

Grzegorz Karoń¹
Wydział Transportu Politechniki Śląskiej

Modelowanie popytu oparte na podróżach pojedynczych

WPROWADZENIE

Podstawowym problemem systemowego opisu transportu w obszarach zurbanizowanych jest charakterystyka elementów i relacji składających się na strukturę zagospodarowania przestrzennego oraz strukturę systemu transportowego. Struktura ta wywołuje potrzeby przewozowe będące popytem na transport, jak również kształtuje podaż transportu w postaci systemu transportowego i jego potencjału przewozowego. Sama również ulega przemianom (głównie długoterminowym) w wyniku oddziaływań wzajemnych między: zmianami w jakości usług transportowych i zmianami dostępności transportowej, zmianami w strukturze popytu i zmianami mobilności użytkowników, zmianami aktywności mieszkańców związanych również z dostępnością terenu pod określoną działalność gospodarczą lub pod zabudowę mieszkaniową.

Identyfikacja wzajemnych zależności umożliwia opis systemu transportowego, zarówno pod względem techniczno-organizacyjnym, jak również funkcjonalnym. Do opisu ruchu w systemie transportowym stosuje się modele matematyczne, dostosowane do wymaganej szczegółowości odwzorowania zjawisk transportowych [4], [5]. Z jednej strony mogą być to modele wykorzystywane na etapie planowania, które operują na wartościach globalnych i zagregowanych. Z drugiej strony, gdy wymagany jest bardzo szczegółowy opis potoków ruchu, wykorzystywane są modele mikrosymulacyjne, deterministyczne i probabilistyczne, nierzadko wykorzystujące teorię zbiorów rozmytych oraz algorytmy genetyczne. Podobne problemy występują podczas modelowania popytu na usługi przewozowe. W tym zakresie wykorzystuje się modele, których opis zmienia się od ogólnego do bardzo szczegółowego, odpowiednio do: poziomu planowania strategicznego rozwoju systemów transportowych (w horyzontach długoterminowych rzędu 10-30 lat), poziomu studium wykonalności, poziomu planowania taktycznego (średnio- i krótkoterminowego), poziomu zarządzania operacyjnego (krótkoterminowego, np. zmiany organizacji ruchu, zmiany z dnia na dzień) oraz poziomu sterowania ruchem (np. systemy sterowania on-line).

1. ODDZIAŁYWANIA MIĘDZY PODAŻĄ, POPYTEM I AKTYWNOŚCIAMI

Rozpatrując przestrzeń zurbanizowaną pod względem transportowym i przestrzennym, można wyróżnić, w podstawowym opisie, następujące podsystemy (rysunek 1):

- podsystem aktywności (działalności),
- podsystem popytu na transport,
- podsystem podaży transportu.

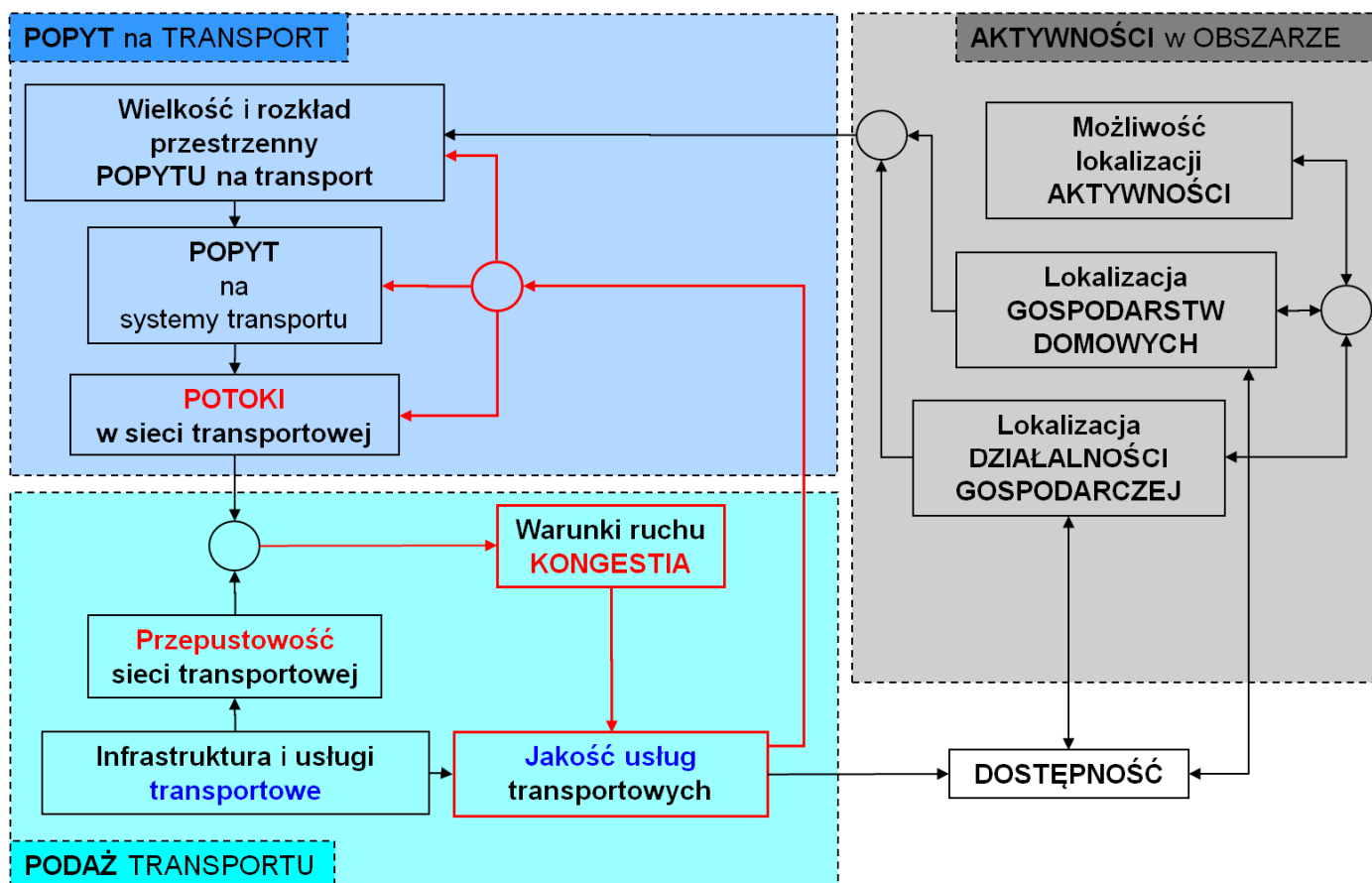
Podsystem aktywności (działalności) to zbiór indywidualnych, społeczno-ekonomicznych potrzeb i zachowań użytkowników (mieszkańców, firm, instytucji, organizacji, etc.), które powodują występowanie potrzeb przewozowych. Geograficzna lokalizacja obiektów dowolnej działalności człowieka oraz lokalizacja gospodarstw domowych (miejsc zamieszkania) wpływa na wielkość potrzeb przewozowych oraz ich rozkład przestrzenny i czasowy. Wśród elementów tego systemu można wyróżnić:

- lokalizację i strukturę gospodarstw domowych – gospodarstwa charakteryzujące się liczbą osób, statusem społecznym, dochodami, stanem posiadania samochodów itd.,
- lokalizację i strukturę działalności gospodarczej – charakteryzującą się rodzajem działalności, liczbą zatrudnionych, wielkością produkcji, strukturą dystrybucji itd.,

¹ grzegorz.karon@polsl.pl

- lokalizację i strukturę nieruchomości – charakteryzującą się powierzchnią użytkową dostępną pod określoną działalność gospodarczą lub pod zabudowę mieszkaniową z uwzględnieniem cen rynkowych nieruchomości.

Zależności wzajemne, które występują między tymi strukturami mają charakter sprzężenia zwrotnego (rysunki 1 i 2). Lokalizacja gospodarstw domowych jest uzależniona w dużej mierze od lokalizacji miejsc pracy w ich otoczeniu a lokalizacja działalności gospodarczej zależy od lokalizacji gospodarstw domowych. Całość uzupełnia struktura nieruchomości, przedstawiająca dostępność terenu pod zabudowę mieszkaniową lub zabudowę związaną z określoną działalnością gospodarczą.



Rys. 1. Zależności systemowe: powiązania pomiędzy popytem na transport, podażą systemu transportowego oraz aktywnościami (działalnością) w obszarze

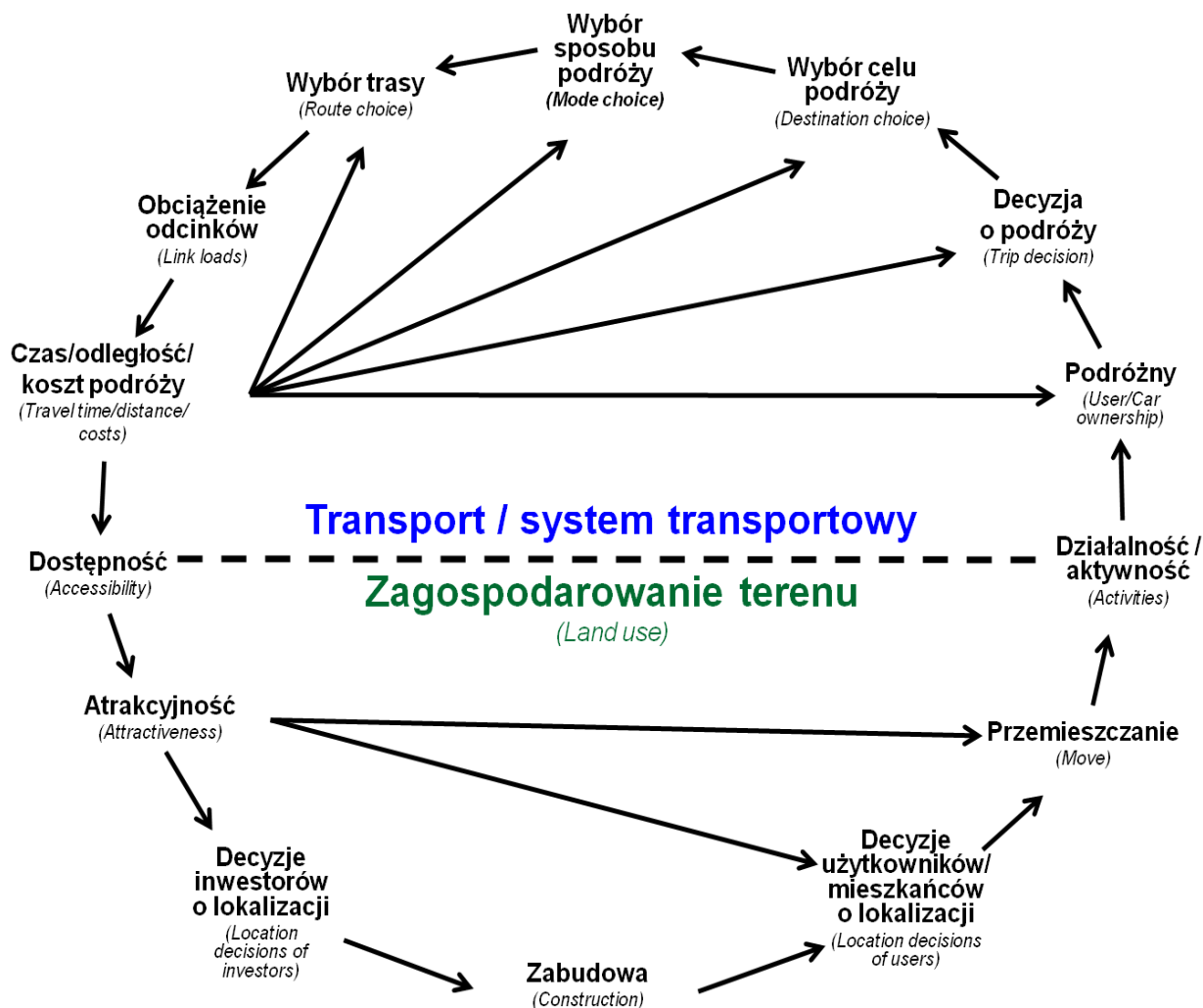
Źródło: na podstawie [3].

