

# **CONTRIBUȚII LA CONDUCEREA TRAFICULUI RUTIER URBAN UTILIZÂND O REȚEA DE SENZORI WIRELESS CA DETECTOR DE TRAFIC**

Teză destinată obținerii  
titlului științific de doctor inginer  
la  
Universitatea "Politehnica" din Timișoara  
în domeniul AUTOMATICĂ  
de către

**Ing. Ovidiu Baniaș**

Conducător științific:  
Referenți științifici:

prof.univ.dr.ing. Radu-Emil Precup  
prof.univ.dr.ing. Clement Feștilă  
prof.univ.dr.ing. Matei Vinătoru  
prof.univ.dr.ing. Ștefan Preitl

## Cuvânt înainte

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității de cercetare desfășurată în calitate de cadru didactic și de doctorand în cadrul Facultății de Automatică și Calculatoare, Departamentului de Automatică și Informatică Aplicată al Universității „Politehnica” din Timișoara.

În cadrul acestei teze au fost dezvoltate noi metode de conducere a traficului rutier urban, precum și noi arhitecturi de detecție a participanților la trafic utilizând tehnologia rețelelor de senzori wireless.

În primul rând vreau să îi mulțumesc conducătorului științific, prof. univ. dr. ing. Radu-Emil Precup pentru sprijinul acordat de-a lungul perioadei de doctorat, mai ales prin atenta îndrumare, timpul deosebit acordat studiului lucrării și prin minuțiozitatea și promptitudinea de care a dat dovadă. Vreau să îi mulțumesc domnului prof. univ. dr. ing. Daniel Curiac, pentru ajutorul științific și sprijinul prietenesc pe care mi l-a dat de-a lungul întregii perioade doctorale și nu numai. De asemenea, vreau să îi mulțumesc domnului conf. univ. dr. ing. Florin Drăgan, pentru suportul moral și sfaturile prietenești care mi-au fost de mare ajutor.

Îmi exprim întreaga considerație față de membrii comisiei de doctorat, domnul președinte al comisiei prof. univ. dr. ing. Octavian Proștean, decanul Facultății de Automatică și Calculatoare din Timișoara, și domnii prof. univ. dr. ing. Clement Feștilă de la Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, prof. univ. dr. ing. Matei Vînătoru de la Universitatea din Craiova și prof. univ. dr. ing. Ștefan Preitl de la Universitatea „Politehnica” din Timișoara, care au răspuns solicitării de a face parte din comisia de analiză a tezei. De asemenea le mulțumesc pentru timpul de studiu acordat lucrării.

Nu în ultimul rând, doresc să le mulțumesc colegilor și prietenilor din colectivul B624 pentru sprijinul acordat pe parcursul elaborării acestei teze. De asemenea, imi exprim recunoștința față de toți cei care fie prin sprijin moral, fie prin sprijin științific m-au ajutat de-a lungul acestor ani, chiar dacă numele lor nu a fost amintit explicit.

Timișoara, Mai 2009

Ovidiu Baniș

# Cuprins

<b>1 INTRODUCERE</b>	<b>5</b>
1.1 Necesitatea fluidizării traficului rutier urban	7
1.2 Obiectivele tezei	8
1.3 Structura și conținutul tezei	9
<b>2 ANALIZA STADIULUI ACTUAL AL PROBLEMELOR DE MODELARE, SIMULARE ȘI CONDUCERE AFERENTE SISTEMELOR INTELIGENTE DE TRANSPORT RUTIER</b>	<b>13</b>
2.1 Introducere	13
2.2 Sisteme inteligente de transport rutier	13
2.3 Modelarea traficului rutier	15
2.3.1 Diagrama fundamentală a fluxului de trafic rutier	15
2.3.2 Evoluția modelării macroscopice în traficul rutier	18
2.3.3 Modelarea macroscopică a traficului rutier urban	23
2.4 Analiza stadiului actual al soluțiilor de simulare a traficului rutier	27
2.5 Analiza stadiului actual al metodelor de conducere urbană	28
2.5.1 Indicatori de performanță utilizați în aprecierea metodelor de conducere a traficului rutier	28
2.5.2 Metode de conducere statică la nivel de intersecție	30
2.5.3 Metode de conducere statică prin coordonarea mai multor intersecții	32
2.5.4 Metode de conducere dinamică la nivel de intersecție	32
2.5.5 Metode de conducere dinamică prin coordonarea mai multor intersecții	34
2.6 Concluzii	35
<b>3 ARHITECTURĂ DE CONDUCERE IERARHIZATĂ MULTIAGENT UTILIZÂND REȚELE DE SENZORI WIRELESS</b>	<b>37</b>
3.1 Introducere	37
3.2 Arhitectură de conducere ierarhizată	38
3.2.1 Nivelul senzorial	39
3.2.1.1 Senzori pentru autovehicule	39
3.2.1.2 Senzori pentru pietoni	40
3.2.2 Nivelul de procesare și agregare	41
3.2.3 Nivelul de conducere multiagent a semafoarelor	43
3.2.3.1 Nivelul de conducere local (LTA)	45
3.2.3.2 Nivelul de conducere zonal (ZTA)	46
3.2.3.3 Nivelul de coordonare metropolitan (CTA)	47
3.3 Prezentarea rețelei de senzori wireless propusă	51
3.3.1 Introducere	51
3.3.2 Utilitatea rețelelor de senzori. Aplicabilitate	53
3.3.3 Tipuri de senzori utilizați în managementul traficului modern	55
3.3.4 Arhitectura rețelelor de senzori wireless. Topologii de rețea	57
3.3.5 Rețea de senzori wireless - detector de trafic rutier urban	60
3.4 Principii de securitate în rețele de senzori wireless	68
3.4.1 Introducere	68
3.4.2 Vulnerabilități și metode de securizare	69
3.5 Concluzii	73

<b>4</b>	<b>CONDUCEREA LOCALĂ LA NIVEL DE INTERSECȚIE SEMAFORIZATĂ</b>	<b>75</b>
4.1	Introducere	75
4.2	Strategii de modelare a sistemului de conducere locală la nivel de intersecție	76
4.2.1	Modelarea procesului de schimbare a semafoarelor	76
4.2.2	Abordări în modelarea matematică a procesului condus reprezentat de traficul rutier urban la nivel de intersecție semaforizată prin monitorizarea cozilor de așteptare	77
4.3	Punerea problemei de reglare în sistemul de conducere a traficului rutier urban la nivel de intersecție	87
4.3.1	Definirea indicatorilor de calitate a comportării sistemului	90
4.4	Proiectarea simulatorului de trafic	91
4.5	Algoritmul de conducere locală - LTA	94
4.6	Studii de caz legate de conducerea traficului rutier într-o intersecție simplă	100
4.6.1	Studii de caz legate de conducerea traficului rutier la nivelul autovehiculelor	101
4.6.2	Studii de caz legate de conducerea traficului rutier la nivelul autovehiculelor și pietonilor	119
4.7	Conducerea semaforizării în intersecții complexe din zona centrală a orașului Timișoara	132
4.7.1	Intersecția numărul 1	133
4.7.2	Intersecția numărul 2	138
4.7.3	Intersecția numărul 3	145
4.7.4	Intersecția numărul 4	150
4.7.5	Intersecția numărul 5	155
4.7.6	Interpretarea rezultatelor obținute	161
4.8	Conducerea optimă a traficului rutier urban într-o intersecție semaforizată	161
4.8.1	Definirea problemei de optimizare și reducerea la două probleme de programare liniară și pătratică	162
4.8.2	Calculul matricelor cu parametri necesari rezolvării problemei de optimizare	164
4.8.3	Exemplificarea și rezolvarea problemelor de programare liniară și pătratică pentru o intersecție de tipul celei prezentate în Figura 4.5	167
4.8.4	Studii de caz legate de conducerea optimă a traficului rutier într-o intersecție, la nivelul autovehiculelor și pietonilor	169
4.9	Concluzii	178
<b>5</b>	<b>COORDONAREA LA NIVEL DE ZONĂ</b>	<b>181</b>
5.1	Introducere	181
5.2	Soluție de coordonare la nivel de zonă	182
5.2.1	Sincronizarea semafoarelor	187
5.2.2	Tratarea blocajelor	192
5.3	Concluzii	196
<b>6</b>	<b>CONCLUZII</b>	<b>197</b>
6.1	Contribuții personale	197
6.2	Direcții de cercetare generate de studiile efectuate	200
	<b>Bibliografie</b>	<b>201</b>

# 1. INTRODUCERE

Congestionarea traficului rutier urban în zile noastre a devenit o problemă majoră cu care ne confruntăm aproape în fiecare zi, mai ales în drumul spre locul de muncă și înapoi. Singurele soluții viabile în scopul decongestionării sunt următoarele:

- dezvoltarea infrastructurii actuale prin construirea de noi șosele în jurul orașelor sau chiar șosele supraetajate,
- dezvoltarea de soluții de conducere a semafoarelor, cu adaptare în funcție de condițiile de trafic și necesitățile urbane.

Prin congestionarea traficului rutier se înțelege starea în care se află rețeaua de transport caracterizată de viteze de deplasare mici, timpi de deplasare mari și cozi de așteptare lungi. Altfel spus, traficul este congestionat când cererea (numărul de participanți la trafic - autovehicule sau pietoni), este mai mare decât capacitatea rețelei de transport. Principalele cauze ale congestiunii conform unor studii realizate în 2005 ar fi: gâtuii 40%, vreme neprielnică 25%, incidente neprevăzute 15%, zone în lucru 10%, semaforizări slabe 5% și altele 5% [108].

Ideea semaforizării intersecțiilor din cadrul localităților a apărut ca necesitate odată cu apariția automobilelor încă din secolul XX. Cu toate acestea, primul semafor rutier a apărut înaintea automobilelor. Începând cu data de 10 decembrie 1868, în Londra funcționa pe bază de lămpi cu gaz aprinse pe timp de noapte (una roșie însemnând "stop" și una verde însemnând "atenție"), dirijând circulația doar pentru pietoni și pentru vehiculele trase de cai. Pentru utilizarea sa era nevoie de un polițist care schimba culoarea semaforului pentru o anumită direcție prin rotirea cu ajutorul unui levier a stâlpului pe care era instalat semaforul. A apărut astfel o primă automatizare a dirijării traficului rutier, chiar dacă aceasta necesita o persoană pentru schimbarea culorilor semaforului. Din păcate, la mai puțin de o lună de la instalarea sa, semaforul a explodat răzind polițistul care îl manevra.

După apariția curentului electric, în anul 1912 a apărut și prima invenție a semaforului electric datorită polițistului Lester Wire. Semaforul avea două culori: verde și roșu, iar la schimbarea culorii acesta emitea un semnal sonor. Primul semafor cu trei culori: verde, galben și roșu a fost inventat în anul 1920 de către ofițerul William Potts din Detroit. Ideea a apărut de la tehnologia semafoarelor automate deja utilizată pe caile ferate și de la nevoia de structurare a traficului rutier urban odată cu apariția automobilelor. În 1923 Garret Morgan a realizat nevoia de semaforizare rutieră automată, a patentat semaforul electric automat și apoi a vândut licența către General Electric Corporation [69; 99].

Odată cu trecerea timpului și dezvoltarea tehnologiei, semafoarele și implicit utilitatea lor au suferit diferite modificări. În ceea ce privește conducerea semafoarelor, s-au realizat de asemenea progrese pornind de la conducerea statică la nivel de intersecție și ajungând în zilele noastre la soluții de conducere la nivel de oraș. Prin conducerea traficului rutier se înțelege orice formă de dirijare a autovehiculelor și pietonilor într-o anumită zonă rutieră, având ca principal obiectiv îmbunătățirea fluidității traficului. Termenul de conducere în traficul rutier este complex, implicând

atât strategii de fluidizare a traficului, cât și metode de gestionare a evenimentelor speciale generate de ambulanță, poliție, pompieri sau a blocajelor pe anumite artere rezultate în urma accidentelor rutiere sau a lucrărilor de mentenanță.

Metodele de conducere a semafoarelor pot fi împărțite în patru categorii [104; 106]:

- *conducere statică* - caracterizată prin calculul unor timpi apriori stabiliți pentru fiecare fază de semafor,
- *conducere dinamică* - caracterizată prin timpi de semafor calculați în funcție de condițiile curente de trafic,
- *conducere prin coordonare* - caracterizată prin timpi de semafor stabiliți de către un anumit punct de control al traficului pe baza informațiilor generale de trafic,
- *conducere la cerere* - activată prin apăsarea unui buton de către pietoni.

Principalele metode actuale de conducere [104] sunt: conducerea dinamică și conducerea prin coordonare, având impact direct asupra mediului înconjurător, asupra costurilor economice și asupra participanților la trafic. Marile orașe au devenit din ce în ce mai aglomerate prin creșterea rapidă a numărului de mașini și de locuitori, singura soluție de ameliorare a congestiei în trafic fiind sistemele inteligente de conducere. Se preferă terminologia de ameliorare și nu de rezolvare a congestiei pentru că rezolvarea definitivă a acestei probleme este realmente imposibilă, utilizând doar elemente de inteligență artificială și fără a dezvolta infrastructura de drumuri rutiere.

Sistemele inteligente pentru ghidarea în trafic sunt acele sisteme care au ca intrări destinația dorită de către conducătorul auto, un senzor GPS (Global Positioning System) pentru detecția poziției, alături de diferiți parametri ce caracterizează preferințele conducătorului auto, și care produc la ieșire itinerariul propus, oferind informații în timp real asupra schimbărilor de direcție. Aceste sisteme de ghidare sunt utile, au dezvoltat în ultimii ani o adevărată industrie, dar până nu va exista o răspândire vastă (apropape în fiecare autovehicul participant la trafic), nu putem vorbi de o eficiență majoră și de o conducere generală de trafic prin colaborare, ci doar de avertizări și sugerări de rute în trafic. După cum se arată în [8; 24; 83] majoritatea îmbunătățirilor în conducerea traficului rutier sunt realizate prin strategii de conducere centralizate, deciziile de fluidizare fiind luate de către o unitate de decizie globală - unitate decizională de conducere. Odată cu evoluția tehnologiei s-a ajuns la detecția în timp real a participanților la trafic oferind posibilitatea implementării de soluții de conducere adaptive. Aceste soluții adaptive sunt folosite astăzi pe scară largă în întreaga lume, având menirea de a schimba culorile semafoarelor dintr-o intersecție în funcție de datele în timp real recepționate de la senzori. Limitările acestor soluții sunt legate de rata scăzută de adaptivitate la schimbările bruște ale condițiilor de trafic, datorită procesării și algoritmilor de conducere centralizați care nu țin seama de fluctuațiile de trafic la nivel local de intersecție. Conducerea adaptivă la nivel de intersecție deși poate realiza un optim local pe un anumit orizont de timp, cu siguranță nu va realiza un optim la nivel global. Totuși, prin realizarea colaborării dintre sistemul de conducere locală la nivel de intersecție și vecinii acestuia (sistemele învecinate de conducere locală) pot fi îmbunătățite semnificativ rezultatele soluțiilor de conducere locale. Această tehnică de colaborare între soluțiile de conducere locale la nivel de intersecție, se numește învățare prin reîntărire ("reinforcement learning") [124] și alături de conducerea locală adaptivă în timp real la condițiile de trafic, formează o strategie puternică de descentralizare și îmbunătățire a conducerii traficului rutier.

## 1.1. Necesitatea fluidizării traficului rutier urban

Fluidizarea traficului rutier urban influențează în zilele noastre aproape tot ce ține de viața modernă. Este vorba de următoarele aspecte importante [1]:

- mediul înconjurător - poluare, zgomot, încălzire,
- economia,
- numărul accidentelor rutiere,
- siguranța în trafic,
- gradul de nervozitate al persoanelor din trafic producând furie rutieră ("road rage"),
- timpii de deplasare între două obiective din oraș,
- ritmul de viață.

Acestea sunt doar o parte din ceea ce înseamnă în totalitate influența fluidizării/decongestionării traficului rutier urban în orașele zilelor noastre asupra vieții cotidiene. Principalul efect, nu neapărat cel mai important, pe care îl resimțim zi de zi toți participanții la trafic, fie ca pietoni, fie ca și conducători de autovehicule, fie ca pasageri, este timpul de deplasare spre serviciu și înapoi. Privind în urmă, putem spune că fără modificări ale strategiilor de conducere a traficului rutier, timpii de deplasare între două obiective au crescut odată cu trecerea timpului și cu creșterea numărului de vehicule cu motor pe cap de locuitor (în SUA s-a ajuns la o medie de aproape un autovehicul pe cap de locuitor [94]).

Cel mai nociv efect al aglomerației urbane în reprezintă efectul asupra mediului înconjurător. Prima alertă de acest gen a apărut încă din 1960, în așa zisa eră "flower power", era păcii mondiale și a traiului în armonie cu natura. Schimbarea mediului înconjurător a venit ca o necesitate a evoluției umane, a progresului, din pacate fără limite și norme suficient de bine stabilite. În zilele noastre problema mediului înconjurător a devenit într-adevăr o realitate pe care o resimțim cu toții. De la semnarea Tratatului de la Kyoto [112] (protocol internațional de reducere a încălzirii globale) și până în prezent, emisiile de  $CO_2$  au crescut și au devenit o unitate de măsură de referință a normelor de poluare în transportul rutier în țările dezvoltate de astăzi [18].

Urmărind datele statistice ale Comisiei Europene de Accidente Rutiere (CARE), legate de accidentele survenite în traficul rutier începând cu anul 1983 și până în prezent, se poate observa în majoritatea statelor europene monitorizate, o scădere anuală continuă a numărului de accidente și de victime. Luând în considerare creșterea anuală a numărului de autovehicule, dar și de infrastructură se poate afirma că lucrurile evoluează în ceea ce privește siguranța în trafic [17]. De asemenea, ritmul de viață actual este în continuă intensificare. Majoritatea populației muncitoare se grăbește undeva, iar congestionările în traficul urban, generează stres participanților la trafic prin imposibilitatea atingerii în timp util a țintelor propuse sau prin imposibilitatea de a calcula cu acuratețe timpul de deplasare. Furia rutieră este o problemă din ce în ce mai des întâlnită în zilele noastre, având ca și cauză principală congestionarea traficului rutier. Efectul se observă în creșterea numărului de accidente intenționate, neatenție în trafic, încălcarea regulilor de circulație, abuzuri verbale către participanții la trafic și condus agresiv [73; 116]. Acestor factori înșiruiți mai sus li se pot adăuga o serie de alți factori subiectivi sau obiectivi relativ la fiecare participant din trafic, necesitatea soluțiilor de fluidizare în traficul rutier urban devenind astfel o problemă evidentă și de mare importanță.

## 1.2. Obiectivele tezei

Această teză își propune în prima parte analiza traficului rutier urban și a metodelor actuale de conducere a acestuia cu ajutorul semafoarelor. Apoi, în cea de-a doua parte, se propune o arhitectură și o soluție multiagent de conducere în timp real a traficului rutier urban, utilizând ca detector de trafic o rețea de senzori wireless.

Se cercetează soluții de decongestionare a traficului rutier urban printr-o conducere distribuită, descentralizată, folosind o arhitectură multiagent de conducere pe trei niveluri:

- conducere locală la nivel de intersecție - agent local,
- coordonare zonală în vederea sincronizării semafoarelor și a tratării blocajelor în trafic - agent zonal,
- coordonare la nivel de oraș prin interacțiunea cu alte sisteme decât cele de trafic - agent metropolitan.

Cu alte cuvinte se realizează o automatizare avansată a conducerii semafoarelor într-un oraș prin strategii de conducere adaptivă la condițiile curente de trafic, îmbunătățind metodele de conducere actual implementate și evitând situațiile în care agenții de circulație sunt nevoiți să fluidizeze traficul în intersecții. Se va implementa un agent inteligent local care ia locul agentului de circulație din intersecție și un agent inteligent zonal în vederea înlocuirii ofițerului de circulație care coordonează prin stație agenții din intersecții. Agentul metropolitan este prezentat la nivel de arhitectură, subliniind interacțiunea sa cu alte sisteme decât cele de trafic rutier.

În continuare vor fi subliniate principalele obiective majore propuse împreună cu subobiectivele aferente:

- Studiul critic al stadiului actual în conducerea traficului rutier urban. Se realizează studiul utilizării tehnologiei rețelelor de senzori wireless ca detector de trafic și integrarea acestei tehnologii în algoritmi de conducere propuși;
- Conceperea unei arhitecturi multiagent de conducere ierarhizată pe trei niveluri a traficului rutier urban utilizând rețele de senzori wireless ca detector de trafic. Se realizează o paralelă între agentul de conducere la nivel de intersecție și agentul de circulație uman. Se analizează interacțiunea dintre cele trei niveluri de conducere: local, zonal și metropolitan și demonstrarea utilității individuale sau în colaborare cu alte niveluri de conducere, pentru diferite condiții de trafic locale sau globale;
- Modelarea matematică a arhitecturii propuse, folosită ulterior în implementarea agenților. Se propune modelarea procesului de schimbare a culorilor semafoarelor cu ajutorul unei rețele Petri și modelarea fluxului traficului într-o intersecție prin monitorizarea cozilor de așteptare, extinzând un model anterior dezvoltat în literatură;
- Realizarea algoritmilor de conducere pentru agenții locali și zonali. Se dezvoltă și se implementează algoritmul de conducere local la nivel de intersecție reprezentând pasul cel mai important în descentralizarea conducerii traficului rutier. Se realizează o abordare nouă prin introducerea în metoda de conducere a pragurilor pentru timpii de așteptare limită pe culoarea roșie a semaforului alături de lungimile cozilor de așteptare în timp real;
- Conceperea structurii și particularităților tehnice ale unei rețele de senzori wireless pentru detecția în timp real a datelor de trafic și informarea în timp real a participanților la trafic asupra condițiilor de trafic curente (gradul de aglomerare pe anumite tronsoane, blocaje în trafic, devieri) și asupra timpilor de semafor (extinderea comportamentului contoarelor de trafic curente în vederea integrării sistemului de semaforizare cu soluțiile de conducere în timp real propuse);



- Interacțiunea dintre agentul metropolitan și alte sisteme inteligente. Această componentă a sistemului de conducere își propune conectarea agentului metropolitan la un sistem automatizat, centralizat la nivel de oraș, incluzând alte subsisteme cum ar fi iluminarea stradală, detecția gradului de poluare, detecția calamităților (inundații, cutremure, incendii), detecția scurgerilor de gaze. Scopul conectării îl constituie luarea deciziilor automate la nivel de oraș prin căutarea în baze mari de cunoștințe (data mining);
- Proiectarea și implementarea unui simulator de trafic de tip macroscopic în vederea testării soluțiilor propuse;
- Dezvoltarea unor noi soluții de conducere destinate decongestionării traficului rutier urban. Acestea se referă la: conducerea locală la nivel de intersecție, conducerea prin coordonarea semafoarelor dintr-o anumită zonă urbană și conducerea optimală bazată pe optimizare liniară și pătratică. Se definesc noi indicatori de calitate prin care sunt impuse obiectivele conducerii;
- Realizarea unei analize comparative între soluțiile de conducere propuse și soluția de conducere actual utilizată într-o zonă centrală a orașului Timișoara. Analiza este realizată pe baza rezultatelor experimentale obținute în urma simulării comportamentului soluțiilor de conducere.

### **1.3. Structura și conținutul tezei**

Teza este structurată pe 6 capitole. Primul capitol este introductiv, următoarele patru capitole reprezintă teza propriu-zisă, iar în ultimul capitol sunt enumerate contribuțiile realizate în capitolele anterioare. În continuare va fi descrisă structura fiecărui capitol, punctând principalele realizări.

În capitolul 2 se pun bazele teoretice, sprijinite pe 33 de relații, necesare proceselor de modelare, simulare și conducere a traficului rutier urban. Cercetarea din această teză este raportată la stadiul actual prin realizarea unor sinteze critice pe baza studiului bibliografic asupra metodelor de modelare, simulare și conducere a traficului rutier urban. Acest capitol este structurat pe patru subcapitole după cum urmează:

- Realizarea unei sinteze asupra Sistemelor Inteligente de Transport rutier;
- Efectuarea unui studiu critic asupra conceptelor de modelare a traficului rutier urban. Clasificarea metodelor de modelare punctând utilitatea fiecăreia dintre ele relativ la tipurile de trafic urmărite. Elaborarea unei sinteze asupra evoluției modelării traficului rutier urban;
- Analiza metodelor și produselor software utilizate în simularea comportamentului traficului rutier urban;
- Analiza critică asupra metodelor de conducere utilizate până în prezent în conducerea traficului rutier urban și prezentarea principalelor avantaje și dezavantaje.

În capitolul 3 este prezentată arhitectura propusă a sistemului de conducere ierarhizată utilizată în dezvoltarea soluțiilor de conducere locală și globală a traficului rutier urban. Principalele concepte și tehnologii subliniate în acest capitol sunt următoarele:

- arhitectura sistemului structurată ierarhizat,
- arhitectura multiagent,
- utilizarea rețelelor de senzori wireless pentru detecția în timp real a datelor de trafic,
- datele tehnice și structura rețelei de senzori propusă ca detector de trafic rutier urban.

Într-o primă parte a capitolului 3 este descrisă arhitectura propusă de conducere a traficului rutier urban bazată de rețele de senzori wireless, structurată pe trei niveluri: nivelul senzorial (descrierea tipurilor de senzori necesari și proprietățile acestora), nivelul de agregare și procesare (schimbul de informație cu primul și ultimul nivel, interpretarea și procesarea datelor de trafic), nivelul de conducere a traficului (scurtă prezentare conceptuală lucrând pe modele dinamice la nivel de intersecție și pe informațiile în timp real primite de la nivelurile anterioare). Pe baza arhitecturii propuse au fost implementate soluții de decongestionare a traficului rutier atât pentru autovehicule, cât și pentru pietoni. În partea a doua a capitolului 3 sunt prezentate detalii tehnice amănunțite privind rețeaua de senzori wireless folosită ca detector de trafic rutier urban. În finalul capitolului se concluzionează asupra rezultatelor obținute subliniindu-se contribuțiile personale.

Capitolul 4 se întinde pe mai bine de jumătate din totalul de pagini al tezei și are ca scop atât descrierea și implementarea agentului/sistemului de conducere locală la nivel de intersecție semaforizată, cât și validarea soluțiilor propuse prin simulare. Împărțirea pe subcapitole este prezentată în continuare:

- Dezvoltarea unei strategii de modelare a sistemului de conducere locală la nivel de intersecție. Se modelează atât procesul de schimbare a semafoarelor, cât și procesului reprezentat de traficul rutier urban la nivel de intersecție semaforizată prin monitorizarea cozilor de așteptare;
- Punerea problemei de reglare în sistemul de conducere a traficului rutier urban la nivel de intersecție și definirea indicatorilor de calitate a comportării sistemului;
- Proiectarea simulatorului de trafic necesar atât pentru validarea soluțiilor de conducere propuse, cât și pentru realizarea studiilor comparative între soluțiile propuse și alte soluții actual utilizate;
- Dezvoltarea și implementarea la nivel de agent local a algoritmului de conducere propus LTA;
- Definirea studiilor de caz legate de conducerea traficului rutier într-o intersecție semaforizată. Compararea rezultatelor obținute în diferite condiții de trafic, prin simularea comportamentului sistemului de transport în urma utilizării atât a soluției de conducere în timp real propusă, cât și a soluției de conducere statică de tip "split cycle";
- Dezvoltarea de studii comparative pe baza a cinci cazuri reale de conducere a traficului rutier urban în orașul Timișoara;
- Reducerea problemei conducerii traficului rutier urban la nivel de intersecție la o problemă de optimizare prin metode de programare liniară și pătratică. Generalizarea modelului matematic dezvoltat la începutul acestui capitol și definirea a două funcții obiectiv, câte una pentru fiecare metodă de programare utilizată,  $LP$  și respectiv  $QP$ . Definirea problemelor de programare liniară și pătratică în formă canonică și prezentarea matricelor aferente. Realizarea unui studiu comparativ între soluțiile de conducere propuse, pe baza a 48 de studii de caz.

În capitolul 5 este descris agentul/sistemul de coordonare la nivel de zonă rutieră urbană, soluțiile de coordonare propuse fiind validate prin simulare pe diferite studii de caz. Împărțirea pe subcapitole este prezentată în continuare:

- Extinderea simulatorului de trafic macroscopic prezentat anterior, în vederea modelării și simulării comportamentului traficului rutier la nivel de zonă urbană. Prezentarea interacțiunii dintre nivelurile sistemului de conducere ierarhizată descriind procesul de comunicare prin intermediul mesajelor;
- Coordonarea traficului într-o zonă urbană prin sincronizarea în timp real a semafoarelor din intersecțiile care alcătuiesc zona respectivă;
- Tratarea în timp real la nivel de agent zonal a blocajelor de trafic apărute în apropierea intersecțiilor aflate în aria de acoperire a agentului;
- Realizarea unor studii comparative între una dintre soluțiile de conducere locală propuse și soluția de coordonare atât în ceea ce privește sincronizarea semafoarelor, cât și a coordonării semafoarelor în situații de blocaj de trafic;
- Interpretarea rezultatelor obținute în urma simulărilor.

În finalul lucrării sunt prezentate contribuțiile personale, concluziile și posibile direcții de cercetare în opinia autorului. Teza se întinde pe 211 pagini și conține 90 de figuri, 56 de tabele și 149 de titluri bibliografice. O bună parte din contribuții a fost validată prin prezentarea și publicarea a 9 lucrări la care autorul tezei este coautor, dintre care la 4 este prim autor. Acestea sunt structurate după cum urmează:

- 5 lucrări publicate sau în curs de publicare în volumele unor conferințe indexate ISI Proceedings,
- 2 lucrări publicate într-o revistă de categoria B recunoscută de CNCSIS,
- 2 lucrări publicate în volumele unor conferințe internaționale neindexate.



## **2. ANALIZA STADIULUI ACTUAL AL PROBLEMELOR DE MODELARE, SIMULARE ȘI CONDUCERE AFERENTE SISTEMELOR INTELIGENTE DE TRANSPORT RUTIER**

### **2.1. Introducere**

Conducerea traficului rutier în marile orașe a devenit o problemă majoră în zilele noastre datorită creșterii continue a numărului de autovehicule și pietoni implicați în trafic. Datorită acestui fapt, în prezent se cercetează soluții de fluidizare a traficului în orașele aglomerate. Evitarea blocajelor este benefică atât pentru mediu, cât și pentru economie, dar ridică totuși problema creșterii cererii de autovehicule pe piața de consum, ajungându-se astfel la un număr și mai mare de mașini în trafic și implicit la o problemă mai mare de decongestionare a traficului [143]. Prin decongestionarea traficului pe o anumită porțiune se înțelege procesul de micșorare a densității de trafic, cu alte cuvinte reducerea numărului de autovehicule pe respectiva porțiune.

Sistemele inteligente de conducere a traficului rutier urban oferă soluții de îmbunătățire a fluidității traficului prin utilizarea conceptelor de inteligență artificială cum ar fi rețele neuronale, algoritmi genetici, sisteme bazate pe cunoștințe [41; 49; 91; 126; 146].

### **2.2. Sisteme inteligente de transport rutier**

Sistemele inteligente de transport (Intelligent Transportation Systems, ITS) sunt studiate încă din anii 1960, la ora actuală fiind utilizate cu succes și confirmând cu rezultate în aplicații cum ar fi: siguranța în traficul rutier, soluții de decongestionare, conducere automată a semafoarelor, sisteme automate de parcare ghidată, recunoaștere automată a numerelor de pe plăcuțele autovehiculelor, sisteme automate de plată pe autostradă [118], transport public și de marfă, situații de urgență. Se poate da astfel o definiție a sistemelor inteligente de transport ca fiind acele sisteme care se ocupă cu dezvoltarea rețelelor de transport, indiferent de tipul acestora, prin intermediul soluțiilor de inteligență artificială.

Dezvoltarea acestor sisteme inteligente a crescut simțitor în ultimii ani. Nevoia de noi soluții inteligente de management al transporturilor a apărut datorită dezvoltării industriei transporturilor și progresului continuu al tehnologiei. Cercetarea soluțiilor inteligente în domeniul transporturilor este un domeniu de actualitate la nivel mondial, înregistrând o mai mare dezvoltare cu precădere în țările dezvoltate și în curs de dezvoltare. Principalele centre de cercetare și implementare a acestor soluții ITS se regăsesc atât în Europa cât și în America de Nord [46; 66; 67; 70; 131]:

În continuare vor fi prezentate pe scurt câteva din programele de cercetare și dezvoltare al domeniului sistemelor inteligente de transport rutier în Europa după anul

2000 [71]:

- *AIDE* - Adaptive Integrated Driver-vehicle Interface (creșterea siguranței în trafic prin sisteme asistență adaptivă a șoferului). Proiectul își propune implementarea de noi metodologii de interfațare om-mașină și predicția comportamentului șoferului. Proiectul este coordonat de către Volvo Technology.
- *ERTRAC* - Contributing to European road transport research priorities. Scopul acestui proiect este de a uni marile companii din domeniul ITS și de a coopera sub egida Uniunii Europene în vederea îmbunătățirii infrastructurii, a securității și a transportului de persoane și marfă. Proiectul este coordonat de către AVL List GmbH (AVL)/EARPA.
- *FeedMAP* - actualizarea rapidă și ieftină a hărților. Hărțile digitale din aplicațiile ce rulează pe calculatorul de bord al autovehiculelor vor fi sincronizate la zi rapid și ieftin. Acest fapt este foarte important pentru aplicațiile de asistență și ghidare a șoferului, trăind într-o lume cu o dezvoltare rapidă și construcții de infrastructuri rutiere în continuă creștere. Proiectul este coordonat de către ERTICO.
- *Festa* - cercetarea impactului sistemelor informatice de comunicare la comportamentul șoferilor în scopul siguranței rutiere. Proiectul este coordonat de către Centro Ricerche Fiat.
- *HeavyRoute* - transport de marfă mai rapid și mai sigur. Dezvoltarea de soluții de ghidare automată pentru autovehiculele de mare tonaj care transportă mărfuri în vederea reducerii consumului de carburant și a distrugerii drumurilor. Proiectul este coordonat de către Swedish National Road and Transport Research Institute.
- *ROSATTE* - siguranța în traficul rutier al Europei. Proiectul își propune realizarea unui parteneriat între administrația publică și marile companii care elaborează hărțile digitale în scopul modificărilor la zi în ceea ce privește infrastructura rutieră. Proiectul este coordonat de către ERTICO.
- *SAFESPOT* - siguranță în trafic prin informarea șoferului asupra datelor de trafic. Se consideră că evitarea accidentelor rutiere se poate realiza prin extinderea informațiilor legate de siguranța traficului percepute de șofer. Se dezvoltă noi generații de infrastructuri senzoriale. Proiectul este coordonat de către Fiat Research Centre.
- *PreVENT* - siguranță în trafic prin prevenție. Proiectul se ocupă cu dezvoltarea și testarea aplicațiilor de asistență automatizată a șoferului în scopul reducerii accidentelor rutiere. Sistemele implementate vor informa șoferul în legătură cu potențialele pericole de accident prin senzori de detecție și poziționare. Proiectul este coordonat de DaimlerChrysler AG.
- *EOS* - European Organization for Security. Parteneriatul între țările europene în vederea securității în trafic ar putea fi o soluție prin unirea forțelor din domeniul privat și public, având ca rezultat scăderea numărului de accidente.
- *CVIS* - Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems. Proiectul își propune dezvoltarea și testarea de noi tehnologii pentru comunicarea între autovehicule și infrastructura automatizată instalată în apropierea drumurilor rutiere. Principalele avantaje ar fi: influențarea directă a metodelor de conducere adaptivă a traficului rutier, informații despre ruta aleasă, ghidare, informații despre limitele de viteză și despre eventualele semne de circulație, mesaje în cazuri speciale. Proiectul este coordonat de către ERTICO.

- *iTravel* - informații în timp real legate de trafic, știri de ultimă oră. Se urmărește dezvoltarea unor tehnologii de informare a șoferului bazat pe evenimente și pe modificarea traseului ("content-awareness"). Proiectul este coordonat de către ERTICO.
- *RCI* - Road Charging Interoperability. Proiectul urmărește dezvoltarea unui standard în ceea ce privește taxarea electronică a utilizării anumitor porțiuni de drum rutier. Se va crea o arhitectură generală de taxare, apoi se va implementa practic și se va testa în șase țări europene. Proiectul este coordonat de către ERTICO.
- *SISTER* - Satcoms in Support of Transport on European Roads. Proiectul va integra comunicarea sateliților cu sistemele noi de navigație Galileo, specifice Europei. Proiectul este coordonat de către Avanti Communications.
- *CONNECT* - stimularea activităților ITS în Europa Centrală și de Est. Scopul acestui proiect este de a integra cât mai repede noile țări membre UE la standardele și activitățile ITS și, de asemenea, cooperarea în domeniul ITS între statele membre. Proiect coordonat de către Austrian Federal Ministry of Transport, Innovation and Technology (AustriaTech).
- *MODIBEC* - cooperare în comunicații între Europa și China. Proiectul promovează cooperarea dintre Uniunea Europeană și China în ceea ce privește emiterea digitală în comunicația mobilă. Proiectul este coordonat de către ERTICO.
- *ITS Nationals* - Network of National ITS Associations. Promovarea asociațiilor naționale cu activitate în domeniul ITS prin ajutor în logistică, sponsorizare, programe de pregătire și de schimb de informație.

Programele prezentate mai sus reprezintă doar o mică parte din ceea ce înseamnă sistemele inteligente de transport la nivel internațional și dovesc vastitatea domeniului. Cu alte cuvinte ITS se referă la aproape orice ține de dezvoltarea și automatizarea sistemelor de transport.

## 2.3. Modelarea traficului rutier

Pentru a putea genera soluții de conducere a traficului rutier, primul pas constă în alegerea unui model viabil care să satisfacă, cerințele sistemului de conducere, și de asemenea să redea cât mai exact informațiile de trafic. În funcție de aplicabilitatea lor și gradul de detaliu, modelarea se clasifică în: micro, mezo și macromodelare. Micromodelarea se ocupă de modelarea la nivel de autovehicul/pieton ținând seama de deciziile acestora în trafic, intrând în cele mai mici detalii cum ar fi schimbarea benzii de mers. Astfel, fiecare autovehicul poate fi caracterizat separat în funcție de modul de conducere a șoferului, având o viteză proprie dependentă de condițiile de trafic. Macromodelarea în schimb se ocupă cu modelarea la nivel de grupuri de autovehicule/pietoni, oferind informații generale de trafic pentru anumite zone și unități de timp. Informațiile din trafic sunt agregate, iar apoi sunt procesate de către sistemul de conducere la nivel de grup.

### 2.3.1. Diagrama fundamentală a fluxului de trafic rutier

Principala și prima metodă (1934) de înțelegere a comportamentului traficului rutier a fost așa numita diagramă fundamentală a fluxului de trafic a lui Greenshield [55]. Această diagramă este o reprezentare grafică a fluxului de trafic în funcție de densitatea traficului (Figura 2.1). Totul pornește de la presupunerea că pentru condiții

de trafic cu flux neîntrerupt, viteza variază liniar în raport cu densitatea (Figura 2.1). Prin flux de trafic se înțelege numărul de autovehicule ce trec printr-un anumit loc într-o perioadă de timp dată, iar prin densitatea traficului se înțelege numărul de autovehicule ce se găsesc într-o anumită secțiune de drum la un anumit moment.

Pentru condițiile de trafic specificate în Tabelul 2.1 [135], în condițiile vitezei pentru trafic degajat (free flow) de 15 m/s și densității de blocaj de 0,12 veh/s, în Figura 2.1 este exemplificată forma generală a diagramei fundamentale, flux versus densitate. Diagramele derivate, viteză versus densitate și viteză versus flux, sunt prezentate în Figura 2.2 și respectiv Figura 2.3. Au fost luate în considerare următoarele variabile:

- $q$  - fluxul de autovehicule [veh/s],
- $c$  - densitatea traficului [veh/m],
- $c = q/v$  -  $v$  - viteza [m/s] cu care circulă autovehiculele,

parametri specifici diagramei fiind:

- $q_{max}$  - fluxul maxim [veh/s],
- $c_{cr}$  - densitatea critică [veh/m],
- $v_{cr}$  - viteza [m/s] la care se atinge densitatea critică,
- $c_{bl}$  - densitatea de blocaj [veh/m].

Tabelul 2.1: Perechi de date pentru exemplificarea diagramei fundamentale a fluxului de trafic

Viteză ( $v$ )	Densitate ( $c$ )	Flux ( $q = c * v$ )
15	0	0
13,5	0,012	0,162
12	0,024	0,288
10,5	0,036	0,378
9	0,048	0,432
7,5	0,06	0,45
6	0,072	0,432
4,5	0,084	0,378
3	0,096	0,288
1,5	0,108	0,162
0	0,12	0

Din Figura 2.1 se poate observa că fluxul autovehiculelor crește împreună cu densitatea până la un anumit punct critic ( $c_{cr}, q_{max}$ ). După ce densitatea atinge pragul  $c_{cr}$  și continuă să crească, fluxul începe să scadă. Cu alte cuvinte, creșterea densității autovehiculelor peste un anumit punct critic pe o anumită porțiune de șosea are ca efect micșorarea fluxului autovehiculelor ce trec prin zona respectivă, capacitatea șoselei devenind insuficientă pentru necesitățile de trafic. Scăderea fluxului autovehiculelor, odată cu creșterea densității, se înregistrează până la valoarea zero corespunzătoare densității de blocaj ( $c_{bl}, 0$ ). Ideal pentru utilizarea la maxim a capacității rutiere ar fi ca densitatea traficului să se apropie cât mai mult de pragul critic  $c_{cr}$ , dar să nu îl depășească, garantând astfel un flux aproape maxim. Din diagrama vitezei versus densitate se observă cum viteza de deplasare scade odată cu creșterea densității, cu cât densitatea crește cu atât autovehiculele încetinesc, îndreptându-se spre starea de blocaj, conform relației (2.1). Din diagrama fluxului versus viteză se



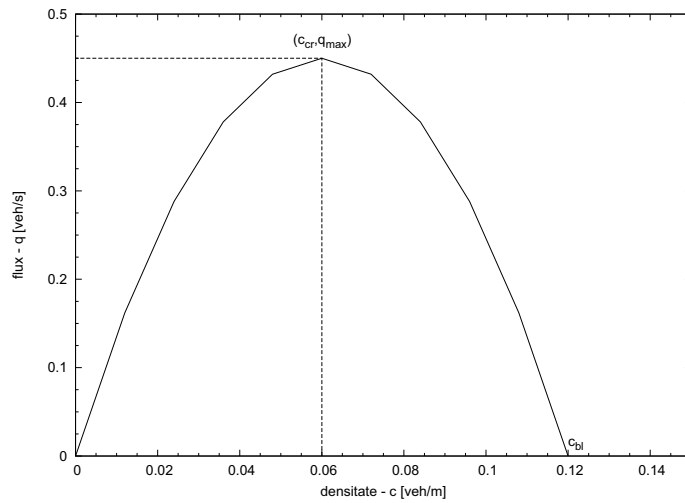


Figura 2.1: Diagrama fundamentală a fluxului de trafic: flux vs. densitate

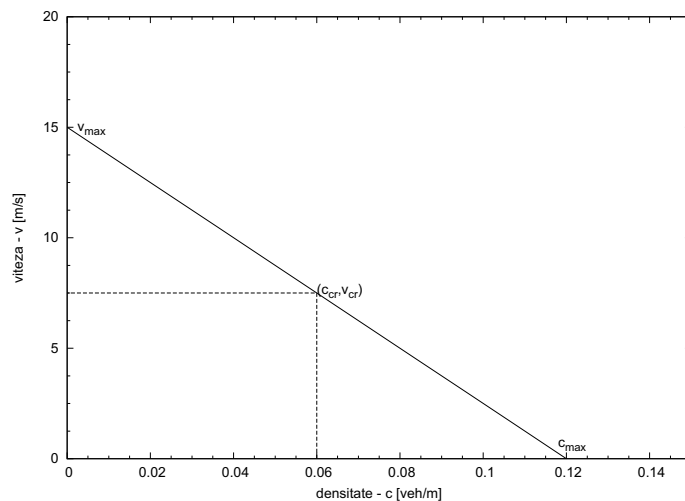


Figura 2.2: Diagrama fundamentală a fluxului de trafic: viteză vs. densitate

observă că fluxul crește împreună cu viteza până la un anumit prag al acesteia, apoi începe să scadă în același ritm. Cu referire la diagrama prezentată în Figura 2.2, ecuația dreptei este:

$$v = v_{max} - \frac{v_{max}}{c_{max}} * c, c \in [0, c_{max}], \quad (2.1)$$

în care:

- $v$  - viteza [m/s],
- $v_{max}$  - viteza maximă [m/s],

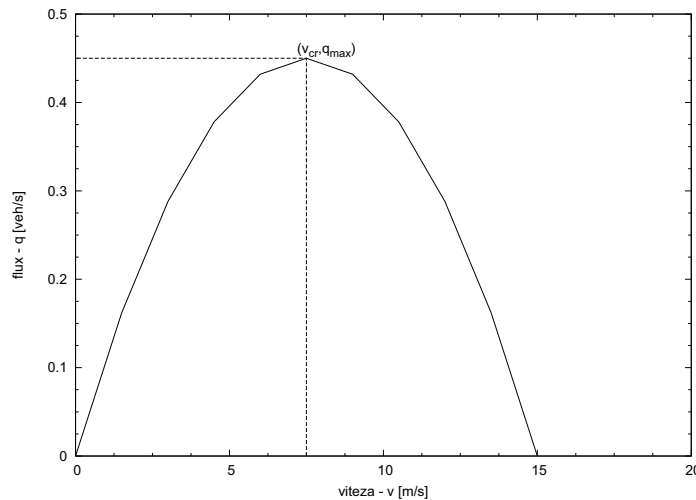


Figura 2.3: Diagrama fundamentală a fluxului de trafic: flux vs. viteză

- $c$  - densitatea traficului [veh/m],
- $c_{max}$  - densitatea maximă de trafic [veh/m].

### 2.3.2. Evoluția modelării macroscopice în traficul rutier

Primele modelări de trafic rutier la nivel macroscopic au început încă din anii 1955-1956 când Lighthill și Whitham, și apoi Richards au publicat un model matematic în timp continuu. Acest model este referit în literatură [87; 115] sub numele de model LWR (Lighthill, Whitham, Richards) și se bazează pe asemănarea dintre fluxul autovehiculelor în trafic și fluxul apelor râurilor conform ecuației cu derivate parțiale (2.2).

$$\frac{n(x)\partial C(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial q(x,t)}{\partial x} = 0. \quad (2.2)$$

Această corespondență dintre cele două fluxuri este aplicabilă doar în cazul zonelor cu intersecții nesemaforizate, traficul nefiind fragmentat prin semaforizare, autovehiculele circulând doar după semnele și regulile de circulație statice (stop, cedează trecerea, prioritate de dreapta). Ultima parte a modelului LWR, descrisă prin ecuațiile (2.3) și (2.4), pornește de la premisa că viteza autovehiculelor pe o anumită porțiune se modifică instantaneu în funcție de densitatea traficului pe respectiva porțiune:

$$q(x,t) = C(x,t)v(x,t)n(x), \quad (2.3)$$

$$v(x,t) = V(C(x,t)), \quad (2.4)$$

Modelul LWR este alcătuit din relațiile (2.2), (2.3) și (2.4), în care:

- $x$  - poziția [m],
- $t$  - timpul [s],
- $v(x,t)$  - viteza autovehiculelor [m/s] la poziția  $x$  și timpul  $t$ ,

- $C(x, t)$  - densitatea traficului [veh/m] în raport cu  $x$  și  $t$ ,
- $q(x, t)$  - fluxul traficului [veh/s] la poziția  $x$  și timpul  $t$ ,
- $n(x)$  - numărul de benzi de mers la poziția  $x$ ,
- $V(C(x, t))$  - viteza [m/s] autovehiculelor adaptată în funcție de densitatea traficului.

În relația (2.5)  $v_{max}$  și  $C_{max}$  reprezintă viteza maximă admisă pe o anumită porțiune și respectiv densitatea maximă în caz de blocaj în trafic. Premisa matematică necesară în explicarea relațiilor (2.3) și (2.4), nu este întotdeauna adevărată pe porțiuni de drum cu diferențe bruște de densitate. Aceasta se datorează faptului că relația dintre viteză și densitate (2.5):

$$v(x, t) = v_{max} * \left(1 - \frac{C(x, t)}{C_{max}}\right), \quad (2.5)$$

nu se poate aplica în cazul traficului rutier urban.

Modelul LWR (2.2),(2.3),(2.4) fiind un model continuu în timp și spațiu, pentru a putea fi folosit în practică trebuie discretizat în timp și spațiu [9]. Discretizarea se realizează la intervale de timp  $\Delta t$  de regulă 15 secunde împărțind șoseaua în porțiuni de anumite lungimi (pentru autostradă de obicei 500-1000m), astfel încât din motive de stabilitate [105],  $\Delta x > v\Delta t$ .

Discretizând în timp ecuația (2.2) se obține:

$$C_j(k+1) = C_j(k) + \frac{\Delta t}{l_j n_j} [q_{in,j}(k) - q_{out,j}(k)], \quad (2.6)$$

în care:

- $C_j(k)$  - densitatea medie [veh/m] în porțiunea  $j$  și perioada  $k$ ,
- $l_j$  - lungimea unei porțiuni 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] din secțiunea  $j$ ,
- $\Delta t$  - perioada de eșantionare [s].

Ecuația (2.6) reprezintă ecuația de modificare a densității de trafic într-o anumită porțiune  $j$  în intervalul de timp  $[k\Delta t, (k+1)\Delta t)$ , având semnificația că diferența dintre densitățile de trafic la momentele  $(k+1)\Delta t$  și  $k\Delta t$  este direct proporțională cu diferența dintre fluxul de intrare și fluxul de ieșire.

Formula de calcul a vitezei medii pentru o porțiune de șosea  $j$  la momentul timp  $k\Delta t$  este prezentată în continuare conform [9; 95]:

$$v_j(k) = V^e(C_j(k)) = v_f \left[ 1 - \left[ \frac{C_j(k)}{C_{bl}} \right]^{\alpha} \right]^{\beta}, \quad (2.7)$$

în care:

- $v_j(k)$  - viteza medie [m/s] pe porțiunea  $j$  și perioada  $k$ ,
- $v_f$  - viteza [m/s] în condiții de trafic degajat, cu condiția ca două autovehicule să nu se influențeze reciproc,

- $\alpha, \beta$  - parametri adimensionali care iau valori în funcție de condițiile de trafic,
- $C_{bl}$  - densitatea [veh/m] de blocaj la care viteza medie de deplasare se apropie de zero.
- $V^e$  - viteza medie de echilibru [m/s],

Utilizând relația (2.3), prin discretizare în timp și spațiu rezultă că fluxul de trafic pe o anumită porțiune de șosea  $j$  la momentul de timp  $k\Delta t$  este direct proporțional cu viteza medie, cu densitatea de trafic și cu numărul de benzi de mers din respectiva porțiune (2.8):

$$q_j(k) = C_j(k)v_j(k)n_j. \quad (2.8)$$

Modelul LWR are două mari dezavantaje și anume: traficul se consideră nefragmentat astfel că modelul nu este aplicabil în cazul intersecțiilor semaforizate și schimbarea vitezei autovehiculelor pe o anumită porțiune se consideră a se realiza instantaneu în funcție de densitatea traficului, fapt nu întotdeauna adevărat. Problemele modelului LWR au fost rezolvate de către Payne [109], în modelul său îmbunătățit, în care viteza de deplasare se consideră a fi dependentă de trei factori:

- relaxare - tendința șoferilor de a accelera sau a decelera spre viteza dorită este caracterizată de densitatea de trafic,
- convecție - schimbarea vitezei medii pe o anumită porțiune de șosea în funcție de fluxul de intrare și fluxul de ieșire de pe respectiva porțiune,
- anticipare - autovehiculele își modifică viteza în funcție de viteza și gradul de aglomerare (densitatea) a autovehiculelor aflate în fața lor, accelerând odată cu scăderea densității sau decelerând odată cu creșterea acesteia.

Modelul Payne conține două ecuații cu derivate parțiale, (2.2) și (2.9). Prima ecuație (2.2) descrie conservarea autovehiculelor ca și la modelul LWR, iar a doua ecuație (2.9) descrie viteza medie de deplasare pe o anumită porțiune de șosea ținând seama nu numai de densitatea de trafic, ci și de dinamica vitezei și de secțiunile învecinate:

$$\frac{\partial v(x, t)}{\partial t} + a_1(x, t) = a_2(x, t) + a_3(x, t), \quad (2.9)$$

în care  $a_1(x, t)$ ,  $a_2(x, t)$  și  $a_3(x, t)$  sunt trei termeni cu semnificația de accelerație:

$$a_1(x, t) = v \frac{\partial v}{\partial x}, \quad (2.10)$$

$$a_2(x, t) = \frac{V^e(C) - v}{T}, \quad (2.11)$$

$$a_3(x, t) = \frac{c_0^2}{C} \frac{\partial C}{\partial x}. \quad (2.12)$$

Termenul  $a_1(x, t)$  este termen de convecție,  $a_2(x, t)$  este termen de relaxare, iar  $a_3(x, t)$  este termen de anticipare. În relațiile (2.10), (2.11), (2.12) au fost introduse următoarele notații:

- $V^e$  - viteza medie de echilibru [m/s],
- $c_0$  - constanta de anticipare [m/s], cu semnificația de viteză,
- $T$  - constanta de relaxare [s].

Prin discretizare în timp și spațiu a ultimelor patru relații conform procedurii din [105], utilizând  $\Delta x = l_j$  rezultă relația:

$$v_j(k+1) = v_j(k) - a_1(k) + a_2(k) + a_3(k), k \in \mathbb{N}, \quad (2.13)$$

în care:

$$a_1(k) = \frac{\Delta t}{l_j} v_j(k) [v_{j-1}(k) - v_j(k)], \quad (2.14)$$

$$a_2(k) = \frac{\Delta t}{T} [V^e(C_j(k)) - v_j(k)], \quad (2.15)$$

$$a_3(k) = \frac{c_0^2 \Delta t [C_{j+1}(k) - C_j(k)]}{l_j [C_j(k) + \kappa]}, \quad (2.16)$$

și:

- $\kappa$  - parametru de ajustare [m/s],
- $V^e(C_j(k))$  - viteza medie de echilibru [m/s].

Din ecuația (2.13) rezultă că viteza autovehiculelor pe porțiunea de șosea  $j$  la momentul  $(k+1)\Delta t$  este egală cu viteza pe secțiunea  $j$  la momentul  $k\Delta t$  la care se adaugă o anumită corecție pentru convecție, relaxare și anticipare [9]:

- *convecție* ( $a_1(k)$ ) cu următoarea interpretare fizică: autovehiculele care trec din porțiunea  $j-1$  în porțiunea  $j$ , spre deosebire de modelul LWR nu își schimbă viteza instantaneu. Spre exemplu, un șofer care circulă cu viteză mare pe porțiunea  $j-1$ , va decelera treptat până va ajunge la o viteză pe care o consideră adecvată pentru porțiunea  $j$ , în timpul decelerării viteza sa medie fiind mai mare decât viteza de echilibru pe porțiunea  $j$ . Astfel, cu cât viteza pe porțiunea  $j-1$  este mai mare, cu atât va crește și viteza medie pe porțiunea  $j$ . De asemenea, cu cât viteza pe porțiunea  $j-1$  este mai mică, cu atât viteza medie pe porțiunea  $j$  va scădea, autovehiculele fiind nevoite să accelereze la trecerea în porțiunea  $j$  până la atingerea vitezei medii pe respectiva porțiune. Convecția este astfel proporțională cu diferența dintre vitezele de deplasare pe cele două porțiuni învecinate, cu cât această diferență este mai mare, cu atât durata accelerării/decelerării este mai mare, având impact mai mare asupra vitezei medii pe ultima porțiune. Convecția este astfel proporțională și cu viteza medie. Impactul convecției este cu atât mai mare cu cât lungimea porțiunii de șosea este mai mică; putem spune astfel că, convecția este invers proporțională cu lungimea porțiunii de șosea.
- *relaxare* ( $a_2(k)$ ) cu următoarea interpretare fizică: șoferii autovehiculelor tind să atingă viteza proprie dorită. Dacă viteza la un moment dat este mai mică decât cea dorită, datorită unui oarecare obstacol întâlnit, atunci șoferul va accelera spre viteza dorită. Dacă viteza dorită scade datorită congestiei traficului sau din orice alte motive, atunci șoferul va decelera adaptând viteza curentă la noua viteză dorită. Urmărind acest comportament al șoferilor în trafic se poate afirma că viteza de deplasare este influențată direct de către densitatea de trafic. Cu cât diferența dintre viteza curentă și viteza dorită este mai mare cu atât acest factor de relaxare este mai mare. Constanta de timp  $T$  reprezintă capacitatea de reacție a șoferului, cu cât valoarea sa este mai mare, cu atât șoferul va reacționa mai încet în schimbarea vitezei și factorul de relaxare va fi mai mic.

- *anticipare* ( $a_3(k)$ ) cu următoarea interpretare fizică: autovehiculele își modifică viteza în funcție de viteza și gradul de aglomerare a autovehiculelor aflate în fața lor. Dacă șoferul autovehiculului vede că densitatea traficului din porțiunea spre care se îndreaptă este mai mare, atunci va decelera treptat până va atinge viteza de deplasare pe respectiva porțiune. De asemenea, dacă vede că densitatea traficului scade, atunci șoferul va accelera. Constanta de anticipare  $c_0$  este direct proporțională cu diferența de densitate de trafic pe porțiunea curentă  $j$  și porțiunea următoare  $j+1$ . Constanta de timp  $T$  reprezintă capacitatea de reacție a șoferului, la fel ca și în cazul relaxării, iar parametri  $v_a$  și  $\kappa$  permit ajustarea termenului de anticipare.

În 1990, Papageorgiou [105] a adus două îmbunătățiri la modelul Payne discretizat (2.13), și anume tratarea a două situații importante pe autostradă ce au ca efect creșterea densității traficului. Prima situație este înălțată în zonele de urcare pe autostradă, iar cea de-a doua situație în zonele în care scade numărul benzilor de mers.

Scăderea vitezei de deplasare în apropierea urcărilor pe autostradă se datorează creșterii densității în zona respectivă. Autovehiculele ce urmează să urce pe autostradă vor influența autovehiculele deja circulând pe autostradă prin schimbările de bandă pe care acestea din urmă le vor efectua pentru a permite accesul pe prima bandă. Această schimbare de bandă de mers va avea ca efect imediat scăderea vitezei de deplasare. Situația menționată a fost modelată de către Papageorgiou prin adunarea unui termen suplimentar, numit termen de amestecare, ecuației discretizate Payne (2.13) [9]. Expresia termenului de amestecare este:

$$a_4(k) = - \left( \frac{\delta \Delta t}{l_j n_j} \right) \frac{q_\mu(k) v_j(k)}{C_j(k) + L}, \quad (2.17)$$

în care:

- $\delta$  - parametru adimensional de ajustare a termenului de amestecare,
- $L$  - parametru de ajustare a termenului de amestecare [veh/m],
- $q_\mu(k)$  - fluxul autovehiculelor [veh/s] pe intrarea pe autostradă.

Relația (2.17) are interpretare fizică imediată. Aceasta se referă la faptul că scăderea vitezei pe autostradă este direct proporțională cu creșterea fluxului  $q_\mu(k)$  pe intrarea pe autostradă.

Îngustarea autostrăzii prin reducerea numărului de benzi pe anumite porțiuni este similară cazului anterior de urcare pe autostradă, fluxul autovehiculelor depășind brusc capacitatea porțiunii respective. Pentru aceasta Papageorgiou a mai adăugat un termen la membrul drept al ecuației (2.13):

$$a_5(k) = - \left( \frac{\phi \Delta t}{l_j n_j} \right) \left( \frac{\Delta n_j C_j(k)}{C_{bl,j}} \right) v_j^2(k), \quad (2.18)$$

în care:

- $\Phi$  - parametru adimensional de ajustare,
- $n_j$  - numărul de benzi din secțiunea  $j$ ,
- $\Delta n_j = n_j - n_{j+1} < 0$  - diferența dintre numărul de benzi din secțiunea  $j$  și numărul de benzi din secțiunea  $j+1$ .

În final, ecuația Payne îmbunătățită de Papageorgiou are expresia:

$$\begin{aligned}
v_j(k+1) = v_j(k) - \underbrace{\frac{\Delta t}{l_j} v_j(k) [v_{j-1}(k) - v_j(k)]}_{a_1} + \underbrace{\frac{\Delta t}{T} [VC_j(k) - v_j(k)]}_{a_2} + \\
\underbrace{\frac{c_0^2 \Delta t [C_{j+1}(k) - C_j(k)]}{l_j [C_j(k) + \kappa]}}_{a_3} - \underbrace{\left( \frac{\delta \Delta t}{l_j n_j} \right) \frac{q_\mu(k) v_j(k)}{C_j(k) + L}}_{a_4} - \underbrace{\left( \frac{\phi \Delta t}{l_j n_j} \right) \left( \frac{\Delta n_j C_j(k)}{C_{bl,j}} \right) v_j^2(k)}_{a_5}. \quad (2.19)
\end{aligned}$$

Completări la aceste modele macroscopice la nivel de autostradă au fost aduse de către Helbing [61], Daganzo [28], Kotsialos și Papageorgiou [79; 98].

Modelele amintite au ca scop principal descrierea fluxului autovehiculelor pe autostradă sau în orașe pe porțiuni de drum nesemaforizate. Întrucât majoritatea intersecțiilor în marile orașe ale zilelor noastre sunt semaforizate, acest tip de modele nu este întotdeauna adecvat. În acest caz mult mai importante sunt datele de trafic în timp real cum ar fi, lungimea cozilor de așteptare, numărul de autovehicule ce trec prin intersecție pe durata unui ciclu de semafor, vitezele medii de deplasare pe fiecare stradă care intră și care iese din intersecție, timpii medii de așteptare la semafor.

Majoritatea studiilor legate de conducerea traficului în zilele noastre își îndreaptă atenția spre traficul pe autostradă, securitate în trafic și implementarea unor sisteme dinamice pentru ghidarea șoferilor în trafic [7; 8; 50; 60; 62; 80; 93; 114; 125]. Cu toate acestea încă există foarte multe orașe nedotate cu infrastructură prevăzută cu autostrăzi (mai ales în țările slab dezvoltate sau în curs de dezvoltare), existând chiar mari orașe ale lumii cu zone de trafic urban fără autostradă. De aici rezultă necesitatea implementării unor sisteme dinamice de conducere a traficului urban în timp real prin comanda semafoarelor din intersecții, fapt ce implică în primul rând o modelare adecvată. Legat de modalitatea de reprezentare a procesului în timp continuu sau în timp discret, majoritatea modelor (chiar în timp continuu) ajung să fie rezolvate numeric în timp discret după cum arată și Hegyi [58]. Se poate afirma astfel că modelele în timp discret sunt mai utile, reprezentând o modalitate matematică directă de simulare a condițiilor reale de trafic rutier.

### 2.3.3. Modelarea macroscopică a traficului rutier urban

Spre deosebire de soluțiile cercetate în ceea ce privește traficul pe autostradă, fie că ne referim la modelarea traficului, la simularea comportamentului acestuia sau la soluțiile de conducere, cercetarea traficului urban semaforizat se regăsește în mult mai puține lucrări în literatura de specialitate. Modelarea traficului urban semaforizat este total diferită față de modelarea traficului pe autostradă datorită, în primul rând, deselor segmentări ale fluxului traficului aproape în fiecare intersecție și în al doilea rând, datorită conducerii diferite datorate semaforizării.

