

TEZĂ DE DOCTORAT

CONTRIBUȚII LA MODELAREA ANALITICĂ A TRAFICULUI RUTIER CU ELEMENTE DIN TEORIA ȘIRURILOR DE AȘTEPTARE

Ing. Iulia Maria HARAGOȘ

Conducător științific: Prof.dr.ing. Ștefan HOLBAN

Timișoara, 2014

Rezumat

Tema abordată în cadrul tezei de doctorat vizează o direcție de cercetare fundamentală deosebit de importantă la ora actuală și anume cea a optimizării traficului rutier.

Transporturile reprezintă unul din cele mai importante aspecte ale vieții cotidiene. În prezent, transportul rutier a devenit unul dintre cele mai utilizate moduri de transport, aspect care a generat însă numeroase probleme legate de congestii, poluare și accidente. Din aceste considerente în ultimul deceniu, studiile legate de optimizarea traficului au cunoscut o dezvoltare deosebită.

Studiul științific al fluxului de trafic rutier își are începuturile în anii 1930, pornind de la aplicarea teoriei probabilităților pentru a descrie traficul, cu studiile lui Bruce D. Greenshields la Yale. Aceste studii au fost efectuate pe diferite modele de vehicule, de volume, de viteză și de investigare a performanțelor traficului în intersecții.

Cercetările în acest domeniu, de-a lungul timpului au cunoscut diverse abordări, ceea ce a condus la dezvoltarea de noi metode în vederea soluționării problemelor cu care se confruntă traficul rutier.

Principala problemă cu care se confruntă traficul urban este congestia rutieră a cărei efect imediat este acela de apariție a unor timpi mari de așteptare în intersecții și a vitezelor de deplasare mici (sub limita admisă pe străzi), cozi de așteptare interminabile, toate acestea contribuie la reducerea nivelului de siguranță în trafic, la creșterea poluării mediului, la creșterea consumului de combustibil.

Identificarea surselor de apariție a congestiei într-o rețea de transport ne permite înțelegerea acestui fenomen și ne oferă posibilitatea de a îmbunătăți performanța traficului.

Datorită complexității traficului rutier este dificil de construit modele de evaluare analitice care să utilizeze teoria șirurilor de așteptare pentru a surprinde exact dinamica acestui proces. Din acest considerent în prezent cea mai des utilizată metodă de abordare pentru analiza și evaluarea congestiei într-o rețea de transport rutier este cea oferită de tehnicile de simulare. Astfel au fost dezvoltate numeroase platforme de simulare.

Dintre cele mai cunoscute pot fi amintite de exemplu Synchro și SimTraffic – platforme care permit construirea de modele pentru intersecții semaforizate sau nu, VISSIM – platforma care permite modelarea semaforizării procesului de trafic rutier. Numărul lor este extrem de mare, multe dintre acestea fiind destinate construirii de modele de simulare pentru cazuri particulare de configurații rutiere. Toate aceste platforme cu un caracter general sau

particular prezintă un mare dezavantaj și anume faptul că rezultatele obținute privind calitatea traficului au un caracter probabilistic, ceea ce face ca indicii de performanță ce caracterizează traficul să prezinte un anumit grad de credibilitate. Dezavantajul constă în faptul că peste un proces de trafic de factura probabilistică se suprapune o tehnică de simulare care este de asemenea probabilistică, ceea ce are ca rezultat final obținerea unor indici de calitate ai traficului cu un grad scăzut de credibilitate.

Pe de altă parte, teoria șirurilor de așteptare dă posibilitatea de construire a unor modele analitice exacte și deci de obținere a unor rezultate exacte. Această tehnică, datorită complexității traficului rutier, nu putea fi aplicată decât în cazul unor structuri rutiere simple, fiind imposibil de utilizat în cazul unui trafic rutier real.

Acesta este contextul în care s-a realizat teza de doctorat. Ceea ce se propune și se obține în finalul acestei cercetări este de a descrie global traficul rutier prin intermediul unui indice de performanță și de a-l încorpora în teoria clasică a modelării analitice cu șiruri de așteptare. În acest mod devine posibilă utilizarea teoriei șirurilor de așteptare clasică în modelarea analitică a traficului.

Teza de doctorat „*Contribuții la modelarea analitică a traficului rutier cu elemente din teoria șirurilor de așteptare*” este structurată pe șapte capitole având un număr de 100 de pagini și peste 75 de referințe bibliografice.

