

## **ZASTOSOWANIE NOWOCZESNEGO OPROGRAMOWANIA DO MODELOWANIA I SYMULACJI RUCHU**

### **1. Wstęp**

Efektywnie funkcjonujący system transportowy podnosi warunki życia mieszkańców oraz atrakcyjność inwestycyjną regionu. Stąd planowanie rozwoju poszczególnych systemów transportu jest jednym z bardzo odpowiedzialnych zadań podejmowanych przez jednostki samorządowe. Do skutecznego planowania modernizacji i rozwoju systemów transportu wykorzystuje się modele ruchu. Uzyskiwane wyniki z ich stosowania są podstawowymi przesłankami służącymi do oceny efektywności planowanych/projektowanych elementów infrastruktury. Stąd stosowanie modelowania ruchu jest bardzo ważne w całym procesie planowania/projektowania elementów infrastruktury, ale z drugiej strony jest bardzo wrażliwym elementem, który musi stale być poddawany weryfikacji i kontroli. Błędnie wykonany i/lub zastosowany model ruchu może przyczynić się do wyciągnięcia błędnych wniosków, co do efektywności planowanych elementów infrastruktury i przyczynić się do podejmowania błędnych decyzji. Z uwagi na powyższe metodyka modelowania ruchu musi być ciągle rozwijana i udoskonalana. Sprzyja temu dynamiczny rozwój specjalistycznego oprogramowania służącego do modelowania i symulacji ruchu.

### **2. Modelowanie i prognozowanie ruchu - rys historyczny, doświadczenia krajowe i zagraniczne**

Modelowanie i prognozowanie ruchu jest stosunkowo młodą, lecz dynamicznie rozwijającą się dziedziną nauki mocno powiązaną z zagadnieniem planowania systemów transportowych. W latach 50-tych ubiegłego wieku powstały dwie bardzo ważne teorie dotyczące modelowania podróży.

Pierwsza z nich, tzw. metoda Fratara [7]. Ma ona zastosowanie w prognozowaniu ruchu opartym na mnożeniu macierzy ruchu przez macierz wskaźników wzrostu na poszczególnych relacjach.

---

<sup>1</sup> dr inż., Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej  
TransEko Sp.j. [www.transeko.pl](http://www.transeko.pl)

Druga z nich to tzw. model grawitacyjny [28], [29]. Opiera się ona na założeniu, że liczba podróży pomiędzy obszarami miasta jest proporcjonalna do ich wielkości (liczby mieszkańców i miejsc pracy), a odwrotnie proporcjonalna do odległości między nimi. Zastosowanie modelu grawitacyjnego umożliwiło prognozowanie liczby podróży w oparciu o prognozowane zmiany demograficzne oraz zatrudnienia.

W następnej kolejności powstawały teorie dotyczące podziału podróży na poszczególne środki transportowe oraz sposoby wprowadzania podróży do sieci, czyli sposoby rozkładania ruchu.

Powstające teorie zostały skonsumowane do stworzenia kompleksowego pojęcia modelu ruchu. Został on nazwany cztero-stopniowym modelem ruchu<sup>2</sup> [15], [32]. Nazywany jest on też klasycznym modelem ruchu. Jest on najbardziej rozpowszechnionym i używanym również obecnie kompleksowym modelem ruchu. Jego nazwa pochodzi od jego konstrukcji, składa się on z czterech faz (generacja ruchu<sup>3</sup>, dystrybucja ruchu<sup>4</sup>, podział na środki transportu<sup>5</sup> oraz rozkład ruchu na sieci<sup>6</sup>).

W ostatnich latach coraz większą popularnością wśród badaczy i praktyków cieszą się modele, które zastępują pierwsze trzy fazy klasycznego modelu ruchu. Modele te nazywają się modelami opartymi na aktywności komunikacyjnej mieszkańców<sup>7</sup> [23], [33]. Zwolennicy ich stosowania wskazują na większe możliwości uwzględniania w obliczeniach liczby podróży między rejonami różnych czynników jak np. kosztów korzystania z poszczególnych środków transportu, komfortu podróżowania, zatłoczenia komunikacyjnego oraz zmieniających się zachowań komunikacyjnych i aktywności mieszkańców. Niestety zastosowanie tych modeli wiąże się z większymi nakładami na badania zachowań i preferencji komunikacyjnych.

W specjalnym raporcie [16] wskazuje się na konieczność doskonalenia i rozwijania obydwu aspektów modelowania podróży.