În viziunea autorului, principalele caracteristici necesare a fi luate în considerare privind procesul de modelare a traficului rutier urban semaforizat sunt următoarele:

- numărul de străzi ce intră și ies din intersecție,
- numărul de benzi de pe fiecare stradă,
- definirea ciclurilor și fazelor de semafor,
- definirea pragurilor maxime de timp de așteptare pentru fiecare stradă în parte,
- definirea timpilor între două faze consecutive de verde în vederea evitării accidentelor,

- politica de grupare a străzilor pentru aceeași fază de semafor specifică intersecției,
- lungimea cozilor de așteptare,
- viteza medie a autovehiculelor,
- rata de creștere a cozii de așteptare pentru fiecare fază de semafor,
- rata de golire a cozii de așteptare pentru fiecare fază de semafor,
- estimarea creșterii cozilor de așteptare,
- condițiile de trafic diferite în funcție de perioada zilei,
- detecția și monitorizarea cozilor de așteptare atât a autovehiculelor cât și a pietonilor,
- posibilitatea sincronizării cu alte intersecții,
- posibilitatea conducerii locale la nivel de intersecție,
- posibilitatea conducerii prin coordonare de către un sistem central,
- posibilitatea simulării comportamentului sistemelor de conducere implementate.

În literatura de specialitate [36; 104] se disting două componente complementare ale modelării macroscopice a traficului urban semaforizat: 1) modelarea procesului de schimbare a culorilor semafoarelor și 2) modelarea fluxului traficului într-o intersecție prin monitorizarea cozilor de așteptare. Principalele metode utilizate în modelarea în timp discret sunt: teoria cozilor [72; 140; 142], rețelele Petri [36; 48; 92] și automatele celulare [6; 10; 20; 38; 101]. În continuare va fi făcută o analiză succintă a metodelor amintite mai sus.

Teoria cozilor este des utilizată în modelarea macroscopică datorită faptului că oferă suportul matematic pentru monitorizarea/modelarea cozilor de așteptare a autovehiculelor în intersecțiile semaforizate. Utilizând relațiile lui Kendall din teoria cozilor cu trei factori ( $A/B/C$ , în care  $A$  este procesul de sosire,  $B$  este distribuția în timp a golirii cozii și  $C$  reprezintă numărul de canale de golire a cozii), majoritatea abordărilor din literatura de specialitate [72; 140; 142] utilizează modele de tipurile:  $G/G/1$ ,  $M/G/1$ ,  $G/M/1$  și  $M/M/1$ ; în care  $M$  este notația pentru proces/distribuție de tip Markovian (proces/distribuție de tip stohastic), iar  $G$  este notația pentru proces/distribuție generală. În Figura 2.4 este prezentat principiul de monitorizare a cozilor de așteptare a autovehiculelor în funcție de rata de sosire  $\lambda$  a acestora și rata de plecare  $\mu$ . Marele avantaj al modelării cozilor de așteptare este dat de ușurința implementării alături de oferirea de informații de trafic în timp real. Singurul dezavantaj al acestei metode de modelare este că se pot strecura erori în cazurile în care cozile de așteptare sunt discontinue, adică autovehiculele nu sunt grupate în pluton, ci sunt întrerupte din diferite motive.

O modelare matematică de principiu a lungimilor cozilor de așteptare în funcție de ratele sau vitezele de sosire  $\lambda$  și de plecare  $\mu$  a autovehiculelor în și respectiv din coada de așteptare este descrisă în ecuația (??). În literatura de specialitate se disting două abordări legate de unitatea de măsură a lungimilor cozilor de așteptare, o abordare prin care se măsoară numărul de autovehicule prezente în coada de așteptare, și altă abordare prin care se măsoară lungimea efectivă a cozii de așteptare în metri.

$$l(t_k) = \max(l(t_{k-1}) + (\bar{\lambda}_1^{(k-1)} - \bar{\mu}_1^{(k-1)})\delta_k, 0) , \quad (2.20)$$

în care:



- $\delta_k = t_{k+1} - t_k \in \mathbb{N}^+$  - timpul dintre schimbarea culorilor semaforului din verde în roșu sau invers,
- $l(t)$  - lungimea cozii de așteptare (numărul de autovehicule în așteptare) măsurată în metri,
- $\bar{\lambda}_i^{(k)} = \text{const}, \forall t \in [t_k, t_{k+1}), \bar{\lambda}_i^{(k)} \in \mathbb{N}$  - viteza medie de sosire a autovehiculelor în intervalul de timp  $[t_k, t_{k+1})$ , măsurată în [m/s],
- $\bar{\mu}_i^{(k)} = \text{const}, \forall t \in [t_k, t_{k+1}), \bar{\mu}_i^{(k)} \in \mathbb{N}$  - viteza medie de plecare a autovehiculelor în intervalul de timp  $[t_k, t_{k+1})$ , măsurată în [m/s].

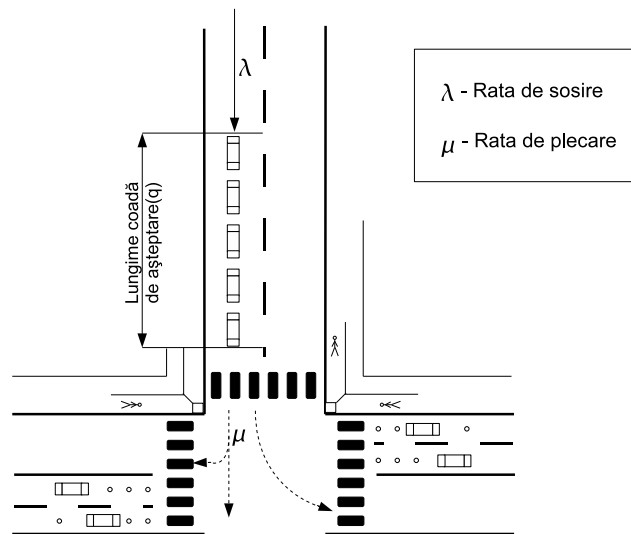


Figura 2.4: Schemă de principiu privind monitorizarea unei cozi de așteptare

Utilizarea automatelor celulare în modelarea traficului rutier urban îmbină generalitatea oferită de modelarea macroscopică, cu particularitățile fiecărui participant la trafic oferite de modelarea microscopică. Principiul de funcționare este relativ simplu conform lucrării [101]: o stradă este formată dintr-o mulțime de celule adiacente, un autovehicul putându-se deplasa dintr-o anumită celulă în una din celulele vecine după anumite reguli cu condiția ca celula respectivă să nu fie ocupată. Modelarea se realizează în timp discret, cunoscându-se datele exacte de trafic la fiecare moment ( $t$ ) și tranzițiile de la starea  $S_t$  la starea  $S_{t+1}$ . În Figura 2.5 este prezentat un exemplu de modelare a traficului rutier pentru două benzi de mers, una înainte și alta spre stânga.

Din figură se poate observa că fiecare bandă este împărțită în celule de lungime 7.5 metri, lungime corespunzătoare distanței medii între barele din față a două mașini aflate una în urma celeilalte. Fiecare celulă poate fi ocupată sau liberă și este caracterizată de viteza de deplasare pe porțiunea respectivă  $v_i = 0, v_{max}$ , în care  $v_{max}$  este viteza maximă admisă, iar  $v_i = 0$  denotă o celulă goală. Relațiile de mișcare a autovehiculelor  $x(i)$  ( $i$  indexul autovehiculului) între celule sunt caracterizate de patru pași:

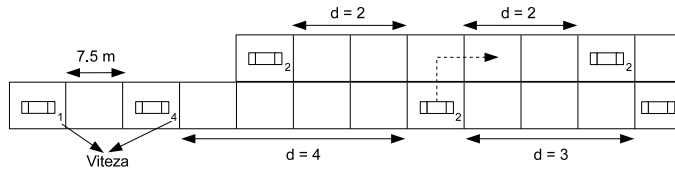


Figura 2.5: Schemă de principiu privind modelarea cu automate celulare

- accelerație :  $v_i(t + 1) = \min(v_i(t) + 1, v_{max})$ ,
- evitarea accidentelor :  $v_i(t + 1) = \min(v_i(t), dist)$ , în care  $dist$  este distanța dintre autovehiculul curent și cel dinaintea sa,
- introducerea elementului aleator specific comportamentului sistemului de transport sub forma probabilității  $p$ , rezultând expresia vitezei:

$$v_i(t + 1) = \begin{cases} v_i(t), & \text{dacă } p < 50\% \\ v_i(t) - 1, & \text{în caz contrar} \end{cases} \quad (2.21)$$

- mișcare :  $x(i, t + 1) = x(i, t) + v_i(t)$  - fiecare autovehicul avansează  $v_i(t)$  celule.

Rețelele Petri sunt cunoscute în domeniul modelării atât pentru modelarea matematică riguroasă cât și pentru reprezentarea grafică sugestivă. Cu ajutorul acestor rețele pot fi modelate sistemele cu evenimente discrete care necesită sincronizarea proceselor, concurență, calcul secvențial, partajarea resurselor. O rețea Petri este formată din locuri, tranziții și arce care conectează locurile de tranziții și invers  $(L, T, A)$ . Unde  $L$  este mulțimea locurilor,  $T$  este mulțimea tranzițiilor și  $A$  este mulțimea arcelor, cu proprietatea că  $A : (L \times T) \cup (T \times L) \rightarrow \mathbb{N}^+$ , cu alte cuvinte nu există arc care să conecteze două locuri sau două tranziții. Fiecare loc conține zero sau mai multe jetoane care se vor deplasa în interiorul rețelei în funcție de condițiile stabilite pentru tranzițiile vecine. În momentul în care condițiile tranzițiilor sunt îndeplinite, jetoane din locurile aflate exact înaintea tranzițiilor respective se vor deplasa către locul imediat următor.

În ceea ce privește modelarea traficului rutier urban, rețelele Petri reprezintă o posibilitate de modelare a schimbării fazelor de semafor într-o intersecție semaforizată utilă în cazul metodelor de conducere în timp discret. Astfel, fiecărei faze de semafor  $i$  se va atribui un loc Petri, iar schimbării fazei de semafor (terminarea culorii verde pentru faza de semafor curentă și alegerea următoarei faze de semafor)  $i$  se va atribui o tranziție. Definierea arcelor între locuri și tranziții se va face în funcție de metoda de conducere și de succesiunea fazelor de semafor. După definirea componentelor rețelei se va alege o primă fază de semafor/loc Petri și  $i$  se va atribui un singur jeton. După terminarea primei tranziții, acest jeton se va deplasa spre locul următor și va aștepta până următoarea tranziție va fi îndeplinită și așa mai departe până jetonul va ajunge în poziția inițială, fapt care confirmă încheierea unui ciclu de semafor. În figura 2.6 este prezentată o schemă de principiu a procesului de schimbare a culorilor semafoarelor utilizând pentru modelare o rețea Petri și având următoarele notații:

- $S_i$  - stare Petri - activarea fazei de verde pentru starea numărul  $i$ ,
- $t_i$  - tranziție Petri - se termină culoarea verde a semaforului pentru starea  $i$ .

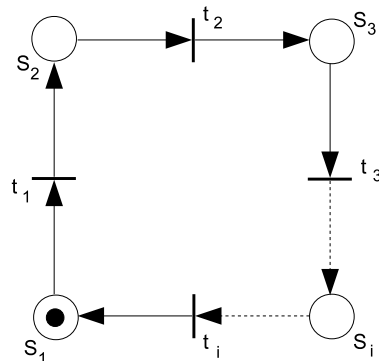


Figura 2.6: Schemă de principiu privind modelarea procesului de schimbare a semafoarelor

## 2.4. Analiza stadiului actual al soluțiilor de simulare a traficului rutier

Necesitatea de sisteme inteligente de transport (ITS) rutier a dus la dezvoltarea unei industrii software pentru planificarea, modelarea și simularea comportamentului traficului rutier indiferent de mediu (urban sau rural) și indiferent de tipul de trafic (trafic prin intersecții semaforizate sau echipate cu semne de circulație, și trafic pe autostradă). Prin modelarea, simularea și verificarea soluțiilor de trafic înaintea implementării acestora, se evită astfel cheltuieli mari pentru soluții care în final se pot dovedi ineficiente. În acest subcapitol se va face o prezentare succintă a produselor software actuale fără a atinge aspecte tehnice, datorită faptului că aceste produse sunt comerciale și ascund astfel de informații detaliate.

Liderul pe piața internațională în acest domeniu este PTV [113], are ca principale produse VISUM și VISSIM și este utilizat în soluțiile de trafic pe toate continentele globului. VISUM este un produs puternic de planificare și modelare a traficului rutier, are un ridicat grad de generalitate și ține seama de toate tipurile de transport: autovehicule, mijloace de transport în comun, autovehicule de transport marfă, pietoni, bicicliști, etc. VISSIM în schimb folosește modelele implementate în VISUM pentru simularea traficului rutier, oferind date și statistici atât la nivel macroscopic și mezoscopic, cât și la nivel microscopic.

Quadstone Paramics [107] concurează cu PTV pe piața microsimulării rutiere, având în prezent mai mult de o mie de clienți în patruzeci și cinci de țări. Produsul software se numește Paramics și oferă soluții de modelare puternice atât matematic cât și grafic. În ceea ce privește grafica (2D și 3D), nivelul de detaliu este complex, uimind efectele legate de vreme și culorile realiste ale participanților la trafic. Proiectarea se realizează în detaliu până la cele mai mici amănunte indiferent de infrastructura rutieră.

O altă companie importantă și cunoscută pentru soluțiile de modelare, simulare și conducere a traficului rutier este compania TRL (Transport Research Laboratory) [134] din Marea Britanie. Produsul software de simulare a traficului rutier se numește Transyt și a fost și este folosit în câteva sute de locații din întreaga lume. Transyt simulează și estimează costurile necesare conducerii statice (valori presetate pentru fiecare fază de semafor) a traficului rutier urban cunoscându-se valorile medii ale fluxului și densității de trafic.

AIMSUN [137] este un produs software realizat de compania TSS (Transport Simulation Systems), important pentru calitățile sale de simulare indiferent de gradul de detaliu. AIMSUN oferă posibilitatea atât a modelării microscopice, mesoscopice, cât

și macroscopice, din acest punct de vedere este preferat în modelarea traficului rutier la diferite grade de detaliu. SimTraffic [132] oferă de asemenea posibilitatea simulării traficului rutier la nivel microscopic, nu este la fel de utilizat ca și Visum sau Paramics, dar totuși există cereri pe piață.

În afara produselor prezentate mai sus, există multe alte simulatoare de trafic urban cu grade scăzute de complexitate utile pentru soluții dedicate. Alegerea simulatorului adecvat depinde de mulți factori cum ar fi: particularitățile cazurilor simulate, condițiile de trafic, tipul de modelare (micro, macromodelare sau ambele), scalabilitatea și nu în ultim rând costurile achiziționării.

## 2.5. Analiza stadiului actual al metodelor de conducere urbană

Conducerea traficului rutier urban la nivel de intersecție se împarte în două mari categorii: conducere statică (lungimile fazelor de semafor sunt stabilite apriori după anumite criterii) și conducere dinamică (lungimile fazelor de semafor și succesiunea acestora se stabilesc în funcție de măsurătorile de trafic în timp real). În acest capitol se va realiza o scurtă descriere a ambelor tipuri de conducere, a avantajelor și dezavantajelor acestora, prezentând pe scurt pentru fiecare tip de conducere principalele metode conform literaturii de specialitate [106].

Majoritatea soluțiilor de conducere utilizate pe plan mondial la ora actuală sunt raportate mai degrabă sub formă de implementări și produse comerciale. Acesta este motivul pentru care în acest subcapitol s-a încercat o prezentare cât mai detaliată a bazelor matematice ale soluțiilor analizate. Acolo unde nu s-a reușit (din motive obiective) au fost puse în evidență avantajele și dezavantajele fiecărei soluții prin prisma utilizării acestora.

Cu toate că metodele de conducere statică sunt încă implementate pe scară largă în zilele noastre datorită costurilor reduse față de metodele de conducere dinamică, acestea au marele dezavantaj de a avea la baza strategiilor de conducere informații de trafic obținute pe baza statisticilor, și nu informații proaspete în timp real care reflectă necesitățile reale și curente din trafic. Alte dezavantaje ce pornesc de la lipsa de informații reale din trafic sunt:

- pot exista diferențe mari între condițiile de trafic înregistrate la aceeași oră, dar în zile diferite,
- pe termen lung cererea de trafic se schimbă și astfel soluția de conducere statică implementată nu mai este avantajoasă,
- necesitățile de a vira în intersecții se schimbă de asemenea în timp datorită faptului că, conducătorii auto încep să cunoască strategia de schimbare a semafoarelor (după mai multe traversări ale intersecției) și pe viitor vor lua decizii de a schimba ruta în funcție de observațiile asupra semaforizărilor,
- blocajele în trafic, indiferent de condițiile care au dus la acestea, afectează metoda de conducere într-un mod imprevizibil.

### 2.5.1. Indicatori de performanță utilizați în aprecierea metodelor de conducere a traficului rutier

Indicatorii de performanță au rolul important de a aprecia cantitativ și calitativ rezultatele obținute de metodele de conducere în anumite condiții de trafic. Cu ajutorul acestor indicatori se poate studia comparativ comportamentul anumitor metode de conducere în condiții de trafic specifice și pot fi realizate clasificări ale metodelor de

conducere în cauză. De asemenea, indicatorii de performanță sunt utili în procesul de dezvoltare și îmbunătățire a unei anumite metode de conducere, oferind posibilitatea de a observa performanțele și evoluția în timp a sistemului de conducere.

Conform literaturii de specialitate [29; 104] indicatorii de performanță măsoară rezultatele conducerii traficului rutier utilizând date de trafic cum ar fi: viteza ( $v[m/s]$ ), fluxul ( $q[veh/m]$ ) și densitatea ( $c[veh/m]$ ). Pornind de la aceste date de trafic se elaborează diferiți indicatori de performanță pentru a evidenția anumite proprietăți ale sistemului de conducere. În continuare vor fi prezentați o serie de indicatori de performanță utilizați în conducerea traficului rutier, pentru o anumită porțiune de șosea  $\Delta x$  și pe o anumită perioadă de timp  $\Delta t$ .

- **viteza medie** [m/s]:

$$v_{med} = \frac{\Delta x}{\Delta t}, \quad (2.22)$$

Metodele de conducere au ca scop îmbunătățirea acestui indicator prin obținerea de valori cât mai mari.

- **fluxul mediu** [veh/s] definit în două moduri. Primul este:

$$q_{med} = v_{med} * c_{med}, \quad (2.23)$$

se calculează în funcție de viteza medie și densitatea medie de trafic, unde  $c_{med}$  este densitatea medie de trafic măsurată în [veh/m]. Metodele de conducere au ca scop îmbunătățirea acestui indicator prin obținerea de valori cât mai mari și apropiate de fluxul critic  $c_{cr}$ . Cel de-al doilea mod de definire se referă la luarea în considerare a fluxurilor pe fiecare secțiune:

$$q_{med} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i * l_i}{td_{\Delta x}}, \quad (2.24)$$

unde  $n$  reprezintă numărul de secțiuni a porțiunii de șosea  $\Delta x$ . Metodele de conducere au ca scop îmbunătățirea acestui indicator prin obținerea de valori cât mai mari și apropiate de fluxul critic  $c_{cr}$ .

- **densitatea medie** [veh/m]:

$$c_{med} = \frac{q_{med}}{v_{med}}, \quad (2.25)$$

se calculează în funcție de viteza medie și fluxul mediu de trafic. Metodele de conducere au ca scop obținerea de valori cât mai apropiate de densitatea de blocaj  $c_{cr}$ .

- **lungimea cozilor de așteptare** [m]:

$$l_{\Delta x} = c_{med} * \Delta x, \quad (2.26)$$

mai este calculată uneori și în număr de autovehicule [veh], cu precizarea că lungimea medie a unui autohevicul se consideră a avea valori între 5 și 7 metri. Metodele de conducere au ca scop îmbunătățirea acestui indicator prin obținerea de valori cât mai mici.

- **timpul mediu de traversare a intersecției [s]:**

$$t_{med} = \frac{l_{\Delta x}}{v_{med}} / l_{auto}, \quad (2.27)$$

unde  $l_{auto}$  reprezintă lungimea medie măsurată în [m] a unui autovehicul aflat în coada de așteptare. Metodele de conducere au ca scop îmbunătățirea acestui indicator prin obținerea de valori cât mai mici.

- **totalul distanței parcurse [m]:**

$$td_{\Delta x} = \sum_{i=1}^n \Delta x_i, \quad (2.28)$$

unde  $n$  reprezintă numărul de secțiuni a porțiunii de șosea  $\Delta x$ . Rezultatele obținute de metodele de conducere sunt raportate la acest indicator de performanță.

- **timpul total petrecut în trafic [s]:**

$$tt_{\Delta x} = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{v_i}, \quad (2.29)$$

unde  $n$  reprezintă numărul de secțiuni ale porțiunii de șosea  $\Delta x$ . Rezultatele obținute de metodele de conducere sunt raportate la acest indicator de performanță.

- **numărul de opriri/autovehicul în apropierea intersecției  $n_{stop}$ ,**
- **timpul total petrecut în coada de așteptare  $t_{coada}$  [s].**

La indicatorii  $t_{med}$ ,  $tt_{\Delta x}$ ,  $n_{stop}$ ,  $t_{coada}$ , nu se specifică în literatura de specialitate care sunt valorile recomandate (mai mici sau mai mari). Acești indicatori caracterizează anumite proprietăți ale metodelor de conducere în diferite condiții de trafic, fiind utilizați de obicei împreună cu alți indicatori de performanță.

### 2.5.2. Metode de conducere statică la nivel de intersecție

Conducerea statică este prima metodă de conducere utilizată de la inventarea semaforizării. Gradul de aplicabilitate este destul de mare și în zilele noastre, deși începe să piardă teren în favoarea metodelor de conducere dinamică datorită noilor tehnologii de măsurare a datelor de trafic și datorită ușurinței integrării acestora în strategiile de conducere. La nivel de intersecție, metodele de conducere statică sunt utile doar pentru condiții de trafic subsaturat datorită faptului că nu se ține seama de densitatea curentă a traficului pe străzile ce intră în intersecție. Astfel nu pot fi favorizate anumite străzi cu densitate mai mare în detrimentul celor cu densitate mai mică, necunoscând date de trafic în timp real. De obicei se stabilesc strategii de conducere statică în funcție de perioada zilei și de gradul de aglomerație (densitatea traficului) înregistrat în statisticile de trafic.

Metodele de conducere statică se împart la rândul lor în două categorii în funcție de setările apriori ale timpilor de semafor: conducere la nivel de ciclu de semafor și conducere la nivel de fază de semafor. Metodele de conducere la nivel de ciclu de semafor determină durata unui ciclu de semafor și împărțirea acestei valori la toate fazele de semafor necesare în respectiva intersecție (optimal split [104]). În

schimb metodele de conducere la nivel de fază de semafor se ocupă pe lângă calcularea ciclurilor de semafor și cu îmbunătățirea sau optimizarea timpilor fazelor de semafor.

Metodele SIGSET și SIGCAP intră în categoria metodelor statice la nivel de ciclu de semafor și au ca scop atât minimizarea întârzierilor la nivel de intersecție cunoscându-se fluxurile de trafic ale tuturor străzilor ce intră în intersecție, cât și maximizarea capacității intersecției. Pentru o anumită intersecție semaforizată a cărei ciclu de semafor se împarte în  $m$  faze, durata ciclului de semafor se distribuie între toate cele  $m$  faze după cum urmează:

$$\lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_m = 1, i = \overline{1, m}, \lambda_i \in [0, 1], \quad (2.30)$$

în care:

- $t_c$  - lungimea ciclului de semafor [s],
- $\lambda_0 = \frac{t_p}{t_c}$  -  $t_p$  este timpul pierdut [s] pe durata unui ciclu complet,
- $\lambda_i$  - ponderea alocată fazei de semafor  $i$  din lungimea ciclului  $t_c$ .

Pentru ca soluția SIGSET să funcționeze, condiția principală este ca următoarea inegalitate să fie îndeplinită, adică fluxul traficului pentru fiecare stradă  $j$  care intră în intersecție să nu depășească un anumit prag:

$$c_s(j) \sum_{i=1}^m \alpha_{ij} \lambda_i \geq c_n(j), \forall j = \overline{1, n_{SI}}, \quad (2.31)$$

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{dacă strada are culoare verde la faza de semafor } i \\ 0 & \text{în caz contrar} \end{cases} \quad (2.32)$$

în care:

- $c_s(j)$  - fluxul de saturație [veh/s] pe strada  $j$ ,
- $c_n(j)$  - fluxul necesar pe strada  $j$  [veh/s],
- $\alpha_{ij}$  - are valoarea 1 dacă strada  $j$  are verde la faza  $i$  și are valoare 0 în caz contrar,
- $n_{SI}$  - numărul de străzi care intră în intersecție.

Cu alte cuvinte se impune prin inegalitatea (2.31) ca valoarea fluxului necesar  $c_n(j)$  pe strada  $j$  să nu depășească valorile maxime ale fluxului posibil pe această stradă. Relațiile (2.30), (2.31), (2.32) reprezintă restricțiile celor două metode de optimizare cu variabilele  $\lambda_i, i = \overline{1, m}$  grupate în vectorul  $\lambda$  (2.33).

$$\lambda = [ \lambda_0 \quad \lambda_1 \quad \dots \quad \lambda_m ]^T. \quad (2.33)$$

Vectorul cu alocarea optimă a ponderilor  $\hat{\lambda}$  pentru fiecare fază de semafor relativ la lungimea ciclului, este obținut ca soluție a metodei de optimizare:

$$\hat{\lambda} = \arg \min_{\lambda} Split(\lambda), \quad (2.34)$$

supusă la restricțiile (2.30), (2.31), (2.32), (2.33).

Metodele statice la nivel de fază de semafor [68] sunt asemănătoare cu cele prezentate mai sus, aducând în plus căutarea în spațiul tuturor soluțiilor a soluției optime de împărțire a duratei ciclului de semafor între fazele acestuia. Acest fapt induce automat timpi de calcul semnificativ mai mari decât în cazul metodelor statice la nivel de ciclu, totuși puțin semnificativ având în vedere că aceste calcule nu se realizează în timp real.

### 2.5.3. Metode de conducere statică prin coordonarea mai multor intersecții

Conform literaturii de specialitate o primă metodă de coordonare statică numită MAXBAND [88] a fost dezvoltată încă din anii 1966, apoi a fost îmbunătățită în timp [89]. Pentru o anumită arteră formată din  $n$  intersecții succesive  $S_1, S_2, \dots, S_n$ , algoritmul MAXBAND are ca scop maximizarea numărului de autovehicule ce se deplasează între prima și ultima intersecție cu o anumită viteză stabilită între anumite paliere, fără ca acestea să aștepte la semafor în intersecțiile intermediare. Cu alte cuvinte oferă undă verde pentru o anumită arteră cu intersecții semaforizate, prin stabilirea diferenței în timp între începutul fazelor de semafor ale intersecțiilor învecinate  $S_i$  și  $S_{i+1}$  de pe artera respectivă, cu mențiunea că aceste faze servesc plutonul de autovehicule care a plecat din intersecția  $S_1$ . Pe lângă sincronizarea semafoarelor din intersecțiile învecinate se iau în considerare și străzile laterale din intersecțiile de pe parcursul arterei, lungimea fazelor de semafor pentru aceste străzi considerându-se cunoscute și setate astfel apriori. Totuși rămâne rezolvarea problemei de stabilire a succesiunii fazelor de semafor în fiecare intersecție astfel încât să se maximizeze la nivelul arterei suma dintre timpul de servire a autovehiculelor care circulă de-a lungul arterei și timpul celor care doar o intersecțiază. Soluția acestei probleme este parcurgerea spațiului tuturor soluțiilor - cel mai util algoritm fiind branch and bound (necesitând un spațiu de memorie care crește exponențial odată cu numărul de intersecții de pe parcursul arterei). În ceea ce privește aplicabilitatea practică a acestei metode, s-au implementat soluții de sincronizare a unor intersecții în America de Nord, aducându-se îmbunătățiri în anii 1990 pentru virajele spre stânga, pentru timpii de golire a cozilor de așteptare curente, prin definirea pentru fiecare intersecție de-a lungul arterei a timpilor de acces la unda de verde în funcție de necesități, sub numele de MULTIBAND [51; 52; 123].

O altă metodă des utilizată este TRANSYT. Această metodă a fost dezvoltată în prima sa variantă la sfârșitul anilor '60 [117], apoi a fost mult îmbunătățită până la varianta de la ora actuală. Fiind cea mai cunoscută metodă de conducere statică până în prezent, este folosită ca referință pentru testarea metodelor de conducere în timp real prin compararea rezultatelor obținute în aceleași condiții de ambele metode. După cum se arată în [106], primele implementări ale acestei metode în practică a dus la o îmbunătățire cu 16% a timpilor medii de traversare a unei intersecții. Versiunea actuală a metodei TRANSYT, de fapt produsul software TRANSYT [136], dezvoltată de compania TRL, calculează pentru diferite modele de trafic un indicator de performanță monetar, apoi urmărește optimizarea costurilor prin minimizarea acestui indicator de performanță. Se ocupă cu realizarea de soluții de conducere statică pentru condiții variabile de trafic prin optimizarea timpilor de traversare a intersecțiilor sau a sensurilor giratorii; de asemenea detectează și ia decizii în caz de blocaje în trafic.

### 2.5.4. Metode de conducere dinamică la nivel de intersecție

Cele mai cunoscute metode de conducere dinamică a traficului rutier urban la nivel de intersecție sunt OPAC [47; 86], CRONOS [12; 13] și RHODES[47]. Aceste metode funcționează după același principiu și anume optimizează în timp real succesiunea fazelor și timpilor de semafor utilizând date de trafic în timp real și estimări pe baza informațiilor înregistrate.

Algoritmul OPAC (Optimized Policies for Adaptive Control) este un algoritm de conducere în timp real și are ca scop optimizarea timpilor pentru fiecare fază de semafor prin reducerea întârzierilor sau a opririlor. Deciziile asupra schimbării fazei de semafor se iau la intervale de timp de cinci secunde, fiecare fază de semafor fiind limitată inferior și superior de pragurile de timp limită. Algoritmul folosește tehnica programării dinamice pentru optimizarea timpilor de semafor pe o anumită perioadă de timp. Pentru începutul acestei perioade sunt cunoscute informațiile de trafic în timp real legate de viteza de sosire a autovehiculelor, iar pentru restul perioadei rămase,



vitezele de sosire se estimează pe baza înregistrărilor anterioare. Ultima versiune la care s-a ajuns în prezent este OPAC-RT, utilă mai ales pentru condițiile de trafic subsaturat și are următoarele caracteristici [86] și *avantaje*:

- perioada pentru care se aplică optimizarea este împărțită în etape. Durata unei etape este cuprinsă între 50 și 100/120 de secunde, comparabilă cu durata unui ciclu de semafor caracteristică metodelor de conducere statice. Apoi fiecare etapă este împărțită în intervale de câte 5 secunde,
- la fiecare etapă sunt permise cel puțin una și nu mai mult de trei modificări de semnal,
- se calculează un indice de performanță pentru fiecare abordare, pentru toate secvențele de comutare de pe parcursul unei etape. Indicele se calculează ca fiind suma dintre lungimea inițială a cozii de așteptare și diferența de sosire și de plecare pentru fiecare interval din etapă. La final se calculează funcția obiectiv, ca fiind suma tuturor indicilor de performanță pentru toate abordările,
- secvența optimă de comutare este calculată folosind o metodă de căutare secvențială bazată pe constrângeri. Funcția obiectiv este evaluată secvențial pentru toate secvențele de comutare viabile. La fiecare iterație, valoarea funcției obiectiv curente este comparată cu cea memorată anterior. Cea mai mică va fi memorată. Punctele de comutare corespunzătoare secvenței și lungimile cozilor vor fi de asemenea memorate. La sfârșitul căutării, valorile memorate reprezintă soluția optimă.

*Dezavantajele* majore ale algoritmului OPAC sunt următoarele:

- necesitatea colaborării cu un sistem de detecție foarte performant în vederea supravegherii întregii porțiuni de sosire în intersecție ,
- gradul scăzut de aplicabilitate în condiții de trafic suprasaturat.

Algoritmul CRONOS se aseamănă algoritmului OPAC, aducând în plus optimizarea fluxului de trafic într-o anumită zonă formată dintr-un număr mic de intersecții (cinci sau zece) și este alcătuit din trei module: predicție, simulare și optimizare. Principalele sale caracteristici și *avantaje* sunt următoarele:

- poate fi integrat cu un sistem de detecție și procesare video,
- algoritmul de optimizare pornește de la algoritmul Box [81], găsește rapid minimul local și are complexitate polinomială chiar prin adăugarea de noi intersecții - este scalabil,
- fazele și ciclurile de semafor sunt calculate în timp real, fără valori presetate,
- optimizează fluxul de trafic la nivel de zonă.

*Dezavantajele* acestui algoritm sunt aceleași cu cele enumerate mai sus pentru algoritmul OPAC, din simplul motiv că, cele două metode sunt asemănătoare și au aceleași principii de funcționare.

Algoritmul RHODES (Real-time Hierarchical Optimized Distributed Effective System) este un algoritm de conducere distribuită a traficului rutier urban. Acest algoritm, ca și algoritmi prezentați anterior, utilizează date de trafic în timp real și metode de predicție, principala sa deosebire fiind structura de conducere arborescentă formată din următoarele componente:

- componenta decizională RHODES,

- simulatorul de pluton APRES-NET,
- optimizare de secțiune REALBAND,
- predictor pentru autovehicule PREDICT,
- optimizare locală COP.

Componenta APRES-NET estimează timpul necesar plutonului să atingă următoarea intersecție. Estimarea se face pe baza rezultatelor preluate de la componenta REALBAND și a condițiilor de trafic. Totodată APRES-NET aproximează întârzierile și numărul total de opriri. REALBAND este un algoritm de coordonare ce are ca scop planificarea timpului astfel încât plutonul să străbată în întregime intersecția. Atunci când un senzor detectează un autovehicul, componenta PREDICT estimează timpul în care vehiculul va fi detectat de următorul senzor. Acest rezultat este folosit de componenta COP. Folosind programarea dinamică, COP optimizează succesiunea fazelor și timpilor de semafor în intersecția respectivă. Un dezavantaj al acestei metode este faptul că algoritmi folosii au o complexitate exponențială, iar metoda de conducere nu este aplicabilă în timp real pentru mai mult decât o intersecție la un moment dat. În acest sens, optimizarea generală este efectuată de componentele APRES-NET și REALBAND.

*Avantajele* algoritmului RHODES sunt următoarele:

- conducerea distribuită a traficului rutier,
- utilizarea datelor de trafic în timp real,
- conducerea arborescentă,
- arhitectură prevăzută cu componentă de predicție,
- optimizarea locală a fazelor și a timpilor de semafor la nivel de intersecție,

iar *dezavantajele*:

- algoritmi utilizați au complexitate exponențială,
- conducerea în timp real nu este aplicabilă la mai mult de o intersecție.

### **2.5.5. Metode de conducere dinamică prin coordonarea mai multor intersecții**

Cea mai cunoscută metodă de conducere dinamică a unei zone urbane prin coordonarea intersecțiilor din zona respectivă este metoda SCOOT (Split Cycle and Offset Optimization Technique). Această metodă a fost dezvoltată în anii '80 [65], de-a lungul timpului a suferit diferite modificări și îmbunătățiri, iar la ora actuală a devenit un produs software al companiei Transport Research Laboratory [134] utilizat în mai mult de 150 de orașe ale Marii Britanii. Principiul de funcționare este asemănător metodei TRANSYT dezvoltată de aceeași companie, în schimb deciziile globale se iau de către un calculator central. Pentru fiecare intersecție se verifică în parte în mod repetat decalajele, efectele modificării duratei ciclului de semafor și modul de împărțire al acestuia în faze. În urma evaluării, dacă aceste modificări se dovedesc a fi benefice, sunt transmise componentei de control local din fiecare intersecție. Asemenea metodei TRANSYT, se calculează un indicator de performanță (2.35) la nivel de zonă, în funcție de întârzieri și opririle la semafor, urmând ca acest indicator să fie micșorat, eventual utilizat ca funcție obiectiv pentru a fi minimizat.

$$PI = \sum_{i=1}^N (d_i + K c_i) \quad (2.35)$$

în care:

- $N$  - numărul de legături,
- $d_i$  - costul total pe medie de pasageri ai autovehiculelor, măsurat în ore de întârziere; în literatură se utilizează termenul  $pcu$  (passangers per car unit),
- $c_i$  - numărul mediu de opriri  $pcu$  pe legătura  $i$ .
- $K$  - coeficient de ponderare introdus pentru a asigura:
  - omogenitatea termenilor din paranteza aferentă sumei din (2.35),
  - flexibilitate în problemele de optimizare care utilizează  $PI$  ca funcție obiectiv.

Dezvoltări recente ale programului SCOOT au dus la prioritizarea eficientă a mijloacelor de transport în comun, reducând întârzierile autobuzelor și micșorând totodată efectele întârzierilor acestora asupra traficului normal. După introducerea sistemelor bazate pe SCOOT, studiile de tipul "înainte și după", au evidențiat o scădere semnificativă atât a timpilor de călătorie cât și a întârzierilor. Detecția autovehiculelor la fiecare intrare în intersecție permite crearea unui profil pentru fiecare stradă, apoi pe baza acestui profil se va face o predicție asupra comportamentului coșilor de așteptare. Această predicție va fi utilizată ulterior în procesul de optimizare. În cazul detecției variațiilor de trafic de scurtă durată, sistemul are capacitatea de a le ignora și a nu le introduce în metoda de conducere. Principalele avantaje ale utilizării metodei SCOOT sunt următoarele:

- capacitatea de a trata evenimentele speciale,
- gestionarea decalajelor între semafoarele intersecțiilor sincronizate,
- detecția blocajelor și a accidentelor,
- reducerea întârzierilor și opririlor în trafic ținând seama de transportul în comun,
- optimizarea la nivel de zonă urbană a indicatorului de performanță utilizat.

## 2.6. Concluzii

În acest capitol s-a realizat o sinteză asupra unei părți din domeniului ITS (Sisteme Inteligente de Transport) rutier, punându-se accent pe soluțiile de conducere a traficului rutier utilizate în zilele noastre. Pe baza studiului bibliografic s-au indicat principalele probleme existente în traficul rutier urban și importanța rezolvării acestora.

În prima parte a acestui capitol s-a dat o definiție originală a Sistemelor Inteligente de Transport, subliniind câteva dintre aplicațiile în care acestea și-au dovedit utilitatea. De asemenea, au fost prezentate câteva dintre cele mai însemnate proiecte europene în ceea ce privește acest domeniu.

În partea a doua au fost prezentate atât concepte generale cât și particulare legate de modelarea traficului rutier. S-a realizat o clasificare a metodelor de modelare, punctând utilitatea fiecăreia dintre ele relativ la tipurile de trafic urmărite.

Pornind de la descrierea diagramei fundamentale a fluxului de trafic a lui Greenshield s-a realizat o sinteză a evoluției modelării în traficului rutier. În finalul acestei părți au fost descrise principalele caracteristici considerate de către autor necesare a fi îndeplinite în procesul de modelare a traficului rutier urban.

În ultima parte a acestui capitol au fost analizate critic metodele curente de conducere și simulare în traficul rutier urban. Pe baza studiului bibliografic s-a realizat o scurtă sinteză asupra principalelor metode de conducere în traficul rutier urban și a produselor software aferente, subliniind gradul de aplicabilitate în practică a acestor soluții. De asemenea, după o analiză atentă a acestor metode de conducere s-a realizat o prezentare a principalelor avantaje și dezavantaje pentru fiecare metodă în parte. În ceea ce privește produsele software de modelare și simulare a traficului rutier urban s-a realizat un studiu bibliografic prezentând de asemenea avantaje și dezavantaje.

În acest capitol au fost prezentate noțiuni teoretice sprijinite pe 33 de relații necesare în realizarea modelării macroscopice a traficului rutier urban, oferind suportul teoretic în proiectarea și dezvoltarea metodelor de conducere a traficului rutier urban.

În opinia autorului principalele contribuții aferente capitolului 2 sunt următoarele:

- definirea și realizarea unei sinteze asupra Sistemelor Inteligente de Transport rutier,
- realizarea unui studiu critic asupra conceptelor de modelare a traficului rutier urban,
- clasificarea metodelor de modelare punctând utilitatea fiecăreia dintre ele relativ la tipurile de trafic urmărite,
- elaborarea unei sinteze asupra evoluției modelării traficului rutier,
- descrierea principalelor caracteristici considerate de autor necesare a fi îndeplinite în modelarea traficului rutier urban,
- realizarea unui studiu critic asupra metodelor de modelare studiate,
- analiza critică asupra metodelor de conducere utilizate până în prezent în conducerea traficului rutier urban, prezentând principalele avantaje și dezavantaje,
- analiza metodelor și produselor software de simulare a traficului rutier urban,
- prezentarea unificată a noțiunilor teoretice sprijinite pe 33 de relații utile în realizarea conducerii traficului rutier urban.

## **3. ARHITECTURĂ DE CONDUCERE IERARHIZATĂ MULTIAGENT UTILIZÂND REȚELE DE SENZORI WIRELESS**

### **3.1. Introducere**

Pornind de la capitolele anterioare, introductive și teoretice, în acest capitol va fi prezentată arhitectura propusă a sistemului de conducere ierarhizată utilizată în dezvoltarea soluțiilor de conducere locală și globală a traficului rutier urban. Principalele concepte și tehnologii subliniate în acest capitol sunt următoarele:

- arhitectura sistemului structurată ierarhizat,
- arhitectura multiagent,
- utilizarea rețelelor de senzori wireless pentru detecția în timp real a datelor de trafic,
- datele tehnice și structura rețelei de senzori propusă ca detector de trafic rutier urban.

Arhitectura sistemului de conducere a traficului rutier urban bazată pe rețele de senzori wireless este structurată pe trei niveluri ierarhice: nivelul senzorial, nivelul de procesare/agregare și nivelul de conducere. Pe arhitectura propusă se vor implementa metode de decongestionare a traficului rutier atât pentru autovehicule, cât și pentru pietoni.

În zilele noastre, pentru decongestionarea traficului rutier se utilizează tehnologii de detecție precum: inele inductive, tuburi pneumatice, camere video. Aceste tehnologii folosite pentru detecția autovehiculelor în trafic sunt greu de întreținut sau sunt inexacte [96], având o infrastructură complicată. Pentru minimizarea costurilor de decongestionare, a fost luată în calcul posibilitatea utilizării rețelelor de senzori wireless, aceasta oferind costuri scăzute atât la implementare, cât și la mentenanță. Principalul avantaj al utilizării rețelelor de senzori wireless în detecția și conducerea traficului rutier este dat de proprietatea acestora de a fi ușor desfășurate și ușor de înlocuit. Rețelele de senzori wireless nu ridică probleme în timpul instalării cum ar fi blocări sau redirectionări de trafic datorită lucrărilor la sistemul de detecție. Aceste soluții bazate pe rețele de senzori wireless sunt încă în stadiul de cercetare, iar soluțiile de conducere a traficului rutier utilizând această tehnologie de detecție implică o atență dezvoltare atât a arhitecturii rețelei, cât și a protocoalelor de comunicație și a tehnicilor de procesare a datelor.

Într-o primă parte se va descrie arhitectura propusă bazată de rețele de senzori wireless, structurată pe trei niveluri: nivelul senzorial (descrierea tipurilor de senzori necesari și proprietățile acestora), nivelul de agregare și procesare (schimbul de informație cu primul și ultimul nivel, interpretarea și procesarea datelor de trafic), nivelul de conducere a traficului (scurtă prezentare conceptuală lucrând pe modele

dinamice la nivel de intersecție și pe informațiile în timp real primite de la nivelurile anterioare). În partea a doua vor fi prezentate detalii tehnice amănunțite privind rețeaua de senzori wireless folosită ca detector de trafic rutier urban. În final se concluzionează asupra rezultatelor obținute subliniindu-se contribuțiile personale.

### 3.2. Arhitectură de conducere ierarhizată

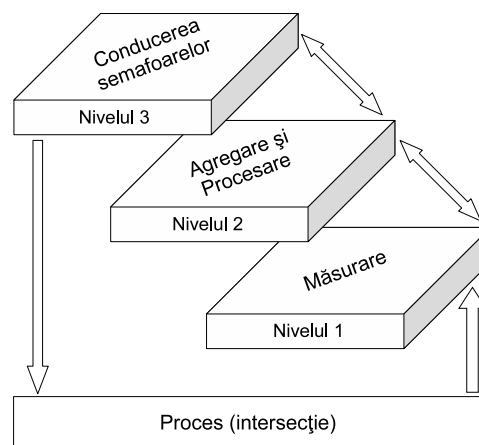


Figura 3.1: Nivelurile arhitecturii rețelei de senzori pentru conducerea traficului rutier

Arhitectura propusă de conducere a traficului rutier urban utilizând o rețea de senzori wireless ca detector de trafic are caracter general și o largă aplicabilitate în vederea implementării soluțiilor de decongestionare a traficului. Se va lua în considerare în primul rând decongestionarea traficului pentru autovehicule, totuși fără a uita de pietoni și alte cazuri speciale. În continuare vor fi prezentate aspecte privind arhitectura unei rețele de senzori pentru conducerea traficului rutier într-o intersecție semaforizată, structurată pe trei niveluri ca în Figura 3.1.

Primul nivel este reprezentat de nodurile rețelei de senzori, având ca scop detectarea mișcării autovehiculelor și pietonilor, și apoi trimiterea informației mai departe către următorul nivel. Al doilea nivel recepționează și agreghează informația primită de la nivelul anterior, apoi procesează datele pentru nivelul următor. Al treilea nivel este reprezentat de unitatea de conducere a semafoarelor, rulează algoritmi de decongestionare a traficului și comandă schimbarea culorilor semafoarelor în funcție de informațiile de trafic recepționate în timp real de la al doilea nivel. Arhitectura propusă nu va conține noduri ale rețelei de senzori desfășurate în autovehicule, cum se arată în alte lucrări [82; 102], având ca motiv principal faptul că este imposibil a afirma cu certitudine că toate autovehiculele din oraș au noduri instalate și că ele funcționează. Presupunând că toate autovehiculele dintr-un oraș sunt echipate cu noduri wireless și că ele funcționează, vor exista cu siguranță multe alte mașini din alte localități sau țări neechipate, ducând astfel la imposibilitatea de utilizare a acestei metode atâta timp cât nu există un standard internațional. Un alt inconvenient al instalării nodurilor pe fiecare autovehicul, chiar prin introducerea ca standard, este imposibilitatea de a controla dacă acele noduri funcționează sau nu. Al treilea nivel

oferă soluții de decongestionare a traficului rutier, schimbând culorile semafoarelor instalate în intersecții. Conducerea traficului rutier va depinde atât de informațiile în timp real obținute de la al doilea nivel, cât și de statistici din trafic generate pe anumite intervale orare.

### 3.2.1. Nivelul senzorial

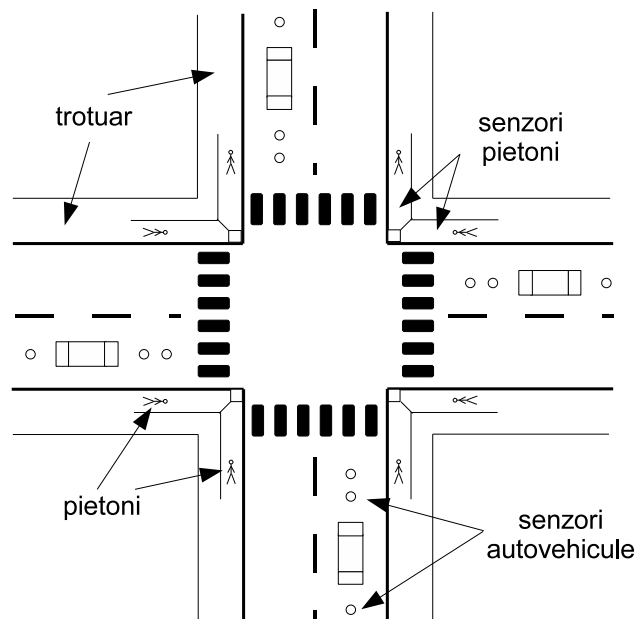


Figura 3.2: Arhitectura unei intersecții simple bazată pe rețele de senzori wireless

Primul nivel senzorial este reprezentat de o rețea de senzori wireless, ale cărei noduri sunt echipate cu senzori corespunzători pentru detecția și măsurarea traficului rutier. Este foarte important pentru sistemul de conducere, ca nivelul senzorial să fie wireless pentru a putea atinge costuri scăzute de mentenanță, prin simpla înlocuire a nodurilor sau doar prin schimbarea bateriilor. Datorită proprietății de a fi fără fir, nodurile pot fi instalate simplu, în timp redus, fără tăieturi laborioase în carosabil, evitând astfel blocajele de trafic în orașele aglomerate. În Figura 3.2 este prezentată arhitectura bazată pe rețele de senzori pentru o intersecție simplă, echipată cu senzori wireless pentru detecția autovehiculelor și pietonilor.

#### 3.2.1.1. Senzori pentru autovehicule

Detecția autovehiculelor cu ajutorul rețelelor de senzori este o tehnologie relativ nouă cu rezultate publicate deja de către Berkeley University Lab [11]. Cei mai fini senzori pentru detecția autovehiculelor sunt magnetometrele, detectând perturbațiile câmpului magnetic al pământului în prezența obiectelor feroase.

Principalul avantaj în utilizarea acestor senzori în locul senzorilor acustici este independența de mediu (semnalele acustice ale autovehiculelor fiind influențate de diferite zgomote chiar de la alte autovehicule din trafic și de asemenea sunt influențabile de condițiile atmosferice). Folosind două magnetometre instalate în carosabil la o distanță mică unul de altul, pe aceeași bandă de mers, rețeaua de senzori este capabilă de altfel să măsoare viteza aproximată a autovehiculelor care rulează deasupra lor. Rețeaua de senzori wireless trebuie să poată detecta autovehiculele speciale cum ar fi salvarea, poliția sau pompierii, aceste autovehicule ar trebui să-și poată transmite radio prezența către rețeaua de senzori wireless instalată în intersecție, sau să fie echipate cu noduri speciale detectabile de către nodurile instalate în carosabil. Deținând aceste informații, nivelul de conducere poate lua decizii de decongestionare a traficului în zona respectivă sau pe anumite artere, oferind "verde" pentru mașinile speciale.

În vederea unei instalări și mentenanțe ușoare, senzorii pentru autovehicule trebuie să fie fără fir, indiferent de tipul acestora: magnetometre, senzori acustici sau senzori laser. Nodurile rețelei necesită a fi plasate în carosabil, de-a lungul fiecărei benzi de mers care se apropie de intersecție. În funcție de strategia de conducere a traficului rutier, senzorii pot fi instalați în număr mic (doar câțiva pentru o bandă) sau în număr mare pe zeci/sute de metri distanță de intersecție (în acest caz informația de la nodurile îndepărtate va fi rutată prin nodurile rețelei de senzori wireless spre punctele de acces). În acest ultim caz, traficul autovehiculelor este atent măsurat, nivelul de conducere primind o mare cantitate de informație în timp real. Sistemul trebuie să fie capabil să raporteze imediat blocajele din trafic la nivel de bandă, produse din diferite motive cum ar fi autovehicule defectate, accidente sau orice alt motiv. Rețeaua de senzori wireless va detecta această problemă prin magnetometre, observând vehiculele staționare pentru o anumită perioadă de timp mai mare decât pragul corespunzător benzii respective.

### 3.2.1.2. Senzori pentru pietoni

O altă problemă importantă în marile orașe este detecția pietonilor. În general, este nevoie de decongestionarea traficului rutier pentru autovehicule, totuși pietonii trebuie de asemenea luați în considerare în soluția de conducere. Trecherile de pietoni de tip "Zebra" nu reprezintă o soluție viabilă datorită faptului că dacă pietonii ar traversa la intervale de câteva secunde ar putea cauza blocaje de trafic privind autovehiculele. Trecherile de pietoni de tip "Pelican" (pietonii apasă un buton, indicând astfel sistemului de conducere a semaforizării că se dorește trecerea străzii) este o soluție bună, dar poate fi înlocuită cu un sistem și mai bun și anume detecția automată a pietonilor sau poate o combinație între "apăsarea butonului" și detecția automată.

Datorită faptului că prezența pietonilor nu poate fi detectată cu ajutorul magnetometrelor (pietonii nu pot fi priviți ca obiecte feroase), detectoarele folosite în prezent sunt încorporate în pavaj [77]. Principalul dezavantaj al acestor soluții, lăsând la o parte problemele de mentenanță, este că dacă aria de detecție este prea mare sistemul nu va ști dacă pietonii aflați în acea zonă la un colț de stradă vor traversa strada A sau strada B (vezi Figura 3.3), iar dacă aria de detecție este prea mică, atunci sistemul va putea detecta doar câțiva pietoni. Privind arhitectura rețelei de detecție pentru pietoni propunem ca zona de detecție din Figura 3.3 să fie delimitată de restul trotuarului prin garduri mici. Cu ajutorul acestei delimitări, sistemul de conducere va putea beneficia de o mai mare zonă de detecție, neîncurcând pietonii care doresc să traverseze cu ceilalți pietoni care doar trec pe lângă zona de detecție. De exemplu, zona de detecție A1 va număra pietonii așteptând să treacă strada, și împreună cu zona de detecție de peste drum va însuma în timp real numărul de pietoni care așteaptă să treacă strada A (Figura 3.3). Zonele delimitate de garduri pot fi interpretate ca și mici benzi pentru pietoni în vederea așteptării trecerii străzii. În soluția propusă, bazată



pe garduri mici, traficul pietonilor nu va fi constrâns, ci doar structurat pentru o mai bună evidență a pietonilor în așteptarea traversării. Pentru a minimiza costurile și de asemenea pentru a atinge o cât mai ușoară mentenanță, senzori cu microunde sau raze laser ar putea fi utilizate în scopul detectării pietonilor în așteptare.

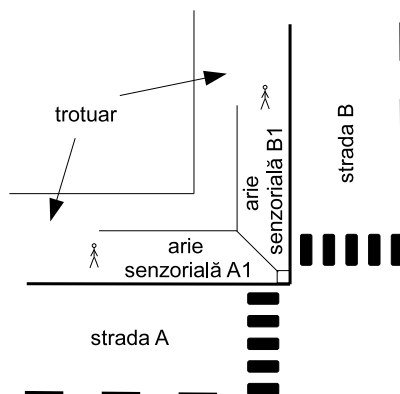


Figura 3.3: Schemă de principiu a zonei de detecție a pietonilor

Nodurile rețelei de senzori prevăzute cu senzori de detecție vor transmite informațiile de trafic spre următorul nivel reprezentat de către punctul de acces în trei moduri diferite: 1) la anumite intervale de timp, 2) când un autovehicul a fost detectat și 3) la cererea punctului de acces. Transmiterea/recepția va fi realizată radio atât între noduri cât și între punctele de acces. PEDAMACS (Power Efficient and Delay Aware Medium Access Protocol for Sensor networks) [21] este un bun protocol de comunicație și poate fi folosit pentru transmiterea informațiilor de trafic către punctul de acces. Punctul de acces va crea într-un prim pas o topologie între nodurile rețelei din zona acoperită, iar apoi va elabora un orar de timp pentru transmisii de date și în al doilea pas, va transmite orarul către fiecare nod inclus în topologie.

Compania Crossbow [22] este astăzi lider de piață privind producția de componente pentru rețele de senzori wireless. MICA2, MICAz sau MICA2DOT ar putea fi o posibilitate în alegerea nodurilor pentru implementarea unei rețele de senzori wireless privind sistemul de detecție și conducere a traficului rutier urban, datorită dimensiunilor scăzute și datorită fiabilității deja dovedite.

### 3.2.2. Nivelul de procesare și agregare

Al doilea nivel este reprezentat de către punctul de acces (AP). Acesta este un nod special al rețelei de senzori, având capacitatea de a procesa și de a agrega datele primite de la nivelul anterior. Datorită necesității unei puteri mari de calcul (relativ la dimensiunile și constrângerile privind arhitectura nodurilor wireless) pentru procesarea datelor și pentru o bună viteză de transfer a datelor către nivelul următor, acest nod trebuie să fie legat la o sursă de tensiune și să dețină putere de calcul crescută. Punctul de acces trebuie instalat în fiecare intersecție monitorizată, pentru ca nodurile rețelei de senzori să poată comunica cu acesta (Figura 3.4). Agregarea informațiilor în trafic se va face în funcție de culoarea semaforului, numărul benzii, calculând medii aritmetice pentru diferite scenarii.

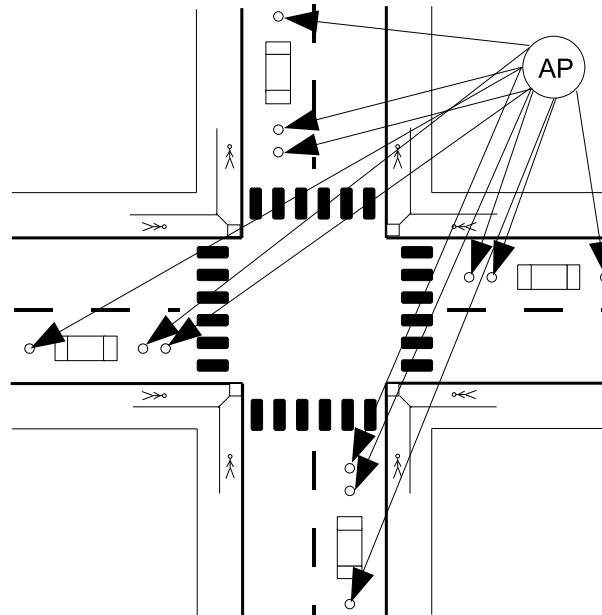


Figura 3.4: Schemă de principiu a punctului de acces

Agregarea datelor este esențială în vederea oferirii de soluții rapide de conducere a traficului rutier urban. În locul transmiterii către nivelul de conducere a fiecărei informații de trafic recepționate de la senzorii instalați, punctul de acces va selecta, agrega și transmite doar informația utilă. Informația redundantă nu va fi transmisă, eventual va fi stocată pentru elaborarea statisticilor. Informația procesată și agregată va fi transmisă către nivelul superior după un orar de timp bine stabilit. Al doilea nivel va transmite doar informațiile cerute, evitând astfel posibilele întârzieri în conducerea traficului datorate transmiterii unui număr mare de pachete către nivelul următor. În Tabelul 3.1 [3] este prezentat un studiu de agregare a parametrilor de trafic mășurați pentru o anumită bandă, la un interval de 5 secunde. În primul rând, informația este agregată în funcție de culoarea semaforului (verde/roșu),  $\Delta t_p$  reprezentând durata culorii verzi a semaforului, iar  $\Delta t_w$  reprezentând durata culorii roșii a semaforului. Pentru fiecare bandă, eșantioanele de timp la care se agreghează informația sunt valori predefinite în secunde reprezentând intervalul de timp scurs de la ultima măsurare. Caracteristicile de trafic măsurate sunt: numărul de autovehicule, viteza medie de deplasare a autovehiculelor și lungimea cozii de așteptare la semafor. Din primele trei linii ale tabelului se poate observa o creștere a vitezei medii de deplasare a autovehiculelor traversând intersecția pe culoarea verde a semaforului și de asemenea o micșorare a cozii de așteptare. Ultimele trei linii ale tabelului prezintă informații de trafic agregate pentru culoarea roșie a semaforului, numărul de autovehicule care se adaugă la coada prezentă și lungimea acestei cozi în metri la intervale de 5 secunde. Lungimea cozii de așteptare, măsurată în metri este foarte importantă în metodele de decongestionare a traficului rutier, informând sistemul de conducere în legătură cu depășirea unor anumite praguri de aglomerare stabilite apriori pentru fiecare stradă sau bandă în parte.

Tabelul 3.1: Parametri de trafic agregați măsurați pentru o singură bandă

Eșantion de timp [hh:mm:ss.s]	culoare verde			culoare roșie	
	Numărul de mașini în $\Delta tp$	Viteza medie [m/s]	Lungime coadă [m]	Numărul de mașini în $\Delta tw$	Lungime coadă [m]
12:23:52.55	19	7	200		
12:23:57.76	26	10	127		
12:23:59.80	12	13	30		
12:24:05.05				15	60
12:24:10.07				13	121
12:24:15.01				7	160

Foarte importante în vederea măsurării fluidității traficului și producerii de evenimente pentru nivelul de conducere sunt următoarele: numărul de autovehicule care au trecut prin intersecție pe culoarea verde a semaforului și numărul de autovehicule care așteaptă pe culoarea roșie a semaforului. Lungimea cozii de așteptare la un semafor reprezintă o altă metodă importantă de măsurare a stării traficului, oferind informații în timp real despre benzile congestionate, pentru ca nivelul de conducere să poată lua decizii în consecință. Viteza medie se poate măsura ușor cu ajutorul a două noduri vecine instalate în carosabil, fiind un parametru bun atât pentru statisticile legate de fluxul traficului, cât și pentru conducerea traficului.

Numărul pietonilor traversând sau așteptând trebuie de asemenea monitorizat pe intervale de timp pentru o conducere mai precisă a traficului rutier. În vederea îmbunătățirii metodei de cuantificare a pietonilor, numărul pietonilor în așteptarea traversării vor fi însumați cu numărul pietonilor de peste drum (care doresc să traverseze prin același loc).

### 3.2.3. Nivelul de conducere multiagent a semafoarelor

Acest nivel are menirea de a oferi soluții de decongestionare a traficului rutier urban, prin schimbarea culorilor semafoarelor instalate în intersecțiile monitorizate. Conducerea traficului va depinde în cea mai mare parte de informațiile în timp real, dar va ține seama și de statisticile pe intervale orare primite de la nivelul anterior. Se propune implementarea nivelului de conducere ca un sistem decizional în timp real bazat pe cunoștințe. În Figura 3.5 este prezentată arhitectura nivelului de conducere a semafoarelor, fiecare nivel de conducere fiind compus din unul sau mai mulți agenți de conducere.

Nivelul de conducere este ierarhizat pe trei niveluri: nivelul de conducere locală la nivel de intersecție (LTA), nivelul de conducere zonală format prin coordonarea mai multor intersecții (ZTA) și nivelul de conducere globală la nivel de oraș (CTA). Fiecare nivel își are rolul său foarte bine definit în scopul obținerii unei strategii de conducere distribuite. Arhitectura de conducere multiagent a fost proiectată ierarhizat pentru a oferi posibilitatea unei conduceri distribuite și descentralizate atât prin conducere la nivel local cât și conducere prin coordonare pe nivelurile superioare. Ambele tipuri de conducere au o importanță deosebită, dar doar utilizate împreună pot aduce valoarea adăugată. Detalii privind utilitatea conducerii distribuite în conducerea traficului rutier urban cu referiri la literatura de specialitate vor fi prezentate în capitolele următoare destinate conducerii.