Podsystem popytu na transport – odzwierciedla zapotrzebowanie na przemieszczenia (podróże osób oraz przewozy ładunków) pomiędzy elementami podsystemu działalności człowieka – wynika z rozmieszczenia gospodarstw domowych, obiektów działalności gospodarczej oraz nieruchomości. Popyt na transport osób oraz popyt na transport ładunków [1] (surowców, półproduktów i wyrobów gotowych w logistycznym łańcuchu dostaw) odwzorowane są rozkładami przestrzennymi, zmiennymi w czasie (w skali doby, tygodnia, miesięcy – sezonowość) i związanymi z dostępnością różnych systemów transportowych, wykorzystywanych osobno lub w sposób łączony (multimodalny i komodalny [2]). Efektem realizacji zadań przewozowych, sformułowanych na podstawie wielkości popytu, są potoki ruchu w sieci transportowej, składające się z pojazdów przewożących ładunki oraz z pojazdów przewożących pasażerów.

Składniki podsystemu podaży transportu to:

- infrastruktura tworząca sieć transportową – m.in. linie kolejowe, tramwajowe, autobusowe, drogi, ulice, skrzyżowania, parkingi, stacje, przystanki, chodniki itd.,
- środki transportu – pociągi, tramwaje, autobusy, samochody osobowe i ciężarowe etc.,

- usługi transportowe – m.in. układ linii i rozkład jazdy systemów transportu zbiorowego, organizacja i warunki ruchu pojazdów na odcinkach i w węzłach sieci, oferta przewozowa przewoźników i organizatorów transportu, opłaty transportowe (opłaty za przejazd płatnymi odcinkami dróg ekspresowych i autostrad, opłaty za wjazd do centrum – za zwiększenie kongestii, za parkowanie itd.).

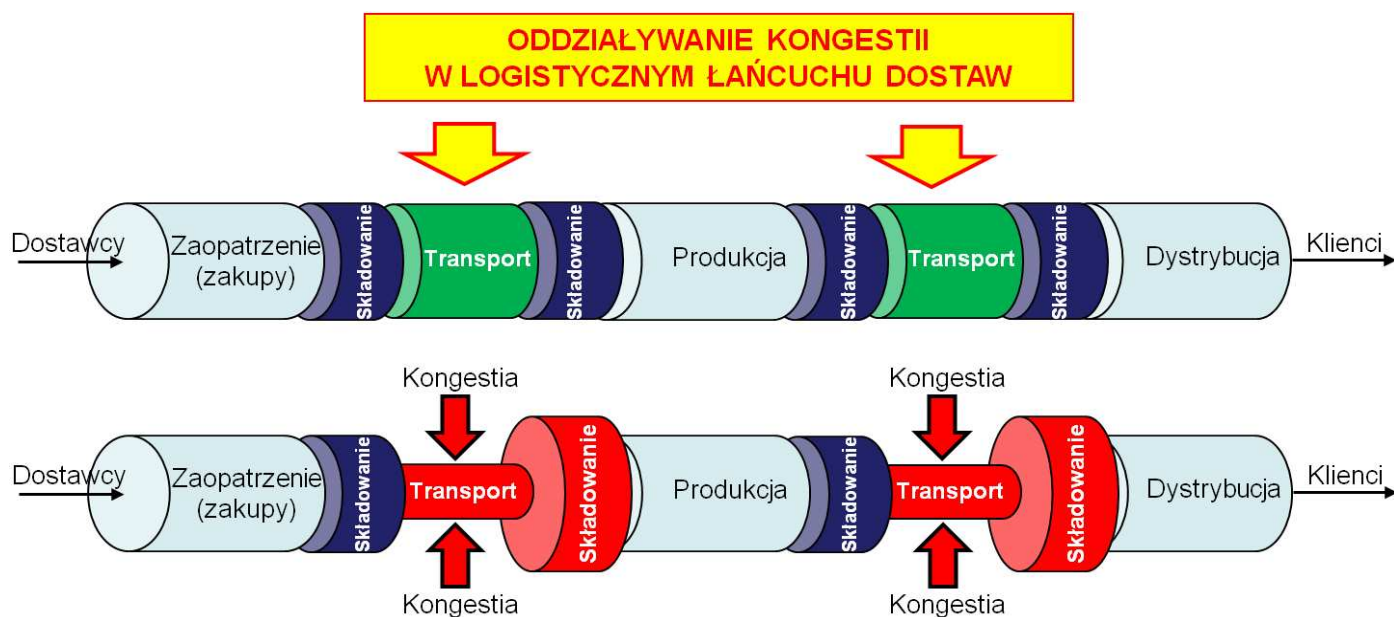


Rys. 2. Oddziaływania wzajemne systemu transportowego oraz zagospodarowania przestrzennego na zachowania komunikacyjne

Źródło: na podstawie [9].

Całość podaży transportu stanowi ofertę przewozową miasta lub aglomeracji, którą można scharakteryzować jakościowo i ilościowo. Atrybuty jakościowe usług transportowych to między innymi czas, koszt, niezawodność (pewność), komfort podróży etc. Jakość usług poszczególnych systemów transportowych wpływa na mobilność oraz zachowania komunikacyjne (decyzje dotyczące sposobu podróżowania) użytkowników (rysunek 2).

Nasylenie sieci transportowej ruchem – przeciążenie poszczególnych węzłów i połączeń potokami o natężeniu bliskim przepustowości wywołuje stany kongestii, co w efekcie zmniejsza poziom jakości usług transportowych – wzrasta czas i koszt podróży, pojawiają się opóźnienia, wzrasta niepewność osiągnięcia miejsca docelowego w zaplanowanym czasie – wzrasta ryzyko spóźnienia. Obniżenie jakości usług transportowych, spowodowane kongestią, zmniejsza efektywność logistycznego łańcucha dostaw (rysunek 3) oraz zwiększa uogólniony koszt podróży (rysunek 4), co skutkuje zmniejszeniem dostępności czynnej (możliwości realizacji podróży z określonego punktu do pozostałych punktów aglomeracji) i zmniejszeniem dostępności biernej (możliwości realizacji podróży do określonego punktu z pozostałych punktów aglomeracji).



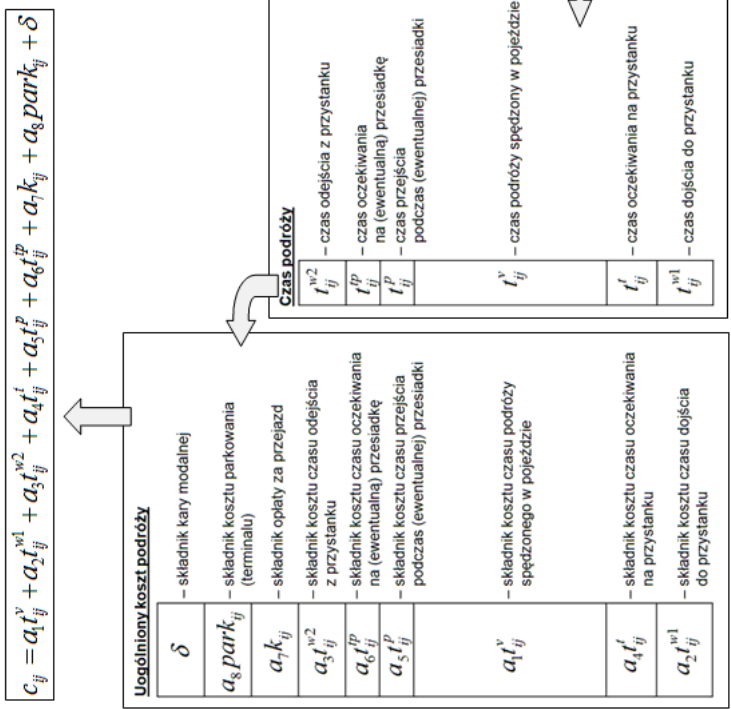
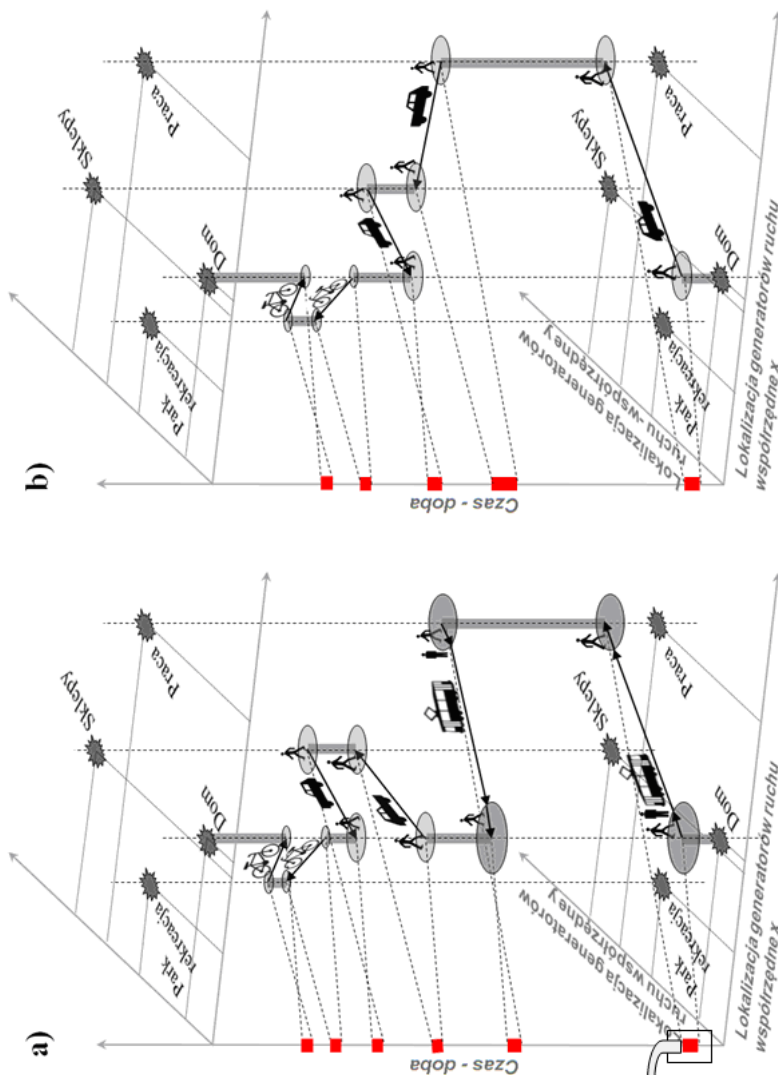
Rys. 3. Interpretacja oddziaływania kongestii na efektywność logistycznego łańcucha dostaw

