

**Politechnika Krakowska  
Wydział Inżynierii Lądowej  
Instytut Inżynierii Drogowej i Kolejowej  
Zakład Systemów Komunikacyjnych**



**Cracow University  
of Technology**



Department of Transportation  
Systems

Praca doktorska

**„Modelowanie zjawiska zmiany trasy przejazdu w  
sytuacjach niespodziewanych”**

("Rerouting phenomena modelling for unexpected events in Dynamic  
Traffic Assignment")

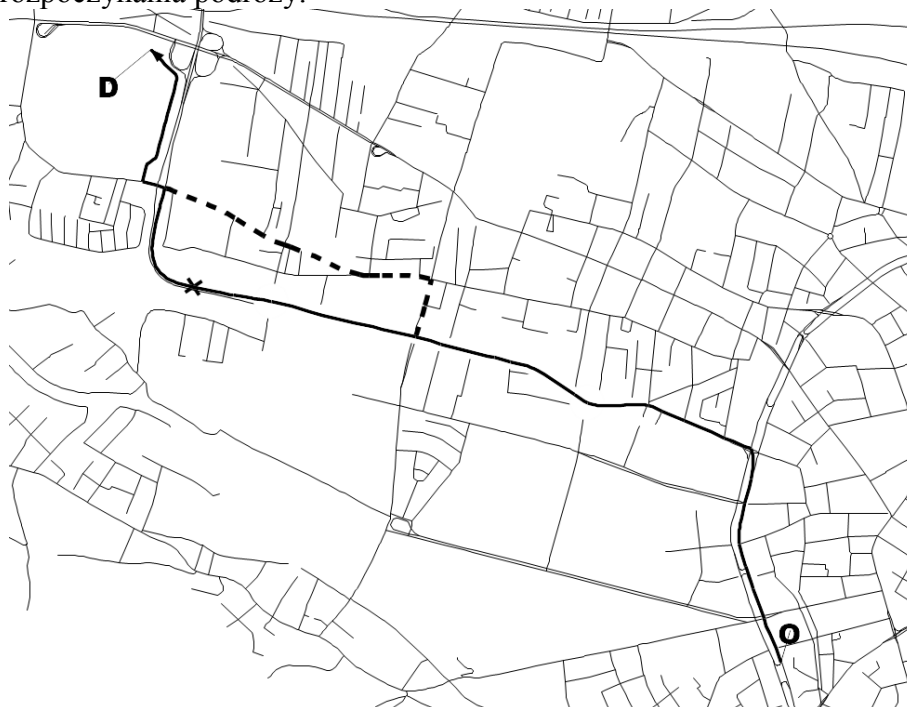
Autor: mgr inż. Rafał Kucharski  
Promotor: dr hab. inż. Andrzej Szarata, prof. PK

Kraków | 2015



Jednak w zatłoczonych miejskich sieciach drogowych, stan równowagi często zostaje zaburzony. Codziennie są zdarzenia drogowe, przez które podróże nie mogą być realizowane tak jak były zaplanowane. Jeśli na planowanej trasie przejazdu zdarzy się coś nieoczekiwanego, opóźni to czas dotarcia do celu i zwiększy koszty podróży. Może to być wypadek samochodowy, roboty drogowe, nowy plan sygnalizacji, demonstracja, czy wydarzenie sportowe. Jeśli jest ono nieoczekiwane, to burzy plany podróży.

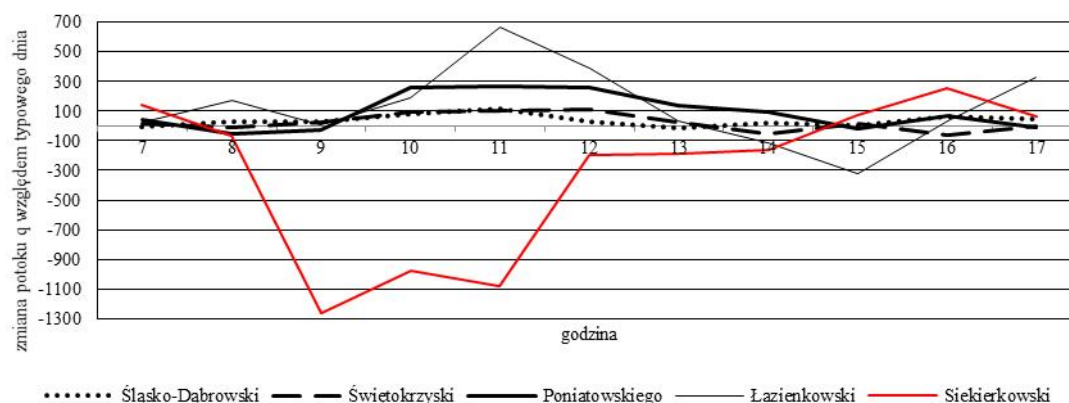
Użytkownicy w sieci transportowej zachowują się racjonalnie: minimalizują koszty i maksymalizują oczekiwaną użyteczność podróży (Bernoulli, 1783). Racjonalne decyzje są podejmowane nie tylko co do planowania trasy, ale również przy jej adaptacji. Użytkownik w trakcie podróży może zrewidować swoje postanowienia i podjąć lepsze decyzje. Tak może się stać gdy otrzyma informacje o niespodziewanym zdarzeniu, które wydłuży jego podróż. W momencie otrzymania informacji ponowi on proces planowania (wyboru trasy) i, być może, zmieni trasę na taką, która pozwoli uniknąć negatywnych konsekwencji. Sytuacja taka przedstawiona jest na rys. 2, gdzie użytkownik zmienia pierwotnie wybraną trasę, aby uniknąć negatywnych konsekwencji zdarzenia drogowego, o którym nie wiedział w momencie rozpoczynania podróży.



Rysunek 2 Typowa ścieżka (pogrubiona) łącząca źródło *O* i cel *D* podróży na której miało miejsce zdarzenie nieoczekiwane *X*. Użytkownik po otrzymaniu informacji o zdarzeniu nieoczekiwanym zmienia trasę na inną (linia przerywana), by uniknąć dodatkowych kosztów dotarcia do celu.

Analiza danych z ekranu Wisły w Warszawie potwierdza hipotezę o tym, że użytkownicy zmieniają ścieżki by uniknąć konsekwencji zdarzeń drogowych. Gdy Most Siekierski (jeden z ważniejszych) został zablokowany przez wypadek samochodowy, użytkownicy zaczęli używać alternatywnych mostów. Stacje ciągłego pomiaru ruchu zarejestrowały wówczas zwiększony potok pojazdów na moście Łazienkowskim, Poniatowskiego i Świętokrzyskim. Pojawili się tam użytkownicy, którzy zazwyczaj przekraczają Wisłę mostem Siekierskim, dotyczyło to około 20% z nich. Wyniki tych obserwacji przedstawiono na rys. 3, gdzie pokazano wpływ zdarzenia nieoczekiwanego na zmianę typowych potoków pojazdów. Przez most Łazienkowski w dwie godziny po zdarzeniu przejechało o 700 pojazdów na godzinę więcej niż zazwyczaj. To duży wzrost, który znacząco zmienia stan sieci.