Din Figura 3.5 se poate observa că în arhitectura propusă există un singur agent la nivel de oraș (CTA) care comunică și coordonează fiecare agent zonal  $ZTA_i, i = \overline{1, z}$ . La rândul său, fiecare agent zonal comunică cu toți agenții locali  $LTA_{i,j}, j = \overline{1, l_i}$  din jurisdicția sa, unde  $z$  - numărul de agenți de trafic zonal și  $l_i$  - numărul de agenți locali

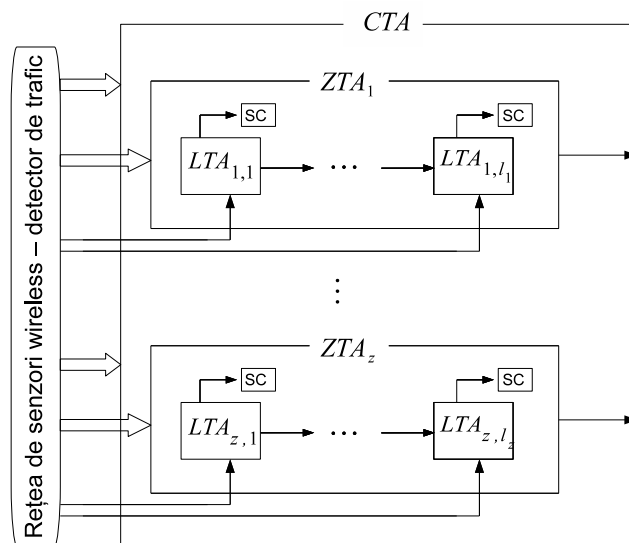


Figura 3.5: Arhitectura nivelului de conducere

aflați sub coordonarea agentului zonal numărul  $i$ . De asemenea, fiecare agent local va emite comandă de schimbare a culorilor semafoarelor (SC) din intersecția respectivă.

Au fost definite patru tipuri de comunicare între agenți (Figura 3.6): LTA cu LTA, ZTA cu LTA, ZTA cu ZTA și CTA cu ZTA. În ceea ce privește comunicarea între agenții locali la nivel de intersecție (LTA cu LTA), agenții comunică între ei după următorul principiu: în primul rând o zonă de trafic rutier este formată dintr-o mulțime de intersecții aranjate într-o anumită ordine, ca și o coadă, apoi fiecare agent local  $i$  din zona respectivă trimite mesaje către agentul local vecin  $i + 1$ . În acest fel agentul  $i + 1$  primește informații despre autovehiculele care se apropie dinspre intersecția anterioară și poate lua decizii în funcție de aceste informații. Un alt tip de comunicare dintre agentul zonal și agenții locali coordonați de către acesta (comunicare ZTA cu LTA) este strâns legată de comunicarea LTA cu LTA. Acest tip de comunicare este folosit pentru sincronizarea semafoarelor și detectarea evenimentelor de blocare a traficului pe anumite artere. Împreună cu comunicarea LTA cu LTA oferă o bază importantă pentru deciziile la nivel de agenți. Comunicarea ZTA cu ZTA este folosită doar pentru rapoarte și statistici, realizând o bază de cunoștințe importantă pentru deciziile automate la nivel de oraș. Comunicarea CTA cu ZTA este comunicarea între agenții de pe nivelurile cele mai înalte din arhitectura propusă, fiind utilă atât pentru semnalarea anumitor evenimente apărute la nivel zonal cât și pentru coordonarea de către CTA a agenților de pe nivelurile inferioare în anumite situații speciale cum ar fi: dezastre, sărbători ale orașului, evenimente deosebite.

În ceea ce privește arhitectura de conducere distribuită prezentată în Figura 3.5, se poate observa o strânsă legătură între toate cele trei niveluri de conducere, foarte important pentru implementarea algoritmilor de optimizare în scopul decongestionării traficului rutier urban. Privind sistemul de conducere distribuit ca un graf de tip arbore cu trei niveluri (a se vedea Figura 3.6), conducerea la nivel de oraș fiind rădăcina (primul nivel), conducerea la nivel de zonă (al doilea nivel) și conducerea locală la nivel de intersecție (al treilea nivel - frunzele arborelui), putem

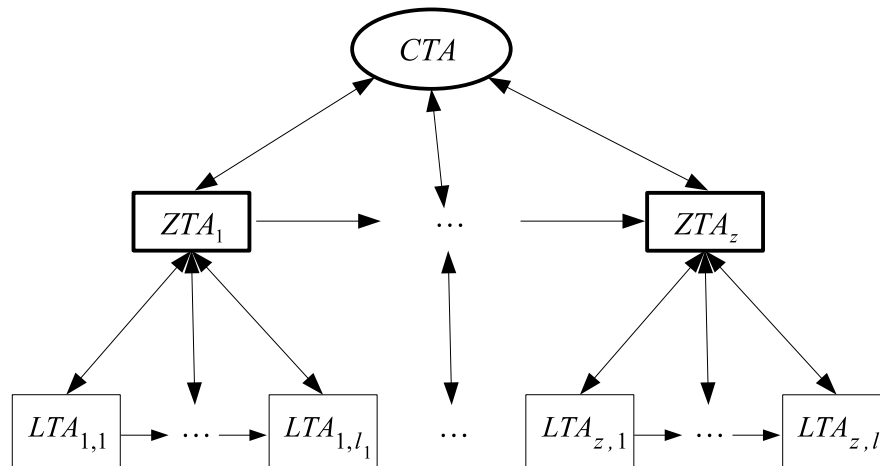


Figura 3.6: Schemă de principiu privind interacțiunea dintre nivelurile de conducere

înțelege modalitatea de comunicare dintre cele trei niveluri. Fiecare nivel de conducere primește comandă de coordonare de la nivelul imediat următor, în lipsa acesteia și până la momentul în care va exista o asemenea comandă se vor lua decizii specifice nivelului respectiv în funcție de informațiile în timp real primite de la rețeaua de senzori wireless.

În cele ce urmează vor fi descrise cele trei niveluri de conducere. Va fi pus accentul în special pe principiile de bază, pe comunicarea cu celelalte niveluri și pe utilitate.

### 3.2.3.1. Nivelul de conducere local (LTA)

Nivelul de conducere local oferă soluții automate de fluidizare a traficului rutier urban la nivel de intersecție semaforizată fiind foarte important, pentru că din totalitatea timpului de funcționare, majoritatea deciziilor de conducere se iau la acest nivel fără a primi comandă specială de la nivelurile superioare. În majoritatea situațiilor, soluțiile de decongestionare se iau la nivel de intersecție cu excepția orelor de vârf când strategiile de sincronizare ar putea fi mai eficiente sau a cazurilor excepționale când anumite tronșoane sunt blocate sau necesită fluidizare urgentă. În aceste cazuri intervin în conducere deciziile automatizate de coordonare de pe nivelurile superioare. Principalul avantaj al utilizării unei conduceri locale la nivel de intersecție este că se obține o conducere distribuită la nivel de zonă/oraș, iar scalabilitatea acestui sistem este foarte mare. Adăugarea de noi agenți în alte intersecții nu influențează astfel stabilitatea sistemului de conducere distribuit.

Oferind soluții de fluidizare la nivel de intersecție și având ca intrări doar infrastructura și lungimile cozilor de așteptare din respectiva intersecție, acest nivel de conducere poate fi văzut ca și un înlocuitor automatizat al agentului de circulație din intersecție. Putem face astfel o paralelă între nivelul de conducere local implementat ca și un sistem expert în timp real bazat pe cunoștințe și agentul de circulație din

intersecție. Datele de trafic obținute în timp real de la rețeaua de senzori wireless reprezintă pentru LTA ceea ce reprezintă ochii pentru agentul de circulație, iar soluțiile și algoritmi de conducere automatizată ale sistemului în timp real bazat pe cunoștințe vor lua decizii pentru LTA la fel cum agentul de circulație va lua decizii cu ajutorul creierului uman (Figura 3.7).

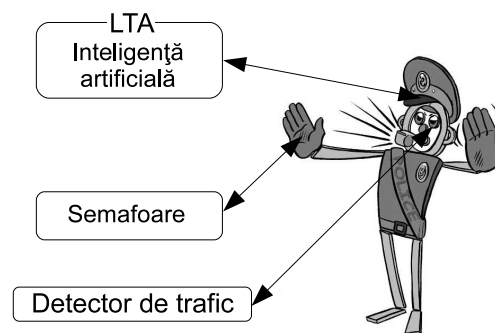


Figura 3.7: Paralelă LTA - agent de circulație

Având ca scop fluidizarea traficului rutier într-o anumită intersecție prin comanda semafoarelor existente, la acest nivel se vor implementa atât algoritmi de conducere bazați pe cunoștințe, cât și algoritmi de optimizare cum ar fi minimizarea lungimilor cozilor, minimizarea timpilor morți (timp mort - moment în care semaforul indică culoarea verde și nici o mașină nu se află în coada de așteptare) și maximizarea vitezei medii.

Conducerea locală a semaforizării într-o anumită intersecție va funcționa fără oprire, cu excepția comenzilor specifice primite de la nivelul imediat superior. În acest caz strategiile de conducere locală vor ține seama în primul rând de strategiile impuse de către nivelul de conducere zonală.

### 3.2.3.2. Nivelul de conducere zonal (ZTA)

Nivelul de conducere zonal are ca scop conducerea prin coordonarea directă a semafoarelor dintr-o anumită zonă. Zona va fi definită apriori prin specificarea exactă a infrastructurii rutiere (lungimea străzilor între două intersecții învecinate, numărul străzilor care intră și care ies dintr-o intersecție, sensurile de mers pentru fiecare bandă a fiecărei străzi care intră în intersecție) urmând a avea două mari funcții de îndeplinit: sincronizarea semafoarelor din zona respectivă și blocarea accesului pe anumite străzi pe care sunt raportate blocaje de trafic.

Sincronizarea semafoarelor este o problemă cu un grad ridicat de complexitate, în ultima vreme investindu-se sume foarte mari în acest sens [46; 133; 138]. În această teză se va prezenta o modalitate de sincronizare în timp real a semafoarelor pentru evidențierea utilității comunicării între primele două niveluri (local și zonal) în scopul conducerii distribuite. Deși comanda de sincronizare se emite de la nivelul zonal, realizarea sincronizării propriu-zise se va realiza de către fiecare nod de conducere din intersecție în funcție de datele de trafic recepționate în timp real de la rețeaua de senzori wireless. Existența acestei arhitecturi de conducere distribuite și prezența rețelei de senzori wireless care oferă date de trafic în timp real va face posibilă o conducere complexă, adaptivă la caracteristica de tip stohastic a traficului rutier urban.

Un alt avantaj al agentului de coordonare zonal este acela de a avea posibilitatea de a lua decizii globale referitoare la zona în cauză pe baza statisticilor și a datelor de trafic monitorizate continuu de către nivelul anterior. Principalele utilizări ale acestui agent zonal sunt:

- sincronizarea semafoarelor, prin stabilirea unei unde de verde pentru o anumită arteră/tronson/zonă,
- blocarea accesului la cerere pe anumite străzi/tronsoane pentru lucrări de mentenanță a carosabilului sau a echipamentelor aferente,
- detecția blocajelor în trafic survenite în urma accidentelor sau a defecțiunilor autovehiculelor prin monitorizarea fluxului autovehiculelor și luarea deciziilor automate de blocare a accesului pe anumite străzi și fluidizare rapidă prin prioritizare sau/și sincronizarea semafoarelor,
- informarea nivelului superior asupra condițiilor de trafic prin transmiterea de date agregate de trafic.

### **3.2.3.3. Nivelul de coordonare metropolitan (CTA)**

Ultimul nivel, cel de coordonare a traficului la nivel de oraș are ca și caracteristică principală posibilitatea de comunicare și integrare cu alte sisteme inteligente componente ale arhitecturii orașelor inteligente din viitor [40; 78]. Aceste orașe ale viitorului sunt imaginate ca fiind medii cu înaltă calitate a vieții și grade ridicate de securitate, toate acestea oferite la costuri de implementare acceptabile. Pentru a dezvolta aceste viziuni, noi provocări urmează a fi înfruntate datorită faptului că marile orașe sunt foarte aglomerate, au infrastructură complicată și greu de întreținut. De asemenea, cheltuielile de regie (costuri în bani, timp, poluare) sunt într-o continuă creștere, tinzând să atingă praguri extreme. Utilizarea soluțiilor automatizate și inteligente de decizie și conducere, în vederea îmbunătățirii gradului de utilitate a infrastructurii (trafic rutier, iluminare, distribuția de gaz și apă) ar putea fi o posibilitate de rezolvare a provocărilor amintite mai sus.

Coordonarea traficului rutier la nivel de oraș este un hibrid între un centru de control al traficului acționat de către om și un sistem de coordonare automatizat (agentul metropolitan CTA) la nivel de oraș. Acest agent are trei funcționalități principale: 1) comunicarea cu alte componente inteligente ale orașului, 2) coordonarea agenților zonali în anumite situații și 3) interfațarea programării și configurării la distanță a agenților locali și zonali. În ceea ce privește coordonarea agenților zonali de pe nivelul imediat următor, agentul metropolitan trimite mesaje către aceștia în mod asemănător cu modul în care agentul zonal transmite mesajele de coordonare către agenții locali. Coordonarea metropolitană automată este prevăzută ca un sistem de tratare a evenimentelor speciale la nivel de oraș care implică aglomerări foarte mari în trafic. Evenimentele speciale pot fi definite sau detectate de către celelalte sisteme inteligente cu care agentul acționează, acestea putând fi dezastră de orice fel, zile festive ale orașului, concerte, activități sportive majore.

#### **A) Comunicarea cu alte componente inteligente ale orașului**

Conducerea la nivel de oraș se realizează pe baza informațiilor în timp real obținute atât de pe nivelurile inferioare de conducere ierarhizată a traficului rutier, cât și de la sistemele inteligente metropolitane cu care există interconectare. Calitatea decizională a agentului de coordonare globală este o balanță între complexitate și costuri de implementare. Comparativ cu deciziile de conducere locale care utilizează cantități reduse de date primite de la senzori, dar mult mai ieftine din punct de

vedere al costurilor de implementare, deciziile globale pot fi mai eficiente implicând o analiză detaliată asupra unor cantități mari de date. În literatura de specialitate recentă se sugerează că tehnologia modernă cum ar fi colecția de date cu ajutorul senzorilor, analiza și predicția automată, optimizarea în timp real, poate oferi noi posibilități în vederea deciziei automate eficiente în zone urbane menținând costurile de implementare scăzute [15; 19; 31; 44; 45; 54; 64; 72; 82; 84; 100; 148]. Proiecte de cercetare recente au fost focalizate pe utilizarea ultimelor tehnologii computaționale și de comunicare, incluzând rețelele de senzori wireless, pentru diferite aplicații în medii urbane extinse cum ar fi: transportul în comun [148], monitorizarea traficului [64; 84], acumularea de date [15] și comunicare [74].

Prin renunțarea la metodele tradiționale de rezolvare individuală a problemelor de conducere/coordonare urbană și interconectarea agentului de coordonare global cu alte sisteme de conducere/coordonare la nivel de oraș, se extinde atât spațiul de optimizare, cât și fiabilitatea deciziei automate. O schiță a interacțiunii dintre sistemul de coordonare globală a traficului rutier urban și alte sistemele de detecție la nivel de oraș este prezentată în Figura 3.8.

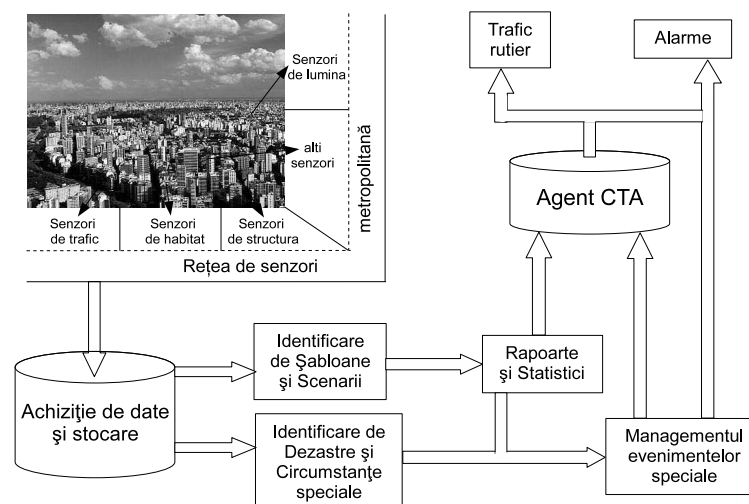


Figura 3.8: Interconexiunea cu alte sisteme inteligente

În partea stângă a Figurii 3.8 se poate observa rețeaua de senzori metropolitană înglobând pe lângă senzorii de trafic rutier și senzori de habitat, senzori de monitorizare a structurii clădirilor, senzori de lumină și alte tipuri de senzori. Măsurătorile în timp real realizate cu ajutorul acestor senzori sunt stocate într-o bază de date metropolitană prin intermediul componentei *Achiziție de date și Stocare*. Această bază de date este utilă în vederea identificării șabloanelor și scenariilor, inclusiv a dezastrelor. Utilizând informațiile achiziționate în timp real, sunt identificate situațiile speciale urmând ca noi evenimente să fie create prin componenta *Managementul Evenimentelor Speciale*. Aceste evenimente sunt transmise apoi către agentul de coordonare metropolitan CTA, iar pe baza acestora se vor lua decizii de coordonare a traficului rutier la nivel de oraș. Componenta *Achiziție de date și Stocare* comunică cu componenta *Identificare de Șabloane și Scenarii* în vederea mapeării măsurătorilor curente pe șabloanele și scenariile existente, în acest fel realizându-se procesul de identificare. Componenta de *Rapoarte și Statistici* crează pornind de la măsurătorile



în timp real, rapoartele și statisticile necesare ulterior în procesul de decizie a agentului metropolitan de coordonare a traficului rutier. După cum se observă din Figura 3.8, agentul de conducere metropolitan CTA are două ieșiri: coordonarea traficului rutier urban și semnalarea anumitor evenimente sau condiții de trafic speciale.

### B) Coordonarea agenților locali ZTA

Agentul de coordonare metropolitan ia decizie de coordonare a agenților zonali ZTA în funcție de datele de intrare înregistrate și transmise de către *Rețeaua de Senzori Metropolitană*. Se disting două situații de activare a sistemului de coordonare metropolitană: fie că datele de trafic în timp real se potrivesc anumitor șabloane și scenarii cunoscute, fie că noi evenimente speciale sunt detectate. Coordonarea agenților zonali de pe nivelul inferior se realizează prin transmiterea de mesaje. Aceste mesaje au o valabilitate nedeterminată până când agentul metropolitan va transmite un nou mesaj de anulare a comenzii de coordonare anterior transmisă. Prin intermediul acestor mesaje se urmăresc următoarele:

- sincronizarea semafoarelor dintr-o anumită zonă,
- blocarea accesului pe anumite străzi dacă este detectat blocaj în trafic,
- obținerea de undă verde continuă pentru un traseu care parcurge o anumită zonă,
- deblocarea rapidă a unei zone supraaglomerate prin sincronizarea semafoarelor din zonele de defluire a zonei respective și blocarea temporară a traficului pe străzile care intersectează aceste tronsoanele de defluire (utilă de obicei pentru rezolvarea aglomerărilor generate de terminarea unor concerte, activități sportive majore sau sărbători ale orașului),
- blocarea traficului spre anumite zone în care sistemul senzorial metropolitan a detectat posibilitatea existenței unei amenințări cu privire la siguranța traficului (incendii, scurgeri de gaze, inundații),
- obținerea de undă verde pentru servirea autovehiculelor speciale (salvare, pompieri, poliție) în vederea facilitării intervențiilor rapide în cazuri de urgență,

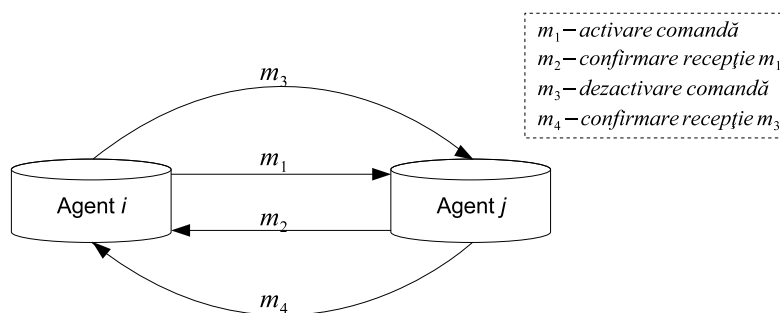


Figura 3.9: Schemă de principiu privind protocolul de comunicare între doi agenți

Protocolul de transmitere a mesajelor între doi agenți  $i$  și  $j$  este relativ simplu fiind format din patru pași (Figura 3.9):

- agentul  $i$  transmite mesajul  $m_1$  către agentul  $j$  - corpul mesajului conținând specificații de activare a comenzii  $c$ ,
- agentul  $j$  transmite mesajul  $m_2$  de confirmare a recepției mesajului  $m_1$ ,
- după o anumită perioadă de timp  $\Delta t$  comanda  $c$  este dezactivată de către agentul  $i$  prin transmiterea mesajului  $m_3$  către agentul  $j$  - corpul mesajului conținând specificații de dezactivare a comenzii  $c$ ,
- agentul  $j$  transmite mesajul  $m_4$  de confirmare a recepției mesajului  $m_3$ .

### C) Programarea și configurarea la distanță

Configurarea și programarea la distanță a agenților locali și zonali reprezintă o facilitate foarte importantă adăugată sistemului de conducere ierarhizat. Se economisește astfel timp și bani prin evitarea deplasării personalului specializat la locul în care sunt amplasate sistemele de conducere locală și coordonare zonală. De asemenea se eficientizează atât timpul de reparație a erorilor survenite, cât și durata mentenanței întregului sistem de conducere.

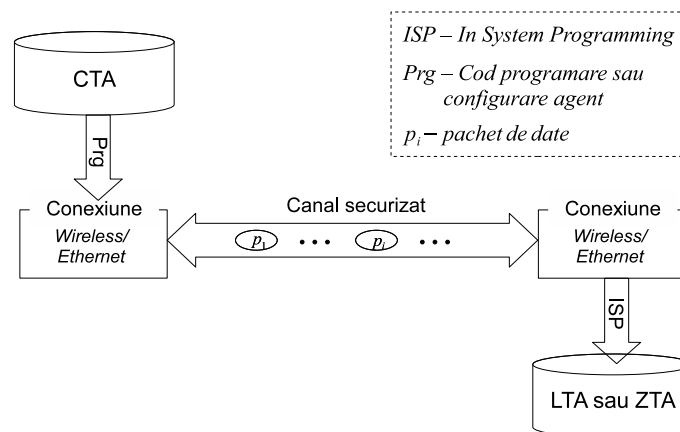


Figura 3.10: Schemă de principiu privind realizarea programării și a configurării la distanță

În Figura 3.10 este descris procedeul de programare și configurare la distanță a agenților locali și zonali, prin intermediul unui canal de comunicare securizat [37; 97]. Acest procedeu este cunoscut sub numele de ISP (In-System Programming) [85] și necesită ca sistemul de calcul pe care este implementat agentul (local sau zonal) să suporte această procedură. În acest sens, la proiectarea hardware a sistemului de calcul se va ține seama de această cerință. Astfel, agentul metropolitan CTA va transmite date către agentul local (LTA) sau zonal (ZTA) prin intermediul unei conexiuni wireless sau ethernet. Datele transmise conțin codul program sau parametri de configurare a agentului care urmează a fi programat/configurat, punându-se accent pe securizarea canalului de transmisie. După recepționarea tuturor pachetelor care alcătuiesc datele de cod, agentul în cauză va scrie acest cod în memoria program a sistemului de calcul prin intermediul unui protocol ISP.

### 3.3. Prezentarea rețelei de senzori wireless propusă

#### 3.3.1. Introducere

##### Scurtă descriere

În [144] este propusă o definiție a rețelelor de senzori care subliniază principalele caracteristici ale acestora: o rețea de senzori wireless este o rețea fără fir compusă din echipamente autonome, distribuite geografic, care utilizează senzori pentru a monitoriza în colaborare, mărimi fizice și condiții de mediu cum sunt: temperatura, sunetul, vibrațiile, presiunea, mișcarea sau poluarea în diferite locații.

Principalele componente ale unei rețele de senzori wireless sunt următoarele:

- ansamblul de noduri ale rețelei,
- nodul de bază, de obicei sistem de calcul legat la o sursă de curent,
- senzorii atașați nodurilor,
- topologia rețelei interconectate wireless,
- algoritmi de procesare, agregare și rutare,

Dezvoltarea tehnologiei rețelelor de senzori a fost motivată inițial de aplicațiile militare, însă în prezent ea avansează rapid pe diferite arii ale industriei civile și militare, fiind stimulată atât de progresul tehnologiei din zilele noastre, cât și de apariția tot mai multor aplicații care se pot rezolva mai eficient folosind rețelele de senzori wireless. În acest sens pot fi date câteva exemple de aplicații foarte importante: rețelele radar pentru controlul traficului aerian, rețele pentru controlul traficului rutier, rețelele electrice naționale și regionale, rețeaua națională meteorologică, aplicații din domeniul sănătății, monitorizarea mediului, predicția dezastrilor naturale, monitorizarea stării bolnavilor, monitorizarea proceselor de fabricație, transporturile și nu în ultimul rând asigurarea confortului în locuințe. Toate aceste aplicații foloseau în trecut calculatoare specializate și protocoale de comunicație foarte scumpe sau protocoale nestandardizate. Utilizând avantajele rețelelor de senzori wireless, implementarea și folosirea acestor aplicații se poate face cu o mai mare eficiență și în viitor cu un cost mai redus. Se așteaptă ca această tehnologie să aducă avantaje majore în aplicațiile de automatizare.

Ultimele descoperiri legate de tehnicile de construcție, de materialele și conceptele utilizate vor duce la micșorarea mărimii, greutateii și costurilor de fabricație ale senzorilor. În același timp tot acest progres va duce și la îmbunătățirea caracteristicilor lor de funcționare. În prezent această tehnologie este destul de scumpă, cu precizarea că prețul este invers proporțional cu dimensiunea senzorilor (senzori de dimensiuni mici - preț ridicat). În viitorul apropiat va fi posibilă integrarea a milioane de senzori în diverse sisteme inteligente cu scopul de a mări performanța și durata de viață a acestor sisteme.

Foarte importantă este deschiderea pe care această tehnologie o prezintă pentru soluționarea problemelor din viața de zi cu zi a oamenilor. Se așteaptă ca în următorii ani rețelele de senzori wireless să permită realizarea următoarelor funcții: controlul de la distanță a încălzirii și a iluminatului, monitorizări medicale de la distanță, monitorizării medicale proprii, supravegherea copiilor, etc. Există o serie de provocări pentru cercetătorii din domeniu, provocări legate de costuri, dimensiuni, topologie dar poate cel mai important, provocări legate de eficientizarea consumului de energie în rețea - nodurile care formează rețeaua sunt alimentați cu ajutorul bateriilor, deci o sursă limitată de energie, astfel că optimizarea rețelei și a consumului de energie este foarte importantă pentru viitor.

### Istoric

Istoria rețelelor de senzori wireless se împarte în 4 etape (faze) descrise în cele ce urmează [122]:

*Etapa 1* Perioada de aur a rețelelor de senzori construiți în scopuri militare. În timpul Războiului Rece, o cantitate mare de senzori acustici a fost dezvoltată în SUA pentru supravegherea submarinelor; o parte din acești senzori încă mai sunt folosiți și astăzi de către Administrația Națională pentru Oceane și Atmosferă (NOAA) în vederea monitorizării activității seismice din ocean. De asemenea, tot în această perioadă rețele de radare pentru protecția aeriană au fost dezvoltate și plasate în America de Nord.

*Etapa 2* Cercetări realizate cu sprijinul DARPA. La începutul anilor 1980 cu sprijinul DARPA s-a desfășurat o serie vastă de cercetări în domeniul rețelelor de senzori. Prin dezvoltarea rețelelor de senzori distribuiți (DSN) s-a dorit a se verifica dacă noile protocoale TCP-IP și ARPANET-ul (predecesorul internetului) pot fi folosite în contextul rețelelor de senzori. Una dintre primele definiții ale rețelelor de senzori a fost dată tot atunci, odată cu dezvoltarea DSN: rețeaua de senzori presupune existența mai multor noduri (senzori) ieftine, distribuite spațial. Aceste noduri coexistă într-un mediu colaborativ (cooperează unele cu altele) dar își păstrează și autonomia. Scopul rețelei era acela de a direcționa informația spre nodul care o poate utiliza într-un mod cât mai corect și mai performant. Proiectul DSN a pus accentul pe calculul distribuit, procesarea semnalului și activitatea de supraveghere și urmărire. Printre elementele de tehnologie folosite se numărau: senzorii acustici, protocoale de comunicare foarte performante la momentul respectiv, algoritmi computaționali și software distribuit. Cercetătorii de la universitatea Carnegie-Mellon din Pittsburgh, Pennsylvania au încercat mai târziu dezvoltarea unui sistem de operare pentru rețelele de senzori care să permită accesul transparent la resursele distribuite ale rețelei.

*Etapa 3* Aplicații militare dezvoltate în anii 1980-1990. În această perioadă au fost dezvoltate primele aplicații cu rețele de senzori cu statut de produs comercial. Bazându-se pe rezultatele obținute anterior de proiectul DARPA-DSN, armata a hotărât să adopte tehnologia rețelelor de senzori ca și direcție viitoare pentru dezvoltarea tehnicilor de război. S-a decis folosirea tehnologiei și a interfețelor pentru rețele deja existente, reducându-se astfel costurile și durata perioadei de dezvoltare. Într-un mediu de război clasic, fiecare armă (platformă fizică de război) funcționa într-un mod autonom, în schimb prin utilizarea rețelelor de senzori întregul sistem de arme colaborează între ele prin intermediul informațiilor trimise și primite de nodurile rețelei. Rețelele de senzori au crescut performanța procesului de urmărire și de supraveghere, au mărit raza de acțiune a radarelor și au redus timpul de răspuns pentru arme și echipamente.

*Etapa 4* Cercetări în domeniu din zilele noastre. Reprezintă perioada celei de-a doua generații de produse comerciale. Progresele înregistrate între anii 1990 și 2000 în domeniul computațional și al comunicării au adus o nouă generație de rețele de senzori. S-a început dezvoltarea senzorilor din ce în ce mai mici și din ce în ce mai ieftini - micro sisteme electromecanice (MEMS) și nano sisteme electromecanice (NEMS). Tehnologia rețelelor de senzori a fost adusă la o nouă dimensiune prin apariția standardelor și protocoalelor de comunicare în rețea - tehnologia wireless. Descoperirile din domeniul rețelelor wireless (IEEE 802.11a/b/g, Bluetooth, ZigBee și WiMax) permit în prezent implementarea unei rețele omniprezente ("ubiquitous connectivity" - cercetătorii de la centrul de cercetare Xerox din Palo Alto, California, au ajuns la concluzia că tehnologiile cele mai profunde sunt acelea care devin parte a vieții de fiecare zi până acolo încât nu mai pot fi distinse).

Dezvoltarea procesoarelor ieftine care se bazează pe un consum mic de energie a făcut posibilă utilizarea senzorilor într-o multitudine de aplicații. În prezent eforturile cercetătorilor sunt orientate pe definirea și dezvoltarea unor topologii de rețea: mesh (rețea plasă), peer-to-peer (rețea punctuală-rețele care folosesc protocoale orientate pe straturi; fiecare echipament hardware din rețea comunică cu un alt echipament din

același strat) și cluster-tree (rețea mănunchi). În tabelul 3.2 [122] sunt prezentate principalele generații de senzori folosiți în rețelele de senzori wireless în ultimii 25 - 30 de ani.

Tabelul 3.2: Caracteristici WSN pe etape și caracteristici

	<b>Prima generație (1980 - 1990)</b>	<b>A doua generație (1990 - 2000)</b>	<b>A treia generație (după anul 2000)</b>
<b>Dimensiune</b>	Mari și foarte mari	De dimensiuni medii (cât un telefon)	Foarte mici (cât o monedă, particulă de praf)
<b>Greutate</b>	Kilograme	Sute de grame	Gramme și chiar mai puțin
<b>Modul de răspândire</b>	Parașutate în diverse medii	Instalate manual	Integrate în diverse echipamente
<b>Arhitectura nodurilor</b>	Detecție, procesare și comunicare separată	Detecție, procesare și comunicare parțial integrată	Detecție, procesare și comunicare complet integrată
<b>Protocoale</b>	nestandardizate	nestandardizate	Wi-Fi, ZigBee, WiMax
<b>Topologie</b>	Punctuală, stea și arbore	Client - Server și peer-to-peer	Peer-to-peer
<b>Sursa de energie</b>	Baterii	Baterii AA	Energie solară sau energie obținută prin nanotehnologie
<b>Durata de viață</b>	Ore - Zile	Zile - Săptămâni	Luni - Ani

### 3.3.2. Utilitatea rețelelor de senzori. Aplicabilitate

Rețelele de senzori wireless au căpătat o vastă aplicabilitate în zilele noastre având ca scop oferirea unei platforme robuste în vederea automatizării proceselor. Domeniile de aplicabilitate sunt de asemenea nenumărate: medicină, agricultură, armată, economie, construcții, cercetare, etc. Fiecare dintre aceste domenii înglobând subdomenii cu diferite oportunități de aplicabilitate a rețelelor de senzori wireless.

Utilitatea rețelelor de senzori wireless este subliniată prin următoarele proprietăți care fac diferența între acest tip de rețele și celelalte tipuri existente:

- *wireless* - comunicarea între ansamblul de noduri care formează rețeaua este de tip radio, făcând inutilă existența cablurilor,
- *detecție senzorială* - în funcție de necesitățile aplicației, nodurile rețelei de senzori sunt echipate cu senzori specifici; aceștia captează informații din mediul înconjurător și apoi le transmit wireless către nodurile vecine,
- *autoorganizare* - prin autoorganizare sau autoconfigurare se înțelege pe de o parte capacitatea unei rețele de senzori de a adăuga automat la topologia existentă noi noduri proaspăt instalate în vecinătatea rețelei și pe de altă parte, capacitatea de a elimina nodurile inactive sau defecte din respectiva topologie,

- *mentenanță ușoară* - datorită proprietății de autoorganizare, mentenanța rețelei și a nodurilor componente se poate face ușor și rapid, mai ales datorită inexistenței cablurilor de legătură,
- *rutarea informației* - esențial în comunicarea între nodurile rețelei este proprietatea nodurilor de a se comporta ca routere în vederea transmiterii mai departe a informațiilor recepționate de la nodurile vecine,
- *dimensiuni reduse* - evoluția tehnologiei a dus la evoluția evidentă a nodurilor unei rețele de senzori, atingându-se dimensiuni de ordinul centimetrilor și milimetrilor în funcție de domeniul de aplicabilitate,
- *medii de instalare* - comunicând wireless, având dimensiuni mici și putând fi încapsulate în orice înveliș protector, mediul de instalare nu este o problemă pentru nodurile unei rețele de senzori wireless,
- *costuri* - se estimează că în viitorul apropiat costul unui nod va fi de ordinul cenților, iar achiziționarea unei rețele de senzori cu mii/zeci de mii de noduri va fi accesibilă.

În ceea ce privește vasta aplicabilitate a rețelelor de senzori wireless vor fi prezentate în continuare doar câteva dintre nenumăratele proiecte implementate sau în curs de implementare în anul 2008 folosind această tehnologie [23]. După cum s-a arătat în paragrafele anterioare, domeniile de aplicabilitate a rețelelor de senzori sunt aproape nemărginite, acestea găsindu-și utilitatea peste tot unde este nevoie de detecție, monitorizare și conducere autonomă. Proiectele prezentate în continuare au ca scop demonstrarea aplicabilității atât în practică cât și în cercetare, subliniind importanța și vasta aplicabilitate a acestei noi tehnologii a rețelelor de senzori wireless:

- *STARMAC* - Conducerea multiagent în timp real a elicopterelor autonome cu patru rotoare. Scopul este realizarea misiunilor de salvare cu ajutorul acestor elicoptere autonome, fără existența pilotului uman. Mai multe elicoptere survolează zona, comunică între ele și iau decizii autonome pentru evitarea coliziunilor;
- *IVHM* - Integrated Vehicle Health Monitoring. Scopul acestui proiect este de a detecta și a informa punctul de control despre eventualele defecte survenite în funcționarea motorului unei rachete spațiale. Principalul motiv pentru utilizarea acestei tehnologii este capacitatea de a detecta defecte și a acționa în timpul zborului, mult mai rapid decât un sistem care comunică și așteaptă deciziile de la punctul de control amplasat la sol;
- *ITS* - Intelligent Transportation Systems. Dezvoltarea de noi soluții de către Universitatea din Newcastle, utilizând rețelele de senzori wireless în scopul decongestionării traficului în Anglia și reducerea emisiilor de carbon. În acest sens fiecare autovehicul este dotat cu un nod wireless care comunică cu rețeaua ce împânzește un anumit oraș, informând șoferul despre condițiile de trafic și rutele posibile în vederea evitării decongestionării;
- *PipeNet* - Rețea de senzori implementată de către Imperial College din Londra în scopul detectării scurgerilor în cadrul infrastructurii de alimentare cu apă prin utilizarea de senzori acustici;
- *Intelligent Home* - reducerea costurilor de energie electrică dintr-o casă particulară folosind o rețea de senzori wireless pentru detecția și apoi reglarea temperaturii ambientale și a intensității luminoase;

- *Motes in Antarctica* - Monitorizarea stării vremii (temperatura atmosferică, temperatura zăpezii, umiditatea, lumina solară și presiunea atmosferică) la Polul Sud, la o temperatură medie de -55 grade Celsius pe o perioadă de 4 luni. Proiect realizat de către Chinese Academy of Science în colaborare cu compania Crossbow;
- *Swarm Navigation* - Supravegherea unei zone de către roboți, fiecare robot fiind echipat cu un nod de rețea wireless pentru intercomunicare și o acoperire cât mai bună a zonei date. Proiect realizat de către compania EasySen în colaborare cu University of Notre Dame's Mobile Sensing Systems (MOSES) Lab;
- *Irigation Management* - Irigarea automată a solului în vederea creșterii productivității folosind platforma Eko, dezvoltată de compania Crossbow.

În exemplificarea de mai sus s-a încercat alegerea unor soluții implementate cu rețele de senzori wireless din domenii diferite, numai în anul 2008, pentru a întări afirmația că această tehnologie este de cert interes și este în plină dezvoltare în zilele noastre.

### 3.3.3. Tipuri de senzori utilizați în managementul traficului modern

Detecția în traficul rutier urban dispune la ora actuală de o serie de tehnologii de mare actualitate sau de actualitate mai mică, având grade diferite de aplicabilitate în situații de trafic reale ale zilelor noastre. În continuare vor fi enumerate aceste tehnologii, apoi vor fi specificate principalele avantaje și dezavantaje conform unui studiu realizat de către US Department of Transportation [77]:

- inele inductive (inductive loop),
- magnetometre pe două axe,
- inducție magnetică,
- radar cu microunde,
- radar laser (infraroșii active),
- infraroșii pasive,
- detecție ultrasonică,
- detecție acustică,
- camere video - procesare de imagini.

**Inele inductive** - Avantaje: posibilitatea utilizării într-o plajă largă de aplicații, tehnologie matură cu cea mai mare răspândire, oferă date de trafic cum ar fi volumul, prezența, gradul de ocupare, viteza, distanța între două autovehicule, independență de condițiile meteo (ploaie, ceață, zăpadă), oferă cea mai bună acuratețe în contorizarea autovehiculelor, oferă posibilitatea clasificării autovehiculelor. Dezavantaje: necesită decuparea carosabilului, instalarea și mentenanța necesită închiderea traficului pe banda respectivă, cablurile sunt influențate de trafic și de temperatură, mai multe inele sunt necesare pentru monitorizarea unei anumite locații, acuratețea de detecție scade odată cu creșterea varietății claselor de autovehicule.

**Magnetometre pe două axe** - Avantaje: sunt mai rezistente la trafic decât inelele inductive, pot fi utilizate unde inelele inductive nu sunt fezabile - de exemplu pe punțile podurilor, independență de condițiile meteo (ploaie, ceață,

zăpadă), transmiterea datelor pe frecvență radio, funcționare pe baterii. Dezavantaje: necesită decuparea pavajului la dimensiuni mult mai mici decât inelele inductive, instalarea greșită duce la reducerea duratei de viață a carosabilului, instalarea și mentenanța necesită închiderea traficului pe banda respectivă - timpul de lucru este mult redus față situația inelelor inductive, necesită instalarea mai multor unități pentru detectarea traficului autovehiculelor pe întreaga bandă de mers.

**Inducție magnetică** - Avantaje: pot fi utilizate unde inelele inductive nu sunt fezabile - de exemplu pe punțile podurilor, unele modele se instalează sub carosabil fără ca acesta să necesite a fi tăiat prin găurire pe sub carosabil, independență de condițiile meteo (ploaie, ceață, zăpadă), mai rezistente la trafic decât inelele inductive. Dezavantaje: instalarea necesită tăierea carosabilului sau găurire sub acesta, nu poate detecta vehiculele în staționare decât dacă este utilizată o anumită poziționare a senzorilor și un anumit software de procesare.

**Radar cu microunde** - Avantaje: independență de condițiile meteo pe distanțe scurte de trafic, măsurarea directă a vitezei fără a adăuga mai mulți senzori ca și în metodele anterioare, funcționalitate pe mai multe benzi în același timp. Dezavantaje: senzorii CW Doppler (Continuous Wave Doppler) nu pot detecta autovehiculele în staționare.

**Radar laser (infraroșii active)** - Avantaje: transmite mai multe raze pentru măsurarea cu acuratețe a poziției autovehiculelor, vitezei și tipul acestora, funcționalitate pe mai multe benzi în același timp. Dezavantaje: funcționarea poate fi afectată de ceață când vizibilitatea este sub 6 metri sau în timpul viscolirii zăpezii, instalarea și mentenanța necesită ștergerea periodică a lentilelor și necesită închiderea benzilor de mers.

**Infraroșii pasive** - Avantaje: funcționare pe mai multe benzi în același timp. Dezavantaje: pe timp de ploaie, ninsoare sau ceață pot apărea reduceri ale sensibilității, unele modele nu sunt recomandate pentru detectarea prezenței.

**Ultrasonice** - Avantaje: funcționare pe mai multe benzi în același timp, posibilitatea de detecție a autovehiculelor care depășesc anumite limite de înălțime, experiență mare de utilizare practică în Japonia. Dezavantaje: performanțele pot fi afectate de schimbarea temperaturii sau de turbulențe mari de aer, pot apărea probleme de măsurare a gradului de ocupare pe autostradă când autovehiculele rulează cu viteze de la moderat la mare.

**Acustice** - Avantaje: detecție pasivă, independență de precipitații, funcționare pe mai multe benzi în același timp. Dezavantaje: temperaturile scăzute pot afecta acuratețea măsurării numărului de autovehicule, anumite modele nu sunt recomandabile pentru autovehiculele circulând la viteze mici sau în trafic aglomerat și sacadat.

**Procesarea de imagini video** - Avantaje: funcționare pe mai multe benzi și zone în același timp, ușor de adăugat și modificat zonele de detecție, oferă multe date de trafic, prin conectarea mai multor camere video învecinate se poate crește suprafața de monitorizare și detecție. Dezavantaje: instalarea și mentenanța pentru curățirea lentilelor necesită închiderea traficului pe benzile de mers când camerele video sunt montate deasupra carosabilului, în cazul în care camerele video sunt montate pe marginea carosabilului, acest lucru nu mai este necesar. Performanțele sunt influențate de ceață, ploaie, zăpadă, umbrele autovehiculelor, fazele zilei, apă pe carosabil, pânze de păianjen și țurțuri formați în direcția de vizionare a lentilelor. Funcționarea pe timp de noapte necesită iluminare stradală, necesită montaj la înălțimi între 9 și 15 metri în vederea detectării optime a prezenței și pentru a măsura corect viteza. La unele modele câmpul vizual al camerelor video poate fi modificat de vânt, vibrații sau de către sistemul de montare, iar uneori costurile de implementare pot fi ridicate când sunt necesare date speciale de trafic.

Pe baza descrierii de mai sus a tehnologiilor de detecție a autovehiculelor în traficul rutier, putem concluziona că magnetometrele reprezintă o soluție viabilă și de viitor. În Figura 3.11 este prezentată o schiță a modificării câmpului magnetic al pământului în vecinătatea unui magnetometru și în prezența unui autovehicul. În



primul rând se potrivește arhitecturii de detecție wireless, funcționând pe baterii pentru o perioadă îndelungată de timp și având posibilitatea de a comunica wireless datele de trafic. În al doilea rând, detecția traficului rutier urban prin magnetometre nu este influențată de condițiile atmosferice precum alte tehnologii ca și procesarea de imagini video, radare laser, detecție acustică. În al treilea rând, comparând tehnologia de detecție prin magnetometre cu fiecare altă tehnologie de detecție prezentată mai sus prin studierea avantajelor și dezavantajelor în funcție de caz, s-a observat că în vederea conducerii traficului rutier urban utilizând ca detector de trafic soluții wireless, detecția prin magnetometre s-a adeverit a fi cea mai indicată.

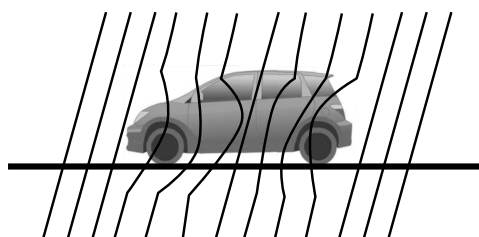


Figura 3.11: Modificarea câmpului magnetic al pământului de către autovehicule

#### **3.3.4. Arhitectura rețelelor de senzori wireless. Topologii de rețea**

O rețea de senzori wireless este formată de obicei dintr-un nod bază, de obicei legat la o sursă de curent, și noduri care funcționează pe baterii și comunică wireless între ele și cu nodul de bază, echipate cu diferiți senzori și având ca scop raportarea către nodul de bază a informațiilor detectate cu ajutorul senzorilor. Fiecare nod component al unei rețele de senzori wireless are în alcătuirea sa un număr de senzori, un emițător/trasmițător radio (sau alt dispozitiv care permite comunicarea wireless) și o sursă de energie, de obicei o baterie, iar anumite noduri mai au în componență și un procesor și o memorie. Datorită faptului că sunt alimentate cu ajutorul bateriilor, nodurile rețelei de senzori pot fi utilizate în aproape orice mediu, având proprietatea principală de a se autoorganiza ierarhic formând automat topologie de rețea și de a transmite informațiile necesare nodului bază. Principalele componente ale unui nod dintr-o rețea de senzori wireless sunt prezentate în Figura 3.12.

În Figura 3.13 sunt prezentate topologiile de rețea cel mai utilizate în prezent. O versiune a topologiei Stea este utilizată în rețelele wireless de dimensiuni mari sub numele de SENMA (SEnsor Network with Mobile Access) [128]. Principalul avantaj al acestei topologii este timpul scurt de transmitere a mesajelor de la nodurile rețelei către nodul de bază, un dezavantaj major fiind observat în cazul în care nodul de bază nu este funcțional - rețeaua devenind inutilă. De asemenea, dacă comunicarea dintre un nod și nodul de bază este slabă sau nu se poate realiza, mesajele transmise de nodul respectiv nu vor ajunge prin nici un mijloc la nodul de bază, respectivul nod devenind inutil pentru rețea. În topologia de tip Inel, nu există nod de bază, fiecare nod al rețelei având aceeași funcționalitate. Mesajele sunt transmise de obicei în aceeași direcție de-a lungul inelului (există și inele cu capacitate de autovindecare în care mesajele sunt transmise în ambele direcții), în acest caz principala problemă este ridicată în cazul

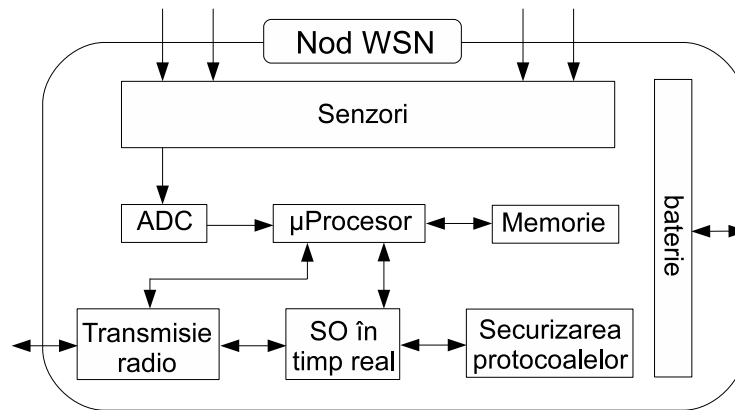


Figura 3.12: Componentele unui nod al rețelei de senzori

În care comunicarea dintre două noduri vecine nu se poate realiza, rețeaua devenind astfel inutilă. Topologia Arbore aduce în plus extinderea ariei de acoperire a rețelei wireless prin comunicarea mesajelor de la frunzele arborelui către nodul rădăcină (nod de bază al rețelei) prin intermediul legăturilor de tip tată. Dezavantajul acestei abordări este că odată cu creșterea razei de acoperire, crește și timpul de propagare al mesajului transmis de la un nod frunză către nodul de bază. Rețelele conectate complet oferă un grad ridicat de fiabilitate, dar din păcate nu sunt scalabile, adăugarea de noi noduri va crește exponențial numărul de conexiuni în interiorul rețelei. Această topologie este utilă doar în cazul rețelelor cu un număr scăzut de noduri, care necesită o fiabilitate ridicată. Topologia de tip Plasă este cea mai des întâlnită în aplicațiile cu rețele wireless de dimensiuni mari. În cadrul acestei topologii, un anumit nod va transmite mesaje către nodurile vecine, acestea având rolul de a ruta informația mai departe către vecinii lor. Datorită modalității de propagare a informației din nod în nod, această metodă se mai numește și MultiHop, informația străbătând mai multe "hopuri" de la sursă către destinație.

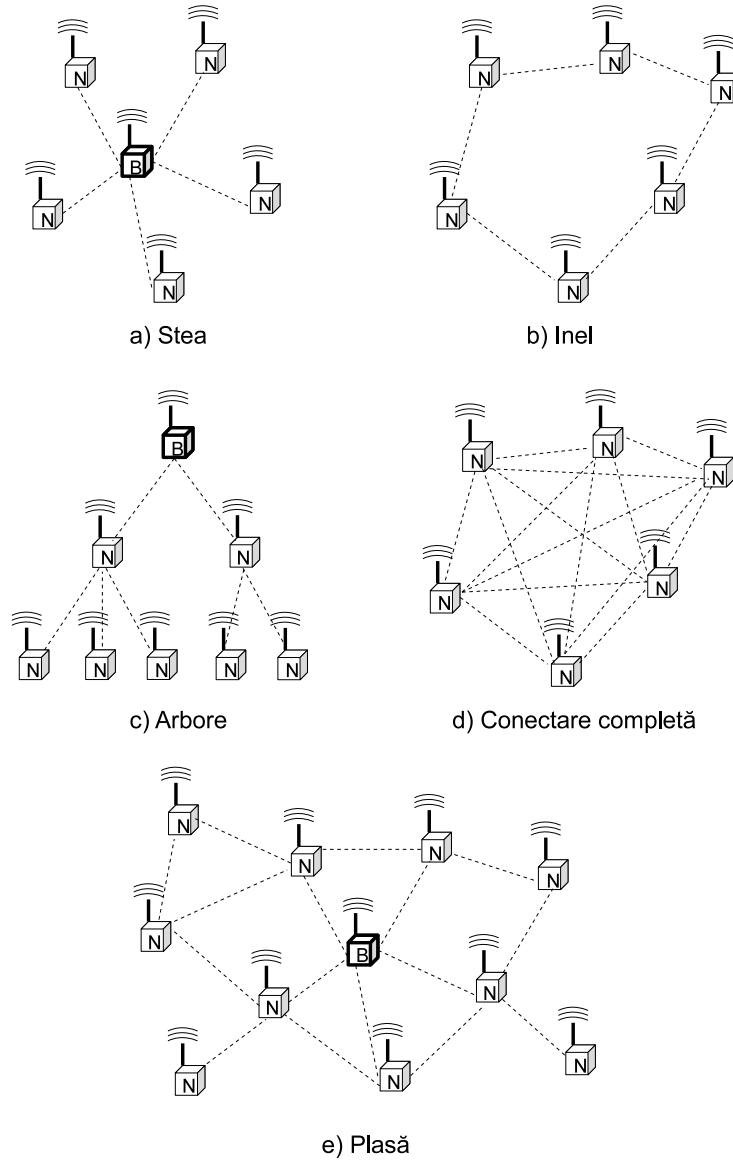


Figura 3.13: Schemă bloc privind clasificarea topologiilor rețelelor de senzori

**3.3.5. Rețea de senzori wireless - detector de trafic rutier urban**

Teza de față își propune folosirea unei rețele de senzori wireless ca detector de trafic, nodurile rețelei fiind reprezentate pe de o parte de magnetometre pentru detecția autovehiculelor din trafic și pe de altă parte de raze laser sau microunde pentru detecția pietonilor.

În Figura 3.14 este prezentată arhitectura rețelei de senzori wireless propusă ca detector de trafic rutier urban. Componentele rețelei de senzori sunt următoarele:

- senzorii de detecție a autovehiculelor - magnetometre,
- senzorii de detecție a pietonilor - raze laser sau microunde,
- punctul de acces poziționat în fiecare intersecție,
- repeatoarele de semnal,
- afișajele electronice privind semaforizarea sau condițiile de trafic.

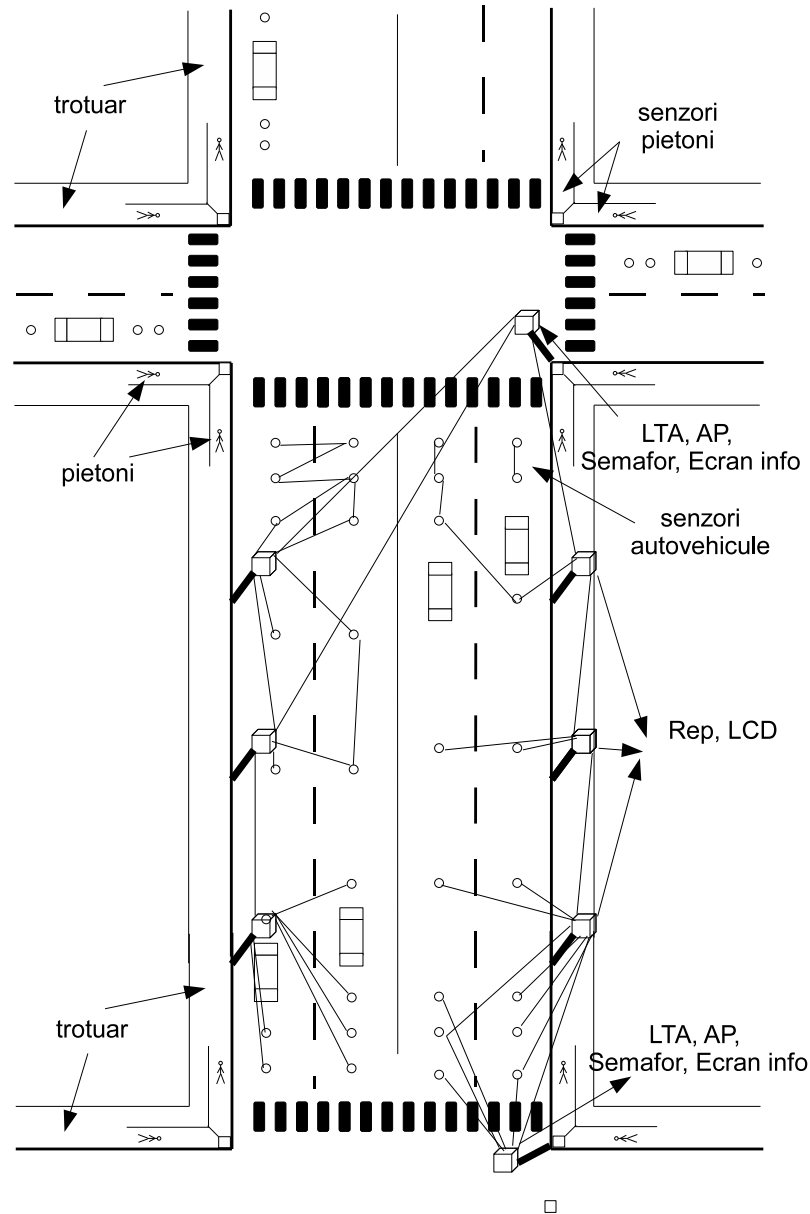


Figura 3.14: Arhitectura rețelei de senzori wireless în traficul rutier urban

Fiecare nod de detecție al rețelei de senzori wireless va transmite MultiHop informațiile de trafic către nodurile apropiate. Pentru a evita întârzierile datorate transmisiilor multihop între nodurile de detecție și până la punctul de acces, se vor introduce repeatoare de semnal (*Rep*) în topologia rețelei wireless. Aceste repeatoare sunt legate la curent și sunt dotate cu echipament de emisie mai puternic decât

echipamentul prezent pe senzorii de detecție, în acest caz consumul de energie nu mai fiind o problemă. Scopul repetoarelor este acela de a transmite mai departe informațiile primite de la nodurile de detecție, către următorul repetor sau către punctul de acces (Ap). Această abordare în detecția wireless a traficului rutier urban se găsește în literatura de specialitate în proiectul SenSys [121].

Componentele rețelei de senzori wireless propuse se pot grupa în trei mari categorii:

- noduri de detecție și/sau rutare,
- noduri decizionale,
- noduri de informare a participanților la trafic (afișaje electronice).

Repetoarele de semnal își au rolul lor bine definit în topologia rețelei, utilitatea lor fiind evidentă. Distanța dintre aceste repetoare se stabilește în funcție de particularitățile rețelei și a zonei monitorizate, cu aproximare între 50 și 100 de metri liniari. Repetoarele funcționând doar în scopul rutării informațiilor către punctul de acces, ar putea fi ușor extinse cu proprietăți de afișare a informațiilor de trafic utile conducătorilor auto. De mare ajutor în acest sens este informarea conducătorilor auto asupra gradului de aglomerare a anumitor tronsoane sau chiar asupra blocajelor în trafic, aceștia putând lua decizii ca atare de a ocoli zonele respective. De asemenea, toate semafoarele dintr-o intersecție pot fi prevăzute cu astfel de ecrane de informare asupra condițiilor de trafic din aval și mai pot fi prevăzute cu date concrete legate de semaforizarea curentă: contoare de timp pentru culorile roșu și verde, legate direct la sistemul de conducere local(a se vedea Figura 3.15).

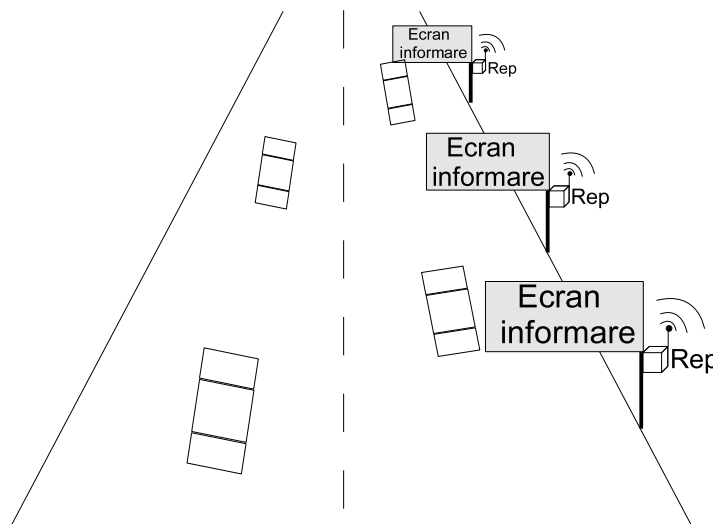


Figura 3.15: Repetitoare de semnal cu ecran de informare

Majoritatea echipamentelor hardware utilizate în alcătuirea rețelei de senzori wireless propuse sunt realizate de către compania Crossbow [22]. Acestea sunt alese cu focalizare directă asupra detecției de trafic și a conducerii distribuite.

### Topologia ZigBee

În primul rând, pentru a beneficia din plin de avantajele utilizării unei rețele de senzori wireless ca detector de trafic, trebuie aleasă cu grijă topologia de rutare a informațiilor în cadrul rețelei. În vederea economisirii energiei - reducerea consumului bateriei și prelungirea duratei de viață a nodului - este necesar ca distanța de emisie radio a fiecărui nod să fie cât mai mică, datorită faptului că transmisia radio s-a dovedit a fi cea mai mare consumatoare de energie. În acest sens, s-a ales o topologie din categoria MultiHop pentru ca informația să poată fi rutată între nodurile rețelei. Pentru a beneficia atât de rutarea informațiilor, cât și de un consum redus de energie, s-a optat pentru alegerea unei combinații hibride între topologia Star și topologia Mesh, acest tip de abordare fiind specific anumitor tipuri de aplicații cu rețele de senzori wireless cunoscut și sub numele de ZigBee (Figura 3.15).

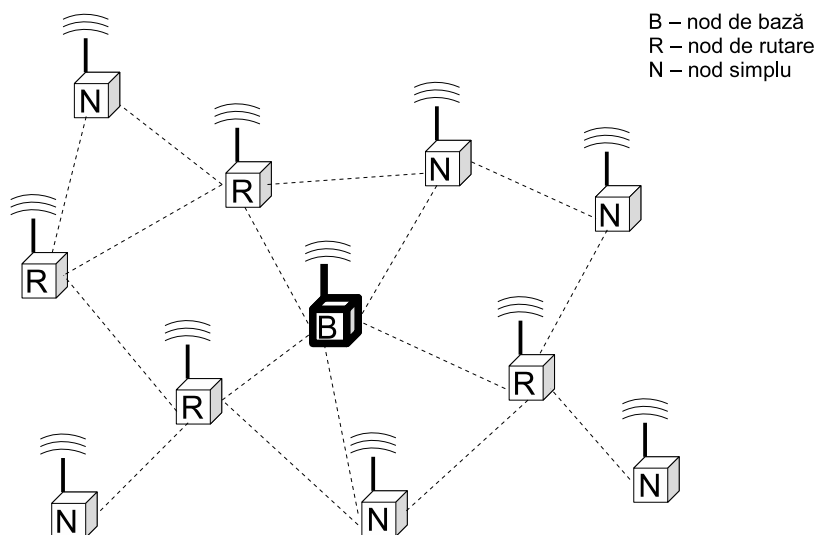


Figura 3.16: Topologie hibridă Stea-Plasă(ZigBee)

### Comunicarea radio. Protocolul XMesh

Alegerea tipului de comunicare în rețelele de senzori wireless reprezintă un factor determinant în proiectarea și implementarea acestora. În teza de față s-a optat pentru protocolul de comunicare XMesh [127] datorită proprietăților sale deja confirmate prin implementări[23]:

- topologii MultiHop de tip Plasă flexibile : Star, Hybrid-Star(ZigBee), Mesh,
- autoorganizare - prin adăugarea unui nou nod în vecinătatea rețelei, acesta este automat introdus în topologia rețelei,
- autovindecare - dacă un nod al rețelei nu mai funcționează corect sau nu mai poate comunica cu nodurile vecine din diferite motive cum ar fi terminarea

bateriei sau defecțiuni interne, acesta este eliminat automat din topologie, rețeaua începând autoorganizarea în zona respectivă,

- reprogramarea nodurilor wireless (XOtap),
- comunicare bidirecțională cu timp de răspuns rapid,
- suport pentru standardul 802.15.4/ZigBee,
- durată mare de viață a bateriei (mai mult de 5 ani de viață) - în mod normal nodurile se află în starea de adormire în majoritatea timpului de viață, trezindu-se doar când este nevoie,
- scalabilitate - funcționarea rețelei de senzori wireless nu este influențată de adăugarea de noi noduri.