Zmniejszenie dostępności w krótkich okresach utrudnia podróżowanie, natomiast w dłuższych horyzontach może wpłynąć na zmianę w dystrybucji potencjałów ruchu – może zmienić lokalizację gospodarstw domowych, lokalizację działalności gospodarczej oraz strukturę nieruchomości. Decyzje dotyczące lokalizacji gospodarstw domowych w dużej mierze zależą od dostępności czynnej (możliwość podróżowania do pracy, szkoły itd.). Natomiast istotny wpływ na lokalizację działalności gospodarczej ma dostępność bierna, uwzględniająca możliwość dojazdu potencjalnych klientów oraz pracowników. Wpływ dostępności transportowej oraz mobilności użytkowników przedstawiono schematycznie na rysunku 2.

Kongestia wywołuje w systemie aglomeracji oddziaływania tymczasowe i oddziaływania trwałe. Oddziaływania tymczasowe (krótkotrwały wpływ kongestii na zmiany w systemie transportowym aglomeracji) obserwowane są podczas codziennego podejmowania decyzji o sposobie realizacji podróży, na podstawie warunków ruchu w sieci (czas jazdy, zatłoczenie, dostępność wolnych miejsc parkingowych, opłaty za parkowanie etc.) z uwzględnieniem jakości usług transportu zbiorowego (częstotliwość kursowania, punktualność, zatłoczenie w środkach transportu). Decyzje użytkowników w tym kontekście traktowane są jako decyzje krótkoterminowe i opisywane są modelami wyboru związanymi z warunkami podróży (*travel choice*). Przykładem oddziaływania tymczasowego kongestii są warunki ruchu występujące w wąskim gardle aglomeracji górnośląskiej (rysunek 5). Źródłem kongestii w tym miejscu jest, z jednej strony wysoka koncentracja potrzeb przewozowych, wynikająca ze struktury aktywności w obszarze aglomeracji, która charakteryzuje się wysoką koncentracją ludności, przemysłu i urbanizacji. Z drugiej strony występuje niekorzystny rozkład potoków ruchu na zbyt krótkim odcinku przeplatania, zlokalizowanym za wylotem z tunelu pod rondem im. gen. Jerzego Ziętka w Katowicach, w kierunku wschodnim.

Oddziaływania trwałe mogą być spowodowane długo utrzymującymi się trudnymi warunkami ruchu, permanentną kongestią, brakiem akceptowanej jakości usług transportu zbiorowego. Występujące wówczas ograniczenie dostępności wpływa na utrwalenie się tymczasowych zachowań komunikacyjnych i silniej oddziałuje na decyzje dotyczące lokalizacji gospodarstw domowych oraz lokalizację działalności gospodarczej. Dodatkowo decyzje użytkowników związane z długoterminowym (utrwalonym) sposobem podróżowania, rozpatrywane w kontekście gospodarstwa domowego, uwarunkowane są posiadaniem prawa jazdy, dostępem do samochodu (liczba samochodów w gospodarstwie), dochodem itd. Ten kontekst podejmowania decyzji opisywany jest modelami wyboru związanymi z mobilnością użytkowników (*mobility choice*).

UOGÓLNIONY KOSZT PODRÓŻY I RÓŻNE SPOSOBY REALIZACJI PODRÓŻY W CIĄGU DOBY

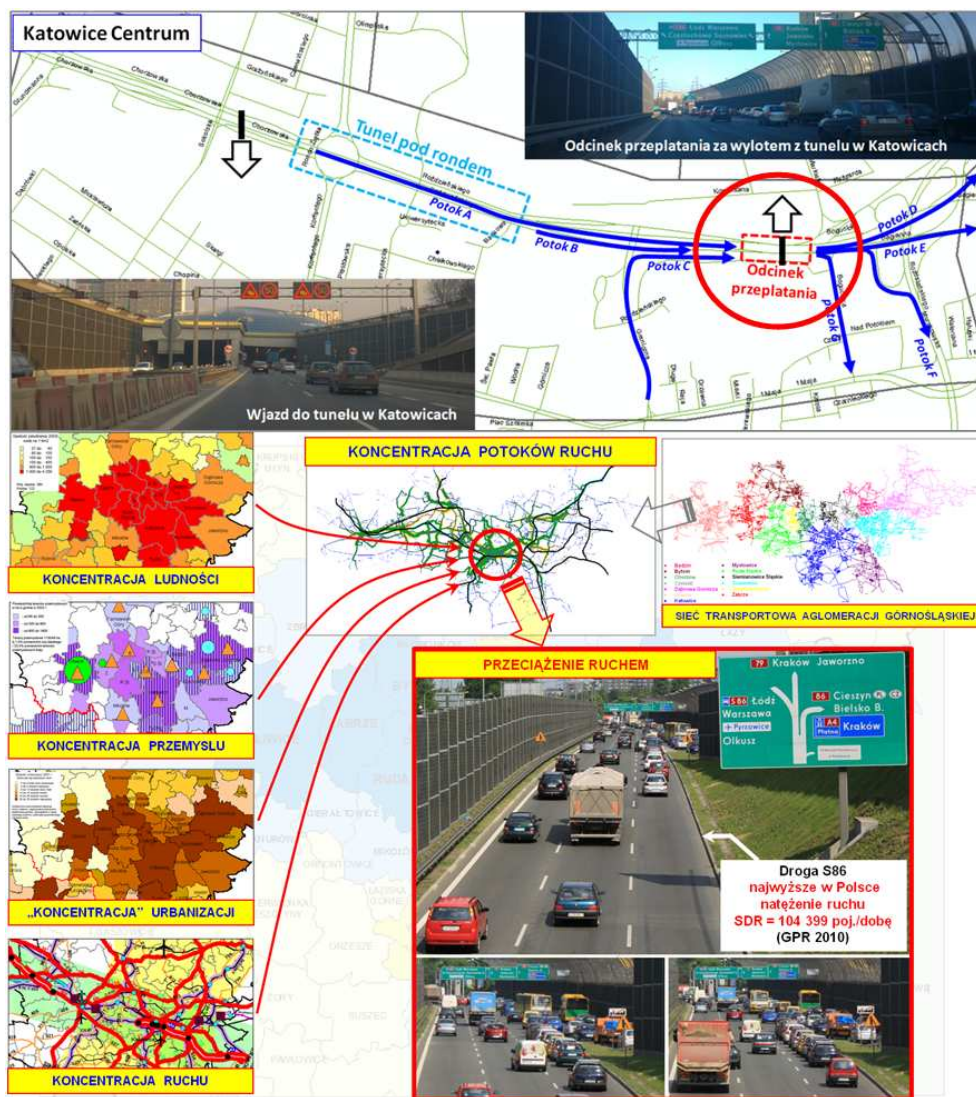


a_1, \dots, a_8 – wagi poszczególnych składników, które pozwalają również wyprowadzić wspólną jednostkę (pieniężną lub czasu).

Objaśnienia:

- ☼ - Generator ruchu,
- - Dostępność przestrzeni do parkingu,
- - Dostępność przestrzeni do przystanku,
- - Przejeżdżanie piesze lub przejazd,
- ⏸ - Przebiecie pieszo, oczekiwanie na przystanku,
- 🚗 - Sposób przejazdu: transportem zbiorowym,
- 🚲 - rowerem, samochodem,
- ⏱ - Czas pobytu w źródle lub celu podróży, ■ - Czas podróży.

Rys. 4. Interpretacja uogólnionego kosztu podróży w „czasoprzestrzeni podróży”: a) przykład trzech podróży pojedynczych związanych z domem, b) przykład łańcucha podróży (dom-praca-zakupy-dom) oraz podróży pojedynczej (dom-rekreacja-dom)



Rys. 5. Wąskie gardło układu komunikacyjnego aglomeracji górnośląskiej

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem map zamieszczonych w Planie zagospodarowania przestrzennego województwa śląskiego.

Decyzje związane z realizacją podróży podejmowane są przez użytkowników jeszcze przed podróżą (decyzje *pre-trip*), jak również podczas podróży (decyzje *en-route*) – np. wybór trasy przejazdu w sieci z kongestią. Decyzje *pre-trip* mogą uwzględniać porównanie kosztów podróży, komfortu podróży, dostępności rozkładu jazdy, dostępności miejsca parkingowego u celu podróży itd. Natomiast decyzje *en-route* mogą być wynikiem nieznanymi i nieprzewidywalnymi zdarzeń – np. zamknięcia dróg, zatory, awarie sygnalizacji [10].

