

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

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea *Politehnica* Timișoara
în domeniul ȘTIINȚA CALCULATOARELOR
de către

Ing. Iulia Maria Haragoș

Conducător științific: prof.univ.dr.ing. Ștefan Holban
Referenți științifici: prof.univ.dr.ing. Daniela Elena Popescu
prof.univ.dr. Alexandru Cicortaș
prof.univ.dr.ing. Ionel Jian

Ziua susținerii tezei: 14 Februarie 2014

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|---|--|
| 1. Automatică | 9. Inginerie Mecanică |
| 2. Chimie | 10. Știința Calculatoarelor |
| 3. Energetică | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 4. Ingineria Chimică | 12. Ingineria sistemelor |
| 5. Inginerie Civilă | 13. Inginerie energetică |
| 6. Inginerie Electrică | 14. Calculatoare și tehnologia informației |
| 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații | 15. Ingineria materialelor |
| 8. Inginerie Industrială | 16. Inginerie și Management |

Universitatea *Politehnica* Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2014

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității *Politehnica* Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221
e-mail: editura@edipol.upt.ro

Cuvânt înainte

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității de cercetare desfășurate în calitate de doctorand în cadrul Facultății de Automatică și Calculatoare, Departamentul de Calculatoare și Tehnologia Informației al Universității "Politehnica" din Timișoara.

Mulțumiri deosebite se cuvin conducătorului de doctorat, prof.dr.ing. Ștefan Holban, pentru sprijinul acordat de-a lungul perioadei de doctorat, mai ales prin atenta îndrumare, timpul acordat studiului și prin minuțiozitatea și promptitudinea de care a dat dovadă.

Vreau de asemenea să mulțumesc familiei pentru susținerea permanentă pe parcursul acestor ani de studiu.

Mulțumesc Universității *Politehnica* Timișoara pentru oportunitatea oferită de a urma aceste studii și programele desfășurate (POSDRU) și asigurarea suportului financiar.

Doresc să mulțumesc tuturor celor care în mod direct sau indirect, m-au ajutat la realizarea acestui material.

„This thesis was possible with the partial financial support of the strategic grant POSDRU/CPP107/DMI1.5/S/77265 (2010) of the Ministry of Labor, Family and Social Protection, Romania, co-financed by the European Social Fund – Investing in people.”

Timișoara, Februarie 2014

Ing. Iulia Maria Haragoș

Haragoș, Iulia Maria

Contribuții la modelarea analitică a traficului rutier cu elemente din teoria șirurilor de așteptare

Teze de doctorat ale UPT, Seria 10, Nr. 42, Editura Politehnica, 2014, 100 pagini, 28 figuri, 14 tabele.

ISSN: 1842-7707

ISBN: 978-606-554-778-0

Cuvinte cheie:

trafic rutier, congestia de trafic, șiruri de așteptare, modelarea traficului, controlul traficului, calitatea rețelei de transport, factorul de calitate.

Rezumat,

Teza se concentrează pe abordarea modelării traficului rutier într-o rețea de transport urbană. Modelarea traficului în cadrul unei rețele de transport este o parte esențială a oricărui sistem de transport urban, deoarece facilitează planificarea și managementul acestuia.

Această lucrare propune unificarea modelării sistemelor de trafic rutier cu teoria clasică a rețelelor cu șiruri de așteptare. Unificarea se realizează prin intermediul factorului de calitate. Acest factor este obținut cu ajutorul modelelor de calcul regresional și înglobează principalele caracteristici statice și dinamice prezente în trafic.

Această abordare în domeniul traficului rutier permite evaluarea și analiza traficului din punct de vedere calitativ atât la nivel de intersecție cât și la nivel de rețea de transport.

Factorul de calitate este introdus în cadrul modelului lui Jackson, model de referință în teoria șirurilor de așteptare deschise. Aplicarea factorului de calitate în cadrul modelului lui Jackson permite evidențierea modului în care fiecare caracteristică statică sau dinamică influențează conduita fluxului de trafic în rețeaua de transport.

În cadrul tezei au fost efectuate studii de caz care scot în evidență, prin intermediul indicatorilor de performanță, importanța utilizării factorului de calitate în analiza fluxului de trafic într-o rețea de transport.

Cuprins

Abrevieri.....	7
Lista figurilor.....	8
Lista tabelelor.....	9
1. Introducere.....	11
1.1. Prezentare generală.....	11
1.2. Motivație.....	12
1.3. Obiectivele tezei.....	13
1.4. Structura și conținutul tezei.....	13
2. Stadiul actual în domeniul modelării traficului rutier.....	15
2.1. Diagrama fundamentală a fluxului de trafic.....	16
2.2. Evoluția modelării traficului rutier.....	18
2.3. Indicatori de performanță utilizați în analiza traficului rutier.....	24
2.4. Analiza stadiului actual al metodelor de modelare și simulare traficului..	26
2.5. Concluzii.....	27
3. Modelarea analitică a traficului rutier cu elemente din teoria șirurilor de așteptare.....	28
3.1. Modele analitice de cozi de așteptare.....	28
3.2. Indicatori de performanță.....	30
3.3. Analiza stadiului actual al modelării traficului rutier cu elementele din teoria șirurilor de așteptare.....	32
3.4. Modelul lui Jackson.....	33
3.4.1. Modelul lui Jackson pentru rețele cu șiruri de așteptare deschise...	34
3.4.1.1. Teorema lui Jackson.....	34
3.4.2. Modelul lui Jackson pentru rețele cu șiruri de așteptare închise.....	43
3.4.2.1. Calculul constantei de normalizarea.....	48
3.4.2.1.1. Calculul lui $G(N, M)$ pentru cazul frecvenței de servire constante.....	48
3.4.2.1.2. Calculul lui $G(N, M)$ pentru cazul frecvenței de servire variabile.....	49
3.5. Cazuri particulare ale modelului lui Jackson.....	51
3.6. Concluzii.....	53
4. Contribuții la modelarea analitică a traficului rutier.....	54
4.1. Utilizarea grafurilor în reprezentarea stradală.....	54

6	Cuprins	
4.2.	Unificarea teoriei șirurilor de așteptare cu teoria modelării traficului rutier.....	55
4.2.1.	Factorul de calitate al traficului rutier.....	57
4.3.	Modelul lui Jackson cu factorul de calitate al traficului rutier.....	59
4.4.	Concluzii.....	60
5.	Factorul de calitate. Contribuții proprii.....	61
5.1.	Modelul analitic al factorului de calitate	61
5.1.1.	Prezentarea modelului.....	61
5.1.2.	Descrierea caracteristicilor structurii stradale.....	62
5.2.	Determinarea modelului analitic.....	62
5.3.	Analiza coeficienților de corelare parțială.....	65
5.4.	Concluzii.....	69
6.	Experimente.....	70
6.1.	Modelarea traficului cu ajutorul centrelor de servire.....	70
6.1.1.	Prezentarea metodei.....	70
6.1.2.	Simularea modelului.....	71
6.2.	Modelarea analitică a traficului rutier cu factorul de calitate.....	78
6.2.1.	Studiu experimental.....	78
6.2.2.	Calculul factorului de calitate.....	79
6.2.3.	Validarea modelului.....	82
6.3.	Concluzii.....	86
7.	Concluzii.....	88
7.1.	Contribuții proprii	88
7.2.	Direcții de cercetare viitoare.....	90
	Bibliografie.....	91
	Anexa 1 - Lista lucrărilor științifice publicate.....	96

Abrevieri

LWR	Lighthill, Whitham și Richards
LOS	Nivelul de serviciu (Level of Service)
HCM	Highway Capacity Manual
QF	Factorul de calitate (Quality Factor)
JMT	Java Modelling Tools
PHF	Peak Hour Factor

Lista figurilor

- Fig. 2.1 Diagrama fundamentală u-k.
- Fig. 2.2 Diagrama fundamentală q-k.
- Fig. 2.3 Diagrama fundamentală u-q.
- Fig. 3.1 Modul de reprezentare a unui centru de servire.
- Fig. 3.2 Reprezentarea grafică a unei rețele cu șiruri de așteptare deschisă.
- Fig. 3.3 Modul de configurare a unei rețele cu șiruri de așteptare deschisă.
- Fig. 3.4 Modul de configurare a centrelor de servire [44].
- Fig. 3.5 Modul de configurare a unei rețele cu șiruri de așteptare închisă,
- Fig. 5.1 Tipul intersecției care a fost supusă modelării.
- Fig. 5.2 Reprezentarea grafică a coeficienților de corelare parțială.
- Fig. 5.3 Influența fiecărui parametru a traficului asupra factorului de calitate.
- Fig. 6.1 Un sector de drum dintr-o rețea de transport urban [50].
- Fig. 6.2 Modelul de simulare propus [50].
- Fig. 6.3 Numărul de clienți pentru S_2 și S_4 [50].
- Fig. 6.4 Numărul de clienți pentru S_5 și S_7 [50].
- Fig. 6.5 Numărul de clienți pentru S_1 și S_3 [50].
- Fig. 6.6 Gradul de utilizare pentru S_2 și S_4 [50].
- Fig. 6.7 Gradul de utilizare pentru S_5 și S_7 [50].
- Fig. 6.8 Gradul de utilizare pentru S_1 înainte și după modificarea timpului de servire [50].
- Fig. 6.9 Gradul de saturare pentru S_1 pe durata analizei What-If [50].
- Fig. 6.10 Creșterea capacității relative de trecere cu 50% pentru S_1 [50].
- Fig. 6.11 Reprezentarea grafică a sectorului de drum studiat [57].
- Fig. 6.12 Reprezentarea grafică a capacității relative de trecere obținută analitic.
- Fig. 6.13 Modul de configurare a modelului de simulare pentru sectorul de drum analizat [57].
- Fig. 6.14 Reprezentarea grafică a valorilor obținute pentru gradul de utilizare.
- Fig. 6.15 Reprezentarea grafică a valorilor obținute pentru timpul de așteptare.
- Fig. 6.16 Reprezentarea grafică a valorilor obținute pentru timpul de răspuns.
- Fig. 6.17 Reprezentarea grafică a valorilor obținute pentru capacitate.

Lista tabelelor

- Tabelul 5.1 Parametrii fluxului de trafic corespunzători fiecărui test.
- Tabelul 5.2 Valorile coeficienților ecuației.
- Tabelul 5.3 Matricea de corelare.
- Tabelul 5.4 Coeficienții de corelare parțială
- Tabelul 6.1 Rata de sosire a celor trei clase [50].
- Tabelul 6.2 Timpii de servire pentru toate tipurile de clase [50].
- Tabelul 6.3 Timpul de servire pentru intersecția S1 [50].
- Tabelul 6.4 Valorile parametrilor luați în calcul pentru fiecare conexiune [57]
- Tabelul 6.5 Valorile factorului de calitate pentru fiecare conexiune [57]
- Tabelul 6.6 Valorile capacității relative de trecere [57]
- Tabelul 6.7. Valorile obținute pentru gradul de utilizare [57]
- Tabelul 6.8. Valorile obținute pentru timpul de așteptare [57]
- Tabelul 6.9. Valorile obținute pentru timpul de răspuns [57]
- Tabelul 6.10. Valorile obținute pentru capacitatea relativă de trecere [57]

1. INTRODUCERE

1.1. Prezentare generală

Transporturile reprezintă unul din cele mai importante aspecte ale vieții de zi cu zi. Oamenii au în permanență nevoie de servicii de transport, fie că este vorba de deplasări în interes propriu, fie pentru a furniza bunuri și servicii. Ca și o consecință a acestui fapt, transportul rutier a devenit unul dintre cele mai utilizate moduri de transport, aspect care a generat numeroase probleme legate de congestii, poluare și accidente în trafic. Din aceste considerente 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.

Cele mai des întâlnite probleme în traficul rutier urban sunt din ce în ce mai complexe, fapt ce se datorează extinderii rețelei rutiere precum și a creșterii numărului de vehicule în mediul urban. Principala problemă cu care se confruntă traficul urban este congestia rutieră a cărei efect imediat este acela de apariție a unor timpuri 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.

Congestia traficului apare datorită mai multor cauze și anume: topologia stradală; numărul mare de vehicule care depășește capacitatea rutieră, conducând la apariția gâtuirilor/blocajelor; comportamentul șoferilor; zone cu semaforizări slabe; zone în lucru; condiții meteorologice neprielnice și altele.

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.

Pentru a putea genera soluții la problemele cu care se confruntă traficul rutier, primul pas constă în dezvoltarea unui model viabil care să satisfacă necesitățile rețelei de transport și să redea cu exactitate informații legate de starea traficului [52].

1.2. Motivație

Justificarea alegerii acestei teme de cercetare este complexă, deoarece acest domeniu al traficului rutier este unul în continuă dezvoltare.

Interesul pentru acest subiect se datorează în principal evoluției în domeniul industriei automotivă, care a cunoscut o dezvoltare rapidă în defavoarea infrastructurii rețelelor de transport rutier. Această evoluție a condus la apariția unor condiții de trafic complexe, implicit și la necesitatea dezvoltării unui domeniu de analiză și expertiză care are în vedere siguranța rutieră.

Un factor important în alegerea acestei teme a fost faptul că subiectul este unul interdisciplinar, combinându-se astfel, domeniul ca și calculatoare și tehnologia informației cu transporturile, matematica și altele. Având în vedere acest lucru, putem spune că sunt oferite numeroase oportunități de îmbunătățire a metodelor clasice.

Alt aspect care s-a avut în vedere este necesitatea de deplasare/de mobilitate atât ca simpli pietoni, bicicliști, cât și ca șoferi, necesitate care a condus la dezvoltarea transportului dar și la apariția unor probleme specifice.

Principala problemă care se datorează creșterii traficului la nivel de rețea de transport este congestia. Acest fenomen fizic are efecte negative asupra calității vieții oamenilor, deoarece conduce la crearea cozilor de așteptare, implicit a întârzierilor aferente, este redusă siguranța, crește poluarea mediului.

Pentru abordarea acestei probleme într-un mod mai eficient este necesară aplicarea unor modele de planuri și tehnici de control ale traficului la nivel de rețea. Tehnicile de control a fluxurilor de trafic sunt adaptate în general configurației infrastructurii rutiere. Obiectivele acestor tehnici de control al fluxurilor au în vedere:

- Utilizarea capacității maxime a infrastructurilor existente
- Fluidizarea traficului în scopul reducerii congestiilor și a emisiilor poluante
- Restricționarea accesului în anumite zone ale rețelei pentru a evita sau limita congestia.

În scopul realizării acestor obiective, mai mulți cercetători au apelat la cele mai moderne tehnologii utilizate în prezent și anume la modelarea și simularea traficului rutier într-o rețea de transport urban.

Modelarea traficului la nivel de rețea de transport este un element important utilizat pentru evitarea congestiilor și blocajelor dintr-un sistem. În acest fel se obțin oportunități de îmbunătățire a traficului rutier prin oferirea de alternative de modificare a rețelelor existente [44].

În încercarea de a diminua efectele negative pe care le are traficul rutier asupra „vieții moderne” am acordat o bună parte din atenție îmbunătățirii calității traficului, deoarece într-o rețea de transport o importanță deosebită trebuie acordată fluidizării traficului.

Un pas înainte în acest domeniu se poate concretiza prin oferirea unui „plus” în calitatea rețelei de transport.

1.3. Obiectivele tezei

Obiectivul principal al acestei teze este de a găsi soluții de descongestionare a traficului rutier atât la nivel de arteră de circulație cât și la nivelul întregului sistem de transport. La baza realizării acestui obiectiv propun următoarele:

- Definirea unui indice de performanță care să facă posibilă utilizarea teoriei șirurilor de așteptare în modelarea traficului rutier.
- Dezvoltarea unui model regresional care să calculeze indicii de performanță propus în funcție de caracteristicile particulare ale unui proces de trafic.
- Determinarea principalelor caracteristici de trafic care influențează calitatea traficului din punctul de vedere al fluenței acestuia.
- Dezvoltarea unui model analitic aplicabil în reprezentarea traficului rutier.
- Definirea unei proceduri de construire a unui model analitic pentru traficul rutier. Procedura ia în considerare indicii de performanță propus în contextul utilizării modelului analitic de tip Jackson.
- Optimizarea prin modelare analitică a traficului cu scopul:
 - Reducerii dimensiunii șirurilor de așteptare
 - Reducerii întârzierilor din trafic
 - Creșterea siguranței în trafic.

1.4. Structura și conținutul tezei

Teza este structurată pe 7 capitole. **Primul capitol** este unul introductiv, următoarele cinci reprezintă teza propriu-zisă, iar în ultimul capitol sunt enumerate contribuțiile realizate. În continuare va fi descrisă structura fiecărui capitol.

Capitolul 2 prezintă stadiul actual în domeniul modelării traficului rutier. În cadrul acestui capitol este realizată o sinteză asupra tipurilor de metode de modelare a traficului rutier, precum și a evoluției acestor modele. De asemenea sunt definiți și explicați principalii indicatori de performanță utilizați în analiza traficului. Tot în cadrul acestui capitol s-a făcut o trecere în revistă a soluțiilor și metodelor existente în modelarea și simularea comportamentului de trafic.

Capitolul 3 este destinat prezentării principalelor concepte ale modelării analitice cu cozi de așteptare și indicatorii de performanță care se au în vedere. Tot aici s-a realizat o sinteză asupra evoluției modelării traficului rutier cu elementele din teoria șirurilor de așteptare. Este prezentat în detaliu un model de referință în teoria șirurilor de așteptare și anume modelul și teorema lui Jackson atât pentru rețele cu șiruri de așteptare deschise cât și închise.

În **Capitolul 4** se prezintă modalitatea în care se realizează unificarea elementelor specifice teoriei modelării traficului cu elementele clasice existente în teoria șirurilor de așteptare. În prima parte a acestui capitol este evidențiată importanța utilizării grafurilor în reprezentarea topologiei rețelei de transport.

Această parte este urmată de detalierea modalității de unificare prin intermediul factorului de calitate, care înglobează caracteristicile particulare ale unui proces de trafic. În finalul capitolului este descrisă procedura de calcul a modelului lui Jackson care ia în calcul acest factor de calitate.

Capitolul 5. În cadrul acestui capitol este descris modul de calcul al factorului de calitate, care a fost introdus cu scopul de a unifica elemente existente în teoria cozilor de așteptare cu unele existente în traficul rutier.

Capitolul 6 este dedicat în întregime studiilor de caz realizate în vederea îmbunătățirii calității traficului rutier prin modelarea traficului cu elemente din teoria clasică a șirurilor de așteptare.

Capitolul 7 prezintă contribuțiile personale ale autorului într-o formă detaliată pentru a sublinia aspectele analizate în cadrul tezei.

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

Teza se întinde pe 100 pagini și conține 28 figuri, 14 tabele și 81 titluri bibliografice. O mare parte din contribuții a fost validată prin publicarea a 7 lucrări științifice în domeniul abordat în teza.

2. STADIUL ACTUAL ÎN DOMENIUL MODELĂRII TRAFICULUI RUTIER

Teoriile existente legate de modelarea traficului descriu într-un mod matematic precis interacțiunile între vehicule și operatorii acestora și infrastructura.

Modelarea matematică a comportamentului fluxului de trafic este o condiție esențială pentru o serie de activități, și anume: de planificare de transport, de control al proiectării, de simulare, de prognoză și de evaluare a sistemului de transport.

Studiul științific asupra fluxului de trafic își are începutul în anii 1930, pornind de la aplicarea teoriei probabilităților pentru a descrie traficul (Adams) [74] și studii de pionierat efectuate de Bruce D. Greenshields la Yale Bureau of Highway Traffic. Aceste studii s-au efectuat pe diferite modele de volume de vehicule, viteză [3] și investigații a performanțelor traficului în intersecții [75]. După cel de al doilea război mondial, a existat o creștere a parcului de autovehicule care a permis extinderea rețelei de transport rutier. Acest lucru a determinat un interes crescut în studiul caracteristicilor de trafic și în dezvoltarea teoriilor fluxului de trafic [1].

Datorită complexității sistemului fluxului de trafic, modelele de simulare a fluxului de trafic au fost concepute pentru a caracteriza comportamentul acestuia, astfel devenind un instrument esențial în analiza traficului rutier.

Un model de simulare a traficului reprezintă modificarea dinamică de-a lungul timpului precum și starea traficului.

Modelele de trafic pot fi clasificate 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 [60].

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 macroscopic prin cumulara 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. De exemplu, o manevră a schimbării benzii de rulare poate fi reprezentată de un vehicul individual ca un eveniment instantaneu, în cazul în care decizia de a efectua un culoar de schimbare se bazează pe densități relative pe benzi, precum și

diferențele de viteză. Unele modele mesoscopice sunt derivate de la teoria cinetică a gazelor. Aceste așa – numitele modele de gaz cinetică descriu dinamica distribuției de viteză [60].

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 [2]: viteza, debitul și densitatea, variabile care reflectă modelul de trafic macroscopic ce 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.

O altă clasificare a modelelor fluxului de trafic este dată de reprezentarea proceselor în [60]. În acest sens, se disting modele deterministe și modele stohastice. Modelele deterministe au la bază legi fizice stabile, iar stările următoare se pot determina cu mare precizie.

Modelele stohastice încorporează procese care includ variabile aleatoare. În cazul acestor modele, stările următoare nu pot fi determinate cu o mare precizie.

De exemplu, un model „car-following” poate fi formulat fie ca determinist sau o relație stohastică definind timpul de reacție al șoferului, o constantă sau respectiv o variabilă aleatoare.

Deoarece aproape toate modelele de trafic descriu sisteme dinamice, o clasificare naturală este în funcție de timp. Se pot distinge două scări de timp, și anume continue și discrete. Un model continuu descrie modul de stat a sistemului de trafic care se schimbă continuu în timp, ca răspuns la stimuli continui. Modelele discrete presupun că schimbările de stat apar discontinuu în timp, la momente de timp discrete. În afară de timp, de asemenea, alte variabile independente pot fi descrise fie prin variabile continue sau discrete (de exemplu, poziția, viteza, viteza dorită). De asemenea, au fost propuse modele mixte [60].

2.1. Diagrama fundamentală a fluxului de trafic

Prima diagramă fundamentală a fluxului de trafic a fost propusă de Greenshields (1935) în [3]. Diagrama fundamentală este un instrument de bază în înțelegerea comportamentului sistemelor de trafic. Diagrama fundamentală descrie relația statistică dintre variabilele fluxului de trafic macroscopic și prezintă o serie de detalii ale relației dintre acestea: densitate – debit - viteză, plecând de la derivarea relației fundamentale.

$$q = k \cdot u \quad (2.1)$$

Unde: q- debitul; k- densitatea; u- viteza.
Astfel s-au obținut diagramele:

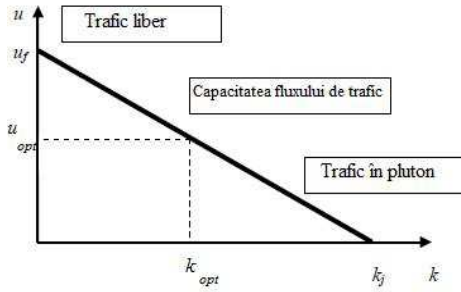


Fig.2.1 Diagrama fundamentală u-k

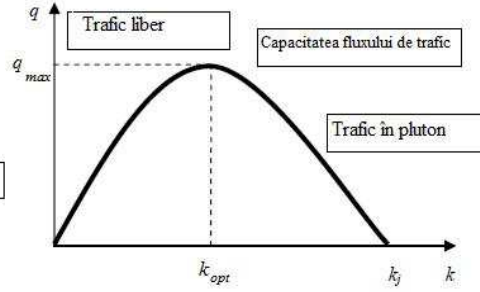


Fig.2.2 Diagrama fundamentală q-k

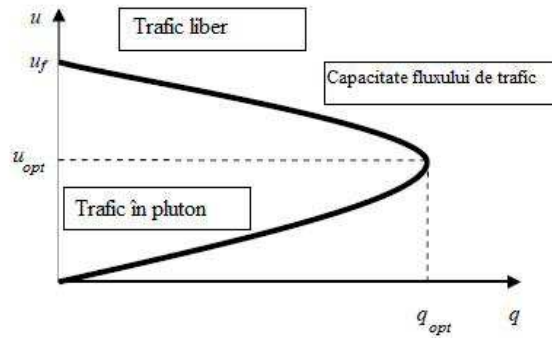


Fig.2.3 Diagrama fundamentală u-q

Diagramele fundamentale care descriu corelația parametrilor au relațiile:

- Viteză - densitate :

$$u = u_f \cdot \left(1 - \frac{k}{k_j} \right) \quad (2.2)$$

- Viteză – debit :

$$q = u_f \cdot k \cdot \left(1 - \frac{k}{k_j} \right) \quad (2.3)$$

- Debit - densitate:

$$q = k_j \cdot u \cdot \left(1 - \frac{u}{u_f} \right) \quad (2.4)$$

Unde:

u_f - viteza înregistrată în condiții de trafic liber

k_j - densitatea traficului în condiții de congestie

Traficul poate avea diferite regimuri caracterizate de variabile ce descriu starea traficului [4],[16]:

- Fluxul de trafic liber este caracterizat de o densitate scăzută care determină viteza de flux liber u_f . Viteza maximă permisă este u_f .
- Capacitatea fluxului de trafic este caracterizată printr-un debit maxim q_{max} care se mai numește și debit de capacitate.
- Traficul în pluton este caracterizat de densitate maximă k_j (viteză redusă sau nu), denumit trafic îngreunat.

Diagramele fundamentale sunt determinate de datele de trafic din viața reală. Acest lucru se face de obicei presupunând că perioadele de staționare pot fi identificate în timpul măsurării datelor. Pentru a obține diagrame fundamentale semnificative, colectarea datelor trebuie să fie efectuată la locul corect pe parcursul unei perioade de timp selectate.