Conform specificațiilor Crossbow, XMesh este un protocol de comunicare pentru rețele plasă, multi-hop și ad-hoc, special dezvoltat pentru rețelele wireless. Acest protocol este în definitiv o bibliotecă software care are nevoie de sistemul de operare TinyOS, special dezvoltat pentru sistemele embedded cu resurse limitate. O rețea XMesh este formată din noduri care comunică wireless între ele și sunt capabile să transmită/ruteze mesaje radio către stația de bază. În cele din urmă, aceste mesaje vor ajunge la o stație de procesare (computer sau alt client). Prin rutarea unui mesaj între noduri se obține de fapt o extindere a comunicării radio prin reducerea energiei necesare transmiterii la distanță a mesajelor și creșterea duratei de propagare a mesajului. Specifică majorității rețelelor wireless este nevoia de economisire a energiei bateriei în detrimentul creșterii timpului de transmitere a mesajelor către nodul de bază. Transmițând datele prin rețea în acest fel, protocolul XMesh oferă două beneficii foarte importante: îmbunătățirea acoperirii radio și fiabilitate crescută. Pentru ca două noduri să comunice între ele, nu este necesar să se afle în aria directă de acoperire radio. Un mesaj poate fi transmis la unul sau mai multe noduri aflate între nodurile sursă și destinație, apoi aceste noduri intermediare vor ruta informația către nodul destinație. De asemenea, dacă nu se poate realiza comunicare radio între două noduri, oricare ar fi motivele, această problemă se rezolvă ușor prin rerutarea informațiilor în jurul ariei nefuncționale.

### Nodul de detecție a prezenței autovehiculelor și pietonilor

Scopul nodurilor de detecție este de a determina prezența autovehiculelor și a pietonilor în zonele monitorizate. În cazul autovehiculelor se dorește de asemenea determinarea vitezei, fapt ușor de realizat prin montarea a două noduri la o anumită distanță stabilită apriori. Calculul vitezei se face în funcție de această distanță și perioada de timp scursă de la detectarea autovehiculului de către primul nod și până la detectarea acestuia de către al doilea nod (Figura 3.17).

După cum se poate observa din Figura 3.17, viteza de deplasare a unui autovehicul se poate calcula după formula  $v = \frac{\Delta d}{\Delta t}$ , unde  $\Delta t = t_2 - t_1$ ,  $\Delta d$  este distanța dintre nodul  $s_1$  și nodul  $s_2$ , iar  $t_1$  și  $t_2$  sunt momentele de timp la care autovehiculul este detectat de către nodul  $s_1$  și respectiv de către nodul  $s_2$ . Pentru un calcul mai riguros al vitezei de deplasare a autovehiculelor se pot utiliza mai mult de două noduri, crescând astfel precizia calculului vitezei medii de deplasare.

Dezvoltarea rapidă a tehnologiei în ultimele decenii a dus la soluții noi de detecție în traficul rutier: camere video, inele inductive, tuburi pneumatice, magnetometre, raze laser, etc. După cum s-a prezentat în capitolul anterior, detecția traficului cu ajutorul magnetometrelor pare a avea cea mai bună aplicabilitate în practică ținând seama de necesitățile de instalare și mentenanță, durata de viață,



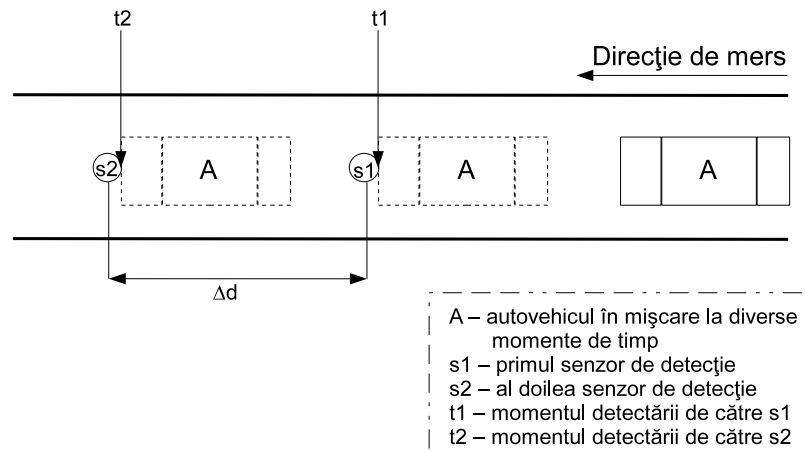


Figura 3.17: Schemă de principiu privind calculul vitezei de deplasare a autovehiculelor

fiabilitatea, dimensiunea redusă, transmiterea datelor wireless pe frecvențe radio și independența față de condițiile meteorologice.

Nodul de detecție al autovehiculelor se va instala pe mijlocul benzilor de mers, fie prin introducerea acestuia în carosabil, fie prin fixarea la suprafața carosabilului. Configurația hardware a nodului de detecție al autovehiculelor, inspirată după configurația modulului wireless Crossbow Iris, este următoarea:

- procesor și memorie - Atmel ATmega1281, Flash Program 128 KB, RAM 8 KB,
- radio - bandă de frecvență 2.4 GHz, rata de transfer 250 kbps, acoperire de până la 500 m,
- magnetometru pe trei axe - Crossbow CXM113 (5V, 28 mA),
- baterie - LithiumIon 2.7V - 3.3V.

În ceea ce privește detecția pietonilor se vor utiliza soluții existente bazate pe microunde și/sau raze laser [63; 120]. Soluțiile de detecție ale pietonilor vor putea fi integrate în rețeaua de senzori wireless prin conectarea la un nod Crossbow Iris sau având în vedere că sistemele de detecție sunt instalate de obicei chiar la colțurile stăzilor care intră în intersecție, acestea vor putea fi conectate direct la nodul de procesare.

### Nodul de procesare (Access Point)

Nodul de procesare a informațiilor recepționate de la nodurile de detecție, mai numit și Access Point în literatura de specialitate are două funcționalități principale: de procesare și de agregare a informațiilor. Datele recepționate în timp, de la toate nodurile de detecție, legate de prezența autovehiculelor sau pietonilor este necesar a fi înregistrate, pe baza lor actualizându-se atât lungimile cozilor de așteptare pentru fiecare bandă de mers în cazul autovehiculelor, cât și numărul pietonilor așteptând să traverseze. Funcționalitățile nodului de procesare sunt următoarele:

- recepționarea informațiilor în formă brută de la nodurile de detecție,
- procesarea informațiilor recepționate pentru fiecare nod în parte,
- salvarea în memorie a prezenței autovehiculelor pentru fiecare nod,
- actualizarea cozilor de așteptare în timp real pe baza datelor procesate și salvate - agregarea informațiilor de trafic,
- transmiterea lungimilor cozilor de așteptare în timp real către sistemul de conducere local.

Din punct de vedere al implementării hardware, nodul de procesare are nevoie de mai multă memorie și de mai multă putere de calcul decât nodurile de detecție. Deși nod al rețelei de senzori, prin poziționarea sa în intersecție, acesta poate fi legat la curent și astfel constrângerea legată de consumul de energie este eliminată. De asemenea, nu există limitare la dimensiuni, iar costurile componentelor hardware influențează foarte puțin costul total al rețelei de senzori necesară unei singure intersecții. În ceea ce privește echipamentele de conducere automată instalate momentan în intersecțiile semaforizate, acestea sunt de o mare vastitate depinzând de diferiți factori cum ar fi: sistemul de detecție, tipul de conducere, complexitatea intersecției, costurile de implementare, fiabilitatea. Aceste echipamente sunt instalate în intersecții în interiorul unor cutii pentru a fi protejate. Există multe companii pe piață care produc astfel de echipamente, în continuare vor fi exemplificate doar câteva dintre aceste produse [129; 130]:

- NEMA TS-2 Type 1,
- NEMA TS-2 Type 2,
- Enhanced 170E Model 970 TS2,
- Model 2070,
- MicroCab,
- Model 170E,
- PROM Module Model 412C.

Principalele caracteristici sunt următoarele:

- conexiune ethernet,
- conexiune RS232,
- posibilitate de definire până la 100 de scheme de conducere la nivel de intersecție,
- ecran de afișare,
- conexiune cu sistem de detecție,
- microprocesore de până la 32 de biți,
- temperaturi de funcționare între -40 și +60 de grade Celsius,
- dotare cu memori EEPROM și RAM de minim 32KB.

### **Repetorul de semnal**

Repetoarele de semnal au un singur scop, și anume de a transmite mai departe înspre nodul de procesare toate informațiile recepționate de la nodurile de detecție aflate în vecinătate. După cum se observă din Figura 3.15, acestea sunt instalate de preferință pe marginea carosabilului și sunt foarte utile pentru reducerea consumului de energie a nodurilor de detecție. Cu cât crește numărul repetoarelor de-a lungul suprafeței monitorizate, cu atât se restrânge distanța pe care trebuie să o acopere transmisia radio a nodurilor de detecție. În felul acesta se poate reduce semnificativ consumul de energie prin reducerea puterii de transmisie.

Fiind legat la curent și având rol doar de a ruta informația în rețeaua de senzori wireless, repetorul nu are nevoie de memorie sau de putere de calcul mare, ci doar de o antenă cât mai puternică pentru a putea recepționa informații și mai ales pentru a le putea transmite pe distanțe cât mai mari. Din acest punct de vedere se poate folosi o structură hardware asemănătoare nodului Crossbow Iris, cu îmbunătățiri asupra sistemului de emisie/recepție.

### **Ecranul de afișare**

O componentă care lipsește sistemelor de conducere în timp real implementate în prezent este informarea continuă a participanților la trafic în legătură cu condițiile de trafic de pe porțiunea de drum pe care aceștia se deplasează sau nu numai. Prin instalarea repetoarelor de-a lungul carosabilului, fapt a cărui necesitate a fost prezentată în paragraful anterior, infrastructura este deja pregătită pentru adăugarea unor ecrane de informare a participanților la trafic alături de repetoare sau chiar prin integrarea cu acestea. Caracteristicile pe care ecranele de informare trebuie să le îndeplinească sunt următoarele:

- dimensiuni care să permită vizibilitatea din traficului rutier urban, între  $4m^2$  și  $20m^2$ ,
- funcționare indiferent de condițiile meteo,
- dimensiunea ledului (pitch) între  $10mm$  (pentru ecranele de dimensiuni mici) și  $22mm$  (pentru ecranele de dimensiuni mari),
- comunicare serială RS232 sau RS485.

### **Extinderea informațiilor oferite de semafor**

În prezent majoritatea semafoarelor pentru autovehicule pot avea următoarele proprietăți:

- trei culori de avertizare: roșu, galben, verde,
- în majoritatea situațiilor culoarea galbenă a semaforului apare ca tranziție de la culoarea verde la culoarea roșie a semaforului, pentru a avertiza conducătorii auto să încetinească în vederea opririi,
- uneori culoarea galbenă a semaforului apare și ca tranziție de la culoarea roșie la culoarea verde a semaforului, pentru a avertiza conducătorii auto că se apropie culoarea verde a semaforului și să fie pregătiți să pornească,
- contoare de timp pentru ambele culori verde și roșu ale semaforului, care își decrementează valoarea la fiecare secundă, reprezentând timpul rămas până la schimbarea culorii curente,

Aceste proprietăți pot fi extinse prin adăugarea de ecrane cu leduri pentru informare suplimentară în structura semaforului. Asemenea ecranelor instalate de-a lungul carosabilului, ecranele integrate în sistemul de semaforizare pot afișa informații legate de condițiile de trafic curente. De asemenea, în funcție de metoda de conducere a traficului rutier în intersecția respectivă, pot fi afișate informații direct legate de timpii de semafor. Contoarele de timp utilizate în prezent au următorul comportament ciclic: după ce contorul ajunge la valoarea 0 să presupunem pentru culoarea verde, acesta se inițializează cu valoarea timpului de așteptare pe culoarea roșie și va începe să se decrementeze la fiecare secundă, apoi după ce ajunge la valoarea 0, se reinițializează cu valoarea timpului de verde și va începe decrementarea. Această abordare necesită o cunoaștere prealabilă a timpilor de roșu și verde pentru fiecare fază de semafor, fapt caracteristic metodelor de conducere statice. În schimb, metodele de conducere în timp real, iau decizii asupra fazei următoare și timpului aferent, după fiecare fază de semafor, fapt ce face imposibil un comportament al contorului de timp după cum s-a prezentat mai sus. Această problemă se poate rezolva prin adăugarea de praguri de timp limită  $\theta$  de la care să înceapă funcționarea contorului. Astfel contorul va avea două stări (indiferent de culoarea semaforului): inactiv - afișează " $\geq \theta$  sec" și activ - afișează valoarea contorului decrementată cu o unitate la fiecare secundă. În acest fel se pot lua decizii în timp real fără a influența conducătorul auto prin neinformarea sa asupra apropierii momentelor de tranziție între culorile semaforului.

Pentru metodele de conducere în timp real, în care nu se cunosc exact timpii de semafor decât începând cu un anumit prag limită  $\theta$  după cum s-a arătat în paragraful anterior, plecând de la premisa că există un timp limită maxim  $\gamma$  în care un participant la trafic nu primește culoare verde (se utilizează pentru a evita situațiile de așteptare excesivă a anumitor participanți la trafic), este utilă adăugarea unui alt contor de timp pentru informarea asupra acestui fapt. Acest contor se inițializează cu valoarea de prag  $\gamma$  la tranziția de la culoarea verde la culoarea roșie a semaforului, este activ doar pe culoarea roșie și afișează valoarea contorului decrementată cu o unitate la fiecare secundă. Contorul devine inactiv în momentul în care metoda de conducere stabilește timpul exact până la schimbarea semaforului pe culoarea verde. Cu alte cuvinte acest contor informează asupra timpului maxim rămas până la servire, iar împreună cu primul contor descris în paragraful anterior, face posibilă informarea participanților la trafic în intersecțiile conduse prin metode în timp real, aproape în aceeași măsură în care o fac contoarele de timp acționate de metodele de conducere statică.

### 3.4. Principii de securitate în rețele de senzori wireless

#### 3.4.1. Introducere

Proiectarea rețelelor de senzori wireless înfruntă două mari probleme în zilele noastre: restricția asupra consumului de energie și securizarea informațiilor transmise în interiorul rețelei. Sistemul de conducere prezentat în teza de față intră în categoria SCADA/DCS (Supervisory Control And Data Acquisition/Distributed Control Systems) pentru care este cunoscută importanța securității și pentru care se caută activ soluții. Chiar dacă până în prezent au fost propuse mai multe protocoale de comunicare cum ar fi *SNEP*,  *$\mu$ TESLA*, *AODV*, *DSR* [110; 119], nici una nu poate garanta o securitate puternică, neimpunându-se ca standard în securizarea rețelelor de senzori wireless.

Nodurile rețelei de senzori fiind desfășurate în diferite medii, fără o configurare prealabilă a rețelei, ar trebui să comunice securizat între ele și să evite eventualii intruși. Din acest motiv, algoritmi criptografici ar trebui să fie de folos, dar din păcate sunt insuficienți pentru moment. Proiectantul rețelei de senzori trebuie să decidă între o securitate ridicată a rețelei, fapt ce implică o creștere a consumului de energie și o securitate scăzută cu un consum mic și implicit o durată de viață mai mare. De exemplu, utilizarea rețelelor de senzori în scopul detecției (incendii, inundații,

cutremure) necesită o validitate a informației nu mai mult de câteva secunde, suficient pentru ca informația să fie propagată către nodul de bază. În această situație, pe de o parte, nivelul de securitate a informației nu este ridicat, putând fi folosiți algoritmi de criptare cu cheie simetrică sau algoritmi de criptare cu cheie asimetrică, dar având dimensiuni reduse ale cheilor de criptare, iar pe de altă parte autentificarea este foarte importantă pentru a minimiza posibilitatea ca un atacator să trimită informații eronate.

În funcție de gradul de importanță a informațiilor transmise între nodurile rețelei de senzori wireless, transmisia se împarte în două categorii: securizată și nesecurizată [35]. Utilizând transmisie de date nesecurizată, nu se ține cont că informația transmisă între noduri ajunge la destinație nealterată sau nu, pentru că informația nu este relevantă pentru scopul rețelei de senzori (de exemplu, într-o rețea de senzori wireless de detecție a incendiilor, informația "nu incendiu" nu este importantă pentru că nu schimbă starea implicită a rețelei). Pe de altă parte, informația care va schimba starea rețelei și care poate cauza o anumită alarmă trebuie securizată foarte atent. De asemenea, rețeaua trebuie să fie capabilă de a recunoaște intrușii și să nu utilizeze informația recepționată de la aceștia.

În continuare vor fi prezentate principalele vulnerabilități ale rețelelor de senzori wireless și principalele metode de protejare împotriva atacurilor posibile.

#### **3.4.2. Vulnerabilități și metode de securizare**

Datorită comunicării wireless și a resurselor restrânse care stau la baza lor, rețelele de senzori wireless prezintă o serie de vulnerabilități de securitate. Câteva dintre aceste vulnerabilități vor fi enumerate în continuare:

- interceptare mesaje - mesajele transmise între noduri pot fi interceptate de către un eventual atacator (cunoscut în literatura de specialitate ca și "eavesdropping") dotat cu o antenă puternică,
- coruperea mesajelor - atacatorul interceptează mesajul trimis de la sursă către destinație, îl modifică și apoi trimite către destinație mesajul corupt (cunoscut în literatura de specialitate ca și "spoofing"),
- capturare nod - prin capturarea unui nod al rețelei de senzori, memoria sa este citită și eventual rescrisă, atacatorul având posibilitatea de a citi cheile criptografice și alte informații legate de rețeaua de senzori,
- adăugarea unui nod fals - prin adăugarea de către un atacator a unui nod în rețea, se urmărește introducerea de informații false sau coruperea anumitor noduri,
- funcționare eronată - o problemă destul de importantă în rețelele de senzori wireless este detectarea funcționării eronate și deosebirea de situațiile în care nodul este capturat,
- DOS (Denial of Services) - aceste tipuri de atacuri pot avea urmări grave asupra funcționării rețelei de senzori wireless, urmărind epuizarea resurselor și blocarea comunicării radio. Amintim câteva dintre atacurile din această categorie: "Wormholes", "Flooding", "Sinkholes", "Sybil attack",
- analiza traficului - un atacator poate determina structura rețelei de senzori prin urmărirea direcțiilor de propagare a mesajelor, chiar dacă acestea sunt criptate, importante sunt doar nodurile sursă și nodurile destinație.

Pornind de la arhitectura rețelei de senzori propusă se vor identifica principalele vulnerabilități ale acesteia, urmând a se căuta soluții de protecție. Având în vedere că doar nodurile de detecție dotate cu magnetometre funcționează pe baterii, problemele mari de securitate se rezumă în principal la aceste noduri. Funcționalitatea acestor

noduri de detecție este de a detecta prezența autovehiculelor, de a transmite valorile de detecție către nodurile învecinate și de a ruta informația primită de la nodurile vecine. În acest sens, identificăm următoarele posibile vulnerabilități/atacuri adresate rețelei de senzori propusă ca detector de trafic rutier, în ordinea descrescătoare a gravității lor:

- atacuri de tip DOS,
- capturarea nodurilor,
- coruperea mesajelor/funcționare eronată.

Celelalte tipuri de vulnerabilități/atacuri nu prezintă amenințări reale asupra rețelei de senzori propuse. În continuare vor fi prezentate câteva abordări de securizare a rețelei de senzori propuse, prin strategii de detecție a atacurilor de capturare a nodurilor și de corupere a mesajelor [2; 25; 26; 27; 141].

### Protocoale de comunicare în rețele de senzori wireless

Rețelele de senzori wireless se pot împărți după scopul lor în două categorii: generale sau dedicate. Nodurile din cadrul rețelelor cu caracter general, sunt construite pentru a fi reprogramate de fiecare dată când este necesar (pentru recalibrare sau pentru a fi folosite în alte rețele de senzori). Din păcate acest tip de arhitectură lasă o ușă larg deschisă atacurilor datorită proprietății lor de a fi reprogramate. Odată ce un atacator reușește să captureze un astfel de nod, va putea citi protocoalele de comunicare, cheile criptografice, memoria și va putea rescrie software-ul în scopuri distructive. Pe de altă parte, arhitectura nodurilor din cadrul rețelelor dedicate conferă robustețe, dar și costuri de implementare ridicate. În această situație, protocoalele de comunicare și cheile secrete sunt securizate în sistemul embedded, fără a lăsa posibilități de citire și rescriere a software-ului; eventualele încercări de acest gen acționând procesul de autodistrugere al nodului (tamperproof hardware)[56]. În cazul arhitecturii de uz general, odată ce un nod a fost capturat, rețelei de senzori îi va fi imposibil de a detecta dacă nodul este folosit pentru a asculta mesajele din rețea și pentru a le trimite mai departe către atacator. De asemenea, va fi foarte greu de detectat dacă nodul capturat face "spoofing".

În [56] se demonstrează cum EEPROM-ul și Flash-ul unui nod capturat poate fi citită în mai puțin de un minut și cheile de securitate extrase cu ușurință din memoria SDRAM. Pe baza acestor observații se poate afirma că dacă un atacator poate citi hardware-un unui nod, rămâne doar o problemă de timp până va găsi cheile de securizare și va putea intra în sistem. Evitarea capturării nodurilor este aproape imposibil de realizat datorită proprietății rețelelor de senzori de a funcționa wireless, în mare parte autonom și de a fi desfășurate în aproape orice mediu. Singura variantă de a securiza informațiile dintr-un nod capturat este de a evita extragerea acestora sau de a amâna pe cât posibil extragerea cheilor de securizare. În [90; 149] sunt prezentate strategii în acest sens, propunându-se desfășurarea nodului cu chei de securizare predistribuite, iar mai târziu ștergerea acestora și înlocuirea lor cu altele [16; 39].

Security Protocols for Sensor Networks (SPINS), conține două blocuri de securizare: *SNEP* și *μTesla*. *SNEP* oferă confidențialitate, autentificare bidirecțională și prospețimea datelor. *μTesla* este un protocol care asigură transmisie de tip broadcast autentificată. Sensor Network Encryption Protocol (*SNEP*) oferă avantaje ca securitate semantică (algoritmi de criptare asimetrici), autentificare și prospețimea datelor cu numai opt bytes adăugați la mesaj [111]. Pentru autentificare, protocolul utilizează un contor partajat de către emițător și receptor (în acest fel nu este necesară transmiterea acestei informații împreună cu mesajul, contorul fiind incrementat odată

cu fiecare mesaj transmis). Protocolul de broadcast  $\mu T esla$  se bazează de asemenea pe metoda de criptare asimetrică, obținând asimetria prin întârzierea dezvoltării cheilor simetrice. Pentru a transmite un pachet de date, emițătorul calculează codul de autentificare (MAC) pe baza unei chei secrete, la un moment dat, și apoi trimite pachetul de date. După ce pachetul a ajuns la destinație, se verifică dacă cheia secretă nu a fost dezvăluită încă, astfel înseamnă că pachetul este sigur și poate fi salvat în buffer. La timpul la care emițătorul publică cheia secretă, codul de autentificare (MAC) este deja salvat în buffer, este calculat și verificat dacă este autentic [111]. Protocolul *AODV* (Ad hoc On-demand Distance Vector) și protocolul *DSR* (Dynamic Source Routing), sunt cercetate de către IETF (Internet Engineering Task Force) în vederea utilizării ca și standard de comunicare în rețelele de senzori wireless, fiind foarte utile pentru traficul în rețea dar nu sunt suficient de sigure (a se vedea Tabelul 3.3) [119].

Tabelul 3.3: Caracteristici ale atacurilor DSR și AODV

Nume atac	DSR	AODV
Spoofing	da	da
Modificarea contoarelor de rutare	da	nu
Modificarea surselor de rutare	nu	da
Tunneling	da	da

TinySec este un protocol de comunicare dezvoltat în cadrul UC Berkeley și se adresează arhitecturilor rețelelor de senzori cu resurse extrem de limitate. Utilizează criptarea semantică (asimetrică) și oferă două variante: criptare autenticată (TinySec-AE) și autentificare simplă (TinySec-Auth) [75]. Dar nici acest protocol nu este suficient de sigur, fiind vulnerabil atacurilor de tip DOS (Denial of Services) cum ar fi: "Selective forwarding", "Sinkholes", "Sybil", "Wormholes" și "Hello flood" [75].

Cel mai greu de detectat atac este o combinație între "Sinkhole" și "Wormhole". Atacul "Sinkhole" încearcă să atragă pachete de date de la nodurile vecine, având ca scop eliminarea lor din procesul de rutare. Atacul "Wormhole" se realizează cu ajutorul a două noduri străine care comunică între ele pe o bandă de frecvență necunoscută de rețeaua de senzori wireless, unul dintre noduri este plasat lângă nodul de bază și altul lângă nodul țintă care urmează a fi atacat. În acest fel nodurile aflate la distanță unele de altele sunt făcute să "creadă" că sunt apropiate. Acest atac este foarte puternic pentru că nu necesită capturarea nodurilor rețelei de senzori, ci doar instalarea a două noduri străine, unul lângă stația de bază și unul lângă țintă. Două scheme au fost propuse pentru detectarea acestui tip de atac, dar nici unul nu s-a dovedit suficient de eficace [147]. Prin atacul "Sybil" [42], un nod străin adună identitățile mai multor noduri din rețeaua de senzori wireless și apoi își va schimba propria identitate cu identitatea grupului respectiv. Atacul de tip "Hello flood", pe cât este de simplu pe atât este de nociv, trimițând mesaje de tip "Hello" la cât mai multe noduri posibile, la intervale de timp cât mai mici, are ca scop principal reducerea duratei de viață a bateriilor.

### Detecția nodurilor atacate și a intruziunilor

Detecția anomaliilor și a intrușilor într-o rețea de senzori wireless este de o importanță majoră. După detectarea problemelor, rețeaua de senzori poate lua, după caz, decizii de a investiga, a căuta și a șterge nodurile atacate sau străine. Atacurile care doar ascultă mesajele transmise în rețeaua de senzori nu reprezintă o problemă pentru anumite tipuri de rețele (detecție, raportare) datorită duratei mici de valabilitate a mesajelor. Cele mai importante probleme de securitate ale rețelelor de senzori wireless sunt atacurile de tip "spoofing" (un nod strain se mascază ca și un nod

din rețea, falsifică mesajele primite și le trimite mai departe) și de tip DOS (Denial of Services).

În literatura de specialitate există propuneri de evitare a atacurilor DOS, un punct de vedere interesant este că nodurile vecine unei zone în care se raportează blocarea rețelei de comunicare să realizeze o graniță în jurul acesteia, să scoată nodurile respective din topologia de rutare și să ruteze pachetele prin rețea utilizând această graniță [145]. Detectarea capturării nodurilor poate fi realizată simplu prin atașarea unui modul GPS fiecărui nod, iar în momentul în care se detectează schimbarea coordonatelor GPS, se pot lua decizii locale, după caz, cum ar fi de ștergerea memoriei, ștergerea cheilor de securitate și chiar autodistrugerea echipamentelor hardware. Din păcate, echipând fiecare nod al rețelei cu receptoare GPS, costurile de implementare cresc foarte mult, făcând utilizarea acestei soluții inefabilă în majoritatea cazurilor.

O problemă delicată este deosebirea intruziunilor în rețelele de senzori (prin capturarea nodurilor) de funcționarea defectuoasă a anumitor noduri prin transmiterea de informații eronate. În anumite situații funcționarea defectuoasă se poate detecta prin metode de comparare a valorilor raportate de către nodul vizat cu valorile raportate ale nodurilor vecine (a se vedea Figura 3.18).

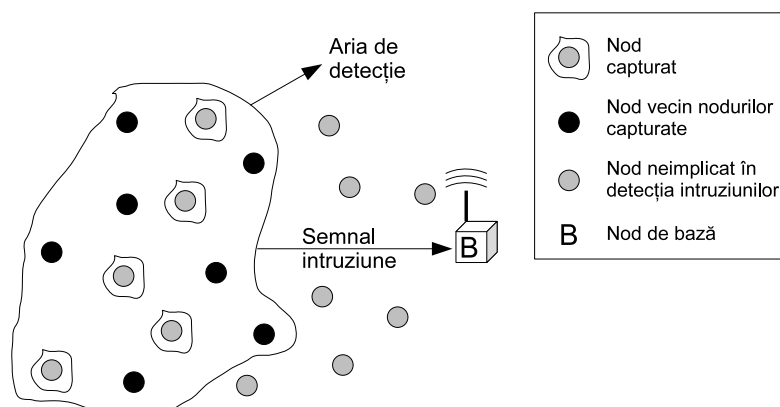


Figura 3.18: Intruziune în rețea de senzori

Utilizând datele recepționate de la nodurile vecine pot fi estimate valorile corecte aferente nodului monitorizat, apoi detectarea funcționării defectuoase se realizează prin compararea valorilor raportate cu cele estimate [25; 43]. Aceste calcule estimative, necesitând putere de calcul se efectuează de obicei la nivelul nodului de bază al rețelei de senzori sau după caz la orice nod cu putere de calcul, legat la rețeaua de curent. Chiar dacă în literatura de specialitate au fost propuse multe metode de detecție a intruziunilor, nici una dintre ele nu oferă rezultate suficient de puternice pentru rețele de senzori în general (diferite tipuri de arhitecturi și cazuri speciale). Rezultatele dovedesc că o metodă generală de detecție a intruziunilor este greu de implementat datorită restricțiilor ridicate, lăsând astfel loc metodelor dedicate cu o mai bună aplicabilitate asupra cazurilor particulare.

În ceea ce privește rețeaua de senzori propusă ca detector de trafic, capturarea nodurilor de detecție (a magnetometrelor) este relativ greu de realizat datorită faptului că acestea sunt plasate în carosabil. Chiar dacă un nod este capturat, durata de timp scursă de la capturare și până la replasarea sa în carosabil este suficientă pentru



deteția acestei acțiuni prin-o metodă de supraveghere cum ar fi camerele video și luarea măsurilor necesare de a reprograma nodul respectiv sau de a-l elimina temporar din dectia traficului. Singura problemă reală a rețelei de senzori propuse rămâne atacul de tip "spoofing" datorită faptului că un atacator ar putea plasa un nod străin în vecinătatea unui nod țintă din rețea, interceptând mesajele transmise de acesta și transmițându-le mai departe sub identitatea nodului țintă dar cu conținut modificat. După cum s-a arătat în paragrafele anterioare, rămâne doar o problemă de securizare a protocoalelor de comunicare, în vederea evitării acestui tip de atac ținând seamă de parametri rețelei de senzori în cauză.

### 3.5. Concluzii

În acest capitol a fost propusă o arhitectură de conducere ierarhizată a traficului rutier urban utilizând o rețea de senzori wireless ca detector de trafic. De asemenea s-a făcut o descriere a rețelei de senzori propusă spre utilizare ca detector de trafic, insistând asupra problemelor de securitate.

În prima parte au fost descrise cele trei niveluri ale arhitecturii de conducere ierarhizată multiagent propuse, nivelul local, nivelul zonal și nivelul metropolitan. A fost prezentat nivelul senzorial, de dectie a autovehiculelor și a pietonilor și modul de comunicare între agenții care alcătuiesc structura de conducere ierarhizată. Agentul de conducere local la nivel de intersecție a fost descris printr-o paralelă cu agentul de circulație din intersecție, urmând a fi detaliat în capitolul următor. Au fost prezentate caracteristici generale ale nivelului zonal și metropolitan, nivelul zonal urmând a fi detaliat în capitolele următoare.

În partea a doua a fost formulată o definiție a rețelelor de senzori wireless pornind de la larga aplicabilitate practică a acestora. S-a realizat o descriere generală, apoi pe baza studiului bibliografic s-a prezentat evoluția acestei tehnologii de la începuturi și până în prezent. Au fost prezentate caracteristici generale ale rețelelor de senzori wireless, utilitatea și aplicabilitatea lor în diferite domenii, făcând apoi legătura cu domeniul conducerii traficului rutier urban prin prezentarea tipurilor de senzori utilizați în managementul traficului modern.

Au fost descrise componentele rețelei de senzori wireless propuse și rolul acestora în tot ansamblul de dectie. Au fost extinse abordări curente din literatura de specialitate prin adăugarea de ecrane de informare de-a lungul carosabilului și integrarea acestora cu rețeaua de senzori wireless. De asemenea s-a prezentat utilitatea ecranelor de informare prin extinderea proprietăților sistemelor de semaforizare utilizate în prezent.

A fost pusă apoi problema securizării rețelei de senzori wireless, prin descrierea vulnerabilităților și a metodelor de protecție. Securitatea în rețelele de senzori wireless este una dintre problemele importante ale acestei tehnologii, până în prezent neexistând metode puternice și standardizate de obținere a securității pentru rețele cu caracter general.

În acest capitol s-a realizat o privire de ansamblu asupra întregului sistem de conducere, schițând principalele sale componente și interacțiunile dintre ele. Au fost prezentate de asemenea avantajele utilizării tehnologiei rețelelor de senzori wireless în dectia de trafic rutier urban. Capitolul reprezintă un plan simplu al tezei de față, o bază tehnică pentru implementările descrise în capitolele următoare, având ca rol principal combinarea strategiilor de conducere ierarhizată multiagent în traficul rutier urban cu tehnologia rețelelor de senzori wireless.

În opinia autorului principalele contribuții aferente capitolului 3 sunt următoarele:

- proiectarea unei arhitecturi de conducere a traficului rutier urban ierarhizată pe trei niveluri,
- utilizarea unei rețele de senzori wireless atât ca detector de trafic, cât și ca sistem de informare a participanților la trafic,
- realizarea unei paralele între agentul de conducere locală LTA și agentul de circulație din intersecție,
- definirea, prezentarea istoricului și a aplicabilității rețelelor de senzori wireless pe baza studiului bibliografic,
- descrierea componentelor rețelei de senzori wireless propusă ca detector de trafic rutier urban,
- extinderea abordărilor curente în semaforizarea rutieră urbană prin adăugarea de ecrane de informare de-a lungul carosabilului și integrarea acestora cu rețeaua de senzori wireless,
- extinderea sistemelor de semaforizare utilizate în prezent prin conectarea la sistemul de conducere a sistemului de informare suplimentară în timp real a participanților la trafic asupra condițiilor de trafic și asupra timpilor de așteptare,
- realizarea unei sinteze a posibilităților de securizare a rețelei de senzori wireless prin descrierea vulnerabilităților și a metodelor de protecție.

## 4. CONDUCEREA LOCALĂ LA NIVEL DE INTERSECȚIE SEMAFORIZATĂ

### 4.1. Introducere

Agentul de trafic local (Local Traffic Agent, LTA), a fost implementat la nivel de intersecție ca un agent de conducere în timp real bazat pe cunoștințe, după cum se arată și în Figura 4.1. Cu alte cuvinte, LTA încearcă prin metode de inteligență artificială să substituie eventuala necesitate a prezenței agentului de circulație într-o intersecție semaforizată în vederea îmbunătățirii fluidizării traficului rutier. Deciziile de conducere a traficului autovehiculelor și pietonilor într-o intersecție se vor lua doar la nivelul LTA, pe baza informațiilor de trafic în timp real, fără alte coordonări din exterior.

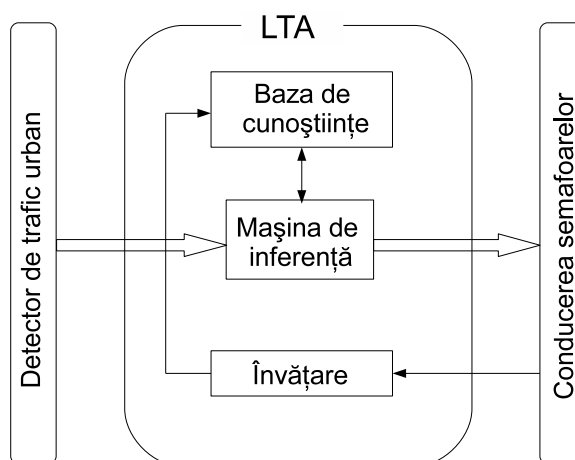


Figura 4.1: Schema bloc de principiu a arhitecturii LTA

Soluția propusă se sprijină în primul rând pe stabilirea pentru participanții la trafic a unui prag limită de așteptare fără a primi culoarea verde a semaforului și introducerea acestui prag în metoda de conducere alături de informațiile de trafic obținute în timp real de la sistemul de detecție. Nu se propune extinderea metodei *Split* [104], care împarte procentual timpul de verde al întregului ciclu pentru fiecare fază de semafor în parte, în funcție de necesitate. Această strategie de conducere este dezavantajoasă în cazurile în care o fază de semafor deja servită trebuie să

aștepte până sunt servite și restul fazelor împreună cu care formează un ciclu de semafor complet, chiar dacă timpul de verde necesar autovehiculelor aflate în cozile de așteptare este mult mai mic decât timpul alocat de către metoda de conducere - se pierde în acest fel timp de verde prețios. Soluția de conducere propusă are o abordare diferită prin setarea timpilor de verde pentru fazele de semafor în funcție de condițiile de trafic monitorizate în timp real și în funcție de un anumit prag de timp limită apriori stabilit pentru fiecare grup de evenimente de trafic.

Rezultatele obținute prin simularea sistemului de transport în urma utilizării algoritmului de conducere propus la nivel de agent local, au fost comparate atât cu rezultatele obținute prin utilizarea conducerii statice de tip *SplitCycle* la nivel de intersecție, cât și cu rezultatele obținute utilizând algoritmi de optimizare liniară și pătratică. Prin conducere statică se înțelege o setare apriori a timpilor de verde pentru fiecare fază de semafor, fără a ține seama de date de trafic în timp real, ci doar de observații generale de trafic înregistrate de-a lungul timpului și de necesități de fluidizare prestabilite. Algoritmii de optimizare utilizați vor fi prezentați în detaliu în finalul acestui capitol. Pentru simularea atât a comportamentului sistemului de transport în urma utilizării atât a algoritmului de conducere propus cât și a altor algoritmi în diferite condiții de trafic, s-a implementat un simulator de trafic de tip macroscopic. De asemenea, au fost definiți trei indicatori de calitate cu ajutorul cărora au fost evaluate rezultatele algoritmilor de conducere și au fost scoase în evidență îmbunătățirile aduse de către algoritmul propus. Studiile de caz definite modelează pentru diferite condiții de trafic, atât intersecții cu geometrie simplă, cât și cinci intersecții cu geometrie complexă dintr-o zonă centrală a orașului Timișoara. În acest fel, algoritmul de conducere propus este testat în multe și diferite situații de trafic rutier la nivel de intersecție semaforizată, iar comportamentul său este comparat atât calitativ, cât și cantitativ cu comportamentul altor metode de conducere din literatura de specialitate.

## 4.2. Strategii de modelare a sistemului de conducere locală la nivel de intersecție

### 4.2.1. Modelarea procesului de schimbare a semafoarelor

Cu ajutorul simulatorului implementat pot fi definite intersecții cu grad ridicat de complexitate fără restricții referitoare la numărul străzilor, a benzilor acestora și a trecerilor de pietoni. Modelarea procesului de schimbare a culorilor semafoarelor într-o intersecție fără a ține seama de gradul de complexitate a geometriei acesteia s-a realizat utilizând o rețea Petri. Motivul pentru care s-au folosit rețelele Petri pentru modelare este că rețelele Petri oferă suportul matematic necesar pentru descrierea procesului de schimbare a semafoarelor într-o intersecție, iar conducerea traficului rutier într-o intersecție realizându-se în timp discret, principiul de funcționare bazat pe stări și tranziții s-a dovedit a fi o soluție viabilă.

Procesul de schimbare a culorilor semafoarelor prezentat în cele ce urmează are două mari avantaje:

- spre deosebire de succesiunea ciclică a fazelor de semafor caracteristică metodelor de conducere de tip *Split*, procesul propus de schimbare a culorilor semafoarelor are caracter general bazat pe informațiile de trafic în timp real, fără a se cunoaște în prealabil succesiunea fazelor de semafor,
- după terminarea unei anumite faze de semafor, faza următoare va fi aleasă de către soluția de conducere din mulțimea tuturor fazelor de semafor, inclusiv cea care tocmai s-a încheiat.

În continuare vor fi descrise principalele proprietăți de care s-a ținut seama în modelarea modalităților de traversare a intersecției și de cuplare pe aceeași fază de semafor a mai multor evenimente de trafic. În primul rând, în procesul de modelare au fost luate în considerare atât autovehiculele, cât și pietonii. Semaforizarea din intersecție se consideră a fi realizată cu ajutorul semafoarelor cu trei culori (roșu, galben, verde) și a altor informații adiționale legate de condițiile de trafic. Intersecțiile monitorizate pot fi prevăzute cu scenarii diferite de semaforizare în funcție de necesitate, iar traseele de traversare a unei intersecții sunt grupate după proprietatea de a nu se intersecta reciproc oricare două trasee aparținând aceluiași grup de evenimente de trafic. O anumită fază de semafor servește doar traseele care aparțin aceluiași grup, iar alegerea fazei următoare se realizează în funcție de un algoritm de decizie în timp real. Lungimile cozilor de așteptare de pe fiecare bandă de mers sunt considerate intrări recepționate în timp real de la sistemul de detecție - în situația de față, rețeaua de senzori wireless.

Modelul Petri stea prezentat în Figura 4.2 descrie schimbul culorilor semafoarelor într-o intersecție simplă cu patru străzi. Acest model poate fi extins ușor pentru o intersecție cu geometrie complexă și cu structură de semaforizare complicată. Componentele modelului Petri prezentat în Figura 4.2 sunt următoarele:

- $S_i$  - stare Petri - fază de verde pentru grupul de evenimente  $G_i$  (a se vedea paragraful următor),
- $t_i^v$  - tranziție Petri - se termină culoarea verde a semaforului pentru grupul de evenimente  $G_i$ ,
- $t_i^g$  - tranziție Petri - se termină culoarea galben înainte de apariția culorii verzi a semaforului pentru grupul de evenimente  $G_i$ ,
- $LTA$  - stare Petri - partea decizională a agentului de conducere local,
- $Q_i$  - lungimile cozilor de așteptare primite de la rețeaua de senzori wireless.

Graful modelului Petri este un 3-tuplu  $(S, T, A)$ , în care  $S = \{S_1, \dots, S_i, \dots\}$  este mulțimea stărilor,  $T = \{t_1^v, t_1^g, \dots, t_i^v, t_i^g, \dots\}$  este mulțimea tranzițiilor, iar  $A = (S \times T) \cup (T \times S)$  este mulțimea arcelor orientate care conectează stările de tranziții și invers. Urmărind Figura 4.2 se poate observa că după executarea unei tranziții  $t_i^v$  agentul local  $LTA$  preia controlul și decide care dintre fazele de semafor  $S_i$  vor fi servite cu culoarea verde la pasul următor. De asemenea se poate observa că sistemul permite unității decizionale  $LTA$  alegerea pentru servire cu verde a oricărei faze de semafor indiferent de faza servită anterior, fapt care asigură o varietate mare de decizie a sistemului.

#### 4.2.2. Abordări în modelarea matematică a procesului condus reprezentat de traficul rutier urban la nivel de intersecție semaforizată prin monitorizarea cozilor de așteptare

În acest capitol va fi descris modelul propus de monitorizare a cozilor de așteptare la nivel de intersecție. Într-o primă parte se va realiza un studiu critic asupra unui model anterior propus de către De Shutter [32], urmând ca în partea a doua să se realizeze o extindere a acestui model în vederea asigurării compatibilității cu arhitectura de conducere propusă în Capitolul 3.

##### A) Studiu critic asupra modelului DeSchutter

În cele ce urmează va fi prezentat un studiu critic asupra unui model adecvat conducerii traficului rutier în intersecțiile semaforizate, propus de către De Shutter

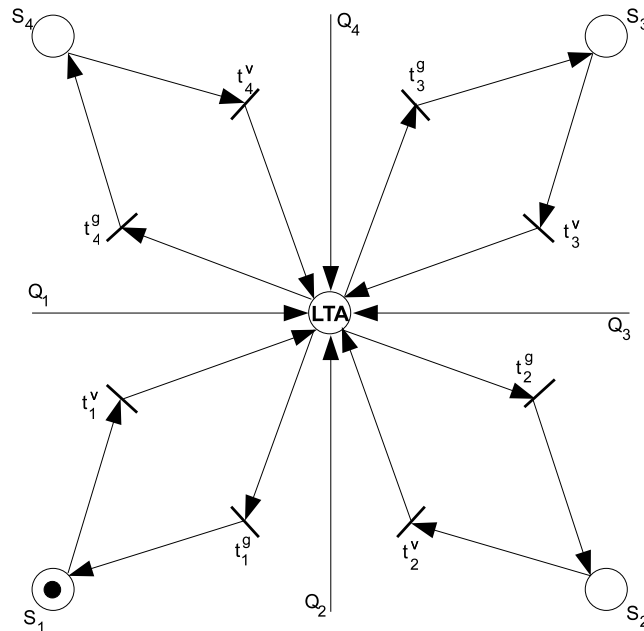


Figura 4.2: Modelare Petri a procesului de schimbare a semafoarelor într-o intersecție

[32]. Acest model descrie o intersecție semaforizată simplă monitorizând doar autovehiculele participante la trafic, fără a ține seama de pietoni. Analizând modelul menționat, a fost dezvoltat un nou model [4] cu un grad sporit de generalitate având următoarele facilități suplimentare:

- monitorizarea pietonilor,
- modelarea intersecțiilor indiferent de numărul de străzi care intră și ies din aceasta,
- schimbarea culorilor semaforului evitându-se cozi mari de așteptare pentru anumite benzi,
- introducerea în model a fazei culorii galben ca fază intermediară după culoarea roșie și înainte de culoarea verde a semaforului.

În continuare vor fi prezentate critic aspecte privind modelul DeSchutter, ținând seama și de alte modele dedicate conducerii traficului rutier [14; 33; 57; 59; 76; 139]. Conform cu [32] se acceptă următoarele notații:

- $\delta_a$  - timpul necesar culorii galbene a semaforului măsurat în secunde,
- $\delta_k = t_{k+1} - t_k$  - timpul măsurat în secunde dintre schimbarea culorilor semaforului din verde în roșu sau invers,
- $l_i(t)$  - lungimea cozii de așteptare (numărul de autovehicule în așteptare) pe banda  $L_i$  măsurată în metri,

- $\bar{\lambda}_i^{(k)} = \text{const}, \forall t \in [t_k, t_{k+1})$  - viteza medie de sosire a autovehiculelor pe banda  $L_i$  în intervalul de timp  $[t_k, t_{k+1})$ , măsurată în [m/s],
- $\bar{\mu}_i^{(k)} = \text{const}, \forall t \in [t_k, t_{k+1})$  - viteza medie de plecare a autovehiculelor de pe banda  $L_i$  în intervalul de timp  $[t_k, t_{k+1})$ , măsurată în [m/s],
- $\bar{\kappa}_i^{(k)} = \text{const}, \forall t \in [t_k - \delta_a, t_k)$  - viteza medie de plecare a autovehiculelor de pe banda  $L_i$ , pe culoarea galben a semaforului, măsurată în [m/s],
- $t$  - variabila de timp.

În Figura 4.3 este prezentată modelarea unei intersecții simple. Pentru culoarea roșie a semaforului a benzii  $L_1$ , avem următoarele ecuații:

$$l_1(t_{2k+1}) = l_1(t_{2k}) + \bar{\lambda}_1^{(2k)} \delta_{2k}, \quad (4.1)$$

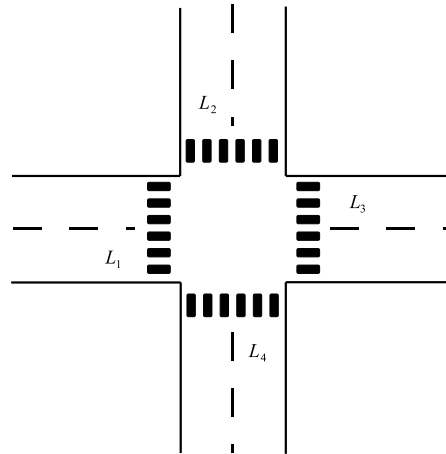


Figura 4.3: Schema de principiu a unei intersecții simple

Pentru culoarea verde a semaforului a benzii  $L_1$ , autovehiculele sosesc și pleacă din coada de așteptare în intervalul de timp  $t \in [t_{2k+1}, t_{2k+2} - \delta_a)$ . Prin urmare poate fi aplicată relația:

$$\frac{l_1(t)}{t_{2k+2} - t_{2k+1} - \delta_a} = \begin{cases} \bar{\lambda}_1^{(2k+1)} - \bar{\mu}_1^{(2k+1)}, & l_1(t) > 0 \\ 0, & l_1(t) \leq 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

În funcție de vitezele de plecare și de sosire a autovehiculelor, se poate ajunge la situația în care toate autovehiculele așteptând în coadă, cât și toate autovehiculele sosite în timpul culorii verzi a semaforului, vor putea trece prin intersecție. În această situație, lungimea cozii de așteptare va fi egală cu zero.

Pentru culoarea galbenă a semaforului a benzii  $L_1$ , autovehiculele sosesc și de asemenea și pleacă din intersecție, dar vitezele de sosire și de plecare sunt diferite față de vitezele aferente culorii roșu/verde a semaforului, în intervalul de timp  $t \in [t_{2k+2} - \delta_a, t_{2k+2})$ :

$$l_1(t_{2k+2} - \delta_a) = \max(l_1(t_{2k+1}) + (\bar{\lambda}_1^{(2k+1)} - \bar{\mu}_1^{(2k+1)})(\delta_{2k+1} - \delta_a), 0) \quad (4.3)$$

Din ecuațiile lungimii cozii de așteptare pe culoarea verde a semaforului  $[t_{2k+1}, t_{2k+2} - \delta_a)$  și respectiv pe culoarea galbenă a semaforului  $[t_{2k+2} - \delta_a, t_{2k+2})$ , se obține lungimea cozii de așteptare la momentul  $t_{2k+2}$ :

$$\begin{aligned} l_1(t_{2k+2}) &= \max(l_1(t_{2k+2} - \delta_a) + (\bar{\lambda}_1^{(2k+1)} - \bar{\kappa}_1^{(2k+1)})\delta_a, 0) \\ &= \max(l_1(t_{2k+1}) + (\bar{\lambda}_1^{(2k+1)} - \bar{\mu}_1^{(2k+1)})\delta_{2k+1} + (\bar{\mu}_1^{(2k+1)} - \bar{\kappa}_1^{(2k+1)})\delta_a, (\bar{\lambda}_1^{(2k+1)} - \bar{\kappa}_1^{(2k+1)})\delta_a, 0) \end{aligned} \quad (4.4)$$

Datorită faptului că se pot scrie aceleași ecuații pentru celelalte trei benzi, definind vectorul de stare (4.5):

$$\mathbf{x}_k = [ l_1(t_k) \quad l_2(t_k) \quad l_3(t_k) \quad l_4(t_k) ]^T, \quad (4.5)$$

se obțin ecuațiile de stare ale modelului matematic aferent unui ciclu de semafor complet:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{2k+1} &= \max(\mathbf{x}_{2k} + \mathbf{b}_1^{2k} \delta_{2k} + \mathbf{b}_3^{2k} \delta_a, \mathbf{b}_2^{2k} \delta_a) \\ \mathbf{x}_{2k+2} &= \max(\mathbf{x}_{2k+1} + \mathbf{b}_1^{2k+1} \delta_{2k+1} + \mathbf{b}_3^{2k+1} \delta_a, \mathbf{b}_2^{2k+1} \delta_a) \end{aligned} \quad (4.6)$$

în care  $\mathbf{b}_1^k, \mathbf{b}_2^k, \mathbf{b}_3^k$ , sunt vectori de perturbație calculați din vitezele de sosire și de plecare a autovehiculelor la momentul  $t_k$ , iar  $\mathbf{0} = [0 \dots 0]^T \in \mathbb{R}^4$ . Din relația (4.6) se observă că ecuațiile de stare ale modelului includ atât variabile de comandă  $\delta_{2k}, \delta_a$ , cât și variabile de perturbație  $\bar{\lambda}_i^{(2k)}, \bar{\mu}_i^{(2k)}, \bar{\kappa}_i^{(2k)}$ , în care  $k$  este indexul ciclului de semafor și  $i = \overline{1,4}$  este indexul fazei de semafor.

Ecuația de ieșire a modelului este definită în continuare:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{x}_k. \quad (4.7)$$

Vectorii intrărilor de perturbație au expresiile:

$$\begin{aligned} \mathbf{b}_1^{2k} &= [ \lambda_1 & 0 & \lambda_3 & 0 ]^T \\ \mathbf{b}_2^{2k} &= [ 0 & \bar{\lambda}_2^{(2k)} - \bar{\mu}_2^{(2k)} & 0 & \bar{\lambda}_4^{(2k)} - \bar{\mu}_4^{(2k)} ]^T \\ \mathbf{b}_3^{2k} &= [ 0 & \bar{\mu}_2^{(2k)} - \bar{\kappa}_2^{(2k)} & 0 & \bar{\mu}_4^{(2k)} - \bar{\kappa}_4^{(2k)} ]^T \\ \mathbf{b}_1^{2k+1} &= [ \lambda_1 & 0 & \lambda_3 & 0 ]^T \\ \mathbf{b}_2^{2k+1} &= [ 0 & \bar{\lambda}_2^{(2k+1)} - \bar{\mu}_2^{(2k+1)} & 0 & \bar{\lambda}_4^{(2k+1)} - \bar{\mu}_4^{(2k+1)} ]^T \\ \mathbf{b}_3^{2k+1} &= [ 0 & \bar{\mu}_2^{(2k+1)} - \bar{\kappa}_2^{(2k+1)} & 0 & \bar{\mu}_4^{(2k+1)} - \bar{\kappa}_4^{(2k+1)} ]^T \end{aligned} \quad (4.8)$$

Modelul este de tip Intrare-Stare-Ieșire neliniar, multivariabil la intrare și ieșire (MIMO) și are următoarele componente:

- *intrări*: mărimi de comandă  $\delta_{2k}, \delta_a$  și mărimi de perturbație  $\bar{\lambda}_i^{(2k)}, \bar{\mu}_i^{(2k)}, \bar{\kappa}_i^{(2k)}$ , în care  $k$  este indexul ciclului de semafor și  $i = \overline{1,4}$  este indexul fazei de semafor,
- *stări*: lungimile cozilor de așteptare  $x_{2k+j}$ , în care  $k$  este indexul ciclului de semafor și  $j$  este indexul fazei de semafor,
- *ieșiri*: vectorul de ieșire  $\mathbf{y}_k$  este egal cu vectorul de stare  $\mathbf{x}_k$ , în care  $k$  este indexul ciclului de semafor.

Principalele *dezavantaje* ale modelului (4.6),(4.7),(4.8) sunt următoarele:

- este aplicabil doar în cazul intersecțiilor simple cu număr simetric de străzi care intră și ies din intersecție, acest caz fiind rar întâlnit în traficul urban al zilelor noastre;



- virajul la stânga pe culoarea verde a semaforului este posibil doar dacă nici un autovehicul din sens opus nu intră în intersecție cu scopul de a se deplasa drept înainte. Această situație ar trebui tratată separat, evitându-se astfel cozi mari de așteptare pentru virajul la stânga, lucru nepermis de restricțiile modelului de față;
- culoarea galbenă a semaforului ar putea fi inclusă în model și ca fază de tranziție între roșu și verde informând conducătorii auto că semaforul va schimba culoarea în verde imediat, având ca scop câștigarea de secunde importante la pornirea de pe loc;
- pietonii nu sunt incluși în acest model, fiind inutilizabil în intersecțiile în care este necesară conducerea traficului rutier ținându-se seama și de numărul de pietoni care așteaptă să traverseze intersecția. În jurul orelor de vârf în marile orașe, și nu numai, un număr însemnat de pietoni au nevoie să traverseze de pe un trotuar pe altul. Dacă nu există un pasaj subteran sau aerian, atunci cu siguranță în acele locuri este necesară instalarea unui semafor pentru pietoni și includerea acestuia în modelul intersecției.

Modelul îmbunătățit propus va fi descris în detaliu în cele ce urmează și va include: monitorizarea pietonilor, acceptarea intersecțiilor generale cu geometrii complexe (număr variabil de străzi care intră și ies din intersecție), posibilitatea schimbării culorilor semaforului evitând cozi mari de așteptare pentru anumite benzi de mers prin acceptarea de informații de trafic în timp real, și includerea culorii galbene între culorile roșu și verde ale semaforului. Acest nou model a fost publicat în [4].

#### **B) O nouă abordare privind modelarea traficului rutier urban la nivel de intersecție semaforizată utilizând rețele de senzori wireless ca detector de trafic**

În continuare va fi prezentat un model îmbunătățit față de modelul DeSchutter. Partea de modelare este foarte importantă. În studiul de față oferă suportul matematic pentru modelarea traficului rutier în vederea implementării cu succes a soluțiilor de conducere la nivel de intersecție. Folosind o rețea de senzori wireless [3] ca detector de trafic, modelul poate recepționa în timp real informații precise de trafic, direct proporțional cu numărul de noduri ale rețelei, oferind un grad ridicat de precizie comparativ cu modelele care se bazează în deosebi pe predicție. Condițiile de funcționare a modelului propus pornesc de la condițiile de trafic rutier și de la structura intersecției modelate.

Avantajele modelului propus [4] sunt:

- monitorizarea atât a autovehiculelor cât și a pietonilor,
- posibilitatea de extindere la nivel de zonă urbană sau chiar la nivel de oraș,
- gradul ridicat de complexitate a structurii intersecțiilor monitorizate,
- culorile semafoarelor se schimbă în funcție de grupuri de evenimente (benzi de mers sau treceri de pietoni) care nu se intersectează reciproc [3].

Pentru o mai bună înțelegere a modelului propus, în cele ce urmează va fi descrisă modelarea unei intersecții cu patru străzi, fără restricție la numărul de benzi de mers, fiecare stradă având cel puțin o bandă pentru viraj la stânga, pentru viraj la dreapta și respectiv pentru mers drept înainte. În final, modelul va fi generalizat indiferent de numărul de străzi care intră și ies din intersecție.

În descrierea modelului matematic vor fi utilizate următoarele notații[3]:

- $IN_i$  - strada numărul  $i$  intră în intersecție,
- $OUT_i$  - strada numărul  $i$  iese din intersecție,
- $IN_iOUT_j$  - eveniment de trafic indicând faptul că autovehiculele intră în intersecție de pe strada numărul  $i$  și părăsesc intersecția pe strada numărul  $j$  (independent de numărul de benzi ale străzilor),
- $C_i$  - eveniment de trafic indicând faptul că pietonii necesită traversarea străzii  $i$ .

Se definește mulțimea posibilelor evenimente de trafic dintr-o intersecție:

$$E = \{IN_iOUT_j | i = \overline{1, nrIN}, j = \overline{1, nrOUT}\} \cup \{C_k | k = \overline{1, nrC}\}, \quad (4.9)$$

în care:

- $nrIN$  - numărul de străzi care intră în intersecția dată,
- $nrOUT$  - numărul de străzi care ies din intersecție,
- $nrC$  - numărul de treceri de pietoni din intersecție.

Evenimentele de trafic care nu se intersectează reciproc vor fi grupate și vor avea aceeași culoare a semaforului la un moment dat. Pentru fiecare grup de evenimente  $G_i$ , se va nota cu  $v_i(t)$  lungimea cozilor de așteptare corespunzătoare autovehiculelor pentru toate benzile din grup (înlocuind notația  $l_i(t)$  din modelul anterior) și cu  $p_i(t)$  lungimea cozilor de așteptare (exprimată în număr de pietoni) pentru toate trecerile de pietoni aparținând grupului  $i$  la momentul  $t$ . Se vor păstra notațiile modelului anterior și variabilele macroscopice după cum urmează:

- $\delta_a \in [1, 5]$  - timpul necesar culorii galben a semaforului măsurat în secunde,
- $\delta_k = t_{k+1} - t_k \in \mathbb{N}^+$  - timpul dintre schimbarea culorilor semaforului din verde în roșu sau invers,
- $l_i(t)$  - lungimea cozii de așteptare (numărul de autovehicule în așteptare) pe strada  $L_i$  măsurată în metri,
- $\bar{\lambda}_i^{(k)} = const, \forall t \in [t_k, t_{k+1}), \bar{\lambda}_i^{(k)} \in \mathbb{N}$  - viteza medie de sosire a autovehiculelor pe benzile grupului  $G_i$  în intervalul de timp  $[t_k, t_{k+1})$ , măsurată în [m/s],
- $\bar{\mu}_i^{(k)} = const, \forall t \in [t_k, t_{k+1}), \bar{\mu}_i^{(k)} \in \mathbb{N}$  - viteza medie de plecare a autovehiculelor de pe benzile grupului  $G_i$  în intervalul de timp  $[t_k, t_{k+1})$ , măsurată în [m/s],
- $\bar{\kappa}_i^{(k)} = const, \forall t \in [t_k - \delta_a, t_k), \bar{\kappa}_i^{(k)} \in \mathbb{N}$  - viteza medie de plecare a autovehiculelor de pe benzile grupului  $G_i$ , pe culoarea galben a semaforului, în intervalul  $[t_k - \delta_a, t_k)$ , măsurată în [m/s].

Se adaugă următoarele definiții:

- $\varphi_i(k)$  - numărul de pietoni care ajung în cozile de așteptare ale grupului de evenimente  $G_i$ , în intervalul de timp  $[t_k, t_{k+1})$ ,
- $\sigma_i(k)$  - numărul de pietoni care părăsesc cozile de așteptare ale grupului de evenimente  $G_i$ , în intervalul de timp  $[t_k, t_{k+1})$ .

Condițiile de funcționare ale modelului propus sunt următoarele:

- centrul intersecției se consideră liber - intersecția nu este blocată,
- căile de defluire  $OUT_i, |i = \overline{1, nrOUT}$  se consideră libere, în caz contrar modelul necesită a fi adaptat la noile condiții prin modificarea parametrilor,
- se modelează lungimile cozilor pentru autovehicule și pentru pietoni, căile de traversare ale intersecției destinate exclusiv mijloacelor de transport în comun nu sunt monitorizate,
- nu se ține seama de numărul de benzi de mers - lungimea cozii de așteptare formată din autovehiculele care așteaptă să traverseze intersecția într-o anumită direcție de defluire se consideră a fi egală cu maximum dintre lungimile cozilor de așteptare ale tuturor benzilor de mers către direcția respectivă,
- vitezele medii de sosire ( $\bar{\lambda}_i^{(k)}$ )/plecare ( $\bar{\mu}_i^{(k)}$ ) ale autovehiculelor în/din coada de așteptare se consideră a fi constante pentru fiecare fază de semafor ( $\forall t \in [t_k, t_{k+1})$ ),
- se consideră că pietonii părăsesc cozile de așteptare fie că traversează strada pe culoarea verde, fie că se răzgândesc asupra traversării și ies din zona de detecție.