Obserwacje te potwierdzają tezę, że użytkownicy reagują na zdarzenia nieoczekiwane i zmieniają trasę. W następstwie zdarzenia nieoczekiwanego można się więc spodziewać nie tylko korków bezpośrednio związanych ze zdarzeniem, ale również innego schematu przepływu pojazdów przez sieć. Gdy faktyczny stan sieci (czasy i koszty przejazdu) znacząco odbiega od typowego, użytkownik może zareagować zmieniając ścieżkę na bardziej atrakcyjną (o mniejszym koszcie dotarcia do celu). Reprezentacja tego zjawiska jest szczególnie skomplikowana, gdy informacja dociera do użytkownika już po rozpoczęciu podróży. W języku angielskim problem nazywany jest *rerouting*, przez co rozumie się zmianę pierwotnie wybranej przez użytkownika ścieżki po otrzymaniu informacji o zdarzeniu. Zjawisko to jest kluczowe dla opisu stanu sieci w następstwie zdarzenia drogowego.



Rysunek 3 Zmiana przepływu pojazdów przez mosty w Warszawie w sytuacji, gdy Most Siekierski był zamknięty

Stan sieci rozumiany jako opis przepływu pojazdów i kosztów związanych z tym przepływem, np. czasy przejazdu (zob. Rysunek 1), coraz powszechniej ujmowany jest dynamicznie, gdzie przepływ pojazdów i koszt są wyrażone jako zmienne czasu. Narzędziem opisującym stan sieci jest dynamiczny model ruchu pokazujący aktualne i prognozowane przepływy potoków w sieci. Zjawiska zachodzące w miejskiej sieci transportowej mają dynamiczną naturę: zarówno potoki pojazdów, jak i warunki ruchu zmieniają się w czasie (np. w ciągu doby). Właśnie dlatego metody dynamicznego rozkładu ruchu (Dynamic Traffic Assignment - DTA) zyskują popularność i coraz częściej są stosowane do modelowania przemieszczeń w miastach. Sposobem rozwiązania problemu pracy będzie stworzenie dynamicznego modelu ruchu uwzględniającego zdarzenia nieoczekiwane. Jednak, jak pokazano w opisie aktualnego stanu wiedzy, dostępne metody modelowania ruchu nie są w stanie uchwycić zjawiska *rerouting* i dostarczyć realistycznej reprezentacji stanu sieci w następstwie zdarzeń nieoczekiwanych.

Zarządzający systemem transportowym, ma obecnie całą paletę środków z których może korzystać, by regulować przepływ pojazdów przez sieć. Są to: informacje przekazywane do użytkowników (np. przez internet, radio); znaki zmiennej treści: ograniczające prędkość, zamykające pasy, informujące o stanie sieci; zmiana planów sygnalizacji (optymalizująca przepływ pojazdów wzdłuż arterii) itp. Aby efekt zarządzania był pozytywny, środki te muszą być dopasowane do aktualnego stanu sieci, czyli do faktycznego przepływu pojazdów przez sieć. Wobec tego pojawia się potrzeba określenia stanu sieci nie tylko dla stanu równowagi, ale również sytuacji nietypowych i ich następstw.

Znaczenie tego problemu jest o tyle istotne, że zdarzenia nieoczekiwane występują powszechnie w miejskich sieciach drogowych i, paradoksalnie, to co uznawane jest za typowy stan miejskiej sieci transportowej, występuje niezwykle rzadko. Według danych z Systemu Ewidencji Wypadków i Kolizji w Krakowie w 2012 roku miało miejsce prawie 9000 zdarzeń, co daje średnio około 30 zdarzeń na typowy dzień roboczy. Każde z tych zdarzeń

wpływa na stan sieci. W związku z tym koniecznością wydaje się możliwość opisu stanu sieci w sytuacji nietypowej.

### 9.3. Cel i tezy pracy

W sytuacjach nietypowych (np. wypadków, zatorów, czy demonstracji) istotna część użytkowników sieci wybierze inną trasę niż zazwyczaj, zmieniając obciążenie sieci. Celem tej pracy jest określenie jaki będzie stan sieci drogowej gdy część użytkowników, świadoma zdarzenia nieoczekiwanego, zmieni pierwotnie wybraną trasę. Realizacją celu pracy jest stworzenie metody pozwalającej na określenie stanu sieci (w sensie ustalenia przepływu potoków ruchu przez sieć w czasie) dla zadanego zdarzenia nieoczekiwanego, np. wypadku drogowego. Zaproponowana metoda powinna być zgodna z charakterystyką zjawiska obserwowaną w rzeczywistości, oraz powinna umożliwiać łatwą weryfikację na podstawie dostępnych pomiarów.

W pracy przyjęte zostały następujące tezy badawcze:

1. Teza naukowa: Użytkownicy miejskiej sieci drogowej reagują na informacje o zdarzeniach wpływających na ich drogę do celu i mogą zmieniać ścieżkę w trakcie podróży. Możliwy i pożądany jest opis tego zjawiska i jego wpływu na stan sieci.
2. Teza praktyczna: Model popytu w dynamicznym modelu ruchu może być rozszerzony tak, by uwzględniał reakcję użytkowników na zdarzenia nieoczekiwane. Modyfikacja taka może zostać wprowadzona bez znacznego zwiększenia czasu obliczeń modelu.

### 9.4. Zakres pracy

Praca niniejsza rozpoczyna się od opisu problemu i jego znaczenia praktycznego. Po ogólnym zdefiniowaniu dynamicznych zjawisk zachodzących w sieci transportowej wprowadzone zostaje pojęcie stanu sieci i opis wpływu zdarzenia nieoczekiwanego na stan sieci.

W przeglądzie literatury pokazano tło badawcze problemu. Opisano stan badań i metod dynamicznego rozkładu ruchu na sieć. W szczególności skupiono się na sposobie modelowania zachowania użytkowników w sieci transportowej, głównie wyboru ścieżki. Pokazano dostępne metody wyboru ścieżki i powszechnie przyjmowane założenia. Dokonano przeglądu dotychczasowych badań i propozycji rozwiązania problemu zmiany trasy przejazdu, co pozwoliło na identyfikację luki badawczej: brak dynamicznego modelu rozkładu ruchu określającego stan sieci w następstwie zdarzenia nieoczekiwanego. Lub, równoważnie, brak narzędzi opisujących stan sieci niebędącej w stanie równowagi. Na tej podstawie zdefiniowano problem w kontekście dynamicznego modelowania ruchu.

Proponowane rozwiązania rozszerzają metody dynamicznego rozkładu ruchu na sieć, co wymaga obszernego wprowadzenia formalnego. W rozdziale teoretycznym przedstawiono podstawowe definicje i algorytmy, omówiono sposób rozwiązania problemu dynamicznego rozkładu ruchu na sieć. Nacisk położono na opis modelu popytu, szczególnie modele wyboru trasy i dynamicznej propagacji ruchu przez sieć. Dla lepszego zrozumienia proponowanych metod wprowadzono i zdefiniowano formalnie hybrydowy model wyboru trasy, który pozwala na zmianę percepcji kosztów w trakcie podróży (np. po otrzymaniu informacji o zdarzeniu). Dzięki temu możliwe było formalne zdefiniowanie obydwu proponowanych rozwiązań.