Cercetătorii în problemele de trafic au fost mult timp interesați de aceste corelații, precizând și estimând aceste relații, dar cu denaturarea comportamentală și/sau statistică.

De exemplu, Greenberg (1959) a propus o formă logaritmică pentru viteză în raport cu densitatea [76], Underwood (1961) utilizează o formă exponențială [77], și Edie (1961) combinat aceste două pentru a adapta o discontinuitate clară în datele din apropierea densităților critice [78].[79]

2.2. Evoluția modelării traficului rutier

Multe modele au fost propuse pentru a descrie caracteristicile principale ale traficului și au avantajul că simularea lor în unele limite și condiții inițiale ne oferă un instrument pentru a ghida înțelegerea noastră.

Deși există mai multe modele diferite macroscopice m-am axat pe cele trei modele mai importante: modelul Lighthill-Whitham-Richards, modelul Payne și modelul Papageorgiou, deoarece acestea sunt cel mai des utilizate în practică.

1. Modelul Lighthill-Whitham-Richards

Primul pas major în modelarea macroscopică a traficului a fost luat de către Lighthill și Whitham în 1955, [5], care a pornit de la ideea comparării fluxului de trafic cu fluxul apelor râurilor. Acest model propus pentru studiul fluxului de trafic se bazează pe ecuații cu derivate parțiale construite pentru densitate. Ecuațiile descriu modificarea densității într-un moment dat de timp și spațiu. Un an mai târziu, Richards (1956) [6] completează ideea cu introducerea de "unde-soc pe autostrada" într-o abordare identică. Această încercare de a explica comportamentul de trafic congestionat a devenit modelul de bază pentru numeroase studii ale fluxului de trafic disponibile în literatura de specialitate de astăzi.

Acest model este întâlnit sub numele de modelul lui LWR (Lighthill, Whitham și Richards) și se prezintă matematic astfel:

$$\frac{n(x) \cdot \partial C(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial q(x, t)}{\partial x} = 0 \quad (2.5)$$

Unde:

$C(x, t)$ - densitatea traficului care se măsoară în vehicule pe banda/kilometru la locația x și la momentul de timp t

$n(x)$ - numărul de benzi la poziția x

$q(x, t)$ - fluxul de trafic care se măsoară în vehicule/ora în momentul t și în poziția x , sau altfel cunoscut sub numele de intensitatea traficului.

Variabilele $C(x, t)$ și $q(x, t)$ sunt funcții continue în timp și spațiu. Ecuația (2.5) este o "lege fizică" în teoria traficului care atestă faptul că nu există vehicule ce pot să dispăra și nici să apară din senin. Prin urmare, această ecuație se adaptează mai exact pentru fiecare regim de trafic posibil și în orice moment de timp.

Fluxul de trafic din ecuația (5) poate fi exprimat în funcție de densitatea traficului și de viteza $v(x, t)$:

$$q(x, t) = C(x, t) \cdot v(x, t) \cdot n(x) \quad (2.6)$$

Ultima parte a modelului Lighthill-Whitham-Richards este definită de ecuația care consideră că viteza medie de echilibru a vehiculelor este o funcție a densității traficului:

$$v(x, t) = F(C(x, t)) \quad (2.7)$$

O soluție analitică a acestor ecuații pentru o rețea de străzi este greu sau chiar imposibil de găsit. În practică, modelul este discretizat în timp și în spațiu, pentru a permite o simulare pe computer a ecuațiilor diferențiale care descriu comportamentul traficului într-o rețea de străzi [21].

Discretizarea în funcție de timp se realizează prin intermediul intervalelor de timp Δt care de obicei ating valoarea de 15 secunde. Discretizarea în funcție de spațiu se obține prin împărțirea străzii în secțiuni de anumite lungimi care variază între 500-1000 metri. Din motive de stabilitate, Papageorgiou în [9] consideră că discretizarea trebuie să fie de așa natură încât $\Delta x > v \Delta t$ pentru toate secțiunile din rețea.

Astfel, prin discretizarea ecuației (2.5) se obține relația:

$$C_j(k+1) = C_j(k) + \frac{\Delta t}{l_j \cdot n_j} \cdot [q_{in,j}(k) - q_{out,j}(k)] \quad (2.8)$$

Unde:

$C_j(k)$ - densitatea medie în secțiunea j și perioada k , [veh/m];

l_j - lungimea unei secțiuni de șosea [m],
 n_j - numărul de benzi,
 $q_{in,j}$ - fluxul de intrare [veh/s] în secțiunea j ,
 $q_{out,j}$ - fluxul de ieșire [veh/s] în secțiunea j ,
 Δt - perioada de înregistrare [s].

Această relație reprezintă ecuația care arată modificarea densității traficului într-o secțiune j în intervalul de timp $[k, k+1]$.

Formula empirică pentru calculul vitezei medii a fost propusă de [7] și este:

$$v_j(k) = V^e(C_j(k)) = v_f \cdot \left[1 - \left[\frac{C_j(k)}{C_{jam}} \right]^a \right]^\beta \quad (2.9)$$

Unde:

$v_j(k)$ - viteza medie pe secțiunea j și perioada k , [m/s]

v_f - viteza de flux liber [m/s]

V^e - viteza medie de echilibru [m/s]

C_{jam} - densitatea traficului în situația apariției congestiei la care viteza de deplasare devine zero, [veh/m].

a, β - parametri adimensionali cu valori în funcție de condițiile existente în trafic.

Luând în considerare ecuația (2.6), prin discretizare în timp și spațiu se obține următoarea relație:

$$q_j(k) = C_j(k) \cdot v_j(k) \cdot n_j \quad (2.10)$$

Prin împărțirea unei rețele de străzi în mai multe secțiuni și scriind ecuațiile (2.8), (2.9) și (2.10), pentru fiecare secțiune se poate pune în aplicare un model de simulare.

Modelul permite să se simuleze densitatea traficului, viteza medie și intensitatea traficului în fiecare secțiune. Acești parametri sunt importanți pentru optimizarea strategiilor de control al traficului.

Acest model al lui LWR se confruntă cu câteva probleme și anume:

- nu poate fi aplicat în cazul intersecțiilor semaforizate deoarece traficul nu se poate împărți
- modificarea vitezei pe o secțiune de stradă analizată se realizează în funcție de densitatea fluxului pe fiecare secțiune, fapt care nu e tot timpul realizabil.

2. Modelul Payne

Cel de al doilea model macroscopic de trafic este cel al lui Payne [8]. Acest model rezolvă problemele modelului LWR. Modelul Payne conține două ecuații

diferențiale. Prima ecuație descrie conservarea vehiculelor și este aceeași ca și la modelul LWR.

Observațiile cu privire la trafic arată că viteza medie într-o secțiune nu depinde numai de densitatea traficului în această secțiune, ci și de starea traficului din secțiunile învecinate, lucru care afectează dinamica vitezei medii. Trei mecanisme majore care influențează viteza medie se pot distinge: relaxare, convecție și anticipare. Astfel, ecuația (2.9) este înlocuită de:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{V^e(C) - v}{T} - \frac{c_0^2}{C} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.11)$$

Unde:

c_0 - constanta de anticipare
 T - constanta de relaxare.

Ecuația (2.11) este derivată pentru un simplu model "car following" care descrie comportamentul și interacțiunea vehiculelor pentru ca acestea să urmărească un vehicul de pe drum. Aceasta descrie schimbarea vitezei medii într-o secțiune de drum într-un interval de timp prin convecție (termen 1), relaxare (pe termen 2) și anticipare (termen 3).

La fel ca și modelul LWR modelul Payne este discretizat pentru punerea în aplicare pe un computer. Prin discretizarea ecuației (2.11) se obține relația:

$$v_k(k+1) = v_j(k) + \frac{\Delta t}{l_j} \cdot v_j(k) \cdot [v_{j-1}(k) - v_j(k)] + \frac{\Delta t}{T} \{V[C_j(k)] - v_j(k)\} - \frac{v \cdot \Delta t \cdot [C_{j-1}(k) - C_j(k)]}{T \cdot l_j \cdot [C_j(k) + K]} \quad (2.12)$$

Unde:

T - constanta de timp
 v - constanta de anticipare
 K - parametru de ajustare
 $V[C_j(k)]$ - viteza medie în echilibru.

Viteza medie în echilibru este o funcție empirică a densității traficului și are nevoie să fie calibrată.

În conformitate cu ecuația (2.12), viteza de la punctul j la momentul $k+1$ este egală cu viteza de la punctul j la momentul k , plus o corecție de convecție, relaxare, anticipare [21]:

- *Convecția* (termenul 1 din (2.11) și 2.12)) are interpretarea: Vehiculele care se deplasează de la secțiunea $j-1$ la secțiunea j nu se adaptează la viteza lor instantanee. Ca exemplu este: un conducător auto care circulă cu o viteză mare prin secțiunea $j-1$, va reduce treptat viteza până va ajunge la viteza care îi asigură un confort pentru punctul j . În timpul procesului de frânare, conducătorul auto constată că viteza sa este mai mare decât viteza de echilibru în punctul j . Astfel, cu cât crește viteza medie în secțiunea $j-1$, cu atât se mărește și viteza medie în punctul j . Același lucru apare și în situația când vehicule care se deplasează cu o viteză redusă în secțiunea $j-1$ au

nevoie de timp pentru a accelera la o viteză medie mai mare pentru punctul j . Convecția este proporțională cu diferența dintre vitezele de deplasare de pe cele două secțiuni, cu cât această diferență este mai mare, cu atât vehiculele vor avea nevoie de mai mult timp pentru a accelera sau reduce viteza, fapt ce are și mai mare impact asupra vitezei medii în secțiune. Convecția este de asemenea proporțională cu viteza medie în secțiune. Impactul convecției scade cu lungimea secțiunii.

- *Relaxarea* (pe termen 2 în (2.11) și (2.12)): Termenul de relaxare descrie faptul că toți conducătorii au tendința de a ajunge la viteza dorită. În cazul în care viteza reală este mai mică, șoferul va accelera, în cazul în care viteza reală este mai mare, șoferul va frâna. Urmărind comportamentul conducătorilor auto, se observă că există o dependență între densitate și viteză. Cu cât este mai mare diferența dintre viteza reală și cea dorită, cu atât este mai mare acest factor de relaxare. Constanta de timp T depinde de rapiditatea șoferilor. Astfel, cu cât T este mai mare, cu atât șoferii vor reacționa mai lent în schimbarea vitezei și factorul de relaxare va fi mai mic.
- *Anticiparea* (termen 3 în (2.11) și (2.12)): Termenul de anticipare ia în considerare faptul că șoferii iau în calcul ceea ce văd în fața vehicului lor. În cazul în care un șofer observă că densitatea traficului înainte este mai mare, el va anticipa și va încetini. În caz contrar, dacă un șofer observă că densitatea traficului înainte este mai mică decât densitatea curentă, el va accelera. Constanta de anticipare este proporțională cu diferența dintre densitatea relativă între secțiunile j și $j+1$. Constanta de timp T descrie rapiditatea în răspuns a șoferilor. Parametrii v și K permit reglarea termenului de anticipare.

Diferența majoră dintre acest model și modelul LWR este ecuația dinamică pentru viteză.

3. Modelul lui Papageorgiou

În 1990, Papageorgiou [9] a adus două îmbunătățiri modelului Payne discretizat și anume tratează două situații importante pe autostradă ce au ca efect creșterea densității traficului. Prima situație este întâlnită în zonele de intrare pe șosea, iar a doua situație în zonele în care scade numărul de benzi de circulație.

În primul caz, tratează problema scăderii vitezei de deplasare în apropierea intrărilor (rampelor) pe autostradă, fapt care se datorează creșterii densității traficului.

Vehiculele care urmează să intre pe autostradă influențează vehiculele care deja se deplasează pe autostrada prin schimbările de bandă pe care acestea din urmă le vor realiza pentru a oferi accesul pe prima bandă. Această schimbare de bandă influențează fluxul de trafic și astfel rezultând o scădere a vitezei de deplasare [21].

Situația prezentată mai sus a fost modelată în [9] prin adăugarea unui termen la relația (2.12), numit termen de amestecare:

$$-\left(\frac{\delta \cdot \Delta t}{l_j \cdot n_j}\right) \cdot \frac{q_u(k) \cdot v_j(k)}{C_j(k) + L} \quad (2.13)$$

Unde:

δ - parametru adimensional de ajustare a termenului de amestecare.

L - parametru de ajustare a termenului de amestecare pentru viteză.

$q_u(k)$ - fluxul de vehicule la intrarea pe autostradă(veh/s).

Asfel, relația (2.12) va arăta ca cea de mai jos:

$$v_k(k+1) = v_j(k) + \frac{\Delta t}{l_j} \cdot v_j(k) \cdot [v_{j-1}(k) - v_j(k)] + \frac{\Delta t}{\tau} \{V[C_j(k)] - v_j(k)\} - \frac{v \cdot \Delta t \cdot [C_{j-}(k) - C_j(k)]}{\tau \cdot l_j \cdot [C_j(k) + K]} - \left(\frac{\delta \cdot \Delta t}{l_j \cdot n_j} \right) \cdot \frac{q_u(k) \cdot v_j(k)}{C_j(k) + L} \quad (2.14)$$

În cel de a doilea caz, când numărul de benzi pe o autostradă scade, vehiculele care circulă pe benzile care dispar trebuie să fuzioneze în alte benzi. Banda de proces de schimbare și impactul său este aproape la fel ca și în situația descrisă mai sus [21]. Relația (2.15) este termenul ce se adaugă la ecuația (2.12), pentru a ține o reducere de benzi între secțiunea j și $j + 1$:

$$- \left(\frac{\theta \cdot \Delta t}{l_j \cdot \lambda_j} \right) \cdot \frac{\Delta \lambda_j \cdot C_j(k)}{C_{jam,j}} \cdot v_j^2(k) \quad (2.15)$$

Unde:

θ - parametru adimensional de ajustare.

λ_j - numărul de benzi din secțiunea j

$$\Delta \lambda_j = \lambda_j - \lambda_{j+1}$$

În final, modelul lui Payne îmbunătățit de Papageorgiou se prezintă sub forma [21]:

$$v_k(k+1) = v_j(k) + \frac{\Delta t}{l_j} \cdot v_j(k) \cdot [v_{j-1}(k) - v_j(k)] + \frac{\Delta t}{\tau} \{V[C_j(k)] - v_j(k)\} - \frac{v \cdot \Delta t \cdot [C_{j-}(k) - C_j(k)]}{\tau \cdot l_j \cdot [C_j(k) + K]} - \left(\frac{\delta \cdot \Delta t}{l_j \cdot n_j} \right) \cdot \frac{q_u(k) \cdot v_j(k)}{C_j(k) + L} - \left(\frac{\theta \cdot \Delta t}{l_j \cdot \lambda_j} \right) \cdot \frac{\Delta \lambda_j \cdot C_j(k)}{C_{jam,j}} \cdot v_j^2(k) \quad (2.16)$$

Ca și completare ulterioară la acest model a fost și modelul propus de Helbing [10], care ia în considerare ca și variabile densitatea traficului, viteza medie și variația vitezei. Helbing descrie modul în care traficul pe autostradă evoluează în timp și spațiu.

Studii și completări ulterioare au mai urmat, dintre aceste modele sunt menționate în [11], [12], [13], [14].

2.3. Indicatorii de performanță utilizați în analiza traficului rutier

Indicatorii de performanță au un rol important în aprecierea situațiilor/ condițiilor de trafic. De asemenea, aceștia sunt utili în procesul de dezvoltare și îmbunătățire a situațiilor existente de trafic, oferind posibilitatea de a observa performanțele și evoluția în timp. În continuare sunt prezentați o serie de indicatori de performanță. Acești indicatori se determină pe o distanță stabilită Δx și un anumit interval de timp Δt [15].

- *Viteza medie* [m/s]

$$v_{med} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (2.17)$$

- *Fluxul mediu sau debitul* [veh/s] - reprezintă numărul de vehicule care trec printr-o secțiune de drum într-un interval de timp specificat. Acest indicator se poate determina în mai multe moduri:

a)
$$q = \frac{N}{T} \quad (2.18)$$

Unde:

N - numărul de vehicule contorizate de detector în perioada de timp T ;

T - perioada de timp specificată în care se face măsurătoarea, (în secunde).

Acest parametru permite caracterizarea traficului derulat pe tronsoane de drum din punct de vedere al fluenței traficului, gradului de încărcare, astfel constituind o modalitate de cuantificare a eficienței utilizării arterelor rutiere [16].

b)
$$q = \frac{\sum_{i=1}^n q_i \times l_i}{L} \quad (2.19)$$

Unde:

n - numărul de sectoare de drum analizate,

l_i - lungimea sectorului de drum

q_i - fluxul de trafic

L - totalul lungimilor [15]:

$$L = \sum_{i=1}^n l_i \quad (2.20)$$

c)
$$q_{med} = v_{med} \cdot k_{med} \quad (2.21)$$

Unde:

k_{med} - densitatea medie

- *Densitatea* [veh/km]- reprezintă repartiția numărului de vehicule pe unitatea de lungime (km) a tronsonului analizat.[16]. Modul în care acest parametru se poate determina necesită în cele mai multe situații fotografii aeriene sau înregistrări video pentru sectorul de drum respectiv.

Matematic, densitatea fluxului de trafic se poate exprima cu ajutorul relației:

$$k = \frac{N}{l_j} \quad (2.22)$$

Unde:

k - densitatea exprimată în [veh/km]

N - numărul de vehicule

l_j - lungimea tronsonului la care se face raportarea fluxului

- *Lungimea cozilor de așteptare* [m]

$$l_q = k_{med} \cdot \Delta x \quad (2.23)$$

- *Distanța totală parcursă* [m]

$$\Delta x t = \sum_{i=1}^n q_i \cdot l_j \quad (2.24)$$

Unde:

n - numărul de sectoare de drum analizate

l_j - lungimea sectorului de drum

q_j - fluxul de trafic [15]

- *Timpul total petrecut în trafic*

$$\Delta t t = \sum_{i=1}^n \frac{l_j}{v_i} \quad (2.25)$$

Unde:

n - numărul de sectoare de drum analizate,

l_j - lungimea sectorului de drum

v_j - valoarea vitezei pe fiecare sector.

2.4. Analiza stadiului actual al metodelor de modelare și simularea traficului

Modelarea și metodele de simulare sunt elemente esențiale în proiectarea și operarea sistemelor de transport. Simularea traficului reprezintă o modelare matematică a sistemului de transport prin aplicarea unor produse software pentru a ajuta la o mai bună proiectare și exploatare a planului sistemului de transport.

Necesitatea dezvoltării comportamentului traficului rutier în marile orase a generat creșterea tot mai mare a numărului de sisteme software utilizate în scopul îmbunătățirii condițiilor de trafic.

Așadar, în acest domeniu liderul pe piața mondială în materie de produse software este ocupat de PTV, deoarece acesta oferă un nivel ridicat de integrare în cadrul procesului global de planificare a transportului și în operațiunile de transport. PTV-ul are ca și produse de bază VISUM și VISSIM care sunt utilizate în soluționarea problemelor de trafic. VISSIM este programul de simulare microscopică pentru modelarea fluxului de trafic multi-modal. Cu un nivel înalt de detaliu se simulează cu exactitate traficul urban și cel de pe autostradă, inclusiv pietonii, bicicliștii și vehiculele motorizate. VISSIM este instrumentul ideal pentru profesioniștii în transport rutier, pentru a simula diferite scenarii de trafic înainte de a începe punerea în aplicare. VISUM este un sistem complet, un software flexibil pentru planificarea transportului, modelarea cererii de deplasare și de gestionare a datelor de rețea. VISUM este utilizat pe toate continentele pentru aplicații metropolitane, regionale și la nivel național de planificare [17].

AIMSUN este un sistem software utilizat pentru modelarea transportului, dezvoltat și comercializat de TSS-Transport Simulation System [18]. AIMSUN oferă posibilitatea modelării macroscopice, mesoscopice și microscopice în cadrul unei singure aplicații software. Acest lucru permite vizualizarea 2D și 3D a scenariilor de transport la un nivel înalt de detaliu. AIMSUN este utilizat pentru a îmbunătăți infrastructura, a diminua emisiile poluante, a reduce congestia și permite proiectarea propriu zisă a rețelei urbane.

Synchro plus SimTraffic este un pachet software dezvoltat de TRAFFICWARE. *Synchro* permite modelarea și optimizarea semnalelor de sincronizare a traficului pentru intersecțiile semnalizate. SimTraffic este folosit pentru efectuarea simulării microscopice și animației traficului auto în intersecțiile semnalizate, realizate în *Synchro* [19].

Un alt produs software este Transyt dezvoltat de către TRL- Transport Research Laboratory [20]. Transyt poate modela rețelele coordonate și optimiza timpii de semaforizare pentru a reduce cozile de așteptare, întârzierile și obține un cost cât mai economic al congestiei.

În afară de produsele software prezentate mai sus, mai există și alte simulatoare care ajută la soluționarea problemelor care apar în trafic. În alegerea unui astfel de simulator se au în vedere parametri care se doresc analizați, condițiile de trafic, etc.

2.5. Concluzii

În acest capitol s-a realizat o sinteză asupra domeniului modelării traficului rutier. În prima parte a acestui capitol au fost prezentate concepte generale legate de modelarea traficului rutier. S-a realizat o trecere în revistă a tipurilor de metode existente în modelarea traficului rutier, punctând utilitatea fiecăruia.

Pornind de la descrierea diagramei fundamentale a fluxului de trafic a lui Greenshields, s-a realizat o sinteză asupra evoluției modelării în traficul rutier. De asemenea, au fost definiți și explicați principalii indici de performanță utilizați în procesul de modelare și analiză a traficului rutier.

Partea ce încheie acest capitol prezintă o analiză a metodelor curente de modelare și simulare a traficului rutier urban. Pe baza studiului bibliografic s-a realizat o scurtă sinteză asupra celor mai des utilizate produse software de modelare și simulare a traficului, subliniind gradul de aplicabilitate a acestora.

În cadrul acestui capitol au fost prezentate concepte teoretice susținute de 25 de relații necesare în realizarea modelării macroscopice a traficului rutier, acest lucru oferind un suport teoretic în proiectarea și dezvoltarea sistemelor de trafic rutier.

3. MODELAREA ANALITICĂ A TRAFICULUI RUTIER CU ELEMENTE DIN TEORIA ȘIRURILOR DE AȘTEPTARE

3.1. Modele analitice de cozi de așteptare

Teoria cozilor de așteptare este văzută ca o ramură a teoriei probabilităților aplicate. Teoria cozilor de așteptare utilizează o varietate de tehnici matematice pentru analiza modelelor de cozi.

Modelarea unui sistem cu ajutorul cozilor de așteptare este una din cele mai utilizate metode din literatura de specialitate. Modelele cu cozi de așteptare au fost extins aplicate în ultimele decenii ca fiind un instrument puternic de modelare, de evaluare a performanțelor și de predicție [24], [25], [26]. Ea a fost inițial aplicată în modelarea sistemelor de calcul [22], unde a obținut rezultate foarte bune, și s-a extins la alte sisteme reale [23].

O coadă de așteptare constă în implementarea unei liste de așteptare a unor job-uri pentru obținerea unui serviciu. Serviciul poate să fie furnizat de unul sau mai multe servere care lucrează în paralel. Acest ansamblu de coadă de așteptare și serverele de furnizare de servicii poartă denumirea de centre de servire [26].

Un model de bază a unui centru de servire este prezentat în mod schematic în figura 3.1:

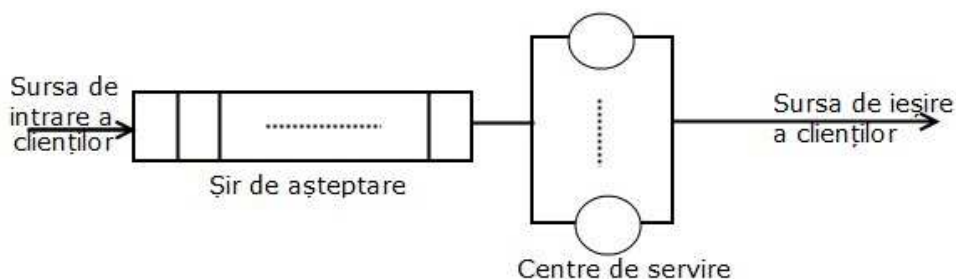


Fig.3.1 Modul de reprezentare a unui centru de servire

Un model de cozi de așteptare constă în unul sau mai multe servere. Clienții sosesc în centrul de servire în mod aleatoriu, stau în lista de așteptare până în momentul când un server este liber, obțin serviciul dorit și părăsesc sistemul. Un client care părăsește un centru de servire poate intra într-un alt centru de servire sau să părăsească sistemul. Un client trebuie să sosească în sistem dintr-o sursă externă, să petreacă un timp în sistem și să îl părăsească mai apoi.

În scopul de a defini corect un model de cozi de așteptare este necesară descrierea unor mărimi ce au în vedere [26], [27], [28], [29]:

- Procesul de sosire a clienților

În cadrul acestui proces trebuie luată în calcul rata sau frecvența de sosire a clienților în sistem.

Rata de sosire - Arrival rate (λ) definește numărul de clienți (N) sosiți la centru de servire într-un interval de timp (t) și se determină astfel:

$$\lambda = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{N(t)}{t} \quad (3.1)$$

Intervalul de timp dintre două sosiri succesive la centrul de servire este denumit *interarrival times* T_w . Acesta este definit ca fiind inversul ratei de sosire:

$$T_w = \frac{1}{\lambda} \quad (3.2)$$

- Comportamentul clienților.

Clienții pot să fie răbdători și dispuși să aștepte (pentru o lungă perioadă de timp) sau clienții pot fi nerăbdători și pleacă după un timp.