Pentru intersecția prezentată în Figura 4.4 se notează străzile intrând în intersecție de la  $IN_1$  la  $IN_4$  în ordinea acelor de ceasornic și străzile părăsind intersecția de la  $OUT_1$  la  $OUT_4$  după regula "fiecare  $OUT_i$  lângă  $IN_i$ " (a se vedea Figura 4.5). Se obțin astfel patru grupuri de evenimente care nu se intersectează reciproc:

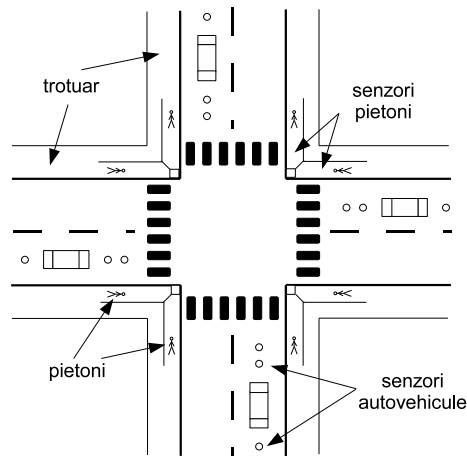


Figura 4.4: Schema de principiu a unei intersecții simple cu detecție de autovehicule și pietoni

$$\begin{aligned}
 G_1 &= \{IN_1OUT_3, IN_3OUT_1, C_2, C_4\} \\
 G_2 &= \{IN_1OUT_2, IN_3OUT_4, IN_2OUT_1, IN_4OUT_3\} \\
 G_3 &= \{IN_2OUT_4, IN_4OUT_2, C_1, C_3\} \\
 G_4 &= \{IN_2OUT_3, IN_4OUT_1, IN_1OUT_4, IN_3OUT_2\}
 \end{aligned}
 \quad , \quad (4.10)$$

și patru faze de semafor într-un ciclu complet, prezentate în Tabelul 4.1:

Tabelul 4.1: Fazele de semafor pentru modelul propus

$G_1$	$G_2$	$G_3$	$G_4$	Interval de timp
verde	roșu	roșu	roșu	$(t_{4k}, t_{4k+1})$
galben	galben	roșu	roșu	$(t_{4k}, t_{4k+1})$
roșu	verde	roșu	roșu	$(t_{4k+1}, t_{4k+2})$
roșu	galben	galben	roșu	$(t_{4k+1}, t_{4k+2})$
roșu	roșu	verde	roșu	$(t_{4k+2}, t_{4k+3})$
roșu	roșu	galben	galben	$(t_{4k+2}, t_{4k+3})$
roșu	roșu	roșu	verde	$(t_{4k+3}, t_{4k+4})$
galben	roșu	roșu	galben	$(t_{4k+3}, t_{4k+4})$

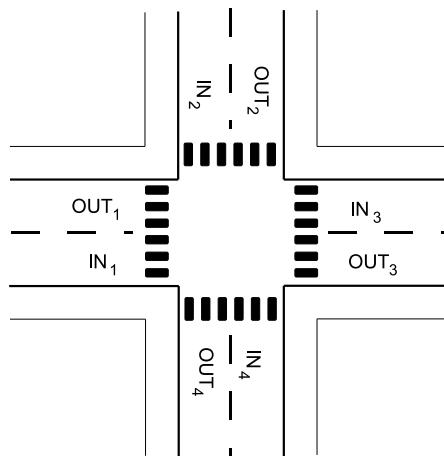


Figura 4.5: Definierea străzilor care intră și ies dintr-o intersecție simplă

Pentru culoarea verde în grupul de evenimente  $G_1$  modelul este exprimat sub forma:

$$v_1(t_{4k+1} - \delta_a) = \max(v_1(t_{4k}) + (\bar{\lambda}_1^{(4k)} - \bar{\mu}_1^{(4k)})(\delta_{4k} - \delta_a), 0) , \quad (4.11)$$

$\bar{\lambda}_1^{(4k)} - \bar{\mu}_1^{(4k)}$  fiind creșterea cozii de așteptare definită în (4.12):

$$\frac{v_1(t)}{t_{4k+1} - t_{4k} - \delta_a} = \begin{cases} \bar{\lambda}_1^{(4k)} - \bar{\mu}_1^{(4k)}, & \bar{\lambda}_1^{(4k)} > \bar{\mu}_1^{(4k)} \\ 0, & \bar{\lambda}_1^{(4k)} \leq \bar{\mu}_1^{(4k)} \end{cases} \quad (4.12)$$

Pentru intervalul de timp  $[t_{4k}, t_{4k+1})$  (inclusiv culoarea galbenă a semaforului ca fază de tranziție de la verde la roșu), lungimea cozii de așteptare este (4.13):

$$v_1(t_{4k+1}) = \max(v_1(t_{4k+1} - \delta_a) + (\bar{\lambda}_1^{(4k)} - \bar{\kappa}_1^{(4k)})\delta_a, 0) . \quad (4.13)$$

Utilizând relațiile (4.11) și (4.12) se obține relația (4.14):

$$v_1(t_{4k+1}) = \max(v_1(t_{4k}) + (\bar{\lambda}_1^{(4k)} - \bar{\mu}_1^{(4k)})\delta_{4k} + (\bar{\mu}_1^{(4k)} - \bar{\kappa}_1^{(4k)})\delta_a, (\bar{\lambda}_1^{(4k)} - \bar{\kappa}_1^{(4k)})\delta_a) . \quad (4.14)$$

În continuare sunt prezentate ecuațiile (4.15),(4.16),(4.17) care descriu lungimea cozii de așteptare pentru autovehicule pe durata culorii roșii a semaforului pentru grupul  $G_1$ , în intervalul de timp  $[t_{4k+1}, t_{4k+4}]$ :

$$v_1(t_{4k+2}) = \max(v_1(t_{4k+1}) + \bar{\lambda}_1^{(4k+1)} \delta_{4k+1}, 0) , \quad (4.15)$$

$$v_1(t_{4k+3}) = \max(v_1(t_{4k+2}) + \bar{\lambda}_1^{(4k+2)} \delta_{4k+2}, 0) , \quad (4.16)$$

$$v_1(t_{4k+4}) = \max(v_1(t_{4k+3}) + \bar{\lambda}_1^{(4k+3)} \delta_{4k+3}, 0) , \quad (4.17)$$

Urmărind Tabelul 4.1 se observă că trecerile de pietoni sunt prezente doar în grupurile  $G_1$  și  $G_3$ . Lungimile cozilor de așteptare pentru pietoni în intervalul de timp  $[t_{4k}, t_{4k+4}]$  pot fi caracterizate prin intermediul următoarelor patru ecuații (4.18):

$$p_1(t_{4k+j}) = p_1(t_{4k+j-1}) + (\bar{\varphi}_1^{(4k+j-1)} - \bar{\sigma}_1^{(4k+j-1)}) \delta_{4k+j-1}, j = \overline{1, 4} . \quad (4.18)$$

$$\bar{\sigma}_1^{(4k+j-1)} \cong p_1(t_{4k+j-1}) + \bar{\varphi}_1^{(4k+j-1)}$$

Conform definiției lungimii cozilor de așteptare pentru pietoni, acestea vor fi întotdeauna mai mari sau cel puțin egale cu zero. Întrucât în timpul culorii roșii a semaforului pietonii se pot răzgândi în legătură cu traversarea respectivei străzi, în zonele de detecție a pietonilor pot fi înregistrate de asemenea și scăderi ale numărului de pietoni. Acest caz în care pietonii se răzgândesc, este echivalent din punct de vedere al modelării cu cazul în care pe culoarea verde a semaforului pietonii traversează strada și scad astfel numărul de pietoni în așteptare. În Tabelul 4.2 sunt prezentate fazele de semafor pentru modelul De Schutter [32].

Tabelul 4.2: Fazele de semafor pentru modelul De Schutter

$L_1, L_3$	$L_2, L_4$	Interval de timp
roșu	verde	$[t_{2k}, t_{2k+1})$
roșu	galben	$[t_{2k}, t_{2k+1})$
verde	roșu	$[t_{2k+1}, t_{2k+2})$
galben	roșu	$[t_{2k+1}, t_{2k+2})$

În vederea generalizării relațiilor modelului pentru o intersecție cu  $I$  grupuri de evenimente, vor fi definiți vectorii de stare care conțin lungimile cozilor de așteptare atât pentru autovehicule cât și pentru pietoni, având  $2I$  componente ( $I$  componente pentru autovehicule și  $I$  componente pentru pietoni):

$$\mathbf{X}_{4k+j} = \begin{bmatrix} v_1(4k+j) & \dots & v_i(4k+j) & \dots & v_I(4k+j) & \dots \\ \dots & p_1(4k+j) & \dots & p_i(4k+j) & \dots & p_I(4k+j) \end{bmatrix}^T , \quad (4.19)$$

în care:  $\mathbf{X}_{4k+j} \in R^{2I}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $k$  - indexul ciclului de semafor,  $j$  - indexul fazei semaforului.

Se definesc vectorii  $\mathbf{V}_{4k+j+1}$  conținând intrări de trafic în timp real (comenzi și perturbații) legate de autovehicule (4.20), pentru fiecare grup  $i$ , în intervalul de timp  $[t_{4k+j}, t_{4k+j+1})$ :

$$\mathbf{V}_{4k+j+1} = \begin{bmatrix} \bar{\lambda}_1^{(4k+j)} \delta_{4k+j} \\ (\bar{\lambda}_i^{(4k+j)} - \bar{\mu}_i^{(4k+j)}) \delta_{4k+j} + (\bar{\lambda}_i^{(4k+j)} - \bar{\kappa}_i^{(4k+j)}) \delta_a \\ \dots \\ \bar{\lambda}_I^{(4k+j)} \delta_{4k+j} \end{bmatrix}^T , \quad (4.20)$$

în care  $\mathbf{V}_{4k+j+1} \in R^I$ .

Similar cu (4.20) se definesc vectorii  $P_{4k+j+1}$  care conțin intrări de trafic în timp real legate de pietoni, pentru fiecare grup  $i$ , în intervalul de timp  $[t_{4k+j}, t_{4k+j+1})$ :

$$P_{4k+j+1} = \begin{bmatrix} \overline{\varphi}_1^{(4k+j)} - \overline{\sigma}_1^{(4k+j)} & \dots \\ \overline{\varphi}_i^{(4k+j)} - \overline{\sigma}_i^{(4k+j)} & \dots \\ \overline{\varphi}_I^{(4k+j)} - \overline{\sigma}_I^{(4k+j)} \end{bmatrix}^T \quad (4.21)$$

în care  $P_{4k+j+1} \in R^I$ .

Utilizând relațiile (4.20) și (4.21) se definește în (4.22) vectorul intrărilor (comenzi și perturbații)  $B_{4k+j+1}$ , atât pentru autovehicule, cât și pentru pietoni, într-o intersecție complexă.

Prin intersecție complexă se înțelege o intersecție a cărei geometrii/structuri nu depinde de următorii factori: numărul de străzi care intră și ies din intersecție, numărul de benzi pentru fiecare stradă de mers, numărul de treceri de pietoni, organizarea și gruparea evenimentelor de trafic. Din relațiile (4.20), (4.21), (4.22), se observă că ecuațiile de stare ale modelului includ atât variabile de comandă  $\delta_{4k+j}$ ,  $\delta_\alpha$ , cât și variabile de perturbație  $\overline{\lambda}_i^{(4k+j)}$ ,  $\overline{\mu}_i^{(4k+j)}$  și  $\overline{\kappa}_i^{(4k+j)}$ , în care  $i = \overline{1, I}$ ,  $k$  este indexul ciclului de semafor, iar  $j$  este indexul fazei de semafor.

$$B_{4k+j+1} = [ V_{4k+j+1}^T \quad P_{4k+j+1}^T ]^T, B_{4k+j+1} \in R^{2I} \quad (4.22)$$

Pe baza ecuațiilor (4.14), ..., (4.22), pot fi exprimate ecuațiile de stare ale modelului matematic în formă generală după cum urmează:

$$X_{4k+j+1} = X_{4k+j} + B_{4k+j+1} \quad , \quad X_{4k+j+1} \in R^{2I}, \quad (4.23)$$

în care:  $k$  - indexul ciclului de semafor, iar  $j$  - indexul fazei semaforului. Vectorii  $X$  și  $B$  sunt matrice de dimensiuni  $1 \times 2I$ .

Ecuația de ieșire a modelului propus este:

$$Y_k = X_k. \quad (4.24)$$

Modelul este de tip Intrare-Stare-Ieșire neliniar, multivariabil la intrare și la ieșire (MIMO) și are următoarele componente:

- **intrări:** mărimi de comandă  $\delta_{4k+j}$ ,  $\delta_\alpha$  și mărimi de perturbație  $\overline{\lambda}_i^{(4k+j)}$ ,  $\overline{\mu}_i^{(4k+j)}$  și  $\overline{\kappa}_i^{(4k+j)}$ , în care  $i = \overline{1, I}$ ,  $k$  este indexul ciclului de semafor, iar  $j$  este indexul fazei de semafor,
- **stări:** lungimile cozilor de așteptare  $X_{4k+j}$  atât pentru autovehicule, cât și pentru pietoni, în care  $k$  este indexul ciclului de semafor și  $j$  este indexul fazei de semafor,
- **ieșiri:** vectorul de ieșire  $Y_k$  este egal cu vectorul de stare  $X_k$ , în care  $k$  este indexul ciclului de semafor.

Se observă că modelul de stare (4.22)-(4.24) este general și depinde doar de numărul de grupuri de evenimente de trafic (obținute din distribuția evenimentelor de trafic, fiecare eveniment fiind repartizat unui anume grup în funcție de condiția de a nu se încrucișa cu un alt eveniment din același grup). Punerea problemei în conducerea traficului rutier urban, se poate face astfel: pornind de la modelul de monitorizare în timp real a cozilor de așteptare (4.22)-(4.24), rezultatele de trafic dorite se pot obține din elaborarea algoritmilor de conducere în vederea îmbunătățirii anumitor indicatori de calitate a priori definiți.

### 4.3. Punerea problemei de reglare în sistemul de conducere a traficului rutier urban la nivel de intersecție

În Figura 4.6 este prezentată schema bloc de principiu a subsistemului de conducere automată a traficului rutier la nivel de intersecție din cadrul sistemului de conducere ierarhizat. Acesta are rol de sistem de reglare automată.

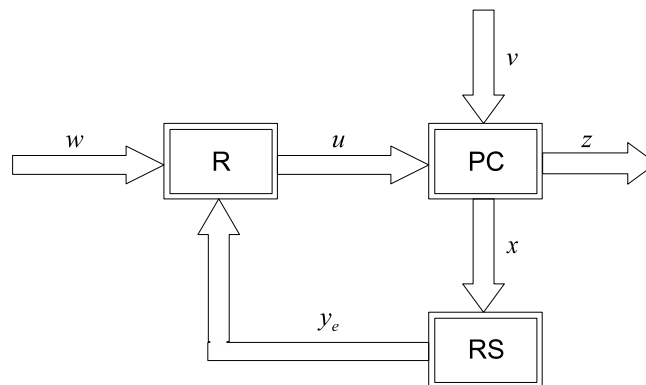


Figura 4.6: Schema bloc de principiu a subsistemului de conducere automată

Blocurile neliniare din Figura 4.6 au următoarea semnificație:

- *PC* - proces condus, care include și elementele de execuție aferente semafoarelor,
- *RS* - rețea de senzori wireless utilizată ca detector de trafic,
- *R* - regulator de trafic.

Variabilele din Figura 4.6 au următoarea semnificație:

- *z* - vectorul ieșirilor de apreciere definit în (4.25)

$$z = \begin{bmatrix} v_m \\ t_m \\ l_c \end{bmatrix}, \quad (4.25)$$

În vederea evaluării performanțelor algoritmului de conducere propus se definesc trei variabile care sunt ieșiri reglate și care permit aprecierea performanțelor. Aceste variabile vor fi prezentate în continuare.

- viteza medie pe faza curentă de semafor  $v_m(k)[m/s]$ :

$$v_m(k) = \frac{l_j(k)}{\delta(k)}, \quad (4.26)$$

în care  $l_j(k)[m]$  reprezintă lungimea în metri a cozii de așteptare eliberată pe durata culorii verzi a semaforului aferentă fazei de semafor  $j$  care se termină

la momentul  $k = \sum_{p=1}^j \delta_p$  (a se vedea Figura 4.7). Variabila  $\delta(k) = \delta_j$  este variabila de comandă a sistemului de conducere și reprezintă durata culorii verzi a semaforului aferentă fazei de semafor curente  $j$  și care se termină la momentul  $k$ . Cu alte cuvinte  $v_m(k)$  este viteza medie de deplasare a autovehiculelor care reușesc să traverseze intersecția pe durata de timp  $\delta(k)$  și pe distanța  $l_j(k)$ . Cu ajutorul acestei variabile pot fi comparate vitezele medii de plecare de la semafor obținute în urma simulării comportamentului mai multor algoritmi de conducere în aceleași condiții de trafic.

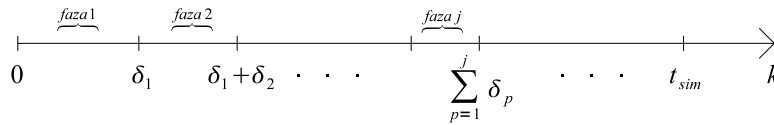


Figura 4.7: Momentele de timp aferente schimbărilor fazelor de semafor pe perioada de simulare  $t_{sim}$  și perioadă de eșantionare de o secundă

- timpul de verde neutilizat pe faza curentă de semafor (timp mort)  $t_m(k)[s]$ :

$$t_m(k) = \delta(k) - \frac{l_j(k)}{\bar{\mu}_i(k) - \bar{\lambda}_i(k)}, \quad (4.27)$$

în care  $\bar{\mu}_i(k)[m/s]$  reprezintă viteza medie de golire a cozilor de așteptare pe faza de semafor aferentă grupului de evenimente de trafic  $i$ , iar  $\bar{\lambda}_i(k)[m/s]$  reprezintă viteza medie de creștere a cozilor de așteptare pe faza de semafor  $j$  aferentă grupului de evenimente de trafic  $i$ . Se menționează că  $k$  este momentul de timp la care se termină faza de semafor  $j$ . Prin "timp mort" se înțelege momentul în care semaforul indică culoarea verde și nici un autovehicul sau pieton nu se află în coada de așteptare. Se observă că timpul mort de verde pentru faza de semafor  $j$  se obține prin diferența dintre variabila de comandă  $\delta(k)$  a sistemului de conducere și timpul de verde utilizat efectiv  $\frac{\bar{\mu}_i(k) - \bar{\lambda}_i(k)}{l_j(k)}$ .

- suma tuturor lungimilor cozilor de așteptare din intersecție  $l_c(k)[m]$ :

$$l_c(k) = \sum_{i=1}^I l_i(k), \quad (4.28)$$

în care  $l_i(k)[m]$  reprezintă lungimea cozilor de așteptare la momentul de timp  $k$  pentru faza de semafor  $i$ , iar  $I$  reprezintă numărul de grupuri de evenimente de trafic definite la nivel de intersecție. Variabila  $l_c(k)$  reprezintă de fapt suma tuturor lungimilor cozilor de așteptare într-o intersecție la un moment dat, măsurând gradul de aglomerare la nivel de intersecție. Această variabilă este importantă în evaluarea capacității algoritmului de conducere de a satisface numărul de autovehicule și pietoni din intersecție în funcție de condițiile de trafic.

- $w$  - vectorul referințelor/valorilor dorite pentru mărimile de ieșire din vectorul  $z$

$$w = \begin{bmatrix} vd_m \\ td_m \\ ld_c \end{bmatrix}, \quad (4.29)$$



în care pentru faza curentă de semafor  $vd_m$  reprezintă valoarea dorită a vitezei medii având valori cât mai mari,  $td_m$  reprezintă valoarea dorită a timpilor morți având valori cât mai mici, iar  $ld_c$  reprezintă valoarea dorită a sumei lungimilor cozilor de așteptare având valori cât mai mici.

- $u$  - vectorul de comandă

$$u = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \dots \\ \delta_{card(u)} \end{bmatrix}, \quad (4.30)$$

în care  $\delta_i, i = \overline{1, card(\delta)}$  reprezintă durata în secunde alocată fazei de semafor  $i$ .

- $v$  - vectorul perturbațiilor

$$v = \begin{bmatrix} \lambda \\ \mu \\ \kappa \\ \varphi \\ \sigma \end{bmatrix}, \quad (4.31)$$

în care  $\lambda = [\lambda_1 \dots \lambda_I]^T$  este vectorul vitezelor medii de sosire a autovehiculelor în coada de așteptare,  $\mu = [\mu_1 \dots \mu_I]^T$  este vectorul vitezelor medii de plecare a autovehiculelor din coada de așteptare pe culoarea verde a semaforului,  $\kappa = [\kappa_1 \dots \kappa_I]^T$  este vectorul vitezelor medii de plecare a autovehiculelor din coada de așteptare pe culoarea galbenă a semaforului,  $\varphi = [\varphi_1 \dots \varphi_I]^T$  este vectorul ratelor medii de sosire a pietonilor în coada de așteptare,  $\sigma = [\sigma_1 \dots \sigma_I]^T$  este vectorul ratelor medii de plecare a pietonilor din coada de așteptare, iar  $i = \overline{1, I}$  este indexul grupului de evenimente de trafic.

- $x$  - vectorul de stare ce caracterizează prezența autovehiculelor în coada de așteptare,

$$x = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \dots \\ n_{card(x)} \end{bmatrix}, \quad (4.32)$$

în care  $n_i$  reprezintă numărul de autovehicule aflate în coada de așteptare și care au trecut de senzorul numărul  $i$  amplasat pe sensul de mers. Se menționează că numerotarea senzorilor începe de la senzorul cel mai apropiat de intersecție. Aceste date de trafic vor fi procesate de către rețeaua de senzori wireless, apoi se vor estima lungimile cozilor de așteptare.

- $y_e$  - vectorul de ieșire estimată de către rețeaua de senzori,

$$y_e = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \dots \\ l_I \end{bmatrix}, \quad (4.33)$$

în care  $l_i$  reprezintă lungimea cozii de așteptare pentru evenimentul de trafic  $i$ , iar  $i = \overline{1, I}$  este indexul grupului de evenimente de trafic.

#### 4.3.1. Definirea indicatorilor de calitate a comportării sistemului

Obiectivele reglării sunt următoarele:

- asigurarea unor performanțe cât mai bune în vectorul de ieșire  $z$  în raport cu vectorul referință  $w$ ,
- reducerea efectelor perturbațiilor  $v$  în vectorul de ieșire  $z$ .

În acest context, pentru aprecierea performanțelor de reglare ale sistemului, vor fi definiți indicatori de calitate/performance. Utilizând ieșirile de apreciere și reglate se obțin relațiile următorilor indicatori de calitate:

- $J_1$  - suma lungimilor cozilor de așteptare golite pe durata de simulare  $t_{sim}$ :

$$J_1 = \sum_{j=1}^{card(\delta)} (v_m(\sum_{p=1}^j \delta_p)\delta_j), \quad (4.34)$$

în care  $\delta_j$  este variabila de comandă a sistemului de conducere reprezentând durata colorii verzi a semaforului aferentă fazei de semafor numărul  $j$ , iar  $\delta = \{\delta_1, \delta_2, \dots\}$  este mulțimea variabilelor de comandă cu condiția ca  $\sum_{i=1}^{card(\delta)} \delta_i \leq t_{sim}$ . Metodele de conducere au ca scop îmbunătățirea acestui indicator prin obținerea de valori cât mai mari.

- $J_2$  - suma timpilor morți de verde pe durata de simulare  $t_{sim}$ :

$$J_2 = \sum_{j=1}^{card(\delta)} (t_m(\sum_{p=1}^j \delta_p)), \quad (4.35)$$

Însumând valorile ieșirii de apreciere definită în (4.27) pe o anumită perioadă de timp se poate calcula suma timpilor morți în care semaforul arată culoarea verde și nici un autovehicul sau pieton nu se află în coada de așteptare. Metodele de conducere au ca scop îmbunătățirea acestui indicator prin obținerea de valori cât mai mici.

- $J_3$  - suma lungimilor cozilor de așteptare pe durata de simulare  $t_{sim}$ :

$$J_3 = \frac{\sum_{j=1}^{card(\delta)} (l_c(\sum_{p=1}^j \delta_p)\delta_j)}{t_{sim}}, \quad (4.36)$$

Însumând valorile ieșirii de apreciere definită în (4.28) pe toată perioada de simulare, se calculează suma ponderată a tuturor lungimilor cozilor de așteptare la anumite momente de timp. În cazul de față s-a ales ca pas de eșantionare valoarea variabilei de comandă  $\delta_j$ , în care  $j$  reprezintă indexul fazei de semafor pe toată perioada de simulare. Metodele de conducere au ca scop îmbunătățirea acestui indicator prin obținerea de valori cât mai mici, obținându-se astfel o reducere a aglomerării la nivel de intersecție.

## 4.4. Proiectarea simulatorului de trafic

Pentru a putea testa comportamentul sistemului de transport rutier utilizând algoritmi de conducere propuși prin comparație cu soluția de conducere statică, s-a implementat un simulator de trafic de tip macroscopic capabil să simuleze condiții reale de trafic rutier urban la nivel de intersecție. S-a optat pentru modelarea și simularea macroscopică datorită principiului de conducere utilizat, bazat pe măsurarea în timp real a lungimilor cozilor de așteptare. Astfel au fost necesare informații din trafic cu caracter general, fără detalii legate de fiecare participant la trafic și comportamentul individual al acestuia.

Simulatorul de trafic implementat are două avantaje principale: posibilitatea simulării comportamentului sistemului de transport în urma utilizării algoritmilor de conducere locali (atât algoritmi propuși, cât și algoritmul de conducere statică) și posibilitatea simulării coordonării la nivel de zonă prin acceptarea unor algoritmi de sincronizare a semafoarelor. Acest capitol este dedicat doar simulării comportamentului sistemului de transport în urma utilizării soluțiilor de conducere locale, la nivel de intersecție. Condițiile de trafic dintr-o anumită intersecție nu depind de condițiile de trafic din intersecțiile vecine, doar indirect, prin intermediul lungimilor cozilor de așteptare și a vitezelor medii de plecare și sosire.

Simulatorul local, la nivel de intersecție are două mari componente:

- managementul lungimilor cozilor de așteptare pentru fiecare eveniment din intersecție utilizând modelul matematic propus în subcapitolul anterior,
- definirea grupurilor de evenimente de trafic și schimbarea culorilor semafoarelor în funcție de datele primite de la soluția de conducere.

În continuare vor fi prezentate detalii privind proiectarea celor două componente.

### A) Managementul lungimilor cozilor de așteptare

După cum s-a arătat în paragrafele anterioare, s-a optat pentru modelarea cozilor de așteptare cu ajutorul vitezelor medii de sosire și plecare ( $\bar{\lambda}_i$  și  $\bar{\mu}_i$ ) pentru fiecare eveniment de trafic  $i$  dintr-o anumită intersecție.

În urma unor măsurători experimentale realizate în traficul rutier urban, legate de lungimile cozilor de așteptare și timpul de golire al acestora pe culoarea verde a semaforului, s-a realizat un tabel estimativ în care fiecărui eveniment de trafic  $i$  îi sunt asociate perechi de forma  $(m_i, s_i)$ , având următoarea interpretare: o coadă de așteptare de lungime  $m_i$  metri pentru evenimentul de trafic  $i$  este golită în aproximativ  $s_i$  secunde pe culoarea verde a semaforului (a se vedea Tabelul 4.3).

Tabelul 4.3: Estimarea timpilor de golire a cozilor de așteptare

Evenimente					
ev. 1		...	ev. i		...
$m_{1,1}$	$s_{1,1}$	...	$m_{1,i}$	$s_{1,i}$	...
$m_{2,1}$	$s_{2,1}$	...	$m_{2,i}$	$s_{2,i}$	...
...	...	...	...	...	...
$m_{j,1}$	$s_{j,1}$	...	$m_{j,i}$	$s_{j,i}$	...
...	...	...	...	...	...

Aceste valori sunt estimate și sunt necesare soluțiilor de conducere bazate pe lungimile cozilor de așteptare. Totuși condițiile de trafic se pot schimba de la o zi la alta sau chiar de la un interval orar la altul. Pentru a rezolva acest impediment, prin aducerea valorilor estimate la valori cât mai apropiate de valorile reale, simulatorul

permite schimbarea acestor valori. În momentul în care modulul diferenței dintre valorile estimate  $s_{j,i}(t-1)$  și valorile reale înregistrate ulterior  $s_{j,i}^{(r)}(t-1)$  depășesc un anumit prag  $\tau_{es}$  la momentul de timp  $t-1$ , estimările viitoare ale timpilor de golire a cozilor de așteptare  $s_{j,i}(t)$  se vor face în funcție de ultimele valori reale măsurate (4.37):

$$s_{j,i}(t) = \begin{cases} s_{j,i}^{(r)}(t-1), & \\ \text{dacă } |s_{j,i}(t-1) - s_{j,i}^{(r)}(t-1)| \geq \tau_{es} & \\ s_{j,i}(t-1), & \\ \text{în caz contrar} & \end{cases} \quad (4.37)$$

O altă facilitate a simulatorului legată de managementul cozilor de așteptare este posibilitatea definirii vitezelor de sosire a autovehiculelor sau mai bine zis ratele de creștere a lungimilor cozilor de așteptare într-o anumită perioadă de timp. În acest sens, creșterea cozilor a fost definită în formă de tabel (a se vedea Tabelul 4.4), fiecare linie a tabelului  $j$  reprezentând lungimile în metri care se adaugă la coada de așteptare curentă într-un interval de timp stabilit apriori  $t_{es}$  pentru fiecare eveniment de trafic  $i$ . Prin alegerea acestei structuri de definire a vitezelor de sosire/a creșterii cozilor de așteptare se poate simula foarte aproape de realitate orice condiție de trafic. Se pot simula diferite scenarii plecând de la trafic subsaturat până la trafic suprasaturat și totodată pot fi simulate condiții de trafic variabile pe anumite intervale orare sau chiar condiții de trafic stohastice între anumite praguri limită.

Tabelul 4.4: Ratele de creștere a cozilor de așteptare

Eșantion de timp	Evenimente			
	ev. 1	...	ev. i	...
<b>1</b>	$L_{1,1}$	...	$L_{1,i}$	...
<b>2</b>	$L_{2,1}$	...	$L_{2,i}$	...
...	...	...	...	...
<b>j</b>	$L_{j,1}$	...	$L_{j,i}$	...
...	...	...	...	...

În teza de față s-a ales  $t_{es} = 1 \text{ min}$ , considerând astfel că pe durata acestor perioade de timp ratele de creștere a lungimilor cozilor sunt constante. Prin alegerea acestei valori de un minut, nu s-a pierdut caracterul general al simulării traficului rutier urban, schimbările condițiilor de trafic realizându-se în general la intervale mult mai mari de timp, iar variațiile creșterii lungimilor cozilor pe durata unui minut pot fi considerate neglijabile fără a influența vizibil fluxul de trafic.

## B) Definirea grupurilor de evenimente. Schimbarea culorilor semafoarelor

Pentru a putea oferi suportul în vederea conducerii unor tipuri de intersecții cu geometrie complexă și variate ca structură, simulatorul a fost prevăzut cu un modul de definire la nivel de intersecție a tuturor evenimentelor de trafic posibile și a grupării acestora în grupuri de evenimente compatibile (oricare două evenimente aparținând aceluiași grup nu se intersectează reciproc - pot primi simultan culoarea verde a semaforului fără a fi nevoite să își cedeze prioritatea după regulile de circulație). Au fost definite două tipuri de elemente de trafic: intersecția  $k$  și strada  $s$ . Pe baza acestor elemente s-a format o rețea de străzi și intersecții interconectate, sub forma unui graf orientat  $G(K, S)$ , unde  $K$  reprezintă mulțimea nodurilor (mulțimea intersecțiilor) și  $S$  reprezintă mulțimea muchiilor (mulțimea străzilor). Pe baza acestor elemente s-au definit trei tipuri de evenimente de trafic: pentru autovehicule, pentru pietoni și cu caracter general (este importantă doar interacțiunea cu celelalte evenimente).

a) Evenimentul de trafic la nivelul autovehiculelor se definește astfel:

$$(S_{IN,i}, K_k, S_{OUT,j}), i, j \in \overline{1, card(S)}, k \in \overline{1, card(K)} \quad (4.38)$$

în care:

- $card(X)$  - cardinalul mulțimii finite  $X$ ,
- $S_{IN,i}$  - evenimentul pornește de pe strada numărul  $i$ ,
- $K_k$  - evenimentul traversează intersecția numărul  $k$ ,
- $S_{OUT,j}$  - după traversarea intersecției, evenimentul ajunge pe strada numărul  $j$ .

b) Evenimentul de trafic la nivelul pietonilor se definește astfel:

$$(P_i), i \in \overline{1, card(S)}, \quad (4.39)$$

în care  $P_i$  are însemnătatea că există o trecere de pietoni care intersectează strada  $i$ .

c) Evenimentele generale au ca scop modelarea tuturor celorlalte evenimente care nu intră în categoria evenimentelor prezentate mai sus. Aceste evenimente pot fi destinate pietonilor (de exemplu traversarea mai multor străzi, sau doar a unor benzi de pe o stradă fapt care poate fi modelat diferit) sau transportului în comun. Pentru aceste evenimente este necesară doar definirea listelor de evenimente cu care se intersectează, în scopul formării grupurilor de evenimente care să respecte proprietățile definite în capitolul anterior.

După faza de definire a evenimentelor de trafic, simulatorul permite definirea grupurilor de evenimente (a se vedea subcapitolul anterior). Motivul pentru care aceste grupuri de evenimente sunt definite apriori și nu sunt formate dinamic după fiecare fază de semafor este că timpul necesar unei asemenea proceduri de calcul nu este acceptabil în cazul metodelor de conducere în timp real datorită faptului că întârzierile sistemului decizional ar fi mult prea mari. Într-adevăr, formarea grupurilor de evenimente după fiecare fază de semafor ar crește performanțele sistemului de conducere. În majoritatea situațiilor se înregistrează diferențe mari de creștere a lungimilor cozilor de așteptare între evenimentele aceluiași grup. Reorganizarea evenimentelor în grupuri evitând acest impediment. Chiar pentru o intersecție cu geometrie simplă, cu aproximativ șaisprezece evenimente, gruparea evenimentelor de trafic astfel încât lungimile cozilor de așteptare pentru evenimentele care aparțin aceluiași grup să fie cât mai apropiate, numărul de iterații este foarte mare și implicit timpul de rulare neacceptabil datorită căutării în spațiul tuturor soluțiilor. O soluție posibilă, dar nu optimă ar fi un algoritm de căutare euristic în spațiul soluțiilor, care să aleagă cea mai bună variană dintre cele parcurse într-o anumită perioadă de timp limită.

Un alt rol al simulatorului de trafic implementat este acela de a schimba culorile semafoarelor cu care este prevăzută o anumită intersecție. Procedura după care se realizează această schimbare de culori este descrisă în Figura 4.2. După terminarea unei anumite faze de semafor (stare  $S_i$ ), algoritmul de conducere ia decizia care este starea următoare (care grup de evenimente va primi culoarea verde) și durata culorii verzi în secunde. În cazul simulatorului implementat, timpii de procesor necesari calculării lungimilor cozilor de așteptare și luării deciziei sunt neglijabili. În schimb, în implementarea reală a soluțiilor de conducere propuse, este necesar a se ține seama de timpii de capturare a datelor de la sistemul senzorial de detecție și procesării acestora. Întreg procesul decizional urmează a fi pornit cu câteva secunde înainte de epuizarea timpului pentru faza curentă de semafor.

### 4.5. Algoritm de conducere locală - LTA

Pornind de la arhitectura sistemului de conducere distribuită [3; 5] și de la modelul matematic prezentat (4.23) în cele ce urmează se va defini algoritmul de conducere implementat la nivelul agentului de trafic local. Pentru o mai bună descriere teoretică a algoritmului propus, se vor adăuga variabile și se vor defini termeni noi.

Se definește graful  $G(E, A)$  al evenimentelor de trafic posibile într-o anumită intersecție. În acest context, în relație cu (4.9),  $E$  este mulțimea de noduri (fiecărui eveniment îi corespunde un nod în graf) și  $A$  este matricea de adiacență care definește muchiile între noduri:

$$A_{x,y} = \begin{cases} 1, & \text{dacă } E_x \text{ și } E_y \text{ nu se intersectează} \\ 0, & \text{dacă } E_x \text{ și } E_y \text{ se intersectează} \end{cases}, \quad (4.40)$$

în care  $A_{x,y}$  reprezintă elementele matricei de adiacență a grafului  $G$ .

După cum se poate observa din relația (4.40), între oricare două evenimente care nu se intersectează există o muchie în graf. Din punctul de vedere al conducerii traficului rutier, existența unei muchii între două evenimente semnifică faptul că acele evenimente vor avea întotdeauna culori diferite ale semafoarelor la un moment dat. Pentru o mai ușoară prezentare se va porni de la un caz simplu care apoi va fi generalizat. Se considerată procesul de schimbare a culorilor semafoarelor dintr-o intersecție în care la fiecare fază de semafor doar o anumită stradă  $IN_i$  care intră în intersecție va primi culoarea verde pentru toate direcțiile posibile  $OUT_j$ . Prin gruparea tuturor evenimentelor autovehiculelor  $IN_iOUT_j$  în  $G_i$  și în funcție de infrastructura intersecției, și adăugând sau nu evenimentele pietonilor, obținem numărul total de grupuri de evenimente de trafic cu proprietatea că două evenimente din același grup nu se intersectează reciproc. Plecând de la aceste grupuri setate apriori și de la valorile cozilor de așteptare măsurate în timp real, agentul local va lua decizii legate atât de succesiunea fazelor de semafor (culoarea verde) pentru fiecare grup, cât și de durata de timp corespunzătoare fiecărei faze. Pentru fiecare eveniment se definește pragul de timp limită de așteptare fără a primi culoarea verde a semaforului (cu alte cuvinte durata maximă acceptabilă ca un participant la trafic să aștepte la semafor până să înainteze - nu neapărat să traverseze intersecția) sub forma variabilei  $\tau_i$ :

$$\tau_i \in \{l_{min}, l_{min} + 1, \dots, l_{max}\}, l_{min}, l_{max} \in \mathbb{N}, \quad (4.41)$$

în care  $l_{min}, l_{max}$  sunt valori setate apriori. Acest timp limită poate fi regăsit în majoritatea algoritmilor de conducere la nivel de intersecție, fiind foarte important pentru conducătorii auto. Din păcate acești algoritmi țin seama de acest prag limită doar pentru a nu fi depășit, dar nu includ această variabilă în procesul de conducere. O valoare prea ridicată a acestui prag va crea nervozitate în rândul participanților la trafic din cauza perioadei prea mari de așteptare, în schimb o valoare prea mică va produce scaderea traficului, iar conducerea la nivel de intersecție va fi greu de optimizat relativ la condițiile de trafic în timp real. După fiecare fază de semafor, agentul local va decreta timpul limită de așteptare curent  $\theta_i$  pentru fiecare eveniment care nu a primit culoarea verde la faza respectivă și pentru fiecare eveniment care a primit culoarea verde va seta timpul limită de așteptare curent la valoarea de prag predefinită:

$$\theta_i(t) = \begin{cases} \max(\theta_i(t-1) - \delta_{t-1}, 0), & \text{dacă evenimentul "i" a primit culoarea roșie} \\ \tau_i, & \text{dacă evenimentul "i" a primit culoarea verde} \end{cases} \quad (4.42)$$

în care  $\delta_{t-1}$  este timpul în secunde alocat fazei de semafor anterioare. În Figura 4.8 este prezentată o schemă logică de principiu în vederea descrierii algoritmului de conducere implementat, urmând a se face explicitarea pe baza sa:

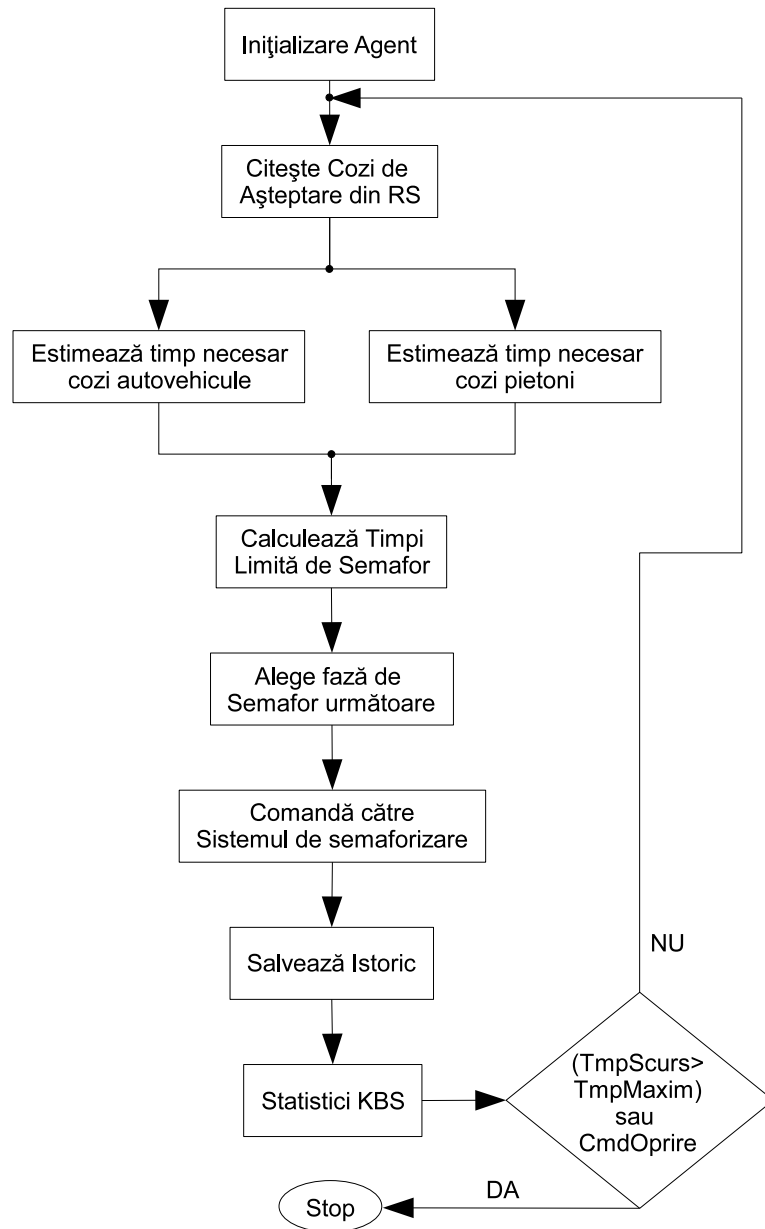


Figura 4.8: Schema logică de principiu a algoritmului de conducere propus

Din schema logică prezentată în Figura 4.8 se observă că după o primă parte de inițializare, algoritmul de conducere la nivelul agentului local intră într-o buclă de ciclare până când timpul de rulare depășește un anumit prag limită sau până când se primește comandă de oprire. În prima parte se inițializează variabilele și parametri necesari algoritmului de conducere: definirea grupurilor de evenimente  $G(E, A)$ , inițializarea cozilor de așteptare pentru autovehicule și pețoni  $v_i(t)$  și  $p_i(t)$  pentru fiecare grup de evenimente  $G_i$ , definirea pragurilor de așteptare  $\tau_i$  pentru fiecare grup de evenimente  $G_i$ .

Partea de algoritm propriu-zisă se împarte în cinci mari pași care apoi se repetă ciclic. Primul pas constă în citirea lungimilor cozilor de așteptare de la detectorul de trafic - rețeaua de senzori wireless (notată cu RS). Lungimile cozilor de așteptare pentru toate evenimentele de trafic sunt stocate în două tablouri (unul pentru autovehicule și altul pentru pețoni). La pasul doi, valorile stocate la pasul anterior sunt procesate și se estimează timpul necesar în secunde pentru golirea acestor cozi de așteptare utilizând informațiile primite de la sistemul bazat pe cunoștințe. În cele din urmă, se calculează timpii de așteptare limită curenți pentru fiecare grup de evenimente în funcție de valorile anterioare și timpul alocat ultimei faze de verde. Pasul trei este cel mai important în algoritmul de conducere, la acest pas se ia decizia care grup de evenimente va fi servit la următoarea fază de semafor și durata în secunde a acestei faze. Decizia se ia în timp real în funcție de lungimile cozilor de așteptare curente, timpii limită de așteptare, estimările legate de timpii de golire a cozilor pentru fiecare grup de evenimente și statisticile de trafic ale sistemului bazat pe cunoștințe. Acest pas va fi detaliat în cele ce urmează. Pasul patru are ca scop transmiterea către sistemul de semaforizare a deciziei luate la pasul anterior: grupul de evenimente care primește culoarea verde și numărul de secunde alocat. La pasul cinci se salvează decizia de conducere, parametri curenți de trafic și lungimile cozilor de așteptare golate în unitatea de timp, în vederea calibrării estimărilor viitoare de la pasul doi.

### Managementul variabilelor de stare

Înainte de a descrie componenta decizională este necesară definirea celor trei vectori de stare care caracterizează în timp real lungimile cozilor de așteptare pentru fiecare eveniment de trafic. Acești vectori se modifică odată cu recepționarea lungimilor cozilor de așteptare de la nivelul senzorial (rețeaua de senzori wireless) și sunt definiți după cum urmează:

- $LM \in R^{card(E)}$  - lungimea cozilor de așteptare măsurată în metri, pentru fiecare dintre evenimentele de trafic existente în intersecția monitorizată, unde  $E$  reprezintă mulțimea evenimentelor de trafic, iar  $card(E)$  cardinalul mulțimii finite  $E$ ,
- $LS \in R^{card(E)}$  - timpul estimat, exprimat în secunde, necesar golirii cozilor de așteptare corespunzătoare tuturor evenimentelor de trafic din intersecție, unde  $E$  reprezintă mulțimea evenimentelor de trafic,
- $WL \in R^{card(E)}$  - limita maximă de așteptare, exprimată în secunde, pentru fiecare dintre evenimentele de trafic existente în intersecția monitorizată, până când respectivul eveniment va primi culoarea verde a semaforului.

După încheierea fazei de semafor curente, valorile vectorului  $LS$  sunt recalculat prin estimare pornind de la vectorul  $LM$  (provenit de la rețeaua de senzori wireless) și de la timpii estimați de golire a cozilor de așteptare pe anumite intervale (proveniți de la sistemul bazat pe cunoștințe prin învățare). De asemenea, valorile vectorului  $WL$  sunt decrementate după încheierea fiecărei faze de semafor pentru fiecare eveniment în așteptare, iar pentru evenimentele  $i$  servite în timpul fazei curente de semafor vor fi setate la valorile de prag maxim  $\tau_i$  (4.41).



### Componenta decizională

Modelând traficul într-o intersecție cu ajutorul unei rețele Petri (vezi Figura 4.2), decizia va fi luată în cadrul stării decizionale *LTA* ce joacă rol de regulator. În Figura 4.9 sunt prezentate intrările și ieșirile unității decizionale:

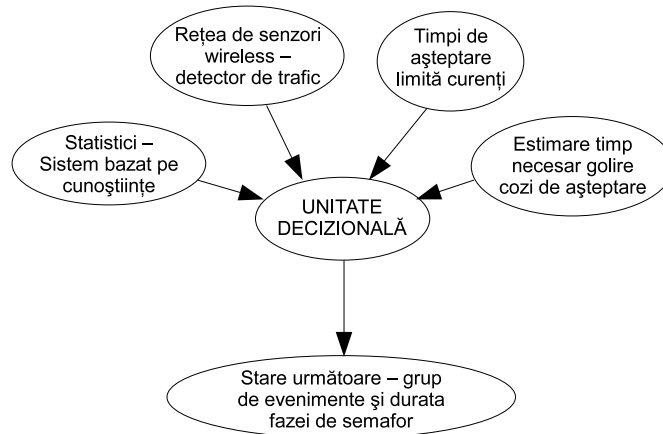


Figura 4.9: Unitate decizională

Unitatea decizională a fost redusă la un număr de șapte condiții prin minimizare, aceste condiții fiind dezvoltate pe baza intrărilor descrise mai sus. În Figura 4.10 este prezentată succesiunea pașilor efectuați de către unitatea decizională:

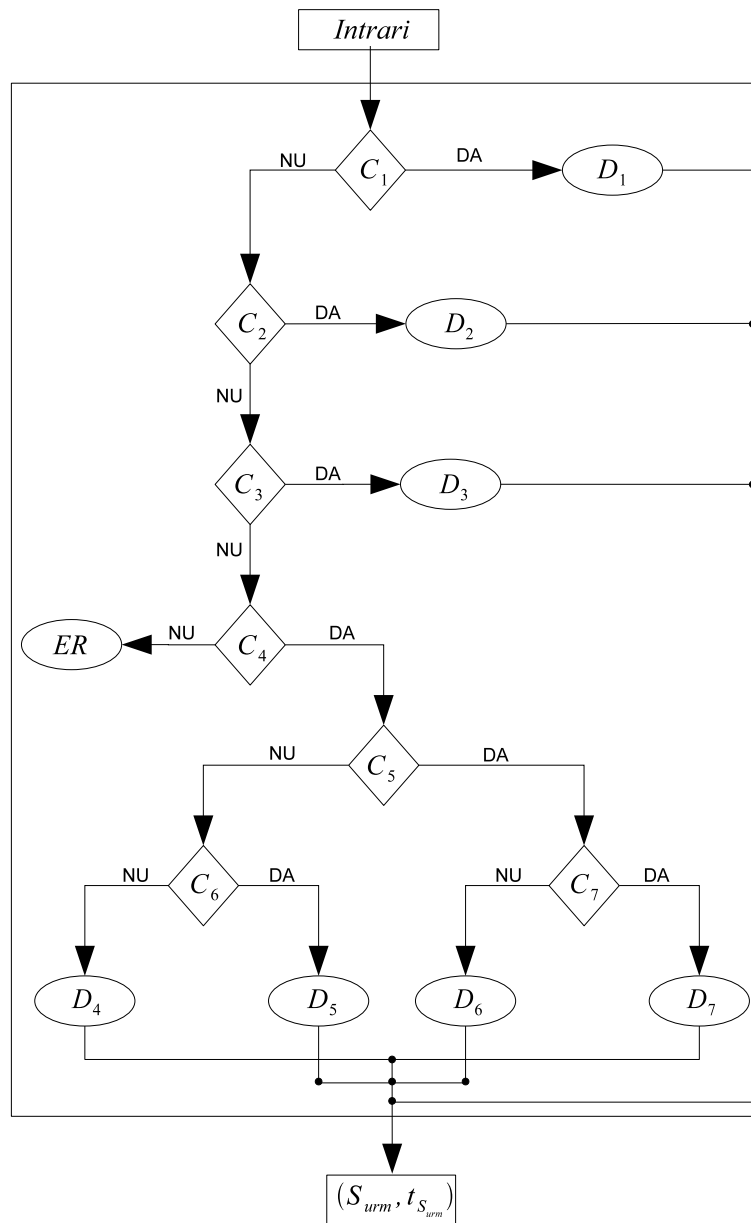


Figura 4.10: Unitate decizională

în care:

- $C_i$  - condiția numărul  $i$  din regulatorul LTA,
- $D_i$  - decizia numărul  $i$ , posibil a fi aleasă ca decizie finală,
- $(S_{urm}, t_{S_{urm}})$  - decizia finală,  $S_{urm}$  reprezentând starea/faza următoare de

semafor și  $t_{S_{urm}}$  reprezentând durata în secunde stabilită pentru următoarea fază de semafor  $S_{urm}$ .

În Tabelul 4.5 sunt descrise condițiile regulatorului asociate organigramei din Figura 4.10:

Tabelul 4.5: Condițiile algoritmului de conducere

Nume condiție	Corp condiție
$C_1$	$\exists S_i   WL(S_i) = 0$
$C_2$	$\neg \exists S_i   WL(S_i) < t_{lim}$
$C_3$	$\exists! S_i   WL(S_i) < t_{lim}$
$C_4$	$\exists S_i   WL(S_i) < t_{lim}, i = \overline{1, x}, x > 1$
$C_5$	$LS(S_i) \geq WL(S_i)   WL(S_i) = \min(WL(S_k)), k = \overline{1, card(S)}$
$C_6$	$LS(S_i) \leq WL(S_j)   WL(S_j) = \min(WL(S_k)), WL(S_i) = \min_2(WL(S_k))$
$C_7$	$\exists S_j   LS(S_j) \geq LS(S_i) \text{ ȘI } LS(S_j) \leq WL(S_i)$

Deciziile posibile ale regulatorului asociate organigramei din Figura 4.10 sunt descrise în Tabelul 4.6:

Tabelul 4.6: Deciziile algoritmului de conducere

Nume decizie	Corp decizional
$D_1$	$(S_{C_1}, \min(\min(LS(S_{C_1}), \min_2_{LM}(S_{C_1})), t_{max}))$
$D_2$	$(S_{C_2}, \min(\min(WL(S_{C_2}), LS(S_{C_2})), t_{max}))$
$D_3$	$(S_{C_3}, \min(LS(S_{C_3}), t_{max}))$
$D_4$	$(S_{C_4}, \min(WL(S_{C_6}), t_{max}))$
$D_5$	$(S_{C_4}, \min(LS(S_{C_6}), t_{max}))$
$D_6$	$(S_{C_7}, LS(S_{C_7}))$
$D_7$	$(S_{C_4}, LS(S_{C_4}))$

în care:

- $\min(a, b)$  - minimul dintre  $a$  și  $b$ ,
- $\min_2_{LM}(i)$  - minimul din vectorul  $LM$  exceptând indexul  $i$ ,
- $S_{C_i}$  - starea aleasă prin condiția  $i$ ,
- $t_{max}$  - durata maximă de verde pentru o fază de semafor.

În continuare sunt enumerate avantajele oferite de regulatorul prezentat mai sus:

- elimină timpii morți de așteptare la semafor - nu există situație în care un participant la trafic așteaptă pe culoarea roșie a semaforului, în timp ce pe culoarea verde a semaforului nu se înregistrează trafic,
- evenimentele de trafic sunt prioritizate în funcție de densitatea de trafic,
- definirea unor timpi limită de așteptare pe culoarea roșie a semaforului și utilizarea acestora în soluția de conducere,
- soluția de conducere se execută în timp real pe baza informațiilor curente de trafic,
- prin utilizarea acestei soluții traficul nu este sacadat,

- se urmărește creșterea vitezei medii de deplasare prin intersecție și creșterea lungimilor cozilor eliberate pe culoarea verde a semaforului,
- se pot conduce intersecții cu geometrie complexă,
- se ține seama de pietoni în soluția de conducere.

#### 4.6. Studii de caz legate de conducerea traficului rutier într-o intersecție simplă

Se consideră intersecție simplă o intersecție cu geometrie simplă în care o stradă care intră în intersecție primește culoarea verde a semaforului la un moment dat pentru toate benzile de mers (înainte, stânga, dreapta). Cu alte cuvinte, doar o stradă este servită prin semaforizare la un moment dat, toate celelalte străzi fiind în așteptare (a se vedea Figura 4.11).

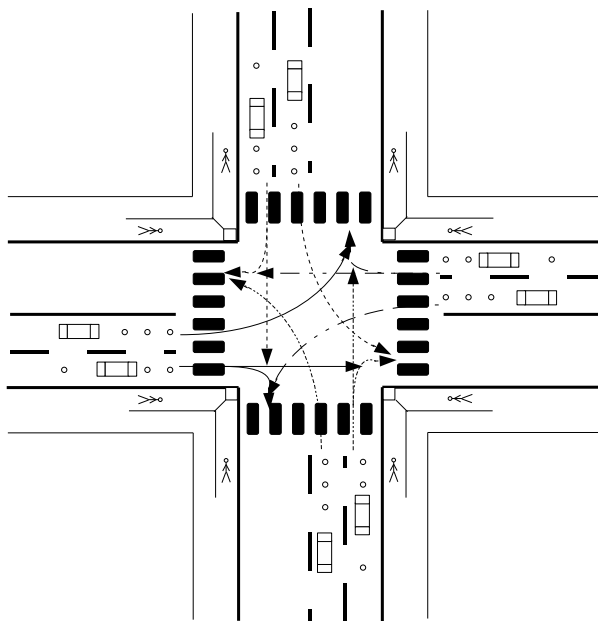


Figura 4.11: Schema unei intersecții simple

Acest tip de semaforizare la nivel de intersecție se regăsește în zilele noastre în multe intersecții, fie că este vorba de o conducere dinamică (în timp real) sau statică, fie că este vorba de un oraș mic sau mare, fie că amplasarea este într-o zonă centrală sau la periferie. Putem astfel afirma că, deși acest tip de semaforizare are anumite restricții de proiectare a fluxului autovehiculelor și pietonilor printr-o intersecție, are totuși o mare utilizare, datorită simplității sale. Pentru studierea rezultatelor comportamentului sistemului de transport în urma utilizării algoritmilor de conducere propuși, în acest capitol se vor considera studii de caz pentru diferite

condiții de trafic, iar legat de numărul străzilor din intersecție s-a ales o intersecție simplă cu patru străzi care intră și patru străzi care ies. Algoritmul de conducere este general și nu ține seama de numărul străzilor, fapt care va fi demonstrat în capitolul următor.

#### 4.6.1. Studii de caz legate de conducerea traficului rutier la nivelul autovehiculelor

În acest subcapitol, conducerea traficului într-o intersecție se realizează ținând seama doar de lungimile cozilor de așteptare formate din autovehiculele de pe fiecare stradă care intră în intersecție. În algoritmul de conducere nu este luat în considerare numărul pietonilor care așteaptă să traverseze strada prin respectiva intersecție. Acest caz de conducere a traficului, deși un caz particular, poate fi folosit cu succes în situațiile în care fluxul autovehiculelor printr-o anumită intersecție este mult mai mare decât fluxul pietonilor. Cu toate acestea, deși algoritmul de conducere este axat pe datele de trafic legate de autovehicule, pietonii vor avea posibilitatea de a traversa în cadrul unor faze de semafor, cu dezavantajul de a nu se ține seama de timpii de așteptare și de nevoile de mișcare ale acestora.

Înainte de a prezenta scenariile de simulare împreună cu rezultatele aferente, se vor defini câteva noțiuni legate de condițiile de trafic care stau la baza scenariilor mai sus amintite:

- condițiile de *trafic echilibrat* se regăsesc în traficul rutier urban la nivel de intersecție atunci când vitezele medii de sosire și de plecare au valori apropiate pentru toate grupurile de evenimente  $G_i$  din respectiva intersecție,
- *densitatea* (notată cu  $c$ ) *mare de trafic* măsurată în [veh/m] se întâlnește în situațiile în care viteza de sosire a autovehiculelor în coada de așteptare depășește 3 [m/s] ( $\bar{\lambda}_i \geq 1, \forall i = \overline{1, I}, I$  - numărul grupurilor de evenimente din intersecție),
- *densitatea* ( $c$ ) *medie de trafic* se întâlnește în situațiile în care viteza de sosire a autovehiculelor în coada de așteptare  $\bar{\lambda}_i \in [1.5, 3), \forall i = \overline{1, I}$ ,
- *densitatea* ( $c$ ) *mică de trafic* se întâlnește în situațiile în care viteza de sosire a autovehiculelor în coada de așteptare  $\bar{\lambda}_i \in [0.5, 1.5), \forall i = \overline{1, I}$ ,
- *densitatea* ( $c$ ) *de trafic noaptea* se întâlnește în situațiile în care viteza de sosire a autovehiculelor în coada de așteptare  $\bar{\lambda}_i \in [0, 0.5), \forall i = \overline{1, I}$ .

#### Scenariul de simulare 1: condiții de trafic echilibrat

Situațiile în care rata de creștere a cozilor de așteptare pentru străzile care intră în intersecție au valori apropiate sunt rareori întâlnite. Vom arăta în continuare că și în această situație algoritmul de conducere local propus la nivel de agent aduce totuși îmbunătățiri algoritmului de conducere statică de tip "split cycle". Au fost alese patru scenarii de simulare pentru diferite valori ale densității traficului: densitate mare de trafic, densitate medie, densitate mică și densitate de trafic pe timpul nopții. Au fost simulate ambele soluții, atât soluția de conducere propusă, cât și soluția de conducere statică, pentru fiecare dintre cazurile enumerate mai sus, pe baza unei modelării a cozilor de așteptare de tipul  $G/G/1$ .

Restricțiile și setările simulatorului pentru acest scenariu de simulare sunt următoarele:

- s-a ales o intersecție cu patru străzi (cu posibilitate de extindere),

- vitezele de plecare ale autovehiculelor au valori prestabilite pentru primele cicluri de semafor,
- agentul local va învăța continuu și va actualiza vitezele medii de plecare,
- monitorizarea variabilelor și a indicatorilor de calitate se realizează după 600 sec, timp suficient și necesar pentru intrarea sistemului de conducere în regim normal de funcționare,
- $t_{sim} = 7200 \text{ sec}$  - durata de simulare,
- $t_{lim} = 120 \text{ sec}$  - limita maximă de așteptare pentru un participant la trafic fără a primi culoarea verde,
- $t_{max} = 40 \text{ sec}$  - durata maximă de verde pentru o fază de semafor,
- $t_{min} = 6 \text{ sec}$  - durata minimă de verde pentru o fază de semafor,
- $l_{max} = 1000 \text{ m}$  - lungimea maximă a unei cozi de așteptare. Dacă lungimea unei anumite cozi de așteptare depășește acest prag, se va considera valoarea lungimii cozii de așteptare ca fiind  $l_{max}$ ,
- $\bar{\lambda}_i \cong \bar{\lambda}_j, \forall i, j = \overline{1, I}, i \neq j$ ,
- $\bar{\lambda}_i^{(k)} = \bar{\lambda}_i^{(p)}, \forall k, p \leq t_{sim}, k \neq p$  - vitezele medii de sosire ale autovehiculelor pentru grupul de evenimente  $G_i$  sunt constante pe toată perioada de simulare (cu posibilitatea de a modifica aceste valori la fiecare minut),
- același set de date de trafic au fost utilizate în simularea pe o perioadă de 2 ore a comportamentului sistemului de transport în urma utilizării atât a algoritmului LTA, cât și a algoritmului static.

Figurile prezentate în acest capitol sunt formate din trei grafice reprezentând comparația între soluția propusă LTA și soluția de conducere statică pentru fiecare dintre cele trei variabile de apreciere a performanței:  $v_m[m/s]$ ,  $t_m[s]$ ,  $l_c[m]$ . Comparația între cele două soluții este realizată grafic cu ajutorul a două funcții, soluția LTA este desenată cu linie punctată, iar soluția statică este desenată cu line continuă.

În Figura 4.12 și în Tabelul 4.7 sunt prezentate rezultatele studiului de caz cu densitate mare de trafic (oră de vârf). Din graficul 4.12(a) se observă că vitezele medii de plecare de la semafor au aceleași valori pentru ambele soluții. Din graficul 4.12(b) se observă că valoarea variabilei  $t_m$  care măsoară timpii morți pe culoarea verde a semaforului este identică pentru ambele soluții, datorită cozilor mari de așteptare existente pentru fiecare stradă în parte și datorită incapacității soluțiilor de conducere de a servi aproape toate autovehiculele aflate în așteptare dintr-o singură fază de semafor. Graficul 4.12(c) întărește ipoteza că pentru densități mari de trafic, nu se pot aduce îmbunătățiri majore soluției statice, sumele lungimilor cozilor de așteptare după terminarea fiecărei faze de semafor fiind de asemenea aproape identice pentru cele două soluții de conducere. Studiind valorile indicatorilor de calitate prezentate în Tabelul 4.7 se observă că valorile celor trei indicatori sunt aproape identice pentru ambele soluții de conducere. Putem astfel concluziona că soluția LTA (Local Traffic Agent), în cazul densității mari de trafic pentru toate străzile care intră în intersecție, nu aduce îmbunătățiri în ceea ce privește fluidizarea traficului rutier datorită lungimilor mari ale cozilor de așteptare.

