

Grzegorz KAROŃ

Politechnika Śląska, Wydział Transportu  
ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice  
grzegorz.karon@polsl.pl

## MODELOWANIE MOBILNOŚCI W ANALIZACH RUCHU DLA PROJEKTÓW INWESTYCJI TRANSPORTOWYCH

### Streszczenie:

W artykule omówiono obowiązującą metodykę sporządzania analiz i prognoz ruchu w kontekście mobilności. Scharakteryzowano również modele ruchu stosowane w praktyce. Wskazano zasadność dostosowania szczegółowości modeli ruchu oraz prognoz do programów zarządzania mobilnością.

Słowa kluczowe: mobilność, modelowanie ruchu, analiza CBA, warianty inwestycyjne, Niebieska Księga, Zielona Księga.

### WPROWADZENIE

Planowanie systemów transportowych wraz z programami zarządzania mobilnością powinny znaleźć właściwe odzwierciedlenie w modelach prognostycznych. Działania wykorzystujące komodalność<sup>1</sup> systemów transportowych zakładają w większym stopniu komplementarność poszczególnych form i gałęzi transportu niż ich konkurencyjność i substytucję. Nowe podejście do mobilności na obszarach miejskich obejmuje działania w zakresie podaży transportowej – poprzez optymalizację wykorzystania różnorodnych środków transportu i tworzenie współmodalności pomiędzy różnymi rodzajami transportu zbiorowego oraz różnymi rodzajami transportu indywidualnego, jak również działania w zakresie popytu transportowego – zarządzanie popytem na transport w celu zapewnienia mobilności, dobrobytu społecznego, odpowiedniego poziomu życia i ochrony środowiska. Różnorodność tych działań, sformułowanych w *Zielonej Księdze*<sup>2</sup>, oraz konieczność sporządzania dla projektów transportowych analiz kosztów i korzyści wskazuje na potrzebę uszczegółowienia obecnych wytycznych zawartych w *Niebieskiej Księdze*<sup>3</sup>.

### 1. ZAŁOŻENIA NOWEJ KULTURY MOBILNOŚĆ

Według założeń nowej kultury mobilności, zintegrowane i multimodalne systemy transportowe, funkcjonujące w warunkach komodalności, powinny zwiększać mobilność a jednocześnie: umożliwiać rozwój gospodarczy miast i aglomeracji, zapewniać odpowiedni

<sup>1</sup> Komodalność (ang. *co-modality*) lub współmodalność – zaangażowanie różnych środków transportu samodzielnie i w połączeniu z innymi, w celu doprowadzenia do optymalnego oraz zrównoważonego wykorzystania zasobów systemu transportowego. Uwzględniane są przy tym kryteria ekonomiczne, finansowe, jakości świadczonych usług oraz ochrony środowiska. Termin powstał w 2006 roku podczas aktualizowania polityki transportowej Unii Europejskiej w zakresie zrównoważonego rozwoju transportu zapisanej w *Białej Księdze* z 2001 roku.

<sup>2</sup> *Zielona Księga. W kierunku nowej kultury mobilności*. Komisja Wspólnot Europejskich. Bruksela 2007.

<sup>3</sup> *Niebieskie Księgi* to zbiór wytycznych stanowiących przewodnik dla beneficjentów ubiegających się o dofinansowanie projektu z funduszy UE. W tym przypadku zalecenia pochodzą z *Niebieskiej Księgi*. Sektor transportu publicznego. Jaspers, Warszawa grudzień 2008r. s. 15-16.

poziom życia mieszkańców oraz chronić środowisko naturalne. Wiąże się to z pogodzeniem z jednej strony rozwoju gospodarczego miast i dostępu do nich, a z drugiej strony z poprawą poziomu życia i ochroną środowiska, oraz pogodzeniem interesów związanych z przewozem towarów i osób bez względu na rodzaj używanego środka transportu. Tak szerokie działania postulują się planować, projektować i realizować w ujęciu zintegrowanym, łączącym

Działania w ramach kultury mobilności wymagające zintegrowanego podejścia. (na podstawie: Zielona Księga. W kierunku nowej kultury mobilności. Bruksela 2007r.)	
<b>1. GRUPA DZIAŁAŃ → W kierunku płynnego ruchu w miastach</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ atrakcyjność i bezpieczeństwo alternatywnych sposobów przemieszczania się: pieszo, rowerem, motocyklem, skuterem, transportem zbiorowym,</li> <li>→ efektywne powiązanie poszczególnych środków transportu umożliwiające optymalizację podróży,</li> <li>→ powiązanie transportu ładunków z ich dystrybucją oraz dystrybucja skonsolidowana.</li> </ul>
<b>2. GRUPA DZIAŁAŃ → W kierunku zielonych miast</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ promocja, modernizacja i rozwój ekologicznego transportu miejskiego: tramwajów, trolejbusów, metra i kolei,</li> <li>→ wdrażanie bardziej ekologicznych i energooszczędnych systemów napędowych, w tym opartych na paliwach alternatywnych,</li> <li>→ zachęcanie do ekologicznego stylu jazdy (eco-driving).</li> </ul>
<b>3. GRUPA DZIAŁAŃ → W kierunku bardziej inteligentnego transportu miejskiego</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ zwiększenie interoperacyjności rozwiązań ITS,</li> <li>→ interakcja inteligentnych pojazdów z inteligentną infrastrukturą,</li> <li>→ zbieranie i przetwarzanie danych o ruchu i podróżach w celu dynamicznej kontroli ruchu oraz przekazywania informacji dla podróżnych, kierowców, przewoźników,</li> <li>→ lepsza informacja dla podróżnego zwiększająca jego mobilność dzięki świadomemu wyborowi:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>środku transportu, czasu podróży oraz realizacji podróży multimodalnej,</li> </ul> </li> <li>→ inteligentne systemy poboru opłat.</li> </ul>
<b>4. GRUPA DZIAŁAŃ → W kierunku dostępnego transportu miejskiego</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ ułatwienie dostępu do infrastruktury transportowej osobom o ograniczonej sprawności ruchowej, osobom starszym, rodzicom z małymi dziećmi,</li> <li>→ odpowiednia obsługa transportem zbiorowym miejsc działalności gospodarczej i usługowej,</li> <li>→ lepsza obsługa stref podmiejskich o małej gęstości zaludnienia,</li> <li>→ eliminacja zjawiska izolacji przestrzennej mieszkańców poprzez rozwiązania „na miarę”, na przykład transport na żądanie, oraz inne usługi przewozowe przeciwdziałające wykluczeniu społecznemu osób starszych oraz o niskich dochodach.</li> </ul>
<b>5. GRUPA DZIAŁAŃ → W kierunku bezpiecznego i niezawodnego transp. miejskiego</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ idąc pieszo, jadąc na rowerze lub samochodem, albo ciężarówką, każdy powinien ponosić jak najmniejsze ryzyko.</li> </ul>