2. STRUKTURA MODELU POPYTU NA TRANSPORT

Modele opisujące popyt na transport można podzielić z uwzględnieniem wielu różnych kryteriów. Jednym z nich jest kryterium dotyczące kolejności podejmowania decyzji o podróży. Podróż rozumiana jest jako przemieszczenie między punktem początkowym (źródłem) a punktem końcowym (celem), w określonej motywacji, z wykorzystaniem określonego sposobu przemieszczenia (*mode*) oraz odpowiedniej trasy w sieci. Tak definiowane podróże mogą być rozpatrywane jako podróże pojedyncze (indywidualne) (np. dom-praca) lub jako łańcuchy podróży z pośrednimi celami (np. dom-praca-zakupy-dom). Dodatkowo podróże mogą być opisywane jako łańcuchy zamknięte czyli podróże „tam i z powrotem” (np. dom-praca-dom). Przykłady takich podróży zamieszczono na rysunku 4, na którym w części a) przedstawiono:

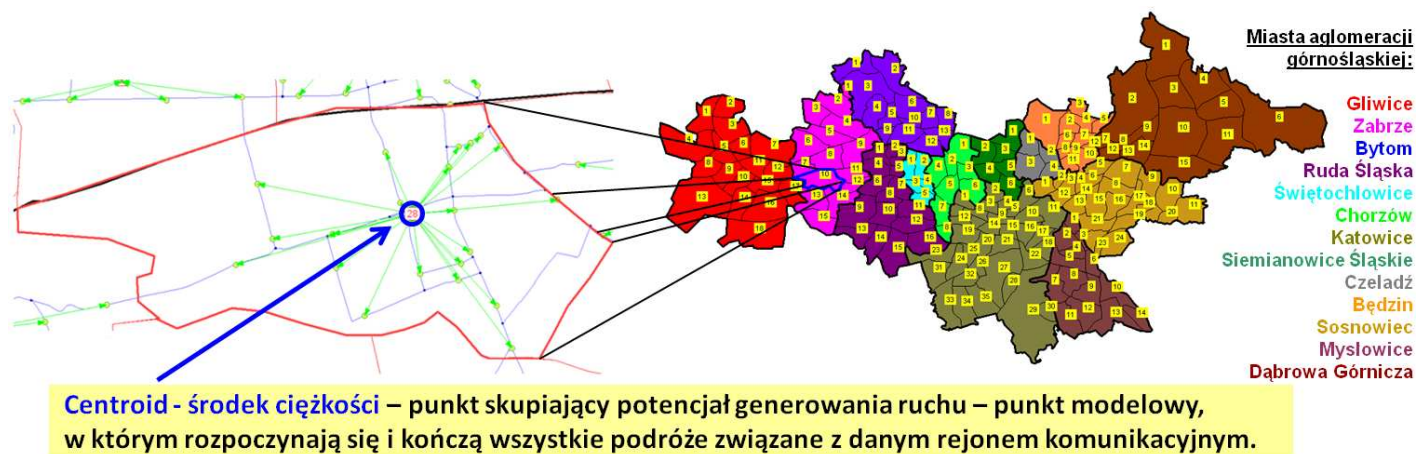
- podróż bezwzględnie obligatoryjną (ściśle określone dni i godziny): dom-praca-dom, realizowaną komunikacją tramwajową,
- podróż względnie obligatoryjną (zaspokojenie potrzeb socjalno-bytowych w różnych dniach i godziny): dom-zakupy-dom, realizowaną samochodem osobowym,
- podróż fakultatywną (zagospodarowanie czasu wolnego), związaną z wyjazdem rowerem do parku – dom-rekreacja-dom.

Każda z wymienionych podróży może być rozpatrywana jako podróż pojedyncza (dom-praca, praca-dom, dom-sklepy, sklepy-dom, dom-rekreacja, rekreacja-dom) lub jako łańcuchy zamknięte (dom-praca-dom, dom-sklepy-dom, dom-rekreacja-dom). W części b) rysunku 4 przedstawiono natomiast podróże w tych samych motywacjach, przy czym dwie pierwsze realizowane są z wykorzystaniem samochodu osobowego. Ponadto rozpatrując podróże, jako łańcuch (łańcuch zamknięty), np. dom-praca-zakupy-dom, może okazać się, iż decyzja dotycząca podróży pośredniej do sklepów, realizowana w drodze powrotnej z pracy do domu, jest decyzją zależną od całego łańcucha i sposobu realizacji podróży – samochodem osobowym (wygoda przewożenia zakupów).

Biorąc powyższe pod uwagę można wyróżnić następujące modele popytu [3]:

- modele oparte na podróżach pojedynczych (indywidualnych) (*trip-based travel-demand models*), w których przyjmuje się niezależność decyzji o sposobie realizacji każdej pojedynczej podróży, nawet występującej w łańcuchu podróży,
- modele oparte na łańcuchach podróży (*trip-chaining travel-demand models*), w których zakłada się, iż decyzja o sposobie realizacji podróży zależy od całego łańcucha podróży.
- modele oparte na aktywności mieszkańców (rozpatrywanych w kategoriach członków gospodarstw domowych) i ich przemieszczeniu się pomiędzy miejscami związanymi z działalnością (*activity-based demand models*); w modelach tych przyjmuje się, iż decyzje związane z realizacją podróży zależą od potrzeb transportowych oraz organizacji zajęć w ciągu dnia.

Modelowanie popytu (podróży), zakładające agregację źródeł i celów podróży do rejonów komunikacyjnych, jednorodnych pod względem czynników ruchotwórczych (pod względem rodzaju aktywności w obszarze), prowadzi do zastąpienia rzeczywistych lokalizacji punktów źródłowych i docelowych, modelowymi punktami w przestrzeni – środkami ciężkości (centroidami). Uzyskane wówczas wyniki to szacowana wielkość popytu przedstawiająca liczbę podróży pomiędzy punktem początkowym *i* oraz punktem końcowym *j*, przyjmowanymi, jako środki ciężkości rejonów komunikacyjnych: rejonu źródłowego oraz rejonu docelowego podróży (rysunek 6). Liczba rejonów komunikacyjnych obszaru, a tym samym liczba środków ciężkości, stanowi o rozmiarze macierzy O-D (macierz źródło-cel; *origin-destination*). Przy czym agregacja rejonów komunikacyjnych może przebiegać nie tylko pod względem rodzaju aktywności ale również z uwzględnieniem na przykład podziału administracyjnego (centrum, przedmieścia, dzielnice, miasto, miasta aglomeracji). Taki, dodatkowy podział (makrorejonów odpowiadające miastom) przyjęto również dla aglomeracji górnośląskiej o charakterze konurbacji [6].



Centroid - środek ciężkości – punkt skupiający potencjał generowania ruchu – punkt modelowy, w którym rozpoczynają się i kończą wszystkie podróże związane z danym rejonem komunikacyjnym.

Rys. 6. Rejon komunikacyjny z zaznaczonym środkiem ciężkości na przykładzie aglomeracji górnośląskiej

Źródło: [6].

W modelach popytu opartych na podróżach pojedynczych (*trip-based travel-demand models*) liczba podróży między parą rejonów komunikacyjnych i oraz j , z którą związane są określone charakterystyki K_1, K_2, \dots, K_n , może być wyrażony ogólnie, jako funkcja [3, 8]:

$$T_{ij}^{K_1, K_2, \dots, K_n}(SE, TR, \beta) \quad (1)$$

której argumentami są: wektor SE zmiennych socjoekonomicznych, opisujących aktywności (zagospodarowanie obszaru) oraz decyzje podejmowane przez podróżnych, wektor TR zawierający atrybuty ilościowe i jakościowe systemu transportowego oraz dodatkowy wektor β współczynników i parametrów.

Przyjmując za K_1, K_2, \dots, K_n podstawowe charakterystyki opisujące użytkownika realizującego podróż (K_1 – kategoria użytkownika, K_2 – motywacja podróży, K_3 – okres analizy, K_4 – sposób realizacji podróży, K_5 – trasa w sieci) oraz wykorzystując czterostopniowy model popytu, funkcja (1) może być przedstawiona jako [3], [8]:

$$T_{ij}^{kzhms}(SE, TR, \beta) = O_i^{kzh} Pr_i^k(j|zh) Pr_i^k(m|zhj) Pr_i^k(s|zhjm) \quad (2)$$

gdzie:

$T_{ij}^{kzhms}(SE, TR, \beta)$ – liczba podróży (popyt) między rejonami i oraz j , którą realizują użytkownicy kategorii k , w motywacji z , w rozpatrywanym okresie h , wykorzystując sposób podróżowania m i trasę s ,

k – kategoria użytkownika opisana charakterystykami socjoekonomicznymi,

i, j – źródło i cel podróży, w modelach przyjmowane jako rejon źródłowy oraz rejon docelowy, a dokładniej centroidy tych rejonów,

z – motywacja podróży (motywacje związane z domem, np. dom-praca, dom-nauka, dom-zakupy, dom-rekreacja itd. oraz motywacje niezwiązane z domem, np.: praca-zakupy, praca-nauka, nauka-praca, praca-rekreacja itd.),

h – okres, dla którego wyznaczana jest wielkość popytu (godzina, okres szczytu porannego, popołudniowego, okres międzyszczytowy, doba, rok etc.),

m – sposób realizacji podróży (*mode*),

s – trasa w sieci, łącząca centroidy rejonów źródłowego i docelowego, którą realizowane są podróże z wykorzystaniem sposobu m (*mode*),

SE – wektor zmiennych socjoekonomicznych opisujących zagospodarowanie obszaru oraz decyzje podejmowane przez podróżnych,

TR – wektor zawierający atrybuty ilościowe i jakościowe systemu transportowego,

O_i^{kzh} – liczba podróży generowanych w rejonie i przez użytkowników kategorii k , w motywacji z , w okresie h ,

$Pr_i^k(j|zh)$ – prawdopodobieństwo realizacji podróży do rejonu j pod warunkiem, że jest to podróż realizowana w okresie h i w motywacji z ,

$Pr_i^k(m|zhj)$ – prawdopodobieństwo wyboru sposobu realizacji podróży m pod warunkiem, że jest to podróż realizowana w okresie h , w motywacji z , do rejonu j ,

$Pr_i^k(s|zhjm)$ – prawdopodobieństwo wyboru trasy s pod warunkiem, że jest to podróż realizowana w okresie h , w motywacji z , do rejonu j , sposobem m ,

Zależność (2) to model stopniowego wyznaczania kolejnych składników popytu (*partial share model*), ponieważ zakłada etapowe wyznaczenie potoku popytu na transport (*average trip-demand flow*), rozpoczynając od oszacowania całkowitej liczby podróży podejmowanych w każdym rejonie komunikacyjnym (etap generowania podróży) a następnie podzielenia tych podróży według określonych relacji (etap rozkładu przestrzennego między rejonami źródłowymi i docelowymi). W dalszej kolejności podróże w poszczególnych relacjach (źródło-cel) dzielone są na określone sposoby podróżowania (etap wyboru sposobu podróżowania) a na końcu popyt, przypisany poszczególnym sposobom podróżowania, rozdzielany jest na określone trasy w sieci, łączące rejonu źródłowe z docelowymi (etap wyboru trasy

w sieci). Wymieniona kolejność stopniowego wyznaczania popytu nie jest jedyną. Stosowana jest również kolejność, w której decyzja o celu podróży (rejonie docelowym) jest zależna od wybranego sposobu podróżowania, warunków ruchu oraz dostępności celu (na przykład wybór sklepu osiedlowego z powodu jazdy rowerem albo wybór sklepu w centrum handlowym podczas jazdy samochodem).

Model w ujęciu czterostopniowym (2) składa się więc z następujących modeli cząstkowych: modelu generowania popytu, modelu rozkładu przestrzennego popytu, modelu wyboru sposobu podróżowania i modelu wyboru trasy w sieci [3], [8]. Modele cząstkowe mogą mieć różną postać, między innymi w zależności od: przyjętych założeń, szczegółowości opisu każdego z wymienionych czterech etapów oraz stopnia odwzorowania relacji wzajemnych pomiędzy etapami.