Jednym z wydarzeń, które wpłynęło pozytywnie na rozwój planowania, a przez to także modelowania i prognozowania ruchu było wejście w życie w Stanach Zjednoczonych dwóch ustaw. Pierwsza<sup>8</sup> uchwalona w 1961r., umożliwiła agencjom federalnym finansowanie zaawansowanych badań studiów ruchu nad rozwiązywaniem problemów zatłoczenia oraz

---

<sup>2</sup> ang.: *Four-Step Model*

<sup>3</sup> ang.: *trip generation*

<sup>4</sup> ang.: *trip distribution*

<sup>5</sup> ang.: *mode choice*

<sup>6</sup> ang.: *traffic assignment*

<sup>7</sup> ang.: *Activity-Based Model*

<sup>8</sup> Nazwa ustawy: *The Housing Act*

redukowania potrzeb transportowych. Druga ustawa<sup>9</sup> uchwalona w 1962r., wprowadziła obowiązek wykonywania od 1 lipca 1965 roku studiów ruchu dla projektów dotyczących rozwoju infrastruktury w miastach (i ich aglomeracjach) w przypadku, gdy ich wielkość przekraczała 50 tys. mieszkańców.

Rozwój dziedziny nauki jaką jest modelowanie ruchu (w tym modelowanie podróży) jest powiązany z rozwojem komputeryzacji. W publikacji [10] przedstawiono rys historyczny rozwoju dziedziny, jaką jest modelowanie ruchu. W latach 50 i 60 ubiegłego wieku powstały pierwsze modele ruchu dla dużych miast amerykańskich w tym: Detroit, Chicago, Filadelfia i Waszyngtonu D.C. [16] opracowywane na wielkich komputerach IBM.

Modele te wykorzystywały wyniki prac nad makroskopowymi modelami ruchu w arteriach opisane min. w publikacjach [30], [25]. W 1966r. ukazała się publikacja [24], w której opisano teorię powiązania maksymalnych przepływów ruchu do centrów miast w funkcji obszaru, liczby dróg oraz ich przepustowości. Niemniej jednak prace te nie wyjaśniały, jaki jest wpływ na warunki ruchu sytuacji, w których popyt przewyższa przepustowość dróg w godzinach szczytu. Publikacja [27] była pierwszą pracą, w której – w oparciu o analizy wieloletnich pomiarów ruchu wykonywanych w centrum Londynu - przedstawiono liniową zależność pomiędzy prędkością pojazdów, a natężeniem ruchu. W publikacji [31] przedstawiono teoretycznie opracowaną zależność średniej prędkością potoku, liczby pasów ruchu i średnich odległości między skrzyżowaniami. Należy zaznaczyć, że opracowane zależności sprawdzały się jedynie w przypadkach występowania monotonicznego ruchu występującego w mało obciążonych sieciach. Nie nadawały się zatem do opisu ruchu w warunkach występowania stanów zatłoczenia, np. w godzinach szczytu. Jednym z ważniejszych opracowań w tej dziedzinie była praca przedstawiona w publikacji [11] w której stwierdzono, że średnia prędkość ruchu w dużych miastach jest uzależniona od udziału zatrzymań pojazdów w określonym okresie czasu.

W Polsce pierwsze doświadczenia związane z modelowaniem ruchu datowane są na okres 1955-1964, kiedy to powstały pierwsze warszawskie modele ruchu opracowywane z wykorzystaniem maszyn cyfrowych. Tworzyli je pionierzy modelowania ruchu w Polsce skupieni wokół Instytutu Gospodarki Komunalnej w Warszawie oraz Warszawskiego Biura Studiów i Projektów Komunikacji Miejskiej. Krych w publikacji [14] do tej grupy polskich badaczy zalicza: Lilpopa, Rataja, Sidorenkę oraz Suchorzewskiego.

W latach 1975-1985 w ramach programu pomocy ONZ przekazano Polsce amerykański komputerowy pakiet programów Urban Transport Planning System (UTPS).

---

<sup>9</sup> Nazwa ustawy: *The Federal-Aid-Highway Act*

Opracowywanie modeli ruchu dla miast oraz większych aglomeracji umożliwia przeprowadzenie wielu analiz niezwykle ważnych z punktu widzenia diagnozy stanu istniejącego i planowania, w tym:

- analiz warunków ruchu;
- analiz transportochłonności i zapotrzebowania na infrastrukturę transportową;
- analiz środowiskowych, hałasu i emisji;
- wpływu zmian zagospodarowania przestrzennego na system transportowy;
- wpływu zmian demograficznych i ekonomicznych;
- polityki transportowej oraz
- efektywności projektów rozwoju infrastruktury.