najlepsze rozwiązania, między innymi z zakresu innowacji technologicznych, rozwoju ekologicznych, bezpiecznych i inteligentnych systemów transportu (ITS) oraz działań ekonomiczno-prawnych (zachęty ekonomiczne i zmiany w prawie). W związku z tym w *Zielonej Księdze* zdefiniowanych zostało pięć grup działań, które wymagają takiego podejścia (rys.1).

Szeroki zakres oddziaływań związanych z mobilnością ma wpływ na szczegółowość opisu systemu oraz na wybór rodzaju modelu, jako narzędzia planistycznego, zarówno w opisie systemów transportowych i ich oferty transportowej, jak również w opisie uwarunkowań urbanistyczno-społecznych kształtujących przestrzeń w zakresie generatorów ruchu oraz dostępności transportowej, a następnie determinujących zachowania komunikacyjne mieszkańców. Modelując podróże, zachowania komunikacyjne oraz ruch w sieci transportowej nie można rozpatrywać miasta jako izolowanego punktu przestrzeni

Rys. 1. Działania w ramach nowej kultury mobilności.

Źródło: opracowanie własne na podstawie dokumentu *Zielona Księga. W kierunku nowej kultury mobilności. Komisja Wspólnot Europejskich. Bruksela 2007.*

geograficznej, społecznej i transportowej. W celu zachowania związków i wzajemnych zależności, będących podstawą podejścia systemowego, wskazane jest aby modele obejmowały obszar miasta wraz z jego otoczeniem, a szczególnie strefą podmiejską – obszarem przylegającym bezpośrednio do terenów miasta centralnego, obejmującym tereny otwarte, miasta, wsie i osady. Uzasadnieniem takiego podejścia jest ścisłe powiązanie strefy z miastem. Strefa podmiejska, z zagospodarowaniem zarówno o charakterze wiejskim jak i miejskim, cechuje się wielofunkcyjnością zależną od stadium rozwoju i struktury funkcjonalnej miasta. Do podstawowych jej funkcji zalicza się funkcje: rolniczą, wypoczynkową, mieszkaniową, komunalną, komunikacyjną, przemysłową, uzdrowiskową i naukową [7]. W systemach osadniczych strefa podmiejska stanowi część aglomeracji miejskiej. Jeśli miasta zlokalizowane są względnie blisko siebie, to w wyniku postępującej suburbanizacji każdego z nich, następuje rozwój rozległych przedmieść oraz ekspansja zabudowy mieszkaniowej i usługowej na tereny wiejskie (ang. *urban sprawl*), często daleko poza kraniec zwartej strefy zabudowy miejskiej. Kształtują się aglomeracje monocentryczne lub policentryczne (konurbacje), metropolie oraz całe obszary metropolitalne. Powstają wówczas kwestie: wielkości modelu obejmującego całą konurbację z jej strefą, jak np. aglomeracja górnośląska [3], oraz wielkości próby w badaniach i pomiarach ruchu [4]. Ponadto pojawia się wiele dylematów związanych z organizacją kompleksowych badań

ruchu, między innymi dotyczących: zakresu pytań w kwestionariuszach i czasu trwania wywiadów w gospodarstwach domowych, braków w danych związanych z odmowami udzielenia odpowiedzi, doboru przekrojów pomiarowych w sieci, sprawnej i efektywnej organizacji badań w punktach na kordonie obszaru, i wiele innych [4]. Jednak za kompleksowym podejściem do modelowania całego obszaru aglomeracji przemawiają między innymi silne związki funkcjonalno-przestrzenne, spójna sieć transportowa, organizacja przewozów w miejskim transporcie zbiorowym oraz koncentracja czynników ruchotwórczych. Przykładem takiego podejścia może być analiza i prognozy ruchu dla aglomeracji górnośląskiej, które szerzej opisane zostały w [1],[2],[3].

## 2. MOBILNOŚĆ I KOMODALNOŚCI W ANALIZACH RUCHU

Realizacja działań zdefiniowanych w *Zielonej Księdze* związana jest z planowaniem, projektowaniem i realizacją określonych inwestycji w systemie transportowym. Możliwość współfinansowania tych inwestycji z funduszy europejskich są szerokie, jednak wymagane jest przeprowadzenie analizy kosztów i korzyści (*CBA* – *cost-benefit analysis*), która wykaże zasadność realizacji jednego z kilku proponowanych wariantów inwestycyjnych. Analiza *CBA* oparta jest na wynikach analiz ruchu sporządzanych dla scenariuszy prognostycznych rozwoju systemu transportowego obszaru (prognoz ruchu), budowanych z wykorzystaniem modelowania matematycznego (modelowanie podróży i prognozowanie ruchu). Inwestycje oceniane są w *CBA* na podstawie spodziewanych efektów, które można opisać poprzez charakterystyki funkcjonalne systemów transportowych (rys. 2). Wytyczne *Niebieskiej Księgi* klasyfikują inwestycje w trzech grupach uwzględniających zakres ich oddziaływania na system transportowy i zachowania komunikacyjne użytkowników oraz wskazują zakres analiz i prognoz ruchu (rys. 3).