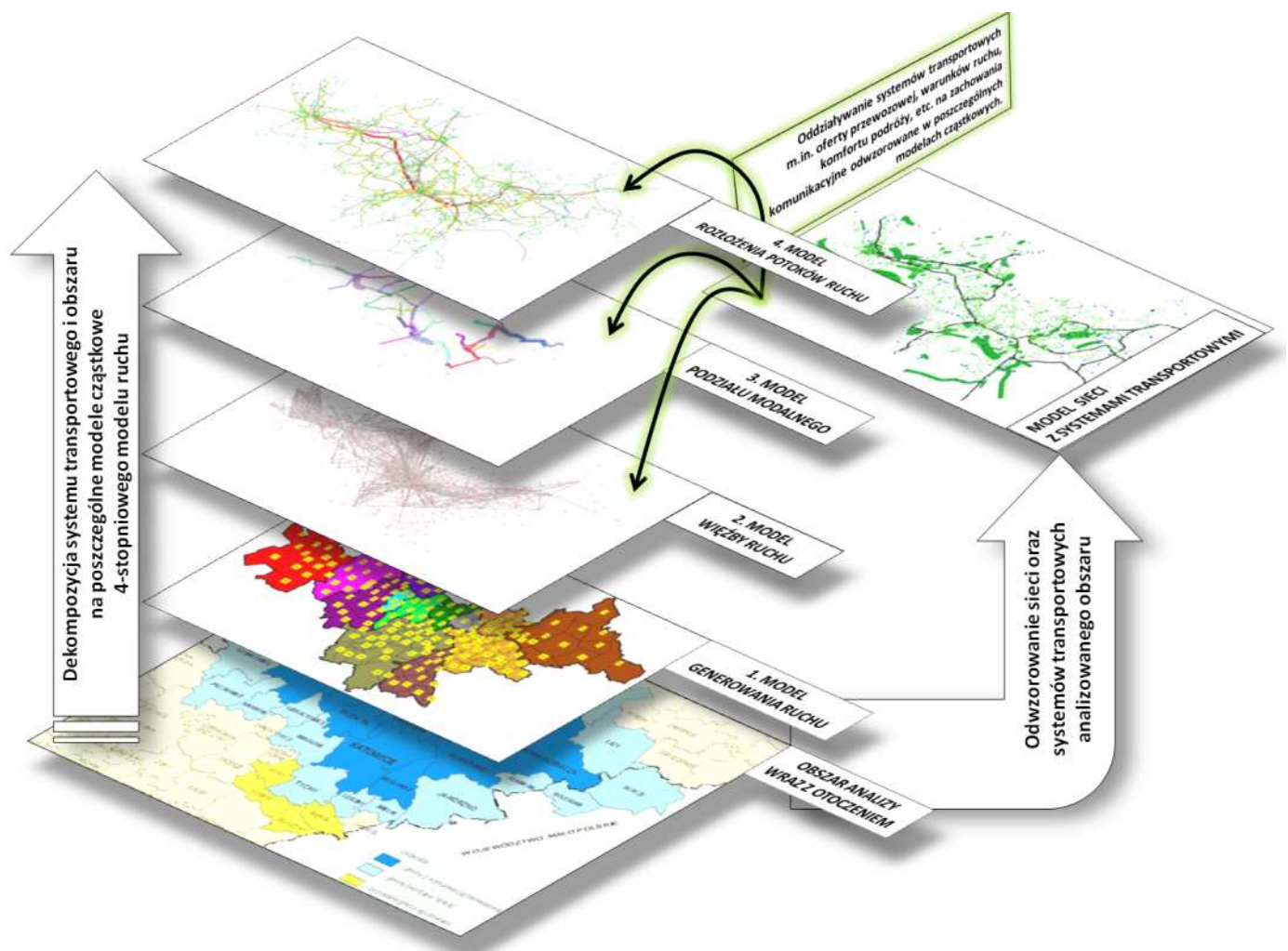
Stopniowe wyznaczanie popytu przedstawione zostało schematycznie na rysunku 7, na którym zamieszczono również model podaży (model sieci z systemami transportowymi). Model podaży, oprócz modelu popytu, jest niezbędnym składnikiem modelu ruchu, ponieważ charakterystyki systemu transportowego TR , między innymi:

- struktura sieci i warunki ruchu w systemie transportu indywidualnego,
- struktura sieci, oferta przewozowa oraz warunki podróżowania systemem transportu zbiorowego,
- infrastruktura rowerowa,
- infrastruktura ruchu pieszego,

pozwalają zbudować odpowiednie modele decyzyjne dotyczące poszczególnych etapów realizacji podróży. W zależności (2) z modelami tymi związane są poszczególne prawdopodobieństwa warunkowe (interpretacja i oznaczenia jak dla (2)): $Pr_i^k(j|zh)$, $Pr_i^k(m|zhj)$, $Pr_i^k(s|zhjm)$. Ponadto w modelach decyzyjnych dotyczących podróży istotne znaczenie mają charakterystyki socjoekonomiczne, opisujące aktywności (zagospodarowanie obszaru) oraz zachowania i preferencje komunikacyjne użytkowników poszczególnych kategorii [3], [6], [7], [8], które w (4) występują jako elementy składowe wektora SE . Podstawowe kryteria klasyfikacji użytkowników to [10]:

- struktura zawodowa: pracownicy sektora budżetowego, pracownicy sektora prywatnego, młodzież szkół średnich i wyższych, osoby niepracujące, emeryci i renciści,
- częstość wykonywania podróży: osoby podróżujące regularnie, osoby podróżujące nieregularnie,
- wpływ zmian w ofercie przewozowej: osoby o zachowaniach niezależnych, częściowo zależnych oraz całkowicie zależnych od zmian w ofercie przewozowej,
- poziom dochodów: osoby o dochodach wysokich, przeciętnych i niskich.

Modele popytu, pod względem podstawowych założeń co do opisu procesu podejmowania decyzji dotyczących podróży, dzielą się na modele deskryptywne oraz behawioralne. Pierwsze z nich wykorzystują przede wszystkim zależności pomiędzy aktywnościami wzbudzającymi potrzeby przewozowe oraz systemem transportowym, który je realizuje, bez szczegółowego opisu indywidualnych zachowań komunikacyjnych użytkowników lub grup użytkowników określonych kategorii. W modelach tych szacowanie liczby podróży oparte jest na wynikach badań przeprowadzonych na próbie losowej w gospodarstwach domowych. Natomiast modele behawioralne, wykorzystują opis sposobu podejmowania decyzji podczas realizacji podróży (*en-route*) na wszystkich jej etapach, jak również jeszcze przed realizacją podróży (*pre-trip*). Modele behawioralne pozwalają również uwzględnić utrwalanie się zachowań komunikacyjnych użytkowników w wyniku gromadzenia określonych wrażeń po odbytej podróży, związanych z poziomem spełnienia oczekiwań z podjętej decyzji. Odpowiedni stopień zadowolenia może prowadzić do powtórzenia podróży (sekwencji przemieszczeń), a w efekcie do utrwalenia zachowań komunikacyjnych [10].



Rys. 7. Schemat czterostopniowego modelu ruchu dla aglomeracji górnośląskiej, w którym można wyróżnić etapy szacowania popytu według *partial share model*.

3. DESKRYPTYWNE MODELE POPYTU

3.1. Deskryptywne modele generowania podróży

Modele deskryptywne, stosowane często do oszacowania liczby podróży regularnych (obligatoryjnych w motywacji związanych z domem, tj. dom-praca, praca-dom, dom-nauka, nauka-dom), wykorzystujące wskaźnik podróży (wskaźnik ruchliwości komunikacyjnej), mają postać:

$$O_i^{kzh} = M_i^k o^{kzh} \quad (3)$$

gdzie:

O_i^{kzh} – liczba podróży rozpoczynanych w rejonie i przez użytkowników kategorii k , w motywacji z , w okresie h ,

M_i^k – liczba użytkowników kategorii k znajdujących się w rejonie i , przy czym użytkownicy należą do kategorii jednorodnej pod względem motywacji, na przykład są to osoby związane z motywacją praca: pracownicy sektora prywatnego, sektora publicznego, sektora produkcji, sektora usług etc.,

o^{kzh} – wskaźnik podróży (wskaźnik ruchliwości komunikacyjnej) dla użytkowników kategorii k , którzy podróżują w motywacji z , w okresie h , oszacowany na przykład z wyników kompleksowych badań i pomiarów ruchu (na podstawie ankiet w gospodarstwach domowych);

Druga grupa modeli deskryptywnych dotyczących generowania podróży to modele regresji liniowej:

$$O_i^{kzh} = \sum_l \beta_l X_{li}^k \quad (4)$$

gdzie:

O_i^{kzh} – liczba podróży rozpoczynanych w rejonie i przez użytkowników kategorii k , w motywacji z , w okresie h ,

X_{li}^k – l -ta zmienna socjoekonomiczna dla grupy użytkowników k znajdujących się w rejonie i (składnik wektora SE w zależności (2)),

β_l – l -ty współczynnik regresji liniowej (składnik wektora współczynników i parametrów β w zależności (2)).

3.2. Deskryptywny model rozkładu przestrzennego podróży

W modelach rozkładu przestrzennego wynikiem obliczeń jest macierz podróży (macierz O-D *origin-destination*) między rejonami komunikacyjnymi. Jednym z bardzo popularnych modeli jest model grawitacyjny, w którym liczbę podróży T_{ij}^{kzh} między każdą z par rejonów (i, j) przedstawia zależność:

$$T_{ij}^{kzh} = \gamma \cdot O_i^{kzh} D_j^{kzh} f(C_{ij}^{kzh}) \quad (5)$$

gdzie:

O_i^{kzh} – liczba podróży rozpoczynanych w rejonie i przez użytkowników kategorii k , w motywacji z , w okresie h ,

D_j^{kzh} – liczba podróży kończonych w rejonie j przez użytkowników kategorii k , w motywacji z , w okresie h ; do wyznaczenia tej liczby można wykorzystać analogiczne modele jak dla O_i^{kzh} , np. wskaźnikowe (3) lub regresji liniowej (4) dla zmiennych opisujących generatory ruchu w rejonach docelowych j ; na przykład dla motywacji związanej z pracą zmienną będzie liczba osób zatrudnionych w zakładach pracy o różnorodnym charakterze (produkcyjnym, handlowym, usługowym),

γ – stała “grawitacji”,

$f(C_{ij}^{kzh})$ – funkcja oporu przestrzeni, której argumentem jest czas lub uogólniony koszt podróży C_{ij}^{kzh} ; przykładowe funkcje oporu przestrzeni z parametrem α to [3]:

$$f(C_{ij}) = e^{-\alpha C_{ij}} \quad (6)$$

$$f(C_{ij}) = C_{ij}^{-\alpha} \quad (7)$$

$$f(C_{ij}) = -\alpha C_{ij} e^{-\alpha C_{ij}} \quad (8)$$

Przyjmując obustronne ograniczenia, związane z warunkami zachowania potoku, w tym przypadku rozumiane, jako: całkowita liczba podróży rozpoczynanych we wszystkich rejonach źródłowych musi być równa całkowitej liczbie podróży kończonych we wszystkich rejonach docelowych, stała “grawitacji” γ jest zastępowana współczynnikami A_i oraz B_j i wówczas model grawitacyjny to:

$$T_{ij}^{kzh} = A_i B_j O_i^{kzh} D_j^{kzh} f(C_{ij}^{kzh}) \quad (9)$$

$$A_i = \left(\sum_j B_j D_j f(C_{ij}) \right)^{-1} \quad (10)$$

$$B_j = \left(\sum_i A_i O_i f(C_{ij}) \right)^{-1} \quad (11)$$

Współczynniki A_i oraz B_j są wzajemnie zależne, więc ich wartości wyznaczone są iteracyjnie. Przyjmując jednostronne warunki ograniczające ($B_j = 1$) model grawitacyjny przyjmuje postać:

$$T_{ij}^{kzh} = O_i^{kzh} \Pr_i^k(j|zh) \quad (12)$$

$$\Pr_i^k(j|zh) = \frac{D_j^{kzh} f(C_{ij}^{kzh})}{\sum_{j'} D_{j'}^{kzh} f(C_{ij'}^{kzh})}, \quad (13)$$

gdzie:

$\Pr_i^k(j|zh)$ – prawdopodobieństwo realizacji podróży do rejonu j pod warunkiem, że jest to podróż realizowana w okresie h i w motywacji z .