- Timpul de servire

Cantitatea de servicii solicitată de un client atunci când a ajuns la centrul de servire este definită de *service demand* (*cererea de servire*) și este notată cu S . O cerere de servire este exprimată în unități de timp.

Numărul de unități de servicii furnizate de un server pe unitatea de timp reprezintă *service rate* (*rata de servire*) și este notată cu μ .

Raportul dintre *service demand* și *service rate* este cantitatea de timp petrecut de server pentru fiecare client, adică *service time* și are următoarea formulă:

$$T_s = \frac{S}{\mu} \quad (3.3)$$

- Modalitatea de servire - Queueing Discipline.

Queueing discipline specifică modul în care clienții din coada de așteptare sunt serviți de către server. Cele mai des folosite metode sunt:

- FiFo (first-in-first-out) - un client care găsește centrul de servire ocupat merge în coadă și va fi următorul servit.

- LIFO (last-in-first-out) - un client care găsește centrul de servire ocupat trece imediat la capul cozii, urmând ca după eliberarea centrului de servire să fie următorul servit, având în vedere că nu mai ajung alți clienți.

- Random Service - clienții din coadă sunt serviți în ordine aleatorie.

- Round Robin - fiecare client primește un anumit timp limită. Dacă serviciul său nu este finalizat, acesta va reintra în coadă.

- Priority Disciplines - fiecare client are o prioritate (static sau dinamic), serverul selectează întotdeauna clienții cu cea mai mare prioritate. Acest sistem poate folosi preempțiune sau nu.

- Locul de așteptare

Trebuie să existe anumite limitări în ce privește numărul de clienți în sistem. Determinarea dimensiunii unui buffer/depozit/sala de așteptare reprezintă un aspect important în proiectarea unei rețele.

În scopul identificării modelelor, Kendall a fost primul care a propus o clasificare a acestora utilizând o codificare de forma: $a/b/c$ în care "a" specifică distribuția timpului de sosire, "b" indică distribuția timpului de servire, iar cea de-a 3-a literă "c" specifică numărul de stații de servire.

Pentru literele "a" și "b", cele mai frecvente abrevieri sunt următoarele:

- M(Markov) – reprezintă o distribuție exponențială
- D - reprezintă o distribuție deterministă
- G - reprezintă o distribuție generală
- E - reprezintă o distribuție Erlang
- H - reprezintă o distribuție Hyperexponențială
-

Câteva exemple de modele sunt : $M/M/1$, $M/M/c$, $M/G/1$, $G/M/1$ și $M/D/1$. Notația poate fi extinsă cu o literă suplimentară pentru a acoperi alte modele de așteptare. De exemplu, un sistem cu timpul de succesiune dintre doi clienți și cu timpul de servire exponențial, cu un server și care are camera/locul de așteptare numai pentru N clienți (inclusiv unul în funcțiune) este abreviat prin codul de patru litere $M/M/1/N$.

În modelul de bază, clienții ajung unul câte unul și fiind întotdeauna permis să intre în sistem, există întotdeauna loc, nu există reguli de prioritate și clienții sunt serviți în ordinea sosirii. Acesta va fi indicat în mod explicit (de exemplu, prin litere suplimentare) atunci când una dintre aceste ipoteze nu este deținută [29].

Modelarea cu cozi de așteptare prezintă ca și avantaj ușurința implementării cu ajutorul informațiilor de trafic în timp real. În literatură de specialitate se regăsesc două tipuri de abordări de unități de măsură a lungimii cozilor de așteptare și anume: numărul de vehicule care se află în coada de așteptare și lungimea efectivă a cozii de așteptare care se măsoară în metri.

Pentru a măsura performanța unui astfel de model se folosesc mai multe mărimi. În continuare sunt prezentate cele mai importante mărimi ce caracterizează un astfel de model.

3.2. Indicatorii de performanță

Un model de cozi de așteptare este un model probabilistic dinamic deoarece folosește probabilități de a reprezenta evoluția sistemului de-a lungul timpului.

Cei mai simpli indicatori de performanță sunt valorile medii pentru numărul clienților ce se află în sistem la un moment dat și timpul mediu de răspuns pentru un client. În continuare vom defini câteva mărimi ce ajută la calcularea acestor valori [26].

Notăm cu n_s numărul de clienți aflați în sistem la un moment de timp s . Pentru aceasta folosim o variabilă aleatoare n a cărei medie și valori pot fi calculate folosind o distribuție de probabilitate. Valoarea dorită pentru numărul de clienți ce se află la un moment dat în sistem este definită de n clienți și se calculează astfel [50]:

$$E[n^k] = \sum_{i=0}^{\infty} i^k \text{Prob}\{n = i\} \quad (3.4)$$

Dacă se consideră că $\text{Prob}\{n=i\}$ și $E[n^k]$ să fie egale cu valoarea medie pe un interval infinit de lung în timp avem [50], [26]:

$$\begin{aligned} \text{Prob}\{n = i\} &= \lim_{s \rightarrow \infty} (\text{prima unitate de timp } s \text{ cand } i \text{ clienti sunt in sistem}) \\ E[n^k] &= \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{1}{s} \int_0^s [n_u]^k du \end{aligned} \quad (3.5)$$

Fiecare client j ce sosește în sistem trebuie să petreacă un anumit timp până când acesta este servit. Definim acest timp ca fiind timpul de răspuns pentru clientul j și îl notăm cu r_j . Dacă se consideră că $\text{Prob}\{r \leq t\}$ și $E[r^k]$ sunt egale cu medii peste un număr infinit de clienți vom avea următoarele formule pentru funcția de distribuție de probabilitate și valoarea așteptată [50], [26].

$$\begin{aligned} \text{Prob}\{r \leq t\} &= \lim_{J \rightarrow \infty} \left(\begin{array}{l} \text{parte din primii } J \text{ clienti care sosesc a caror} \\ \text{timp de raspuns este mai mic sau egal cu } t \end{array} \right) \\ E[r^k] &= \lim_{J \rightarrow \infty} \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J r_j^k \end{aligned} \quad (3.6)$$

Dacă sistemul este unul stabil ($E[n]$ și $E[r]$ sunt finite), atunci capacitatea/ *throughput* Λ trebuie să fie egală cu rata pe termen lung pentru sosirea clienților, unde Λ este definit ca [50], [26]:

$$\Lambda = \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{1}{s} (\text{numarul de clienti care parasesc sistemul in prima unitate de timp } s) \quad (3.7)$$

Momentul în care un server este ocupat, se spune că acest centru de servire este utilizat. Dacă notăm cu b_s numărul de servere ocupate la momentul de timp s și definim gradul de utilizare U (utilization) atunci se obține:

$$U = \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{1}{s} \int_0^s b_u du \quad (3.8)$$

3.3. Analiza stadiului actual al modelării traficului rutier cu elementele din teoria șirurilor de așteptare

Modelarea unui sistem cu ajutorul cozilor de așteptare este una din cele mai utilizate metode din literatura de specialitate.

Cercetările existente în literatura de specialitate care tratează problemele de trafic sunt axate pe optimizarea și evaluarea performanțelor sistemului [35].

În [36], a fost propusă simularea unei rețele de trafic cu ajutorul cozilor de așteptare având o capacitate finită. Analizând traficul din orasul Lausanne în [37], 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.

O altă modalitate de simulare a traficului urban printr-un set de intersecții modelate analitic cu ajutorul unei rețele de cozi de așteptare, a fost propusă de [38], [39]. Ambele sunt bazate pe o metodă de expansiune și încearcă definirea traficului urban ca fiind o extensie a traficului pe autostradă.

O analiză excelentă pentru modele analitice bazate pe cozi de așteptare pentru intersecțiile semaforizate și nesemaforizate o oferă Heidemann în [40], [41]. Aceste modele reușesc să determine o descriere realistă a unui segment de drum dintr-o intersecție utilizând teoria șirurilor de așteptare. Din păcate, fiind o metodă analitică, ea nu poate fi generalizată la segmente multiple de drum sau la multiple intersecții.

Mai recent, în [42] se încearcă să se simuleze o intersecție semaforizată cu multiple benzi de acces. Autorul definește o coadă pentru fiecare sector al intersecției și calculează valorile indicilor de performanță atașați. În acest mod se determină dacă există situații de congestie precum și momentul în timp în care acestea sunt posibile să apară.

În [80], autorii propun un nou model de schemă de detectare a congestiei de trafic bazat pe comunicarea între vehicule și unitatea de la marginea drumului (RSU). În acest model de schemă, lungimea cozii de așteptare este utilizată pentru a identifica starea traficului în intersecții. Pentru a se asigura transmiterea informației din coada de așteptare (TI), autorii au apelat la o strategie "restricted greedy forwarding (RGF)", care se propune în contextul de difuzare multi-salt. Un indicator important care s-a avut în vedere în acest caz este capacitatea, indice utilizat pentru a descrie status-ul congestiei. Aceasta abordare oferă posibilitatea de calcul a capacității în timp real prin poziția din coada de așteptare a vehiculelor.

O altă lucrare [81] propune compararea performanței pentru controlul optim al semnalelor de trafic pe baza a două metode: M/M/1 și modele de așteptare D/D/1, și abordarea Q-learning. În primul rând, s-au utilizat modelele M/M/1 și D/D/1 pentru a minimiza media de timp de așteptare în intersecție, lucru care a condus la obținerea unei derivări a împărțirii optime a timpului de semaforizare. Metoda Q-learning a fost propusă în combinație cu utilizarea modelului de transmisie celulară macroscopică la actualizarea stării dinamice a vehiculului asupra acțiunilor Q-learning. Aceste două abordări au fost comparate în ceea ce privește capacitatea de rețea și întârzierea medie pe vehicul/ întreaga călătorie în nouă scenarii. Rezultatele simulării de la platforma AIMSUN arată că abordarea Q-learning poate îmbunătăți foarte mult capacitatea intersecției și poate reduce în mod

semnificativ întârzierea medie pe întreaga călătorie cu abordările respective M/M/1 și D/D/1.

3.4. Modelul lui Jackson

Teoria șirurilor de așteptare reprezintă un studiu matematic a cozilor de așteptare. Această teorie a fost concepută pe baza teoriei probabilităților, astfel oferind posibilitatea de predicție a timpilor de așteptare la coadă, a lungimii acestora etc. Teoria cozilor de așteptare este cel mai des utilizată în cercetare deoarece poate furniza rezultate folosite în scopul luării deciziilor aferente studiului.

O dezvoltare semnificativă în teoria rețelelor cu cozi de așteptare o au rețelele propuse de Jackson, care sunt o clasă de rețele de șiruri de așteptare în care distribuția de echilibru este simplu de calculat, și are o soluție de forma-produs [30], [31].

Acestea sunt foarte populare în aplicații practice ce au la bază teoria cozilor de așteptare pentru că oferă posibilitatea să se calculeze explicit distribuția lor invariantă și are o formă deosebit de simplă.

O rețea care constă dintr-un număr finit de i cozi se numește rețea Jackson în cazul în care:

- Procesele de sosire în diferite cozi sunt independente de distribuția Poisson. Se notează cu λ și indică rata de sosire în coada i .
- Fiecare coadă are un singur server și funcționează pe principiul FCFS, iar timpul de servire a clienților în fiecare coadă sunt variabile aleatoare exponențiale, cu o distribuție $Exp(\mu_i)$ la coada i . În fiecare coadă, timpul de servire a unui client este conturat independent de timpul de servire de la alte cozi. Această dependență nu afectează semnificativ comportamentul sistemului.
- Modul de rutare este Markovian: Un client care termină serviciul la coada i , pleacă spre o altă coadă. Clientul alege următoarea coadă j în mod aleatoriu cu o probabilitate $q_{i,j}$ sau iese din rețea cu probabilitatea $q_{i,d}$ (rutare probabilistică). Modelul poate fi extins pentru a acoperi cazul de rute prestabilite (traseu fixat/ales)
- Rețeaua este deschisă, de exemplu, cu o probabilitate de unu, fiecare client poate vizita doar un număr finit de cozi înainte de a părăsi rețeaua.[32]

O rețea de cozi de așteptare se numește deschisă atunci când clienții din exterior intră în sistem sau aceștia pot părăsi rețeaua. Clienții pot ajunge din exteriorul rețelei la fiecare nod și pot părăsi rețeaua de la orice nod.

O rețea de cozi de așteptare este denumită o rețea închisă atunci când clienții nu pot nici să intre și nici să părăsească rețeaua. Numărul de clienții într-o rețea închisă este constant. O rețea în care un client intră ori de câte ori un client părăsește sistemul poate fi considerată ca fiind una închisă.

Un sistem ce se modelează printr-o rețea cu cozi de așteptare deschisă este de forma celui din figura de mai jos:

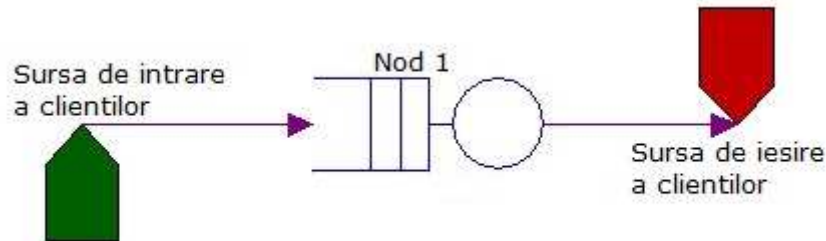


Fig.3.2 Reprezentarea grafică a unei rețele cu șiruri de așteptare deschisă.

În modelul de mai sus se poate vizualiza sursa de intrare reprezentată prin culoarea verde și cu culoarea roșie sursa de ieșire. Sursa de intrare este singura care generează fluxul de clienți în sistem.

O stație, adică un nod, în rețea reprezintă o resursă în sistem real. În principiu, serviciile pot fi transferate între oricare două noduri ale rețelei [33].

Nodurile sau centrele de servire sunt redată printr-un server și o coada de așteptare, care utilizează un anumit model ce are în vedere modalitatea de servire, specifică distribuția timpului de sosire, indică distribuția timpului de servire și specifică numărul de stații de servire.

Modul în care sunt dirijați clienții ce intră în sistem este redat prin matricea de rutare q_{si} sau matricea probabilităților de tranziție; matrice care descrie contribuția fiecărei surse de intrare în rețea la fiecare nod al rețelei existent în rețea. Această matrice nu are intrări negative, și toate sumele sale de pe rânduri trebuie să fie mai mici sau egale cu 1.

3.4.1. Modelul lui Jackson pentru rețele cu șiruri de așteptare deschise

3.4.1.1. Teorema lui Jackson

Teorema lui Jackson poate fi folosită pentru a analiza o rețea de cozi. Teorema se bazează pe trei ipoteze:

- Rețeaua de cozi de așteptare constă din m noduri, fiecare dintre ele prevede o servire independentă exponențială.
- Clienții care vin din afara sistemului la oricare din noduri sosesc cu o rată Poisson.
- Odată servit la un nod, un client merge la unul dintre celelalte noduri cu o probabilitate fixă sau în afara sistemului.

Teorema lui Jackson afirmă că într-o rețea de cozi, fiecare nod este un sistem de așteptare independent, cu o intrare cu distribuție Poisson determinat de principiile de partiționare. Astfel, fiecare nod poate fi analizat separat de celelalte folosind M/M/1 sau model M/M/N, iar rezultatele pot fi combinate prin metode statistice obișnuite.

a) Concepte utilizate

Din punct de vedere topologic, o rețea reprezintă un graf a cărui noduri reprezintă centre de servire, în timp ce arcele definesc modalități de interconectare a acestora. Rețeaua se consideră deschisă dacă este prezentă o legătură cu exteriorul - prin existența unei surse de clienți cât și a unei destinații a acestora [43], [26].

Modul de configurare a unei rețele de șiruri de așteptare deschisă este ilustrat în figura de mai jos:

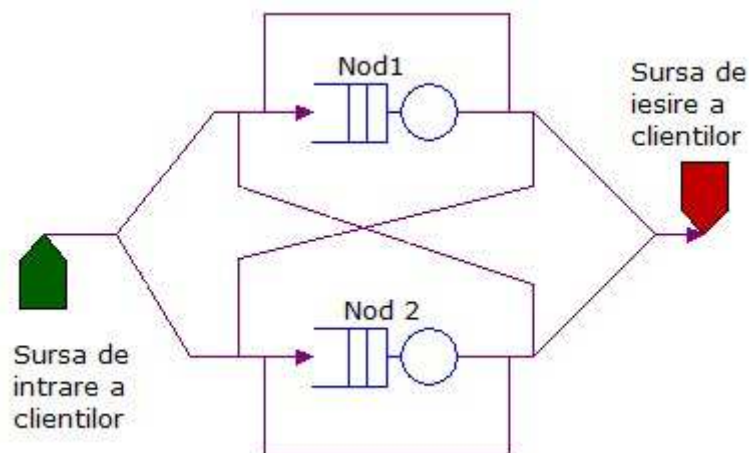


Fig.3.3 Modul de configurarea a unei rețele cu șiruri de așteptare deschisă

Starea unei rețele deschise la un moment dat este dată de numărul de clienți prezenți în fiecare centru de servire. Numărul acestora este dependent de momentul în care este analizată rețeaua. Numărul clienților reprezintă realizările unei variabile aleatoare $N_i(t)$ în diferite noduri $i = 1, \dots, M$, având ca semnificație numărul de clienți la centrul de servire i . Starea rețelei se va preciza prin numărul de clienți definiți prin vectorul:

$$\underline{N}(t) = (N_1(t), \dots, N_i(t), \dots, N_M(t)) \quad (3.9)$$

Numărul de clienți la un moment dat va fi dat de:

$$N = \sum_{i=1}^M N_i(t) \quad (3.10)$$

Procesul de generare a clienților de către sursă este Poisson cu frecvența: $\lambda(N)$.

Dacă q_{sj} definește probabilitatea ca un client să ajungă de la sursă la centru de servire i , atunci procesul de sosire a unităților la fiecare centru va fi de asemenea un proces Poisson cu frecvența $\lambda(N) \cdot q_{sj}$.

Modul de rutare a clienților între stațiile centrelor de servire sau între stații și destinații este definit de probabilitățile de tranziție: $q_{i,j}$, ($i=1,2,\dots,M$; $j=1,2,\dots,M$; destinație).

Cererea de serviciu a unui client la centrul de servire i este dată de o distribuție exponențială. Deoarece în centrul de servire i pot exista una sau mai multe stații de servire, este evident că frecvența de servire a centrului i va fi dependentă de numărul de clienți prezenți în centrul i . Dacă se notează cu $n_i = N_i(t)$ numărul de clienți din centrul i , atunci frecvența de servire va fi $\mu_i(n_i)$.

b) Determinarea distribuției clienților în rețea

Studiul unei rețele cu șiruri de așteptare presupune determinarea probabilității ca în rețea să fie prezentă configurația de clienți: $\underline{n} = (n_1, \dots, n_i, \dots, n_M)$ la un moment de timp t . Atunci când rețeaua se află în starea n , vom avea $N=n$. Probabilitatea ca rețeaua să se găsească în starea n este dată de:

$$P(\underline{n}; t) = P(N(t) = n) \quad (3.11)$$

Pentru a determina sistemul de ecuații diferențiale a căror soluție este $P(\underline{n}; t)$ se studiază comportamentul rețelei în intervalul $[t, t + \Delta t]$, presupunând ca aceasta se găsește la momentul $t + \Delta t$ în starea \underline{n} [43] [26].

Pe durata acestui interval starea rețelei este dată de o reuniune de evenimente de forma:

1. La sfârșitul intervalului de timp nu s-a întâmplat nimic, starea rețelei de la momentul t este aceeași cu cea de la sfârșitul intervalului dt , deci tot \underline{n} . Probabilitatea ca sistemul să fie tot în starea \underline{n} este dată de următoarea reuniune de evenimente:

- Probabilitatea de a avea o sosire în intervalul dt este $\lambda(N)dt$
- Probabilitatea ca, clientul de la centrul i să își termine serviciul este $\mu_i(n_i)dt$, iar probabilitatea să se termine execuția la una din cele M stații

este $\sum_{i=1}^M \mu_i(n_i)dt$.

- Probabilitatea ca să nu se întâmple nimic : $1 - (\lambda(N) + \sum_{i=1}^M \mu_i(n_i))dt$.

Așadar, probabilitatea ca sistemul să fie în starea \underline{n} la momentul t și în intervalul dt și să nu se întâmple nimic este:

$$P(\underline{n}; t) \cdot \left[1 - (\lambda(N) + \sum_{i=1}^M \mu_i(n_i)) dt \right] \quad (3.12)$$

2. La începutul intervalului în sistem sunt prezenți $N - 1$ clienți și în intervalul dt intră în sistem un alt client. Se notează cu:

- $\underline{1}_j = [0, 0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0]$ - vectorul i unitate care este 1 în poziția i și 0 în restul celor M poziții.
- $P(\underline{n} - \underline{1}_j; t)$ - probabilitatea ca la centrul i să avem $n_j - 1$ clienți.

În situația când clientul care sosește trebuie să fie direcționat spre centrul de servire i (unde avem un client în minus), vom avea probabilitatea evenimentului și anume: $q_{si} \cdot P(\underline{n} - \underline{1}_j; t) dt$. Datorită faptului că stația i , unde avem un client în minus, poate fi oricare din cele M centre de servire, probabilitatea evenimentului este:

$$\sum_{i=1}^M q_{si} \cdot P(\underline{n} - \underline{1}_j; t) dt \quad (3.13)$$

Cunoscând acestea se obține probabilitatea ca sistemul să prezinte $N - 1$ clienți la momentul t și ca, clientul în minus sau care lipsește să sosească în intervalul dt cu destinația în centrul unde avem clientul lipsă, mai exact prin:

$$\lambda(N - 1) \cdot \sum_{i=1}^M q_{si} \cdot P(\underline{n} - \underline{1}_j; t) dt \quad (3.14)$$

3. La începutul intervalului în sistem sunt prezenți $N + 1$ clienți și în intervalul dt un client și-a terminat execuția și părăsește definitiv sistemul. Notăm cu $P(\underline{n} + \underline{1}_j; t)$ - probabilitatea ca la stația j să avem $n_j - 1$ clienți.

Atunci, probabilitatea ca, clientul din centrul j să își termine execuția și să plece definitiv în intervalul dt este: $P(\underline{n} + \underline{1}_j; t) \cdot \mu_j(n_j + 1) dt \cdot q_{jd}$.

Datorită faptului că centrul j poate fi oricare din cele M centre de servire, probabilitatea evenimentului căutat la momentul t are la una din centrele de servire un client în plus care își termină execuția și pleacă definitiv este:

$$\sum_{j=1}^M q_{jd} \cdot \mu_j(n_j + 1) \cdot P(\underline{n} + \underline{1}_j; t) dt \quad (3.15)$$

4. În sistem la momentul t avem la un centru de servire j un client în plus, în timp ce la centrul de servire i un client în minus. Probabilitatea ca să avem această configurație și ca în intervalul dt clientul din centrul j să își termine execuția și să fie direcționat spre centrul i unde avem un client în minus se calculează astfel:

Se notează cu:

- $\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{pentru } i = j \\ 0 & \text{pentru } i \neq j \end{cases}$, simbolul lui Kronecker.
- $P(\underline{n} + \underline{1}_j - \underline{1}_i; t)$ - probabilitatea ca la stația j să avem $n_j - 1$ clienți și la stația i să avem $n_i - 1$ clienți la momentul t .

Atunci, probabilitatea evenimentului ca în intervalul dt clientul din centrul j unde avem $n_j - 1$ clienți își termină execuția și pleacă spre centrul i unde avem $n_i - 1$ clienți este:

$$\mu_j(n_j + 1 - \delta_{ij}) \cdot P(\underline{n} + \underline{1}_j - \underline{1}_i; t) \cdot q_{ji} \cdot dt \quad (3.16)$$

În situația în care centrul j poate fi oricare din cele M centre de servire, iar i poate fi de asemenea oricare centru din cele M centre de servire, probabilitatea evenimentului căutat este:

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M q_{ji} \cdot \mu_j(n_j + 1 - \delta_{ij}) \cdot P(\underline{n} + \underline{1}_j - \underline{1}_i; t) \cdot q_{ji} \cdot dt \quad (3.17)$$

Reunind cele patru evenimente se obține ecuația:

$$\begin{aligned} P(\underline{n}; t + \Delta t) = & P(\underline{n}; t) \cdot \left[1 - (\lambda(N) + \sum_{i=1}^M \mu_i(n_i))dt \right] + \\ & + \lambda(N - 1) \cdot \sum_{i=1}^M q_{si} \cdot P(\underline{n} - \underline{1}_i; t)dt + \\ & + \sum_{j=1}^M q_{jd} \cdot \mu_j(n_j + 1) \cdot P(\underline{n} + \underline{1}_j; t)dt + \\ & + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M q_{ji} \cdot \mu_j(n_j + 1 - \delta_{ij}) \cdot P(\underline{n} + \underline{1}_j - \underline{1}_i; t) \cdot q_{ji} \cdot dt \end{aligned} \quad (3.18)$$

Această ecuație (3.18) se mai poate scrie și sub forma:

$$\begin{aligned}
 \frac{P(\underline{n}; t + \Delta t) - P(\underline{n}; t)}{\Delta t} &= P(\underline{n}; t) \cdot \left[1 - (\lambda(N) + \sum_{i=1}^M \mu_i(n_i)) \right] + \\
 + \lambda(N-1) \cdot \sum_{i=1}^M q_{si} \cdot P(\underline{n} - \underline{1}_i; t) &+ \sum_{j=1}^M q_{jd} \cdot \mu_j(n_j + 1) \cdot P(\underline{n} + \underline{1}_j; t) + \\
 + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M q_{ji} \cdot \mu_j(n_j + 1 - \delta_{ij}) \cdot P(\underline{n} + \underline{1}_j - \underline{1}_i; t) \cdot q_{ji} &
 \end{aligned} \quad (3.19)$$

Pentru $\Delta t \rightarrow 0$ se obține ecuația diferențială:

$$\begin{aligned}
 \frac{d(P(\underline{n}; t))}{dt} &= P(\underline{n}; t) \cdot \left[1 - (\lambda(N) + \sum_{i=1}^M \mu_i(n_i)) \right] + \\
 + \lambda(N-1) \cdot \sum_{i=1}^M q_{si} \cdot P(\underline{n} - \underline{1}_i; t) &+ \sum_{j=1}^M q_{jd} \cdot \mu_j(n_j + 1) \cdot P(\underline{n} + \underline{1}_j; t) + \\
 + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M q_{ji} \cdot \mu_j(n_j + 1 - \delta_{ij}) \cdot P(\underline{n} + \underline{1}_j - \underline{1}_i; t) \cdot q_{ji} &
 \end{aligned} \quad (3.20)$$

care are ca soluție $P(\underline{n}; t)$.