W pierwszej kolejności opisano metodę przyswajania informacji (Information Comply Model - ICM), która jest bardziej intuicyjna i pozwala na uchwycenie istoty zjawiska. Po opisie założeń i ogólnej idei przedstawiono części składowe: model uświadamiania i model reakcji. Formalnie zdefiniowano model uświadamiania, z procesami rozprzestrzeniania się informacji z różnych źródeł, oraz model decyzji o zmianie trasy, z definicją użyteczności



zmiany trasy i sformułowaniem dwumianowego modelu logitowego. Po zdefiniowaniu dwóch modeli składowych wprowadzone zostaje rozszerzenie modelu propagacji potoków w którym łańcuch Markova modeluje procesy uświadamiania i zmiany trasy przez użytkowników. Metodę finalizuje przedstawienie sposobu integracji jej z dynamicznym modelem ruchu. Działanie metody ilustrują przykłady obliczeniowe, w których pokazano szczegółowy opis działania z uwzględnieniem różnych źródeł informacji, sposobu informowania, wrażliwości, itp.

Metoda przesuwającego się horyzontu jest definiowana w pierwszym w zastosowaniu ogólnym (głównie w procesach planowania), a następnie w zastosowaniu w modelowaniu ruchu. Pokazano jak problem DTA można rozwiązać metodą przesuwającego się horyzontu, z użyciem hybrydowego modelu wyboru trasy zdefiniowanego we wprowadzeniu formalnym, oraz poprzez zapamiętanie stanu sieci w momencie przesunięcia się horyzontu. Na tej podstawie przedstawiono podstawowy algorytm metody RH-DTA i pokazano jak stosować go do określania stanu sieci. Kolejne przykłady pokazały możliwości zastosowania podstawowego algorytmu w coraz bardziej złożonych sytuacjach: jedno zdarzenie, spóźniona informacja o zdarzeniu, informacja dostępna tylko dla części użytkowników, różne grupy użytkowników, wiele zdarzeń, aż do pełnego algorytmu nadającego się do zastosowań w systemach czasu rzeczywistego.

W ostatniej części pracy przedstawiono metody kalibracji i weryfikacji zaproponowanych modeli. Zidentyfikowano dwa źródła obserwacji, użyteczne dla potrzeb kalibracji: potoki i ścieżki. Zaproponowano analizę formalną kolejno: ścieżek, a następnie potoków, która pozwala w sposób ilościowy opisać zjawisko zmiany trasy w czasie i przestrzeni. Na tej podstawie sformułowano problem estymacji metody ICM aby uzyskać zgodność wyników modelu z zaobserwowanym zjawiskiem. W przeprowadzonej analizie potoków ruchu mierzonych w stanie równowagi i zmierzonych w sytuacji zamknięcia jednego z mostów w Warszawie potwierdzono hipotezy użyte przy formułowaniu problemu.

Pracę kończy podsumowanie, wnioski płynące z przeprowadzonych analiz i kierunki dalszych badań.

## **9.5. Aktualny stan wiedzy i luka badawcza**

Niedawne postępy algorytmiczne i sprzętowe pozwalają stosować Dynamiczne Modele Ruchu (DTA) w problemach rzeczywistych – dla sieci dużych metropolii (np. takich jak Kraków). Dzięki znacznemu zmniejszeniu czasu obliczeń (Gentile, 2010) zwiększyły się możliwości zastosowania dynamicznych modeli ruchu. Poza klasycznym zastosowaniem do celów analitycznych (np. symulacja i testowanie proponowanych wariantów) pojawiła się możliwość zastosowania operacyjnego (np. w centrach zarządzania ruchem działających w czasie rzeczywistym) (Meschini i Gentile, 2010). Jednak użycie dostępnych modeli dynamicznych do działania operacyjnego w czasie rzeczywistym wiąże się z szeregiem problemów (związanych np. ze zbieraniem i wykorzystaniem danych rzeczywistych, ograniczonym czasem obliczeń, przekazywaniem informacji użytkownikom, uwzględnieniem zjawisk losowych, itd.). Niniejsza praca dotyczy jednego z nich: rozszerzenia modelu popytu tak, by reprezentował nie tylko typowy dzień, ale również sytuacje nietypowe, w szczególności nieoczekiwane zdarzenia i ich konsekwencje.

Nieoczekiwane zdarzenie jest tu definiowane szeroko, jako jakiegokolwiek zdarzenie wpływające na przepływ pojazdów w sieci. Może to być np. wypadek, zwężenie, zamknięcie, przebudowa, demonstracja, impreza sportowa, itd. Precyzyjną definicję zdarzeń nieoczekiwanych podaje (Dobler, 2013). Nieoczekiwane zdarzenia wpływają zarówno na podaż jak i na popyt w sieci transportowej, przestaje ona być w stanie równowagi. Po stronie podaży (sieć transportowa) pojawiają się dodatkowe utrudnienia. Pojawiają się one nie tylko w miejscu nieoczekiwanego zdarzenia, ale również w pozostałych częściach sieci: przed

miejszem zdarzenia (w formie kolejek rosnących w przeciwną stronę niż kierunek ruchu) oraz za nim (w formie zmniejszonych potoków wypływających z miejsca zdarzenia) i, co istotne, zmieniają się one w czasie (utrudnienia zaczynają się w momencie zdarzenia i zazwyczaj rosną w czasie). Przy założeniu niezmiennego popytu, zjawiska po stronie podaży można stosunkowo łatwo określić korzystając z modeli przepływu ruchu, co pokazał (Corthout i in., 2009). Znacznie trudniej uchwycić zjawisko po stronie popytu, czyli reakcje na zdarzenia nieoczekiwane (w tym zjawisko rerouting). W literaturze zjawisko *rerouting* nazywane jest również: en-route rerouting (Snowdon i in., 2012), adaptation (Gao i in. 2010), hyperpath (Trozzi i in. 2013). Warto podkreślić, że praca nie dotyczy bliźniaczego problemu zmiany ścieżki przed rozpoczęciem podróży (route-swapping, Watling i Hazelot, 2003).

Dla zobrazowania problemu warto posłużyć się jedną z definicji rozkładu ruchu, w której jest on definiowany jako proces uczenia w ciągu kolejnych dni (ang. day-to-day, Watling i Hazelton, 2003). Taka interpretacja pozwala uchwycić istotę problemów przy modelowaniu zjawiska rerouting. W szczególności pozwala ona unaocznić dwa założenia, które wymagają weryfikacji:

1) użytkownicy korzystają z wyników poprzedniej iteracji, tzn. znają wyniki uprzednio podjętych decyzji i mogą je weryfikować. W ujęciu „z dnia na dzień” iteracje rozumiane są jako kolejne dni, a modyfikacja jest rozumiana jako uczenie się z doświadczeń dnia poprzedniego. Równowaga to stan w którym użytkownicy nauczyli się już sieci i są usatysfakcjonowani swoimi decyzjami na tyle, że ich decyzje na kolejny dzień nie będą się różnić od tych z dnia poprzedniego. Takie założenie nie może być przyjęte dla zdarzeń nieoczekiwanych, gdzie użytkownicy nie mają szansy na przeprowadzenie procesu uczenia się. Zamiast wielu iteracji w których udoskonalane są wybory mamy jedną możliwość podjęcia decyzji przy dużej niewiadomej konsekwencji podejmowanych decyzji.