În cadrul acestei structuri, sunt analizate și dezvoltate trei direcții de cercetare și anume:

- Prezentarea într-un mod sistematizat a conceptelor de bază specifice modelării sistemelor de trafic rutier
- Obținerea unui indice de performanță global care să caracterizeze traficul rutier
- Utilizarea acestui indice de performanță global în teoria șirurilor de așteptare pentru a face posibilă utilizarea ei în modelarea analitică a acestui tip de trafic.

Capitolul 1 „*Introducere*” prezintă obiectivele științifice ale lucrării, motivația cercetării în contextul localizării acesteia în domeniul tehnologiei informațiilor.

Capitolul 2 intitulat „*Stadiul actual în domeniul modelării traficului rutier*” tratează aspectele legate de conceptele teoretice existente în prezent în teoria modelării sistemelor de trafic rutier.

În prima parte a acestui capitol este prezentat studiul științific asupra fluxului de trafic care își are începutul în anii 1930, când pentru prima dată s-a utilizat teoria probabilităților pentru a descrie traficul și a construi modele de trafic rutier.

Dezvoltarea traficului începând cu a doua jumătate a secolului XX a impulsivat studiile privind tehnicile de modelare a acestuia în scopul optimizării și fluidizării traficului în zone urbane. Apar trei tipuri de trafic rutier în funcție de nivelul de detaliu cu care se reprezintă sistemele de trafic și anume: microscopic, mesoscopic și macroscopic.

- Modelarea microscopică încearcă să prezinte comportamentul unui sistem de trafic prin modelarea individuală a vehiculelor care compun fluxul de trafic. Modelul *Car-Following* este un exemplu care modelează deplasarea unui vehicul comparativ cu deplasarea vehiculului precedent. Principalele caracteristici ale simulării microscopice sunt următoarele: reprezentarea detaliată a geometriei rețelei de drumuri; reprezentarea în funcție de caracteristicile individuale, include componente stohastice. În cazul modelului microscopic accentul este pus pe baza comportamentului în timp - spațiu a vehiculelor individuale și influența lor. Unul dintre principalele dezavantaje ale acestui tip de reprezentare este dat de situația

în care, dacă numărul de mașini observate este în creștere atunci complexitatea și ecuațiile evoluează rapid.

- Modelele mesoscopice se bazează pe un nivel intermediar de detaliu și utilizează atât nivelul microscopic prin cumularea componentelor individuale cât și interacțiunilor din nivelul microscopic. Un model mesoscopic nu distinge nici urme de vehicule individuale, dar precizează comportamentul indivizilor, de exemplu, din punct de vedere probabilistic. În acest scop, traficul este reprezentat de (mici) grupuri de entități de trafic, activitățile și interacțiunile dintre acestea fiind descrise la un nivel scăzut de detaliu. Unele modele mesoscopice sunt derivate de la teoria cinetică a gazelor. Aceste așa – numitele modele de *Gas Kinetic* descriu dinamica distribuției de viteză
- Modelele macroscopice descriu traficul la un nivel ridicat de agregare ca densitate macroscopică, viteza medie, ca funcții continue ale spațiului și vitezei, fără a considera componentele sale individuale. În acest caz, accentul este pus pe timp-spațiu a comportamentului întregii colectivități. Modelarea macroscopică a traficului se bazează pe un model care discută despre relația dintre principalele fluxuri ale parametrilor de trafic: *viteza*, *debitul* și *densitatea*, variabile care reflectă modelul de trafic macroscopic și pot fi calculate pentru fiecare locație, în orice moment, în timp util pentru fiecare interval de măsurare. Modelele fluxurilor macroscopice pot fi clasificate în funcție de numărul de ecuații diferențiale parțiale care susțin frecvent modelul pe de o parte, și pe de altă parte ordinea lor. În practică, modele macroscopice au abilitatea de a simula rețele mari în mod eficient, dar în general le lipsesc detaliile individuale.

Datorită faptului că acest tip de reprezentare a traficului este cel mai utilizat în literatură, în cadrul acestui studiu sunt prezentate în detaliu cele mai des utilizate modele de acest tip și anume: *modelul Lighthill-Whitham-Richards*, *modelul Payne*, și *modelul Papageorgiou*. Fiecare din aceste modele este prezentat în detaliu fiind scoase în evidență avantajele și dezavantajele pe care le prezintă.

Cele trei tipuri de trafic: microscopic, mezososcopic și macroscopic pot fi reprezentate de modele deterministe sau stohastice.