Deoarece o soluție analitică a lui $P(\underline{n}; t)$ nu se poate obține, se recurge la găsirea soluției corespunzătoare stării de echilibru a sistemului, în care dependența de timp nu mai apare, fapt care face ca $P(\underline{n}; t)$ să rămână constant. Rezultatul imediat este eliminarea dependenței de timp a lui $P(\underline{n}; t)$ având ca:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P(\underline{n}; t) = P(\underline{n}), \text{ ceea ce are ca urmare: } \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{d(P(\underline{n}; t))}{dt} = 0.$$

În aceste condiții ecuația diferențială (3.20) se mai poate scrie:

$$\begin{aligned}
 \lambda(N) \cdot P(\underline{n}) - \sum_{j=1}^M q_{jd} \cdot \mu_j(n_j + 1) \cdot P(\underline{n} + \underline{1}_j) &= \lambda(N-1) \cdot \sum_{i=1}^M q_{si} \cdot P(\underline{n} - \underline{1}_i) - \\
 - \sum_{i=1}^M \mu_i(n_i) \cdot P(\underline{n}) + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M q_{ji} \cdot \mu_j(n_j + 1 - \delta_{ij}) \cdot P(\underline{n} + \underline{1}_j - \underline{1}_i) &
 \end{aligned} \quad (3.21)$$

Dacă analizăm situația în care clientul se află în starea $\underline{n} = [0, 0, \dots, 0, \dots, 0]$ obținem următoarea relație:

$$\lambda(0) \cdot P(\underline{0}) = \sum_{j=1}^M q_{ji} \cdot \mu_j(1) \cdot P(\underline{1}_j) \quad (3.22)$$

Atunci prin recurență se obține:

$$\lambda(N) \cdot P(\underline{n}) = \sum_{j=1}^M q_{ji} \cdot \mu_j(n_j + 1) \cdot P(\underline{n} + \underline{1}_j) \quad (3.23)$$

Înlocuind relația (3.23) în ecuația diferențială (3.20) rezultă următoarea formă:

$$\begin{aligned} \lambda(N-1) \cdot \sum_{i=1}^M q_{si} \cdot P(\underline{n} - \underline{1}_i) - \sum_{i=1}^M \mu_i(n_i) \cdot P(\underline{n}) + \\ + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M q_{ji} \cdot \mu_j(n_j + 1 - \delta_{ij}) \cdot P(\underline{n} + \underline{1}_j - \underline{1}_i) = 0 \end{aligned} \quad (3.24)$$

Din cele prezentate mai sus rezultă că un sistem modelat printr-o rețea cu șiruri de așteptare apare ca o multitudine de centre de servire interconectate între ele pe de o parte, iar pe de altă parte interconectate cu exteriorul.

Deocamdată ecuația (3.24) nu face altceva decât să surprindă modul în care poate evolua configurația de clienți din sistem fără ca topologia rețelei să fie luată în considerare.

În continuare se prezintă procesul de încorporare în ecuația diferențială a topologiei rețelei, mai exact modul de interconectare a centrelor.

Pentru a reprezenta topologia unei rețele/modul de interconectivitate trebuie avute în vedere următoarele:

- Rețeaua este definită de un graf în care nodurile/intersecțiile sunt centrele de servire.

- Frecvența de sosire a clienților/ vehiculelor în centrul de servire i este λ_i .

- Topologia rețelei poate fi luată în considerare prin intermediul lui λ_i astfel:

Centrele de servire apar sub forma celei din figura 3.4, cu specificația că fiecare centru de servire contribuie la formarea fluxului de clienți care servesc în centrul i cu o anumită cantitate q_{ji} (matricea probabilităților de tranziție) [43],[44].

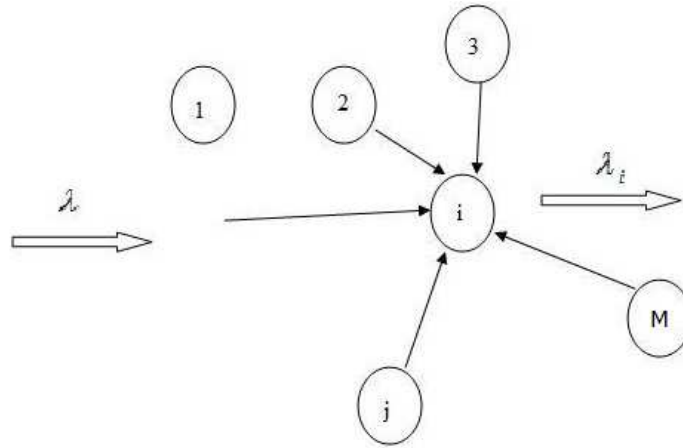


Fig. 3.4. Modul de configurare a centrelor de servire. [44].

În aceste condiții se poate scrie că:

$$\lambda_i = \lambda \cdot q_{si} + \sum_{j=1}^M \lambda_j \cdot q_{ji} \quad (3.25)$$

Unde:

q_{sj} - matricea probabilității de tranziție de la sursele de intrare spre nodurile rețelei, adică descrie contribuția fiecărei surse de intrare în rețea la fiecare nod. Sursa de intrare este cea care generează fluxul de clienți în sistem.

- Fiecare centru de servire poate însă prelucra o anumită cantitate de clienți care trec prin centrul de servire respectiv. Dacă notăm cu e_i capacitatea de trecere relativă a centrului i și o raportăm la fluxul total de clienți λ care intră în sistem vom putea nota că:

$$\lambda_i = e_i \cdot \lambda \quad (3.26)$$

Și ca urmare ecuația (3.25) se v-a putea scrie:

$$e_i = q_{si} + \sum_{j=1}^M e_j \cdot q_{ji} \quad (3.27)$$

Aceasta reprezintă ecuația care exprimă influența topologiei asupra fluxului de clienți din rețea. Mai exact, ecuațiile de mai sus sunt cunoscute ca și ecuațiile de trafic [33], [34]. Aceste ecuații caracterizează stabilitatea unei rețele Jackson. Mai precis, o rețea Jackson este stabilă dacă și numai dacă există o soluție a ecuațiilor de trafic ale căror componente sunt strict mai mici decât ratele cozilor corespunzătoare.

În continuare procedăm la concatenarea celor două efecte definite de ecuația diferențială (3.20) și ecuația care exprimă influența topologiei asupra fluxului de clienți din rețea, obținând astfel:

$$q_{si} = e_i - \sum_{j=1}^M e_j \cdot q_{ji} \quad (3.28)$$

Înlocuind q_{si} în ecuația diferențială vom avea:

$$\begin{aligned} \lambda(N-1) \cdot \sum_{i=1}^M (e_i - \sum_{j=1}^M e_j \cdot q_{ji}) \cdot P(\underline{n} - \underline{1}_i) - \sum_{i=1}^M \mu_i(n_i) \cdot P(\underline{n}) + \\ + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M q_{ji} \cdot \mu_j(n_j + 1 - \delta_{ij}) \cdot P(\underline{n} + \underline{1}_j - \underline{1}_i) = 0 \end{aligned} \quad (3.29)$$

Prin rearanjarea acestei ecuații vom obține:

$$\sum_{i=1}^M \left\{ \lambda(N-1) \cdot e_i \cdot P(\underline{n} - \underline{1}_i) - \mu_i(n_i) \cdot P(\underline{n}) - \sum_{j=1}^M q_{ji} \cdot (\lambda(N-1) \cdot e_j \cdot P(\underline{n} - \underline{1}_i) - \mu_j(n_j + 1 - \delta_{ij}) \cdot P(\underline{n} + \underline{1}_j - \underline{1}_i)) \right\} = 0 \quad (3.30)$$

Dacă se notează cu:

$$B_i(\underline{n}) = \lambda(N-1) \cdot e_i \cdot P(\underline{n} - \underline{1}_i) - \mu_i(n_i) \cdot P(\underline{n}) \quad (3.31)$$

Atunci ecuația de mai sus v-a apare sub forma de:

$$\sum_{i=1}^M \left\{ B_i(\underline{n}) - \sum_{j=1}^M q_{ji} \cdot B_j(\underline{n} + \underline{1}_j - \underline{1}_i) \right\} = 0 \quad (3.32)$$

Pentru ca această relație să fie egală cu 0 este suficient ca $B_i(\underline{n}) = 0$, ceea ce conduce la următoarea relație:

$$\mu_i(n_i) \cdot P(\underline{n}) = \lambda(N-1) \cdot e_i \cdot P(\underline{n} - \underline{1}_i) \quad (3.33)$$

Din care se obține imediat că:

$$P(\underline{n}) = P(\underline{n} - \underline{1}_i) \cdot \lambda(N-1) \cdot \frac{e_i}{\mu_i(n_i)} \text{ pentru orice } \underline{n} \text{ și } i = \overline{1, M} \quad (3.34)$$

Plecând de la starea $\underline{0}$ din aproape în aproape se obține:

$$P(\underline{n}) = P(\underline{0}) \cdot \lambda(0) \cdot \lambda(1) \cdot \dots \cdot \lambda(N-1) \cdot \frac{e_1 \cdot e_1 \cdot \dots \cdot e_1 \cdot e_2 \cdot e_2 \cdot \dots \cdot e_2 \cdot \dots \cdot e_M \cdot e_M \cdot \dots \cdot e_M}{\mu_1(1) \cdot \mu_1(2) \cdot \dots \cdot \mu_1(n_1) \cdot \mu_2(1) \cdot \mu_2(2) \cdot \dots \cdot \mu_2(n_2) \cdot \dots \cdot \mu_M(1) \cdot \mu_M(2) \cdot \dots \cdot \mu_M(n_M)} \quad (3.35)$$

Sau

$$P(\underline{n}) = P(\underline{0}) \cdot \prod_{i=0}^{N-1} \lambda(i) \cdot \prod_{i=1}^M \frac{e_i^{n_i}}{\prod_{k=1}^{n_i} \mu_i(k)} \quad (3.36)$$

Această relația dacă o condensăm se prezintă sub forma unui produs:

$$P(\underline{n}) = P(\underline{0}) \cdot \lambda(N) \cdot \prod_{i=1}^M \frac{e_i^{n_i}}{M_i(n_i)} \quad (3.37)$$

Ecuția de mai sus, poartă denumirea de teorema de compoziție a lui Jackson și a fost determinată în 1963.

3.4.2. Modelul lui Jackson pentru rețele cu șiruri de așteptare închise

În teoria șirurilor de așteptare, teorema Gordon-Newell este o extensie a teoremei lui Jackson de la rețelele de așteptare deschise la rețelele de așteptare închise cu centre de servire exponențiale în cazul în care clienții nu pot părăsi rețeaua [45]. Teorema lui Jackson nu poate fi aplicată la rețele închise, deoarece lungimea cozii de la un nod din rețeaua închisă este limitată de populația rețelei. Teorema Gordon-Newell calculează soluția pentru o rețea deschisă și apoi elimină stările imposibile prin renormalizarea probabilităților.

Așadar, în cazul modelelor definite de rețele cu șiruri de așteptare deschise s-a făcut presupunerea că numărul de clienți din sistemele pe care le modelează este nelimitat. Această presupunere nu este realistă, deoarece pentru perioade lungi de timp, numărul clienților este constant. Plecând de la această constatare (care corespunde unei situații reale, existente în sistemele reale) s-a extins studiul la cazul modelelor reprezentabile prin șiruri de așteptare închise.

Principala *presupunere* care se face se referă la faptul că: atunci când un sistem este modelat printr-o rețea închisă cu șiruri de așteptare imediat ce un client a părăsit sistemul, acesta rămâne constant în rețea.

a) Determinarea sistemului de ecuații care descriu starea sistemului

Pentru determinarea probabilității ca în sistem să avem prezentă starea definită de vectorul $\underline{n} = (n_1, \dots, n_i, \dots, n_M)$, se pornește de la ecuația care descrie comportarea unui sistem deschis la echilibru:

$$\begin{aligned} \lambda(N) \cdot P(\underline{n}) - \sum_{j=1}^M q_{jd} \cdot \mu_i(n_j + 1) \cdot P(\underline{n} + \underline{1}_j) = \lambda(N - 1) \cdot \sum_{i=1}^M q_{si} \cdot P(\underline{n} - \underline{1}_i) - \\ - \sum_{i=1}^M \mu_i(n_i) \cdot P(\underline{n}) + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M q_{ji} \cdot \mu_j(n_j + 1 - \delta_{ij}) \cdot P(\underline{n} + \underline{1}_j - \underline{1}_i) \end{aligned} \quad (3.38)$$

Presupunerea care s-a făcut se concretizează prin întreruperea legăturii cu exteriorul (nu vor mai apare q_{jd} , q_{si} , $\lambda(N)$ care se consideră a fi zero). Ca urmare se obține:

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M q_{ji} \cdot \mu_j(n_j + 1 - \delta_{ij}) \cdot P(\underline{n} + \underline{1}_j - \underline{1}_i) = \sum_{i=1}^M \mu_i(n_i) \cdot P(\underline{n}) \quad (3.39)$$

În sistemul de ecuații care descrie topologia rețelei este reprezentat de:

$$e_i = q_{si} + \sum_{j=1}^M e_j \cdot q_{ji} \quad \text{pentru } i = \overline{1, M} \quad (3.40)$$

va apare sub forma:

$$e_i = \sum_{j=1}^M e_j \cdot q_{ji} \quad \text{sau } 1 = \sum_{j=1}^M q_{ji} \cdot \frac{e_j}{e_i} \quad (3.41)$$

Prin concatenarea celor două efecte (configurarea de clienți în centrele rețelei și topologia rețelei) se înmulțește fiecare termen al ecuației (3.39) [26] cu ecuația (3.41). Se obține astfel următoarea relație:

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M q_{ji} \cdot \left\{ \mu_j(n_j + 1 - \delta_{ij}) \cdot P(\underline{n} + \underline{1}_j - \underline{1}_i) - \frac{e_j}{e_i} \cdot \mu_i(n_i) \cdot P(\underline{n}) \right\} = 0 \quad (3.42)$$

Ecuația (3.42) va fi egală cu 0 dacă cantitatea din paranteză va fi egală cu 0, indiferent de starea rețelei.

$$\mu_j(n_j + 1 - \delta_{ij}) \cdot P(\underline{n} + \underline{1}_j - \underline{1}_i) = \frac{e_j}{e_i} \cdot \mu_i(n_i) \cdot P(\underline{n}), \quad i, j = \overline{1, M} \quad (3.43)$$

Pentru a determina forma lui $P(\underline{n})$ se va utiliza ecuația (3.43), prin aplicarea acesteia în cazul unei rețele simple, rezultatul obținut urmând a fi generalizat. Se consideră următoarea rețea:

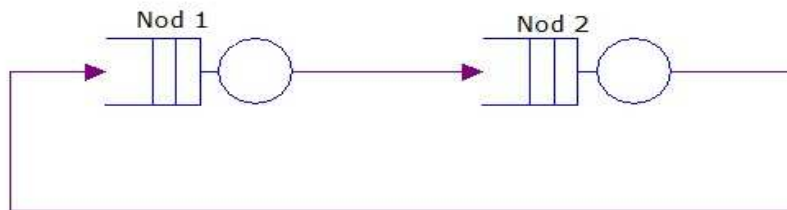


Fig. 3.5 Modul de configurare a unei rețele cu șiruri de așteptare închisă

Pentru această rețea se dorește determinarea lui $P(\underline{n})$ cunoscând că numărul de centre este $M = 2$ și numărul de clienți este $N = 3$.

Configurațiile posibile de clienți în model, mai exact starea rețelei poate fi în acest caz de forma:

n_1	n_2
3	0
2	1
1	2
0	3

Pentru acest caz se notează cu $S(3, 2)$ mulțimea stărilor posibile ale rețelei:

$$S(3, 2) = \left\{ n_1, n_2 \left| \sum_{i=1}^2 n_i = 3, n_i \geq 0, \forall i \right. \right\} \quad (3.44)$$

Astfel, pentru cazul unei rețele formate din M centre de servire în care există N clienți, mulțimea stărilor posibile se va nota cu $S(N, M)$, unde:

$$S(N, M) = \left\{ n_1, n_2, \dots, n_M \left| \sum_{i=1}^M n_i = N, n_i \geq 0, \forall i \right. \right\} \quad (3.45)$$

Pentru modelul de rețea considerat ecuația (3.43) are sens doar pentru $i \neq j$ (pentru $i = j$ se va obține o identitate). Se va obține pentru:

$$i = 1, j = 2$$

$$\mu_2(n_2 + 1) \cdot P(n_1 - 1, n_2 + 1) = \frac{e_2}{e_1} \cdot \mu_1(n_1) \cdot P(n_1, n_2) \quad (3.46)$$

$$i = 2, j = 1$$

$$\mu_1(n_1 + 1) \cdot P(n_2 + 1, n_1 - 1) = \frac{e_1}{e_2} \cdot \mu_2(n_2) \cdot P(n_1, n_2) \quad (3.47)$$

La acestea se adaugă:

$$\sum_{S(N,M)} P(\underline{n}) = 1 \quad (3.48)$$

Ultima condiție aplicată rețelei se va scrie sub forma:

$$P(3,0) + P(2,1) + P(1,2) + P(0,3) = 1 \quad (3.49)$$

Utilizând prima ecuație (3.46) descriem starea rețelei pentru: $P(3,0)$, $P(2,1)$.

$$P(3,0) = \frac{e_2}{e_1} \cdot \mu_1(3) = \mu_2(1) \cdot P(2,1) \Rightarrow P(3,0) = \frac{e_1}{e_2} \cdot \frac{\mu_2(1)}{\mu_1(3)} \cdot P(2,1) \quad (3.50)$$

$$P(2,1) = \frac{e_2}{e_1} \cdot \mu_1(2) = \mu_2(2) \cdot P(1,2) \Rightarrow P(2,1) = \frac{e_1}{e_2} \cdot \frac{\mu_2(2)}{\mu_1(2)} \cdot P(1,2) \quad (3.51)$$

Utilizând a doua ecuație (3.47) descriem starea rețelei pentru: $P(0,3)$

$$P(0,3) = \frac{e_1}{e_2} \cdot \mu_2(3) = \mu_1(1) \cdot P(1,2) \Rightarrow P(0,3) = \frac{e_2}{e_1} \cdot \frac{\mu_1(1)}{\mu_2(3)} \cdot P(1,2) \quad (3.53)$$

Înlocuind aceste relații în ecuația (3.49) se va obține:

$$\begin{aligned} \frac{e_1}{e_2} \cdot \frac{\mu_2(1)}{\mu_1(3)} \cdot \frac{e_1}{e_2} \cdot \frac{\mu_2(2)}{\mu_1(2)} \cdot P(1,2) + \frac{e_1}{e_2} \cdot \frac{\mu_2(2)}{\mu_1(2)} \cdot P(1,2) + \\ + P(1,2) + \frac{e_2}{e_1} \cdot \frac{\mu_1(1)}{\mu_2(3)} \cdot P(1,2) = 1 \end{aligned} \quad (3.54)$$

de unde, rezultă că $P(1,2)$ este de forma:

$$P(1,2) = \frac{1}{1 + \frac{e_2 \cdot \mu_1(1)}{e_1 \cdot \mu_2(3)} + \frac{e_1 \cdot \mu_2(2)}{e_2 \cdot \mu_1(2)} + \frac{e_1^2 \cdot \mu_2(1) \cdot \mu_2(2)}{e_2^2 \cdot \mu_1(3) \cdot \mu_1(2)}} \quad (3.55)$$

$$P(1,2) = \frac{e_1 \cdot e_2^2}{e_1 \cdot e_2^2 + e_2^3 \cdot \frac{\mu_1(1)}{\mu_2(3)} + e_1^2 \cdot e_2 \cdot \frac{\mu_2(2)}{\mu_1(2)} + e_1^3 \cdot \frac{\mu_2(1) \cdot \mu_2(2)}{\mu_1(3) \cdot \mu_1(2)}} \quad (3.56)$$

Prin împărțirea numărătorului și numitorul ecuației la $\mu_1(1) \cdot \mu_1(2) \cdot \mu_1(3) \cdot \mu_2(1) \cdot \mu_2(2) \cdot \mu_2(3)$ va rezulta următoarea relație:

$$P(1,2) = \frac{e_1 \cdot e_2^2 \cdot \mu_1(2) \cdot \mu_1(3) \cdot \mu_2(3)}{e_1 \cdot e_2^2 \cdot \mu_1(2) \cdot \mu_1(3) \cdot \mu_2(3) + e_2^3 \cdot \mu_1(1) \cdot \mu_1(2) \cdot \mu_1(3) + e_1^2 \cdot e_2 \cdot \mu_1(3) \cdot \mu_2(3) \cdot \mu_2(2) + e_1^3 \cdot \mu_2(1) \cdot \mu_2(2) \cdot \mu_2(3)} \quad (3.57)$$

$$P(1,2) = \frac{\frac{e_1}{\mu_1(1)} \cdot \frac{e_2^2}{\mu_2(1) \cdot \mu_2(2)}}{\frac{e_1}{\mu_1(1)} \cdot \frac{e_2^2}{\mu_2(1) \cdot \mu_2(2)} + \frac{e_2^3}{\mu_2(1) \cdot \mu_2(2) \cdot \mu_2(3)} + \frac{e_1^2}{\mu_1(1) \cdot \mu_1(2)} \cdot \frac{e_2}{\mu_2(1)} + \frac{e_1^3}{\mu_1(1) \cdot \mu_1(2) \cdot \mu_1(3)}} \quad (3.58)$$

Ecuția (3.58), prin condensare apare sub următoarea formă:

$$P(1,2) = \frac{1}{\sum_{S(3,2)} \prod_{i=1}^2 \frac{e_i^{n_i}}{\prod_{k=1}^{n_i} \mu_i(k)}} \cdot \prod_{i=1}^3 \frac{e_i^{n_i}}{\prod_{k=1}^{n_i} \mu_i(k)} \quad (3.59)$$

Generalizând obținem:

$$P(\underline{n}) = \frac{1}{G(N, M)} \cdot \prod_{i=1}^M \frac{e_i^{n_i}}{M_i(n_i)} \quad (3.60)$$

Unde:

$$M_i(n_i) = \prod_{k=1}^{n_i} \mu_i(k) \quad (3.61)$$

și $G(N, M)$ poartă numele de constantă de normalizare și este dată de relația:

$$G(N, M) = \sum_{S(N, M)} \prod_{i=1}^M \frac{e_i^{n_i}}{M_i(n_i)} \quad (3.62)$$

3.4.2.1. Calculul constantei de normalizare

În ce privește modul de calcul al constantei de normalizare, acesta depinde de frecvența de servire a clienților, astfel se vor prezenta cazurile care pot să apară și anume:

- Frecvența de servire este constantă
- Frecvența de servire este variabilă

3.4.2.1.1. Calculul lui $G(N, M)$ pentru cazul frecvenței de servire constante

Situația corespunde cazului în care există o singură stație de servire în centrul i , fapt care face ca frecvența de servire să nu depindă de numărul de clienți prezenți în centrul i [26].

Așadar, dacă avem $\mu_i(n_i) = \mu_i$, atunci vom obține următoarea relație:

$$M_i(n_i) = \prod_{k=1}^{n_i} \mu_i(k) = \mu_i^{n_i} \quad (3.63)$$

În această situație, aspectul lui $G(N, M)$ se modifică astfel:

$$G(N, M) = \sum_{S(N, M)} \prod_{i=1}^M \frac{e_i^{n_i}}{\mu_i^{n_i}} \quad (3.64)$$

Dacă notăm cu:

$$X_i = \frac{e_i^{n_i}}{\mu_i^{n_i}} \quad (3.65)$$

raportul dintre capacitatea relativă de trecere și frecvența de sosire, a cărei semnificație este de cerere relativă de servire în centrul i , atunci constanta de normalizare va apare sub forma următoare:

$$G(N, M) = \sum_{S(N, M)} \prod_{i=1}^M X_i^{n_i} \quad (3.66)$$

Această formă modifică și relația (3.60), astfel:

$$P(\underline{n}) = \frac{1}{G(N, M)} \cdot \prod_{i=1}^M X_i^{n_i} \quad (3.67)$$

Relația generală de calcul a constantei de normalizare este dată de:

$$G(N, M) = G(N, M - 1) + X_M \cdot G(N - 1, M) \quad (3.68)$$

Algoritmul de calcul:

Pentru construirea unui algoritm de calcul a constantei de normalizare se pornește de la ecuația (3.68), definind o constantă de normalizare intermediară notată cu $g(n, m)$ care apare sub forma [26]:

$$g(n, m) = g(n, m - 1) + X_m \cdot g(n - 1, m) \quad (3.69)$$

La limită pot să apară următoarele situații:

a) Un singur centru de servire

$$g(n, 1) = X_1^n \quad (3.70)$$

b) Nici un client în sistem

$$g(0, M) = 1 \quad (3.71)$$

c) $g(N, M) = G(N, M)$ (3.72)

3.4.2.1.2. Calculul lui $G(N, M)$ pentru cazul frecvenței de servire variabile

Situația corespunde cazului în care există mai multe stații de servire în centrul i , aspect care face ca frecvența de servire să depindă de numărul de clienți din centrul de servire [26].