2) niezmiennosc danych wejściowych. W DTA proces uczenia się oparty jest o założenie, że kolejny dzień będzie identyczny jak dzisiejszy w sensie parametrów sieci i wielkości popytu. Każda kolejna iteracja problemu symulowana jest dla tych samych parametrów sieci i tej samej więzby ruchu. W związku z tym DTA jest odpowiednim narzędziem do określania stanu sieci powtarzalnego i przewidywalnego dnia (np. typowy dzień roboczy, typowy słoneczny piątek, typowy dzień świąteczny) dla którego użytkownicy mieli szansę nauczyć się swoich zachowań (dzień ten powtarza się). Ponadto, nawet jeśli w danym typowym dniu rzeczywiste warunki odbiegają od typowych, zachowanie użytkowników (ścieżki) nie zmienia się dopóki użytkownicy nie otrzymają informacji, że faktyczne warunki ruchu różnią się od typowych. Założenie o niezmienności danych wejściowych również nie może być przyjęte dla sytuacji nietypowych, gdzie nieoczekiwane zdarzenia z definicji wpływają na parametry sieci (np. zmniejszenie przepustowości).

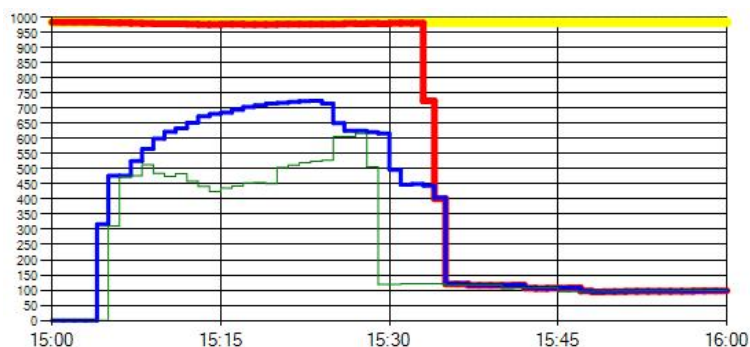
Proponowane rozwiązanie musi uwzględniać powyższe problemy i proponować alternatywne podejście zgodne z charakterystyką zjawiska *rerouting*.

## 9.6. Narzędzia

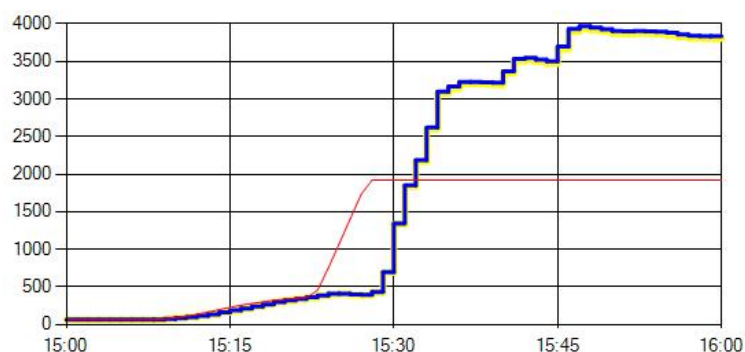
Zaproponowane w pracy doktorskiej metody są rozwinięciem modelu TRE (Traffic Realtime Equilibrium) dynamicznego modelu ruchu działającego w czasie rzeczywistym w dużych aglomeracjach miejskich. Model ten stworzony jest przez prof. Guido Gentile i dra Lorenzo Meschini z uniwersytetu La Sapienza w Rzymie i rozwijany przez firmę SISTeMA, spin-off tego uniwersytetu. Praca zawiera tło teoretyczne zaproponowanych metod. W szczególności rozdział 3.5 przedstawia definicje i algorytmy Dynamicznego Modelu Rozkładu Ruchu (DTA).

Ogólnym celem DTA jest określenie stanu sieci, a więc przepływu potoków ruchu w sieci i warunków ruchu związanych z tym przepływem. DTA rozwiązywane jest metodami rozkładu ruchu na sieć – zazwyczaj wykorzystującego koncepcje równowagi w sieci, tzw.

‘equilibrium’ w którym koszty wszystkich użytkowników są zrównoważone (Wardop, 1952). W ujęciu dynamicznym equilibrium Wardop’a jest rozumiane jako stan w którym żaden z użytkowników nie znajduje lepszej, alternatywnej trasy, ani czasu rozpoczęcia podróży. Stan ten numerycznie osiągnąć jest przez rozwiązanie problemu iteracyjnego, zazwyczaj opisanego w formie problemu punktu stałego (Banach, 1922). W procesie tym wybory użytkowników (ścieżki i czas rozpoczęcia podróży) są modyfikowane na podstawie kosztów uzyskanych w wyniku decyzji podjętych w poprzedniej iteracji. W pracy zastosowano makroskopowe ujęcie DTA zaproponowane przez (Bellei i in., 2005). Problem DTA składa się tam z dwóch części: popyt będący funkcją podaży i podaż będącą funkcją popytu. Część popytowa oblicza ścieżki na podstawie kosztów i czasów przejazdu uzyskanych w modelu podaży (przepływu ruchu). Podczas gdy część podaży określa koszty i czasy przejazdu dla potoków (zagregowanych ścieżek) uzyskanych w modelu popytu. W pracy skorzystano z aktualnej wersji algorytmu zgodnie z definicją z (Gentile i in., 2013). Wykorzystany model popytu oparty jest o sekwencyjny model wyboru ścieżki (Gentile, 2006) będący rozwinięciem probabilistycznego algorytmu (Dial, 1971) ze stochastycznym (logitowym) modelem wyboru ścieżki (Ben-Akiva i Lerman, 1985). Podaż modelowana jest uogólnionym modelem przepływu (opisany w języku polskim w Kucharski, 2013) z pełną aktualną definicją w (Gentile, 2010). Praca skupia się na części popytowej DTA, w szczególności na modelu wyboru ścieżki (Route Choice Model - RCM) i modelu propagacji (Network Flow Propagation - NFP), model przepływu ruchu nie jest przedmiotem badań. Poza podstawowymi definicjami modelu DTA wprowadzono hybrydowy model wyboru ścieżki (Mahmassani i in., 1994) (Pel, 2005), który jest punktem wyjścia do formalnego wprowadzenia obydwu zaproponowanych metod. Przykładowe wyniki dynamicznego modelu ruchu dla pojedynczego odcinka przedstawiają rysunki 4 do 6, gdzie pokazano podstawowe charakterystyki odcinka (potoki, przepustowości, czasy, koszty, zapelnienie i długość kolejki) i ich zmienność w czasie.

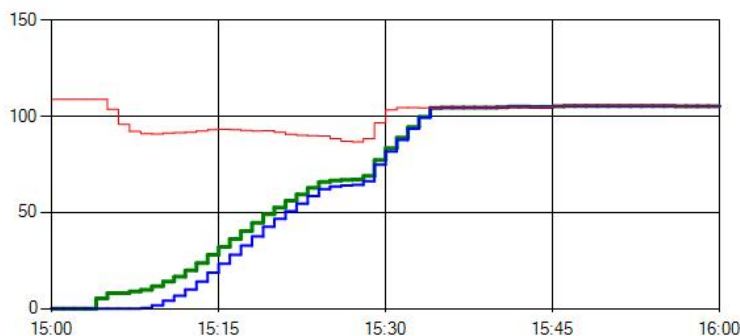


Rysunek 4 Zmienność w czasie potoku pojazdów wjeżdżających (niebieski) i wyjeżdżających (zielony) z danego odcinka w czasie, oraz przepustowość początkowa (czerwony) i końcowa (żółta) tego odcinka [pojazdy].