Ultima parte a acestui capitol este destinată definirii principalilor indici de performanță care pot defini global un sistem de trafic rutier. Sunt trecuți în revistă și discutați: viteza, debitul - fluxul mediu de vehicule, densitatea de vehicule.

Capitolul 3 intitulat “ *Modelarea analitică a traficului rutier cu elemente din teoria șirurilor de așteptare*” abordează două aspecte:

- **Primul aspect** se referă la prezentarea stadiului actual al utilizării rețelelor cu șiruri de așteptare clasică în modelarea traficului rutier. Dintre abordările existente în prezent sunt discutate 3 realizări considerate ca fiind cele mai semnificative. Se arată că o analiză excelentă pentru modele analitice bazate pe cozi de așteptare pentru intersecțiile semaforizate și nesemaforizate o oferă în 1996 Heidemann. Modelele propuse reușesc să asigure o descriere realistă a unui segment de drum dintr-o intersecție utilizând teoria șirurilor de așteptare. Din păcate ea nu poate fi generalizată la segmente multiple de drum sau la multiple intersecții. În 2009, C. Osorio propune simularea unei rețele de trafic cu ajutorul cozilor de așteptare având o capacitate finită. Analizând traficul din orasul Lausanne, autorul propune utilizarea unei cozi de așteptare pentru fiecare linie de trafic. Astfel, de fiecare dată când capacitatea unui drum se schimbă, el adaugă/scoate câte o coadă din rețeaua formată. Rețeaua stradală creată este folosită pentru maximizarea timpilor de semaforizare din intersecțiile

orașului. Mai recent în 2011, Dad și alții încearcă să simuleze o intersecție semaforizată cu multiple benzi de circulație. Acesta definește o coadă pentru fiecare sector al intersecției și calculează valorile indicilor de performanță atașați. Acest model propus reușește să determine dacă există situații de congestie precum și momentul în timp în care acestea sunt posibil să apară.

Pe baza acestei analize a stadiului actual al modelării traficului rutier cu elemente din teoria șirurilor de așteptare s-a concluzionat că aceste abordări au un caracter particular și descriu în general sisteme simple de trafic: segmente stradale cu una sau mai multe benzi de circulație, intersecții simple nesemaforizate.

- **Al doilea aspect** se referă la prezentarea modelului lui Jackson. Acest model dezvoltat în 1963 stă la baza teoriei modelării sistemelor cu șiruri de așteptare. Modelul este prezentat în detaliu fiind arătate etapele care au condus la obținerea sistemului de ecuații diferențiale care descriu un sistem în cazul general. Sunt analizate cele două forme pe care le poate avea sistemul de ecuații diferențiale și anume corespunzătoare celor două situații pe care le poate descrie. Prima corespunde cazului în care perioada tranzitorie, corespunzătoare începutului de funcționare a sistemului, este luată în considerare - denumirea fiind de *model Jackson deschis*, iar cea de a doua corespunzând cazului în care această perioadă tranzitorie de început este eliminată - denumirea fiind de *model Jackson închis*.

Capitolul 4 intitulat „*Contribuții la modelarea analitică a traficului rutier*” reprezintă principalul capitol al acestei teze prin faptul că în cadrul acestuia este introdus un concept nou denumit *Factor de Calitate* prin intermediul căruia este caracterizat global traficul la nivelul unui sens de circulație. Acest factor este utilizat pentru unificarea teoriei clasice a modelării analitice prin intermediul rețelelor cu șiruri de așteptare cu caracteristicile procesului de trafic rutier, aspect care în final va da posibilitatea de a utiliza modelul de tip Jackson pentru reprezentarea traficului și modelarea exactă a acestuia.

Modelul prin intermediul căruia se reprezintă traficul rutier în cadrul unei rețele stradale este văzut ca fiind format din două componente:

- componenta statică care cuprinde structura rețelei rutiere, numărul de benzi de circulație, sensuri de circulație;
- componenta dinamică care se referă la caracteristicile specifice traficului în zonă și anume: categorii de vehicule, viteza acestora, numărul de vehicule existente în zona și în intervale orare diferite.

La construirea componentei statice se utilizează o reprezentare de tip graf pentru definirea structurii unei rețele de transport rutier. În contextul unei reprezentări de acest tip nodurile grafului vor reprezenta intersecții, iar arcele sensuri de circulație care interconectează aceste intersecții.