Relațiile de la care se pornește sunt cele corespunzătoare cazului general:

$$G(N, M) = \sum_{S(N, M)} \prod_{i=1}^M \frac{e_i^{n_i}}{M_i(n_i)} \text{ și } M_i(n_i) = \prod_{k=1}^{n_i} \mu_i(k) \quad (3.73)$$

În această situație pot să apară două cazuri:

a) Numărul clienților este mai mic decât numărul stațiilor de servire.

Dacă în centrul i avem r_i stații de servire și n_i clienți cu $n_i \leq r_i$ atunci:

$$M_i(n_i) = \prod_{k=1}^{n_i} \mu_i(k) = \mu_i(1) \cdot \mu_i(2) \cdot \dots \cdot \mu_i(n_i) = 1 \cdot \mu_i(1) \cdot 2 \cdot \mu_i(1) \cdot \dots \cdot n_i \cdot \mu_i(1) \quad (3.74)$$

Rezultând astfel:

$$M_i(n_i) = n_i! \cdot \mu_i^{n_i}(1) \quad (3.75)$$

Relația se justifică prin faptul ca frecvența de servire se dublează, triplează, etc., dacă în centrul de servire sunt prezenți 2, 3, ș.a.m.d. clienți și există stații de servire disponibile.

b) Numărul stațiilor de servire este mai mic decât numărul clienților.

Suntem în cazul în care $n_i > r_i$ și atunci:

$$M_i(n_i) = \prod_{k=1}^{n_i} \mu_i(k) = \mu_i(1) \cdot \mu_i(2) \cdot \dots \cdot \mu_i(r_i) \cdot \mu_i(r_i+1) \cdot \dots \cdot \mu_i(n_i) \quad (3.76)$$

$$M_i(n_i) = 1 \cdot \mu_i(1) \cdot 2 \cdot \mu_i(1) \cdot \dots \cdot r_i \cdot \mu_i(1) \cdot r_{i+1} \cdot \mu_i(1) \cdot \dots \cdot n_i \cdot \mu_i(1) \quad (3.77)$$

Rezultând astfel:

$$M_i(n_i) = r_i! \cdot \mu_i^{n_i} \cdot r_i^{n_i-r_i} \quad (3.78)$$

Ca urmare:

$$G(N, M) = \sum_{S(N, M)} \prod_{i=1}^M \frac{e_i^{n_i}}{M_i(n_i)} \text{ cu } X_i = \frac{e_i}{\mu_i(1)} \quad (3.79)$$

va conduce la următoarea relație:

$$G(N, M) = \sum_{S(N, M)} \prod_{i=1}^M \frac{X_i^{n_i} \cdot \mu_i^{n_i}(1)}{M_i(n_i)} \text{ cu } M_i(n_i) = \begin{cases} n_i! \cdot \mu_i^{n_i}(1) \\ r_i! \cdot r_i^{n_i-r_i} \cdot \mu_i^{n_i}(1) \end{cases} \quad (3.80)$$

Făcând observația că $\mu_i^{n_i}(1)$ se simplifică rezultă relația finală:

$$G(N, M) = \sum_{S(N, M)} \prod_{i=1}^M \frac{X_i^{n_i}}{\beta_i(n_i)} \text{ cu } \beta_i(n_i) = \begin{cases} n_i! \\ r_i! \cdot r_i^{n_i-r_i} \end{cases} \quad (3.81)$$

Algoritmul de calcul:

Pentru calculul constantei de normalizare se procedează similar ca în cazul anterior, definind o constantă intermediară de normalizare $g(n, m)$ a cărei aspect este [26]:

$$g(n, m) = \sum_{S(N, M)} \prod_{i=1}^M \frac{X_i^{n_i}}{\beta_i(n_i)} \quad (3.82)$$

$$g(n, m) = g(n, m-1) + \frac{X_m}{\beta_m(1)} \cdot g(n-1, m-1) + \dots + \frac{X_m^i}{\beta_m(i)} \cdot g(n-i, m-1) + \dots + \frac{X_m^n}{\beta_m(n)} \cdot g(0, m-1) \quad (3.83)$$

Sau:

$$g(n, m) = \sum_{k=0}^n \frac{X_m^k}{\beta_m(k)} \cdot g(n-k, m-1) \quad (3.84)$$

La limită pot să apară următoarele situații:

a) Un singur centru de servire

$$g(n, 1) = \frac{X_1^n}{\beta_1(n)} \quad (3.85)$$

b) Nici un client în sistem

$$g(0, M) = 1 \quad (3.86)$$

c) $g(N, M) = G(N, M)$

$$(3.87)$$

3.5. Cazurile particulare ale modelului lui Jackson

Pentru modelul lui Jackson se cunosc și două forme particulare și anume [26]:

1. Dacă frecvența de sosire a clienților nu depinde de numărul clienților din rețea (centrele de servire dispun de șiruri de așteptare cu o capacitate infinită și ca urmare nu apar cazuri de refuzare a clienților la intrarea în sistem) atunci:

$\lambda_j = \lambda$ și se obține relația:

$$\Lambda(N) = \prod_{i=0}^{N-1} \lambda_i = \lambda^N = \lambda^{\eta_1} \cdot \lambda^{\eta_2} \cdot \dots \cdot \lambda^{\eta_M} = \prod_{i=1}^M \lambda^{\eta_i} \quad (3.88)$$

Acest lucru face ca ecuația (3.37) să apară sub forma:

$$P(\underline{n}) = P(\underline{0}) \cdot \prod_{i=1}^M \frac{(\lambda \cdot e_j^{n_i})}{M_i(n_i)} \text{ și } P(\underline{0}) = p_1(0) \cdot p_2(0) \cdot \dots \cdot p_M(0) \quad (3.89)$$

Deci:

$$P(\underline{n}) = \prod_{i=1}^M \frac{(\lambda \cdot e_j^{n_i})}{M_i(n_i)} \cdot p_i(0) \quad (3.90)$$

Dacă se notează cu:

$$p_i(n_i) = \frac{(\lambda \cdot e_j^{n_i})}{M_i(n_i)} \cdot p_i(0) \quad (3.91)$$

Atunci se obține:

$$P(\underline{n}) = \prod_{i=1}^M p_i(n_i) \quad (3.92)$$

2. Dacă frecvența de servire este independentă de numărul de clienți din centrul de servire i (fiecare centru de servire dispune de o singură stație de servire), $i = \overline{1, M}$, atunci:

$$\mu_i(n_i) = \mu \quad (3.93)$$

și ca urmare se obține:

$$\rho_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i} \quad (3.94)$$

Unde:

$\lambda_i = e_j \cdot \lambda$ (λ_i fiind frecvența de sosire la centrul i) ceea ce permite să obținem din:

$$p_i(n_i) = \frac{(\lambda \cdot e_j^{n_i})}{M_i(n_i)} \cdot p_i(0) \Rightarrow p_i(n_i) = \rho_i^{n_i} \cdot p_i(0) \quad (3.95)$$

Rezultă în final:

$$P(\underline{n}) = \prod_{i=1}^M p_i(n_i) \text{ cu } p_i(n_i) = \rho_i^{n_i} \cdot p_i(0) \quad (3.96)$$

Din relația (3.96) rezultă că $p_i(0)$ are următoarea formă:

$$\sum_{n_i=0}^{\infty} p_i(n_i) = 1 \Rightarrow \sum_{n_i=0}^{\infty} \rho_i^{n_i} \cdot p_i(n_i) = 1 \quad (3.97)$$

și:

$$p_i^{-1}(0) = \sum_{n_i=0}^{\infty} \rho_i^{n_i} = \frac{1}{1-\rho_i} \Rightarrow p_i(0) = 1 - \rho_i \quad (3.98)$$

3.6. Concluzii

În acest capitol au fost prezentate noțiuni teoretice sprijinite pe 98 de relații necesare în realizarea modelării traficului rutier cu elemente din teoria șirurilor de așteptare, oferindu-se astfel suport tehnic în dezvoltarea unor metode analitice de calcul în domeniul traficului rutier.

În prima parte a acestui capitol au fost prezentate concepte generale legate de modelarea cu cozi de așteptare și anume:

- Realizarea unei vederi de ansamblu asupra conceptului de șir de așteptare prin descrierea componentelor ce o alcătuiesc și asupra modelării cu șiruri de așteptare.
- Prezentarea și descrierea mărimilor care se iau în considerare în modelarea cu șiruri de așteptare.
- Clasificarea modelelor de șiruri de așteptare pe baza metodei propuse de Kendall
- Descrierea principalilor indici de performanță care sunt utilizați în modelarea cu șiruri de așteptare.
- Elaborarea unei sinteze asupra evoluției modelării traficului rutier cu ajutorul cozilor de așteptare.

În cea de a doua parte s-a realizat o sinteză asupra dezvoltării existente în teoria rețelelor cu cozi de așteptare și anume modelul conceput de Jackson.

În cadrul acestei părți au fost prezentate elementele ce compun o rețea modelată cu modelul lui Jackson. Tot aici este prezentat detaliat modelul lui Jackson atât pentru rețelele deschise de cozi de așteptare cât și pentru cele închise. Pentru ambele modele s-a ținut cont de starea rețelei, numărul de clienți, modul de rutare a clienților, frecvența de sosire a clienților.

4. CONTRIBUȚII LA MODELAREA ANALITICĂ A TRAFICULUI RUTIER

4.1. Utilizarea grafurilor în reprezentarea stradală

Teoria grafurilor are multiple aplicații practice, fiind strâns legată de multe ramuri ale matematicii (cercetări operaționale, teoria grupurilor, teoria numerelor), dar sunt folosite și ca modele matematice în rezolvarea unor probleme tehnice, economice, etc.

Teoria grafurilor este cel mai des utilizată în realizarea studiilor de accesibilitate, deoarece în acest mod se pot aborda rețelele de transport. În literatura de specialitate sunt dezvoltate numeroase aplicații ale teoriei grafurilor, având ca scop evaluarea și cuantificarea caracteristicilor fundamentale ale rețelelor de transport. Teoria grafurilor este utilizată și pentru compararea rețelelor de transport aferente unor teritorii distincte, precum și pentru evaluarea impactului unor noi elemente de infrastructură asupra rețelei de transport.[49].

În ceea ce privește o rețea de transport, teoria grafurilor reprezintă un model de analiză teoretică. În mod tradițional, o rețea de transport care este analizată din perspectiva teoriei grafurilor, conține un set de noduri care descriu locații din spațiu și un set de arce care afișează diferite configurații geometrice și topologice. Topologia se referă la modul de aranjare și conectare a nodurilor și legăturilor unei rețele [46], [47]. Așadar, o rețea de transport este puternic influențată de reprezentarea geografică [48].

Prin transpunerea rețelei de transport într-un graf se poate reduce complexitatea sistemului, fără pierderea informațiilor relevante. Astfel, intersecțiile vor constitui nodurile din graful topologic, iar conexiunile existente între două asemenea noduri sunt considerate ca fiind muchiile grafului [49]. În ce privește circulația fluxului de trafic pe artere între noduri se poate desfășura în ambele sensuri în funcție de situația existentă în teren.

Cea mai simplă reprezentare a unei rețele de transport sub forma unui graf este redată de o matrice care prezintă conectivitatea directă dintre nodurile rețelei. Valorile din matricele de conectivitate arată relația directă între noduri, mai exact prezintă conexiunile/ arcele.

Elementelor primare care alcătuiesc structura grafică a unei rețele de transport le pot fi atribuite caracteristici ale configurației stradale. Printre caracteristicile ce se pot atribui unui nod sau unei intersecții se numără și capacitatea de trafic la nivelul acesteia. În cazul arcului/conexiunii dintre noduri îi pot fi alocate date, cum ar fi distanța dintre noduri, viteza de deplasare, timpul de parcurgere a distanței, capacitatea acestuia, fluxul de vehicule, numărul de linii/benzi pentru direcția de deplasare.

Aceste elemente ce prezintă detalii din rețeaua de transport sunt utilizate ca date de intrare pentru modelarea acesteia.

Modelarea și metodele de simulare sunt elemente importante, în special în etapele de proiectare și analiză a rețelelor de transport. Acestea permit inginerilor

de trafic și cercetătorilor să efectueze studii teoretice cât și posibilitatea de evaluare și analiză a rezultatelor. În acest fel se determină oportunități de îmbunătățire a fluxului de trafic prin oferirea alternativelor de modificare a rețelelor de drumuri existente. De asemenea, prezintă importanță și în perfecționarea transportului, reducerea timpilor necesari parcurgerii sectorului de drum și reducerea costurilor ce implică parcurgerea traseului, mai exact al congestiei [50].

Un model de graf este o reprezentare simplificată a unui sistem, ce reproduce și descrie artificial sistemul original existent, care permite studierea sistemului, servind astfel la cunoașterea proprietăților sistemului original și la predicția comportării acestuia. Simularea unui model este realizată în vederea găsirii parametrilor de rulare și pentru determinarea performanței acestuia.

Simularea nu determină soluția optimă a modelului matematic, ci compară rezultatele mai multor alternative predefinite cu scopul de a o reține pe cea mai avantajoasă. Modelul de simulare urmărește evoluția în timp a sistemului real. Simularea se folosește în cazurile în care rezolvarea analitică a modelului matematic este imposibilă sau destul de dificilă [51].

4.2. Unificarea teoriei șirurilor de așteptare cu teoria modelării traficului rutier.

Principala problemă ridicată de transportul rutier cu care se confruntă aproape toți participanții la trafic este congestia rutieră.

Congestia este fenomenul fizic care împiedică deplasarea liberă a vehiculelor și încetinește traficul, influențând astfel activitatea în zonele urbane.

Acest fenomen implică cozi de așteptare, viteze de deplasare mai mici, durată mai mare de deplasare, timp pierdut, consum mai mare de combustibil. Toate aceste aspecte presupun costuri și generează efecte indirecte asupra rețelei de transport prin reducerea utilizării infrastructurii de transport, asupra șoferilor prin apariția condițiilor de stres și a diminuării siguranței în trafic [57].

În ceea ce privește modalitățile de măsurare a congestiei, acestea sunt diverse și fiecare dintre ele implică utilizarea unor parametri diferiți cum ar fi: volumul, densitatea, gradul de ocupare, lungimea cozii, timpul de deplasare, întârzierea, viteza, raportul dintre volum - capacitate și nivelul de serviciu (LOS). [53].

Ca urmare a efectelor pe care le crează congestia, se pune problema optimizării acestui tip de trafic îndeosebi prin reducerea acesteia.

Congestia traficului în sistemele de transport rutier poate fi redusă fie prin îmbunătățirea infrastructurii rutiere, aspect care este dificil de realizat, fie prin optimizarea acestuia prin tehnici de semaforizare care să asigure un flux maxim de mașini într-un context stradal static existent.

În general, luarea unei decizii corecte pentru gestionarea congestiilor de trafic este dificilă, deoarece factorii de decizie trebuie să analizeze și să absoarbă o cantitate mare de informații legate de capacitatea de trafic la nivelul rețelei. Acești factori de decizie sunt influențați de caracteristicile/parametrii care definesc componentele statice și dinamice ce intervin în calculul capacității de trafic a rețelei.

Așadar, un element principal în construirea rețelelor de transport și un factor determinant ce impune modul în care este realizat controlul traficului este capacitatea de transport. Capacitatea de transport este definită de numărul de vehicule care tranzitează o zonă rutieră, alcătuită dintr-o serie de străzi [52].

Estimarea valorilor capacității, în practică este o problema complexă deoarece în calculul acesteia intervin două tipuri de componente:

- O componentă statică care cuprinde structura rețelei rutiere, numărul de benzi de circulație, sensuri de circulație.
- O componentă dinamică care se referă la caracteristicile specifice traficului în zonă și anume: categorii de vehicule, viteza acestora, numărul de mașini existente în zonă 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 și este dictată indirect și de aspecte statice ca de exemplu: lungimea și lățimea străzii, zona urbană în care este amplasată strada.

Acest concept de capacitate este o măsură probabilistică care permite evaluarea traficului din punct de vedere cantitativ. În scopul dezvoltării unei analize a traficului din punct de vedere calitativ, Highway Capacity Manual (HCM) [55] a propus conceptul de nivel de serviciu [52].

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 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 unei 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.

4.2.1. Factorul de calitate al traficului rutier

Creșterea fluxului de trafic la nivelul rețelei de transport reprezintă o mare provocare deoarece poate avea efecte negative asupra mediului, mai exact contribuie la apariția congestiei.

Pentru a determina nivelul de congestie se utilizează diferiți *parametri* cum ar fi:

- *volumul* - reprezintă numărul de vehicule, fizic sau etalon, care trec printr-o secțiune de drum sau pe o bandă de circulație, într-un interval de timp specificat
- *densitatea* - reprezintă repartiția numărului de vehicule pe unitatea de lungime (km) a tronsonului analizat.
- *gradul de ocupare* - indică în ce măsură o arteră de circulație este încărcată sau nu.
- *lungimea cozii* - lungimea efectivă a cozii de așteptare care se măsoară în metri sau în numărul de vehicule care se află în coada de așteptare
- *timpul de deplasare* - reprezintă timpul efectiv dedicat deplasării.
- *întârzierea* - reprezintă timpul efectiv pierdut în trafic datorită eventualelor congestii, etc.
- *viteza* - este definită ca fiind distanța parcursă de un vehicul în unitatea de timp.
- *raportul dintre volum și capacitate*.
- *nivelul de serviciu (LOS)*.

Nivelul de serviciu este o măsură calitativă ce descrie condițiile de funcționare pentru un flux de trafic și cum este acesta simțit și perceput de către conducătorii auto/pasagerii care utilizează secțiunea carosabilului. În Highway Capacity Manual (HCM) și alte cercetări similare, viteza de deplasare este luată ca o măsură cantitativă a eficacității și întreaga gamă de condiții de funcționare este grupată pe șase nivele diferite de servicii, desemnate prin litere de la A la F.

Mulți alți *factori*, cum ar fi:

- libertatea de manevră,
- trafic întrerupt,
- confort și siguranță, au fost considerați calitativi.

Congestia cuantificată este pierderea libertății de mișcare și reprezintă variația nivelului vitezei cu creșterea traficului pe carosabil, traficului și condițiile de control. Deci, nivelul de serviciu este o mai bună măsură a eficacității pentru definirea nivelului de congestie în mod cantitativ [54].

Conceptul de nivel de serviciu (LOS) este menit să reflecte calitatea traficului de pe carosabil [55]. Mai exact, cu ajutorul acestuia, se poate determina starea traficului rutier urban sau nivelul congestiei (dacă există). [57].

De-a lungul timpului, au fost dezvoltate mai multe soluții privind modalitatea de evaluare a calității traficului. Astfel, în [61] și [62], au fost propuse extinderea criteriilor LOS plecând de la cele existente în HCM [55] (de A la J respectiv de A la I). Preocuparea lor s-a datorat întârzierilor mari din trafic, ce apar datorită creșterii congestiei la nivel urban. Prin urmare, autorii au propus criterii de reprezentare a condițiilor de trafic dincolo de LOS - nivelul F, prin adăugarea de categorii suplimentare.

Această preocupare există și în prezent, iar din [63], aflăm că există multe rezultate ce confirmă faptul că participanții la trafic percep mai mult de 6 nivele de LOS. Rezultatele acestei cercetări indică existența a încă trei sau patru nivele de serviciu ce sunt percepute de utilizatori. Există și studii care ne furnizează, în timp real, nivelul de serviciu (LOS) existent într-o intersecție semaforizată [64], [65]. Aceste metode se bazează pe analizarea unor semnale inductive de la fiecare vehicul.

Tot în acest sens, în 2008, s-a dezvoltat un model de calcul al capacității de rețea în funcție de nivelul de serviciu de trafic, care a utilizat un fel de algoritm hibrid de optimizare, combinând un algoritm genetic și unul de „simulated annealing” [66].

O metodă de a evalua o zonă de transport urbană prin nivelul de serviciu a fost propusă în [67]. Această metodă a fost dezvoltată pe baza unui atribut matematic. Atributul matematic descrie caracteristici din mediu și propune o metodă de măsurare.

Mai tarziu, aceiași autori propun în [68], un model de evaluare multi-level pentru nivelul de serviciu al traficului LOS. Modelul include evaluarea unui model segment de trafic regional la nivel microscopic și un model la nivel macroscopic.

Un studiu experimental dezvoltat în [69], propune o metodă de estimare a nivelului de serviciu (LOS) al traficului rutier regional în funcție de percepția umană. Acest experiment, a fost conceput pentru a studia percepția umană asupra nivelului de serviciu real pentru un trafic regional.

În cercetarea sa [70], Xingyi și alții propun o metodă de evaluare a nivelului de serviciu al traficului regional cu ajutorul unui „adaptive neuro-fuzzy inference system” (ANFIS). ANFIS este folosit pentru a imita experiența omului cu privire la specificarea celor patru niveluri de serviciu de trafic existente în Shenzhen Metropolitan Area.

În altă lucrare [71], se propune o metodă pentru estimarea nivelului de serviciu (LOS), pe autostrăzi în mediu video comprimat. Această metodă efectuează calcule statistice pe vectorii de mișcare ai fluxurilor video codate MPEG4 în cadrul unei regiuni de interes, predefinite pentru a stabili un set de patru mișcări caracteristice ce descriu viteza și densitatea fluxului de trafic. [57].

Având în vedere acest concept de nivel de serviciu ce descrie calitatea traficului, în lucrarea [52], am propus un mod de calcul regresional pentru determinarea factorului de calitate QF . Modelul propus ia în considerare principalele caracteristici statice și dinamice prezente în trafic. Prin intermediul factorului QF devine posibilă determinarea calității traficului până la nivelul unui sens de circulație de pe o stradă, ținând cont de structura fizică dar și de condițiile de trafic existente.[52], [56].

Factorul de calitate a fost introdus cu scopul de a unifica elemente existente din teoria cozilor de așteptare cu elementele clasice ce caracterizează traficul rutier. Această abordare în domeniul traficului rutier permite evaluarea sistemului de transport din punct de vedere calitativ.

4.3. Modelul lui Jackson cu factorul de calitate al traficului rutier

Modelul lui Jackson a fost dezvoltat prin intermediul factorului calitate al traficului rutier. Utilizarea acestui factor realizează unificarea modelării sistemelor de trafic rutier cu teoria clasică a rețelelor cu șiruri de așteptare.

Factorul de calitate este atașat grafului ce descrie structura stradală care se analizează din rețeaua de trafic rutier. Acest lucru este reprezentat de următoarea ecuație obținută prin modificarea ecuației (3.27):

$$e_i = q_{si} + \sum_{j=1}^M QF_{ij} \cdot q_{ji} \cdot e_j ; \quad i = \overline{1, N}; j = \overline{1, M} \quad (4.1)$$

Ecuația (4.1) descrie influența topologiei unei rețele stradale asupra fluxului de clienți, unde :

M - numărul de intersecții existente în rețeaua stradală

q_{si} - este matricea probabilității de tranziție care descrie contribuția fiecărei surse de intrare în rețea la fiecare intersecție existentă în rețea. Sursa de intrare este singura care generează fluxul de trafic în sistem.

q_{ji} - matricea probabilităților de tranziție ce prezintă contribuția la formarea fluxului de trafic al fiecărei străzi care este conectată la intersecția i .

e_i, e_j - capacitatea de trecere relativă a străzii j conectate la intersecția i .

QF_{ij} - factorul de calitate al străzii j .

Această ecuație este utilizată la construirea ecuațiilor diferențiale ce descriu comportamentul vehiculelor/traficului rutier în structura stradală luată în considerare.

Prin intermediul acestei relații este îmbunătățit modelul lui Jackson prin introducerea capacității relative de trecere în ecuația (3.37) și anume:

$$P(\underline{n}) = P(\underline{0}) \cdot \Lambda(N) \cdot \prod_{i=1}^M \frac{e_i^{n_i}}{M_i(n_i)} \quad (4.2)$$

Astfel, forma acestei ecuații va fi:

$$P(\underline{n}) = P(\underline{0}) \cdot \Lambda(N) \cdot \prod_{i=1}^M \frac{\left(q_{si} + \sum_{j=1}^M QF_{ij} \cdot q_{ji} \cdot e_j \right)^{n_i}}{M_i(n_i)} \quad (4.3)$$

Aplicarea factorului de calitate în cadrul modelului lui Jackson permite evidențierea modului în care fiecare caracteristică statică sau dinamică influențează conduita fluxului de trafic în rețeaua de transport.

4.4. Concluzii

Acest capitol prezintă unificarea elementelor din teoria clasică a șirurilor de așteptare cu cele existente în traficul rutier. În prima parte a acestui capitol este expusă importanța utilizării grafurilor în reprezentarea topologiei rețelei de transport.

În partea a doua este detaliat modul în care s-a realizat unificarea elementelor specifice teoriei modelării traficului cu elementele clasice existente în teoria șirurilor de așteptare. Tot aici este definit și prezentat elementul care realizează această legătură (factorul de calitate). Cu ajutorul acestei abordări în domeniul traficului rutier se permite evaluarea sistemului de transport din punct de vedere calitativ.

În finalul capitolului este descris modelul lui Jackson care s-a dezvoltat prin intermediul factorului calitate al traficului rutier. Prin aplicarea factorului de calitate în cadrul modelului lui Jackson se evidențiază modul în care fiecare caracteristică statică sau dinamică influențează conduita fluxului de trafic în rețeaua de transport.