În Figura 4.13 și în Tabelul 4.8 sunt prezentate rezultatele studiului de caz cu densitate medie de trafic (trafic normal). Se menționează că parametri de trafic în acest caz se apropie de pragurile de saturație. Studiind critic variațiile în timp ale ieșirilor de apreciere din Figura 4.13 se pot face următoarele afirmații:

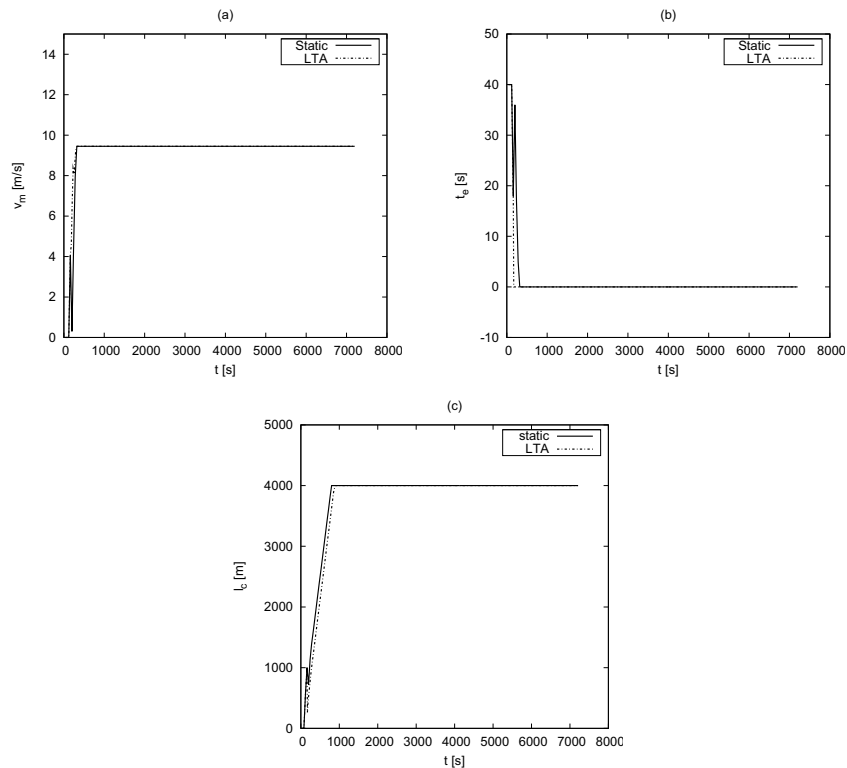


Figura 4.12: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de densitate mare de trafic pentru scenariul de simulare 1

- din graficul 4.13(a) se observă că valorile medii ale variabilei  $v_m$  sunt apropiate pentru ambele soluții de conducere simulate. De asemenea se poate observa că valorile variabilei  $v_m$  oscilează cu amplitudine de aproximativ  $1.5 \text{ m/s}$  în cazul algoritmului LTA și cu aproximativ  $3.5 \text{ m/s}$  în cazul algoritmului static;
- din graficul 4.13(b) se observă că variabila  $t_m$  înregistrează valori mai mari în medie cu 12% în cazul algoritmului static după fiecare fază de semafor, în timp ce algoritmul de conducere propus elimină în totalitate timpii morți de semafor, adică în regim staționar constant  $t_m = 0$ ;
- graficul 4.13(c) arată de asemenea o creștere cu până la 475% a sumei lungimilor cozilor de așteptare în intervalul de două ore în defavoarea algoritmului static, algoritmul LTA fluidizând mult mai bine traficul prin intersecție.

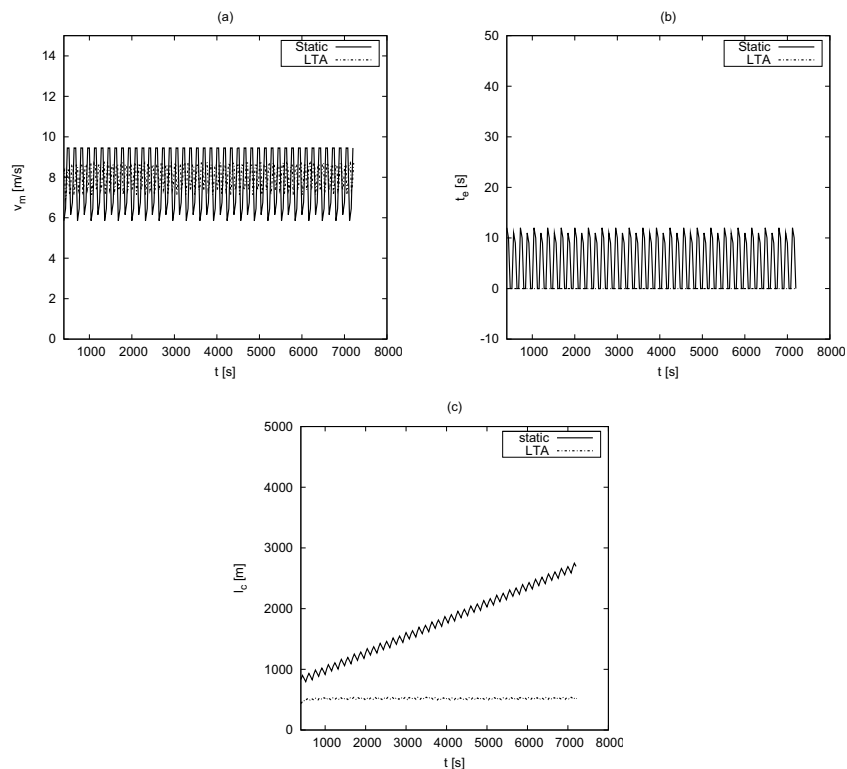
Studiind critic valorile indicatorilor de calitate din Tabelul 4.8 se observă următoarele:

- algoritmul LTA aduce o îmbunătățire de 3% în ceea ce privește golirea cozilor de așteptare,
- algoritmul LTA reduce cu 871 *sec* timpii morți de semafor,
- algoritmul LTA reduce cu 245% suma ponderată a lungimilor cozilor de așteptare la semafor.

Tabelul 4.7: Indicatori de calitate în condiții de densitate mare de trafic pentru scenariul de simulare 1

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	62748	0	3672
<b>LTA</b>	62748	0	3661

Concluzionăm că în situația densităților de trafic puțin sub valoarea densității de saturație pentru toate străzile care intră în intersecție, algoritmul LTA propus se comportă mult mai bine decât algoritmul static.

Figura 4.13: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$ (c), în condiții de densitate medie de trafic pentru scenariul de simulare 1

În Figura 4.14 și în Tabelul 4.9 sunt prezentate rezultatele studiului de caz cu densitate mică de trafic (trafic liber). Studiind critic variațiile în timp ale ieșirilor de apreciere din Figura 4.14 se pot face următoarele afirmații:

- din graficul 4.14(a) se observă că valorile medii ale variabilei  $v_m$  sunt apropiate pentru ambele soluții de conducere simulate. De asemenea se poate observa că valorile variabilei  $v_m$  oscilează cu amplitudine de aproximativ  $0.25 \text{ m/s}$  în cazul algoritmului LTA și cu aproximativ  $2 \text{ m/s}$  în cazul algoritmului static;
- din graficul 4.14(b) se observă că variabila  $t_m$  înregistrează valori mai mari în medie cu 50% în cazul algoritmului static după fiecare fază de semafor, în timp



Tabelul 4.8: Indicatori de calitate în condiții de densitate medie de trafic pentru scenariul de simulare 1

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	52296	871	1646
<b>LTA</b>	53868	0	476

ce algoritmul de conducere propus elimină în totalitate timpii morți de semafor, adică în regim staționar constant  $t_m = 0$ ;

- graficul 4.14(c) arată de asemenea o creștere medie cu 500% a sumei lungimilor cozilor de așteptare în intervalul de două ore în defavoarea algoritmului static, algoritmul LTA fluidizând mult mai bine traficul prin intersecție.

Studiind critic valorile indicatorilor de calitate din Tabelul 4.9 se observă următoarele:

- algoritmul static aduce o îmbunătățire de 4.5% în ceea ce privește golirea cozilor de așteptare,
- algoritmul LTA reduce cu 3141 *sec* timpii morți de semafor,
- algoritmul LTA reduce cu 535% suma ponderată a lungimilor cozilor de așteptare la semafor.

Concluzionăm că în condiții de trafic subsaturat pentru toate străzile care intră în intersecție, algoritmul LTA propus se comportă mult mai bine decât algoritmul static.

Tabelul 4.9: Indicatori de calitate în condiții de densitate mică de trafic pentru scenariul de simulare 1

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	25056	3141	330
<b>LTA</b>	23982	0	52

Studiul de caz cu densitate foarte mică de trafic (traficul noaptea) este prezentat în Figura 4.15. Din graficul 4.15(a) se observă că valoarea medie a variabilei  $v_m$  este aproximativ cu 300% mai mare în favoarea algoritmului LTA, fapt ce are semnificația că mai multe autovehicule sunt servite în timpul culorii verzi utilizând algoritmul LTA decât algoritmul static. Din graficul 4.15(b) se observă că variabila  $t_m$  înregistrează valori mai mari în medie cu 75% în cazul algoritmului static decât în cazul algoritmului propus. Graficul 4.15(c) arată de asemenea o scădere a sumei lungimilor cozilor de așteptare în intervalul de două ore, de aproape șazeci de ori în favoarea algoritmului LTA, datorită faptului că algoritmul propus reduce considerabil lungimile cozilor de așteptare eliminând timpii morți de semafor. Concluzionăm astfel că în cazul densității de trafic nocturn, performanțele obținute de algoritmul LTA propus depășesc cu mult performanțele obținute de algoritmul static atât în ceea ce privește fluidizarea traficului, cât și în micșorarea lungimilor cozilor de așteptare prin eliminarea timpilor morți pentru culoarea verde.

În Figura 4.15 și în Tabelul 4.10 sunt prezentate rezultatele studiului de caz cu densitate foarte mică de trafic (trafic pe timp de noapte). Studiind critic variațiile în timp ale ieșirilor de apreciere din Figura 4.15 se pot face următoarele afirmații:

- din graficul 4.15(a) se observă că valoarea medie a variabilei  $v_m$  este aproximativ cu 200% mai mare în favoarea algoritmului LTA, fapt ce are semnificația că mai multe autovehicule sunt servite în timpul culorii verzi utilizând algoritmul LTA decât algoritmul static;

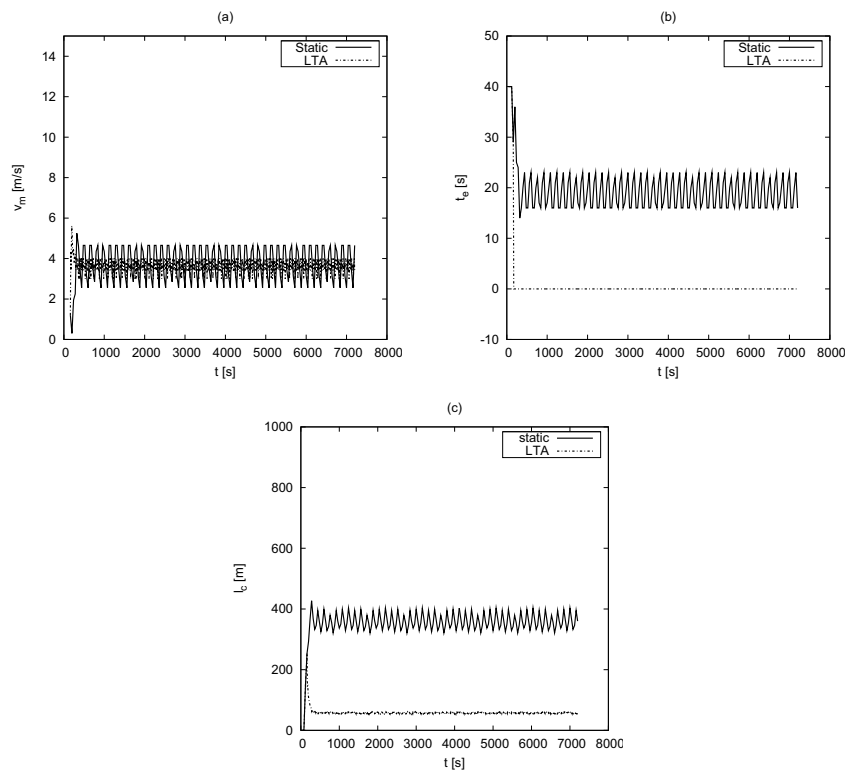


Figura 4.14: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de densitate mică de trafic pentru scenariul de simulare 1

- din graficul 4.15(b) se observă că variabila  $t_m$  înregistrează valori mai mari în medie cu 75% în cazul algoritmului static decât în cazul algoritmului propus;
- graficul 4.15(c) arată de asemenea o scădere a sumei lungimilor cozilor de așteptare în intervalul de două ore, de aproape șaiszeci de ori în favoarea algoritmului LTA, datorită faptului că algoritmul propus reduce considerabil lungimile cozilor de așteptare eliminând timpii morți de semafor.

Studiind critic valorile indicatorilor de calitate din Tabelul 4.10 se observă următoarele:

- algoritmul LTA aduce o îmbunătățire de 108% în ceea ce privește golirea cozilor de așteptare,
- algoritmul LTA reduce cu 3236 *sec* timpii morți de semafor,
- algoritmul LTA reduce cu 2550% suma ponderată a lungimilor cozilor de așteptare la semafor.

Concluzionăm că în condiții de trafic pe timp de noapte algoritmul LTA propus se comportă mult mai bine decât algoritmul static.

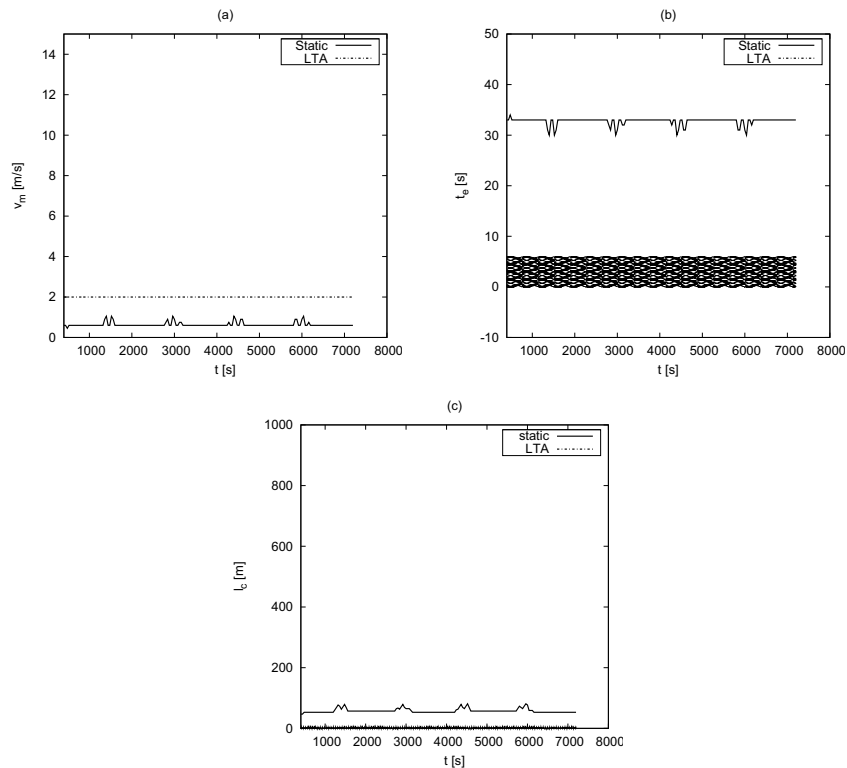


Figura 4.15: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de trafic pe timp de noapte pentru scenariul de simulare 1

### Scenariul de simulare 2: condiții de trafic neechilibrat, viteze medii de sosire constante pentru același grup de evenimente

Condițiile de trafic neechilibrat sunt deseori întâlnite în traficul rutier urban. Un model de trafic neechilibrat este un model foarte aproape de realitatea din intersecțiile semaforizate ale zilelor noastre. Pentru scenariul curent, studiile de caz sunt prevăzute cu viteze medii de sosire constante pentru același grup de evenimente  $G_i$ , iar densitățile de trafic diferă pentru restul grupurilor de evenimente  $G_j | j = 1, I, j \neq i$ . Similar cu scenariul anterior, au fost alese patru studii de caz bazate pe diferite valori ale densității traficului: densitate mare de trafic, densitate medie, densitate mică și densitate de trafic pe timpul nopții, cu observația că la fiecare studiu de caz există cel puțin un grup de evenimente a cărui densitate de trafic diferă de restul densităților de trafic în respectiva intersecție. În ceea ce privește modelarea cozilor de așteptare, procesul de sosire a autovehiculelor este de tip Markovian (stochastic), iar modelul general este de tipul  $M/G/1$ . Restricțiile și setările simulatorului pentru acest scenariu de simulare sunt următoarele:

- intersecție cu patru străzi (cu posibilitate de extindere),
- vitezele de plecare ale autovehiculelor au valori prestabilite pentru primele cicluri de semafor,
- agentul local va învăța continuu și va actualiza vitezele de plecare,

Tabelul 4.10: Indicatori de calitate în condiții de trafic pe timp de noapte pentru scenariul de simulare 1

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	4224	5438	53
<b>LTA</b>	8802	2202	2

- monitorizarea variabilelor și a indicatorilor de calitate se realizează după 600 *sec*, timp suficient și necesar pentru intrarea sistemului de conducere în regim normal de funcționare,
- $t_{sim} = 7200 \text{ sec}$  - durata de simulare,
- $t_{lim} = 120 \text{ sec}$  - limita maximă de așteptare pentru un participant la trafic fără a primi culoarea verde,
- $t_{max} = 40 \text{ sec}$  - durata maximă de verde pentru o fază de semafor,
- $t_{min} = 6 \text{ sec}$  - durata minimă de verde pentru o fază de semafor,
- $l_{max} = 1000 \text{ m}$  - lungimea maximă a unei cozi de așteptare. Dacă lungimea unei anumite cozi de așteptare depășește acest prag, se va considera valoarea lungimii cozii de așteptare ca fiind  $l_{max}$ ,
- $\bar{\lambda}_i \neq \bar{\lambda}_j, \forall i, j = \overline{1, I}, i \neq j$ ,
- $\bar{\lambda}_i^{(k)} = \bar{\lambda}_i^{(p)}, \forall k, p \leq t_{sim}, k \neq p$  - vitezele medii de sosire ale autovehiculelor pentru grupul de evenimente  $G_i$  sunt constante pe toată perioada de simulare (cu posibilitatea de a modifica aceste valori la fiecare minut).

În Figura 4.16 și în Tabelul 4.11 sunt prezentate rezultatele studiului de caz în care majoritatea grupurilor de evenimente din intersecție au densități mari de trafic, un singur grup având densitate mică. Studiind critic variațiile în timp ale ieșirilor de apreciere din Figura 4.16 se pot face următoarele afirmații:

- din graficul 4.16(a) se observă că valoarea medie a variabilei  $v_m$  este aproximativ cu 30% mai mare în favoarea algoritmului LTA, fapt ce are semnificația că mai multe autovehicule sunt servite în timpul culorii verzi utilizând algoritmul LTA decât algoritmul static. De asemenea se poate observa că valorile variabilei  $v_m$  oscilează cu amplitudine de aproximativ 2.3 *m/s* în cazul algoritmului LTA și cu aproximativ 6 *m/s* în cazul algoritmului static;
- din graficul 4.16(b) se observă că variabila  $t_m$  înregistrează valori mai mari în medie cu 25% în cazul algoritmului static decât în cazul algoritmului propus;
- graficul 4.16(c) arată că sumele lungimilor cozilor de așteptare după terminarea fiecărei faze de semafor sunt identice pentru cele două soluții de conducere.

Studiind critic valorile indicatorilor de calitate din Tabelul 4.11 se observă următoarele:

- algoritmul LTA aduce o îmbunătățire de 16% în ceea ce privește golirea cozilor de așteptare,
- algoritmul LTA reduce cu 861 *sec* timpii morți de semafor,
- algoritmul LTA reduce cu 3% suma ponderată a lungimilor cozilor de așteptare la semafor.

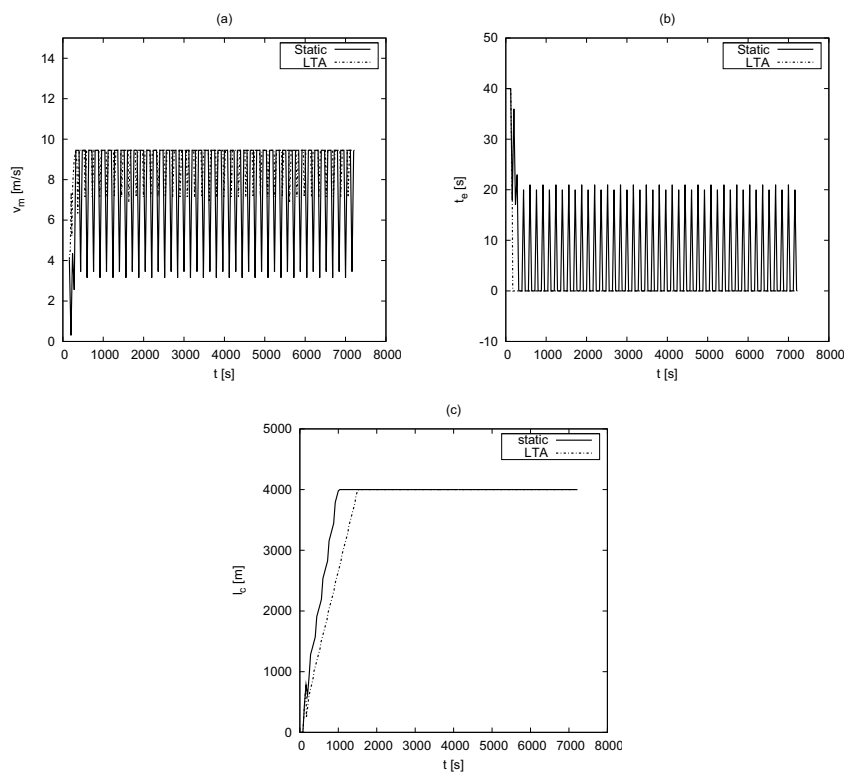


Figura 4.16: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de densitate majoritară mare de trafic neechilibrat (un grup cu densitate mică) pentru scenariul de simulare 2

Concluzionăm că în condiții de densitate majoritară mare de trafic neechilibrat și un singur grup cu densitate mică, algoritmul LTA propus se comportă mai bine decât algoritmul static.

În Figura 4.17 și în Tabelul 4.12 sunt prezentate rezultatele studiului de caz în care majoritatea grupurilor de evenimente din intersecție au densități medii de trafic, un singur grup având densitate mare. Studiind critic variațiile în timp ale ieșirilor de apreciere din Figura 4.17 se pot face următoarele afirmații:

- din graficul 4.17(a) se observă că valoarea medie a variabilei  $v_m$  este aproximativ cu 8% mai mare în favoarea algoritmului LTA, fapt ce are semnificația că mai multe autovehicule sunt servite în timpul culorii verzi utilizând algoritmul LTA decât algoritmul static. De asemenea se poate observa că valorile variabilei  $v_m$  oscilează cu amplitudine de aproximativ  $2.24 \text{ m/s}$  în cazul algoritmului LTA și cu aproximativ  $3.6 \text{ m/s}$  în cazul algoritmului static;
- din graficul 4.17(b) se observă că variabila  $t_m$  înregistrează valori mai mari în medie cu 25% în cazul algoritmului static decât în cazul algoritmului propus;
- graficul 4.17(c) arată de asemenea o creștere mai mare de 700% a sumei lungimilor cozilor de așteptare în intervalul de două ore în defavoarea algoritmului static, algoritmul LTA fluidizând mult mai bine traficul prin intersecție.

Tabelul 4.11: Indicatori de calitate în condiții de densitate majoritară mare de trafic neechilibrat (un grup cu densitate mică) pentru scenariul de simulare 2

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	52416	861	3642
<b>LTA</b>	60930	0	3535

Studiind critic valorile indicatorilor de calitate din Tabelul 4.12 se observă următoarele:

- algoritmul LTA aduce o îmbunătățire de 15% în ceea ce privește golirea cozilor de așteptare,
- algoritmul LTA reduce cu 1354 *sec* timpii morți de semafor,
- algoritmul LTA reduce cu 574% suma ponderată a lungimilor cozilor de așteptare la semafor.

Concluzionăm că în condiții de densitate majoritară medie de trafic neechilibrat și un singur grup cu densitate mare, algoritmul LTA propus se comportă mult mai bine decât algoritmul static.

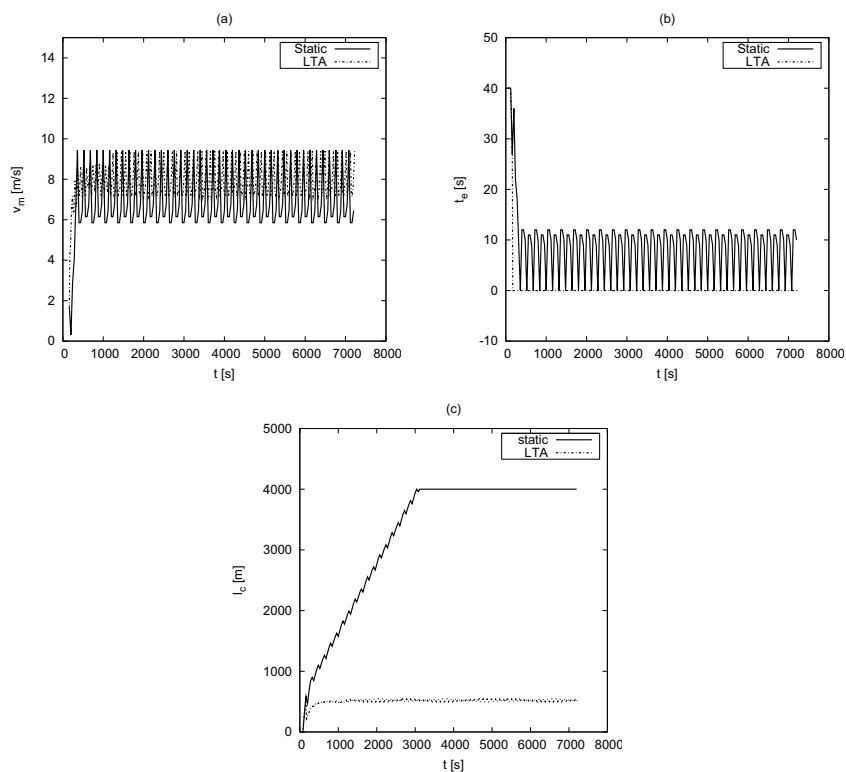


Figura 4.17: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$ (c), în condiții de densitate majoritară medie de trafic neechilibrat (un grup cu densitate mare) pentru scenariul de simulare 2

În Figura 4.18 și în Tabelul 4.13 sunt prezentate rezultatele studiului de caz în care majoritatea grupurilor de evenimente din intersecție au densități medii de trafic,

Tabelul 4.12: Indicatori de calitate în condiții de densitate majoritară medie de trafic neechilibrat (un grup cu densitate mare) pentru scenariul de simulare 2

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	46500	1354	3197
<b>LTA</b>	53826	0	474

un singur grup având densitate mică. Studiind critic variațiile în timp ale ieșirilor de apreciere din Figura 4.18 se pot face următoarele afirmații:

- din graficul 4.18(a) se observă că valoarea medie a variabilei  $v_m$  este aproximativ cu 15% mai mare în favoarea algoritmului LTA, fapt ce are semnificația că mai multe autovehicule sunt servite în timpul culorii verzi utilizând algoritmul LTA decât algoritmul static. De asemenea se poate observa că valorile variabilei  $v_m$  oscilează cu amplitudine de aproximativ  $1.26 \text{ m/s}$  în cazul algoritmului LTA și cu aproximativ  $4.8 \text{ m/s}$  în cazul algoritmului static;
- din graficul 4.18(b) se observă că variabila  $t_m$  înregistrează valori mai mari în medie cu 37.5% în cazul algoritmului static decât în cazul algoritmului propus;
- graficul 4.18(c) arată de asemenea o creștere de 150% a sumei lungimilor cozilor de așteptare în intervalul de două ore în defavoarea algoritmului static, algoritmul LTA fluidizând mult mai bine traficul prin intersecție.

Studiind critic valorile indicatorilor de calitate din Tabelul 4.13 se observă următoarele:

- ambele soluții golesc cozile de așteptare în același ritm,
- algoritmul LTA reduce cu 1930 *sec* timpii morți de semafor,
- algoritmul LTA reduce cu 165% suma ponderată a lungimilor cozilor de așteptare la semafor.

Concluzionăm că în condiții de densitate majoritară medie de trafic neechilibrat și un singur grup cu densitate mică, algoritmul LTA propus se comportă mult mai bine decât algoritmul static.

Tabelul 4.13: Indicatori de calitate în condiții de densitate majoritară medie de trafic neechilibrat (un grup cu densitate mică) pentru scenariul de simulare 2

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	39588	1930	530
<b>LTA</b>	39342	0	200

În Figura 4.19 și în Tabelul 4.14 sunt prezentate rezultatele studiului de caz în care majoritatea grupurilor de evenimente din intersecție au densități mici de trafic, un singur grup având densitate mare. Studiind critic variațiile în timp ale ieșirilor de apreciere din Figura 4.19 se pot face următoarele afirmații:

- din graficul 4.19(a) se observă că valoarea medie a variabilei  $v_m$  este aproximativ cu 5% mai mare în favoarea algoritmului static, fapt ce are semnificația că mai multe autovehicule sunt servite în timpul culorii verzi utilizând algoritmul static decât algoritmul LTA. De asemenea se poate observa că valorile variabilei  $v_m$  oscilează cu amplitudine de aproximativ  $2.65 \text{ m/s}$  în cazul algoritmului LTA și cu aproximativ  $6.6 \text{ m/s}$  în cazul algoritmului static;

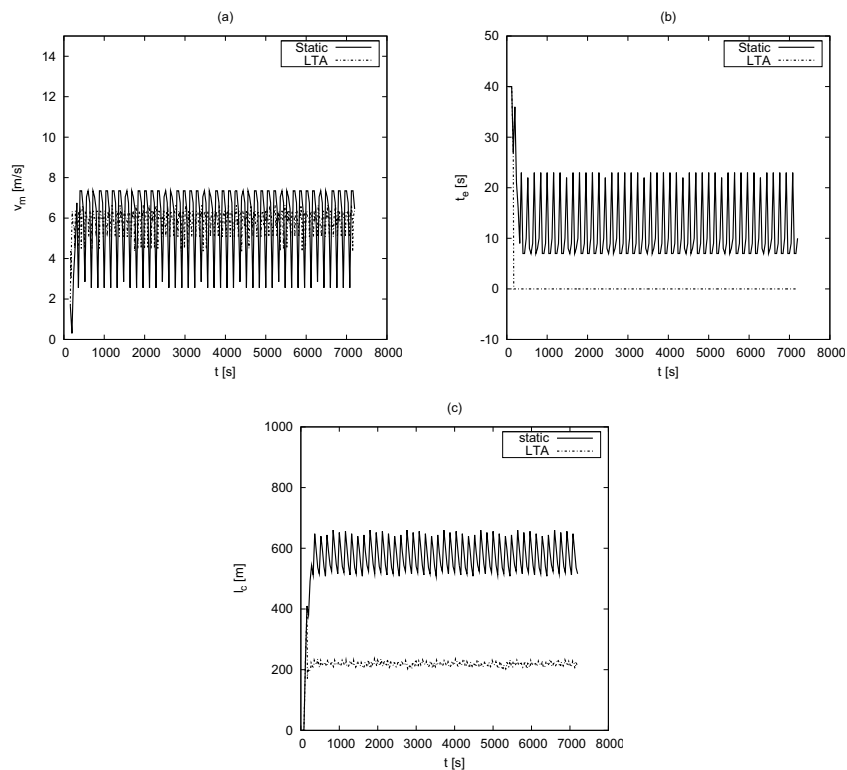


Figura 4.18: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$ (c), în condiții de densitate majoritară medie de trafic neechilibrat (un grup cu densitate mică) pentru scenariul de simulare 2

- din graficul 4.19(b) se observă că variabila  $t_m$  înregistrează valori mai mari în medie cu 25% în cazul algoritmului static decât în cazul algoritmului propus;
- graficul 4.19(c) arată de asemenea o creștere mai mare de 1900% a sumei lungimilor cozilor de așteptare în intervalul de două ore în defavoarea algoritmului static, algoritmul LTA fluidizând mult mai bine traficul prin intersecție.

Studiind critic valorile indicatorilor de calitate din Tabelul 4.14 se observă următoarele:

- algoritmul LTA aduce o îmbunătățire de 21% în ceea ce privește golirea cozilor de așteptare,
- algoritmul LTA reduce cu 2562 *sec* timpii morți de semafor,
- algoritmul LTA reduce cu 1680% suma ponderată a lungimilor cozilor de așteptare la semafor.

Concluzionăm că în în condiții de densitate majoritară mică de trafic neechilibrat și un singur grup cu densitate mare, algoritmul LTA propus se comportă mult mai bine decât algoritmul static.



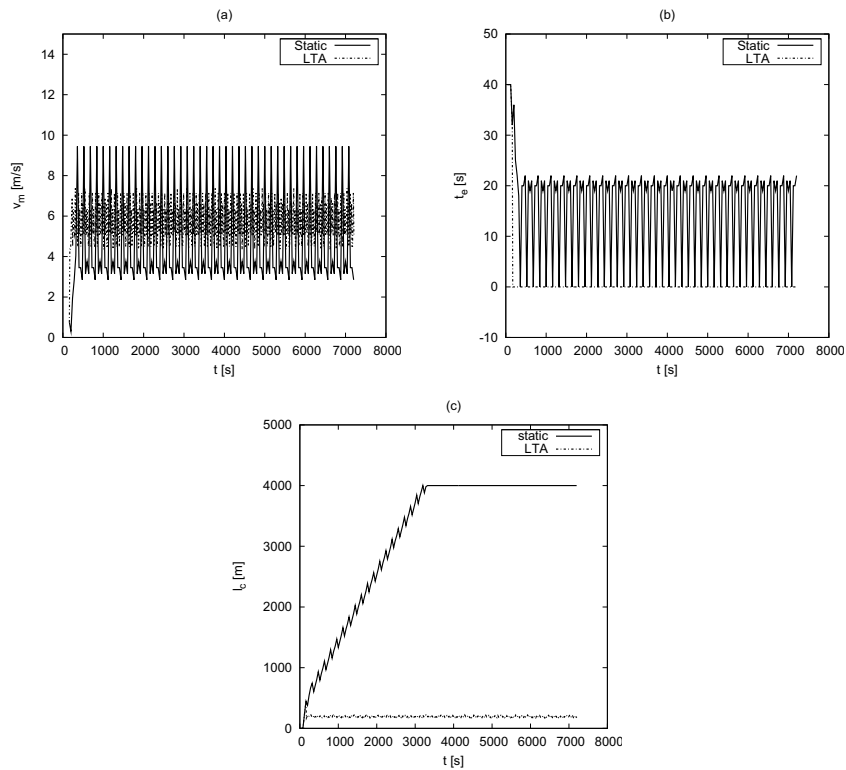


Figura 4.19: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de densitate majoritară mică de trafic neechilibrat (un grup cu densitate mare) pentru scenariul de simulare 2

Tabelul 4.14: Indicatori de calitate în condiții de densitate majoritară mică de trafic neechilibrat (un grup cu densitate mare) pentru scenariul de simulare 2

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	32004	2562	3119
<b>LTA</b>	38934	0	175

### Scenariul de simulare 3: condiții de trafic neechilibrat, viteze medii de sosire variabile pentru același grup de evenimente

În acest subcapitol este prezentat comportamentul sistemului de transport în urma utilizării algoritmului de conducere LTA în condiții de trafic neechilibrat, densitățile de trafic pentru străzile care intră în intersecție au valori diferite, iar vitezele medii de sosire variază între anumite limite pentru același grup de evenimente. Ca și în subcapitolul anterior, legat de modelarea cozilor de așteptare, procesul de sosire a autovehiculelor este de tip Markovian (stochastic), iar modelul general este de tipul  $M/G/1$ . Restricțiile și setările simulatorului pentru acest scenariu de simulare sunt următoarele:

- intersecție cu patru străzi (cu posibilitate de extindere),
- vitezele de plecare ale autovehiculelor au valori prestabilite pentru primele cicluri

de semafor,

- agentul local va învăța continuu și va actualiza vitezele medii de plecare,
- monitorizarea variabilelor și a indicatorilor de calitate se realizează după 600 *sec*, timp suficient și necesar pentru intrarea sistemului de conducere în regim normal de funcționare,
- $t_{sim} = 7200 \text{ sec}$  - durata de simulare,
- $t_{lim} = 120 \text{ sec}$  - limita maximă de așteptare pentru un participant la trafic fără a primi culoarea verde,
- $t_{max} = 40 \text{ sec}$  - durata maximă de verde pentru o fază de semafor,
- $t_{min} = 6 \text{ sec}$  - durata minimă de verde pentru o fază de semafor,
- $l_{max} = 1000 \text{ m}$  - lungimea maximă a unei cozi de așteptare. Dacă lungimea unei anumite cozi de așteptare depășește acest prag, se va considera valoarea lungimii cozii de așteptare ca fiind  $l_{max}$ ,
- $\bar{\lambda}_i \neq \bar{\lambda}_j, \forall i, j = \overline{1, I}, i \neq j$ ,
- $\bar{\lambda}_i^{(k)} \neq \bar{\lambda}_i^{(p)}, \forall k, p \leq t_{sim}, k \neq p$  - vitezele medii de sosire ale autovehiculelor pentru grupul de evenimente  $G_i$  sunt variabile pe toată perioada de simulare.

În Figura 4.20 și în Tabelul 4.15 sunt prezentate rezultatele studiului de caz în care toate grupurile de evenimente din intersecție au densități mici de trafic, valorile vitezelor medii de sosire schimbându-se stohastic la fiecare minut pe toată perioada simulării. Studiind critic variațiile în timp ale ieșirilor de apreciere din Figura 4.20 se pot face următoarele afirmații:

- din graficul 4.20(a) se observă că valoarea medie a variabilei  $v_m$  este aproximativ cu 3% mai mare în favoarea algoritmului LTA, fapt ce are semnificația că mai multe autovehicule sunt servite în timpul culorii verzi utilizând algoritmul LTA decât algoritmul static. De asemenea se poate observa că valorile variabilei  $v_m$  oscilează cu amplitudine de aproximativ 1 *m/s* în cazul algoritmului LTA și cu aproximativ 3 *m/s* în cazul algoritmului static;
- din graficul 4.20(b) se observă că variabila  $t_m$  înregistrează valori mai mari în medie cu 43% în cazul algoritmului static decât în cazul algoritmului propus;
- graficul 4.20(c) arată de asemenea o creștere mai mare de 400% a sumei lungimilor cozilor de așteptare în intervalul de două ore în defavoarea algoritmului static, algoritmul LTA fluidizând mult mai bine traficul prin intersecție.

Studiind critic valorile indicatorilor de calitate din Tabelul 4.15 se observă următoarele:

- algoritmul static este cu 4% mai performantă în ceea ce privește golirea cozilor de așteptare,
- algoritmul LTA reduce cu 2991 *sec* timpii morți de semafor,
- algoritmul LTA reduce cu 423% suma ponderată a lungimilor cozilor de așteptare la semafor.

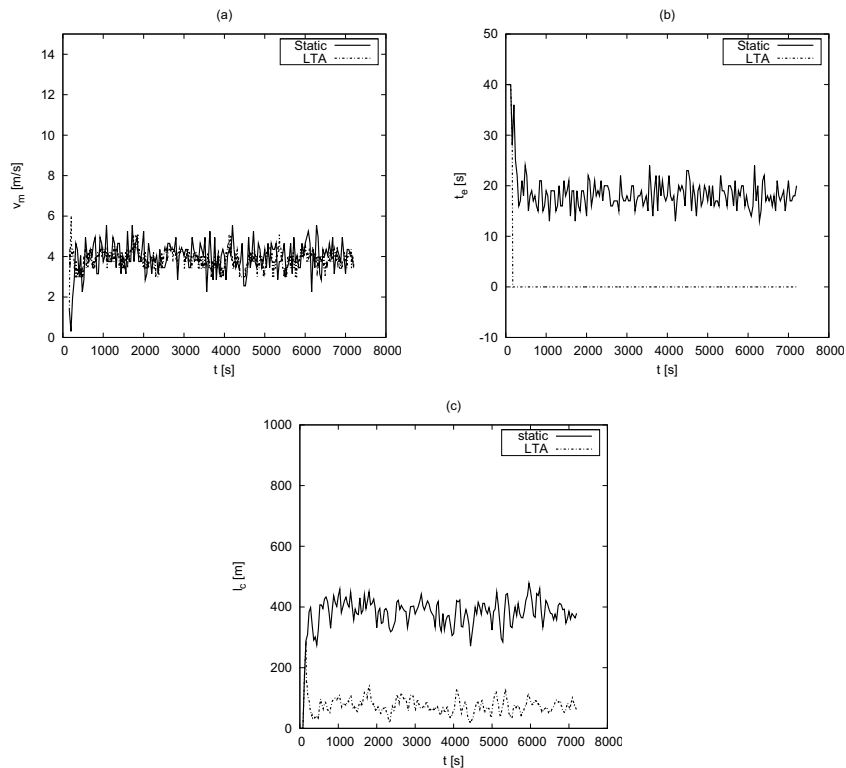


Figura 4.20: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de densitate mică de trafic neechilibrat pentru scenariul de simulare 3

Concluzionăm că în situația densităților de trafic puțin sub valoarea densității de saturație pentru toate străzile care intră în intersecție, algoritmul LTA propus se comportă mult mai bine decât algoritmul static.

În Figura 4.21 și în Tabelul 4.16 sunt prezentate rezultatele studiului de caz în care toate grupurile de evenimente din intersecție au densități medii de trafic, valorile vitezelor medii de sosire schimbându-se stohastic la fiecare minut pe toată perioada simulării. Studiind critic variațiile în timp ale ieșirilor de apreciere din Figura 4.21 se pot face următoarele afirmații:

- din graficul 4.21(a) se observă că valoarea medie a variabilei  $v_m$  este aproximativ cu 3% mai mare în favoarea algoritmului LTA, fapt ce are semnificația că mai multe autovehicule sunt servite în timpul culorii verzi utilizând algoritmul LTA decât algoritmul static. De asemenea se poate observa că valorile variabilei  $v_m$  oscilează cu amplitudine de aproximativ 1.15 m/s în cazul algoritmului LTA și cu aproximativ 2.7 m/s în cazul algoritmului static;
- din graficul 4.21(b) se observă că variabila  $t_m$  înregistrează valori mai mari în medie cu 10% în cazul algoritmului static decât în cazul algoritmului propus;
- graficul 4.21(c) arată de asemenea o creștere mai mare de 45% a sumei lungimilor cozilor de așteptare în intervalul de două ore în defavoarea algoritmului static, algoritmul LTA fluidizând mult mai bine traficul prin intersecție.

Tabelul 4.15: Indicatori de calitate în condiții de densitate mică de trafic neechilibrat pentru scenariul de simulare 3

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	26856	2991	356
<b>LTA</b>	25710	0	68

Studiind critic valorile indicatorilor de calitate din Tabelul 4.16 se observă următoarele:

- ambele soluții golesc cozile de așteptare în același ritm,
- algoritmul LTA reduce cu 619 *sec* timpii morți de semafor,
- algoritmul LTA reduce cu 46% suma ponderată a lungimilor cozilor de așteptare la semafor.

Concluzionăm că în situația densităților de trafic puțin sub valoarea densității de saturație pentru toate străzile care intră în intersecție, algoritmul LTA propus se comportă mult mai bine decât algoritmul static.

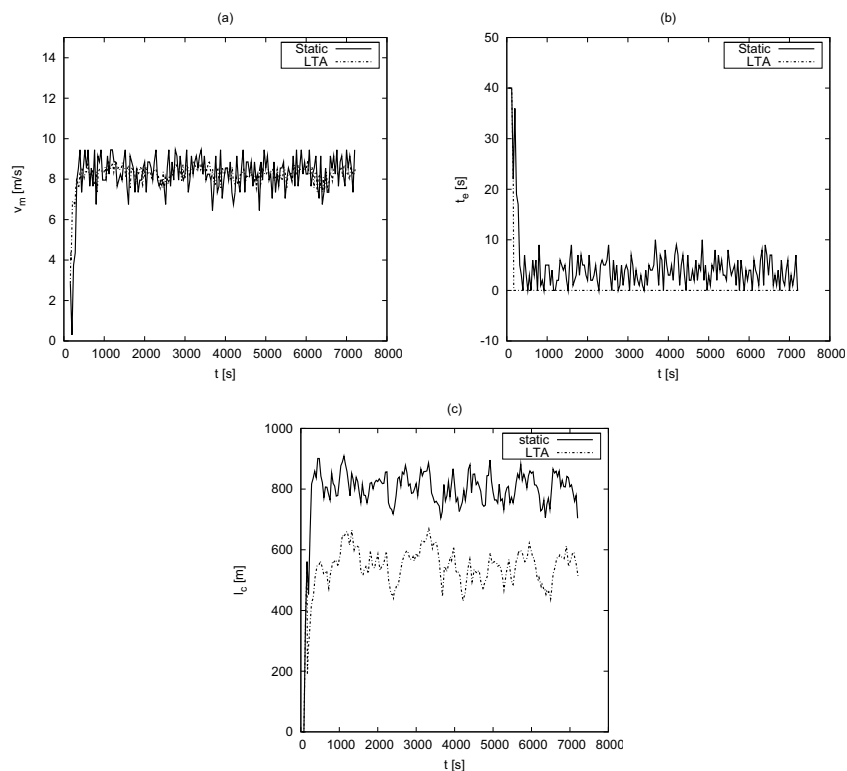


Figura 4.21: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de densitate medie de trafic neechilibrat pentru scenariul de simulare 3

În Figura 4.22 și în Tabelul 4.17 sunt prezentate rezultatele studiului de caz în care toate grupurile de evenimente din intersecție au diferite densități de trafic (de la condiții de trafic subsaturat până la condiții de trafic suprasaturat), valorile vitezelor

Tabelul 4.16: Indicatori de calitate în condiții de densitate medie de trafic neechilibrat pentru scenariul de simulare 3

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	55320	619	742
<b>LTA</b>	54882	0	506

medii de sosire schimbându-se stohastic la fiecare minut pe toată perioada simulării. Studiind critic variațiile în timp ale ieșirilor de apreciere din Figura 4.22 se pot face următoarele afirmații:

- din graficul 4.22(a) se observă că valoarea medie a variabilei  $v_m$  este aproximativ cu 11% mai mare în favoarea algoritmului LTA, fapt ce are semnificația că mai multe autovehicule sunt servite în timpul culorii verzi utilizând algoritmul LTA decât algoritmul static. De asemenea se poate observa că valorile variabilei  $v_m$  oscilează cu amplitudine de aproximativ  $1.9 \text{ m/s}$  în cazul algoritmului LTA și cu aproximativ  $3.6 \text{ m/s}$  în cazul algoritmului static;
- din graficul 4.22(b) se observă că variabila  $t_m$  înregistrează valori mai mari în medie cu 18% în cazul algoritmului static decât în cazul algoritmului propus;
- graficul 4.22(c) arată de asemenea o creștere mai mare de 75% a sumei lungimilor cozilor de așteptare în intervalul de două ore în defavoarea algoritmului static, algoritmul LTA fluidizând mult mai bine traficul prin intersecție.

Studiind critic valorile indicatorilor de calitate din Tabelul 4.17 se observă următoarele:

- ambele soluții golesc cozile de așteptare în același ritm,
- algoritmul LTA reduce cu  $785 \text{ sec}$  timpii morți de semafor,
- algoritmul LTA reduce cu 81% suma ponderată a lungimilor cozilor de așteptare la semafor.

Concluzionăm că în situația densităților de trafic peste valoarea densității de saturație pentru toate străzile care intră în intersecție, algoritmul LTA propus se comportă mult mai bine decât algoritmul static.

Tabelul 4.17: Indicatori de calitate în condiții de densitate diferită de trafic neechilibrat pentru scenariul de simulare 3

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	53328	785	856
<b>LTA</b>	53292	0	471

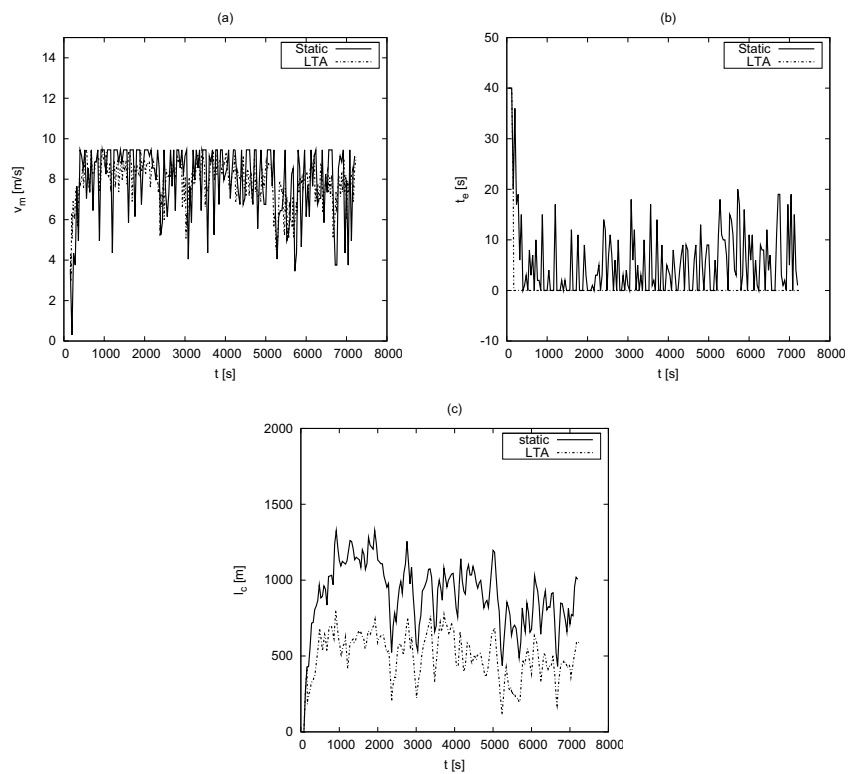


Figura 4.22: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de densitate diferită de trafic neechilibrat pentru scenariul de simulare 3

#### 4.6.2. Studii de caz legate de conducerea traficului rutier la nivelul autovehiculelor și pietonilor

În acest subcapitol, alături de datele de trafic legate de autovehicule, sistemul de detecție va produce și date privind pietonii, iar algoritmul de conducere propus va lua în considerare și informațiile în timp real legate de numărul de pietoni aflați în așteptarea traversării intersecției. În acest sens s-a adăugat o nouă fază de semafor pentru pietoni. După cum se va arăta în continuare, marele avantaj al conducerii semafoarelor într-o intersecție ținând seama de prezența pietonilor este acela de a putea servi la nevoie un număr considerabil de pietoni în așteptare. În zonele urbane centrale există ore de vârf la care oamenii pleacă sau vin de la servicii sau ies în pauza de masă, moment în care intersecțiile din zona respectivă se aglomerează cu pietoni. Este esențial astfel a se ține seama și de pietoni în conducerea traficului rutier într-o intersecție și a stabili timpii de semafor în funcție și de numărul pietonilor în așteptare.

În majoritatea intersecțiilor simple, conducerea statică a semafoarelor suprapune pe aceeași fază de semafor evenimente de trafic ale autovehiculelor cu evenimente de trafic ale pietonilor, fără a se ține seama de faptul că aceste evenimente se intersectează reciproc. Pentru a putea compara algoritmul de conducere propus vom lua în considerare o soluție de conducere statică de tip "split cycle" îmbunătățită prin adăugarea unei faze de semafor pentru pietoni care să nu se intersecteze cu nici un alt eveniment de trafic. După cum s-a specificat și la începutul capitolului, simulările comportamentului sistemului de transport în urma utilizării ambelor soluții (propusă și statică) au fost realizate pentru o intersecție simplă cu patru străzi care intră și ies din intersecție. Restricțiile și setările simulatorului pentru studiile de caz ce vor fi descrise în continuare se rezumă la următoarele:

- intersecție cu patru străzi (cu posibilitate de extindere),
- prioritate identică pentru pietoni și pentru autovehicule (nu este avantajat traficul autovehiculelor),
- $t_{sim} = 7200 \text{ sec}$  - durata de simulare,
- $t_{lim} = 160 \text{ sec}$  - limita maximă de așteptare pentru un participant la trafic fără a primi culoarea verde,
- $t_{max} = 40 \text{ sec}$  - durata maximă de verde pentru o fază de semafor,
- $t_{min} = 6 \text{ sec}$  - durata minimă de verde pentru o fază de semafor,
- $l_{max} = 1000 \text{ m}$  - lungimea maximă a unei cozi de așteptare. Dacă lungimea unei anumite cozi de așteptare depășește acest prag, se va considera valoarea lungimii cozii de așteptare ca fiind  $l_{max}$ ,
- $\varphi_i(k) \neq \varphi_j(k+1)$ , - numărul de pietoni care ajung în cozile de așteptare ale grupului  $i$ , în intervalul de timp  $[t_k, t_{k+1})$  este diferit de numărul de pietoni care ajung în intervalul de timp  $[t_{k+1}, t_{k+2})$ ,
- $\bar{\lambda}_i \cong \bar{\lambda}_j, \forall i, j = \overline{1, I}, i \neq j$ ,
- $\bar{\lambda}_i^{(k)} = \bar{\lambda}_i^{(p)}, \forall k, p \leq t_{sim}, k \neq p$  - vitezele medii de sosire ale autovehiculelor pentru grupul de evenimente  $G_i$  sunt constante pe toată perioada de simulare (cu posibilitatea de a modifica aceste valori la fiecare minut),
- același set de date de trafic au fost utilizate în simularea pe o perioadă de 2 ore a comportamentului sistemului de transport în urma utilizării atât a algoritmului LTA, cât și a algoritmului static.

**Scenariul de simulare 1: densitate mare de trafic echilibrat al autovehiculelor, diferite rate de sosire ale pietonilor**

În acest subcapitol este prezentat comportamentul sistemului de transport în urma utilizării algoritmului de conducere LTA și a algoritmului static în condiții de trafic echilibrat suprasaturat la nivelul autovehiculelor și diferite rate de creștere a numărului pietonilor doritori să traverseze intersecția. Comportamentul sistemului de transport în urma utilizării fiecărei soluții a fost simulat pe trei studii de caz, câte unul pentru fiecare viteză de sosire a pietonilor în intersecție: mică, medie și mare.

Studiind variațiile în timp ale ieșirilor de apreciere din Figurile 4.23, 4.24, 4.25 și valorile indicatorilor de calitate din Tabelele 4.18, 4.19, 4.20 se observă că pentru algoritmul de conducere statică, includerea pietonilor în soluția de conducere nu influențează datele de trafic ale autovehiculelor. Indiferent de ratele de creștere a numărului pietonilor în așteptarea traversării intersecției, pentru aceleași condiții de trafic ale autovehiculelor se înregistrează aceleași valori de trafic la nivelul autovehiculelor. În schimb, în cazul algoritmului de conducere propus se observă îmbunătățiri ale fluxului traficului autovehiculelor odată cu scăderea ratelor de sosire a pietonilor în intersecție cu până la 18% față de algoritmul de conducere statică, datorită alocării timpilor de verde pentru faza de semafor corespunzătoare pietonilor în funcție de lungimea cozilor de așteptare a pietonilor. De asemenea algoritmul propus reduce cu până la 1008 *sec* timpii morți de semafor prin faptul că ia în considerare și lungimile cozilor pietonilor.

Tabelul 4.18: Indicatori de calitate în condiții de densitate mare de trafic al autovehiculelor și viteză de sosire mare a pietonilor pentru scenariul de simulare 1

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	49896	63	3684
<b>LTA</b>	51030	0	3671

Tabelul 4.19: Indicatori de calitate în condiții de densitate mare de trafic al autovehiculelor și viteză de sosire medie a pietonilor pentru scenariul de simulare 1

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	49896	642	3684
<b>LTA</b>	55566	0	3665

Tabelul 4.20: Indicatori de calitate în condiții de densitate mare de trafic al autovehiculelor și rată de sosire mică a pietonilor pentru scenariul de simulare 1

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	49896	1008	3684
<b>LTA</b>	58968	0	3671



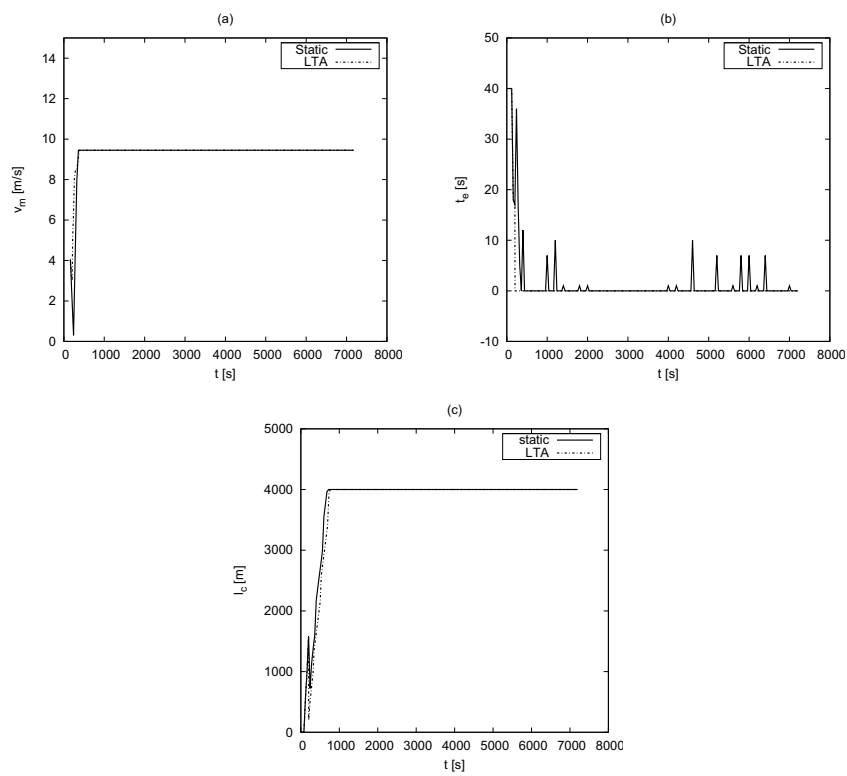


Figura 4.23: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de densitate mare de trafic al autovehiculelor și viteză de sosire mare a pietonilor pentru scenariul de simulare 1

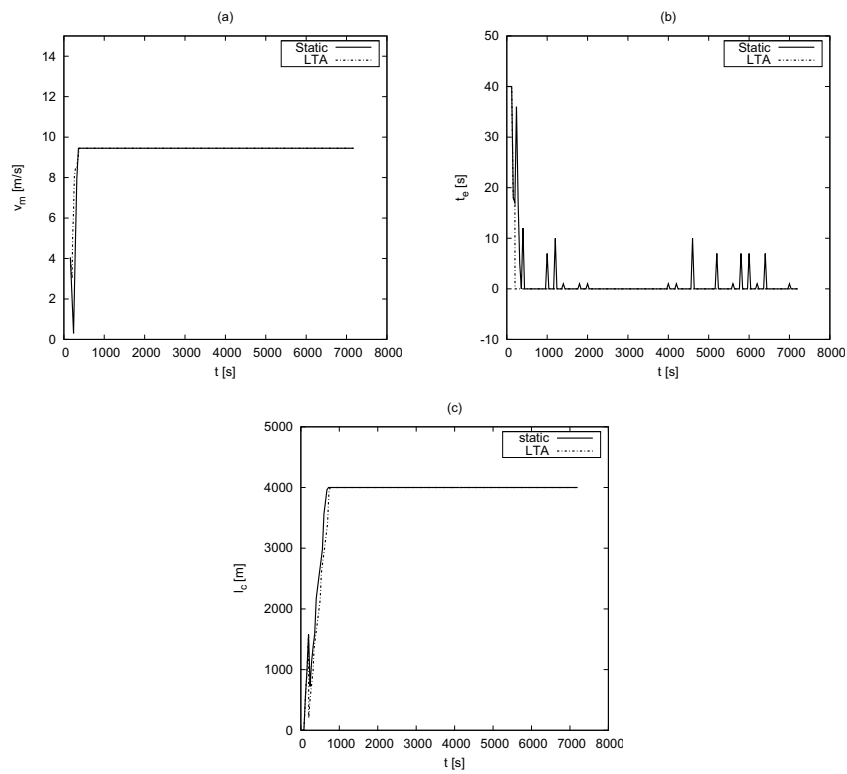


Figura 4.24: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de densitate mare de trafic al autovehiculelor și viteză de sosire medie a pietonilor pentru scenariul de simulare 1

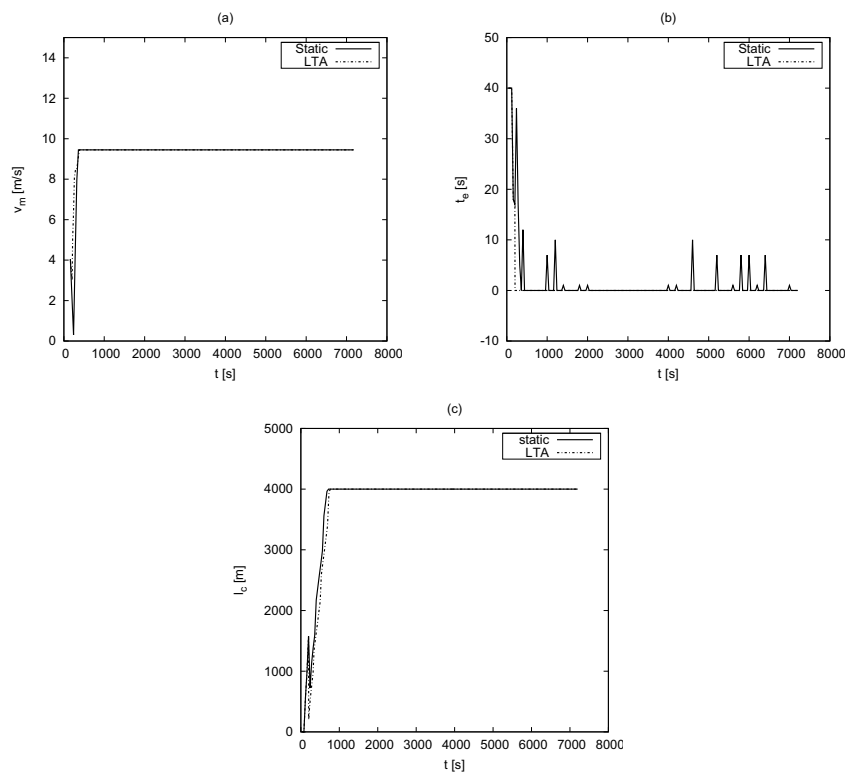


Figura 4.25: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de densitate mare de trafic al autovehiculelor și rată de sosire mică a pietonilor pentru scenariul de simulare 1

### Scenariul de simulare 2: densitate medie de trafic echilibrat al autovehiculelor, diferite rate de sosire a pietonilor

În acest subcapitol este prezentat comportamentul sistemului de transport în urma utilizării algoritmului de conducere LTA și a algoritmului static în condiții de trafic echilibrat aproape de saturație la nivelul autovehiculelor și diferite rate de creștere a numărului pietonilor doritori să traverseze intersecția. Comportamentul sistemului de transport în urma utilizării fiecărei soluții, a fost simulat pe trei studii de caz, câte unul pentru fiecare rată de sosire a pietonilor în intersecție: mică, medie și mare.