W cytowanym już opracowaniu [16] wskazuje się, że poprawny model można uzyskać po wykonaniu 4 pełnych procesów:

- **opracowania modelu ruchu** (model estimation) – wykonanie matematycznego zapisu modelu ruchu z wykorzystaniem informacji zebranych w czasie badań;
- **kalibracji modelu ruchu** (model calibration) – proces porównywania parametrów modelu ruchu z wynikami pomiarów w celu zapewnienia właściwego odwzorowania rzeczywistych warunków; kalibracja ma na celu doprowadzenie do zminimalizowania różnic pomiędzy parametrami modelu i wynikami pomiarów;
- **weryfikacji modelu ruchu** (model validation) – sprawdzenie przydatności modelu do wykonywania analiz konkretnych projektów przy uwzględnieniu odpowiednich uwarunkowań; weryfikacja obejmuje m.in. wykonanie prognoz ruchu przy założeniach, które pozwalają przeprowadzić pomiary ruchu oraz porównać otrzymywane wyniki, przykładem weryfikacji modelu ruchu może być wykonanie „wstecznej” prognozy ruchu w oparciu o dane historyczne i porównanie jej wyników z odpowiadającymi im historycznymi pomiarami ruchu; autor pracy jest zdania; że w przypadku modeli prognostycznych powinno się sprawdzać czy prognozowane natężenia ruchu na sieci drogowej nie doprowadzą do aktywacji LOP;
- **zastosowania modelu ruchu** (model application) – funkcjonalność modelu można sprawdzić poprzez analizę wrażliwości na niewielką zmianę niektórych parametrów modelu (np. wysokości opłat na odcinkach, wartości czasu użytkowników itp.); w przypadku gdy model bardzo czule reaguje nawet na niewielkie zmiany parametrów można uznać, że jego funkcjonalność jest ograniczona; działanie to od 1997 r. jest zalecane przez amerykańską federalną administrację drogową FHWA.

### 3. Powszechnie stosowane modele ruchu, ich wady i zalety

W publikacjach [18], [12] przedstawiono podział powszechnie stosowanych modeli ruchu w zależności od opisu szczegółowości zjawiska jakim jest ruch drogowy. Według przytoczonych klasyfikacji modele ruchu drogowego można podzielić na dwie podstawowe grupy:

- mikroskopowe modele ruchu oraz
- makroskopowe modele ruchu.

Makroskopowe modele ruchu charakteryzują się tym, że opisują ruch drogowy poprzez wielkości zagregowane, w tym np.: średnia prędkość pojazdów, gęstość i natężenie ruchu.

Mikroskopowe modele ruchu drogowego, opisują każdy pojedynczy pojazd znajdujący się w sieci drogowej oraz wzajemne interakcje zachodzące pomiędzy pojazdami i stanem sieci drogowej.

Pomiędzy wymienionymi modelami występują jeszcze mezoskopowe modele ruchu. W ich przypadku trudno jest podać szczegółową definicję. Umownie można przyjąć, że wypełniają one przestrzeń pomiędzy makroskopowymi, a mikroskopowymi modelami ruchu. Generalnie można określić, że mezoskopowe modele ruchu zajmują się opisem ruchu grup pojazdów oraz ich wzajemnych interakcji. W uproszczeniu można określić, że modele mezoskopowe są mniej dokładne niż mikroskopowe, ale za to bardziej dokładne niż makroskopowe modele ruchu.

Jedną z głównych zalet makroskopowych modeli ruchu jest możliwość analizy ruchu na wszystkich pasach drogi (w jednym kierunku) przez wykorzystanie jednego modelu uwzględniającego prawdopodobieństwo wyprzedzania. Wynikiem stosowania makroskopowego modelu ruchu jest średnia prędkości pojazdów  $v(x,t)$  w odniesieniu do gęstości ruchu  $p(x,t)$  jako funkcja przebytej drogi i czasu.