Rysunek 5 Zmienność czasu (niebieski) i kosztu (czerwony) przejazdu odcinka w czasie [sekundy].





Rysunek 6 Zmienność długości kolejki (niebieski), liczby pojazdów (zielony) i pojemności (czerwony) odcinka w czasie [liczba pojazdów].

## 9.7. Rozwiązania

W pracy tej zaproponowano dwie nowe metody rozwiązania problemu dynamicznego rozkładu ruchu na sieć. Bazują one na klasycznych metodach dynamicznego rozkładu ruchu opisanych powyżej, ale dodatkowo pozwalają uwzględnić zdarzenia nieoczekiwane i modelować ich wpływ na stan sieci. Pozwalają one na określenie stanu sieci w następstwie zdarzenia nieoczekiwanego.

W pierwszej metodzie (Information Comply Model – model przyswajania informacji) skupiono się na procesie decyzyjnym jaki towarzyszy zmianie trasy przejazdu. W szczególności odwzorowano procesy rozprzestrzeniania informacji i podjęcia decyzji o zmianie trasy. Wyszczególniono dwie fazy: uświadamianie i reakcja. Użytkownik uświadamia sobie zdarzenie na podstawie otrzymywanych informacji, a następnie podejmuje decyzje na podstawie szacowanych zysków i strat. W procesie uświadamiania uwzględniono wiele źródeł informacji i związanych z nimi procesów rozprzestrzeniania się (internet, sieci społecznościowe, radio, znaki zmiennej treści, obserwacja), pozwala to w realistyczny sposób odwzorować proces zmiany trasy z uwzględnieniem faktycznego procesu decyzyjnego, gdzie informacja poprzedza reakcję, a reakcja jest efektem racjonalnej decyzji mającej na celu minimalizację kosztów. Proces decyzji o zmianie trasy zamodelowano jako dwumianowy proces wyboru dyskretnego opisany modelem logitowym. Użyteczność zmiany trasy w danym miejscu i w danym czasie opisana jest jako funkcja możliwych zysków i możliwych strat. Na podstawie użyteczności określa się prawdopodobieństwo zmiany trasy w danym punkcie. Aby dwie główne składowe ICM: model uświadamiania i model reakcji mogły być zastosowane w Dynamicznym Modelu Ruchu wprowadzono trzy możliwe stany w których może znaleźć się użytkownik: nieświadomy, uświadomiony i po zmianie trasy. Te trzy stany tworzą łańcuch Markowa, gdzie przejścia pomiędzy stanami opisuje prawdopodobieństwo kolejno: uświadomienia i zmiany trasy. Technicznie odbywa się to poprzez zmodyfikowanie modelu propagacji potoku pojazdów w czasie, który po zmianie propaguje pojazdy z uwzględnieniem ich reakcji na zdarzenia nieoczekiwane. Pozwala to określić stan sieci w następstwie zdarzeń nieoczekiwanych.

Druga metoda (Rolling-Horizon – przesuwający się horyzont) powstała z myślą o systemach czasu rzeczywistego, w szczególności centrach zarządzania ruchem w systemach ITS. W systemach tych kluczowy jest czas reakcji i możliwość stosowania w dowolnej sytuacji drogowej (wiele zdarzeń na raz). Wykorzystano tu metodę przesuwającego się horyzontu i uproszczono opis procesu decyzyjnego. Wynik powstaje w wyniku rozwiązania sekwencji kolejnych problemów dynamicznego rozkładu ruchu na sieć, pomiędzy którymi zapamiętany zostaje chwilowy stan sieci (położenie pojazdów). Pozwala to na spójność i ciągłość wynikowego stanu sieci, umożliwiając przy tym zmianę trasy przejazdu w momencie otrzymania informacji. W odróżnieniu od modelu przyswajania informacji, w metodzie

przesuwającego się horyzontu możliwe jest uwzględnienie wielu zdarzeń nieoczekiwanych i praca w czasie rzeczywistym. Metoda przesuwającego się horyzontu zastosowana w czasie rzeczywistym pozwala na wiarygodne prognozowanie stanu sieci dla dowolnej sytuacji w sieci (wiele zdarzeń pojawiających się w czasie rzeczywistym), co jest kluczowe dla zastosowania w systemach czasu rzeczywistego.

Obydwie metody wdrożono w środowisku dynamicznego modelowania ruchu (Dynamic Traffic Assignment – DTA) w czasie rzeczywistym używanym w praktyce w wielu metropoliach na świecie. Metody rozszerzają algorytm TRE (Traffic Realtime Equilibrium), będący trzonem środowiska Optima, produkowanego przez Uniwersytet La Sapienza w Rzymie, firmę SISTeMA, oraz grupę PTV. Zostały przetestowane zarówno na małych sieciach testowych, jak i na rzeczywistych, dużych sieciach miejskich. Metoda przesuwającego się horyzontu dostępna jest zarówno w pakiecie Optima (do aplikacji w czasie rzeczywistym), jak i w środowisku PTV Visum (do aplikacji w celach strategicznych). Model przyswajania informacji jest dostępny w środowisku PTV Visum, do celów analitycznych.

### 9.7.1. Model przyswajania informacji (ICM)

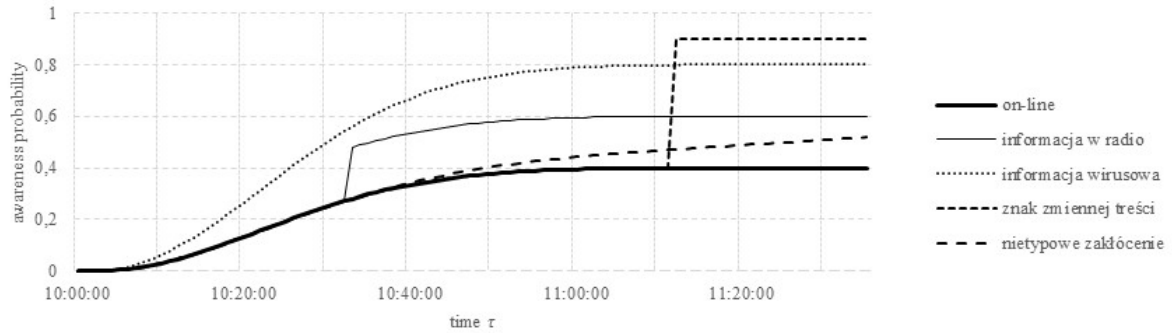
Model Przyswajania Informacji reprezentuje zachowanie użytkowników (kierowców) w sytuacjach nietypowych poprzez odwzorowanie procesu otrzymywania informacji i reakcji na nią. Użytkownicy najpierw uświadamiają sobie o zdarzeniu nieoczekiwanym a potem na nie reagują – taka jest struktura zjawiska zmiany trasy i taka też jest struktura modelu przyswajania informacji. Dzięki temu reprezentacja zjawiska jest zgodna z rzeczywistością i może być łatwo interpretowana i weryfikowana. Model ma dwa kluczowe elementy: model uświadamiania o zdarzeniu i model reakcji na nie. Model uświadamiania uwzględnia wiele źródeł jednocześnie: informacje (internet, radio, znaki zmiennej treści), oraz obserwowanie nietypowego stanu sieci przez doświadczonych użytkowników. Proponowany jest tu probabilistyczny model określający oczekiwaną liczbę uświadomionych użytkowników jako funkcję czasu i położenia w sieci. Wykorzystuje on rozkłady prawdopodobieństwa otrzymania informacji z różnych źródeł jako funkcje czasu i/lub przestrzeni (zob. Rysunek 7). Tylko uświadomieni użytkownicy mogą podjąć decyzję i zareagować na zdarzenie – zmienić trasę. Liczba użytkowników zmieniających trasę jest określana zależnie od czasu i położenia w sieci na podstawie użyteczności (zob. Rysunek 8). Użyteczność jest składową dwóch czynników: potencjalnych zysków („O ile szybciej dotrę do celu gdy tu i teraz zmienię trasę?”) i strat („O ile dłużej pojadę jeśli nie zmienię tu i teraz trasy?”). Obliczona wartość użyteczności jest wykorzystana w logitowym, dwumianowym modelu wyboru dyskretnego, który określa prawdopodobieństwo zmiany trasy jako funkcję użyteczności.