Charakterystyki funkcjonalne systemów transportowych, które mogą być uwzględniane w analizie kosztów i korzyści ( <i>CBA</i> ) jako kryteria cząstkowe oceny i wyboru wariantów inwestycyjnych
→ <b>podział modalny</b> – podział podróży na transport indywidualny i transport zbiorowy oraz na systemy transportu zbiorowego (tramwaj, autobus, kolej, metro), jak również na sposoby przemieszczania się (pieszo, rower, park&ride, bike&ride, etc.),
→ <b>liczba podróży</b> wykonywanych w ciągu dnia (godzin szczytowych) w podziale na motywacje podróży z uwzględnieniem podziały modalnego,
→ <b>czas podróży</b> określany na podstawie czasu dojazdu do przystanku, czasu przejazdu, czasu oczekiwania na przesiadkę, w podziale na motywacje podróży z uwzględnieniem podziały modalnego,
→ <b>częstotliwość</b> świadczenia usług transportowych określana na podstawie liczby linii oraz rozkładów jazdy,
→ <b>komfort podróży</b> określany na podstawie bezpieczeństwa, postrzeganego czasu podróży, kongestii na drogach, kongestii w środkach transportu, elastycznej oferty przewozowej, punktualności, etc.,
→ <b>przepustowość</b> obiektów infrastruktury (dla skrzyżowań oraz odcinków dróg i ulic),
→ <b>warunki ruchu</b> w sieci transportowej określone na podstawie kongestii na drogach i ulicach – poziomy swobody ruchu, bezpieczeństwa w ruchu drogowym, liczby zdarzeń drogowych, etc.,
→ <b>dostępność transportowa</b> obszaru określana na podstawie liczby i rodzajów systemów transportowych oraz tras linii wraz z rozkładami jazdy,
→ <b>wskaźniki ruchliwości komunikacyjnej</b> dla poszczególnych grup użytkowników i motywacji podróży,
→ <b>zachowania i preferencje komunikacyjne</b> mieszkańców oraz instytucjonalnych użytkowników systemu transportowego, wyrażane deklaratywnie w badaniach ankietowych (przeprowadzanych np. podczas kompleksowych badań ruchu - <i>KBR</i> ),
→ <b>inne wskaźniki funkcjonalne</b> zdefiniowane dla określonych inwestycji oraz ich oddziaływania na cały system transportowy, obszar oraz mobilność jego mieszkańców.

Rys. 2. Podstawowe charakterystyki funkcjonalne systemów transportowych

Źródło: opracowanie własne na podstawie dokumentu *Niebieska Księga. Sektor transportu publicznego. Jaspers, Warszawa grudzień 2008r.*

Prognozy ruchu sporządzane są dla następujących horyzontów: rok po oddaniu inwestycji do użytku, kolejne horyzonty pięcioletnie oraz ostatni rok prognoz (przynajmniej 25 lat od uruchomienia inwestycji). Aby zbudować i uruchomić prognostyczne modele sieci i prognostyczne modele ruchu, a następnie wykonać za ich pomocą analizy ruchu, niezbędny jest szczegółowy przegląd strategii rozwoju obszaru zarówno pod względem zmian w sieci i w systemach transportowych, jak również zmian w zagospodarowaniu przestrzennym (zmian w dystrybucji potencjałów ruchu – dla modeli grawitacyjnych). Źródłem danych mogą być między innymi strategię, plany inwestycyjne, plany rozwoju, programy operacyjne, diagnozy stanu,

programy rewitalizacji, uchwały rad miejskich, studia uwarunkowań na poziomie regionu, województwa, aglomeracji, miasta, organizatorów transportu zbiorowego.

Modele prognostyczne określające prognozowany popyt na ofertę transportową, wymagają oszacowania danych społecznych, ekonomicznych i przestrzennych. Wśród czynników bezpośrednio niezależnych od polityki transportowej oraz planów i programów zarządzania mobilnością, a niezbędnych do zbudowania prognostycznych modeli ruchu wymieniane są:

- prognozowane zmiany demograficzne ze szczególnym uwzględnieniem struktury wiekowej (wieku produkcyjnego i poprodukcyjnego) oraz poziomu wykształcenia,
- prognozowane zmiany społeczno-ekonomiczne z uwzględnieniem produktu krajowego brutto, dochodów ludności, wskaźnika motoryzacji, poziomu bezrobocia.

Drugą grupę danych stanowią czynniki zależne od polityki transportowej, planów i programów zarządzania mobilnością, jak również od wymienionych wcześniej czynników demograficznych i społeczno-ekonomicznych. Są to:

- prognozowane zmiany w zagospodarowaniu przestrzennym prowadzące do zmian wielkości potencjałów i rozkładu przestrzennego ruchu,
- prognozowane zmiany w podziale zadań przewozowych, zmiany w strukturze i sposobach przemieszczania się.

Prognozowanie zmian w zagospodarowaniu przestrzennym (zmian w dystrybucji potencjałów ruchu) ze względu na długie horyzonty prognoz, mnogość działań w ramach planów i programów zarządzania mobilnością, powinno być wspomagane modelowaniem (np. modele przesunięć bilansujących, modele pośrednich możliwości [8]). Należy również oczekiwać iż planowanie nowych lub przebudowywanych obszarów będzie uwzględniało możliwość ich obsługi transportem zbiorowym (w tym np. organizowanym w system „na żądanie”) oraz drogami i parkingami rowerowymi.