W makroskopowych modelach ruchu zakłada się, że strumień ruchu jest jednorodny i może być określany przez 3 zmienne: intensywność ruchu (liczba pojazdów przejeżdżających określony przekrój drogi w jednostce czasu [Poj/s]), gęstość ruchu i średnią prędkość. W ruchu jednorodnym wymienione parametry łączy zależność zwana równaniem strumienia stanu pojazdów:

$$q = p \cdot v_t \quad (2)$$

gdzie:

$v_t$  - średnia prędkością chwilową

$$v_t = \frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} v_{ti} \quad (3)$$

gdzie:

$n_t$  - liczba pojazdów znajdująca się na odcinku  $\Delta x$  w danej chwili  $t$

$v_{ti}$  - prędkość pojazdu  $i$  i mierzona w chwili  $t$  na odcinku  $\Delta x$

Jednym z wyników przyjęcia powyższego założenia było powstanie tzw. krzywych oporu (ang. Volume Delay Functions). Są to funkcje, które uzależniają czas przejazdu odcinka drogi  $t_{cur}$  (w przypadku nieobciążonej ruchem drogi średni czas przejazdu odcinka drogi  $t_0$  wynika z prędkości swobodnej  $v_0$ ) od natężenia ruchu. Funkcje te są „rdzeniami programów” (algorytmami) powszechnie wykorzystywanymi w programach komputerowych do modelowania ruchu takich jak Visum czy Emme/2. Funkcje te mają stosunkowo proste formy równań, które umożliwiają oszacowanie średnich prędkości na obciążonych ruchem odcinkach dróg wykorzystując informacje o ich przepustowości [4]. Do najczęściej stosowanych funkcji oporu należą: BPR (oraz jej modyfikacje BPR2 i BPR3), CONICAL, Lohse, INRETS. We wszystkich wymienionych funkcjach oporu głównym składnikiem jest stosunek natężenia ruchu do przepustowości odcinka.

Jedną z najbardziej znanych funkcji oporu jest funkcja BPR. Funkcja ta ma najprostszą postać ze wszystkich analizowanych funkcji:

$$t_{cur} = t_0 \cdot (1 + a \cdot sat^b) \quad (4)$$

gdzie:

$$sat = \frac{Q}{c \cdot Q_{max}} \quad (5)$$

$Q$  - natężenie ruchu [poj/h]

$t_{cur}$  - czas przejazdu odcinka obciążonego natężeniem ruchu  $Q$

$t_0$  - czas przejazdu odcinka przy sobodnych warunkach ruchu

$Q_{max}$  - przepustowość [poj/h]

$a, b, c$  - parametry

Jedną z zalet makroskopowych modeli ruchu jest stosunkowo łatwe do wykonania powiązanie obliczeń z iteracyjnymi procedurami rozkładania ruchu na modelach sieci drogowych. Obliczane średnie prędkości pojazdów w modelach makroskopowych w przypadku występowania natężeń ruchu mniejszych od przepustowości mają stosunkowo

zadowalającą zgodność z danymi pomiarowymi. Jednak w przypadku natężeń ruchu bliskich przepustowości uzyskiwane wyniki znacznie odbiegają od wartości rzeczywistych (pomierzonych). Kształt krzywych powoduje, że w czasie iteracyjnej procedury rozkładania ruchu na sieci nie stanowią one blokady przed przejazdem większej liczby pojazdów niż wynosi ich przepustowość. Dodatkowo makroskopowe modele ruchu nie uwzględniają oddziaływania na siebie sąsiednich odcinków sieci np. występowania tzw. „wąskich gardeł” i ich wpływu na warunki na ruchu w ich otoczeniu. Wymienione wady są dużymi utrudnieniami w modelowaniu ruchu, w których wykorzystuje się makroskopowe modele ruchu. Wady makroskopowych modeli ruchu, były dostrzegane także wcześniej, jednak z uwagi na występujące mniejsze obciążenia sieci drogowej ruchem problem ten nie miał aż takiego znaczenia jak to jest obecnie.

Opisane powyżej problemy nie występują w przypadku stosowania mikroskopowych modeli ruchu, przy pomocy których uwzględnia się zachowanie każdego indywidualnego pojazdu (kierowcy). Jednymi z pierwszych i najpowszechniejszej stosowanych modeli są deterministyczne modele jazdy za liderem. Zapisywane są one w postaci równań różniczkowych. Modele te zakładają, że kierowcy reagują na zmiany sposobu jazdy pojazdu lub pojazdów poprzedzających. Jednym z przykładów udoskonalonych modeli jazdy za liderem jest mikroskopowy model inteligentnego kierowcy (The Microscopic Intelligent-Driver Model) [18], [12] w którym przyspieszenie jest wynikiem funkcji prędkości  $v_\alpha$ , luki pomiędzy pojazdami  $S_\alpha$  oraz różnicy prędkości  $\Delta v_\alpha$  pojazdu  $\alpha$  do prowadzącego pojazdu.