4. BEHAWIORALNE MODELE POPYTU

4.1. Modele losowej użyteczności w modelach behawioralnych

Modele behawioralne, częściej stosowane do podróży fakultatywnych, realizowanych nieregularnie oraz w warunkach niepewności podejmowanych podczas podróży decyzji, wykorzystują modele losowej użyteczności (*random utility models*). W modelach tych zakłada się, że użytkownik działając racjonalnie podczas realizacji podróży, stara się zmaksymalizować swoje postrzegane korzyści (lub zminimalizować uciążliwość), które wyrażone są w postaci funkcji użyteczności. Ze względu na uproszczenie zapisu część indeksów górnych we wzorach, związanych z motywacją oraz okresem analizy, została pominięta. Przyjmowane są więc następujące podstawowe założenia:

- użytkownik (podróżny) kategorii k , podejmując decyzję dotyczącą podróży i jej etapów (jest to określona alternatywa p), rozważa zbiór wzajemnie niezależnych, alternatywnych rozwiązań, przy czym dla różnych kategorii k użytkowników mogą występować różne zbiory alternatyw \mathbf{P}^k ,
- użytkownik przypisuje każdej alternatywie w zbiorze \mathbf{P}^k funkcję użyteczności U_p^k , nazywaną użytecznością postrzeganą albo atrakcyjnością alternatywy p , która zależy od charakterystyk samej alternatywy p oraz charakterystyk użytkownika kategorii k ,
- funkcja użyteczności U_p^k jest zmienną losową, ponieważ różnorodność charakterystyk opisujących alternatywę p i użytkownika kategorii k oraz zmienność ich postrzegania przez samego użytkownika, nie pozwalają na przyjęcie opisu całkowicie deterministycznego,
- użytkownik kategorii k wybiera ze zbioru \mathbf{P}^k taką alternatywę p , która maksymalizuje użyteczność podjętej decyzji, przy czym wybór alternatywy p podawany jest z określonym prawdopodobieństwem $\Pr^k(p)$, określanym następująco:

$$\Pr^k(p) = \Pr^k(U_p^k > U_r^k) \quad \forall p \neq r, \quad p, r \in \mathbf{P}^k \quad (14)$$

- zbiór alternatyw \mathbf{P}^k ma zasadniczy wpływ na prawdopodobieństwo wyboru (14), dlatego bardzo ważne jest jego określenie, poprzez zdefiniowanie alternatyw do niego przynależnych – alternatyw rozważanych przez użytkowników kategorii k podczas podejmowania decyzji,
- niektóre alternatywy mogą nie być w pełni postrzegane, jako możliwe do realizacji przez użytkowników kategorii k (np. część użytkowników nie korzysta z autobusu ze względu na częste opóźnienia lub z powodu braku informacji o rozkładzie jazdy); stosuje się wówczas dodatkowy składnik w funkcji użyteczności nazywany stopniem przynależności (por. zależność (27)), który pozwala określić przynależność alternatyw do zbioru \mathbf{P}^k z pewnym prawdopodobieństwem,

- funkcja użyteczności U_p^k , jako zmienna losowa (funkcja losowej użyteczności), składa się z części deterministycznej V_p^k , będącej wartością oczekiwaną użyteczności zdefiniowanych przez wszystkich podróżnych należących do kategorii k , oraz z części losowej ε_p^k , będącej nieznanym odchyleniem użyteczności poszczególnych podróżnych kategorii k od wartości średniej:

$$U_p^k = V_p^k + \varepsilon_p^k \quad \forall p \in P^k \quad (15)$$

- składnik deterministyczny V_p^k , jest funkcją atrybutów X_{lp}^k , związanych zarówno z alternatywą p , jak również z użytkownikami kategorii k , którzy rozważają wybór tej alternatywy w procesie decyzyjnym; zwykle przyjmuje się, że jest to funkcja postaci:

$$V_p^k = \sum_l \beta_l X_{lp}^k \quad \forall p \in P^k \quad (16)$$

gdzie:

- β_l – l -ty współczynnik regresji liniowej,
- X_{lp}^k – l -ty atrybut spośród atrybutów związanych z systemami transportowymi, zagospodarowaniem terenu oraz użytkownikami kategorii k ,
- argumenty funkcji V_p^k to atrybuty dotyczące trzech podsystemów obszaru (rysunek 1): popytu na transport, podaży transportu oraz aktywności w obszarze,
- atrybuty socjoekonomiczne **SE** popytu na transport dotyczą pojedynczych użytkowników lub gospodarstw domowych i są to np.: płeć, wiek, poziom dochodów, pozycja osoby w rodzinie, stan posiadania prawa jazdy, liczba samochodów, rowerów, motocykli w gospodarstwie etc.,
- atrybuty podaży transportu **TR** można podzielić na ilościowe i jakościowe: np. czas podróży, koszt podróży, częstotliwość kursowania komunikacji miejskiej, opóźnienia, komfort podróży etc.,
- atrybuty aktywności w obszarze opisują zagospodarowanie przestrzenne terenu pod względem ruchotwórczym, m.in. liczbę obiektów generujących ruch i ich parametry: np.: liczbę zakładów i miejsc pracy, liczbę szkół, uczelni oraz liczbę osób uczących się, liczbę sklepów i placówek usługowych wraz z liczbą osób z nich korzystających etc.

W dalszej części artykułu w pierwszej kolejności przedstawiono modele behawioralne dotyczące ostatniego etapu modelowania popytu, tj. wyboru trasy w sieci, ponieważ w największym stopniu przedstawiają wykorzystanie teorii użyteczności.

4.2. Behawioralny model wyboru trasy w sieci

Sposób podróżowania przedstawiany jest, jako sekwencja etapów podróży (przemieszczeń) tworząca łańcuch przemieszczeń (np. sekwencje przedstawione na rysunku 4). Wówczas dla każdej relacji (i, j) można określić zbiór łańcuchów przemieszczeń P_{ij}^k tworzący zbiór alternatyw, rozpatrywany przez użytkowników kategorii k podczas podejmowania decyzji. Zgodnie z teorią użyteczności, każdemu łańcuchowi użytkownicy kategorii k mogą przypisać pewną funkcję oczekiwanej użyteczności U , będącą funkcją losową, składającą się z części deterministycznej reprezentowanej przez składnik V oraz części losowej reprezentowanej przez składnik ε . Składnik V jest zazwyczaj funkcją zmiennych objaśniających wybór określonego łańcucha w relacji (i, j) pod względem jego użyteczności, postrzeganej jako przeciwieństwo uciążliwości. Uciążliwość z kolei może być przedstawiona, jako uogólniony koszt podróży, którego przykładowe składniki przedstawione zostały na rysunku 4. Natomiast składnik ε reprezentuje losowość funkcji, wywołaną wieloma czynnikami. Są to między innymi błędy agregacji podczas opisu rejonów komunikacyjnych i odwzorowania sieci transportowej, zmienność zachowań komunikacyjnych użytkowników spowodowana np. subiektywną oceną czasu podróży i jego kosztu, oraz pozostałe czynniki

nieodwzorowane lub odwzorowane niedokładnie w modelu – na przykład subiektywne czynniki wpływu na decyzje podróżnych związane z czystością taboru i przystanków oraz bezpieczeństwem podróży.

Wobec powyższych założeń można zapisać następującą zależność:

$$V_p^k = f(-c_p^k) \quad \forall p \in P_{ij}^k \quad (17)$$

gdzie:

- V_p^k – składnik deterministyczny funkcji użyteczności łańcucha p dla użytkowników kategorii k ,
- c_p^k – uogólniony koszt p -tego łańcucha, wyrażony w jednostkach związanych z użytecznością (np. jednostki pieniężne, czas lub inne), postrzegany przez użytkowników kategorii k ,
- P_{ij}^k – zbiór łańcuchów alternatywnych dla podróży w relacji (i, j) ,

Uogólniony koszt podróży (łańcucha przemieszczeń) można zapisać, jako kombinację liniową atrybutów poszczególnych składników łańcucha przemieszczeń oraz wag tych atrybutów (składników):

$$c_p^k = \sum_{skt} \beta_{p,skt}^k \cdot w_{p,skt}^k \quad \forall p \in P_{ij}^k \quad (18)$$

gdzie:

- $w_{p,skt}^k$ – wartość zmiennej odpowiadającej atrybutowi składnika skt w p -tym łańcuchu przemieszczeń; przykładowo na rysunku 4, dla podróży tramwajem w motywacji dom-praca, atrybutami są składniki czasu podróży oraz składniki dodatkowe, m.in. opłata za przejazd (bilet), a dla podróży samochodem – opłata za parkowanie,
- $\beta_{p,skt}^k$ – wagi (współczynniki ekwiwalentne) odniesione do atrybutów poszczególnych składników skt p -tego łańcucha przemieszczeń; dla przykładu z rysunku 4 poszczególne wagi, oznaczone w tym przypadku przez a_i , dotyczą kolejnych składników łańcucha przemieszczeń związanych z czasem oraz składników kosztów;

Wagi $\beta_{p,skt}^k$ uwzględniają postrzeganą uciążliwość kolejnych etapów przemieszczeń w ramach określonego łańcucha, przedstawiającego sposób realizacji podróży m , po określonej trasie s , dla podróży w relacji (i, j) , przez użytkowników kategorii k . Należy zauważyć, że uciążliwość tego samego odcinka w łańcuchu, na przykład opisanego czasem spędzonym w pojeździe (na rysunku 4 składnik t_{ij}^v), może być istotnie odmiennie postrzegana przez użytkowników różnych kategorii. Przykładowo brak miejsca siedzącego podczas jazdy tramwajem będzie mniejszą uciążliwością dla osoby młodej niż dla osoby starszej lub o ograniczonej sprawności ruchowej, mimo że obie spędzą w tramwaju ten sam czas stojąc obok siebie. Podobnie postrzeganie czasu podróży samochodem w warunkach kongestii może być odmiennie dla poszczególnych grup użytkowników. Na przykład jazda samochodem w godzinach szczytu drogą z lokalnymi zatorami powodowanymi kongestią (na przykład odcinek drogi S86 w Katowicach – rysunek 5) będzie, być może, mniej uciążliwa dla osoby realizującej krótką podróż z pracy do domu, niż dla osoby spoza miasta, jadącej tą samą drogą ale tranzytem, podczas podróży bezwzględnie obligatoryjnej na drugi koniec aglomeracji.