5. FACTORUL DE CALITATE. CONTRIBUȚII PROPRII

5.1. Modelul analitic al factorului de calitate.

5.1.1. Prezentarea modelului.

Modelul de calcul al factorului de calitate este un model regresional liniar.

În analiza statistică, regresia liniară este o abordare des utilizată pentru investigarea și modelarea relației dintre o variabilă dependentă (y) și una sau mai multe variabile independente (x) [72],[73]. Scopul regresiei liniare este de a exprima relația sub forma unei funcții.

Astfel, un model regresional este definit de o funcție de forma:

$$y = f(x) \quad (5.1)$$

Unde atât y cât și x sunt atributele ce definesc un obiect și care sunt supuse procesului de modelare.

Acest model înglobează matematic relațiile care apar la nivelul setului de atribute ale unui obiect ponderate de atributele celorlalte obiecte din setul studiat [72] [73].

Pentru construirea unui model al acestor variabile se parcurg două etape de analiză :

- a) Analiza regresională care se ocupă cu descrierea și cercetarea legăturilor (dependenței) care există între variabilele ce caracterizează elementele subiectului analizat.
- b) Calculul coeficientului de corelație care se ocupă cu determinarea gradului de dependență care există între variabile.

În ce privește modelul de calcul regresional al factorului de calitate propus în [52], acesta este un model regresional multiliniar. Acest factor ia în considerare elementele caracteristice rețelei de transport atât configurația stradală: benzi de circulație, lățimea benzii de circulație, sistemul de semaforizare prezent sau absent, cât și componenta dinamică specifică unui trafic particular existent: numărul de mașini, intervalul de timp de parcurgere a intersecției.

Acest factor este utilizat pentru caracterizarea globală a traficului într-o intersecție dar și pentru optimizarea traficului într-o structură de intersecții interconectate. Rezultatul furnizat de model este o valoare numerică prin care se descrie calitatea unei străzi.

Astfel, modelul regresional al factorului de calitate este de forma:

$$\text{Factorul de calitate} = f(\text{caracteristicile rețelei de transport})$$

Pentru obținerea acestui model s-a considerat că principalele caracteristici ce intervin sunt: numărul de benzi, lățimea benzii de circulație, declivitatea, fluxul de saturație, viteza, tipul zonei, vehicule grele, bus, PHF.

5.1.2. Descrierea caracteristicilor structurii stradale

Lățimea benzii de circulație este o caracteristică a unui drum care influențează foarte mult siguranța și confortul participanților la trafic. Această caracteristică poate conduce la o modificare a valorii capacității drumului sau a fluxului de vehicule pe secțiunea analizată sau zonele adiacente.

Declivitatea este o caracteristică a brațelor intersecției care ia în considerare efectul înclinării drumului asupra operării tuturor vehiculelor.

Fluxul de saturație este numărul de vehicule care poate fi preluat de grupul de benzi.

Viteza este un parametru care evidențiază direct comportamentul vehiculelor pe un segment de rețea. Acest indicator permite evaluarea traficului în vederea optimizării deplasării vehiculelor și creșterea siguranței în trafic.

Tipul zonei. Un element important care poate caracteriza arterele și afecta valoarea specificată pentru capacitatea arterelor este tipul zonei. Tipul zonei este o modalitate obiectivă de a stabili dacă arterele sunt situate în centre/zone/sectoare de activitate densă (aglomerate) sau în zone mai îndepărtate.

Vehicule grele. Această caracteristică a traficului descrie procentul de vehicule grele pe grupuri de bandă și oferă posibilitatea de a corecta eventualele întârzieri și reduceri ale capacității rutiere cauzate de prezența vehiculelor grele în trafic.

Bus este parametrul ce prezintă numărul de opriri al autobuzelor și ia în considerare impactul autobuzelor și stațiilor de autobuz aflate pe lungimea străzii analizate.

PHF (peak hour factor) este modul de calcul pentru contorizarea traficului. Acesta reprezintă volumul mediu de vehicule înregistrat în perioada de vârf în 60 minute, perioada care este împărțită în patru intervale de timp în care traficul este contorizat pe durata a 15 minute. Valoarea cea mai mare atinsă pe una din cele patru intervale de timp este considerată valoarea lui PHF [52].

5.2. Determinarea modelului analitic

Datele utilizate pentru construirea modelului au fost obținute prin modelarea unei intersecții de tipul celei din figura 5.1, modificând parametri menționați mai sus conform standardelor impuse de normele de circulație rutieră.



Fig.5.1 Tipul intersecției care a fost supusă modelării [52].

Selectarea intersecției s-a realizat prin intermediul Google Earth, care a furnizat reprezentarea grafică ce se observă în figura 5.1. Tipul intersecției alese este în forma de „X”. Aceasta permite un număr de 4 intrări respectiv 4 ieșiri.

Modelarea intersecției s-a realizat cu ajutorul mediului de modelare și simulare Synchro- Simtraffic. Acest mediu are abilitatea de a modela rețelele de intersecții semnalizate și nesemnalizate, de a verifica și ajusta operațiunile de semnal, de a analiza distanțele intersecțiilor cu probleme de blocare și de schimbare a benzii de mers, de a analiza funcționarea intersecțiilor cu congestii grele.

Prin modificarea parametrilor menționați mai sus s-au realizat câteva teste pentru a putea stabili valorile coeficienților parametrilor luați în calculul factorului de calitate. Acești coeficienți redau importanța fiecărui parametru în analiza calității traficului.

În tabelul de mai jos se pot vedea câteva din valorile parametrilor care au fost utilizați în testele realizate pentru analiza intersecției. Tabelul 5.1.

Tabelul 5.1. Parametrii fluxului de trafic corespunzătorii fiecărui test. [52]

Nr. teste	Parametrii de trafic								
	Numărul de benzi	Lățimea benzii	Declivitatea	Fluxul de saturație	Viteza	Tipul zonei	Vehicule grele	Bus	PHF
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉
T1	1	3.7	0	1900	50	1	0	0	0.92
T2	1	2.7	0	1900	50	1	2	0	0.92
T3	1	3.7	2	1900	50	0	0	4	0.89
T4	2	2.5	0	1500	50	1	1	0	0.92
T5	1	4.5	0	1900	30	1	0	1	0.92
T6	2	3.7	0	1500	50	0	0	0	0.98
T7	1	3.7	0	1900	50	1	2	0	0.92
T8	1	3.5	0	1900	50	1	0	3	0.92
T9	2	3	0	1900	50	0	0	0	1
...									
T85	1	3.5	2	1400	30	1	0	3	0.98

În urma realizării acestor teste s-au centralizat datele.

Pentru determinarea modelului s-a recurs la un instrument profesional DataFit, care simplifică task-urile de plotare a datelor, analiză regresională și analiză statistică. Astfel, prin intermediul modelelor regresionale, acest instrument a propus pe baza datelor din tabelul 4, modelul de forma:

$$QF_{ij} = a \cdot x_1 + b \cdot x_2 + c \cdot x_3 + d \cdot x_4 + e \cdot x_5 + f \cdot x_6 + g \cdot x_7 + h \cdot x_8 + i \cdot x_9 \quad (5.2)$$

Unde :

x_1 - numărul de benzi.

x_2 - lățimea benzii.

x_3 - declivitatea

x_4 - fluxul de saturație.

x_5 - viteza

x_6 - tipul zonei

x_7 - vehicule grele

x_8 - bus (mijloace de transport în comun)

x_9 - PHF (peak hour factor)

a, b, \dots, i - coeficienții ecuației care corespund fiecărui parametru din relație.

În urma prelucrării datelor cu DataFit s-au obținut valorile coeficienților modelului propus de acesta. Aceste valori sunt prezentate în următorul tabel [52]:

Tabelul 5.2. Valorile coeficienților ecuației (5.2) [52].

Coeficienții ecuației	Valori	95% (+/-)
a	0.3182	0.2820
b	0.1117	0.1891
c	0.2484	8.9394
d	-3.7309	5.3980
e	7.0607	1.1629
f	1.0307	0.1594
g	1.5641	8.0090
h	1.0427	5.3393
i	8.7046	0.8776

Datele au fost obținute cu un coeficient de regresie (corelare) liniară de 0,89.

Valoarea coeficientului de corelare oferă o primă indicație asupra calității modelului regresional. Deoarece acest parametru definește credibilitatea modelului (modelul are o credibilitate de 0,89, maxim este 1), putem concluziona că setul de teste este corect ales și astfel este posibilă utilizarea matricii de corelație pentru analiza relațiilor care apar.

5.3. Analiza coeficienților de corelare parțială

Acest tip de analiză are la bază matricea coeficienților de corelare. Aceasta definește cum și în ce măsură un parametru influențează un alt parametru și cum și în ce măsură este influențat de alți parametri. Ca urmare rezultă un aspect important și anume faptul că devine posibilă obținerea de informații privind modul în care caracteristicile structurii stradale influențează formarea congestiilor [52].

Matricea de corelare furnizată de DataFit pentru modelul ales este dată în continuare de varianta în care se găsesc valorile absolute.

Tabelul 5.3. Matricea de corelare.

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	Y
X1	1.00	0.35	-0.27	0.17	0.07	0.22	-0.25	-0.25	-0.17	-0.05
X2	0.35	1.00	-0.40	0.49	0.26	0.08	-0.15	-0.15	-0.14	-0.40
X3	-0.27	-0.40	1.00	-0.62	-0.35	-0.05	0.14	0.14	-0.11	0.53
X4	0.17	0.49	-0.62	1.00	0.53	0.00	-0.08	-0.08	-0.13	-0.89
X5	0.07	0.26	-0.35	0.53	1.00	0.01	-0.02	-0.02	-0.03	-0.47
X6	0.22	0.08	-0.05	0.00	0.01	1.00	-0.11	-0.11	-0.05	0.46
X7	-0.25	-0.15	0.14	-0.08	-0.02	-0.11	1.00	0.02	0.08	0.02
X8	-0.25	-0.15	0.14	-0.08	-0.02	-0.11	0.02	1.00	0.08	0.02
X9	-0.17	-0.14	-0.11	-0.13	-0.03	-0.05	0.08	0.08	1.00	0.09
Y	-0.05	-0.40	0.53	-0.89	-0.47	0.46	0.02	0.02	0.09	1.00

În ce privesc valorile coeficienților de corelare parțială, acestea reflectă importanța fiecărui parametru în cadrul modelului propus, și mai exact contribuția fiecărui parametru luat în considerare la stabilirea nivelului de calitate/congestie a traficului [52].

Tabelul 5.4. Coeficienții de corelare parțială [52].

Caracteristicile traficului	Coeficienții de corelare parțială
Numărul de benzi	-0.05
Lățimea benzii	-0.40
Declivitatea	0.53
Fluxul de saturație	-0.89
Viteza	-0.47
Tipul zonei	0.46
Vehicule grele	0.02
Bus	0.02
PHF	0.09

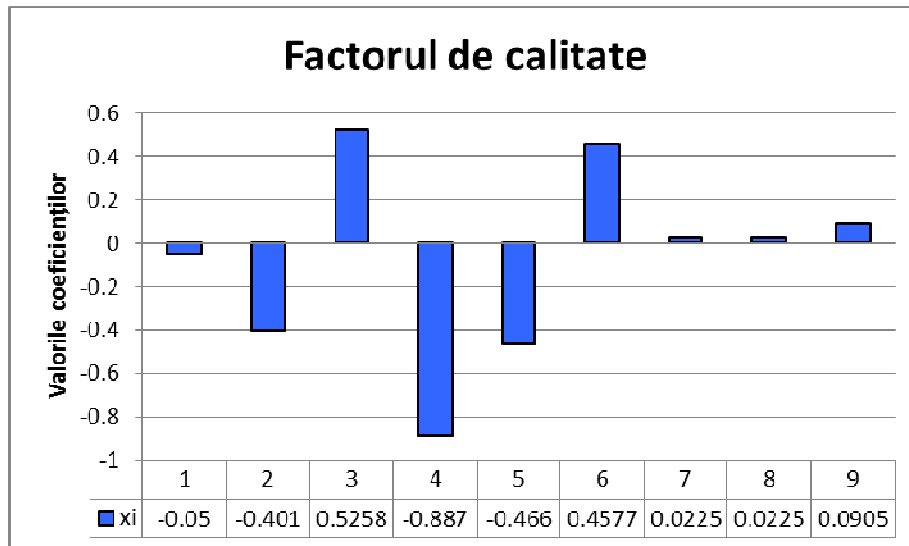


Fig. 5.2 Reprezentarea grafică a coeficienților de corelare parțială [52]

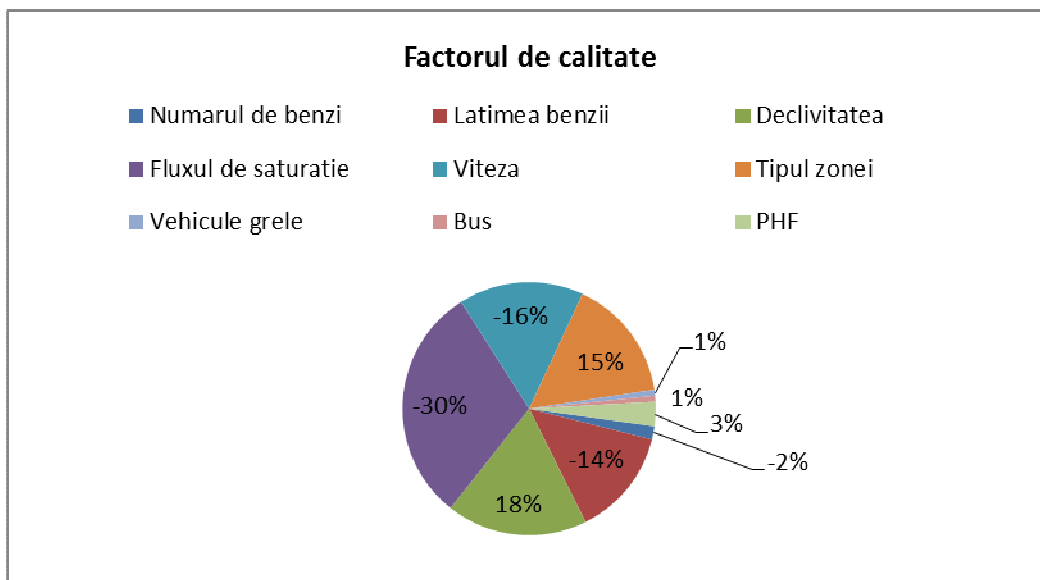


Fig.5.3 Influența fiecărui parametru al traficului asupra factorului de calitate [52].

Luând în discuție valorile absolute ale coeficienților de corelare parțială din figura 5.2 și figura 5.3 se observă următoarele [52]:

- Fluxul de vehicule (parametrul x_4) degradează factorul de calitate stradal. O valoare mare conduce la micșorarea semnificativă a acestui parametru, fiind principalul aspect care influențează acest indicator.

- Cea mai mare contribuție la formarea de blocaje în trafic îl are declivitatea (parametrul x_3). Cu cât valoarea acesteia crește cu atât factorul de calitate este mai bun.

- Parametrul tip zonă (parametrul x_6) arată influența zonei în care este prezentă strada la formarea congestiilor. O zonă care nu este centrală îmbunătățește factorul de calitate stradal.

- Un alt parametru care influențează negativ factorul de calitate este viteza (x_5). Dacă valoarea vitezei de deplasare a traficului are tendința de creștere atunci valoarea factorului de calitate este diminuată.

- Pe poziția următoare, în ordinea în care este influențat factorul de calitate, se situează parametrul x_2 ce ia în calcul lățimea benzii de circulație. O reducere a dimensiunii acestui factor reprezintă o înrăutățire a valorii factorului de calitate.

- Următorul loc este ocupat de PHF(x_9). Acest factor care are în vedere volumul maxim de vehicule în decurs de 15 minute pe parcursul unei ore, influențează într-o mică măsură factorul de calitate. O valoare mai mare a acestuia conduce la o îmbunătățire nesemnificativă a factorului de calitate.

- În ce privește numărul de benzi (x_1) se poate spune că un număr mai mare de benzi ridică valoarea calității traficului.

- Parametrul ce descrie procentul de vehicule grele (x_7) prezintă o influență mai redusă asupra factorului de calitate. Cu cât procentul de vehicule crește cu atât valoarea calității stradale este diminuată, fapt ce se datorează și celorlalți factori luați în calcul (vitezei de deplasare).

- O influență similară o are și numărul de opriri ale mijloacelor de transport în comun (x_8).

5.4. Concluzii

În cadrul acestui capitol este dezvoltat modul de calcul al factorului de calitate, care a fost introdus cu scopul de a unifica elementele existente în teoria cozilor de așteptare cu cele existente în traficul rutier.

În prima parte a fost prezentat modelul analitic de calcul regresional al factorului de calitate. Pentru obținerea acestui model s-au considerat că principalele caracteristici ce intervin în model sunt: numărul de benzi, lățimea benzii de circulație, declivitatea, fluxul de saturație, viteza, tipul zonei, vehicule grele, bus, PHF. Tot în cadrul acestui capitol sunt descrise aceste caracteristici ale structurii stradale.

În cea de-a doua parte sunt punctate toate etapele parcurse în scopul determinării modelului analitic:

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

Partea ce încheie acest capitol oferă o analiză a coeficienților de corelare parțială, analiză care reflectă influența fiecărui parametru în cadrul modelului de calcul al factorului de calitate.

6. EXPERIMENTE

6.1. Modelarea traficului cu ajutorul centrelor de servire

Sistemele de transport au un rol esențial în societatea modernă deoarece facilitează accesul la resursele naturale și stimulează schimburile comerciale. Studiile privind acest domeniu au ca scop îmbunătățirea rețelelor de transport prin dezvoltarea unor noi metode de optimizare. Din cauza creșterii parcului auto la nivel mondial, una dintre cele mai frecvente probleme cu care se confruntă o rețea de transport este congestia traficului. Prin crearea unui model de trafic și simularea acestuia avem posibilitatea de a evita această problemă și de a găsi soluțiile corespunzătoare. În acest studiu de caz se propune o nouă metodă de modelare a traficului rutier. Această metodă 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.

6.1.1. Prezentarea metodei

Acest studiu de caz își propune să facă un pas înainte prin modelarea intersecțiilor dintr-un sector din rețeaua de transport urban cu ajutorul centrelor de servire. Centrele de servire sunt elemente de bază folosite în evaluarea performanțelor sistemelor de calcul. Elementul esențial al studiului constă în aplicarea unui nou model analitic bazat pe centre de servire în simularea traficului rutier.

Metoda prin care reprezentăm un sector de drum într-un mod unitar și care reflectă cât mai bine situația reală este modelarea cu ajutorul cozilor de așteptare. Ea a fost inițial aplicată în modelarea sistemelor de calcul, unde a obținut rezultate foarte bune, și s-a extins la alte sisteme reale.

O coadă de așteptare constă în implementarea unei liste de așteptare a unor clienți pentru obținerea unui serviciu. Serviciul poate să fie furnizat de unul sau mai multe servere. Acest ansamblu (coada de așteptare și serverele de furnizare de servicii) poartă denumirea de centre de servire [26]. Dacă facem o analogie cu lumea reală, ne putem închipui unul sau mai multe ghișee care sunt accesate printr-o coadă de așteptare. Ghișeele lucrează în paralel și furnizează același serviciu, indiferent de poziția lor.

Pentru a putea modela într-un mod unitar intersecțiile dintr-un sector de drum am ales ca model **M/G/1**, deoarece este foarte apropiat de ideea de intersecție de trafic.

În acest fel putem modela ambele tipuri de intersecție existente: semaforizate și nesemaforizate. Parametrii de funcționare specifici sunt calculați după o analiză a traficului rutier.

Determinarea celor mai importanți parametrii (rata de servire și cererea de servire) este obținută statistic prin analiza parametrilor reali. În subcapitolul

următor este prezentată metoda de implementare a unui sector de drum cu un astfel de model. De asemenea sunt supuse analizei diverse situații de congestie apărute și modul în care acestea au fost remediate.

6.1.2. Simularea modelului

Simularea modelului propus s-a efectuat utilizând mediul de simulare Java Modelling Tools (JMT) [58], [50].

a) **Construirea modelului**

Pentru testarea modelului analitic se consideră un sector din rețeaua de transport din mediu urban. Reprezentarea grafică a acestui sector de drum este furnizată de către Google Earth, și se poate vizualiza în Fig.6.1.



Fig.6.1 Un sector de drum dintr-o rețea de transport urban [50].

Pentru a realiza simularea în JMT am ales din figură mai multe artere de circulație și am definit următoarele componente:

- Liniile albe – reprezintă arterele de circulație care fac legătura între intersecțiile (nodurile) rețelei.
- Liniile galbene – reprezintă întrările și ieșirile în sectorul de drum analizat.
- $S_1 \dots S_7$ - reprezintă intersecțiile din sectorul analizat.

Fiecare dintre aceste componente trebuie transpuse în JMT pentru a putea realiza un studiu analitic și pentru a putea simula modelul. Astfel, intersecțiile devin centre de servire cu parametrii asociați, iar săgețile galbene sunt Source/Sink în JMT.

Graful de simulare asociat cu figura 6.1 a fost creat în JMT ca în figura 6.2. Se poate observa că modelul ce trebuie simulat are în componența sa: o sursă de intrare, 7 centre de servire și o sursă de ieșire.

Pentru construirea modelului de simulare a unei rețele de șiruri de așteptare trebuie avute în vedere aspecte ca: reprezentarea grafică a sectorului de drum ce se analizează, definirea tipurilor de clase de clienți, definirea indicilor de performanță analizați.

Asadar, modelul de simulare propus este reprezentat grafic în Fig.6.2.

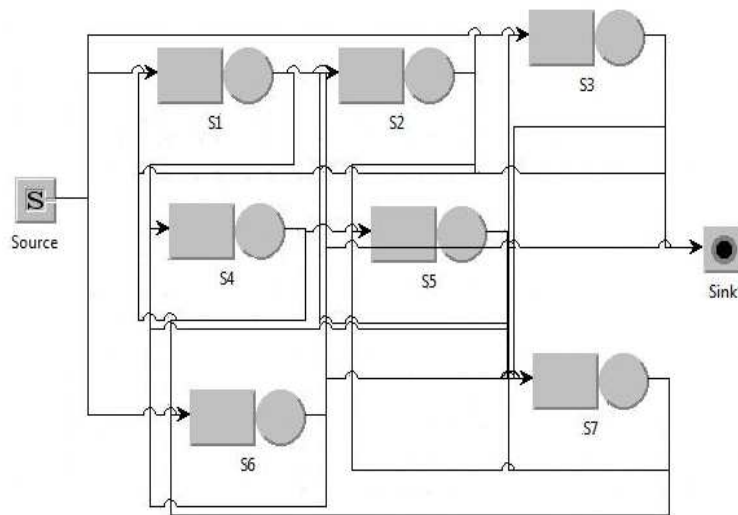


Fig.6.2 Modelul de simulare propus [50].

Pentru simplificare s-a considerat că intrările în sistem sunt generate de o singură sursă și avem tot o singură sursă de ieșire.

Ca și element component, sursa de intrare este cea care generează fluxul de trafic în sistem. Modul în care aceasta repartizează traficul în sistem se face în funcție de tipul distribuției alese și rata de sosire a fluxului de vehicule.

Sursa de ieșire este utilizată pentru tipurile de clienți care ies din sistem. Această sursă nu este caracterizată de nici un parametru, clienții părăsind în mod "liber" sistemul.

Următorul pas în vederea simulării este definirea claselor de clienți ce tranzitează sistemul. Exemplul propus utilizează 3 tipuri de clase de clienți: Auto, Autobuze, Biciclete. Fiecare clasă de clienți are ca sursă de referință singura sursă de intrare. Aceste clase de clienți sunt considerate ca fiind clase deschise.

În acest caz este necesară definirea parametrului care reprezintă rata de sosire λ a clienților în sistem. Numărul de clienți care sosesc în sistem este calculat pe baza unei distribuții exponențiale. În tabelul de mai jos este prezentată rata de sosire pentru fiecare din clasele utilizate.

Tabelul 6.1. Rata de sosire a celor trei clase [50].

	Auto(cienți/s)	Autobuze(cienți/s)	Biciclete(cienți/s)
Rata de sosire (Arrival rate)	0.6	0.143	0.033

Pentru fiecare dintre centrele de servire din sistem trebuie precizat timpul de servire alocat fiecărei clase de clienți. Timpul de sosire a fost calculat statistic pe baza unor măsuratori reale. Pentru simplificare, s-a considerat că o unitate de timp să fie egală cu 10 secunde în timp real. În tabelul 6.2. se pot observa timpii de servire ce au fost folosiți la simulare pentru toate stațiile/clasele definite.

Tabelul 6.2. Timpii de servire pentru toate tipurile de clase [50].

Intersecții	Auto (unitatea de timp)	Autobuze (unitatea de timp)	Biciclete (unitatea de timp)
S1	3.5	4.5	16.0
S2	4.0	5.0	19.0
S3	4.5	5.5	20.3
S4	3.7	4.7	21.6
S5	5.0	6.0	19.7
S6	3.7	4.7	12.6
S7	4.2	5.2	23.0

b) Modalități de simulare

JMT efectuează simularea unui model în funcție de indicii de performanță aleși. Astfel, se are în vedere determinarea performanței sistemului din punct de vedere al: gradului de utilizare (utilization), numărului de clienți (number of customers), capacitatea (throughput), capacitatea sistemului (throughput system). Valorile acestor parametri se pot obține doar în urma simulării și numai dacă aceasta s-a efectuat cu succes. În caz contrar sistemul definit nu poate fi simulat pentru obținerea indicilor specificați [50].