$$\dot{v}_\alpha = a^\alpha \left[ 1 - \left( \frac{v_\alpha}{v_0^{(\alpha)}} \right)^\delta - \left( \frac{s_\alpha^*(v_\alpha, \Delta v_\alpha)}{s_\alpha} \right)^2 \right] \quad (11)$$

Powyższy wzór jest złożeniem przyspieszenia  $a^{(\alpha)} \left[ 1 - (v_\alpha/v_0^{(\alpha)})^2 \right]$  na nieobciążone ruchem drodze oraz opóźnienia (hamowania)  $-a^{(\alpha)} \left[ s_\alpha^*(v_\alpha, \Delta v_\alpha)/s_\alpha \right]^2$ , które opisują wzajemne interakcje między pojazdami. Opóźnienie (hamowanie) zależy od stosunku „pożądanego (komfortowego) odstępu”  $s_\alpha^*$ , a odstępem w danym momencie  $s_\alpha$ . Pożyczany (komfortowy) odstęp liczony jest wg wzoru:

$$s_\alpha^*(v, \Delta v) = s_0^{(\alpha)} + s_1^{(\alpha)} \sqrt{\frac{v}{v_0^{(\alpha)}}} + T_\alpha v + \frac{v \Delta v}{2 \sqrt{a^{(\alpha)} b^{(\alpha)}}} \quad (12)$$

gdzie:

- $v_0$  –pożądaną prędkość [km/h]
- $T$  – bezpieczny czas odstępu między pojazdami [s]
- $a$  – maksymalne przyspieszenie pojazdu [ $m/s^2$ ]
- $b$  – komfortowe opóźnienie (hamowanie) [ $m/s^2$ ]
- $\delta$  - wykładnik przyspieszenia,
- $s_0$  - minimalna luka między pojazdami [m]
- $s_1$  – odległości do „korka drogowego” [m]

Zaletą stosowania mikroskopowych modeli ruchu jest dokładność uzyskiwanych wyników. Jednak stosowanie mikroskopowych modeli ruchu wiąże się z pewnymi ograniczeniami powodowanymi przez trudność ich powiązania z procedurami wyboru ścieżek przejazdów pomiędzy źródłami i celami podróży. W przypadku stosunkowo małych sieci można np. zastosować procedurę jak Dynamic Assignment w programie Vissim [20]. Jednak stosowanie mikroskopowych modeli ruchu w przypadku prognozowania ruchu dla dużych sieci np. miast, aglomeracji oraz modeli dla dróg na obszarze całego kraju jest dotychczas praktycznie niemożliwe do wykonania.

### 3. Programy do wykonywania mikro-symulacyjnych modeli ruchu

Do opracowywania mikro-symulacyjnych modeli ruchu stosuje się współczesne programy komputerowe. Mikroskopowe modele ruchu pełnią rolę rdzeni takich programów i nazywane są symulatorami ruchu. Mikro-symulacyjne modele ruchu dają możliwość ciągłej wizualizacji wyników obliczeń. Do najpowszechniej stosowanych programów (między innymi do testowania programów sterowania ruchem oraz projektów organizacji ruchu) należą: Aimsun, Cube Dynasim, Paramics, S-Paramicsm, Vissim. Każdy z wymienionych wyżej programów ma swoich zwolenników i dość trudno jest wskazać, który z nich najlepiej odwzorowuje rzeczywisty ruch [19], [17]. Z uwagi na to, że autor od lat ma możliwość wykorzystywania programu Vissim, ten właśnie program został opisany w poniższym referacie.

W programie Vissim do mikro-symulacji ruchu wykorzystywany jest mikroskopowy model ruchu jazdy dwóch pojazdów<sup>10</sup> w którym zawarta jest logika zmiany pasa ruchu [20]. Może on wykonywać obliczenia (położenia pojazdów, ich prędkości, przyspieszenia/opóźnienia) w sekwencjach do 1/10s. Model jazdy dwóch pojazdów, stosowany w programie Vissim, jest modelem opracowanym przez Wiesmanna [20]. Jest to model złożony, uwzględniający psycho-fizyczne zachowania kierowców.