W prognozowaniu zmian w podziale zadań przewozowych znaczący wpływ będą miały plany i programy kształtujące podział modalny zarówno w oparciu o stały podział zadań przewozowych, bazujący na deklarowanych preferencjach komunikacyjnych użytkowników (dostępność systemów transportu oraz możliwość intermodalnych przemieszczeń), jak również w wyniku zastosowania zmiennego podziału uwzględniającego w głównej mierze czas przejazdu (topologia i obciążenie sieci oraz warunki ruchu). Ponadto oprócz przyjmowanego obecnie wtórnego podziału zadań przewozowych (szacowanego w modelu

Grupy inwestycyjne wg klasyfikacji z <i>Niebieskiej Księgi. Sektor transportu publicznego. Jaspers, Warszawa grudzień 2008r.</i>	
<b>GRUPA 1</b>	→ <b>inwestycje:</b> związane z wymianą taboru bez zmiany oferty przewozowej (rozkład jazdy marszruty linii). → <b>założenia:</b> inwestycja nie wpłynie na zmianę preferencji i zachowań komunikacyjnych mieszkańców w stopniu, który spowodowałby przenoszenie się podróźnych pomiędzy systemami: transportu indywidualnego i transportu zbiorowego. → <b>zakres:</b> dopuszczalna analiza ruchu dla jednego środka transportu (zbiorowego), → <b>wyjątek:</b> inwestycja realizowana w korytarzu transportowym: – możliwość zmiany preferencji podróźnych dot. środków transportu, – możliwość przenoszenia się użytkowników pomiędzy środkami transportowymi, → analiza wszystkich środków transportu zbiorowego w korytarzu transportowym.
<b>GRUPA 2</b>	→ <b>inwestycje:</b> związane ze zmianą rozkładu jazdy lub marszrutyzacji linii jednego środka transportu zbiorowego. → <b>założenia:</b> wystąpi zmiana preferencji i zachowań w zakresie wyboru środków transportu zbiorowego ale nie wystąpi zmiana podziału modalnego pomiędzy transportem indywidualnym a zbiorowym. → <b>zakres:</b> wskazana analiza ruchu obejmująca wszystkie środki transportu zbiorowego i ich użytkowników.
<b>GRUPA 3</b>	→ <b>inwestycje:</b> których efektem będą zmiany rozkładów jazdy oraz marszrutyzacji więcej niż jednego środka transportu zbiorowego, na przykład: budowa nowej trasy tramwajowej, linii metra, uruchomienie nowej linii autobusowej. → <b>założenia:</b> wystąpi zmiana podziału modalnego pomiędzy transportem indywidualnym a zbiorowym oraz pomiędzy środkami transportu zbiorowego. → <b>zakres:</b> wskazana analiza ruchu obejmująca transport indywidualny i zbiorowy.
<b>METODA ANALIZ I PROGNOZ:</b>	→ modelowania ruchu dla obszaru całego miasta – niezależnie od wpływu inwestycji na system transportowy, → <b>wyjątek:</b> uproszczona analiza tylko dla korytarza wykonana niekoniecznie techniką modelowania ruchu – te inwestycje z grupy 1 w korytarzu transportowym, w którym występuje tylko jeden środek transportu zbiorowego, → <b>obszar analizy:</b> całe miasto a dla inwestycji z oddziaływaniem poza miasto, np. kolejki podmiejska, metro, linie transportu zbiorowego obsługujące gminy przyległe, wymagane jest uwzględnienie gmin sąsiednich.

Rys. 3. Zakres oddziaływania inwestycji oraz zakres analiz ruchu

Źródło: opracowanie własne na podstawie dokumentu *Niebieska Księga. Sektor transportu publicznego. Jaspers, Warszawa grudzień 2008r.*

dopiero po rozkładzie przestrzennym ruchu) może wykształcić się również wiarygodny pierwotny podział zadań przewozowych (szacowany w modelu już na etapie generacji ruchu). Sprzyjają temu akcje i programy świadomego podróżowania kształtujące zachowania komunikacyjne prowadzone już wśród osób najmłodszych. Obecne wytyczne *Niebieskiej Księgi* dotyczące maksymalnych zmian w podziale modalnym ograniczają od góry wyniki prognoz ruchu do liczby użytkowników przejętych z transportu indywidualnego nie większej niż 15% użytkowników transportu zbiorowego.

W modelu popytu jest więc zasadne opracowywanie prognostycznych więźb ruchu dla poszczególnych podróży multimodalnych, jak również więźb ruchu dla poszczególnych etapów takich podróży. Wiąże się to z modelowaniem określonych segmentów popytu dla grup podróżnych preferujących zintegrowane (multimodalne) systemy podróżowania. Takiemu modelowi popytu powinien odpowiadać szczegółowy model oddziaływań, na który składają się modele: użytkownika, przewoźnika oraz oddziaływania na środowisko. Mając na uwadze czterostopniowy model ruchu opisujący ruch w systemie transportowym na obszarze określonej struktury osadniczej, wskazanym jest kompleksowe podejście do wykonywania modeli prognostycznych nie tylko systemu transportowego (prognostyczne modele sieci oraz wszystkich systemów transportu, w tym również systemy multimodalne) ale także modeli prognostycznych obszaru. Modele te, szczególnie w zakresie rozkładu potencjałów ruchu (generatorów ruchu), są istotne przede wszystkim ze względu na źródła pierwotnych oraz wtórnych potrzeb przemieszczania. Lokalizacja osiedli mieszkaniowych, zakładów pracy, szkół, instytucji, ośrodków zdrowia, administracji państwowej oraz działalności handlowo-usługowej wraz z ich potencjałem ruchotwórczym (liczbą osób, liczbą miejsc pracy, wielkością działalności handlowo-usługowej) to najbardziej pierwotne czynniki wymuszające konieczność przemieszczania i determinujące zachowania komunikacyjne opisywane ruchliwością, mobilnością oraz preferencjami w sposobie realizacji podróży. Dlatego niezbędnym staje się wiarygodne prognozowanie struktury ruchotwórczej obszaru w kolejnych horyzontach prognoz, szczególnie w perspektywie polityki zarządzania mobilnością zmierzającej do skoordynowania rozwoju przestrzennego obszaru z rozwojem transportu na wszystkich płaszczyznach (technicznej, urbanistycznej, prawnej etc.).