Aby dwa opisane wyżej modele mogły być użyte w algorytmie DTA zmodyfikowano model propagacji ruchu przez sieć w DTA. Całkowity potok pojazdów podzielono na trzy stany: nieświadomy, uświadomiony i po zmianie trasy. Prawdopodobieństwa przejścia pomiędzy stanami, czyli uświadamianie i reakcja są wyrażone w formie łańcuchu Markova obliczanego na każdym węźle sieci. Modyfikacja zachowuje strukturę pierwotnego algorytmu propagacji, co pozwala na bezpośrednie użycie w algorytmie DTA. Tak zmodyfikowany model propagacji ruchu rozwiązuje problem doktoratu, czyli pozwala uwzględnić reakcje użytkowników na zdarzenie nieoczekiwane w modelowaniu stanu sieci.

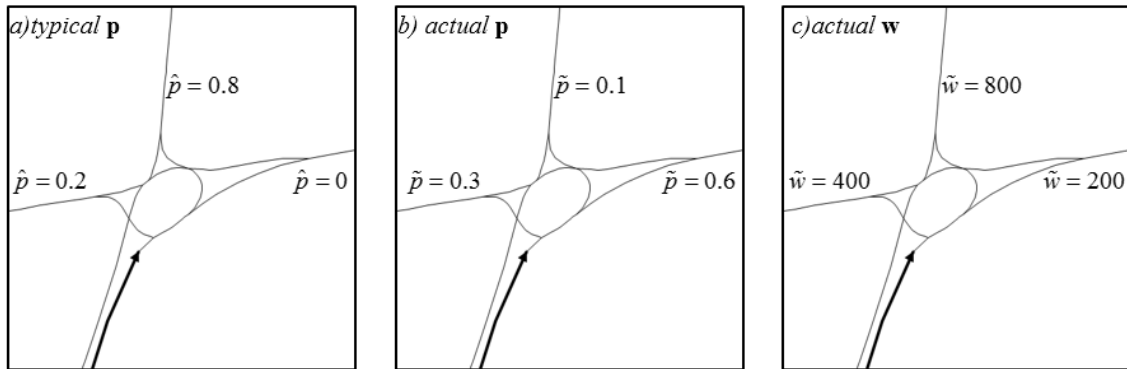
W tabeli 1 pokazano przykład obliczeniowy modelu ICM dla potoku 100 pojazdów przemierzającego korytarz siedmiu kolejnych punktów decyzyjnych  $i$  w czasie  $\tau$  (Rysunek 9). 100 użytkowników rozpoczyna propagację przez korytarz drogowy jako nieświadomi  $\hat{q}$ . W wyniku działania modelu uświadamiania  $t$  część użytkowników zaczyna być świadoma  $a$ . Prawdopodobieństwo uświadomienia obliczane dla wielu źródeł informacji: informacja w radio (*NEWS*), znak zmiennej treści (*VMS*), informacja dostępna on-line (*O-L*) i obserwacja

nietypowego zakłócenia ( $O$ ). Uświadomieni użytkownicy  $a$  szacują użyteczność zmiany trasy  $\kappa$  na podstawie potencjalnych zysków  $\Delta p$  i potencjalnych strat  $\Delta w$ , część z nich postanawia zmienić trasę – zmieniają stan z  $a$  na  $\tilde{q}$ .

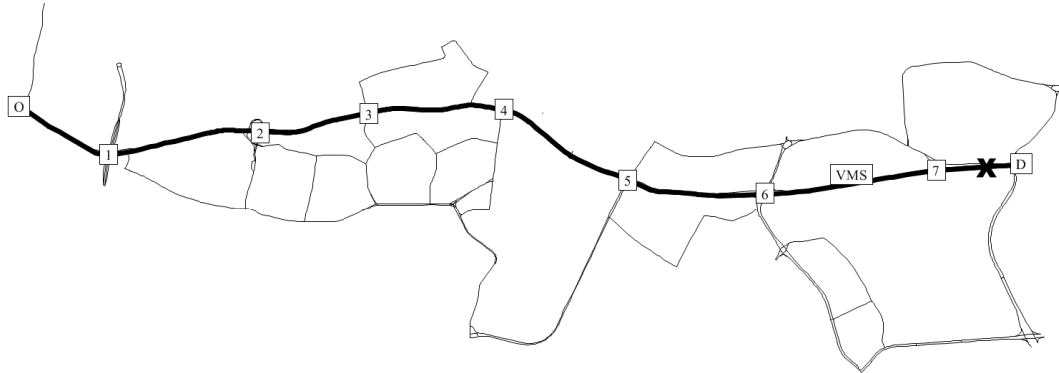
Model przyswajania informacji to narzędzie do opisu zjawiska zmiany trasy, i uwzględnienia go w opisie stanu sieci. Model ten znajdzie zastosowanie w procesie planowania, analiz, określania strategii informowania użytkowników, itp. W zaproponowanej tutaj formie pozwala on na uwzględnienie jedynie jednego zdarzenia, co ogranicza jego stosowanie w systemach czasu rzeczywistego. Stąd potrzeba generalizacji modelu tak, by mógł być stosowany w czasie rzeczywistym.



Rysunek 7 Skumulowane prawdopodobieństwo otrzymania informacji w czasie o zdarzeniu w czasie w bazowym wariancie otrzymania informacji on-line wzmacniane w kolejnych scenariuszach przez: a) podanie informacji w radio o 10:33, b) gdy informacja rozprzestrzenia się ‘wirusowo’ – szybciej i z większym zasięgiem, c) gdy na trasie przejazdu jest znak zmiennej treści informujący o zdarzeniu d) gdy użytkownicy doświadczają konsekwencji zdarzenia (nietypowe zakłócenie).



Rysunek 8 Zmienne objaśniające potrzebne do obliczenia użyteczności zmiany trasy na przykładowym punkcie decyzyjnym (węzeł sieci): a) typowe i b) aktualne prawdopodobieństwo wyboru ścieżki, c) aktualne koszty dotarcia do celu.