---

<sup>10</sup> *ang. the car following model*, tłumaczenie według **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.**], spotykane inne tłumaczenie: model jazdy za liderem



Podstawą tego modelu jest model zachowania kierującego pojazdem, który dostrzegając według indywidualnego poziomu percepcji wolniejszy pojazd rozpoczyna zwalnianie. W sytuacji, kiedy nie potrafi dokładnie określić prędkości poprzedzającego go pojazdu, jego własna prędkość jest utrzymywana na poziomie niższym, do momentu kiedy ponownie rozpocznie przyspieszenie w wyniku osiągnięcia innego poziomu percepcji. W wyniku tego następuje iteracyjny proces zwalniania i przyspieszania. Stochastyczny rozkład prędkości i poziomów percepcji składa się na charakterystykę zachowania indywidualnego kierowcy. Parametry modelu były kalibrowane na podstawie wyniku pomiarów wykonywanych przez zespół badawczy Technicznego Uniwersytetu w Karlsruhe w Niemczech. Okresowo wykonywane są dodatkowe badania ruchu, których celem jest uaktualnienie parametrów modelu zachowań kierowców stosowanego w programie. W programie Vissim, mikro-symulacja ruchu odbywa się poprzez przemieszczanie pojazdów w sieci drogowej, gdzie każdy pojazd ma przypisany indywidualny charakter zachowania na drodze, który koresponduje z technicznymi możliwościami każdego pojazdu.

Spotykane są również mikro-symulacyjne modele ruchu, które wykorzystują komórkowe modele ruchu. W modelach tych droga opisywana jest w postaci łańcucha komórek, które mogą tylko przyjąć dwa stany: wolny lub zajęty. W każdym kroku pojazd może zostać przesunięty lub zostać w miejscu. Przesunięcie następuje wtedy, gdy docelowa komórka jest pusta. Przy wprowadzeniu odpowiednich wartości brzegowych w modelach komórkowych można zdefiniować organizację ruchu, przyspieszenie pojazdów, prędkość maksymalną oraz poziom bezpieczeństwa. W ostatnich latach wykonywane są próby wykorzystywania tych modeli w systemach zarządzania ruchem. Przykład koncepcji inteligentnego systemu zarządzania ruchem drogowym, w której założono wykorzystywanie modeli komórkowych przedstawiono w pracy [26]. Duży zasób informacji na temat modeli komórkowych zawiera referat [6].

#### **4. Programy do wykonywania symulacyjnych makroskopowych modeli ruchu**

Symulacyjne makroskopowe modele ruchu, podobnie jak symulacyjne mikroskopowe modele ruchu mogą być wykorzystywane w algorytmach sterowania na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną. Przykładem makroskopowego symulacyjnego modelu ruchu jest model TRANSYT [9]. Niemniej jednak z uwagi na to, że w modelu TRANSYT oprócz modelu makroskopowego wykorzystywana jest również procedura szacowania strat czasu na skrzyżowaniach można go zaliczyć do modeli z grupy mezoskopowych [13]. Program ten

wykorzystywany jest do analizowania i optymalizowania koordynacji skrzyżowań z sygnalizacją świetlną.

## 5. Programy do wykonywania sieciowego modelowanie ruchu

Sieciowe modelowanie ruchu<sup>11</sup> (nazywane dalej modelowaniem ruchu) można wykonywać w programach komputerowych (nazywanych w dalszej części programami do modelowania ruchu), w których wykorzystywane są makroskopowe modele ruchu. W programach tych do określenia ogólnych charakterystyk ruchu wykorzystywane są opisane w punkcie powyżej krzywe zależności czasu przejazdu od natężenia ruchu.

Modelowanie ruchu, z uwagi na wykorzystywanie makroskopowych modeli ruchu, nie daje tak dokładnych wyników jak mikro-symulacje ruchu [9]. Jednak mimo krytyki pod jego adresem, czego wyrazem może być praca [18], jest niezastąpionym narzędziem, które jest powszechnie wykorzystywanym w planowaniu systemów transportowych. Pomimo aktualnie wysokiego poziomu wiedzy oraz dużych możliwości obliczeniowych komputerów, nie da się zastąpić modelowania ruchu w planowaniu systemów transportu mikro-symulacyjnymi modelami ruchu. Poważnym ograniczeniem stosowania symulacyjnych modeli ruchu jest problem z ich powiązaniem z procedurami wyboru optymalnych ścieżek przejazdów pomiędzy rejonami komunikacyjnymi. Obecny stan techniki komputerowej umożliwia wykonywanie takich powiązań jedynie dla stosunkowo małych obszarów [8].

Do najbardziej zaawansowanych technicznie programów do modelowania ruchu można zaliczyć następujące programy: Cube, Emme/2, Emme/3, Imsun Planer, Saturn12, TransModeler, Visum13, Voyager. Podobnie jak w przypadku programów do mikro-symulacji ruchu, tak i w tym przypadku trudno jest wskazać zdecydowanego lidera [21]. Z uwagi na to, że autor dobrze zna i posługuje się programem Visum, program ten został pokrótce opisany w niniejszym referacie.