Jako przykład działań skoordynowanych można podać projekty europejskie, w ramach których opracowywane są programy integracji zarządzania mobilnością z planowaniem przestrzennym, zarówno na etapie planowania miejscowego, jak i w procesie uzyskiwania pozwoleń na budowę. Gdy planowany jest nowy obiekt, rozbudowa lub przebudowa obiektu istniejącego prowadzone są negocjacje pomiędzy inwestorem, wykonawcą i władzami miasta dotyczące: parkowania, infrastruktury transportu rowerowego, pieszego i zbiorowego, promowania alternatywnych form transportu w podróżach (np. carpooling, carsharing). Dzięki temu wybór różnych sposobów dojazdu do obiektu jest możliwy już od samego początku, w okresie kiedy użytkownicy są otwarci na alternatywne sposoby podróży. W przypadku natomiast, gdy jedynym sposobem dojazdu jest samochód, użytkownicy przyzwyczajają się do korzystania z niego i później o wiele trudniej jest zmienić ich preferencje komunikacyjne [1],[6].

W prognostycznych modelach sieci, będących prognozą podaży transportowej, wskazane jest aby uwzględnić wszystkie planowane zmiany wraz z harmonogramem ich realizacji. Jest to istotne z tego względu, że prognozowane rozkłady potoków ruchu, podział modalny oraz pozostałe charakterystyki funkcjonalne (rys. 2), zależą wprost od parametrów techniczno-eksploatacyjnych elementów sieci transportowej oraz stopnia ich obciążenia. Dlatego wiarygodność prognoz uwarunkowana jest nie tylko identyfikacją i wprowadzeniem zmian w połączeniach sieci ale przede wszystkim wymiarowaniem nowych węzłów i połączeń, poprzez funkcje oporu odcinków i relacji skrzyżnych w węzłach dla modeli opartych na metodach *HCM – Highway Capacity Manual* (rys. 5) lub poprzez uwzględnienie warunków



ruchu w mikrosymulacyjnych modelach opisujących jazdę indywidualnych pojazdów i zachowania kierowców (rys. 6). Jest to zagadnienie tym trudniejsze im dalszego horyzontu prognozy dotyczy, ponieważ brak jest tak szczegółowych planów i projektów rozwoju sieci. Występuje więc problem szczegółowości modeli używanych w scenariuszach prognostycznych i braku dla nich wiarygodnych danych.

Ponadto istotnym problemem jest zdefiniowanie wariantu bazowego (scenariusz bez ocenianej inwestycji) oraz wariantów inwestycyjnych (scenariusze z inwestycją w kilku wariantach techniczno-organizacyjnych) na potrzeby analizy *CBA* przeprowadzanej metodą przyrostową<sup>4</sup>. Liczba i rodzaj wariantów jest zależna od rodzaju inwestycji, przy czym każdy wariant należy tak sformułować aby mógł być oceniony pod względem skuteczności realizacji przyjętych w projekcie celów. Wskazane jest aby cele dotyczyły szeroko rozumianej poprawy warunków ruchu w mieście, szczególnie poprzez zwiększanie mobilności osób podróżujących oraz zwiększenie warunków potencjalnej mobilności w systemie transportowym, rozumianej jako oferta przewozowa pozwalająca realizować podróże multimodalne. Podczas definiowania wariantu bazowego (bezinwestycyjnego) mogą pojawić się następujące kwestie związane z realizacją innych projektów inwestycyjnych [4]:

- w przypadku projektów wzajemnie zależnych realizowanych kolejno, gdy pierwszy projekt warunkuje zasadność realizacji projektu drugiego, wówczas wariant inwestycyjny projektu pierwszego powinien być wariantem bazowym projektu drugiego – np. modernizacja torowiska i zakup nowego taboru.
- w przypadku projektów oddziałujących na siebie wzajemnie i realizowanych równoległe ale niezależnie (np. modernizacja różnych odcinków tej samej trasy tramwajowej), powstaje dylemat: czy warianty bazowe obu projektów powinny być takie same – nie uwzględniające wymienionych projektów? Czy też jeden z tych projektów powinien zostać przyjęty mimo wszystko jako wariant bazowy drugiego?
- w przypadku dużego obszaru i dużej sieci transportowej w horyzontach prognozy mogą pojawić się inne inwestycje, których projekty są obecnie w fazie planowania; w związku z tym powstaje wątpliwość: czy jako wariant bazowy stworzyć scenariusz (prognozę) rozwoju całego systemu transportowego na kilkadziesiąt lat z uwzględnieniem wszystkich projektów poza projektem ocenianym, czy też jako wariant bazowy przyjąć status quo bez żadnego projektu, ponieważ efekty tych projektów są jedynie na etapie planowania? Zasadnym wydaje się przyjęcie założenia, że prognozowane sieci dla wariantu bezinwestycyjnego powinny uwzględniać wszystkie inne działania i inwestycje poza inwestycją będącą przedmiotem projektu. Jednak długie horyzonty prognoz i mnogość projektów komplikuje proces wyboru tych inwestycji, które rzeczywiście zostaną zrealizowane i jaki rzeczywiście przyniosą efekt dla systemu transportowego.