Dacă pentru definirea elementului static prezent în transportul rutier, problematica este clară prin aceea că structura stradală este definită de un graf, componenta dinamică este mult mai greu de definit aceasta fiind dictată indirect și de aspecte statice ca de exemplu: lungimea străzii, lățimea străzii, zona urbană în care este amplasată strada.

S-a avut în vedere faptul că până la momentul prezent nu a existat un indice de performanță care să definească caracteristicile dinamice de trafic. Singura referire făcută la un astfel de indice de performanță este dat de legislația rutieră din SUA unde este definit conceptul de nivel de serviciu pentru a defini calitatea traficului în cadrul unei intersecții sau sens de circulație. Acesta este un factor care ia valori între 0 - trafic blocat și 4 - trafic fluent, are un caracter strict de descriere a calității unei componente stradale, nefiind conectat cu alți indici de calitate.

Referitor la conceptele prezentate anterior legat de modelarea rețelelor cu șiruri de așteptare se are în vedere faptul că în construirea unui model de rețea se definesc indici de performanță, printre care și capacitatea relativă de trafic.

Acest indice definește în cazul unei rețele cu șiruri de așteptare, fluxul teoretic de clienți/vehicule care poate fi suportat de o arhitectură de centre de servire interconectate. Într-un sistem de trafic, capacitatea relativă de trecere este asociată cu fluxul teoretic ideal care poate fi suportat de un sens de circulație.

Pornind de la această idee, devine posibilă utilizarea într-o primă fază a modelului de tip Jackson pentru reprezentarea unui rețele rutiere ideale. Pentru a pune de acord cazul ideal cu cel real impus de un trafic existent în realitate, care prezintă caracteristici particulare, se propune introducerea unui indice de performanță numit *factor de calitate*.

Acest factor de calitate care definește caracteristicile particulare de trafic poate fi calculat prin măsurători efectuate pe un trafic real. Utilizarea sa dă posibilitatea obținerii unei capacități de trecere relative reale pentru fiecare sens de circulație prezent în structura rutieră studiată.

Utilizarea capacității de trecere relativă în situația unui trafic real face posibilă utilizarea modelului Jackson pentru reprezentarea traficului rutier prin modele analitice exacte. Practic rezultatul este obținerea unui model Jackson „nou” care unifică modelele sistemelor de trafic rutier cu teoria clasică a rețelelor cu șiruri de așteptare.

Capitolul 5 intitulat „*Factorul de calitate. Contribuții proprii*” este destinat efectuării unui studiu de analiză regresională prin intermediul căruia se propune o modalitate de calcul a factorului de calitate.

Pentru obținerea acestui model s-au luat în considerare principale atribute care caracterizează traficul rutier la nivelul unui sens de circulație Acestea sunt: numărul de benzi, lățimea benzii de circulație, declivitatea, fluxul de saturație, viteza, tipul zonei, vehicule grele, bus, PHF. Fiecare dintre aceste atribute sunt descrise în extenso. În cea de a doua parte sunt punctate toate etapele parcurse în scopul determinării modelului analitic prin intermediul căruia se va putea determina numeric coeficientul de calitate propus de autoarea tezei. Aceste etape se referă la:

- Selectarea tipului de intersecție supusă analizei
- Stabilirea valorilor parametrilor traficului utilizați pentru fiecare test efectuat
- Centralizarea datelor obținute pe baza testelor
- Determinarea modelului de calcul al factorului de calitate prin intermediul modelelor regresionale.
- Obținerea valorilor coeficienților modelului de calcul al factorului de calitate.

Rezultatul parcurgerii acestor etape este obținerea unei funcții care poate fi utilizată pentru calculul *Factorului de Calitate* aferent unui sens de trafic rutier real.

Modelul prin intermediul căruia s-a determinat acest indice de performanță prezintă un grad de credibilitate bun care este definit de un coeficient de corelație care are valoare 0.89. Un rezultat complementar obținut se referă la determinarea importanței pe care o prezintă atributele ce caracterizează traficul în asigurarea unui coeficient de calitate bun, respectiv a unui trafic fluent.

În ordine descrescătoare a importanței acestea sunt: fluxul de vehicule urmat de panta străzii pe care se desfășoară traficul. Următoarele atribute sunt zona urbană unde este prezentă strada și viteza de trafic pe stradă. Pe ultimele locuri ca importanță apar lățimea benzii de circulație, procentul de vehicule grele ca și numărul de opriri a mijloacelor de transport în comun.

