			
<b>P7.1</b> porusza się Pan(i) częściej na tej trasie;		1 – tak	2 - nie
<b>P7.2</b> zdarza się Panu(i) częściej wychodzić „do miasta”		1 – tak	2 - nie
<b>P7.3</b> czy czas podróży do centrum uległ skróceniu po otwarciu linii tramwajowej ( <b>w porównaniu do sytuacji przed rozpoczęciem budowy</b> )?		1 – tak	2 - nie
Jeżeli tak, to			
Szacowany czas skrócenia podróży			
<b>P.7.4</b> Transportem zbiorowym:		.....Minut	
<b>P.7.5</b> Samochodem osobowym:		.....Minut	
<b>P8.1</b> Proszę podać ile minut oznacza dla Pana / Pani podana wartość skrócenia czasu podróży:			
<b>Małe</b> .....Minut	<b>Średnie</b> .....Minut	<b>Duże</b> .....Minut	<b>B.duże</b> .....Minut
<b>P8.2</b> Proszę podać (w minutach) co oznacza dla Pana / Pani odpowiednie pojęcie częstotliwości kursowania autobusów / tramwajów:			
<b>Bardzo niska</b> .....Minut	<b>Niska</b> .....Minut	<b>Przeciętna</b> .....Minut	
<b>Wysoka</b> .....Minut		<b>Bardzo wysoka</b> .....Minut	