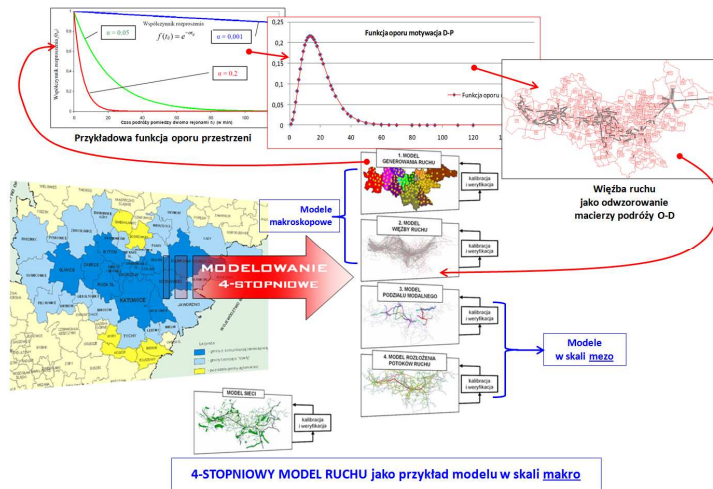
### 3. PODSTAWOWE RODZAJE MODELI STOSOWANYCH W PRAKTYCE

W Polsce stosowane są obecnie w praktyce modele o różnej skali agregacji danych wejściowych i wyników oraz o różnej metodyce i szczegółowości odwzorowania ruchu. Na etapie planowania inwestycji i oceny jej efektów wykorzystywany jest czterostopniowy model ruchu zawierający podstawowe modele cząstkowe: model generacji, model rozkładu przestrzennego, model podziału zadań przewozowych oraz model rozkładu ruchu na sieć transportową (schemat ideowy modelu 4 stopniowego na przykładzie aglomeracji górnośląskiej przedstawiono na rysunkach 4 i 5). W każdym z modeli cząstkowych istnieje

<sup>4</sup> W analizie kosztów i korzyści (ang. *CBA - cost-benefit analysis*) prowadzonej metodą przyrostową porównuje się koszty wariantu bezinwestycyjnego z kosztami wariantu inwestycyjnego a więc projektowanej inwestycji.

możliwość uwzględnienia obecnych zachowań i preferencji komunikacyjnych [1],[6],[9] oraz modelowania czynników jak i efektów zarządzania mobilnością.

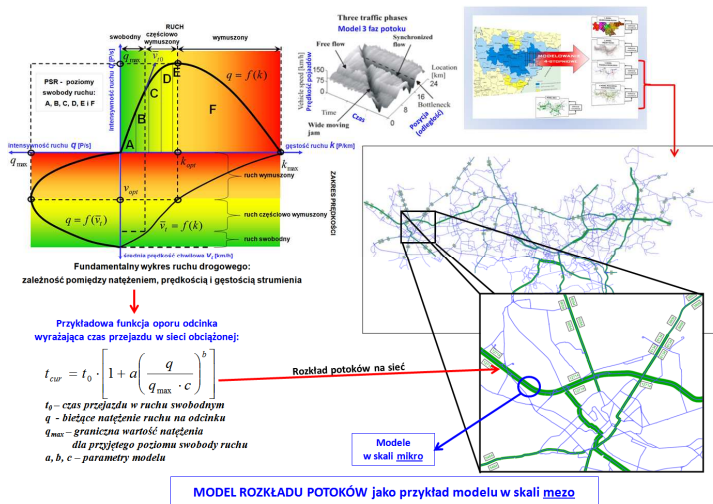
Coraz częściej modele ruchu zamawiane są przez władze samorządowe miast jako narzędzia (implementacja modelu z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania) przy-



Rys. 4. Schemat ideowy powiązania modelu generacji ruchu z modelem więzby w modelu 4 stopniowym na przykładzie aglomeracji górnośląskiej

Źródło: opracowanie własne.

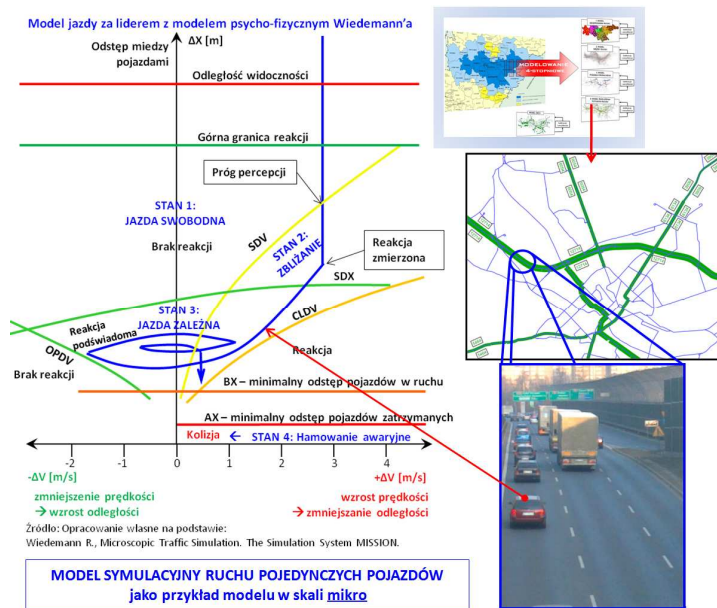
odcinka) oraz oporu relacji skrzyżnych. Charakterystyki te umożliwiają rozkładanie potoków ruchu samochodowego z uwzględnieniem zależności między natężeniem, gęstością oraz średnią prędkością strumienia ruchu (rys. 5). Transport zbiorowy jest odwzorowany w sieci między innymi za pomocą linii, przystanków i rozkładów jazdy. Z technicznego punktu widzenia model sieci transportowej zawiera w sobie odwzorowanie systemów transportowych analizowanego obszaru [2],[5]. Ponadto w modelu sieci zapisane są dane dotyczące ruchu rzeczywistego. Są to między innymi wyniki zebrane w generalnym pomiarze ruchu (GPR), pochodzące z kompleksowych badań ruchu (KBR), pomiarów napełnienia środków transportu zbiorowego oraz innych pomiarów ruchu dedykowanych określonej inwestycji, na przykład pomiary rzeczywistych czasów przejazdu tramwajów i autobusów w celu określenia prędkości komunikacyjnej oraz rzeczywistych czasów przejazdu samochodem w godzinie szczytu (w warunkach kongestii) i w ruchu swobodnym.