Studiind variațiile în timp ale ieșirilor de apreciere din Figurile 4.26, 4.27, 4.28 și valorile indicatorilor de calitate din Tabelele 4.21, 4.22, 4.23 se observă de asemenea că pentru algoritmul de conducere statică, includerea pietonilor în soluția de conducere nu influențează datele de trafic ale autovehiculelor. În schimb, în cazul algoritmului de conducere propus se observă îmbunătățiri majore ale fluxului traficului autovehiculelor odată cu scăderea ratelor de sosire a pietonilor în intersecție după cum urmează:

- algoritmul LTA aduce o îmbunătățire cu până la 18% în ceea ce privește golirea cozilor de așteptare,
- algoritmul LTA reduce cu până la 1354 sec timpii morți de semafor,
- algoritmul LTA reduce cu până la 440% suma ponderată a lungimilor cozilor de așteptare la semafor.

Tabelul 4.21: Indicatori de calitate în condiții de densitate medie de trafic al autovehiculelor și rată de sosire mare a pietonilor pentru scenariul de simulare 2

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	45744	409	3246
<b>LTA</b>	50004	0	2525

Tabelul 4.22: Indicatori de calitate în condiții de densitate medie de trafic al autovehiculelor și rată de sosire medie a pietonilor pentru scenariul de simulare 2

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	45744	988	3246
<b>LTA</b>	52590	0	1187

Tabelul 4.23: Indicatori de calitate în condiții de densitate medie de trafic al autovehiculelor și rată de sosire mică a pietonilor pentru scenariul de simulare 2

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	45744	1354	3246
<b>LTA</b>	53868	0	602

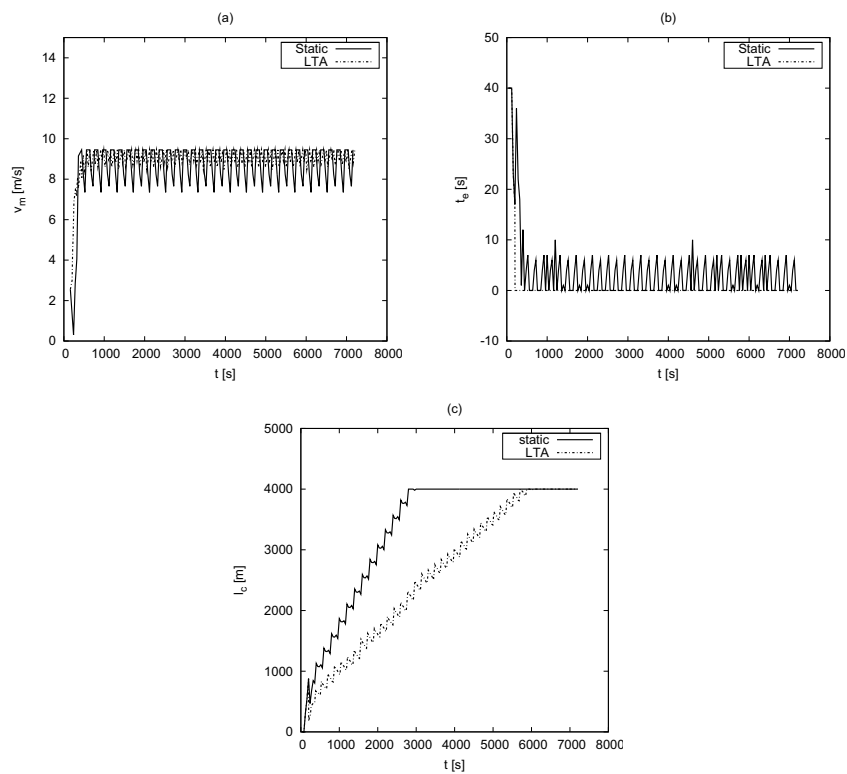


Figura 4.26: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$ (c), în condiții de densitate medie de trafic al autovehiculelor și rată de sosire mare a pietonilor pentru scenariul de simulare 2

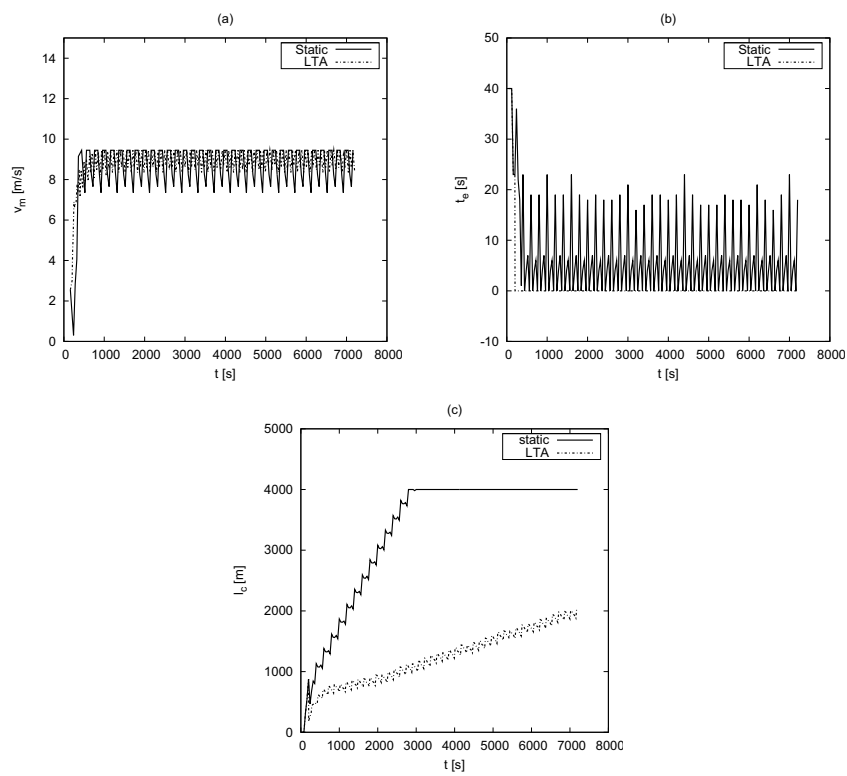


Figura 4.27: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de densitate medie de trafic al autovehiculelor și rată de sosire medie a pietonilor pentru scenariul de simulare 2

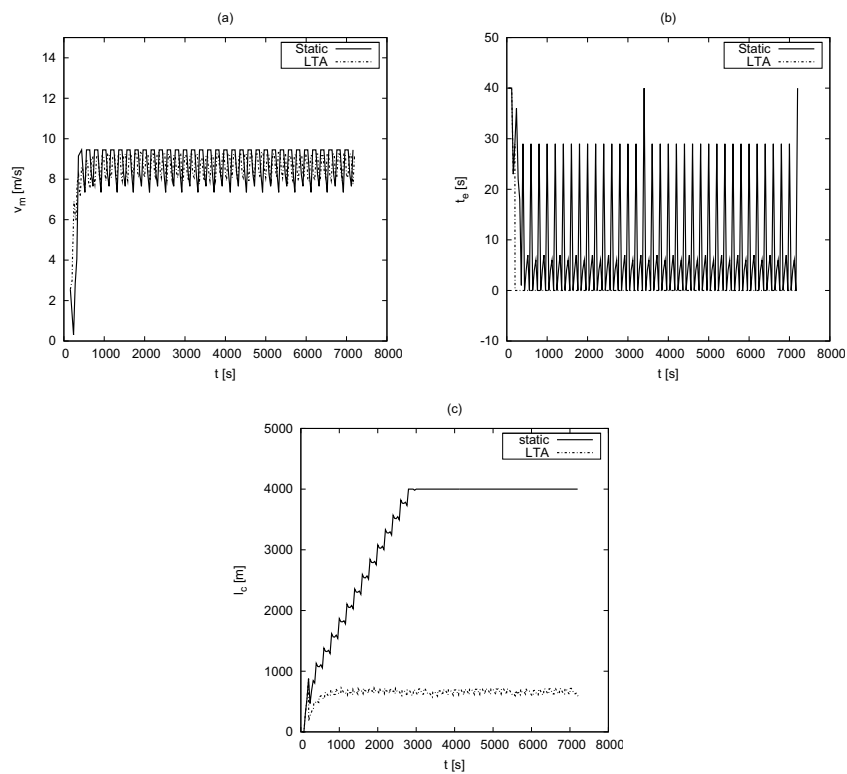


Figura 4.28: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de densitate medie de trafic al autovehiculelor și rată de sosire mică a pietonilor pentru scenariul de simulare 2

### Scenariul de simulare 3: densitate mică de trafic echilibrat al autovehiculelor, diferite rate de sosire a pietonilor

În acest subcapitol este prezentat comportamentul sistemului de transport în urma utilizării algoritmului de conducere LTA și a algoritmului static în condiții de trafic echilibrat subsaturat la nivelul autovehiculelor și diferite rate de creștere a numărului pietonilor doritori să traverseze intersecția. Comportamentul sistemului de transport în urma utilizării fiecărei soluții, a fost simulat pe trei studii de caz, câte unul pentru fiecare rată de sosire a pietonilor în intersecție: mică, medie și mare.

Studiind variațiile în timp ale ieșirilor de apreciere din Figurile 4.29, 4.30, 4.31 și valorile indicatorilor de calitate din Tabelele 4.24, 4.25, 4.26 se observă de asemenea că pentru algoritmul de conducere statică, includerea pietonilor în soluția de conducere nu influențează datele de trafic ale autovehiculelor. În schimb, în cazul algoritmului de conducere propus se observă îmbunătățiri majore ale fluxului traficului autovehiculelor odată cu scăderea ratelor de sosire a pietonilor în intersecție după cum urmează:

- ambele soluții golesc cozile de așteptare în același ritm,
- algoritmul LTA reduce cu până la 2802 *sec* timpii morți de semafor,
- algoritmul LTA reduce cu până la 404% suma ponderată a lungimilor cozilor de așteptare la semafor.

Tabelul 4.24: Indicatori de calitate în condiții de densitate mică de trafic al autovehiculelor și rată de sosire mare a pietonilor pentru scenariul de simulare 3

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	28368	1857	454
<b>LTA</b>	28446	0	190

Tabelul 4.25: Indicatori de calitate în condiții de densitate mică de trafic al autovehiculelor și rată de sosire medie a pietonilor pentru scenariul de simulare 3

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	28368	2436	454
<b>LTA</b>	28272	0	147

Tabelul 4.26: Indicatori de calitate în condiții de densitate mică de trafic al autovehiculelor și rată de sosire mică a pietonilor pentru scenariul de simulare 3

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	28368	2802	454
<b>LTA</b>	28194	0	90



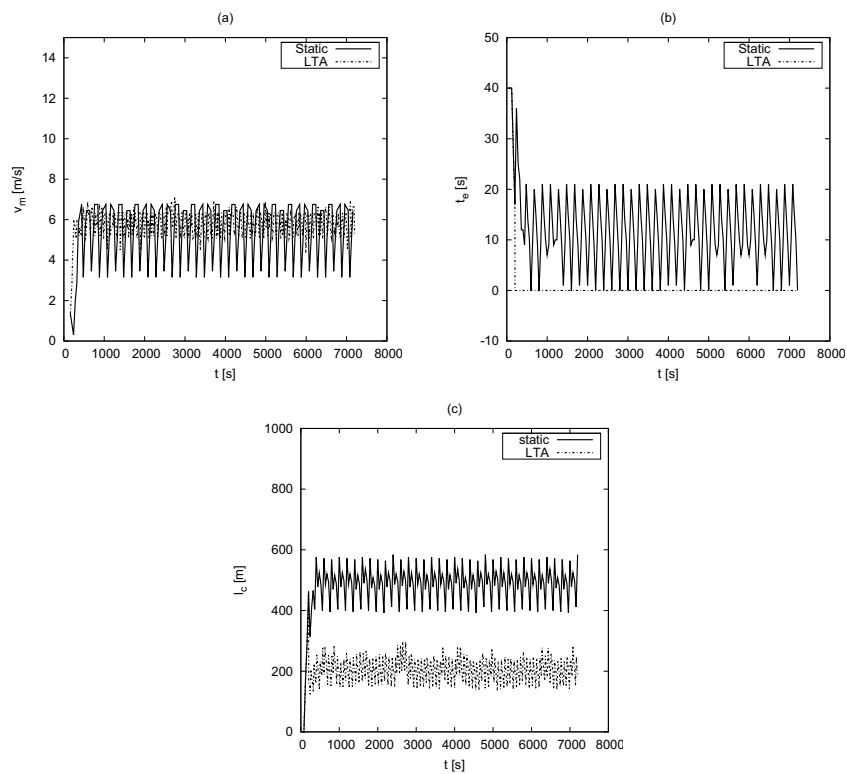


Figura 4.29: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de densitate mică de trafic al autovehiculelor și rată de sosire mare a pietonilor pentru scenariul de simulare 3

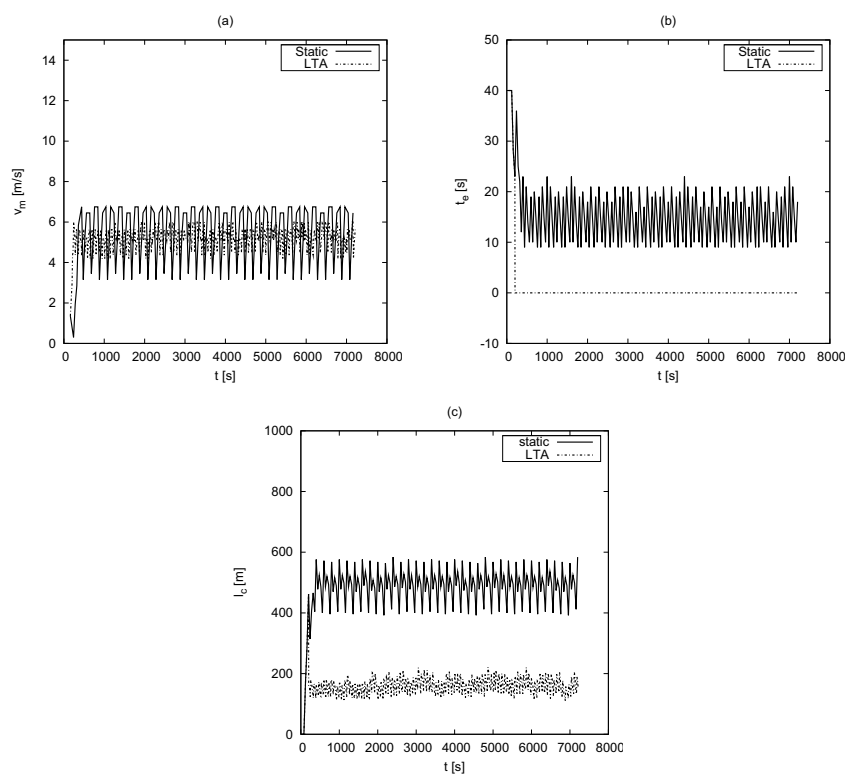


Figura 4.30: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de densitate mică de trafic al autovehiculelor și rată de sosire medie a pietonilor pentru scenariul de simulare 3

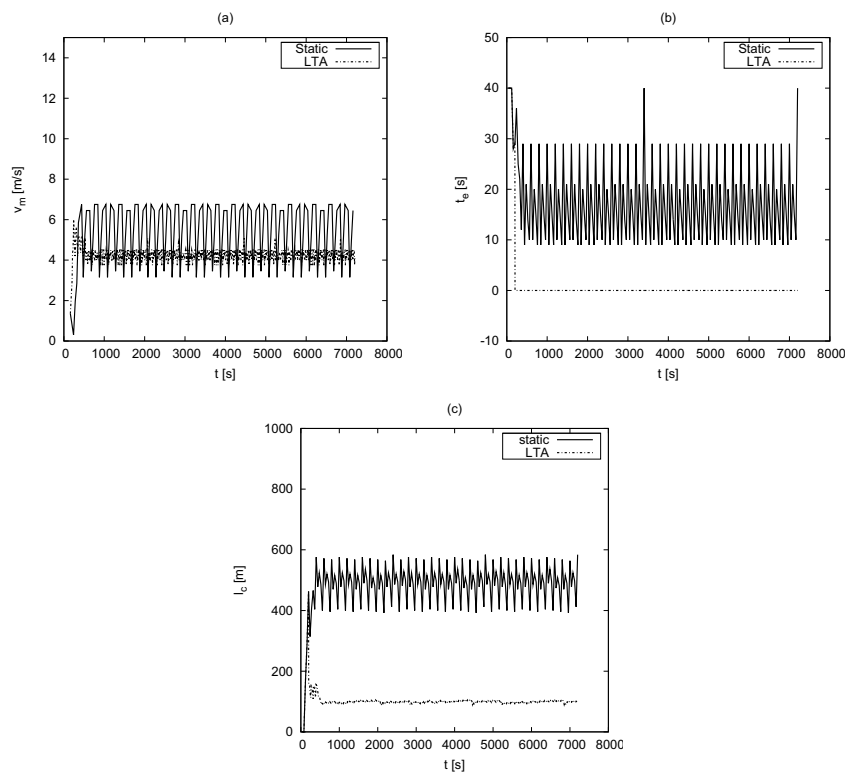


Figura 4.31: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de densitate mică de trafic al autovehiculelor și rată de sosire mică a pietonilor pentru scenariul de simulare 3

### 4.7. Conducerea semaforizării în intersecții complexe din zona centrală a orașului Timișoara

Prin intersecție complexă se înțelege o intersecție în care evenimentele de trafic existente sunt grupate după anumite principii de fluidizare, singura condiție necesară fiind ca oricare două evenimente din același grup să nu se intersecteze reciproc. Un exemplu de intersecție complexă prin evidențierea grafică a evenimentelor de trafic aparținătoare aceluiași grup este prezentat în Figura 4.32.

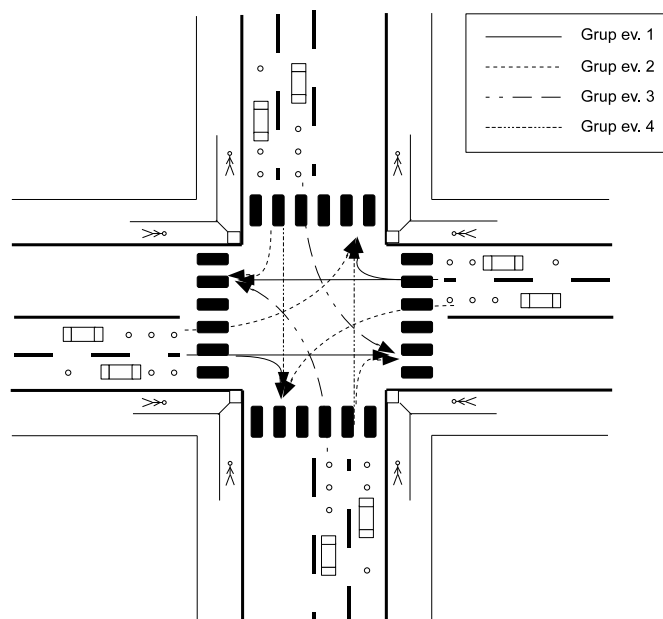


Figura 4.32: Intersecție complexă

Pentru a dovedi utilitatea algoritmului de conducere propus în situații reale de trafic, au fost modelate cinci intersecții complexe dintr-o zonă centrală a orașului Timișoara, aplicându-se prin simulare atât algoritmul de conducere statică de tip "split cycle", utilizată curent (dacă intersecția este deja semaforizată), cât și algoritmul propus. Măsurătorile de trafic realizate în ambele cazuri vor fi utilizate în elaborarea unui studiu comparativ. De asemenea se vor sublinia avantajele utilizării algoritmului de conducere în timp real propus și îmbunătățirile pe care acesta le-ar putea aduce soluției de conducere curent utilizate sau introducerii semaforizării în intersecțiile nesemaforizate. O schiță a zonei în care se află intersecțiile monitorizate se găsește în Figura 4.33.

Studiile de caz prezentate în continuare sunt caracterizate de următoarele detalii de trafic:

- Condiții de trafic neechilibrat, diferite densități ale traficului în funcție de fusul orar,

- Vitezele medii de sosire ale autovehiculelor sunt variabile pentru același grup de evenimente,
- Vitezele medii de plecare ale autovehiculelor au valori prestabilite pentru primele cicluri de semafor, agentul local va învăța continuu și va actualiza aceste valori.

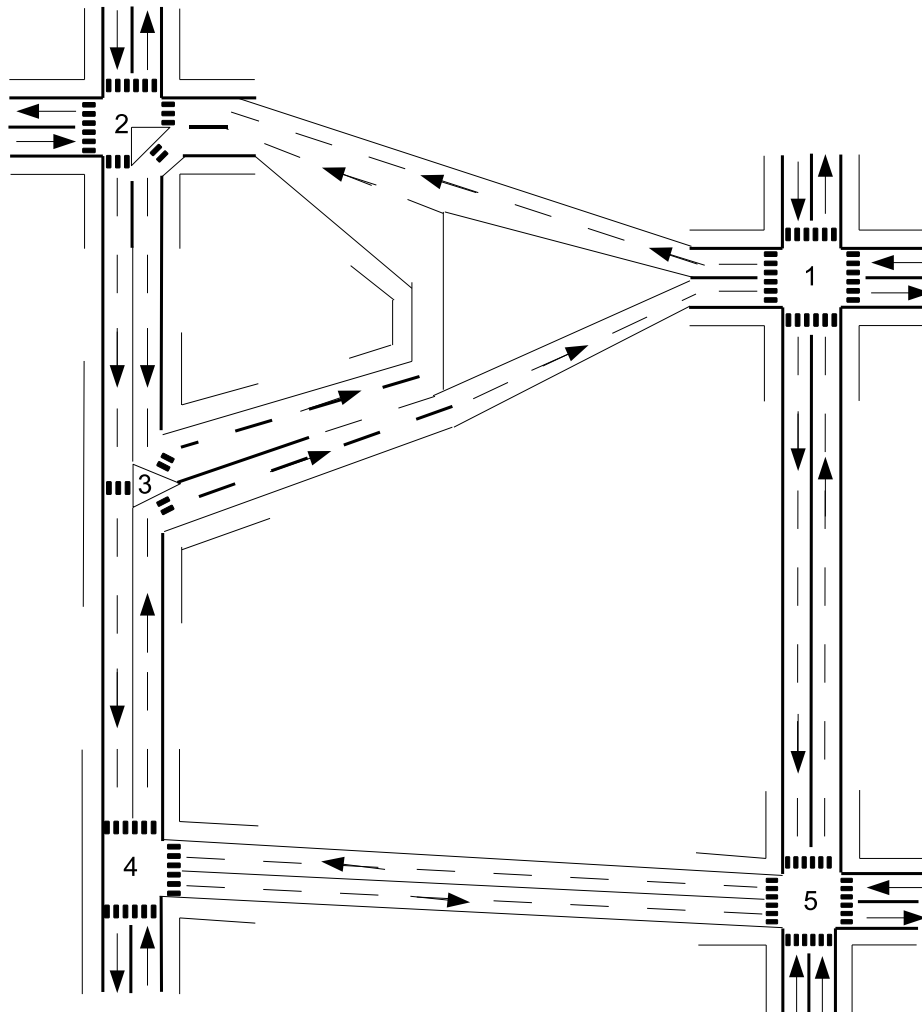


Figura 4.33: Schița zonei centrale

#### 4.7.1. Intersecția numărul 1

Intersecția numărul 1 are structura prezentată în Figura 4.34.

Intersecția este semaforizată, iar algoritmul de conducere statică curent utilizat are următoarele proprietăți:

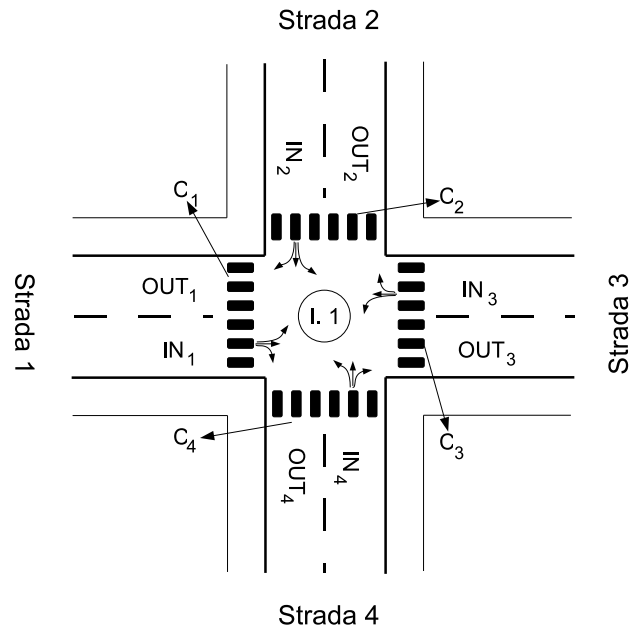


Figura 4.34: Schița intersecției nr. 1

- un ciclu de semafor este format din patru faze, câte una pentru fiecare stradă care intră în intersecție,
- succesiunea fazelor este bine stabilită și este aceeași pentru fiecare ciclu de semafor,
- un eveniment de trafic are presetat același număr de secunde pentru culoarea verde și același număr de secunde pentru culoarea roșie a semaforului, indiferent de fusul orar sau de condițiile de trafic,
- evenimentele de trafic ale autovehiculelor se intersectează cu evenimentele de trafic ale pietonilor, pietonii având prioritate.

Împărțirea actuală a evenimentelor de trafic pe grupuri de evenimente asociate fiecărei faze de semafor, conform notațiilor din Figura 4.34 și timpii de verde aferenți sunt prezentați în continuare:

- $G_1 = \{IN_1OUT_2, IN_1OUT_3, IN_1OUT_4, C_4\}$  - verde = 33 sec.
- $G_2 = \{IN_2OUT_3, IN_1OUT_4, IN_1OUT_1, C_1\}$  - verde = 19 sec.
- $G_3 = \{IN_3OUT_4, IN_3OUT_1, IN_4OUT_2, C_2\}$  - verde = 21 sec.
- $G_4 = \{IN_4OUT_1, IN_4OUT_2, IN_4OUT_3, C_3\}$  - verde = 21 sec.

Din această împărțire a evenimentelor de trafic se observă că pentru toate fazele de semafor, autovehiculele care virează la dreapta în intersecție vor fi nevoite să cedeze trecerea pietonilor care sunt angajați în traversarea străzii pe care acestea

urmează să intre. Acest fapt ridică o problemă serioasă în situațiile în care numărul de pietoni este mare, autovehiculele care virează la dreapta beneficiind doar de câteva secunde de prioritate.

În funcție de necesitățile și particularitățile fiecărei intersecții, evenimentele de trafic pot fi grupate în nenumărate moduri. Pentru intersecția de față s-a optat pentru o grupare asemănătoare celei actuale, după principiul fiecare stradă care intră în intersecție este servită în totalitate. Împărțirea propusă a evenimentelor în grupuri este următoarea:

- $G_1 = \{IN_1OUT_2, IN_1OUT_3, IN_1OUT_4, IN_2OUT_1\}$ ,
- $G_2 = \{IN_2OUT_3, IN_1OUT_4, IN_1OUT_1, IN_3OUT_2\}$ ,
- $G_3 = \{IN_3OUT_4, IN_3OUT_1, IN_4OUT_2, IN_4OUT_3\}$ ,
- $G_4 = \{IN_4OUT_1, IN_4OUT_2, IN_4OUT_3, IN_1OUT_4\}$ ,
- $G_5 = \{C_1, C_2, C_3, C_4\}$ .

În vederea evitării intersecțiilor între evenimentele de trafic s-a adăugat o nouă fază de semafor doar pentru pietoni. S-a ales această soluție pentru a lăsa algoritmului de conducere propus libertate totală în tratarea pietonilor, chiar dacă numărul fazelor de semafor este mai mare cu o unitate decât în împărțirea actuală. Se poate observa că virejele spre dreapta sunt favorizate în această situație, fiind servite de două ori în același ciclu de semafor. O altă împărțire a evenimentelor de trafic în doar patru grupuri, fără intersecție între evenimente ar putea fi următoarea:

- $G_1 = \{IN_1OUT_3, IN_3OUT_1, C_2, C_4\}$ ,
- $G_2 = \{IN_2OUT_4, IN_4OUT_2, C_2, C_4\}$ ,
- $G_3 = \{IN_1OUT_2, IN_3OUT_4, IN_2OUT_1, IN_4OUT_3\}$ ,
- $G_4 = \{IN_2OUT_3, IN_4OUT_1, IN_3OUT_2, IN_1OUT_4\}$ .

Această împărțire reduce numărul fazelor de semafor și poate crește durata fiecărei faze în comparație cu împărțirea precedentă, totuși nu este utilă în situațiile în care se înregistrează cerere mare (lungimile cozilor de așteptare sunt mari) pentru o anumită stradă care intră în intersecție sau chiar pentru două străzi care se întretaie. Din acest motiv, alegerea grupării evenimentelor de trafic depinde doar de necesitățile intersecției.

În continuare vor fi prezentate rezultatele obținute prin simularea comportamentului sistemului de transport în urma utilizării atât a algoritmului de conducere static, actual implementat în intersecția numărul 1, cât și a algoritmului de conducere propus utilizând o împărțire a evenimentelor în cinci grupuri/faze de semafor, după cum s-a arătat mai sus. Simularea ambelor soluții s-a realizat pe o perioadă de timp de două ore în diferite condiții de trafic: subsaturat (liber), aproape de saturație și suprasaturat. În Figurile 4.35, 4.36, 4.37 sunt prezentate grafic valorile ieșirilor de apreciere măsurate, iar în Tabelele 4.27, 4.28, 4.29 sunt prezentate valorile indicatorilor de calitate.

În Figura 4.35 și în Tabelul 4.27 sunt prezentate rezultatele studiului de caz în care se înregistrează densitate mare de trafic la nivelul autovehiculelor și o rată de creștere mică a cozilor de așteptare în ceea ce privește pietonii. Studiind critic variațiile în timp ale ieșirilor de apreciere din Figura 4.35 se pot face următoarele afirmații:

- din graficul 4.35(a) se observă că valoarea medie a variabilei  $v_m$  este aproximativ cu 80% mai mare în favoarea algoritmului LTA, fapt ce are semnificația că mai multe autovehicule sunt servite în timpul culorii verzi utilizând algoritmul LTA decât algoritmul static;

- din graficul 4.35(b) se observă că variabila  $t_m$  înregistrează aproximativ aceleași valori pentru ambele soluții;
- graficul 4.35(c) arată că sumele lungimilor cozilor de așteptare după terminarea fiecărei faze de semafor sunt identice pentru cele două soluții de conducere.

Studiind critic valorile indicatorilor de calitate din Tabelul 4.27 se observă următoarele:

- algoritmul LTA aduce o îmbunătățire de 42% în ceea ce privește golirea cozilor de așteptare,
- algoritmul LTA are același comportament ca și algoritmul static în ceea ce privește timpii morți de semafor, și suma ponderată a lungimilor cozilor de așteptare la semafor.

Concluzionăm că în situația densităților de trafic peste valoarea densității de saturație pentru toate străzile care intră în intersecție, algoritmul LTA propus se comportă mai bine decât algoritmul static.

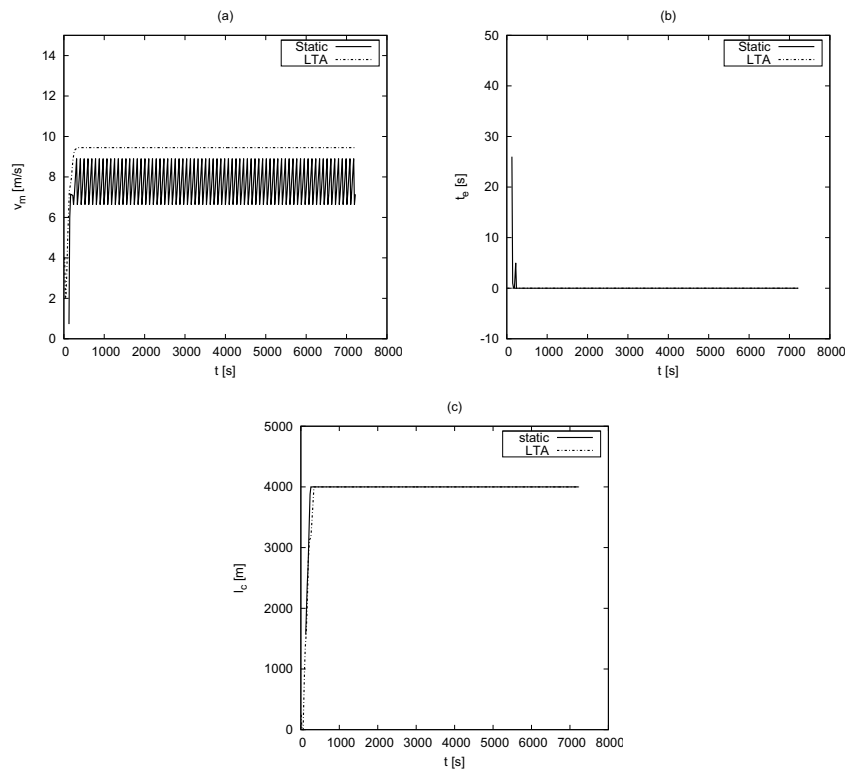


Figura 4.35: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de densitate mare de trafic al autovehiculelor pentru Intersecția 1

În Figura 4.36 și în Tabelul 4.28 sunt prezentate rezultatele studiului de caz în care se înregistrează densitate medie de trafic la nivelul autovehiculelor și o rată de creștere mică a cozilor de așteptare în ceea ce privește pietonii. Studiind critic variațiile în timp ale ieșirilor de apreciere din Figura 4.36 se pot face următoarele afirmații:



Tabelul 4.27: Indicatori de calitate în condiții de densitate mare de trafic al autovehiculelor pentru Intersecția 1

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	40176	0	3677
<b>LTA</b>	57078	0	3706

- din graficul 4.36(a) se observă că valoarea medie a variabilei  $v_m$  este aproximativ cu 2.5% mai mare în favoarea algoritmului LTA, fapt ce are semnificația că mai multe autovehicule sunt servite în timpul culorii verzi utilizând algoritmul LTA decât algoritmul static;
- din graficul 4.36(b) se observă că variabila  $t_m$  înregistrează aproximativ aceleași valori pentru ambele soluții;
- graficul 4.36(c) arată de asemenea o creștere mai mare de 150% a sumei lungimilor cozilor de așteptare în intervalul de două ore în defavoarea algoritmului static, algoritmul LTA fluidizând mult mai bine traficul prin intersecție.

Studiind critic valorile indicatorilor de calitate din Tabelul 4.28 se observă următoarele:

- algoritmul LTA aduce o îmbunătățire de 21% în ceea ce privește golirea cozilor de așteptare,
- algoritmul LTA reduce cu 16 *sec* timpii morți de semafor,
- algoritmul LTA reduce cu 148% suma ponderată a lungimilor cozilor de așteptare la semafor.

Concluzionăm că în situația densităților de trafic puțin sub valoarea densității de saturație pentru toate străzile care intră în intersecție, algoritmul LTA propus se comportă mai bine decât algoritmul static.

Tabelul 4.28: Indicatori de calitate în condiții de densitate medie de trafic al autovehiculelor pentru Intersecția 1

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	39984	16	3655
<b>LTA</b>	48390	0	1471

În Figura 4.37 și în Tabelul 4.29 sunt prezentate rezultatele studiului de caz în care se înregistrează densitate mică de trafic la nivelul autovehiculelor și o rată de creștere mică a cozilor de așteptare în ceea ce privește pietonii. Studiind critic variațiile în timp ale ieșirilor de apreciere din Figura 4.37 se pot face următoarele afirmații:

- din graficul 4.37(a) se observă că valoarea medie a variabilei  $v_m$  este aproximativ cu 15% mai mare în defavoarea algoritmului LTA, fapt ce are semnificația că mai multe autovehicule sunt servite în timpul culorii verzi utilizând algoritmul static decât algoritmul LTA;
- din graficul 4.37(b) se observă că variabila  $t_m$  înregistrează valori mai mari în medie cu 7.5% în cazul algoritmului static decât în cazul algoritmului propus;
- graficul 4.37(c) arată de asemenea o creștere mai mare de 566% a sumei lungimilor cozilor de așteptare în intervalul de două ore în defavoarea algoritmului static, algoritmul LTA fluidizând mult mai bine traficul prin intersecție.

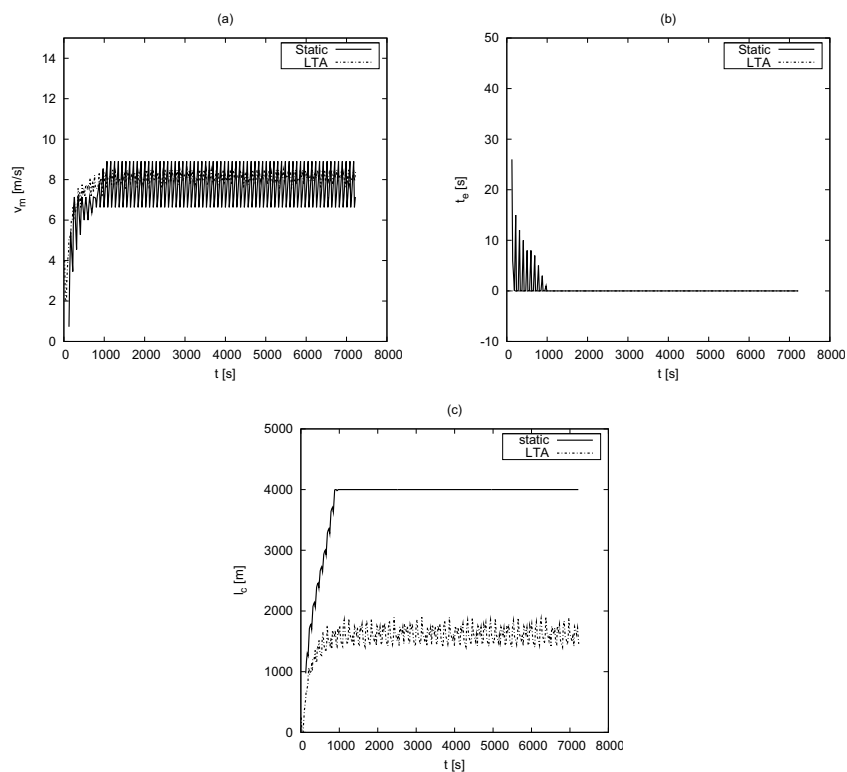


Figura 4.36: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de densitate medie de trafic al autovehiculelor pentru Intersecția 1

Studiind critic valorile indicatorilor de calitate din Tabelul 4.29 se observă următoarele:

- algoritmul static aduce o îmbunătățire de 15% în ceea ce privește golirea cozilor de așteptare,
- algoritmul LTA reduce cu 325 *sec* timpii morți de semafor,
- algoritmul LTA reduce cu 388% suma ponderată a lungimilor cozilor de așteptare la semafor.

Concluzionăm că în situația densităților de trafic subsaturat pentru toate străzile care intră în intersecție, algoritmul LTA propus se comportă mult mai bine decât algoritmul static, cu toate că doar doi dintre cei trei indicatori de performanță arată că algoritmul propus este mai performant decât algoritmul static. Acest fapt se datorează reducerii considerabile a lungimilor cozilor de așteptare și a timpilor morți de semafor, chiar dacă aceasta implică o reducere a vitezei de deplasare pe culoarea verde a semaforului.

#### 4.7.2. Intersecția numărul 2

Intersecția numărul 2 are structura prezentată în Figura 4.38.

Intersecția prezentată este semaforizată, iar algoritmul de conducere statică curent utilizat are următoarele proprietăți:

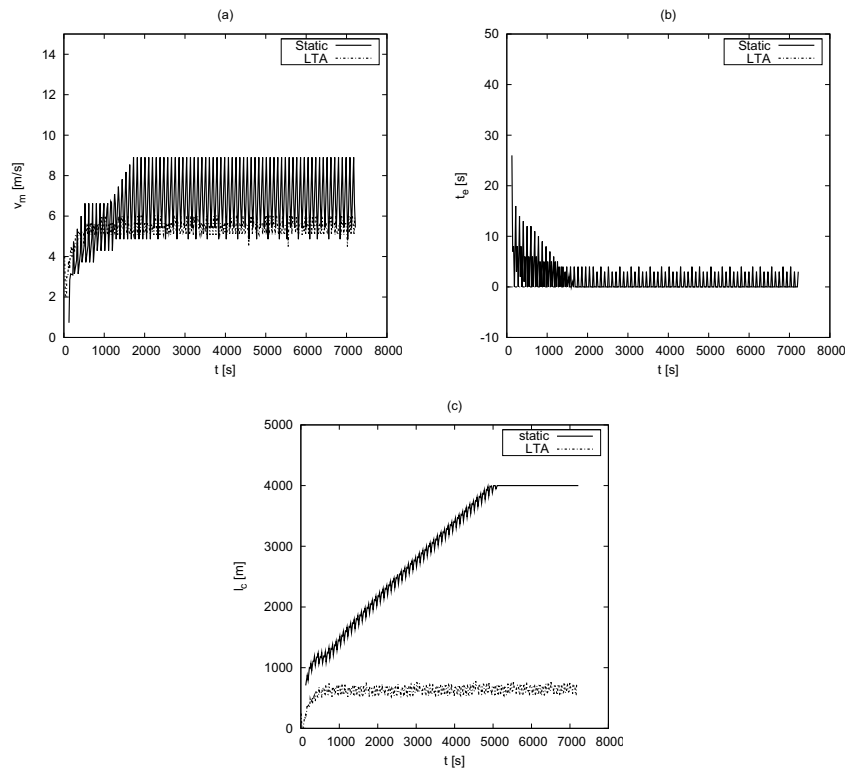


Figura 4.37: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de densitate mică de trafic al autovehiculelor pentru Intersecția 1

- un ciclu de semafor este format din două faze,
- succesiunea fazelor este bine stabilită și este aceeași pentru fiecare ciclu de semafor,
- un eveniment de trafic are presetat același număr de secunde pentru culoarea verde și același număr de secunde pentru culoarea roșie a semaforului, indiferent de fusul orar sau de condițiile de trafic,
- evenimentele de trafic ale autovehiculelor se intersectează atât cu evenimentele de trafic ale pietonilor (pietonii având prioritate), cât și cu alte evenimente de trafic ale autovehiculelor, în acest caz utilizându-se prioritatea de dreapta.

Împărțirea actuală a evenimentelor de trafic pe grupuri de evenimente asociate fiecărei faze de semafor, conform notațiilor din Figura 4.38 și timpii de verde aferenți sunt prezentați în continuare:

- $G_1 = \{IN_1OUT_2, IN_1OUT_3, IN_1OUT_4, IN_3OUT_2, IN_3OUT_4, C_2, C_4\}$  - verde = 38 sec.
- $G_2 = \{IN_2OUT_3, IN_2OUT_4, C_1, C_3, C_5\}$  - verde = 15 sec.

Din această împărțire a evenimentelor de trafic se observă două dezavantaje :  
1) pentru toate fazele de semafor, autovehiculele care virează la dreapta în intersecție

Tabelul 4.29: Indicatorsi de calitate în condiții de densitate mică de trafic al autovehiculelor pentru Intersecția 1

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	36276	325	2844
<b>LTA</b>	31410	0	582

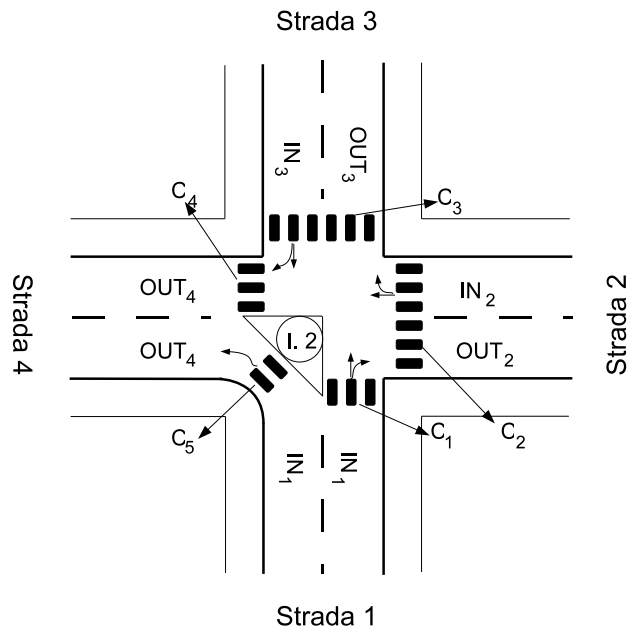


Figura 4.38: Schița intersecției nr. 2

vor fi nevoite să cedeze trecerea pietonilor care sunt angajați în traversarea străzii pe care acestea urmează să intre, 2) autovehicule care virează la stânga peste axul intersecției vor fi nevoite să dea prioritate de dreapta autovehiculelor care circulă de pe aceeași direcție de mers, dar din sens opus. Aceste intersecții între evenimente duc la reducerea semnificativă a timpului de verde utilizabil pentru anumite evenimente de semafor defavorizate. Pentru intersecția de față s-a optat pentru o grupare diferită de cea actuală, cu un număr dublu de faze de semafor și fără a exista două evenimente de trafic care să aparțină aceleiași faze de semafor și care să se și intersecteze reciproc. Împărțirea propusă a evenimentelor în grupuri este următoarea:

- $G_1 = \{IN_1OUT_2, IN_1OUT_3, IN_1OUT_4, C_4\}$ ,
- $G_2 = \{IN_1OUT_4, IN_2OUT_3, IN_2OUT_4, C_1\}$ ,
- $G_3 = \{IN_1OUT_4, IN_3OUT_2, IN_3OUT_4, C_1\}$ ,
- $G_4 = \{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5\}$ .

În continuare vor fi prezentate rezultatele obținute prin simularea comportamentului sistemului de transport în urma utilizării atât a algoritmului de

conducere static, actual implementat în intersecția numărul 2, cât și a algoritmului de conducere propus utilizând o împărțire a evenimentelor în patru grupuri/faze de semafor, după cum s-a arătat mai sus. Simularea ambelor soluții s-a realizat pe o perioadă de timp de două ore în diferite condiții de trafic: subsaturat (liber), aproape de saturație și suprasaturat. În Figurile 4.39, 4.40, 4.41 sunt prezentate grafic valorile ieșirilor de apreciere măsurate, iar în Tabelele 4.30, 4.31, 4.32 sunt prezentate valorile indicatorilor de calitate.

În Figura 4.39 și în Tabelul 4.30 sunt prezentate rezultatele studiului de caz în care se înregistrează densitate mare de trafic la nivelul autovehiculelor și o rată de creștere mică a cozilor de așteptare în ceea ce privește pietonii. Studiind critic variațiile în timp ale ieșirilor de apreciere din Figura 4.39 se pot face următoarele afirmații:

- din graficul 4.39(a) se observă că valoarea medie a variabilei  $v_m$  este aproximativ cu 2% mai mare în favoarea algoritmului LTA;
- din graficul 4.39(b) se observă că după aproximativ 20 de minute de simulare variabila  $t_m$  înregistrează aceleași valori pentru ambele soluții, datorită faptului că lungimile cozilor de așteptare pentru fiecare stradă ajung la valori mai mari decât valoarea maximă la care coada ar putea fi golită în întregime pe o anumită fază de semafor;
- graficul 4.39(c) arată că sumele lungimilor cozilor de așteptare după terminarea fiecărei faze de semafor sunt identice pentru cele două soluții de conducere.

Studiind critic valorile indicatorilor de calitate din Tabelul 4.30 se observă următoarele:

- algoritmul LTA aduce o îmbunătățire de 27% în ceea ce privește golirea cozilor de așteptare,
- algoritmul LTA reduce cu 52 sec timpii morți de semafor,
- ambele soluții au aceleași sume ale lungimilor cozilor de așteptare la semafor.

Concluzionăm că în situația densităților de trafic peste valoarea densității de saturație pentru toate străzile care intră în intersecție, algoritmul LTA propus se comportă mai bine decât algoritmul static.

Tabelul 4.30: Indicatori de calitate în condiții de densitate mare de trafic al autovehiculelor pentru Intersecția 2

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	43626	52	3675
<b>LTA</b>	55518	0	3631

În Figura 4.40 și în Tabelul 4.31 sunt prezentate rezultatele studiului de caz în care se înregistrează densitate medie de trafic la nivelul autovehiculelor și o rată de creștere mică a cozilor de așteptare în ceea ce privește pietonii. Studiind critic variațiile în timp ale ieșirilor de apreciere din Figura 4.40 se pot face următoarele afirmații:

- din graficul 4.40(a) se observă că valoarea medie a variabilei  $v_m$  este aproximativ cu 60% mai mare în favoarea algoritmului static, datorită faptului că durata unei faze de semafor este mult mai mică în cazul algoritmului propus, astfel viteza de golire a cozilor de așteptare devine mult mai mică;
- din graficul 4.40(b) se observă că după aproximativ 40 de minute de simulare variabila  $t_m$  înregistrează aceleași valori pentru ambele soluții, datorită faptului că lungimile cozilor de așteptare pentru fiecare stradă ajung la valori mai mari decât valoarea maximă la care coada ar putea fi golită în întregime pe o anumită fază de semafor;

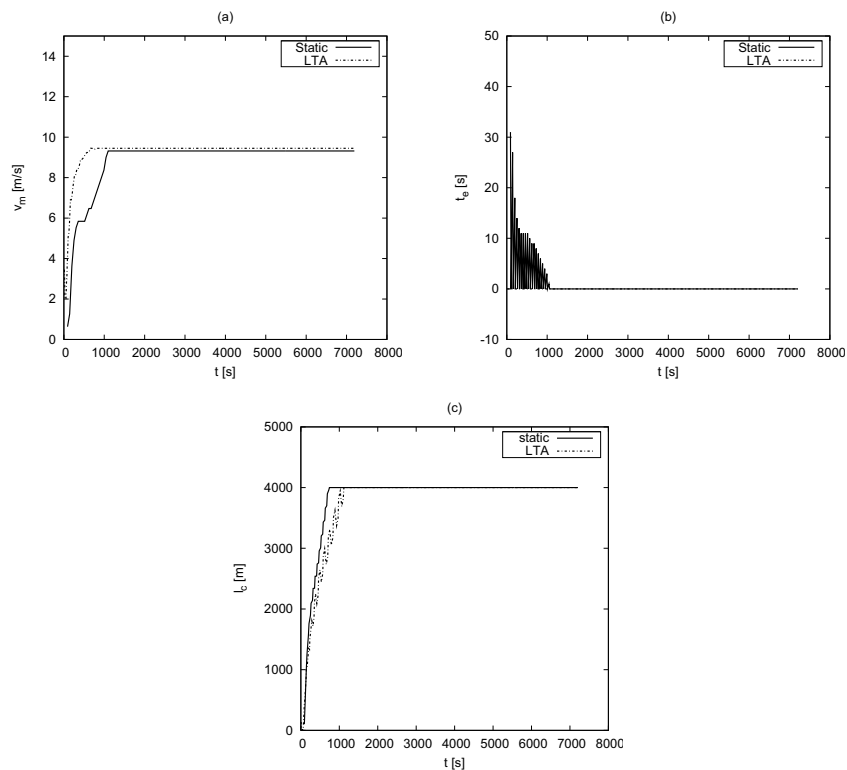


Figura 4.39: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de densitate mare de trafic al autovehiculelor pentru Intersecția 2

- graficul 4.40(c) arată de asemenea o creștere mai mare de 430% a sumei lungimilor cozilor de așteptare în intervalul de două ore în defavoarea algoritmului static, algoritmul LTA fluidizând mult mai bine traficul prin intersecție.

Studiind critic valorile indicatorilor de calitate din Tabelul 4.31 se observă următoarele:

- algoritmul static aduce o îmbunătățire de 24% în ceea ce privește golirea cozilor de așteptare,
- algoritmul LTA reduce cu 291 *sec* timpii morți de semafor,
- algoritmul LTA reduce cu 409% suma ponderată a lungimilor cozilor de așteptare la semafor.

Concluzionăm că în situația densităților de trafic puțin sub valoarea densității de saturație pentru toate străzile care intră în intersecție, algoritmul LTA propus se comportă mai bine decât algoritmul static.

În Figura 4.41 și în Tabelul 4.32 sunt prezentate rezultatele studiului de caz în care se înregistrează densitate mică de trafic la nivelul autovehiculelor și o rată de creștere mică a cozilor de așteptare în ceea ce privește pietonii. Studiind critic variațiile în timp ale ieșirilor de apreciere din Figura 4.41 se pot face următoarele afirmații:

- din graficul 4.41(a) se observă că valoarea medie a variabilei  $v_m$  este aproximativ cu 26% mai mare în favoarea algoritmului LTA, fapt ce are semnificația că mai

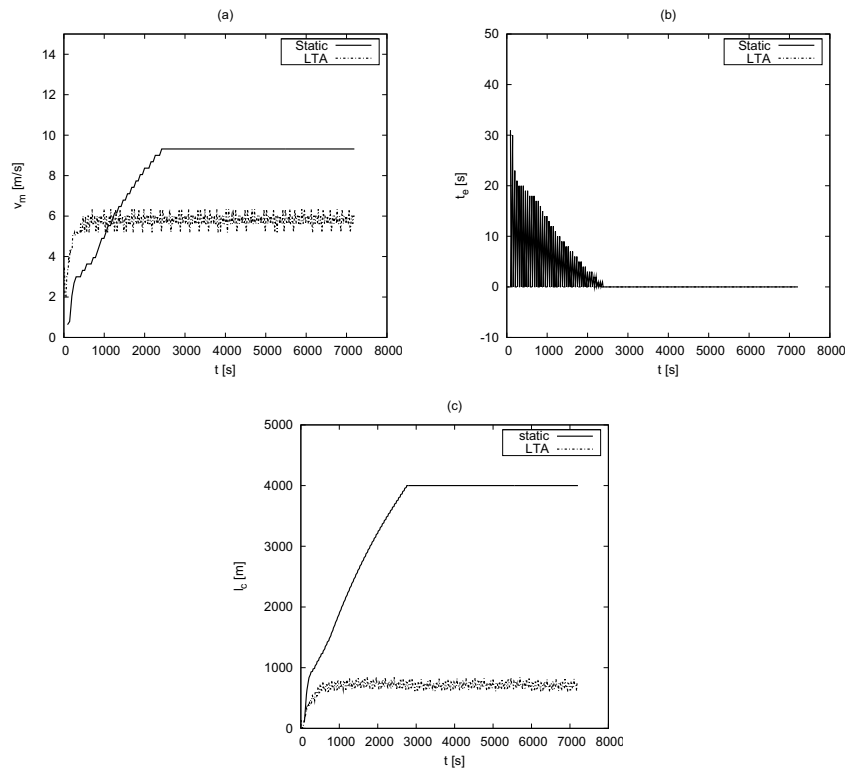


Figura 4.40: Variațiile în timp ale ieşirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de densitate medie de trafic al autovehiculelor pentru Intersecția 2

multe autovehicule sunt servite în timpul culorii verzi utilizând algoritmul LTA decât algoritmul static;

- din graficul 4.41(b) se observă că variabila  $t_m$  înregistrează valori mai mari în medie cu 25% în cazul algoritmului static decât în cazul algoritmului propus;
- graficul 4.41(c) arată de asemenea o creștere cu până la 600% a sumei lungimilor cozilor de așteptare în intervalul de două ore în defavoarea algoritmului static, algoritmul LTA fluidizând mult mai bine traficul prin intersecție.

Studiind critic valorile indicatorilor de calitate din Tabelul 4.32 se observă următoarele:

- algoritmul LTA aduce o îmbunătățire de 40% în ceea ce privește golirea cozilor de așteptare,
- algoritmul LTA reduce cu 2200 *sec* timpii morți de semafor,
- algoritmul LTA reduce cu 452% suma ponderată a lungimilor cozilor de așteptare la semafor.

Concluzionăm că în situația densităților de trafic subsaturat pentru toate străzile care intră în intersecție, algoritmul LTA propus se comportă mult mai bine decât algoritmul static.

Tabelul 4.31: Indicators de calitate în condiții de densitate medie de trafic al autovehiculelor pentru Intersecția 2

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	40758	291	3309
<b>LTA</b>	32712	0	650

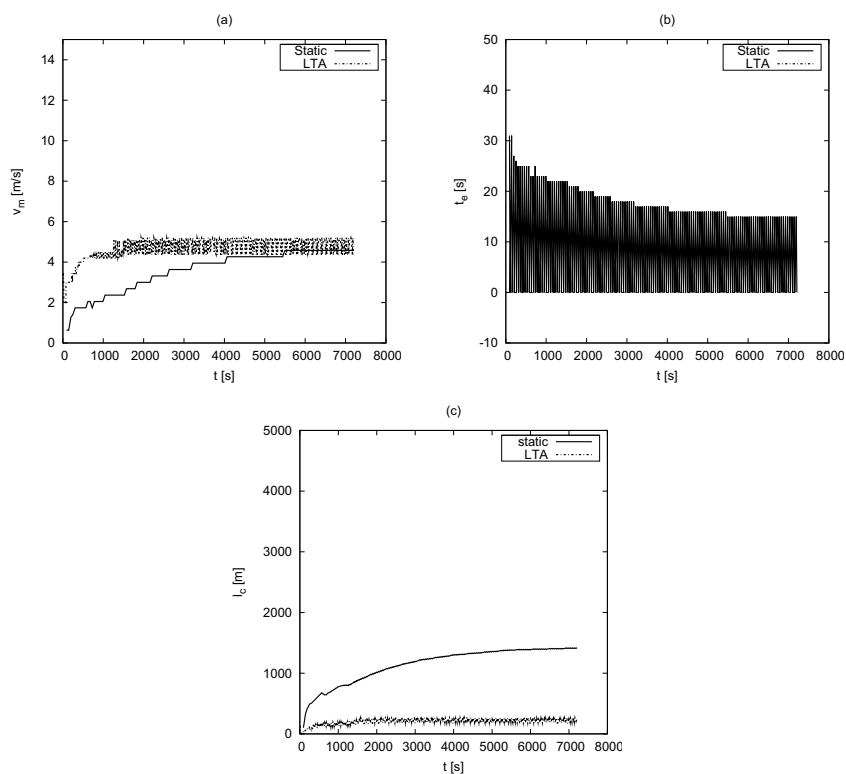


Figura 4.41: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_p$  (b),  $l_p$  (c), în condiții de densitate mică de trafic al autovehiculelor pentru Intersecția 2

Tabelul 4.32: Indicators de calitate în condiții de densitate mică de trafic al autovehiculelor pentru Intersecția 2

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	17862	2200	1105
<b>LTA</b>	25182	0	200



## 4.7.3. Intersecţia numărul 3

Intersecţia numărul 3 are structura prezentată în Figura 4.42.

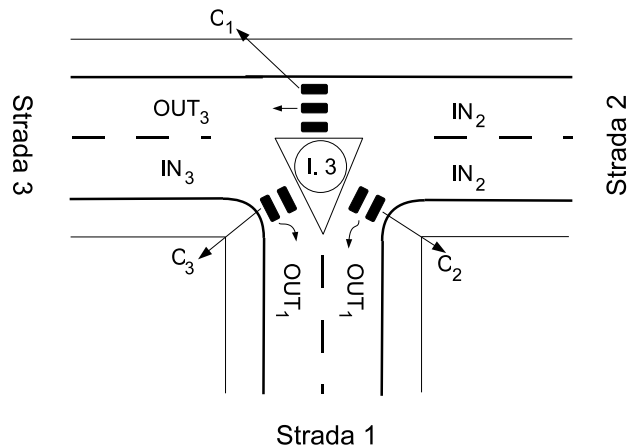


Figura 4.42: Schiţa intersecţiei nr. 3

Intersecţia prezentată nu este semaforizată, în consecinţă se vor defini faze de semafor pornind de la evenimentele de trafic actuale şi apoi se va realiza un studiu comparativ între algoritmul de conducere propus şi un algoritm de conducere statică.

S-a ales o împărţire a evenimentelor de trafic în grupuri de evenimente cu condiţia ca două evenimente aparţinând aceluiaşi grup să nu se intersecteze reciproc, apoi această împărţire a fost utilizată în simularea ambelor soluţii de conducere, propusă şi statică. Conform notaţiilor din Figura 4.42 împărţirea pe grupuri de evenimente şi timpii de verde aleşi pentru algoritmul de conducere statică sunt prezentaţi în continuare:

- $G_1 = \{IN_2OUT_1, IN_2OUT_3, C_3\}$  - verde (pentru conducerea statică) = 40 sec.
- $G_2 = \{IN_3OUT_1, IN_2OUT_3, C_2\}$  - verde (pentru conducerea statică) = 40 sec.
- $G_3 = \{C_1, C_2, C_3\}$  - verde (pentru conducerea statică) = 20 sec.

În continuare vor fi prezentate rezultatele obţinute prin simularea comportamentului sistemului de transport în urma utilizării atât a algoritmului de conducere static, actual implementat în intersecţia numărul 3, cât şi a algoritmului de conducere propus utilizând o împărţire a evenimentelor în trei grupuri/faze de semafor, după cum s-a arătat mai sus. Simularea ambelor soluţii s-a realizat pe o perioadă de timp de două ore în diferite condiţii de trafic: subsaturat(liber), aproape de saturaţie şi suprasaturat. În Figurile 4.43, 4.44, 4.45 sunt prezentate grafic valorile ieşirilor de apreciere măsurate, iar în Tabelele 4.33, 4.34, 4.35 sunt prezentate valorile indicatorilor de calitate.

În Figura 4.43 şi în Tabelul 4.33 sunt prezentate rezultatele studiului de caz în care se înregistrează densitate mare de trafic la nivelul autovehiculelor şi o rată de creştere mică a cozilor de aşteptare în ceea ce priveşte pietonii. Studiind critic variaţiile în timp ale ieşirilor de apreciere din Figura 4.43 se pot face următoarele afirmaţii:

- din graficul 4.43(a) se observă că valoarea medie a variabilei  $v_m$  înregistrează aproximativ aceleași valori pentru ambele soluții de conducere;
- din graficul 4.43(b) se observă că variabila  $t_m$  înregistrează valori mai mari în medie cu 10% în cazul algoritmului static decât în cazul algoritmului propus;
- graficul 4.43(c) arată de asemenea o creștere cu până la 83% a sumei lungimilor cozilor de așteptare în intervalul de două ore în defavoarea algoritmului static, algoritmul LTA fluidizând mult mai bine traficul prin intersecție.

Studiind critic valorile indicatorilor de calitate din Tabelul 4.33 se observă următoarele:

- ambele soluții au același ritm de golire a cozilor de așteptare,
- algoritmul LTA reduce cu 675 sec timpii morți de semafor,
- algoritmul LTA reduce cu 75% suma ponderată a lungimilor cozilor de așteptare la semafor.