În situația în care se dorește o analiză mai detaliată asupra sistemului, atunci acesta este supus unor variații ale unuia sau mai multor parametri. Această analiză se realizează cu ajutorul metodei "What if". În urma acestui tip de simulare JMT afișează media și dispersia pentru parametri de performanță specificați.

Trebuie precizat faptul că rezultatele obținute pot varia de la simulare la simulare. Din această cauză, se încurajează efectuarea mai multor simulări în vederea stabilirii unor concluzii finale.

c) Rezultate și grafice.

Pentru exemplul propus în această lucrare se vor afișa grafic rezultatele indicilor de performanță după cum urmează [50]:

Numărul de clienți (Number of customers) - se poate observa din figura 6.3. că numărul de clienți păstrează o valoare constantă de-a lungul simulării în stațiile $S_{2,4,5,7}$. (nu sunt stații de intrare). Dacă facem o analiză pentru cazul în care numărul de clienți variază între 100% și 250% rezultatele obținute sunt similare. Acest fapt se datorează numărului limitat de vehicule ce trec prin intersecție într-un interval de timp.

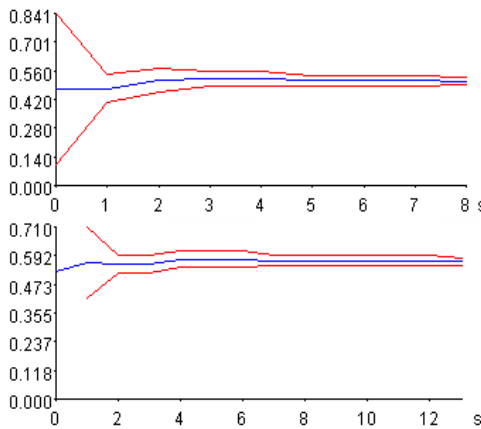


Fig.6.3 Numărul de clienți pentru S_2 și S_4 [50]).

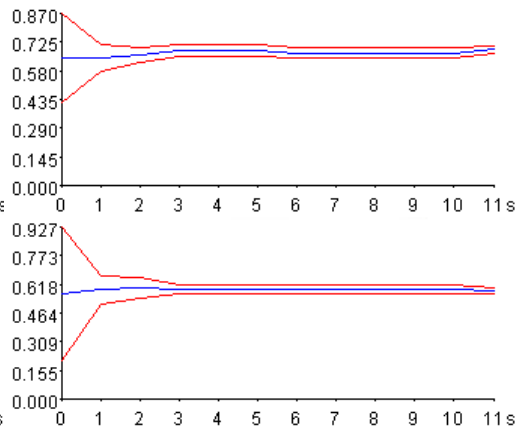
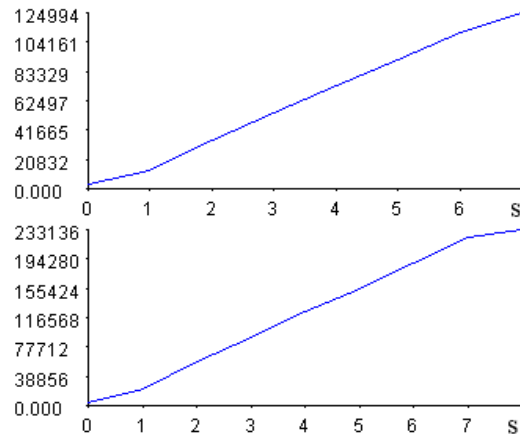
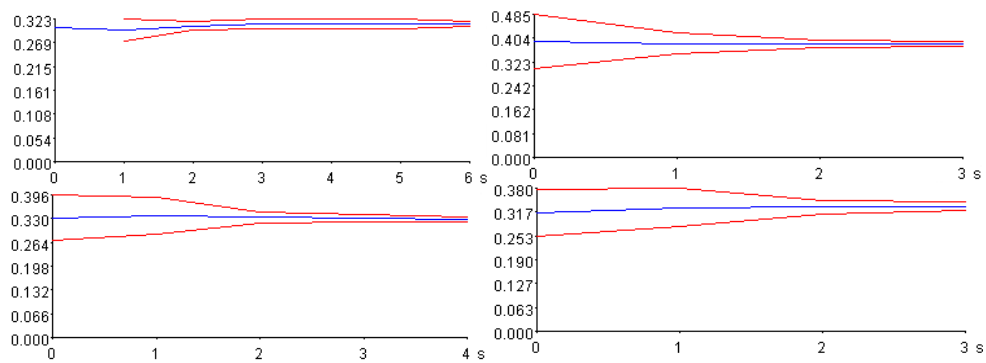


Fig.6.4 Numărul de clienți pentru S_5 și S_7 [50].

În stațiile de intrare ($S_{1, 3, 6}$), simularea nu a putut determina dacă numărul de clienți este constant pe un interval. (Acesta are o tendință crescătoare în timp) Fig.6.5.

Fig.6.5 Numărul de clienți pentru S₁ și S₃ [50].

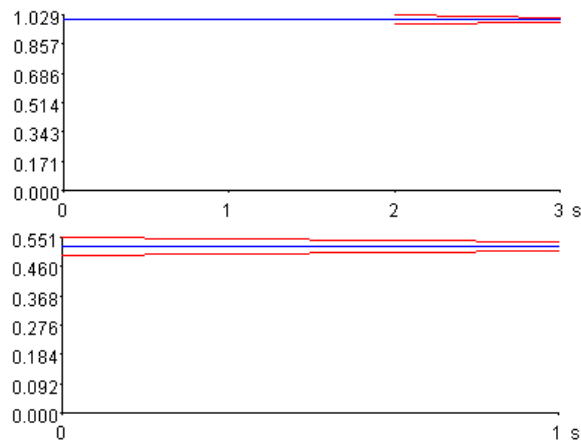
Gradul de utilizare (Utilization) - identic ca și în simulările precedente, nivelul de utilizare al intersecțiilor pentru stațiile S₁, S₃, S₆ este maxim (pragul de saturare). Restul intersecțiilor prezintă o funcționare corectă. Fig.6.6 și 6.7.

Fig. 6.6 Gradul de utilizare pentru S₂ și S₄ [50]Fig.6.7 Gradul de utilizare pentru S₅ și S₇ [50].

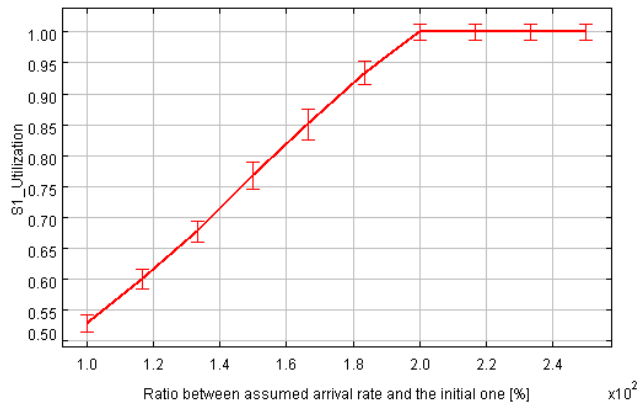
Dacă considerăm că la stația S1 se fac lucrări de modernizare ceea ce presupune o reducere a timpului de servire (vezi tabelul 6.3) gradul de utilizare atinge o funcționare normală.

Tabelul 6.3. Timpul de servire pentru intersecția S1 [50].

Intersecții	Auto (unitatea de timp)	Autobuze (unitatea de timp)	Biciclete (unitatea de timp)
S1	1.42	1.81	6.17

Fig. 6.8. Gradul de utilizare pentru S_1 înainte și după modificarea timpului de servire [50].

Pentru acest caz s-a verificat dacă stația S_1 poate să reziste (nu se saturează) chiar dacă rata de sosire a vehiculelor crește până la 250% (analiza What-if când rata de sosire este între 100% și 250%). Din fig. 6.9 se poate observa că în cazul în care rata de sosire crește la 200% atunci intersecția S_1 se saturează.

Fig. 6.9. Gradul de saturare pentru S_1 pe durata analizei What-If [50].

O ultimă analiză efectuată pentru acest exemplu prezintă schimbarea capacității de trecere prin stația S1 în cazul modernizării acesteia (prezentat mai sus). Din fig 6.10 se poate observa o creștere cu până la 50% a valorii acesteia (de la 2.4 vehicule/s. la 3.1 vehicule/s).

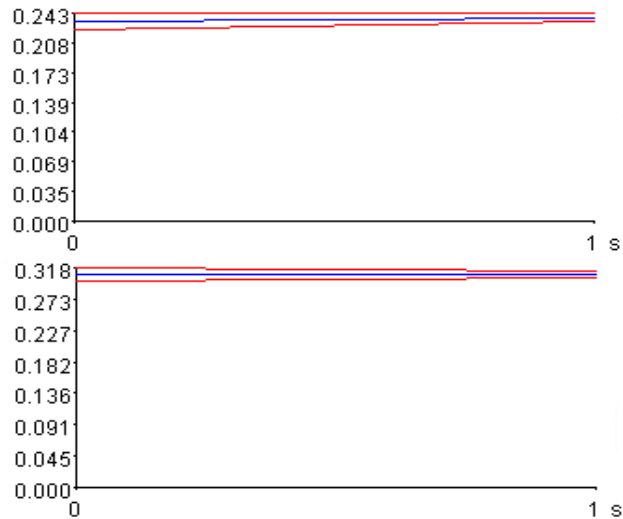


Fig.6.10. Creșterea capacității relative de trecere cu 50% pentru S₁ [50].

6.2. Modelarea analitică a traficului rutier cu factorul de calitate.

6.2.1. Studiu experimental

Pentru a verifica modelul propus în capitolul 4 și 5, pentru factorul de calitate (vezi cap. 4, 5), am considerat un sector de drum dintr-o rețea de transport urban. Reprezentarea grafică a acestui sector de drum este furnizat de către Google Earth, și se poate vizualiza în Fig 6.11. [57].



Fig. 6.11. Reprezentarea grafică a sectorului de drum studiat [57]

Sectorul de drum analizat este compus din:

- Liniile albe – reprezintă arterele de circulație care fac legatura între intersecțiile (nodurile) rețelei.
- Liniile galbene – reprezintă sensurile de circulație ce caracterizează sectorul de drum analizat.
- 1,2,3,4 - reprezintă intersecțiile/nodurile numerotate ale sectorului analizat

Elementele menționate mai sus contribuie la descrierea structurii fizice a sectorului de drum existent. În continuare se va face o detaliere a parametrilor ce compun modelul analitic al factorului de calitate.

6.2.2. Calculul factorului de calitate

Pentru a stabili cu exactitate valorile parametrilor luați în calculul factorului, s-au realizat măsurători pe sectorul analizat din rețea. În tabelul 6.4 se pot observa valorile obținute pentru fiecare parametru în urma măsurărilor [57].

Tabelul 6.4. Valorile parametrilor luați în calcul pentru fiecare conexiune [57]

Conexiuni	Nr. benzi	Lățimea benzii de circulație	Declivitatea	Fluxul de saturație	Viteza	Tipul zonei	Vehicule grele	Bus	PHF
1-2	1	3	0	1900	50	1	3	3	0.92
2-1	1	3	0	2000	50	1	3	3	0.92
1-4	1	3	0	1000	40	1	1	3	0.92
4-1	1	3	0	1100	35	1	1	3	0.92
2-3	1	3.5	0	850	40	1	0	0	0.92
4-3	1	3.5	0	750	40	1	0	0	0.92

Utilizând aceste caracteristici ale topologiei rețelei, se poate determina valoarea procentuală a factorului de calitate pentru fiecare conexiune prezentă în rețeaua studiată. Valorile rezultate sunt prezentate în tabelul 6.5:

Tabelul 6.5. Valorile factorului de calitate pentru fiecare conexiune [57]

Conexiuni	QF – factorul de calitate
1-2	0.669
2-1	0.7157
1-4	0.2506
4-1	0.2977
2-3	0.1743
4-3	0.1277

Modelul propus în [44], reușește să unifice sistemele de trafic rutier cu elementele clasice existente în teoria șirurilor de așteptare. Această unificare se face prin intermediul factorului de calitate. Trebuie precizat că factorul de calitate este asociat fiecărui element fizic luat în considerare din rețeaua stradală. Unificarea se poate observa și din ecuația următoare:

$$e_i = q_{si} + \sum_{j=1}^M QF_{ij} \cdot q_{ji} \cdot e_j ; i = \overline{1, M}; j = \overline{1, M} \quad (6.1)$$

Ecuția descrie relațiile existente într-o structură stradală, parametrii acesteia fiind:

N - numărul de intersecții existente în rețeaua stradală

q_{si} - matricea probabilității de tranziție care descrie contribuția fiecărei surse de intrare în rețea la fiecare intersecție existentă în rețea. Sursa de intrare este singura care generează fluxul de trafic în sistem.

q_{ij} - matricea probabilităților de tranziție ce prezintă contribuția la formarea fluxului de trafic al fiecărei străzi j care este conectată la intersecția i .

e_i, e_j - capacitatea de trecere relativă a străzii j conectate la intersecția i .

QF_{ij} - factorul de calitate al străzii j .

În continuare, sunt definite elementele care s-au utilizat pentru determinarea capacității relative de trecere pentru fiecare nod al rețelei [57].

- Contribuția fiecărui centru de servire/nod (1,2,3,4) la formarea fluxului de vehicule în cadrul rețelei, mai exact matricea probabilităților de tranziție:

$$q_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0.7 & 0 & 0.3 \\ 0.8 & 0 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.35 & 0 & 0.65 & 0 \end{bmatrix}$$

- Contribuția fiecărei surse de intrare în rețea la fiecare nod din rețea care este dată de q_{si} . Pentru simplificare s-a considerat că intrările în sistem sunt generate de o singură sursă.

$$q_{si} = \begin{bmatrix} 0.4 \\ 0.4 \\ 0 \\ 0.2 \end{bmatrix}$$

- Factorul de calitate ce caracterizează conexiunile între nodurile rețelei QF_{ij} precizează starea traficului pe artera de circulație studiată.

$$QF_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0.66 & 0 & 0.25 \\ 0.71 & 0 & 0.17 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.29 & 0 & 0.12 & 0 \end{bmatrix}$$

Toate aceste date sunt utilizate pentru determinarea capacității relative de trecere, la nivelul fiecărui nod de trafic din sectorul de drum analizat. În tabelul de mai jos sunt redate valorile rezultate în urma efectuării calculelor:

Tabelul 6.6 Valorile capacității relative de trecere [57].

Capacitatea relativă de trecere e_i	Valoare cu QF	Valoare fără QF
e_1	0.88702	2.35820
e_2	0.80980	2.05074
e_3	0.04832	1.00000
e_4	0.26652	0.90746

Valorile obținute în urma acestui studiu pentru capacitatea relativă de trecere prin nodurile rețelei sunt diferite. Acest lucru se datorează variației calității traficului pe anumite sectoare ale rețelei de transport (trafic blocat- fluent) și este un aspect întâlnit de fiecare dată când se încearcă modelarea unui sistem de trafic real. Rezultatele sunt evidențiate grafic în figura 6.12.

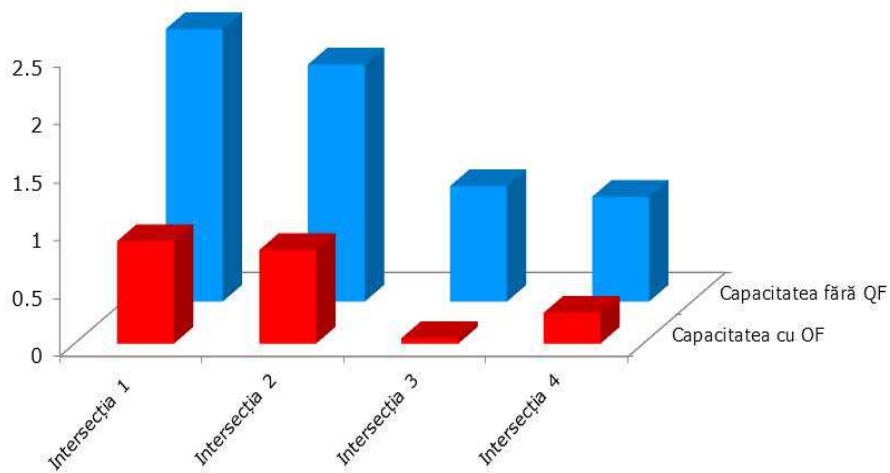


Fig. 6.12 Reprezentarea grafică a capacității relative de trecere obținută analitic.

În urma analizării graficului din fig. 6.12 apar două aspecte:

- Capacitatea relativă de trecere fără factorul de calitate propus este ideală, prin faptul că se ține cont numai de topologia de interconectare a traseelor rutiere din sistemul modelat.
- Capacitatea relativă de trecere care încorporează factorul de calitate propus ține cont de caracteristicile de trafic reale. Din acest considerent, capacitatea reprezintă o valoare reală care este mult mai mică decât cea ideală – în general valoarea reală este cu cel puțin 37% mai mică decât cea ideală.

6.2.3. Validarea modelului.

Pentru a putea valida modelul propus, l-am implementat în Java Modelling Tools (JMT).

Java Modelling Tools (JMT) este un mediu integrat pentru caracterizarea volumului de muncă și de evaluare a performanței bazate pe modele de șiruri de așteptare [59]. JMT suportă o gamă largă de activități, care permite evaluarea performanței, cum ar fi modelul de planificare a capacității de simulare și algoritmi de analiză, caracterizarea volumului de muncă, identificarea automată a blocajelor din rețea, modelarea și optimizarea modelelor analitice. De obicei, în JMT, analiza indicilor de performanță este focalizată pe estimarea debitului, timpului de răspuns la solicitări, gradului de utilizare [50].

Pentru validarea modelului s-a luat în considerare sectorul din rețeaua de transport urban a cărui reprezentare grafică este în figura 6.11. [57].

Fiecare dintre componentele rețelei care se regăsesc în Fig. 6.11 trebuie translatare în JMT pentru a putea realiza o analiză analitică și pentru a putea testa modelul. În urma operației de translatare am obținut graful de simulare din figura 6.13 (acesta este asociat sectorului de drum prezentat în figura 6.11.)

Pentru simularea modelului trebuie avute în vedere următoarele aspecte: reprezentarea grafică a sectorului de drum, definirea tipurilor de clase de clienți, definirea indicilor de performanță analizați.

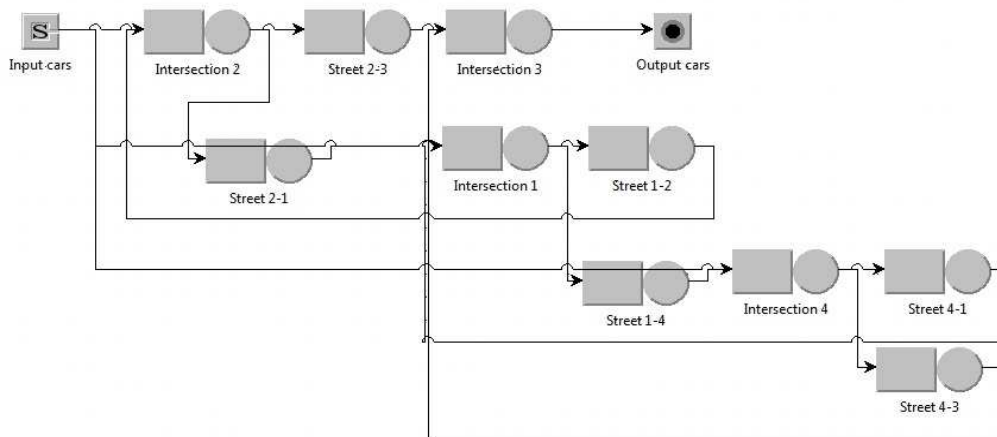


Fig. 6.13 Modul de configurare a modelului de simulare pentru sectorul de drum analizat [57].

Simularea modelului s-a făcut utilizând un model de cozi de așteptare cu clase deschise. În cadrul modelelor cu clase deschise, fiecare clasă de clienți are ca sursă de referință singura sursă de intrare. Din această cauză, sursa de intrare este cea care generează fluxul de trafic în sistem.

Modul în care aceasta repartizează traficul în sistem se face în funcție de tipul distribuției ales și rata de sosire a fluxului de vehicule.

Pentru a putea funcționa, modelul are nevoie de definirea parametrului ce reprezintă rata de sosire a clienților în sistem. Numărul de clienți care sosesc în sistem este calculat pe baza unei distribuții exponențiale. Pentru a putea simula modelul se va lua în calcul valorile obținute în secțiunea de mai sus [57].

JMT realizează simularea modelului în funcție de indicii de performanță aleși. Astfel, se are în vedere determinarea performanței sistemului din punct de vedere al: gradului de utilizare (utilization), timpului de așteptare (queue time), timpului de răspuns (response time), capacității (throughput).

Valorile rezultate după simulare se pot vedea în tabelele următoare:

Tabelul 6.7. Valorile obținute pentru gradul de utilizare [57].

Gradul de utilizare (Utilization)	Strada S1-2	Strada S1-4	Strada S2-3	Strada S4-3	Strada S2-1	Strada S4-1
Gradul de utilizare fără <i>QF</i>	0.705	0.298	0.349	0.417	0.647	0.135
Gradul de utilizare cu <i>QF</i>	0.866	0.140	0.113	0.216	0.887	0.174

Tabelul 6.8. Valorile obținute pentru timpul de așteptare[57]

Timpul de așteptare (Queue Time)	Strada S1-2	Strada S1-4	Strada S2-3	Strada S4-3	Strada S2-1	Strada S4-1
Timpul de așteptare fără <i>QF</i>	44.428	8.565	10.650	13.917	35.403	3.073
Timpul de așteptare cu <i>QF</i>	126.168	3.264	2.662	5.608	144.047	4.198

Tabelul 6.9. Valorile onținute pentru timpul de răspuns [57]

Timpul de răspuns (Response time)	Strada S1-2	Strada S1-4	Strada S2-3	Strada S4-3	Strada S2-1	Strada S4-1
Timpul de răspuns fără <i>QF</i>	65.491	28.853	30.774	33.709	54.870	23.055
Timpul de răspuns cu <i>QF</i>	139.243	23.267	22.714	25.224	161.368	24.265

Tabelul 6.10. Valorile obținute pentru capacitatea relativă de trecere [57]

Capacitatea (Throughput)	Intersecția 1	Intersecția 2	Intersecția 3	Intersecția 4
Capacitatea fără <i>QF</i>	0.05	0.05	0.038	0.027
Capacitatea cu <i>QF</i>	0.05	0.05	0.016	0.019

În tabelul 6.7 este redat **gradul de utilizare** pentru fiecare din arterele existente în sectorul de drum. Analiza a fost făcută în situația în care factorul de calitate (QF) este luat în considerare, respectiv pentru cazul în care acesta nu este luat în considerare (QF = 1 pentru toate elementele).

Valorile rezultate pentru gradul de utilizare, indică o îmbunătățire a acestuia în cazul străzilor "1-2" respectiv "2-1", în situația în care factorul de calitate este luat în considerare (Fig. 6.14). Precizăm că în sectorul de drum analizat, cele două străzi reprezintă două sensuri de circulație ce alcătuiesc în ansamblu o arteră principală din rețea.

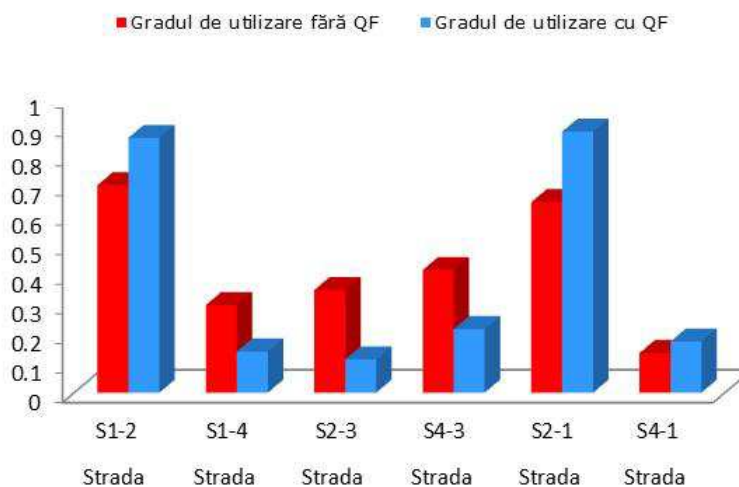


Fig.6.14. Reprezentarea grafică a valorilor obținute pentru gradul de utilizare.

Se observă că o catalogare a străzilor în funcție de factorul de calitate asociat fiecăreia conduce la obținerea unui grad de utilizare mai bun pentru rețeaua stradală pentru care s-a efectuat analiza. 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 participanților la trafic preferă drumuri calitative în detrimentul celor mai puțin calitative.

Un lucru similar se obține și în cazul în care am măsurat **timpul de răspuns și timpul de așteptare** pentru sectorul de drum analizat. Valorile obținute de acest indice marchează o creștere în cazul străzilor 1-2 și 2-1, pentru cazul în care se ia în considerare factorul de calitate al străzilor analizate. Acest fapt se datorează importanței caracteristicilor ce descriu topologia rețelei.