Innowacyjnym elementem programu Visum jest funkcja Bloking-Back Model [22], która okazała się bardzo przydatna w metodyce modelowania ruchu z uwzględnieniem LOP zaproponowanej przez autora niniejszej rozprawy.

---

<sup>11</sup>ang.: static traffic assignment models

<sup>12</sup> Program Saturn umożliwia wykonanie symulacji ruchu na fragmentach sieci drogowej i uwzględnienie jej wyników w procesie rozkładania ruchu na sieci, przez co umożliwia analizowanie ruchu w skali mezoskopowej. Niemniej jednak program ten jest uznawany za „przestrzały” i nie jest powszechnie stosowany w Polsce.

<sup>13</sup> Zastosowanie funkcji Blocking-BackModel w programie Visum, podobnie jak w przypadku programu Saturn umożliwia analizowanie ruchu w skali mezoskopowej.

Funkcja Blocking-Back Model umożliwia fizyczne ograniczenie „nadwyżki” natężenia ruchu (różnicy między popytem na skorzystanie z infrastruktury drogowej, a podażą wynikającą z przepustowości sieci) w analizowanym okresie czasu na poszczególnych odcinkach sieci drogowej. Nadwyżka ruchu rozumiana jest w tym przypadku, jako różnica pomiędzy natężeniem ruchu i przepustowością odcinka. Procedury obliczeniowe funkcji Blocking-Back Model w pierwszej fazie identyfikują odcinki, na których dochodzi do przekroczenia przepustowości. Po identyfikacji takich odcinków uruchamiana jest procedura ograniczenia natężenia ruchu dopływającego (oraz odpływającego) do zidentyfikowanych odcinków. Równocześnie wykonywana jest procedura liczenia długości kolejek pojazdów na tych odcinkach. W przypadku, gdy obliczone kolejki pojazdów są dłuższe niż odcinki, na których dochodzi do formowania się kolejek, sprawdzany jest zasięg kolejki pojazdów na odcinkach położonych w górę strumienia ruchu i na tych odcinkach również następuje pomniejszenie natężenia ruchu w stosunku do wartości początkowych.

## **6. Podsumowanie**

Na rynku dostępnych jest wiele programów służących do modelowania i symulacji ruchu. Niemniej jednak bardzo trudno jest wskazać programy, które są najlepsze. Przegląd stosowania oprogramowania w innych krajach umożliwia stwierdzenie, że występuje analogia do mody. W jednych krajach jedne programy są modne, podczas gdy w innych krajach zupełnie inne.

W Polsce najpopularniejszym programem do modelowania i prognozowania ruchu jest program Visum firmy PTV. Obecnie programem tym posługują się jednostki miejskie między innymi w Warszawie, Krakowie, Wrocławiu, Poznaniu, Gdańsku, Kielcach, Katowicach, Tychach oraz firmy konsultingowe i projektowe. Na popularność tego programu ma wpływ to, że jest on stosowany w procesie edukacji studentów na większości krajowych wyższych uczelni technicznych.

Jeżeli chodzi o programy do symulacji ruchu najbardziej popularnym programem jest Vissim również firmy PTV. Program oprócz jednostek miejskich, firm projektowych i konsultingowych używany jest również powszechnie również przez producentów sterowników sygnalizacji świetlnej.

Najważniejszą przesłanką jaka powinna służyć wyborowi odpowiedniego programu jest nie tylko wykaz zaawansowanych funkcji i możliwości technicznych poszczególnych

programów, ale przede wszystkim możliwość pozyskania pracowników do pracy na tych programach oraz dostępność szkoleń.