A path (bold) connecting origin  $O$  with destination  $D$ , passing through the 7 decision points and one VMS sign; unexpected event marked with  $X$ .

Rysunek 9 Korytarz łączący źródło  $O$  i cel  $D$  podróży. W ostatniej części trasy ma miejsce zdarzenie nieoczekiwane.

Tabela 1. Przykład działania modelu ICM

Punkt decyzyjny		Potok			Model uświadamiania							Model decyzji		
$i$	$\tau$	$\hat{q}$	$a$	$\tilde{q}$	$l$	$t_a^{NEWS}(\tau)$	$t_a^{VMS}(\tau)$	$t_a^{O-L}(\tau)$	$M(\tau)$	$t_a^O(\tau)$	$\Delta t_a$	$\kappa$	$\Delta p$	$\Delta w$
1	7:00	100	0	0	0%	-	-	0%	1	-	-	-	0.00	1.00
2	7:10	97	3	0	3%	-	-	3%	1	-	-	1%	0.01	1.01
3	7:15	93	7	0	3%	-	-	3%	1	-	-	1%	0.01	1.00
4	7:20	62	37	0	33%	30%	-	4%	1.01	-	-	0%	0.00	1.00
5	7:25	60	29	11	4%	-	-	4%	1.01	-	-	28%	0.61	1.47
6	7:40	54	8	27	10%	-	-	10%	1.02	-	-	78%	0.76	2.65
7	8:20	5	1	55	91%	-	80%	6%	1.04	50%	0.5	98%	1.00	4.00

$i$  - punkt decyzyjny  
 $\tau$  - czas w którym potok dociera do  $i$ -tego punktu decyzyjnego  
 $\hat{q}$  - potok nieświadomy  
 $a$  - potok uświadomiony  
 $\tilde{q}$  - potok po zmianie trasy

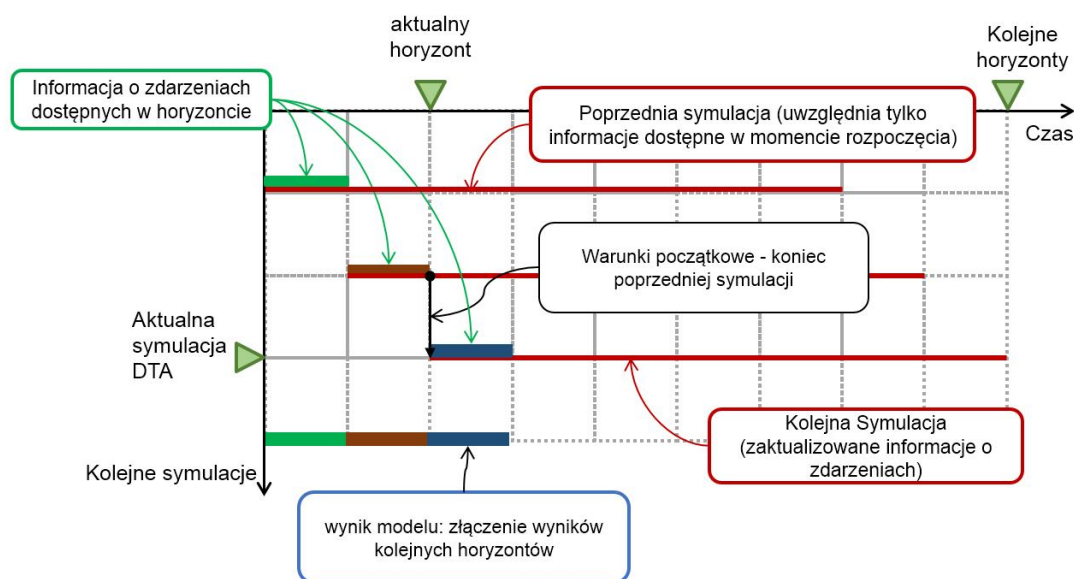
### 9.7.2. Model przesuwającego się horyzontu (RH-DTA)

W rzeczywistych sieciach transportowych dużych aglomeracji zdarzenia są powszechne, a na stan sieci równocześnie może wpływać więcej niż jedno zdarzenie. Co więcej zdarzenia są nieoczekiwane nie tylko dla użytkowników, ale także dla zarządzającego ruchem. Stąd potrzeba zachowania reprezentacji zjawiska z modelu ICM przy poszerzeniu zakresu jego stosowania do systemów czasu rzeczywistego.

Narzędziem do osiągnięcia tego celu jest model przesuwającego się horyzontu, stosowany powszechnie przy podejmowaniu decyzji w sytuacjach niepewności. W dynamicznie rozwijającym się, niepewnym otoczeniu decyzja jest weryfikowana i ewentualnie zmieniana za każdym razem gdy pojawia się nowa, aktualna informacja. Rozwijając koncepcję (Mahmassani i in., 1999) rozszerzono model DTA zakładając, że użytkownicy mogą zmienić swoją decyzję, gdy otrzymają nową informację, inną od tej którą mieli w momencie rozpoczynania podróży. Decyzje co do wyboru trasy mogą być aktualizowane za każdym razem gdy pojawia się nowa informacja. Pojawia się wówczas nowy horyzont, który zastępuje poprzedni.

Zaproponowano metodę RH-DTA, rozszerzenie modelu DTA wykorzystujące koncepcję przesuwającego się horyzontu w makroskopowym, dynamicznym modelu ruchu pozwalające określić stan sieci w następstwie zdarzenia nieoczekiwanego. Stan sieci uzyskiwany jest jako złączenie kolejnych rozwiązań problemu DTA dla kolejnych horyzontów. Wykorzystano tutaj hybrydowy model wyboru ścieżki, a spójność pomiędzy kolejnymi horyzontami uzyskuje się zapamiętując liczbę i cel pojazdów w momencie zmiany horyzontu.

Podstawowy algorytm RH-DTA jest stopniowo rozszerzany w kolejnych przykładach obliczeniowych ilustrujących problem, poczynając od najprostszej sytuacji: jednego zdarzenia o którym od razu wiedzą wszyscy użytkownicy, aż do najbardziej ogólnej sytuacji: wiele zdarzeń pojawiających się w czasie rzeczywistym o których wie tylko część użytkowników, a informacja pojawia się z opóźnieniem.



Rysunek 10 Schemat działania modelu przesuwającego się horyzontu, kolejne symulacje DTA korzystające z dostępnych w danym horyzoncie informacji i rozpoczynające się od stanu zakończenia poprzedniej symulacji. Wynikowy stan sieci powstaje poprzez złączenie wyników kolejnych symulacji.