Rys. 5. Schemat ideowy rozkładu potoków ruchu na sieć w modelu 4 stopniowym na przykładzie aglomeracji górnośląskiej

Źródło: opracowanie własne.

Model 4 stopniowy jest wykorzystywany do analizy rozkładu potoków ruchu na etapie planowania określonej inwestycji. Natomiast na etapie projektowania i realizacji tej inwestycji wykorzystywane są modele i narzędzia oparte na metodach deterministycznych HCM (*Highway Capacity Manual*) lub na metodach symulacyjnych, w których szczegółowość opisu



ruchu zmienia się od makroskopowego opisu strumienia pojazdów poprzez mezoskopowy opis ruchu pojazdów z wykorzystaniem między innymi średnich prędkości jazdy, aż do opisu ruchu pojedynczych pojazdów uwzględniających zachowania indywidualnych kierowców (rys. 6).

Na podstawie raportów FHWA [10], które zawierają przegląd metod oraz narzędzi do oceny strategii rozwoju systemów transportowych w kontekście rosnącej kongestii, sporządzono krótką charakterystykę 7 grup narzędzi do modelowania ruchu – rysunek 7. Raporty FHWA powstały w celu usystematyzowania zagadnień związanych z modelowaniem ruchu oraz w celu wskazania narzędzi analitycznych,

Rys. 6. Schemat ideowy modelu mikrosymulacyjnego

Źródło: opracowanie własne na podstawie Wiedemann R., *Microscopic Traffic Simulation*.

a tym samym modeli, które powinny być wykorzystywane w praktyce podczas wszystkich etapów realizacji projektów o różnej skali i szczegółowości. Jednocześnie podkreślić należy, iż wg raportów FHWA nie ma na razie jednego uniwersalnego narzędzia, którym można wykonać wszystkie rodzaje analiz ruchu.

## PODSUMOWANIE

Odwzorowanie w modelu ruchu czynników i uwarunkowań kształtujących mobilność może odbywać się na wielu płaszczyznach opisu obszaru i opisu systemu transportowego – zarówno w poszczególnych stadiach stosowanego obecnie czterostopniowego modelu ruchu, jak również w modelach opartych na deterministycznych metodach HCM oraz metodach symulacyjnych. Jest to ważne co najmniej z dwóch powodów: ze względu na znaczne środki finansowe przeznaczane na realizację kompleksowych badań ruchu i budowę, na ich podstawie, modeli podróży i prognozowanie ruchu oraz ze względu na efekty i skutki podjętych działań i zrealizowanych inwestycji transportowych, zarówno w wymiarze finansowym jak również gospodarczym i społecznym.

Należy mieć również na uwadze, że złożoność opisu systemu transportowego oraz przestrzeni zurbanizowanej, w której ten system funkcjonuje, w połączeniu z prognozami ruchu powoduje, że zbyt duże uproszczenia wprowadzone na różnych etapach modelowania mogą zniweczyć potencjalne możliwości analityczne jakie dają precyzyjne metody matematycznego opisu.



## GRUPA 1 → PLANOWANIE (SKETCH-PLANNING TOOLS):

- wstępna ocena projektów i wariantów bez szczegółowych analiz (w tym technicznych),
- wstępna ocena (szacowanie) kosztów,
- najprostsze i najmniej kosztowne,
- realizują wszystkie lub wybrane funkcje metod analitycznych ale technikami uproszczonymi,
- operują na wartościach ogólnych, globalnych, zagregowanych,
- ograniczone pod względem: zakresu, dokładności i prezentacji,
- nie zastępują późniejszych szczegółowych analiz.

## GRUPA 2 → MODELE POPYTU/PODRÓŻY (TRAVEL DEMAND MODELS):

- pierwotnie do oceny dużych zmian w systemach transportowych obszarów zurbanizowanych,
- umożliwiają wykonanie analiz oraz prognoz: popytu, podróży i ruchu w sieci,
- uwzględniają charakterystykę popytu w zakresie:
  - potencjału generowanego,
  - rozkładu przestrzennego podróży,
  - motywacji podróży,
  - wyboru sposobu podróżowania (*mode choice*),
  - rozkładu popytu / podróży w sieci transportowej,
- uwzględniają charakterystykę gospodarstw domowych oraz zagospodarowanie obszaru pod względem ruchotwórczym,
- wykorzystują charakterystykę ruchliwości (mobilności) mieszkańców w zakresie: zachowań i preferencji komunikacyjnych,
- nie pozwalają, w bezpośredni sposób, na szczegółowe i efektywne wykorzystanie w zarządzaniu ruchem w ramach ITS,
- mają ograniczone możliwości szacowania zmian dynamicznych charakterystyk ruchu, takich jak: prędkość, opóźnienia, kolejki.

## GRUPA 3 → DETERMINISTYCZNE MODELE ANALITYCZNE OPARTE NA HCM (ANALYTICAL/DETERMINISTIC TOOLS, HCM-BASED):

- przeważnie wykorzystują modele oparte na HCM oraz inne z zakresu inżynierii ruchu drogowego,
- pozwalają wyznaczyć podstawowe charakterystyki: przepustowość, gęstość, prędkość, opóźnienia, kolejki oraz warunki ruchu (np. PSR),
- sprawdzają się w zastosowaniu do wyizolowanych obiektów (skrzyżowania i odcinki sieci drogowo-ulicznej),
- nie umożliwiają analiz sieciowych ani oceny efektów zmian systemowych,
- są modelami makroskopowymi, deterministycznymi i statycznym, tzn. operują na danych o wartościach opisujących warunki ruchu w okresach 15 min. lub 1 godziny, bez uwzględnienia czynników losowych i związanych z nimi zmian ruchu w krótszych interwałach niż podane.