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] Amin, M. A Study of Freeway Lane Use. Masters Thesis, Civil and Environmental Engineering Department, San Diego State University, San Diego, CA.
- [2] Ban X., Chu L., Benouar H. Bottleneck Identification and Calibration for Corridor Management Planning. Journal of the Transportation Research Board, No 1999 Traffic Flow Theory 2007.
- [3] Bang K., Moran C. Area wide analysis of urban road traffic congestion Analysis of travel time based measures. in 5th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service. 2006. Yokohama, Japan Japan Society of Traffic Engineers (JSTE).
- [4] Branston D. Link Capacity Functions A Review. Trans. Res. 10, 1976.
- [5] Chen C., Skabardonis A., Varaiya P. Systematic Identification of Freeway Bottlenecks. Transportation Research Board 83<sup>rd</sup> Annual Meeting. Washington DC, January 2004.
- [6] Dworak A, Miracki M. Modele komórkowe ruchu drogowego. Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, AGH. Kraków, 2005. <http://fatcat.ftj.agh.edu.pl/»mat/ksn/>
- [7] Fratar T. Forecasting Distribution of Interzonal Vehicular Trips by Successive Approximations. Traffic and Operations, 1954, pp. 376-384.
- [8] Friedrich M. i inni. A Dynamic Traffic Assignment Method for Planning and Telematic Applications, Proceedings of Seminar K, European Transport Conference, Cambridge, 2000.
- [9] Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M. Inżynieria ruchu drogowego. Teoria i praktyka. WKiŁ, Warszawa, 2008.
- [10] Geroliminis N. A Macroscopic Fundamental Diagram of Urban Traffic Recent Findings. The “Symposium on the Fundamental Diagram 75 years”, Woods Hole, Massachusetts, 8-10 July 2008.
- [11] Herman R., Prigogine I. A two-fluid approach to town traffic. Science 204, 148–151, 1979.
- [12] Highway Capacity Manual 2000. Transportation Research Board, National Research Council Washington, D.C, 2000.

- [13] Introducing spatial elements to the TRANSYT traffic model. *Advances in Transportation Studies an international Journal Section B* 17, 2009.
- [14] Krych A. Badania i modelowanie ruchu w aglomeracjach, zarys historyczny, stan i kierunki rozwoju. III Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia komunikacyjnego. Materiały konferencji, Poznań, 2001.
- [15] McNally M. The Four Step Model. Paper UCI-ITS-AS-WP-00-5. Institute of Transportation Studies. University of California, Irvine. 2000.
- [16] Metropolitan Travel Forecasting Current Practice and Future Direction, Special Report 288, Committee for Determination of the State of the Practice in Metropolitan Area Travel Forecasting. Transportation Research Board, Washington, D.C., 2007.
- [17] Milam R. Corsim, Paramics and Vissim What the Manuals Never Told You. ITE Annual Meeting. Philadelphia 2002.
- [18] Oskarbski J. Wpływ struktury sieci ulicznej na sprawność i efektywność funkcjonowania transportu indywidualnego w miastach. Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, 2005.
- [19] Parker M. Zooming in on Traffic Microsimulation. *Traffic Technology International*. Dec 2001/Jan 2002.
- [20] PTV Vision. Vissim 5.0 User Manual. PTV Planung Transport Verkehr AG, 2007.
- [21] PTV Vision. Visum 10.0 User Manual – Volume 1. PTV Planung Transport Verkehr AG, 2007.
- [22] PTV Vision. Visum 10.0 User Manual – Volume 2. PTV Planung Transport Verkehr AG, 2007.
- [23] Recker, W. A Bridge between Travel Demand Modeling and Activity-based Travel Analysis. *Transportation Research , Part B: Methodological*, 35, 481-506. 2001.
- [24] Smeed, R. Road Capacity of City Centers. *Traffic Engineering and Control*, Vol. 8, No. 7, 455-458, 1966.
- [25] Smeed, R. Traffic Studies and Urban Congestion. *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 2, No. 1, 1968.

- [26] Stanek M. Inteligentne systemy w zarządzaniu ruchem drogowym. Praca dyplomowa magisterska. Wydział informatyki i Zarządzania, Politechnika Wrocławska. Wrocław, 2006.
- [27] Thomson J. Speeds and Flows of Traffic in Central London 2. Speed-Flow Relations. Traffic Engineering and Control, Vol. 8, No. 12, 721-725, 1967.
- [28] Voorhees A.M. A General Theory of Traffic Movement. Proceedings, Institute of Traffic Engineers, New Haven, Connecticut. 1955
- [29] Voorhees A.M. A General Theory of Traffic Movement. 1956.
- [30] Wardrop, J. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Vol. 1, Part 2, 1952.
- [31] Wardrop J. Journey Speed and Flow in Central Urban Areas. Traffic Engineering and Control, Vol. 9, No. 11, 528-532, 1968.
- [32] Weiner E. Urban Transportation Planning in the United States: An Historical Overview (fifth edition). Report DOT-T-97-24. US Department of Transportation, Washington, DC, 1997.
- [33] Zwerts E. Activity-Based Modelling: An Overview (and Some Things we Have Been Doing to Advance State-of-the-Art). Transportation Research Institute, Limburgs Universitair Centrum, Diepenbeek, Belgium