## 9.8. Obserwacje zjawiska i estymacja modeli

W ostatniej części pokazano sposoby obserwacji zjawiska zmiany trasy przejazdu w sieciach transportowych. Na podstawie obserwacji opracowano metody estymacji modeli zaproponowanych w doktoracie. Zidentyfikowano dwa źródła obserwacji zjawiska: bezpośrednie i pośrednie. Bezpośrednie to zapis ścieżek przejazdu dla podróży źródło-cel zebranych dla reprezentatywnej próby podróży w mieście. W próbie powinny znaleźć się trajektorie obserwowane w sytuacji nietypowej (gdy na planowej trasie przejazdu ma miejsce zdarzenie nieoczekiwane). Pośrednio, z kolei, zjawisko obserwować można poprzez potoki ruchu obserwowane w sytuacjach nietypowych. W szczególności dobrym poligonem badawczym jest obserwacja pełnego ekranu dzielącego graf transportowy na dwie rozłączne części (tzw. cięcie grafu), na przykład ekran rzeki w mieście. Metoda obserwacji potoków jest mniej dokładna niż obserwacja ścieżek, ale jest ona znacznie bardziej dostępna i dostarcza ona opisu zjawiska wystarczającego do estymacji modelu.

Dla obydwu typów obserwacji zaproponowano formalną analizę obserwacji, która pozwala opisać zjawisko zmiany trasy przejazdu. Dla obserwacji bezpośrednich określono teoretyczne (modelowane) i obserwowane prawdopodobieństwo zmiany trasy w danym



miejsu w danym czasie. Dla obserwacji pośrednich zdefiniowano typową i nietypową część potoku mierzonego w czasie. Obydwie mogą służyć jako zmienna objaśniana w problemie estymacji modelu probabilistycznego. W odniesieniu do ścieżek teoretyczne prawdopodobieństwo zmiany trasy (uzyskane w modelu ICM) dopasowywane jest do prawdopodobieństwa obserwowanego w trajektoriach. W wypadku obserwacji potoków, z kolei, zamodelowane potoki nietypowe (potoki pojazdów zmieniających trasę przejazdu) są dopasowywane do mierzonych potoków nietypowych. Zaproponowano tu metodę max log-likelihood, odpowiednią dla estymacji dwumianowych modeli prawdopodobieństwa, w szczególności dwumianowego modelu logitowego. Problem estymacji dedykowany jest dla modelu ICM i pozwala ustalić wielkości parametrów modeli. Dokładna reprezentacja zjawiska rerouting w modelu ICM pozwala uzyskać realistyczny opis procesu decyzyjnego, stwarza jednak problemy przy estymacji. Model ICM parametryzowany jest: modelami rozprzestrzeniania się informacji (szybkość i zasięg informacji), obserwacji (kiedy nietypowy stan sieci prowadzi do uświadomienia sobie o zdarzeniu), reakcji (wrażliwość użytkowników na możliwe zyski i straty przy zmianie trasy), oraz, nie wprost, przewidywaniem reakcji innych użytkowników.

Proponowane metody estymacji dedykowane są dla modelu ICM, model przesuwającego się horyzontu (RH) jest uproszczeniem zjawiska, więc wyniki kalibracji modelu ICM mogą posłużyć do potwierdzenia jego podstawowych założeń: udziału użytkowników zmieniających trasę, opóźnienie reakcji, koszty użyte przez użytkowników zmieniających trasę.

W drugiej części tego rozdziału dokonano analizy wyników pomiaru potoków na ekranie Wisły w Warszawie z kolejnych dni w ujęciu godzinowym. W ostatnim z dni most Siekierski był zamknięty co pozwoliło na obserwacje zjawiska zmiany trasy przejazdu. Najważniejsze obserwacje to: a) około 20% potoku będącego pod wpływem zdarzenia zmienia trasę przejazdu, b) udział pojazdów zmieniających trasę rośnie w czasie, c) użytkownicy ujawniają podejście strategiczne i d) wybierają ścieżki optymalne po zmianie trasy. Obserwacje te potwierdzają założenia co do zachowania użytkowników przyjęte przy definiowaniu modeli zmiany trasy przejazdu.

## 9.9. Wnioski

Praca doktorska pokazuje sposób rozwiązania problemu dynamicznego modelu ruchu w sytuacjach nietypowych. Dwa stworzone w niniejszej pracy modele dynamicznego rozkładu ruchu na sieć, pozwalają opisać stan sieci w sytuacji nietypowej, co do tej pory nie było możliwe. Modele są skonstruowane tak, by można je było stosować ramach istniejących dynamicznych modeli ruchu, również tych działających w czasie rzeczywistym. Stworzone modele są pierwszymi makroskopowymi modelami rozkładu ruchu na sieć, które pokazują jak użytkownicy adaptują trasę przejazdu. Zaproponowane modele uświadamiania, pozwalają opisać prawdopodobieństwo otrzymania informacji w czasie w sytuacji gdy informacje są dostępne z wielu źródeł jednocześnie, co jest nowatorskim podejściem. Zaproponowany model podejmowania decyzji i propozycja funkcji użyteczności zmiany trasy pozwala na opis zjawiska zmiany trasy w formie funkcji kosztu podróży z wykorzystaniem zmiennych dostępnych w dynamicznym modelu ruchu, co do tej pory nie było bezpośrednio możliwe.

## 9.10. Dalsze kierunki badań

Pokazana w pracy metoda kalibracji zaproponowanych modeli powinna być przeprowadzona na obserwacjach z rzeczywistych sieci drogowych, aby zweryfikować czy zaproponowane modele odpowiadają rzeczywistemu zachowaniu kierowców. Będzie to jednak możliwe dopiero po przeprowadzeniu obserwacji ścieżek którymi podróżują

użytkownicy w sytuacji nietypowej. Obserwacje takie muszą być przeprowadzone w mieście w którym w czasie rzeczywistym działa dynamiczny model ruchu. Zaproponowany model uświadamiania jest oparty o założenia, które powinny być zweryfikowane. W szczególności założenie o niezależności źródeł informacji, oraz o rozkładach prawdopodobieństwa dla zidentyfikowanych źródeł informacji. Przyjęte założenie co do wyboru ścieżki przez użytkowników, którzy zmieniają trasę również powinno być dalej badane. Tak samo, jak przyjęta hipoteza, że strategiczne decyzje kierowców (uwzględniające decyzje pozostałych kierowców) mogą być modelowane poprzez kolejne iteracji problemu punktu stałego dynamicznego modelu ruchu powinna być zweryfikowana w badaniach zachowań kierowców. Najistotniejszym jednak kierunkiem dalszych badań powinno być połączenie dwóch zaproponowanych modeli tak, by reprezentacja zjawiska z modelu przyswajania informacji mogła być użyta w środowisku czasu rzeczywistego dla wielu zdarzeń jednocześnie

### ***9.11. Podsumowanie***

W pracy doktorskiej zdefiniowano problem na podstawie zidentyfikowanej luki badawczej: brak dynamicznego modelu rozkładu ruchu określającego stan sieci w następstwie zdarzenia nieoczekiwanego. W zebranych obserwacjach potoków pojazdów przekraczających Wisłę w Warszawie potwierdzono tezę naukową, że użytkownicy miejskiej sieci drogowej reagują na informacje o zdarzeniach wpływających na ich drogę do celu i zmieniają ścieżkę w trakcie podróży. Na podstawie analizy teoretycznej dynamicznych modeli ruchu określono sposoby rozwiązania problemu i zaproponowano dwie metody. Obydwie zaimplementowano w dynamicznych modelach ruchu, przetestowano i przedstawiono wyniki. Potwierdzono tym samym tezę praktyczną, że model popytu w dynamicznym modelu ruchu może być rozszerzony tak, by uwzględniał reakcję użytkowników na zdarzenia nieoczekiwane.