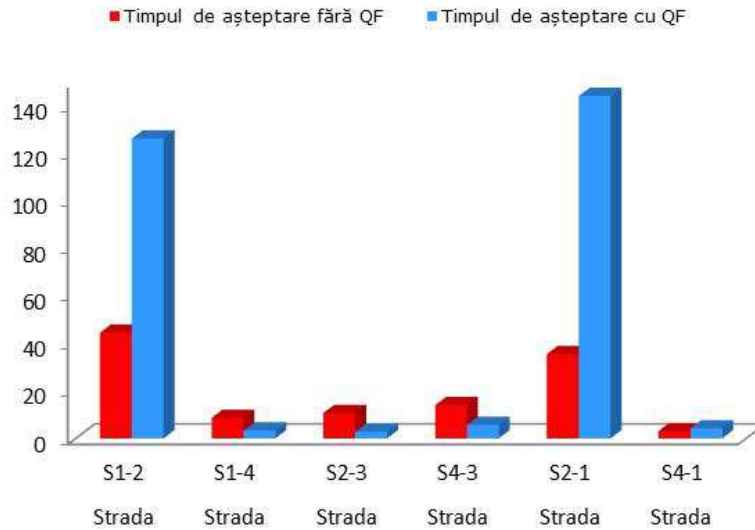


Fig.6.15. Reprezentarea grafică a valorilor obținute pentru timpul de așteptare.

În tabelele 6.8 și 6.9, se pot vizualiza valorile timpului de așteptare și ale timpului de răspuns pentru fiecare stradă în parte. Și în acest caz este evidentă prezența unui factor de calitate mărit la calculul indicelui de performanță pentru artera principală, lucru ce se poate observa și în figurile 6.15 și 6.16.

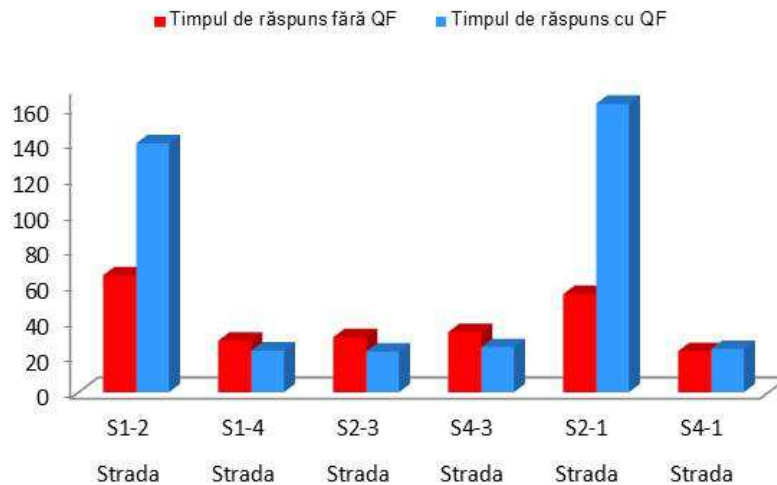


Fig.6.16. Reprezentarea grafică a valorilor obținute pentru timpul de răspuns.

Tabelul 6.10. afișează valorile **capacității** în urma unor teste realizate la nivelul fiecărei intersecții a rețelei analizate. Aceste valori se mențin constante (vezi fig. 6.17) pentru intersecțiile 1 și 2 pentru ambele cazuri în care *QF* este sau nu luat în calcul, iar pentru celelalte două se observă o scădere a capacității [57].

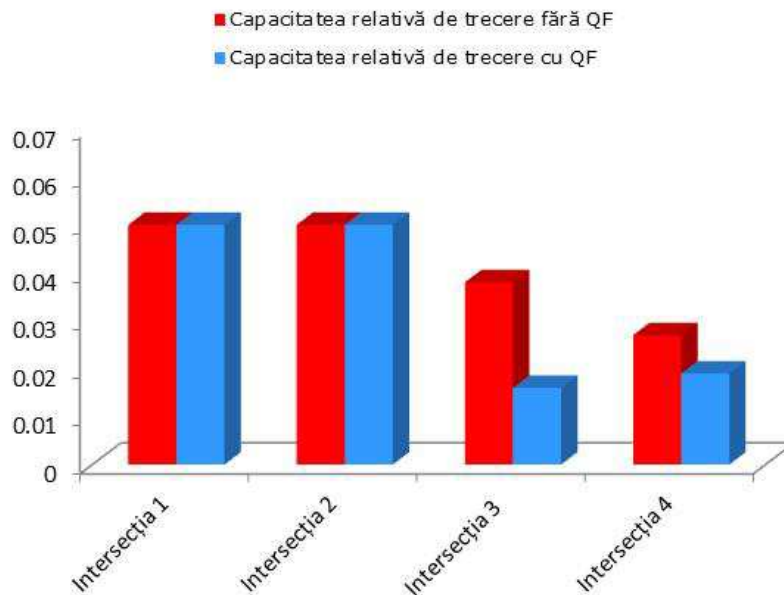


Fig.6.17. Reprezentarea grafică a valorilor obținute pentru capacitate.

6.3. Concluzii

În cadrul acestui capitol 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.

7. CONCLUZII

În acest capitol sunt prezentate contribuțiile autorului, iar la final sunt expuse principalele direcții de continuare a cercetării.

7.1. Contribuții proprii

În cele ce urmează sunt enumerate contribuțiile personale. Acestea au fost punctate în cadrul tezei la fiecare capitol în parte.

Contribuții aferente capitolului 2:

- Prezentarea principalelor concepte de bază specifice modelării sistemelor de trafic rutier.
- Clasificarea metodelor de modelare a traficului punctând utilitatea fiecăreia.
- Elaborarea unei sinteze asupra evoluției modelării traficului rutier.
- Definirea principalilor indici de performanță care sunt utilizați în descrierea globală a unui sistem de trafic.
- Realizarea unei analize a metodelor curente de modelare și simulare a traficului rutier.

Contribuții aferente capitolului 3:

- Realizarea unei vederi de ansamblu asupra conceptului de șir/coadă de așteptare prin descrierea componentelor ce o alcătuiesc și asupra modelării cu șiruri de așteptare
- Prezentarea mărimilor care se iau în considerare în modelarea cu șiruri de așteptare
- Descrierea principalilor indici de performanță care sunt utilizați în modelarea cu șiruri de așteptare
- Elaborarea unei sinteze asupra evoluției modelării traficului rutier cu ajutorul cozilor de așteptare
- Realizarea unei sinteze asupra dezvoltării existente în teoria rețelelor cu cozi de așteptare și anume modelul conceput de Jackson.
- Prezentarea detaliată a modelului lui Jackson atât pentru rețelele deschise de cozi de așteptare cât și pentru cele închise

Contribuții aferente capitolului 4:

- Evidențierea importanței utilizării grafurilor în reprezentarea topologiei rețelei de transport.

- Detalierea modului în care s-a realizat unificarea elementelor specifice teoriei modelării traficului cu elementele clasice existente în teoria șirurilor de așteptare.
- Definirea indicelui de performanță care face posibilă utilizarea teoriei șirurilor de așteptare în modelarea traficului rutier (factorul de calitate).
- Descrierea procedurii de calcul a modelului lui Jackson care s-a dezvoltat prin intermediul factorului calitate al traficului rutier.

Contribuții aferente capitolului 5:

- Dezvoltarea modelului regresional care calculează indicele de performanță propus (factorul de calitate) în funcție de caracteristicile particulare ale unui proces de trafic.
- Prezentarea modelului de calcul regresional care stă la baza obținerii modelului de calcul al factorului de calitate.
- Determinarea principalelor caracteristici de trafic care influențează calitatea traficului rutier din perspectiva fluenței acestuia.
- Parcurgerea etapelor următoare în scopul determinării modelului analitic al factorului de calitate:
 - Selectarea tipului de intersecție supusă analizei
 - Stabilirea valorilor parametrilor traficului utilizați pentru fiecare test efectuat
 - Centralizarea datelor obținute pe baza testelor realizate.
 - Determinarea modelului de calcul al factorului de calitate prin intermediul modelelor regresionale.
 - Obținerea valorilor coeficienților modelului de calcul al factorului de calitate
- Realizarea unei analize a valorilor coeficienților de corelare parțială obținuți, analiză care reflectă influența fiecărui parametru în cadrul modelului de calcul al factorului de calitate.

Contribuțiile aferente capitolului 6:

- Prezentarea studiului de caz în care se propune modelarea traficului rutier prin intermediul modelelor existente în teoria șirurilor de așteptare. Metoda selectată consideră intersecțiile rutiere ca fiind centre de servire. Modelul 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.
- Descrierea studiului experimental care testează și validează modelul lui Jackson ce ia în calcul factorul de calitate. Factorul 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.

Contribuțiile la domeniul abordat în cadrul acestei teze pot fi sumarizate astfel:

- ✓ Realizarea unei analize detaliate privind tehnicile curente de modelare și simulare a traficului rutier .

- ✓ Realizarea unei sinteze relative la conceptul modelării 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.

O bună parte din contribuții a fost validată prin prezentarea și publicarea următoarelor :

- 4 lucrări publicate sau în curs de publicare în volumele unor conferințe indexate IEEE, din care 2 lucrări susținute la conferințe internaționale.
- 1 lucrare publicată în volumul unui jurnal ISI Proceedings.
- 2 lucrări prezentate în cadrul unor workshop-uri.

7.2. Direcții de cercetare viitoare

Principalele direcții sunt:

- Efectuarea unor studii asupra unei rețele mai complexe de transport prin aplicarea modelului lui Jackson "nou" propus pentru calcul *capacității reale de trafic*, model ce ia în considerare factorul de calitate al traficului rutier.
- Îmbunătățirea structurii rețelei de trafic prin aplicarea unui algoritm de căutare a zonelor în care calitatea traficului este deficitară și în acest fel utilizatorii rețelei să fie direcționați spre zone unde fluența traficului se situează la un nivel mai ridicat.

Bibliografie

- [1] *Traffic Flow Theory- A State-of-the-Art Report- revised 2001-* Organized by the Committee on Traffic Flow Theory and Characteristics (AHB45)
- [2] Messmer A., Papageorgiou M., „*METANET: A macroscopic simulation program for motorway networks*“, Traffic Engineering and Control, no 31, pp. 466-470, 1990.
- [3] Greenshields B.D., „*A study of traffic capacity*“, Highway Research Board, Proceedings, vol. 14, pp. 458, 1935.
- [4] Transportation Engineering. Manual Online. Disponibil la: http://www.webpages.uidaho.edu/niatt_labmanual/
- [5] Lighthill M. J., Whitham G.B., „*On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads.*“, Proceedings of the Royal Society, vol. 229A, pp. 317-345, 1955.
- [6] Richards P.I., „*Shockwaves on the highway*“, Operations Research, vol. 4, pp. 42-51, 1956.
- [7] May A.D., „*Traffic Flow Fundamentals*“, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey G, 1990.
- [8] Payne H.J. , „*Models of freeway traffic and control.*“ In: *Mathematical Models of Public Systems*, (G.A. Bekey, ed.), vol. 1, no. 1 of *Simulation Council Proceedings Series*, pp. 51-61, 1971, La Jolia, California.
- [9] Papageorgiou M., Blosseville J. M., and Hadj-Salem H., „*Modelling and real-time control of traffic flow on the southern part of boulevard périphérique in Paris: Part I: Modelling.*“ , Transportation Research A, vol. 24A, no. 5, pp. 345-359, 1990.
- [10] Helbing D., „*Gas-kinetic derivation of Navier-Stokes-like traffic equations.*“, Physical Review, vol. E53, no. 3, pp. 2266-2381, 1996.
- [11] Carlos F. Daganzo, „*The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory*“, Transportation Research Part B Methodological, vol 28(4), pp. 269-287, 1994
- [12] Papageorgiou M., „*Some remarks on macroscopic flow modeling.*“ Transportation Research A, vol. 32 (5), pp. 323-329, 1998.
- [13] Kotsialos A., Papageorgiou M., Messmer A., „*Optimal co-ordinated and integrated control motorway traffic control*“ , A. Ceder editor, Proceedings of the 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Jerusalem, 1999.
- [14] Zhang H.M., „*On the consistency of a class of traffic flow models*“, Transportation Research Part B 37, 101-105, 2003.
- [15] Danech-Pajouh M., „*Road traffic indicators as a performance guide*“, TEC October 2001.
- [16] Filip, Nicolae, „*Ingineria Traficului Rutier*“, Editura Mediamira, Cluj-Napoca, 2010
- [17] <http://www.ptvamerica.com>
- [18] www.aimsun.com
- [19] www.trafficware.com
- [20] Iida Y., „*Methodology for maximum capacity of road network*“, Transaction of Japan Society of Civil Engineers, 1972, vol. 205, pp.147-150.
- [21] Tom Bellemans, Bart De Schutter, Bart De Moor, „*Models for traffic control*“, Journal A, vol. 43, no. 3-4, pp. 13-22, 2002.

- [22] Jackman J., Johnson E., „*The Role of Queuing Network Models in Performance Evaluation of Manufacturing Systems*“, The Journal of the Operational Research Society, Vol. 44, No. 8, 1993.
- [23] S. Balsamo, G. Dei Rossi, A. Marin, „*Applying BCMP Multi-class Queuing Networks for the Performance Evaluation of Hierarchical and Modular Software Systems*“, Eurosis 24th European Simulation and Modelling Conference, ESM'2010 Conference, October 25-27 2010.
- [24] Kant K., „*Introduction to Computer System Performance Evaluation*“, McGraw-Hill, New York, 1992.
- [25] Kleinrock L., „*Queueing Systems*“, Wiley, New York, 1976.
- [26] Lavenberg S.S., „*Computer Performance Modeling Handbook*“, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1983.
- [27] Buzacott J. A. , Shanthikumar J.G., „*Stochastic Models of Manufacturing Systems*“, Prentice Hall, 1993.
- [28] Andreas Willig, „*A Short Introduction to Queueing Theory*“, Technical University Berlin, Telecommunication Networks Group, July 21, 1999
- [29] Ivo Adan, Jacques Resing, „*Queueing Theory*“, Department of Mathematics and Computing Science, Eindhoven University of Technology, The Netherlands, February 28, 2002
- [30] Jackson J. R., „*Networks of Waiting Lines*“, Operations Research 5 (4): 518–521, 1957.
- [31] Jackson J. R., „*Jobshop-like Queueing Systems*“, Management Science, 10 (1): 131–142, Oct. 1963.
- [32] *Networks of queues*, University of Bristol, 2012, <http://www.maths.bris.ac.uk/~maajg/teaching/iqn/networks.pdf>
- [33] Gunter Bolch, Stefan Greiner, Hermann de Meer, Kishor S. Trivedi, „*Queueing Networks and Markov Chains-Modeling and Performance Evaluation with Computer Science Applications*“, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2006.
- [34] Jorma Virtamo, *Queueing Theory/Queueing networks- Note de curs*, Helsinki University of Technology, <http://www.netlab.tkk.fi/~virtamo/>.
- [35] Papageorgiou M., Diakaki C., Dinopoulou V., Kotsialos A., Wang Y., „*Review of road traffic control strategies*“, Proceedings of the IEEE, vol. 91(12), pp. 2043–2067, 2003.
- [36] Osorio C. , Bierlaire M., „*A surrogate model for traffic optimization of congested networks : an analytic queueing network approach*“, Report TRANSP-OR 090825, 2009
- [37] Osorio C., Bierlaire M., „*Network performance optimization using a queueing network model*“, European Transport Conference, 2008 .
- [38] Jain R., Smith J. M, „*Modeling vehicular traffic flow using M/G/C/C state dependent queueing models*“, Transportation science, vol. 31(4), pp. 324–336, 1997.
- [39] T. Van Woensel, N. Vandaele, „*Modelling traffic flows with queueing models: A review*“, Asia-Pacific Journal of Operational Research, Vol. 24(4), pp. 1–27, 2007.
- [40] Heidemann D., „*Queue length and delay distributions at traffic signals*“, Transportation Research B: Methodological, vol. 28(5), pp. 377–389, 1994.
- [41] Heidemann D., „*A queueing theory approach to speed-flow-density relationships*“, In Proceedings of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, pp. 103–118, 1996.
- [42] Jouhra Dad, Mohammed Ouali, and Yahia Lebbah, „*A Multiclass BCMP*

- Queueing Modeling and Simulation-Based Road Traffic Flow Analysis*", World Academy of Science, Engineering and Technology 78,2011
- [43] Holban S., „*Modeling and Simulation*”, lecture notes, 2010. Disponibil online: <http://aspc.cs.upt.ro/modelare>
- [44] Haragos I.M., Holban S., Cernazanu-Glavan C., „*A model to estimate the throughput value for a transport network*”, Proc. of 8th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI 2013), Timișoara, Romania, 23–25 May 2013, pp. 269-273
- [45] Gordon W. J., Newell G. F., „*Closed Queueing Systems with Exponential Servers*”. Operations Research, vol. 15 (2), pp. 254, 1967
- [46] Haragos I.M., Cernazanu-Glavan C., „*Determination of transport network topology influence of traffic characteristics*”, Proc. of 7th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI 2012), Timisoara, Romania, 24-24 May 2012, pp. 279- 283.
- [47] Wyatt P., „*The Development of a GIS-Based Property Information for Real Estate Valuation.*”, International Journal of Information Science, vol. 11(5), pp. 435 –450, 1997
- [48] Oni, Ayotunde Olawande, „*Arterial Road Network and Commercial Property Values: Case Study of Ikeja, Nigeria*”, Paper Presented at the Business Luncheon/MCPD Organized by RICS Nigeria Group, OPIC Complex, Bank-Anthony Way, Ikeja, Nigeria on 15th April 2010.
- [49] Haidu, I., Haidu, C., SIG - *Analiza spațială*, Editura HGA, București pag. 276-278, 1998
- [50] Haragos I.M., Cernazanu-Glavan C., „*Modeling Road Traffic Using Service Center*”, *Advances in Electrical and Computer Engineerig (AECE)*, vol. 12, no. 2, May 2012, pp. 75 – 80
- [51] Romică Trandafir, *MODELE ȘI ALGORITMI DE OPTIMIZARE- Seria „Matematică”*, Editura AGIR, București, 2004
- [52] Haragos I.M., Holban S., Cernazanu-Glavan C., „*Analytical model to determine the quality factor used in transport network*”, Proc. of 14th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI 2013), Budapesta, Ungaria, 19-21 November 2013, pp. 533-538.
- [53] Marchesini P., Weijermars W, „*The relationship between road safety and congestion on motorways ; A literature review of potential effects*”, SWOV Institute for Road Safety Research, The Netherlands, Leidschendam, 2010
- [54] Anjaneyulu M.V.L.R., Nagaraj B.N., „*Modelling Congestion on urban roads using speed profile data*”, Journal of the Indian Roads Congress, January-March 2009
- [55] Transportation Research Board. „*Highway Capacity Manual.*” 4th ed. Washington, D.C.: National Research Council, 2000.
- [56] Tom V. Mathew, „*Traffic Engineering-CAPACITY AND LEVEL OF SERVICE*”, CE740 & NPTEL , February 7, 2013.
- [57] Haragos I.M., Holban S., Cernazanu-Glavan C., „*Determination of quality factor used in road traffic. An experimental study*”, Proc. of 12th IEEE International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI 2014), Herl’any, Slovacia, 23-25 January 2014, pp. 123-128.
- [58] Java Modelling Tools, Dipartimento di Elettronica e Informazione, Politecnico di Milano, 2010, [Online]. Available: <http://jmt.sourceforge.net/>
- [59] Bertoli M., Casale G., Serazzi G., „*JMT: performance engineering tools for system modeling.*”, ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, Volume 36 Issue 4, New York, US, March 2009, 10-15, ACM

- [60] Serge P. Hoogendoorn, Piet H.L. Bovy, „*State-of-the-art of Vehicular Traffic Flow Modelling*”, Special Issue on Road Traffic Modelling and Control of the Journal of Systems and Control Engineering, 2001.
- [61] Cameron R., „*G3F7: An expanded LOS gradation system*” ITE J., pp. 40–41, Jan. 1996.
- [62] Baumgaertner W. E., „*Level of service: Getting ready for the 21st century*”, ITE J., pp. 36–39, Jan. 1996
- [63] Pcheux K.K., Pietrucha M.T., Jovanis P.P., „*User perception of level of service at Signalized Intersections*”, In Proceedings 79th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C, 2000
- [64] Oh C., Ritchie S. G., „*Real-time inductive-signature-based level of service for signalized intersections*”, in Transportation Research Record 1802. Washington, DC: TRB, National Research Council, pp. 97–104, 2002.
- [65] Oh C., Andre Tok, Stephen G. Ritchie, „*Real-time freeway level of service using inductive-signature-based vehicle reidentification system*”, IEEE Transactions on intelligent transportation systems, vol.6, no. 2, pp. 138–146, June 2005.
- [66] Binglin Li, Feng Li, Renying Wang, „*Modeling Capacity of Road Network Based on Level of Service of Network*”, Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), Vol.1, pp.626 – 630, October 2008.
- [67] Zhang Ye, JIA Li-min, Cai Guo-Qiang, „*A novel evaluate method of urban region transportation level of service*”, International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, pp.584-588., 2008.
- [68] Ye Zhang, Li-Min Jia, Guo-Qiang Cai , „*A multi-grade evaluation model for traffic level of service*”, Proceedings of the Eighth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, pp. 3112-3115., Baoding, 12-15 July 2009.
- [69] Honghui Dong, LiminJia, Xiaoliang Sun, Yong Qin, Chenxi Li, „*An experiment study on level of service for the regional road traffic*”, Fifth International Conference on Natural Computation, pp. 233-235., 2009.
- [70] Xingyi Li, Kaiquan Zhu, „*Evaluation of regional traffic level of service based on adaptive neuro-fuzzy inference*”, 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC), pp.3964-3967., 2011
- [71] Roland Tusch, Felix Pletzer, Armin Krätschmer, Laszlo Böszörményi, Bernhard Rinner, Thomas Mariacher, Manfred Harrer, „*Efficient level of service classification for traffic monitoring in the compressed video domain*”, IEEE International Conference on Multimedia and Expo, pp.967-972., 2012.
- [72] John P. Hoffmann, „*Linear Regression Analysis: Applications and Assumptions*”, Second Edition, United States of America, 2010
- [73] Norman R. Draper, Harry Smith, „*Applied regression analysis*”, Third edition, Wiley series in probability and statistics, Canada, 1998.
- [74] Adams, W. F., „*Road Traffic Considered as a Random Series*”, J. Inst. Civil Engineers, 4, pp. 121-130, U.K, 1936.
- [75] Greenshields B. D., Schapiro D., Erickson and E. L., „*Traffic Performance at Urban Intersections*”, Bureau of Highway Traffic, Technical Report No. 1. Yale University Press, New Haven, CT, 1947.
- [76] Greenberg H., „*An analysis of traffic flow*”, Operations Research 7, pp.79-85, 1959.
- [77] Underwood R.T., „*Speed, volume, and density relationships: Quality and theory of traffic flow*”, Yale Bureau of Highway Traffic, pp. 141-188, 1961.

-
- [78] Edie L.C, „*Car Following and Steady-State Theory for Non-Congested Traffic.*“, Operations Research, Volume 9, pp. 66-76,1961.
 - [79] Kara M. Kockelman, „*Modeling Traffic's Flow-Density Relation: Accommodation of Multiple Flow Regimes and Traveler Types*“, Transportation 28, Vol. 4, pp. 363-374, November 2001.
 - [80] Yuwei Xu, Ying Wu, Jingdong Xu, Dongying Ni, Gongyi Wu, Lin Sun, „*A Queue-length-based Detection Scheme for Urban Traffic Congestion by VANETs*“, 2012 IEEE Seventh International Conference on Networking, Architecture, and Storage, pp.252-259, 2012.
 - [81] Pitipong Chanloha, Wipawee Usaha, Jatuporn Chinrungrueng, Chaodit Aswakul, „*Performance Comparison Between Queueing Theoretical Optimality and Q-learning, Approach for Intersection Traffic Signal Control*“, 2012 Fourth International Conference on Computational Intelligence, Modelling and Simulation, pp. 172-177, 2012.

Anexa 1

LISTA PUBLICAȚIILOR REZULTATE ÎN URMA TEZEI DE DOCTORAT, PUBLICATE SUB AFILIERE UPT

1. Lucrări științifice publicate în reviste indexate ISI

1. I.M. Haragos, C. Cernazanu-Glavan, „Modeling Road Traffic Using Service Center”, *Advances in Electrical and Computer Engineering (AECE)*, vol. 12, no. 2, May 2012, pp. 75 – 80. (ISI Web of Knowledge, Scopus).

2. Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice (Proceedings) indexate BDI

1. I.M. Haragos, C. Cernazanu-Glavan, „Determination of transport network topology influence of traffic characteristics”, Proc. of 7th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI 2012), Timișoara, Romania, 24-24 May 2012, pp. 279- 283. (IEEE Xplore, INSPEC, Scopus)
2. I.M. Haragos, S. Holban, C. Cernazanu-Glavan, „A model to estimate the throughput value for a transport network”, Proc. of 8th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI 2013), Timișoara, Romania, 23-25 May 2013, pp. 269-273. (IEEE Xplore, INSPEC, Scopus).
3. I.M. Haragos, S. Holban, C. Cernazanu-Glavan, „Analytical model to determine the quality factor used in transport network”, Proc. of 14th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI 2013), Budapesta, Ungaria, 19-21 November 2013, pp. 533-538 (IEEE Xplore).

3. Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice internaționale (Proceedings) din străinătate

1. I.M. Haragos, S. Holban, C. Cernazanu-Glavan, „Determination of quality factor used in road traffic. An experimental study”, Proc. of 12th IEEE International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI 2014), Herl'any, Slovacia, 23-25 January 2014, pp. 123- 128.

4. Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice

1. I.M. Haragos, „Analysis of throughput system considering the transport network topology”, Workshop-ul nr. 2, „Interdisciplinaritatea Și Managementul Cercetării În Studiile Doctorale”, Universitatea din Oradea, 7-8 iunie 2012

2. I.M. Haragos, „Modeling road traffic using queueing network”, Workshop-ul nr. 3, „Interdisciplinaritatea Și Managementul Cercetării În Studiile Doctorale”, Universitatea din Pitesti, 30-31 Mai 2013.