## GRUPA 4 → OPTIMALIZACJA SYGNALIZACJI ŚWIETLNEJ (TRAFFIC SIGNAL OPTIMIZATION TOOLS):

- opracowywanie optymalnych programów i planów sygnalizacji,
- stosowane do skrzyżowań z sygnalizacją:
  - odosobnioną,
  - skoordynowaną liniowo – ciągi skrzyżowań w arterii,
  - skoordynowaną obszarowo (sieciowo) – skrzyżowania w obszarze sterowania,
- umożliwiają wyznaczenie m.in.: przepustowości, długości cyklu, optymalizacji splitu, ofsetów,
- umożliwiają optymalizację ruchu na wjazdach i zjazdach autostradowych oraz ruchu w miejscach robót drogowych z wyłączeniem pasa ruchu (np. *Dynamic Merge Traffic Control for Work Zones*).

## GRUPA 5 → MAKROSKOPOWE MODELE SYMULACYJNE (MACROSCOPIC SIMULATION MODELS):

- wykorzystują deterministyczne zależności między charakterystykami strumienia ruchu (intensywność, gęstość i średnia prędkość),
- symulacja nie uwzględnia opisu ruchu pojedynczych pojazdów,
- nie umożliwiają tak szczegółowych analiz oddziaływania inwestycji na warunki ruchu jak modele mikroskopowe.

## GRUPA 6 → MEZOSKOPOWE MODELE SYMULACYJNE (MESOSCOPIC SIMULATION MODELS):

- łączą właściwości modeli makro- i mikroskopowych,
- podobnie jak w modelach mikroskopowych symulowanymi jednostkami są pojedyncze pojazdy,
- ruch pojazdów symulowany jest tak jak w modelach makroskopowych – z wykorzystaniem średniej prędkości na odcinku,
- symulacja potoków ruchu i ich predykcja na poziomie zagregowanym nie uwzględnia dynamiki zmian pomiędzy prędkością a wielkością potoków.

## GRUPA 7 → MIKROSKOPOWE MODELE SYMULACYJNE (MICROSCOPIC SIMULATION MODELS) :

- symulują ruch pojedynczych pojazdów,
- wykorzystują modele jazdy za liderem (*car-following*) oraz zmiany pasa ruchu (*lane-changing*),
- wykorzystują stochastyczne rozkłady zgłoszeń i rozkłady odstępów między zgłoszeniami,
- symulacja odbywająca się z bardzo małym krokiem (*rzędu 1 sekundy lub mniejszym*),
- mogą uwzględnić plan i profil drogi (wzniesienia, spadki, łuki poziome wraz wartością przchyłki).

Rys. 7. Charakterystyka modeli wg metodyki zawartej w raportach FHWA [10]

Źródło: opracowanie własne na podstawie *Traffic Analysis Toolbox. Volumes 1÷10. Federal Highway Administration. Research, Development and Technology. 2004 ÷ 2010.*

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Karoń G.: Preferencje komunikacyjne mieszkańców Aglomeracji Górnośląskiej wraz z oceną satysfakcji z transportu zbiorowego. Międzynarodowa Konferencja „Problemy Rozwoju Transportu Regionalnego TRANS-REG. Kształtowanie zachowań komunikacyjnych społeczeństw poprzez promocję transportu zbiorowego.” Dąbrowa Górnicza 14 maja 2010r.

- [2] Karoń G., Janecki R., Sobota A.: Modelowanie ruchu w konurbacji górnośląskiej – sieć publicznego transportu zbiorowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria TRANSPORT, Gliwice 2010.
- [3] Karoń G., Janecki R., Sobota A. z zespołem: Program inwestycyjny rozwoju traktacji szynowej na lata 2008–11. Analiza ruchu, Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej, Katowice 2009.
- [4] Karoń G., Łazarz B.: Wybrane zagadnienia budowy modelu ruchu. Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Transport XXI wieku”, Białołęka 21-24 września 2010r.
- [5] Karoń G., Macioszek E., Sobota A.: Selected problems of transport network modeling of Upper-Sielsian Agglomeration (in Poland). Transbaltica 2009, Proceedings of the 6-th International Scientific Conference. April 22-23 2009. Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania 2009. s. 103-108.
- [6] Karoń G., Żochowska R., Sobota A.: Zachowania komunikacyjne w Aglomeracji Górnośląskiej – wybrane wyniki z 2009r. Ogólnopolska Konferencja Naukowo – Techniczna. „Kompleksowe Badania Ruchu. Teoria i praktyka. Doświadczenia miast polskich.” Gdańsk 24-25 maja 2010r. Zeszyty NT SiTK RP o/Kraków, Nr 93 Zeszyt 152, Kraków 2010, s.83-95.
- [7] Liszewski W.: Strefa podmiejska jako przedmiot badań geograficznych. Próba Syntezy, Przegląd Geograficzny, t. LIX z. 1-2. 1987.
- [8] Litwińska E.: Stan równowagi w modelowaniu systemów osadniczych za pomocą modeli przesunięć bilansujących. OWPW. Wrocław 2004r.
- [9] Sobota A., Karoń G.: Postrzeganie warunków ruchu miejskiego – płynność ruchu – wyniki badań ankietowych. Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna „Modelowanie podróży i prognozowanie ruchu”, Kraków 25-26 listopada 2009. Zeszyty NT SITK RP o/Kraków, Nr 90 Zeszyt 148, Kraków 2009, s. 215-234.
- [10] Traffic Analysis Toolbox. Volumes 1÷10. Federal Highway Administration. Research, Development and Technology. Turner-Fairbank Highway Research Center. 2004 ÷ 2010.

#### **MOBILITY MODELING IN TRAFFIC ANALYSIS FOR TRANSPORTATION PROJECTS**

**Abstract:**

The methodology of traffic analysis and forecasts in the context of mobility has been presented in this article. Traffic models used in practice has been characterized. Pointed the merits of adapting detail traffic models and forecasts for the mobility management programs.

Key words: mobility, transportation systems modeling, CBA cost-benefit-analysis, Blue Book, Green Book.