Wykorzystując teorię użyteczności oraz powyższe założenia, prawdopodobieństwo $\Pr_{ij}^k(p)$ wyboru p -tego łańcucha ze zbioru P_{ij}^k można przedstawić jako [3]:

$$\Pr_{ij}^k(p) = \Pr_{ij}^k(U_p^k > U_r^k) \quad \forall p \neq r, \quad p, r \in P_{ij}^k \quad (19)$$

dla

$$U_p^k = V_p^k + \varepsilon_p^k, \quad U_r^k = V_r^k + \varepsilon_r^k \quad \forall p, r \in P_{ij}^k \quad (20)$$

gdzie:

- p, r – łańcuchy przemieszczeń stanowiące alternatywne sposoby zrealizowania podróży w relacji (i, j) ,
 \mathbf{P}_{ij}^k – zbiór łańcuchów alternatywnych dla podróży w relacji (i, j) ,
 U_p^k, U_r^k – funkcje użyteczności łańcuchów odpowiednio p oraz r ,
 V_p^k, V_r^k – składniki systematyczne (deterministyczne) funkcji użyteczności łańcuchów,
 $\varepsilon_p^k, \varepsilon_r^k$ – składniki losowe funkcji użyteczności łańcuchów.

Rozkład prawdopodobieństwa $\Pr_{ij}^k(p)$ jest zależny od rozkładu reszt losowych ε_p . W najprostszym przypadku, dla założenia, iż wartość oczekiwana reszt losowych ε_p wynosi zero, otrzymuje się deterministyczny model użyteczności:

$$U_p^k = V_p^k = -c_p^k, \quad \forall p \in \mathbf{P}_{ij}^k \quad (21)$$

w którym prawdopodobieństwo $\Pr_{ij}^k(p)$ wyboru p -tego łańcucha wynosi:

$$\Pr_{ij}^k(p) = \begin{cases} 1, & \text{gdy } c_p^k < c_r^k \\ 0, & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad \forall p \neq r \quad p, r \in \mathbf{P}_{ij}^k \quad (22)$$

przy założeniu, że w zbiorze alternatyw występuje łańcuch o minimalnym koszcie.

W modelach stochastycznych do określania rozkładu prawdopodobieństwa wyboru przyjmowane są różne założenia dotyczące rozkładu reszt losowych. Przyjęcie niezależnych składników losowych funkcji użyteczności ε_p , o jednakowych rozkładach prawdopodobieństwa wg rozkładu Gumbela z parametrem θ , który jest proporcjonalny do odchylenia standardowego reszt, pozwala zastosować do wyznaczania prawdopodobieństwa wyboru łańcucha przemieszczeń wielomianowy model logitowy (MNL) [3]:

$$\Pr_{ij}^k(p) = \frac{e^{-\frac{c_p^k}{\theta}}}{\sum_{r \in \mathbf{P}_{ij}^k} e^{-\frac{c_r^k}{\theta}}} \quad (23)$$

Model MNL (23) nie jest odpowiedni dla zbioru \mathbf{P}_{ij}^k , który zawiera łańcuchy alternatywne ale zależne, na przykład wykorzystujące te same odcinki podczas wyboru trasy w sieci. Wówczas nie jest spełniony aksjomat niezależności alternatyw (ang. *ii* - *independence of irrelevant alternatives*), wymagany w teorii losowej użyteczności. W takich przypadkach można zastosować zmodyfikowany wielomianowy model logitowy (C-logit) [3]:

$$\Pr_{ij}^k(p) = \frac{e^{-\frac{c_p^k}{\theta} - CF_p}}{\sum_{r \in \mathbf{P}_{ij}^k} e^{-\frac{c_r^k}{\theta} - CF_r}} \quad (24)$$

w którym współczynnik podobieństwa łańcuchów CF_p (*commonality factor*), zmniejsza składnik deterministyczny V_p^k funkcji losowej użyteczności p -tego łańcucha, w zależności od stopnia podobieństwa (pokrywania się) z pozostałymi łańcuchami w zbiorze \mathbf{P}_{ij}^k . Innymi słowy jest to wielkość udziału p -tego łańcucha przemieszczeń w zbiorze wszystkich łańcuchów, postrzeganych przez podróżnych za atrakcyjne. Współczynnik uwzględnia lepsze postrzeganie p -tego łańcucha, jako pojedynczej alternatywy, jeżeli jego pokrycie z innymi łańcuchami jest mniejsze i odwrotnie [10]. Jedną z kilku funkcji opisujących współczynnik CF_p , jest [3]:

$$CF_p = \sum_{a \in p} w_{ap} \cdot \ln N_a \quad (25)$$

gdzie:

- a – odcinek należący do łańcucha p ,
- w_{ap} – waga odcinka a w łańcuchu p ,
- N_a – liczba tras relacji (i, j) wykorzystujących odcinek a .

4.3. Behawioralny model wyboru sposobu realizacji podróży

Model wyboru sposobu realizacji podróży dotyczy etapu poprzedzającego opisany wcześniej model wyboru trasy w sieci. Prawdopodobieństwo $\text{Pr}_i^k(m | zhj)$ wyboru sposobu realizacji podróży m , pod warunkiem, że jest to podróż realizowana w okresie h , w motywacji z , do rejonu j przedstawia następująca zależność:

$$\text{Pr}_i^k(m | zhj) = \frac{e^{\frac{V_m^k}{\theta}}}{\sum_{m' \in P_{ij}^k} e^{\frac{V_{m'}^k}{\theta}}} \quad (26)$$

gdzie:

- V_m^k – użyteczność sposobu realizacji podróży m ,
- $V_{m'}^k$ – użyteczność pozostałych sposobów m' w zbiorze alternatyw,

W tym modelu zbiór alternatyw P_{ij}^k musi uwzględniać w znacznym stopniu rodzaj systemów transportowych (traktowanych osobno, np. podróż tramwajem oraz w sposób zintegrowany, np. jazda samochodem z przesiadką na tramwaj w systemie P&R) wraz z ich ofertą przewozową (przebieg linii i rozkłady jazdy), jakością usług i warunkami ruchu (opóźnienia, zatory spowodowane kongestią) oraz zasięgiem i dostosowaniem do specyfiki podróży (podróże piesze albo podróże niepiesze, preferencje wyboru systemu transportowego dla określonych motywacji podróży, dostępność systemu transportowego – posiadanie prawa jazdy i posiadanie samochodu w rodzinie). Dlatego dodatkowo wykorzystuje się modele niejawnego postrzegania dostępności alternatyw (*implicit availability perception*), które pozwalają określić przynależność sposobów podróżowania do zbioru alternatyw, poprzez zastosowanie w funkcji losowej użyteczności składnika nazywanego stopniem przynależności $\mu_{P_{ij}^k}^k(m)$. Wówczas funkcja losowej użyteczności U_m^k alternatywy m przyjmuje postać [3]:

$$U_m^k = V_m^k + \ln \mu_{P_{ij}^k}^k(m) + \varepsilon_m^k \quad (27)$$

gdzie:

- U_m^k – postrzegana przez użytkownika k użyteczność alternatywy (sposobu podróżowania) m ,
- V_m^k – składnik deterministyczny użyteczność alternatywy m ,
- ε_m^k – składnik reszt losowych,
- P_{ij}^k – zbiór alternatywnych sposobów podróżowania m' w relacji (i, j) związany z użytkownikiem kategorii k ,
- $\mu_{P_{ij}^k}^k(m)$ – stopień przynależności alternatywy m do zbioru alternatyw P_{ij}^k ; wartości zawarte są w przedziale $0 \leq \mu_{P_{ij}^k}^k(m) \leq 1$.

Dla alternatywy m , niedostępnej dla użytkownika (np. podróż bezpośrednia tramwajem dla mieszkańca dzielnicy nieobsługiwanej przez system tramwajowy, albo podróż samochodem jako kierowca dla osoby nie posiadającej ani samochodu, ani prawa jazdy), stopień jej przynależności do zbioru alternatyw P_{ij}^k wynosi $\mu_{P_{ij}^k}^k(m) = 0$. Stąd składnik $\ln \mu_{P_{ij}^k}^k(m)$ oraz postrzegana użyteczność $U_m^k \rightarrow -\infty$, niezależnie od wartości składnika deterministycznego V_m^k . W przypadku alternatywy m , dostępnej i branej pod uwagę (postrzeganej) przez użytkownika kategorii k (na przykład osoba regularnie korzystająca z samochodu, ze względu na charakter wykonywanej pracy), jej stopień przynależności do zbioru P_{ij}^k wynosi $\mu_{P_{ij}^k}^k(m) = 1$, składnik $\ln \mu_{P_{ij}^k}^k(m) = 0$ a funkcja losowej użyteczności przyjmuje podstawową formę (20). Pozostałe wartości pośrednie $\mu_{P_{ij}^k}^k(m)$ zmniejszają użyteczność alternatywy m w stosunku do pozostałych alternatyw w zbiorze P_{ij}^k . Będą to alternatywy, które teoretycznie są dostępne dla użytkownika, jednak nie są w wystarczający sposób przez niego postrzegane, jako potencjalnie możliwe.

Stopień postrzegania alternatywy dla określonej podróży może zależeć od czynników obiektywnych (np. pogoda dla podróży rowerowej), jak również od czynników subiektywnych (np. brak informacji o rozkładzie jazdy albo ograniczenia czasowe w powiązaniu z obligatoryjnym charakterem podróży, w odniesieniu do wyboru oferty przewozowej transportu zbiorowego o wysokim ryzyku opóźnienia lub awarii pojazdu).

Funkcja V_m^k dla alternatywy m zawiera atrybuty podaży systemu transportowego, jako atrybuty określonego sposobu podróżowania, oraz atrybuty socjoekonomiczne, charakteryzujące użytkowników i ich zachowania komunikacyjne. Mogą również wystąpić atrybuty wspólnie opisujące system transportowy oraz użytkowników (np. koszty transportu odniesione do dochodu w gospodarstwie). Tym samym użyteczność określonego sposobu podróżowania będzie uwzględniała postrzeganie czasu podróży poprzez pryzmat poziomu dochodu w gospodarstwie – zwykle im wyższe dochody tym wyższy postrzegany koszt czasu spędzonego w podróży.