Capitolul 6 intitulat „*Experimente*” este destinat în întregime prezentării etapelor care au condus la definirea unei metodologii originale prin care s-a adaptat modelul Jackson pentru reprezentarea traficului rutier. În acest context, sunt descrise studiile de caz realizate în vederea îmbunătățirii calității traficului rutier prin modelarea traficului cu elemente din teoria clasică a șirurilor de așteptare.

În prima parte a acestui capitol este prezentat studiul de caz în care se propune metoda de modelare a traficului rutier prin intermediul modelelor existente în teoria șirurilor de așteptare. Această metoda consideră intersecțiile rutiere ca fiind centre de servire. Un centru de servire reprezintă un set compus dintr-o coadă, urmată de una sau mai multe servere. Acest model a fost folosit pentru a simula situații reale dintr-un sector de trafic urban. Pe baza lui s-a determinat modul optim de funcționare și indicii de performanță.

Această abordare nouă în domeniu face ca toate intersecțiile din sectorul de drum să poată fi tratate în mod unitar. Parametrii ce caracterizează o intersecție sunt introduși în mod statistic în acest model pe baza unor măsurători reale. Odată modelul creat, el poate fi simulat cu ușurință în mediul JMT pentru a obține măsuri de performanță ce caracterizează modelul.

Un alt avantaj al modelului propus este posibilitatea unei analize ce prezintă variația unui parametru pe un anumit interval. Această analiză oferă o nouă perspectivă asupra funcționării modelului în condiții speciale (trafic de vârf, congestii, etc).

În partea a doua a acestui capitol se prezintă studiul experimental care testează și validează modelul lui Jackson ce ia în calcul factorul de calitate. Acest factor de calitate a fost introdus cu scopul de a unifica elemente existente în teoria cozilor de așteptare cu unele existente în traficul rutier. Această abordare pentru domeniul traficului rutier, oferă o evaluare a sistemului de transport din punct de vedere calitativ.

Experimentele au presupus dezvoltarea unui model în JMT și testarea acestuia folosind date măsurate pentru un sector de drum real. Performanțele acestui model s-au definit prin intermediul a 4 mărimi: gradul de utilizare (utilization), timpul de așteptare (queue time), timpul de răspuns (response time), capacitatea (throughput).

Experimentele au arătat că folosirea factorului de calitate pentru simularea unei situații din traficul rutier conduce la rezultate mai apropiate de cele reale. De asemenea, factorul de calitate reușește să pună în valoare faptul că o arteră este mai aglomerată cu cât are un factor de calitate mai mare. Acest aspect se datorează faptului că majoritatea șoferilor preferă drumuri calitative în detrimentul celor mai puțin calitative.

Un alt aspect interesant a fost acela că toate cele 4 mărimi folosite pentru determinarea performanțelor modelului au fost mai bune în situația în care s-a folosit factorul de calitate. Această situație unitară validează cu succes modelul de calcul propus pentru factorul de calitate și conduce totodată la o mai bună modelare a traficului rutier.

Capitolul 7 „Concluzii”. În acest capitol sunt prezentate contribuțiile la domeniul abordat în cadrul acestei teze și anume:

- Realizarea unei analize detaliate privind tehnicile curente de modelare și simulare a traficului rutier .
- Realizarea unei sinteze relative la conceptul de modelare cu șiruri de așteptare.
- Elaborarea unei sinteze asupra evoluției modelării traficului rutier cu ajutorul cozilor de așteptare
- Prezentarea detaliată a modelului lui Jackson atât pentru rețelele deschise de cozi de așteptare cât și pentru cele închise.
- Propunerea unui nou indice de performanță numit ***Factor de Calitate al Traficului Rutier***.
- Prin utilizarea acestui indice de performanță și introducerea sa în cadrul modelului Jackson clasic, devine posibilă ***unificarea*** celor două domenii.

- Propunerea unui mod de calcul al *Factorului de Calitate al Traficului Rutier*.
- Validarea conceptelor propuse în cadrul unui studiu experimental în care este modelată o rețea de trafic rutier reală. Rezultatele obținute confirmă corectitudinea modelului Jackson modificat.

Teza se încheie cu o bibliografie aferentă, care a făcut posibil acest studiu.

Cuvinte cheie: trafic rutier, congestia de trafic, șiruri de așteptare, modelarea traficului, calitatea rețelei de transport, factorul de calitate.