4.4. Behawioralny model rozkładu przestrzennego podróży

Rozkład przestrzenny podróży poprzedza opisane wcześniej etapy modelowania popytu. Prawdopodobieństwo wyboru $\Pr_i^k(j | zh)$ rejonu docelowego j pod warunkiem, że będzie to podróż realizowana z rejonu i w okresie h i w motywacji z wykorzystujące funkcję losowej użyteczności jest określone, jako [3]:

$$\Pr_i^k(j | zh) = \frac{e^{\frac{V_j^k}{\theta}}}{\sum_{j \in P_i^k} e^{\frac{V_j^k}{\theta}}} \quad (28)$$

gdzie:

- V_j^k – funkcja losowej użyteczności dotycząca rejonu docelowego j ; zawiera atrybuty rejonu związane z aktywnościami (obiekty generujące ruch) i atrakcyjnością rejonu, jako potencjalnego celu podróży oraz atrybuty kosztu podróży do rejonu j .
- V_j^k – funkcja losowe użyteczność związana z pozostałymi rejonami,
- P_i^k – zbiór rejonów komunikacyjnych będących alternatywami dla podróży podejmowanych przez użytkowników kategorii k z rejonu źródłowego i .

Należy zauważyć, iż zbiór alternatyw P_i^k składa się w tym modelu ze wszystkich rejonów komunikacyjnych, co jest założeniem mało realnym, zważywszy iż w rzeczywistości użytkownicy znają zagospodarowanie terenu pod względem celów podróży dla określonych motywacji (szczególnie

obligatoryjnych, jak np.: dom-praca) i własnych preferencji (odwiedzają na przykład tylko określone sklepy), co istotnie zmniejsza zbiór postrzeganych alternatyw. Aby uwzględnić różne zbiory alternatyw dla poszczególnych grup użytkowników, postrzegających tylko określone rejonu docelowe jako potencjalne cele podróży, wykorzystuje się na przykład modele do wyznaczania podzbiorów alternatyw (podzbiorów rejonów komunikacyjnych). Innym sposobem jest wykorzystanie modelu niejawnego postrzegania dostępności alternatywy $\mu_{P_i^k}^k(j)$, podobnie jak w modelu wyboru sposobu realizacji podróży.

Atrakcyjność rejonu $Atrak_j^k$ może być określona funkcją uwzględniającą:

- liczbę miejsc pracy (z podziałem na kategorie działalności: produkcja, handel, usługi),
- liczbę miejsc w placówkach oświatowych (w podziale na określone kategorie: szkoły średnie, szkoły wyższe, placówki prowadzące kursy doształcające i szkolenia etc),
- liczbę osób odwiedzających centra handlowe, liczbę miejsc parkingowych etc.

Ponadto atrakcyjności może uwzględniać lokalizację rejonu w analizowanym obszarze (centrum miasta, centrum kulturalno-rozrywkowe, park, obszar koncentracji handlu i usług, obszar z ograniczeniem ruchu kołowego etc.).

Koszt podróży C_{ij}^k może być wyrażony w różny sposób – na przykład w funkcji odległości, mierzonej w linii prostej między środkami ciężkości rejonów, albo jako funkcja uogólnionego kosztu podróży C_{ij}^k z rejonu i do rejonu j , której przykładową postać zamieszczono na rysunku 4. Uwzględniając atrakcyjność rejonu $Atrak_j^k$, uogólniony koszt podróży C_{ij}^k ze znakiem minus (gdyż jest postrzegany jako przeciwieństwo użyteczności) oraz wagi tych dwóch składników, odpowiednio: β_1 i β_2 , można zapisać:

$$Pr_i^k(j | zh) = \frac{e^{(\beta_1 Atrak_j^k - \beta_2 C_{ij}^k)}}{\sum_{j' \in P_i^k} e^{(\beta_1 Atrak_{j'}^k - \beta_2 C_{ij'}^k)}} \quad (29)$$

Szczególnym przypadkiem jest analogia do modelu grawitacyjnego, gdy atrakcyjność wyrażona jest liczbą podróży kończonych w rejonie D_j^k (por. zależność (13)). Wówczas zależność przybiera postać:

$$Pr_i^k(j | zh) = \frac{f((Atrak_j^k)^{\beta_1}) f((C_{ij}^k)^{-\beta_2})}{\sum_{j'} f((Atrak_{j'}^k)^{\beta_1}) f((C_{ij'}^k)^{-\beta_2})} \quad (30)$$

$$f((Atrak_j^k)^{\beta_1}) = D_j^k \quad (31)$$

$$f((C_{ij}^k)^{-\beta_2}) = f(C_{ij}^k) \quad (32)$$

4.5. Behawioralny model generowania podróży

Model generowania podróży (popytu) jest pierwszym w kolejności etapem opisu popytu. Wykorzystując teorię losowej użyteczności model generowania podróży, można zapisać jako:

$$O_i^{kzh} = \sum_x x Pr_i^k(x | zh) \quad (33)$$

$$Pr_i^k(x | zh) = \frac{e^{\frac{V_x^k}{\theta}}}{\sum_{x'=0, \dots, n} e^{\frac{V_{x'}^k}{\theta}}} \quad (34)$$

gdzie:

- O_i^{kzh} – liczba podróży rozpoczynanych w rejonie i przez użytkowników kategorii k , w motywacji z , w okresie h ,
- $Pr_i^k(x|zh)$ – prawdopodobieństwo, że użytkownik kategorii k znajdujący się w rejonie i rozpocznie x podróży, w motywacji z , w okresie h ,
- x – liczba podróży rozpoczynanych przez użytkowników poszczególnych kategorii; jeśli rozpatrywany okres h jest krótki, np. podczas analizowania godziny szczytowej, wtedy prawdopodobieństwo rozpoczęcia więcej niż 1 podróży przez użytkownika jest niewielkie (pomijalne) i wówczas wyznaczane są prawdopodobieństwa $Pr_i^k(x=0|zh)$ oraz $Pr_i^k(x=1|zh)$; natomiast dla dłuższych okresów analizy wyznaczane są również prawdopodobieństwa większej liczby podróży, tzn. ($x=1,2,3,\dots$),
- V_x^k – deterministyczny składnik funkcji losowej użyteczności, zawierający zmienne (kombinację liniową zmiennych), które dla określonej motywacji z , reprezentują potrzeby (dla motywacji obligatoryjnych) lub możliwości (dla motywacji fakultatywnych) rozpoczęcia dokładnie x podróży,
- $V_{x'}^k$ – deterministyczny składnik funkcji losowej użyteczności dotyczący rozpoczęcia dokładnie x' podróży, będący jednym z n elementowego zbioru alternatyw.

Zmienne reprezentujące chęć lub konieczność realizacji x podróży w motywacji z mogą dotyczyć gospodarstwa domowego. Będzie to wtedy m.in. liczba osób w gospodarstwie, wielkość dochodu, stan posiadania samochodu etc. Mogą również dotyczyć użytkownika indywidualnego, np.: status zawodowy, wiek, płeć, rola w rodzinie, posiadanie prawa jazdy etc. Zmienne mogą również opisywać rejon komunikacyjny i pod względem dostępności transportowej czynnej związanej z potencjalnymi rejonami docelowymi dla motywacji z .

5. PODSUMOWANIE

Przedstawione modele popytu dotyczą podróży pojedynczych (*trip-based travel-demand models*). Stosowanie tego typu modeli jest zasadne dla przypadków, gdy w okresie analizy dominują podróże typu źródło-cel-źródło, np. dom-praca-dom, dom-nauka-dom. Natomiast w przypadku modelowania podróży z celami pośrednim (źródło-cel₁-cel₂-cel_n-źródło, np. dom-praca-zakupy-nauka-dom), bardziej odpowiednimi są modele oparte na łańcuchach podróży. Ponadto oprócz wielomianowego modelu logitowego (*MNL multinomial logit*) wykorzystywane są wielomianowe modele probitowe (*MNP multinomial probit*), logitowe modele zagnieżdżone (*NL nested logit*) oraz cała klasa modeli określana jako uogólniony model ekstremalnych wartości (*GEV generalized extreme value*). Modele popytu w połączeniu z modelami rozkładu potoków na sieć transportową (*assignment models*) pozwalają odwzorować krótko- i długotrwały wpływ kongestii na zmiany w systemie transportowym oraz na zmiany w zagospodarowaniu przestrzennym aglomeracji.

Streszczenie

W artykule przedstawiono modele popytu na usługi przewozowe wykorzystujące opis podróży indywidualnych (*trip-based travel-demand models*). Modele te mają zastosowanie praktyczne głównie na poziomach planowania rozwoju systemów transportowych (strategicznego, studium wykonalności oraz taktycznego).

Słowa kluczowe: modele popytu, kongestia, modelowanie ruchu w aglomeracji.

Trip-based travel-demand modelling**Abstract**

The paper presents trip-based travel-demand models. These models are applicable in practice for strategic transport planning, feasibility studies and tactical planning.

Key words: trip-based travel-demand models, transportation systems modeling in agglomeration.

LITERATURA

- [1] Ambroziak T., Jacyna I.: Regularne hierarchiczne struktury sieci logistycznych w zastosowaniu do obsługi przedsiębiorstwa produkcyjnego. *Logistyka* 2/2011, s.35-44.
- [2] Ambroziak T., Jacyna M.: System logistyczny Polski a komodalność transportu. *Logistyka* 4/2011, s.25-32.
- [3] Cascetta E.: *Transportation Systems Analysis. Models and Applications*. 2nd Edition. Springer, New York Dordrecht Heidelberg London 2009.
- [4] Jacyna M.: *Modelowanie i ocena systemów transportowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
- [5] Jacyna M.: *Modelowanie wielokryterialne w zastosowaniu do oceny systemów transportowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2001.
- [6] Karoń G., Janecki R., Sobota A. z zespołem: *Program inwestycyjny rozwoju trakcji szynowej na lata 2008 – 2011. Analiza ruchu*, Praca n-b Politechniki Śląskiej, Katowice 2009.
- [7] Karoń G., Żochowska R., Sobota A.: *Dynamiczne zarządzanie ruchem w aglomeracji górnośląskiej z wykorzystaniem ITS*. VIII Konferencja Naukowo-Techniczna nt: *Problemy komunikacyjne miast*. Wyd. SITK Oddział w Poznaniu, s. 373-398. Poznań 2011.
- [8] Ortuzar J. De D., Willumsen L. G.: *Modelling Transport*. 3rd Edition. Wiley, New York 2009.
- [9] Wegener M. 1994. *Operational Urban Models: State of the Art*. *Journal of the American Planning Association* 60: 17-29.
- [10] Żochowska R., Karoń G., Sobota A., 2011: *Modelowanie procesów decyzyjnych podróży w transporcie publicznym*. Mat. Konf. VIII Konferencji Naukowo-Technicznej nt: *Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego*, Poznań 2011, s. 113 – 144.
- [11] Bielecki J., *Wprowadzenie do języka C*, Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa 1998.
- [12] Grudzewski W., *Badania operacyjne w organizacji i zarządzaniu: praca zbiorowa*, Polskie Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1995.