Concluzionăm că în situația densităților de trafic peste valoarea densității de saturare pentru toate străzile care intră în intersecție, algoritmul LTA propus se comportă mai bine decât algoritmul static.

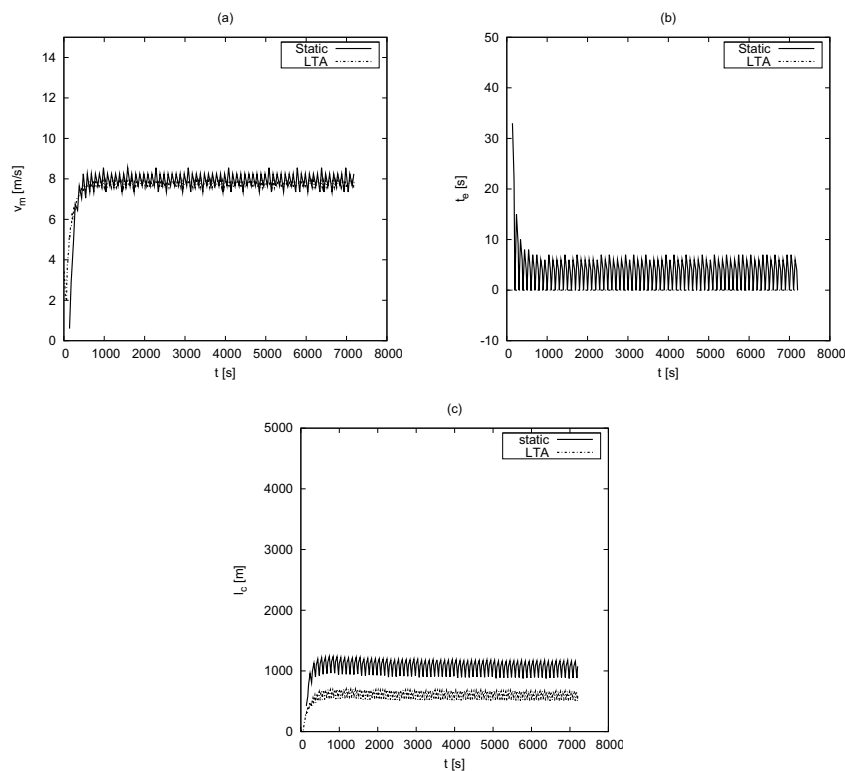


Figura 4.43: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de densitate mare de trafic al autovehiculelor pentru Intersecția 3

În Figura 4.44 și în Tabelul 4.34 sunt prezentate rezultatele studiului de caz în care se înregistrează densitate medie de trafic la nivelul autovehiculelor și o rată de

Tabelul 4.33: Indicatori de calitate în condiții de densitate mare de trafic al autovehiculelor pentru Intersecția 3

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	41796	675	970
<b>LTA</b>	41754	0	553

creștere mică a cozilor de așteptare în ceea ce privește pietonii. Studiind critic variațiile în timp ale ieșirilor de apreciere din Figura 4.44 se pot face următoarele afirmații:

- din graficul 4.44(a) se observă că valoarea medie a variabilei  $v_m$  înregistrează aproximativ aceleași valori pentru ambele soluții de conducere;
- din graficul 4.44(b) se observă că variabila  $t_m$  înregistrează valori mai mari în medie cu 20% în cazul algoritmului static decât în cazul algoritmului propus;
- graficul 4.44(c) arată de asemenea o creștere cu până la 180% a sumei lungimilor cozilor de așteptare în intervalul de două ore în defavoarea algoritmului static, algoritmul LTA fluidizând mult mai bine traficul prin intersecție.

Studiind critic valorile indicatorilor de calitate din Tabelul 4.34 se observă următoarele:

- ambele soluții au același ritm de golire a cozilor de așteptare,
- algoritmul LTA reduce cu 1678 *sec* timpii morți de semafor,
- algoritmul LTA reduce cu 229% suma ponderată a lungimilor cozilor de așteptare la semafor.

Concluzionăm că în situația densităților de trafic puțin sub valoarea densității de saturație pentru toate străzile care intră în intersecție, algoritmul LTA propus se comportă mult mai bine decât algoritmul static.

Tabelul 4.34: Indicatori de calitate în condiții de densitate medie de trafic al autovehiculelor pentru Intersecția 3

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	29760	1678	698
<b>LTA</b>	29682	0	212

În Figura 4.45 și în Tabelul 4.35 sunt prezentate rezultatele studiului de caz în care se înregistrează densitate mică de trafic la nivelul autovehiculelor și o rată de creștere mică a cozilor de așteptare în ceea ce privește pietonii. Studiind critic variațiile în timp ale ieșirilor de apreciere din Figura 4.45 se pot face următoarele afirmații:

- din graficul 4.45(a) se observă că valoarea medie a variabilei  $v_m$  este aproximativ cu 50% mai mare în defavoarea algoritmului LTA;
- din graficul 4.45(b) se observă că variabila  $t_m$  înregistrează valori mai mari în medie cu 25% în cazul algoritmului static decât în cazul algoritmului propus;
- graficul 4.45(c) arată de asemenea o creștere cu până la 3650% a sumei lungimilor cozilor de așteptare în intervalul de două ore în defavoarea algoritmului static, algoritmul LTA fluidizând mult mai bine traficul prin intersecție.

Studiind critic valorile indicatorilor de calitate din Tabelul 4.35 se observă următoarele:

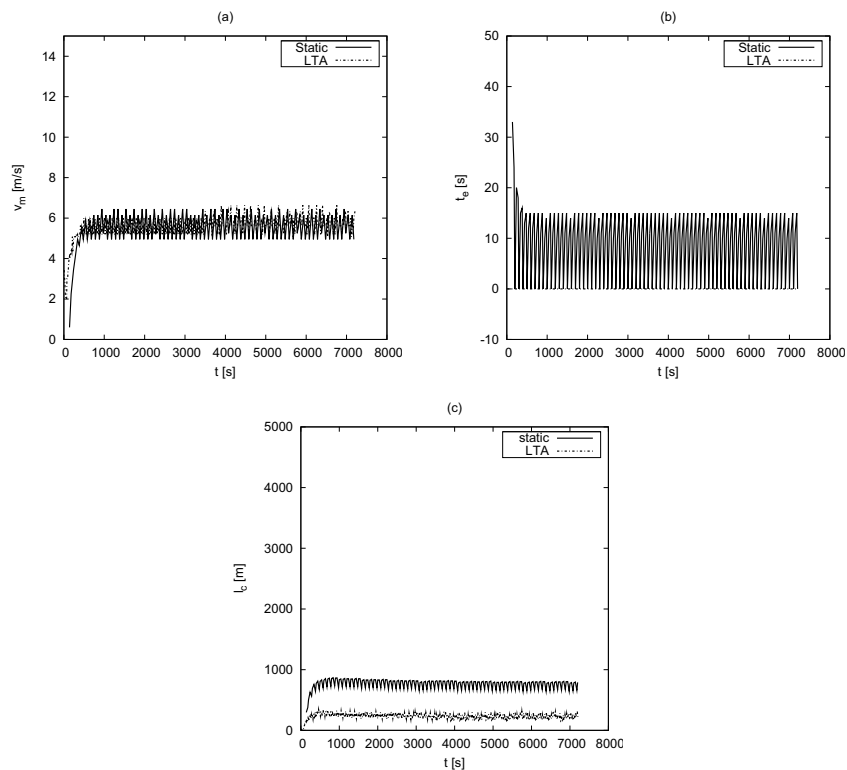


Figura 4.44: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de densitate medie de trafic al autovehiculelor pentru Intersecția 3

- algoritmul static aduce o îmbunătățire de 11% în ceea ce privește golirea cozilor de așteptare,
- algoritmul LTA reduce cu 2930 *sec* timpii morți de semafor,
- algoritmul LTA reduce cu 4900% suma ponderată a lungimilor cozilor de așteptare la semafor.

Concluzionăm că în situația densităților de trafic subsaturat pentru toate străzile care intră în intersecție, algoritmul LTA propus se comportă mult mai bine decât algoritmul static.

Tabelul 4.35: Indicatori de calitate în condiții de densitate mică de trafic al autovehiculelor pentru Intersecția 3

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	14664	2936	250
<b>LTA</b>	13206	0	50

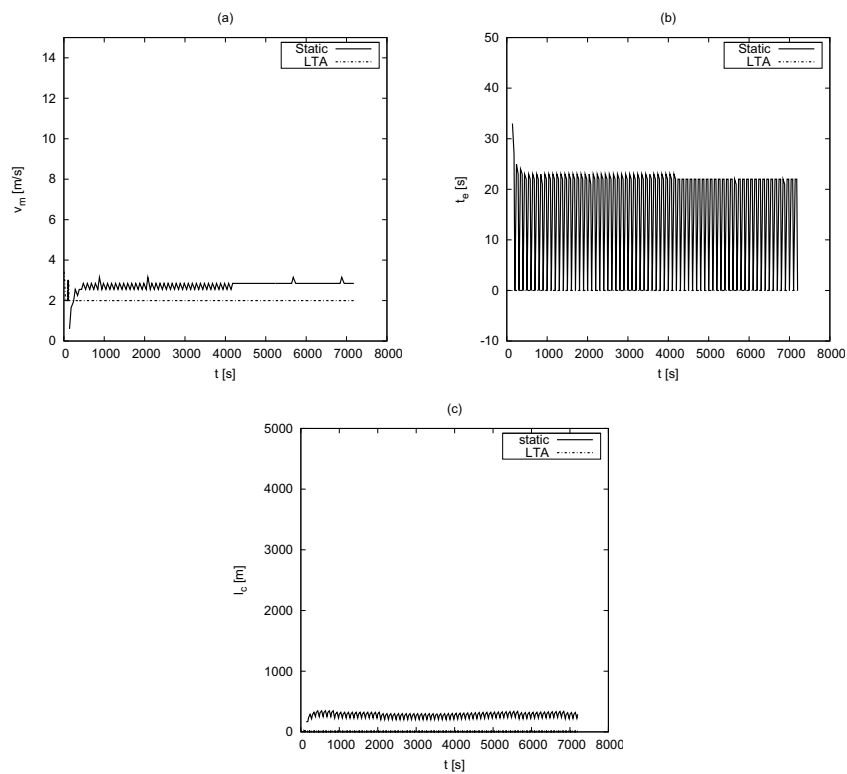


Figura 4.45: Variațiile în timp ale ieşirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de densitate mică de trafic al autovehiculelor pentru Intersecția 3

## 4.7.4. Intersecția numărul 4

Intersecția numărul 4 are structura prezentată în Figura 4.46.

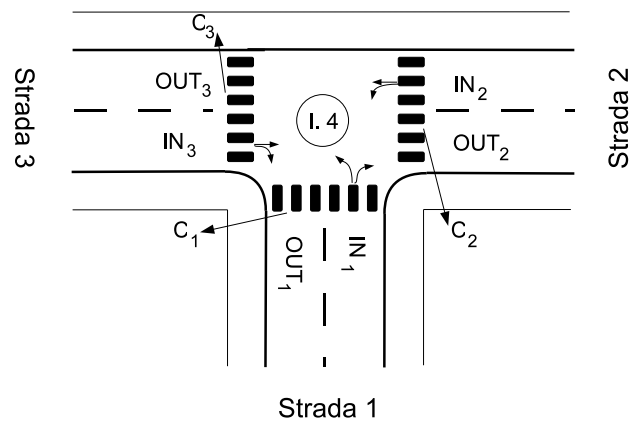


Figura 4.46: Schița intersecției nr. 4

Intersecția prezentată nu este semaforizată, în consecință se vor defini faze de semafor pornind de la evenimentele de trafic actuale și apoi se va realiza un studiu comparativ între algoritmul de conducere propus și un algoritm de conducere statică.

S-a ales o împărțire a evenimentelor de trafic în grupuri de evenimente cu condiția ca două evenimente aparținând aceluiași grup să nu se intersecteze reciproc, apoi această împărțire a fost utilizată în simularea ambelor soluții de conducere, propusă și statică. Conform notațiilor din Figura 4.46 împărțirea pe grupuri de evenimente și timpii de verde aleși pentru algoritmul de conducere statică sunt prezentați în continuare:

- $G_1 = \{IN_1OUT_2, IN_1OUT_3, IN_3OUT_1\}$  - verde (pentru conducerea statică) = 40 sec.
- $G_2 = \{IN_2OUT_1, IN_2OUT_3, IN_1OUT_2\}$  - verde (pentru conducerea statică) = 40 sec.
- $G_3 = \{IN_3OUT_1, IN_3OUT_2, IN_2OUT_3\}$  - verde (pentru conducerea statică) = 40 sec.
- $G_4 = \{C_1, C_2, C_3\}$  - verde (pentru conducerea statică) = 20 sec.

În continuare vor fi prezentate rezultatele obținute în urma simulării atât pentru algoritmul de conducere statică, actual utilizat în intersecția numărul 4, cât și pentru algoritmul de conducere propus utilizând o împărțire a evenimentelor în patru grupuri/faze de semafor, după cum s-a arătat mai sus. Simularea ambelor soluții s-a realizat pe o perioadă de timp de două ore în diferite condiții de trafic: subsaturat (liber), aproape de saturație și suprasaturat. În Figurile 4.47, 4.48, 4.49 sunt prezentate grafic valorile ieșirilor de apreciere măsurate, iar în Tabelele 4.36, 4.37, 4.38 sunt prezentate valorile indicatorilor de calitate.

În Figura 4.47 și în Tabelul 4.36 sunt prezentate rezultatele studiului de caz în care se înregistrează densitate mare de trafic la nivelul autovehiculelor și o rată de creștere mică a cozilor de așteptare în ceea ce privește pietonii. Studiind critic variațiile în timp ale ieșirilor de apreciere din Figura 4.47 și valorile indicatorilor de calitate din Tabelul 4.36 putem concluziona că în situația densităților de trafic peste valoarea densității de saturatie pentru toate străzile care intră în intersecție, ambele soluții simulate au aproximativ același comportament.

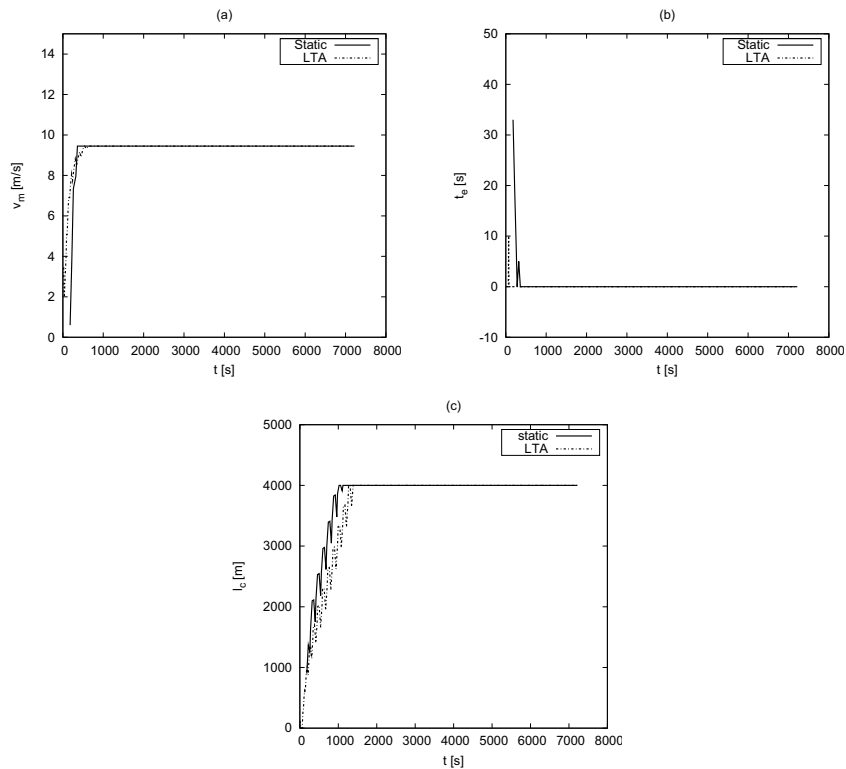


Figura 4.47: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de densitate mare de trafic al autovehiculelor pentru Intersecția 4

Tabelul 4.36: Indicatori de calitate în condiții de densitate mare de trafic al autovehiculelor pentru Intersecția 4

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	54054	0	3658
<b>LTA</b>	55566	0	3576

În Figura 4.48 și în Tabelul 4.37 sunt prezentate rezultatele studiului de caz în care se înregistrează densitate medie de trafic la nivelul autovehiculelor și o rată de creștere mică a cozilor de așteptare în ceea ce privește pietonii. Studiind critic variațiile în timp ale ieșirilor de apreciere din Figura 4.48 se pot face următoarele afirmații:

- din graficul 4.48(a) se observă că valoarea medie a variabilei  $v_m$  înregistrează aproximativ aceleași valori pentru ambele soluții de conducere;

- din graficul 4.48(b) se observă că variabila  $t_m$  înregistrează valori mai mari în medie cu 8% în cazul algoritmului static decât în cazul algoritmului propus;
- graficul 4.48(c) arată de asemenea o creștere cu până la 50% a sumei lungimilor cozilor de așteptare în intervalul de două ore în defavoarea algoritmului static, algoritmul LTA fluidizând mult mai bine traficul prin intersecție.

Studiind critic valorile indicatorilor de calitate din Tabelul 4.37 se observă următoarele:

- ambele soluții au același ritm de golire a cozilor de așteptare,
- algoritmul LTA reduce cu 294 *sec* timpii morți de semafor,
- algoritmul LTA reduce cu 48% suma ponderată a lungimilor cozilor de așteptare la semafor.

Concluzionăm că în situația densităților de trafic puțin sub valoarea densității de saturație pentru toate străzile care intră în intersecție, algoritmul LTA propus se comportă mai bine decât algoritmul static.

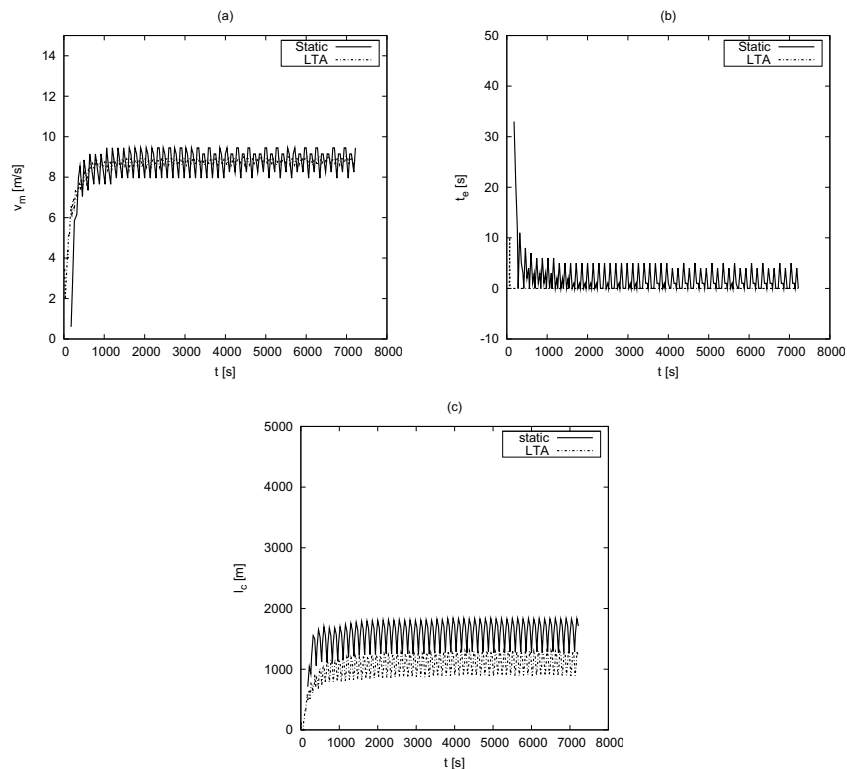


Figura 4.48: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de densitate medie de trafic al autovehiculelor pentru Intersecția 4

În Figura 4.49 și în Tabelul 4.38 sunt prezentate rezultatele studiului de caz în care se înregistrează densitate mică de trafic la nivelul autovehiculelor și o rată de creștere mică a cozilor de așteptare în ceea ce privește pietonii. Studiind critic variațiile în timp ale ieșirilor de apreciere din Figura 4.49 se pot face următoarele afirmații:



Tabelul 4.37: Indicatori de calitate în condiții de densitate medie de trafic al autovehiculelor pentru Intersecția 4

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	50526	294	1461
<b>LTA</b>	50634	0	988

- din graficul 4.49(a) se observă că valoarea medie a variabilei  $v_m$  este aproximativ cu 10% mai mare în defavoarea algoritmului LTA;
- din graficul 4.49(b) se observă că variabila  $t_m$  înregistrează valori mai mari în medie cu 30% în cazul algoritmului static decât în cazul algoritmului propus;
- graficul 4.49(c) arată de asemenea o creștere cu până la 250% a sumei lungimilor cozilor de așteptare în intervalul de două ore în defavoarea algoritmului static, algoritmul LTA fluidizând mult mai bine traficul prin intersecție.

Studiind critic valorile indicatorilor de calitate din Tabelul 4.38 se observă următoarele:

- ambele soluții au aproximativ același ritm de golire a cozilor de așteptare,
- algoritmul LTA reduce cu 2850 *sec* timpii morți de semafor,
- algoritmul LTA reduce cu 459% suma ponderată a lungimilor cozilor de așteptare la semafor.

Concluzionăm că în situația densităților de trafic subsaturat pentru toate străzile care intră în intersecție, algoritmul LTA propus se comportă mult mai bine decât algoritmul static.

Tabelul 4.38: Indicatori de calitate în condiții de densitate mică de trafic al autovehiculelor pentru Intersecția 4

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	19854	2850	721
<b>LTA</b>	19818	0	157

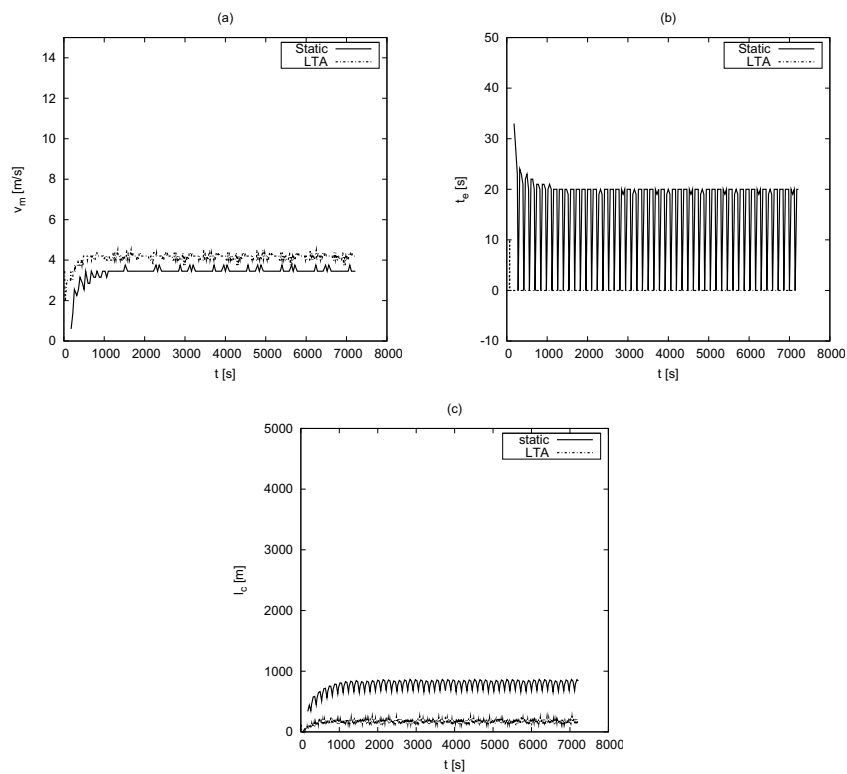


Figura 4.49: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de densitate mică de trafic al autovehiculelor pentru Intersecția 4

## 4.7.5. Intersecția numărul 5

Intersecția numărul 5 are structura prezentată în Figura 4.50.

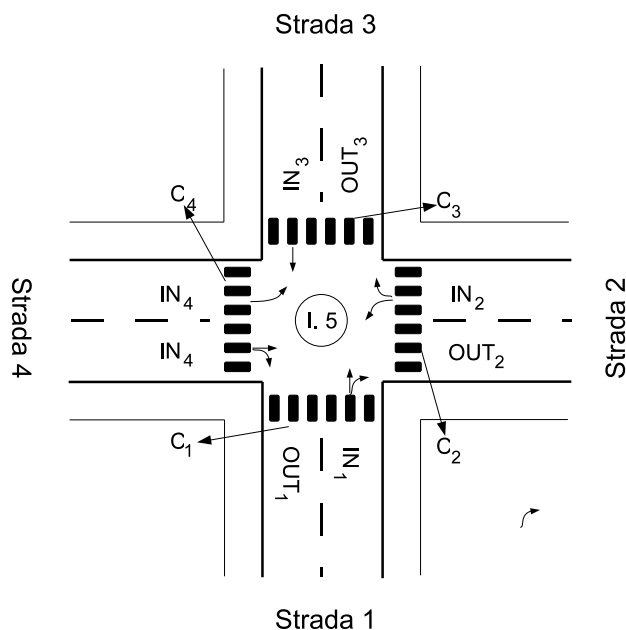


Figura 4.50: Schița intersecției nr. 5

Intersecția prezentată este semaforizată, iar algoritmul de conducere statică curent utilizat are următoarele proprietăți:

- un ciclu de semafor este format din două faze,
- succesiunea fazelor este bine stabilită și este aceeași pentru fiecare ciclu de semafor,
- un eveniment de trafic are prestat același număr de secunde pentru culoarea verde și același număr de secunde pentru culoarea roșie a semaforului, indiferent de fusul orar sau de condițiile de trafic,
- evenimentele de trafic ale autovehiculelor se intersectează atât cu evenimentele de trafic ale pietonilor (pietonii având prioritate), cât și cu alte evenimente de trafic ale autovehiculelor, în acest caz utilizându-se prioritatea de dreapta.

Împărțirea actuală a evenimentelor de trafic pe grupuri de evenimente asociate fiecărei faze de semafor, conform notațiilor din Figura 4.50 și timpii de verde aferenți sunt prezentați în continuare:

- $G_1 = \{IN_1OUT_2, IN_1OUT_3, IN_3OUT_1, C_2, C_4\}$  - verde = 24 sec.
- $G_2 = \{IN_2OUT_1, IN_2OUT_3, IN_4OUT_1, IN_4OUT_2, IN_4OUT_3, C_1, C_3\}$  - verde = 21 sec.

Din această împărțire a evenimentelor de trafic se observă ca și în cazul intersecției numărul 2, două dezavantaje : 1) pentru toate fazele de semafor, autovehiculele care virează la dreapta în intersecție vor fi nevoite să cedeze trecerea pietonilor care sunt angajați în traversarea străzii pe care acestea urmează să intre, 2) autovehiculele care virează la stânga peste axul intersecției vor fi nevoite să dea prioritate de dreapta autovehiculelor care circulă de pe aceeași direcție de mers, dar din sens invers. Aceste intersecții între evenimente duc la reducerea semnificativă a timpului de verde utilizabil pentru anumite evenimente de semafor defavorizate. Pentru intersecția de față s-a optat pentru o grupare diferită de cea actuală, cu un număr dublu de faze de semafor și fără a exista evenimente de trafic aparținând aceleiași faze de semafor și care să se intersecteze reciproc. Împărțirea propusă a evenimentelor în grupuri este următoarea:

- $G_1 = \{IN_1OUT_2, IN_1OUT_3, IN_3OUT_1, C_4\}$ ,
- $G_2 = \{IN_1OUT_2, IN_2OUT_1, IN_2OUT_3, C_4\}$ ,
- $G_3 = \{IN_2OUT_3, IN_4OUT_1, IN_4OUT_2, IN_4OUT_3\}$ ,
- $G_4 = \{C_1, C_2, C_3, C_4\}$ .

În continuare vor fi prezentate rezultatele obținute în urma simulării atât pentru algoritmul de conducere statică, actual utilizat în intersecția numărul 5, cât și pentru algoritmul de conducere propus utilizând o împărțire a evenimentelor în patru grupuri/faze de semafor, după cum s-a arătat mai sus. Simularea ambelor soluții s-a realizat pe o perioadă de timp de două ore în diferite condiții de trafic: subsaturat (liber), aproape de saturație și suprasaturat. În Figurile 4.51, 4.52, 4.53 sunt prezentate grafic valorile ieșirilor de apreciere măsurate, iar în Tabelele 4.39, 4.40, 4.41 sunt prezentate valorile indicatorilor de calitate.

În Figura 4.51 și în Tabelul 4.39 sunt prezentate rezultatele studiului de caz în care se înregistrează densitate mare de trafic la nivelul autovehiculelor și o rată de creștere mică a cozilor de așteptare în ceea ce privește pietonii. Studiind critic variațiile în timp ale ieșirilor de apreciere din Figura 4.51 se pot face următoarele afirmații:

- din graficul 4.51(a) se observă că valoarea medie a variabilei  $v_m$  este aproximativ cu 20% mai mare în defavoarea algoritmului LTA;
- din graficul 4.51(b) se observă că după aproximativ 20 de minute de simulare variabila  $t_m$  înregistrează aceleași valori pentru ambele soluții, datorită faptului că lungimile cozilor de așteptare pentru fiecare stradă ajung la valori mai mari decât valoarea maximă la care coada ar putea fi golită în întregime pe o anumită fază de semafor;
- graficul 4.51(c) arată că sumele lungimilor cozilor de așteptare după terminarea fiecărei faze de semafor sunt identice pentru cele două soluții de conducere după aproximativ 80 minute de simulare. Până la atingerea pragului de 80 de minute se observă că valoarea variabilei  $l_c$  este considerabil mai mică în cazul algoritmului de conducere propus decât în cazul algoritmului static.

Studiind critic valorile indicatorilor de calitate din Tabelul 4.39 se observă următoarele:

- algoritmul LTA aduce o îmbunătățire de 119% în ceea ce privește golirea cozilor de așteptare,
- algoritmul LTA reduce cu 19 *sec* timpii morți de semafor,
- algoritmul LTA reduce cu 13% suma ponderată a lungimilor cozilor de așteptare la semafor.

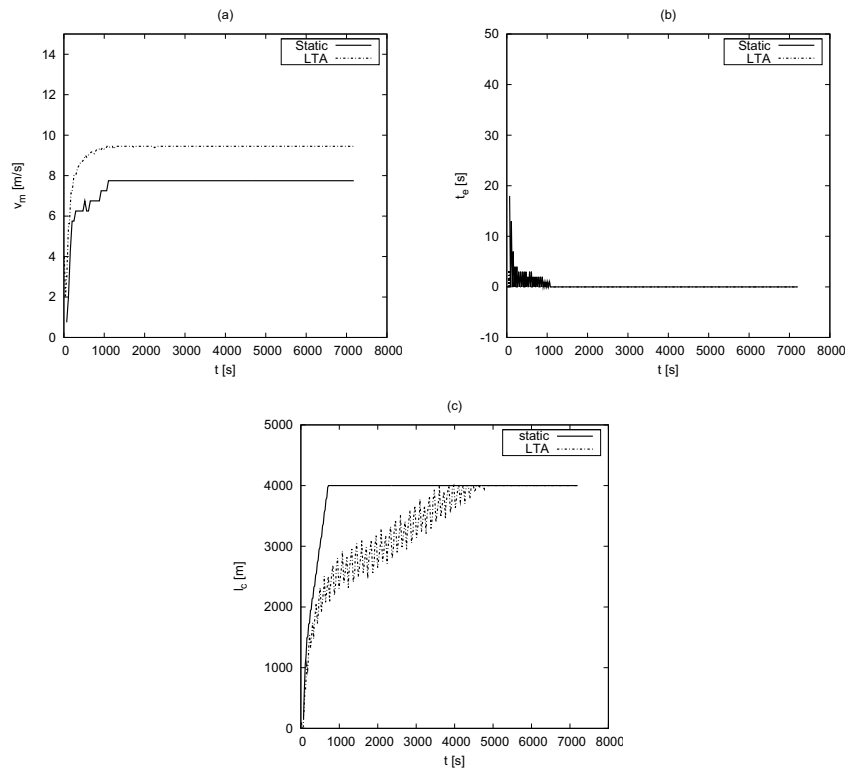


Figura 4.51: Variațiile în timp ale ieşirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de densitate mare de trafic al autovehiculelor pentru Intersecția 5

Concluzionăm că în situația densităților de trafic peste valoarea densității de saturație pentru toate străzile care intră în intersecție, algoritmul LTA propus se comportă mai bine decât algoritmul static.

În Figura 4.52 și în Tabelul 4.40 sunt prezentate rezultatele studiului de caz în care se înregistrează densitate medie de trafic la nivelul autovehiculelor și o rată de creștere mică a cozilor de așteptare în ceea ce privește pietonii. Studiind critic variațiile în timp ale ieşirilor de apreciere din Figura 4.52 se pot face următoarele afirmații:

- din graficul 4.52(a) se observă că valoarea medie a variabilei  $v_m$  este aproximativ cu 58% mai mare în defavoarea algoritmului LTA;
- din graficul 4.52(b) se observă că variabila  $t_m$  înregistrează valori mai mari în medie cu 10% în cazul algoritmului static decât în cazul algoritmului propus;
- graficul 4.52(c) arată de asemenea o creștere cu până la 300% a sumei lungimilor cozilor de așteptare în intervalul de două ore în defavoarea algoritmului static, algoritmul LTA fluidizând mult mai bine traficul prin intersecție.

Studiind critic valorile indicatorilor de calitate din Tabelul 4.40 se observă următoarele:

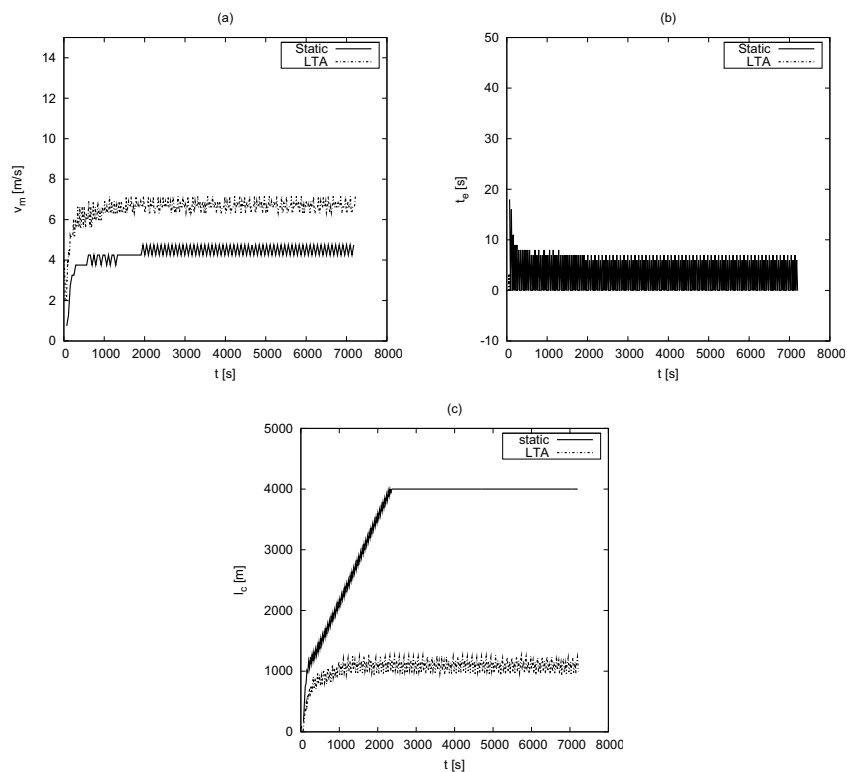
- algoritmul LTA aduce o îmbunătățire de 166% în ceea ce privește golirea cozilor de așteptare,

Tabelul 4.39: Indicatori de calitate în condiții de densitate mare de trafic al autovehiculelor pentru Intersecția 5

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	27114	19	3670
<b>LTA</b>	59574	0	3243

- algoritmul LTA reduce cu 976 sec timpii morți de semafor,
- algoritmul LTA reduce cu 341% suma ponderată a lungimilor cozilor de așteptare la semafor.

Concluzionăm că în situația densităților de trafic puțin sub valoarea densității de saturație pentru toate străzile care intră în intersecție, algoritmul LTA propus se comportă mai mult bine decât algoritmul static.

Figura 4.52: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$ (c), în condiții de densitate medie de trafic al autovehiculelor pentru Intersecția 5

În Figura 4.53 și în Tabelul 4.41 sunt prezentate rezultatele studiului de caz în care se înregistrează densitate mică de trafic la nivelul autovehiculelor și o rată de creștere mică a cozilor de așteptare în ceea ce privește pietonii. Studiind critic variațiile în timp ale ieșirilor de apreciere din Figura 4.53 se pot face următoarele afirmații:

- din graficul 4.53(a) se observă că valoarea medie a variabilei  $v_m$  înregistrează aproximativ aceleași valori pentru ambele soluții de conducere;

Tabelul 4.40: Indicatori de calitate în condiții de densitate medie de trafic al autovehiculelor pentru Intersecția 5

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	15630	976	3381
<b>LTA</b>	41652	0	990

- din graficul 4.53(b) se observă că variabila  $t_m$  înregistrează valori mai mari în medie cu 10% în cazul algoritmului static decât în cazul algoritmului propus;
- graficul 4.53(c) arată de asemenea o creștere cu până la 1800% a sumei lungimilor cozilor de așteptare în intervalul de două ore în defavoarea algoritmului static, algoritmul LTA fluidizând mult mai bine traficul prin intersecție.

Studiind critic valorile indicatorilor de calitate din Tabelul 4.41 se observă următoarele:

- algoritmul LTA aduce o îmbunătățire de 81% în ceea ce privește golirea cozilor de așteptare,
- algoritmul LTA reduce cu 1412 *sec* timpii morți de semafor,
- algoritmul LTA reduce cu 1834% suma ponderată a lungimilor cozilor de așteptare la semafor.

Concluzionăm că în situația densităților de trafic subsaturat pentru toate străzile care intră în intersecție, algoritmul LTA propus se comportă mult mai bine decât algoritmul static.

Tabelul 4.41: Indicatori de calitate în condiții de densitate mică de trafic al autovehiculelor pentru Intersecția 5

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Static</b>	10926	1412	851
<b>LTA</b>	19812	0	44

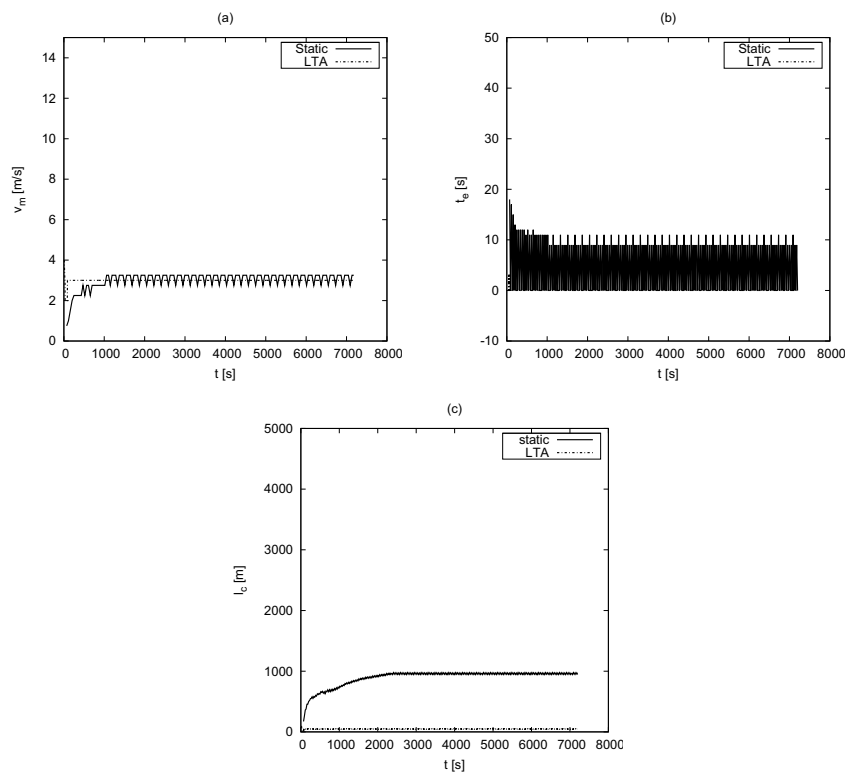


Figura 4.53: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de densitate mică de trafic al autovehiculelor pentru Intersecția 5



**4.7.6. Interpretarea rezultatelor obținute**

Pe parcursul acestui capitol s-a demonstrat aplicabilitatea practică a algoritmului de conducere propus, utilizând ca și studii de caz cinci intersecții complexe dintr-o zonă centrală a orașului Timișoara. Pentru trei dintre intersecțiile deja semaforizate a fost simulat în paralel comportamentul sistemului de transport în urma utilizării atât a algoritmului de conducere propus cât și a algoritmului de conducere statică actual implementat. Pe baza valorilor indicatorilor de trafic obținute în urma simulărilor s-a arătat că algoritmul propus îmbunătățește semnificativ algoritmul actual implementat indiferent de condițiile de trafic. În celelalte două intersecții nesemaforizate s-au grupat evenimentele de trafic în grupuri/faze de semafor, cu proprietatea că oricare două evenimente din același grup să nu se intersecteze reciproc și apoi s-a simulat comportamentul sistemului de transport în urma utilizării ambelor soluții de conducere în diferite condiții de trafic. De asemenea au fost dovedite, inclusiv pentru structurile acestor două intersecții, avantajele implementării algoritmului propus pe baza rezultatelor obținute în urma simulărilor. Cu toate că algoritmul de conducere propus aduce îmbunătățiri algoritmului static în aproape orice condiții de trafic, în cele cinci situații studiate mai sus îmbunătățirile semnificative se notează în condiții de trafic liber și normal. Pentru condițiile de trafic normal, într-un interval de două ore, timpii morți de semafor se reduc cu aproximativ 20%, iar suma lungimilor cozilor de așteptare scade în medie de patru ori. Pentru condițiile de trafic liber, într-un interval de două ore, rezultatele obținute în urma simulărilor sunt mai bune ca și în cazul anterior, timpii morți de semafor se reduc cu aproximativ 25%, și suma lungimilor cozilor de așteptare scade în medie de 10 ori. Putem astfel concluziona, pe baza rezultatelor obținute prin simularea comportamentului sistemului de transport în urma utilizării soluțiilor de conducere studiate în cele cinci intersecții din zona centrală a orașului Timișoara, că algoritmul de conducere propus poate aduce îmbunătățiri majore algoritmului de conducere actual implementată în ceea ce privește fluidizarea traficului rutier urban.

**4.8. Conducerea optimală a traficului rutier urban într-o intersecție semaforizată**

În acest subcapitol se definește și se rezolvă problema optimizării traficului rutier urban la nivel de intersecție semaforizată pornind de la modelul matematic dezvoltat la începutul acestui capitol și de la abordarea lui De Schutter [34]. Datorită caracterului stohastic al traficului rutier urban, rezolvarea problemei de optimizare este dificilă și se poate realiza doar prin reducerea la alte probleme simplificate. Marele impediment în încercarea de a optimiza traficul rutier urban pe o anumită perioadă de timp este imposibilitatea de a se putea ține seama de schimbările bruște, în timp real, ale fluxului autovehiculelor și pietonilor în apropierea unei anumite intersecții. În acest sens, procesul de optimizare se va realiza asupra unor probleme restrânse pe baza unor supoziții/constrângeri legate de comportamentul traficului rutier de-a lungul perioadei de optimizare. În continuare se vor descrie pașii urmați în rezolvarea acestei probleme de optimizare:

- A) Definirea problemei de optimizare și reducerea la două probleme de programare liniară și pătratică,
- B) Calculul matricelor cu parametri necesari rezolvării problemei de optimizare,
- C) Exemplificarea și rezolvarea problemelor de programare liniară și pătratică pentru o intersecție de tipul celei prezentate în Figura 4.5.

#### 4.8.1. Definirea problemei de optimizare și reducerea la două probleme de programare liniară și pătratică

Obiectivul problemei de optimizare este calcularea unei secvențe de comandă optimale  $\delta_0, \delta_1, \dots, \delta_{NF-1}$  reprezentând timpii de verde aferenți fazelor de semafor de-a lungul a  $N$  cicluri complete de semafor, în vederea minimizării unei anumite funcții obiectiv, ținând seama de următoarele condiții de funcționare care generează restricții:

- orizontul de timp este de  $N$  cicluri de semafor,
- succesiunea fazelor de semafor este identică pentru oricare ciclu de semafor,
- numărul fazelor de semafor  $F$  este fixat pentru problema de optimizare, dar este variabil în funcție de caracteristicile intersecției,
- se modelează atât de prezența autovehiculelor, cât și de prezența pietonilor,
- pentru fiecare ciclu de semafor, se consideră o singură fază de semafor pentru servirea pietonilor; toate trecerile de pietoni primesc culoarea verde a semaforului în același timp,
- vitezele medii de sosire și de plecare a participanților la trafic din cozile de așteptare se presupun constante pentru fiecare eveniment de trafic pe parcursul intervalului de timp,  $\bar{\lambda}_i = ct, \bar{\mu}_i = ct, \bar{\kappa}_i = ct, i = \overline{1, F}$
- atât lungimile cozilor de așteptare, cât și timpii de verde pentru fiecare fază de semafor au valori pozitive și sunt mărginiți inferior și superior.

Pornind de la funcția obiectiv  $J_3$  prezentată în (4.36) sunt propuse alte două funcții obiectiv, pentru  $N$  cicluri de semafor și  $F$  faze de semafor, ținând seama de notațiile din (4.46):

$$J_{LP} = \frac{\sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^F \sum_{l=1}^F \mathbf{x}_{F(k-1)+j}(l)}{NF}, \quad (4.43)$$

$$J_{QP} = \frac{\sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^F (\sum_{l=1}^F \mathbf{x}_{F(k-1)+j}(l)) \delta_{F(k-1)+j-1}}{NF}, \quad (4.44)$$

Utilizând modelul de stare al cozilor de așteptare pentru autovehicule și pentru pietoni descris prin ecuațiile (4.14)-(4.18), prin generalizare și ținând seama de restricțiile amintite mai sus, se obține următorul model matematic la nivel de intersecție:

$$v_i(t_{Fk+j}) = \begin{cases} \max(v_i(t_{Fk+j-1}) + (\bar{\lambda}_i^{(Fk+j-1)} - \bar{\mu}_i^{(Fk+j-1)}) \delta_{Fk+j-1} + \\ + (\bar{\mu}_i^{(Fk+j-1)} - \bar{\kappa}_i^{(Fk+j-1)}) \delta_a, (\bar{\lambda}_i^{(Fk+j-1)} - \bar{\kappa}_i^{(Fk+j-1)}) \delta_a), i = j \\ \max(v_i(t_{Fk+j-1}) + \bar{\lambda}_i^{(Fk+j-1)} \delta_{Fk+j-1}, 0), i \neq j \end{cases} \quad (4.45)$$

$$p_1(t_{Fk+F}) = p_1(t_{Fk+F-1}) + (\bar{\varphi}_1^{(Fk+F-1)} - \bar{\sigma}_1^{(Fk+F-1)}) \delta_{Fk+F-1}$$

În care:

- $j = \overline{1, F}$ ,
- $i = \overline{1, F-1}$ .

Se definește vectorul de stare al lungimilor cozilor de așteptare  $x$  astfel:

$$\mathbf{x}_k \in \mathbb{R}^{F \times 1} = \begin{bmatrix} v_1(t_k) \\ v_2(t_k) \\ \dots \\ v_{F-1}(t_k) \\ p_1(t_k) \end{bmatrix}, k = \overline{1, NF}, \quad (4.46)$$

Din ecuațiile (4.45) și (4.46) se obține următoarea ecuație de stare:

$$\mathbf{x}_{F(k-1)+j} = \max(\mathbf{x}_{F(k-1)+j-1} + \mathbf{b}_j \delta_{F(k-1)+j-1} + \mathbf{b}_{F+j} \delta_a, \mathbf{b}_{2F+j} \delta_a), j = \overline{1, F}, k = \overline{1, N} \quad (4.47)$$

Prin interpretarea ecuației (4.47) se obțin două inegalități:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{F(k-1)+j} - \mathbf{x}_{F(k-1)+j-1} - \mathbf{b}_j \delta_{F(k-1)+j-1} - \mathbf{b}_{F+j} \delta_a &\geq 0 \\ \mathbf{x}_{F(k-1)+j} - \mathbf{b}_{2F+j} \delta_a &\geq 0 \end{aligned}, j = \overline{1, F}, k = \overline{1, N}, \quad (4.48)$$

Se introduc restricțiile legate de valorile acceptate pentru lungimile cozilor de așteptare, obținându-se următoarea restricție de tip inegalitate pentru un ciclu complet de semafor:

$$\mathbf{0} \leq \mathbf{x}_k \leq \mathbf{x}_{max}, k = \overline{1, NF}, \quad (4.49)$$

$\mathbf{x}_{max}$  fiind vectorul care conține lungimile maxime ale cozilor de așteptare acceptate pentru fiecare eveniment de trafic. Apoi se introduc restricțiile de tip inegalitate pentru valorile timpilor de verde pentru fiecare fază de semafor:

$$\delta_{F(k-1)+j} \in [\delta_{m_j}, \delta_{M_j}], j = \overline{1, F}, k = \overline{1, N} \quad (4.50)$$

în care:

- $\delta_{m_j}[s]$  reprezintă valoarea minimă acceptată pentru durata de verde aferentă fazei de semafor  $j$ ,
- $\delta_{M_j}[s]$  reprezintă valoarea maximă acceptată pentru durata de verde aferentă fazei de semafor  $j$ .

Prin definirea vectorilor de stare  $\mathbf{x}^*$  și respectiv comandă  $\delta^*$  după cum urmează:

$$\mathbf{x}^* \in \mathbb{R}^{NF^2 \times 1} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_k \\ \dots \\ x_{NF} \end{bmatrix}, k = \overline{1, NF}, \quad (4.51)$$

$$\delta^* \in \mathbb{R}^{NF \times 1} = \begin{bmatrix} \delta_0 \\ \delta_1 \\ \dots \\ \delta_k \\ \dots \\ \delta_{NF-1} \end{bmatrix}, k = \overline{0, NF-1}, \quad (4.52)$$

se obține următoarea formulare matriceală a tuturor restricțiilor de tip inegalitate definite anterior:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}\mathbf{x}^* + \mathbf{B}\delta^* + \mathbf{e} &\geq 0 \\ \mathbf{x}^* + \mathbf{f} &\geq 0 \\ \mathbf{C}\mathbf{x}^* + \mathbf{g} &\geq 0 \\ \mathbf{D}\delta^* + \mathbf{h} &\geq 0 \end{aligned} \quad (4.53)$$

Astfel pot fi formulate următoarele două probleme de optimizare:

1. Problema de programare liniară (Linear Programming, LP):

$$LP : \begin{bmatrix} \hat{x}^* \\ \hat{\delta}^* \end{bmatrix} = \underset{x^* \in \mathbb{R}^{NF^2 \times 1}, \delta^* \in \mathbb{R}^{NF \times 1}}{\operatorname{arg\,min}} J_{LP}(x^*, \delta^*), \quad (4.54)$$

supusă la restricțiile "liniare" (4.53) de tip inegalitate. Se observă că funcția obiectiv  $J_{LP}$ , definită în (4.43), depinde doar de vectorul de stare  $x^*$ , astfel că  $J_{LP}(x^*, \delta^*) = J_{LP}(x^*)$ ,  $\forall \delta^* \in \mathbb{R}^{NF \times 1}$ .

2. Problema de programare pătratică (Quadratic Programming, QP):

$$QP : \begin{bmatrix} \hat{x}^* \\ \hat{\delta}^* \end{bmatrix} = \underset{x^* \in \mathbb{R}^{NF^2 \times 1}, \delta^* \in \mathbb{R}^{NF \times 1}}{\operatorname{arg\,min}} J_{QP}(x^*, \delta^*), \quad (4.55)$$

supusă la restricțiile "liniare" (4.53) de tip inegalitate, cu funcția obiectiv definită în (4.44).

Observând forma funcției obiectiv din ecuația (4.43), forma restricțiilor de tip inegalitate din relația (4.53) și faptul că se pune problema minimizării funcției obiectiv, putem afirma că prima problemă de optimizare este de tip liniar și poate fi rezolvată cu ajutorul metodei  $LP$  [30]. De asemenea, observând forma funcției obiectiv din ecuația (4.44), putem afirma că a doua problemă de optimizare este tot de tip pătratic și poate fi rezolvată cu ajutorul metodei  $QP$  [30]. În paragraful următor vor fi prezentate relațiile detaliate prin care sunt exprimate matricele care conțin parametri utilizați în cele două probleme de optimizare definite în (4.54), (4.55).

#### 4.8.2. Calculul matricelor cu parametri necesari rezolvării problemei de optimizare

Relațiile (4.45)-(4.53), conținând parametri necesari rezolvării problemei de optimizare, au fost grupate sub formă matriceală. Valorile acestor matrice au fost calculate, deoarece modelele procesului și funcțiile obiectiv sunt generalizări ale abordărilor anterioare [34]. În cele ce urmează vor fi exprimați vectorii  $b_i \in \mathbb{R}^{F \times 1}$ ,  $i = \overline{1, 3F}$  prezenți în relațiile (4.48). Aceștia au expresiile:

$$\begin{aligned} b_1 &= \begin{bmatrix} \bar{\lambda}_1 - \bar{\mu}_1 \\ \bar{\lambda}_2 \\ \bar{\lambda}_3 \\ \bar{\lambda}_4 \\ \dots \\ \bar{\lambda}_{F-1} \\ \bar{\varphi}_1 \end{bmatrix} & b_{F+1} &= \begin{bmatrix} \bar{\mu}_1 - \bar{\kappa}_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & b_{2F+1} &= \begin{bmatrix} \bar{\lambda}_1 - \bar{\kappa}_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ b_{F+1} &= \begin{bmatrix} \bar{\lambda}_1 \\ \bar{\lambda}_2 - \bar{\mu}_2 \\ \bar{\lambda}_3 \\ \bar{\lambda}_4 \\ \dots \\ \bar{\lambda}_{F-1} \\ \bar{\varphi}_1 \end{bmatrix} & b_{F+2} &= \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{\mu}_2 - \bar{\kappa}_2 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & b_{2F+2} &= \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{\lambda}_2 - \bar{\kappa}_2 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ & \vdots & & & & \vdots & & & & \vdots \\ & \vdots & & & & \vdots & & & & \vdots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{b}_j &= \begin{bmatrix} \bar{\lambda}_1 \\ \bar{\lambda}_2 \\ \dots \\ \bar{\lambda}_j - \bar{\mu}_j \\ \bar{\lambda}_{j+1} \\ \dots \\ \bar{\varphi}_1 \end{bmatrix} & \mathbf{b}_{F+j} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ \bar{\mu}_j - \bar{\kappa}_j \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & \mathbf{b}_{2F+j} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ \bar{\lambda}_j - \bar{\kappa}_j \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
&\vdots & \vdots & & \vdots & \\
\mathbf{b}_{F-1} &= \begin{bmatrix} \bar{\lambda}_1 \\ \bar{\lambda}_2 \\ \dots \\ \bar{\lambda}_j \\ \dots \\ \bar{\lambda}_{F-1} - \bar{\mu}_{F-1} \\ \bar{\varphi}_1 \end{bmatrix} & \mathbf{b}_{2F-1} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ \dots \\ \bar{\mu}_{2F-1} - \bar{\kappa}_{2F-1} \\ 0 \end{bmatrix} & \mathbf{b}_{3F-1} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ \dots \\ \bar{\lambda}_{3F-1} - \bar{\kappa}_{3F-1} \\ 0 \end{bmatrix} \\
\mathbf{b}_F &= \begin{bmatrix} \bar{\lambda}_1 \\ \bar{\lambda}_2 \\ \dots \\ \bar{\lambda}_j \\ \dots \\ \bar{\lambda}_{F-1} \\ \bar{\varphi}_1 - \bar{\sigma}_1 \end{bmatrix} & \mathbf{b}_{2F} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & \mathbf{b}_{3F} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ \bar{\varphi}_1 - \bar{\sigma}_1 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

în care  $j = \overline{1, F}$ .

Matricele utilizate în restricțiile (4.53) sunt descrise în continuare cu mențiunea că  $j = \overline{3, F-1}$ :

$$\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{NF^2 \times NF^2} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_F & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\mathbf{I}_F & \mathbf{I}_F & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\mathbf{I}_F & \mathbf{I}_F & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -\mathbf{I}_F & \mathbf{I}_F & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & -\mathbf{I}_F & \mathbf{I}_F \end{bmatrix}, \quad (4.56)$$

$$\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{NF^2 \times NF^2} = - \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{b}_2 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{b}_j & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \mathbf{b}_F & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \mathbf{b}_F & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \mathbf{b}_{F-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \mathbf{b}_F \end{bmatrix}, \quad (4.57)$$

$$e \in \mathbb{R}^{NF^2 \times 1} = - \begin{bmatrix} b_{F+1} \\ b_{F+2} \\ \dots \\ b_{F+j} \\ \dots \\ b_{2F} \\ \dots \\ b_{F+1} \\ b_{F+2} \\ \dots \\ b_{F+j} \\ \dots \\ b_{2F} \end{bmatrix}, \quad (4.58)$$

$$f \in \mathbb{R}^{NF^2 \times 1} = - \begin{bmatrix} b_{2F+1} \\ b_{2F+2} \\ \dots \\ b_{2F+j} \\ \dots \\ b_{3F} \\ \dots \\ b_{2F+1} \\ b_{2F+2} \\ \dots \\ b_{2F+j} \\ \dots \\ b_{3F} \end{bmatrix}, \quad (4.59)$$

$$C \in \mathbb{R}^{NF^2 \times NF^2} = - \begin{bmatrix} I_F & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_F & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_F & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & I_F & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & I_F \end{bmatrix}, \quad (4.60)$$

$$g \in \mathbb{R}^{NF^2 \times 1} = \begin{bmatrix} x_{max} \\ \dots \\ \dots \\ x_{max} \end{bmatrix}, \quad (4.61)$$

$$D \in \mathbb{R}^{2NF \times NF} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad (4.62)$$

$$\mathbf{h} \in \mathbb{R}^{2NF \times 1} = \begin{bmatrix} -\delta_{m_1} - \delta_a \\ \delta_{M_1} + \delta_a \\ -\delta_{m_2} - \delta_a \\ \delta_{M_2} + \delta_a \\ \dots \\ -\delta_{m_F} - \delta_a \\ \delta_{M_F} + \delta_a \\ \dots \\ -\delta_{m_1} - \delta_a \\ \delta_{M_1} + \delta_a \\ -\delta_{m_2} - \delta_a \\ \delta_{M_2} + \delta_a \\ \dots \\ -\delta_{m_F} - \delta_a \\ \delta_{M_F} + \delta_a \end{bmatrix}, \quad (4.63)$$

### 4.8.3. Exemplificarea și rezolvarea problemelor de programare liniară și pătratică pentru o intersecție de tipul celei prezentate în Figura 4.5

În acest subcapitol vor fi exemplificate problemele de optimizare liniară și pătratică pentru condiții cu densitate de trafic medie într-o intersecție semaforizată cu geometrie simplă. Se consideră patru evenimente de trafic pentru autovehicule, câte unul pentru fiecare stradă care intră în intersecție și un eveniment de trafic pentru pietoni. În Tabelul 4.43 sunt detaliate datele de trafic utilizate în problemele de optimizare (4.54) și (4.55).

Tabelul 4.43: Valori ale parametrilor utilizați în metoda de optimizare pentru fiecare eveniment de trafic

$\bar{\lambda}_1 = 2.5$	$\bar{\lambda}_2 = 1.72$	$\bar{\lambda}_3 = 2.2$	$\bar{\lambda}_4 = 1.6$	$\bar{\varphi}_1 = 0.3$
$\bar{\mu}_1 = 6$	$\bar{\mu}_2 = 6.2$	$\bar{\mu}_3 = 6$	$\bar{\lambda}_4 = 6.2$	$\bar{\sigma}_1 = 2$
$\bar{\kappa}_1 = 0.3$	$\bar{\kappa}_2 = 0.3$	$\bar{\kappa}_3 = 0.3$	$\bar{\kappa}_4 = 0.3$	$\bar{\varphi}_1 = 0.3$
$x_0(1) = 10$	$x_0(2) = 10$	$x_0(3) = 10$	$x_0(4) = 10$	$x_0(5) = 10$
$x_{max}(1) = 5000$	$x_{max}(2) = 5000$	$x_{max}(3) = 5000$	$x_{max}(4) = 5000$	$x_{max}(5) = 100$
$\delta_{m_1} = 5$	$\delta_{m_2} = 5$	$\delta_{m_3} = 5$	$\delta_{m_4} = 5$	$\delta_{m_5} = 5$
$\delta_{M_1} = 60$	$\delta_{M_2} = 60$	$\delta_{M_3} = 60$	$\delta_{M_4} = 60$	$\delta_{M_5} = 60$

Alături de parametri din tabel au fost considerate următoarele valori ale altor parametri:

- $N \in \{1, 3, 5, 10, 20\}$  - numărul de cicluri de semafor,
- $F = 5$  - numărul de faze de semafor aferente unui ciclu complet de semafor,
- $\delta_a[s] = 3$  - timpul aferent culorii galbene a semaforului.

Pornind de la datele prezentate mai sus, pentru rezolvarea celor două probleme de programare  $LP$  și  $QP$  se utilizează un număr de  $NF^2 + NF \in \{30, 90, 150, 300, 600\}$  variabile pentru fiecare problemă în parte. Numărul de variabile corespunzătoare vectorului  $x^*$  este  $NF^2$ , iar numărul de variabile corespunzătoare vectorului  $\delta^*$  este  $NF$ . Pentru rezolvarea acestor probleme au fost apelate funcțiile *nag\_opt\_lp* și respectiv *nag\_opt\_qp* aparținând librăriei NAG [103], având la bază principiul algoritmului *inertia-controlling* descris amănunțit în [53]. În vederea simulării comportamentului sistemului de transport în urma utilizării celor două metode de optimizare în diferite condiții de trafic, funcțiile librăriei NAG au fost integrate

în simulatorul de trafic dezvoltat, împreună cu procedeul de calcul al matricelor cu parametri aferente restricțiilor de tip inegalitate.

Pentru rezolvarea celor două probleme de programare, liniară și pătratică, a fost aleas algoritmul *inertia-controlling* datorită faptului că poate rezolva ambele probleme doar prin ajustarea funcțiilor obiectiv și de asemenea datorită faptului că este implementată în biblioteca NAG. În continuare este prezentată o formulare generală a problemei de optimizare rezolvabilă prin algoritmul *inertia-controlling*:

$$\hat{x} = \underset{x \in \mathbb{R}^n}{\operatorname{argmin}} J(x),$$

$$J(x) = c^T x + \frac{1}{2} x^T H x, \text{ supusă la } l_i \leq \left\{ \begin{array}{c} x \\ Ax \end{array} \right\} \leq l_s, \quad (4.64)$$

$$A \in \mathbb{R}^{m \times n}, c \in \mathbb{R}^n, H \in \mathbb{R}^{n \times n},$$

în care:

- $J(x)$  - funcția obiectiv,
- $x$  - vector coloană cu variabilele problemei,
- $n = \operatorname{card}(x)$  - numărul de variabile ale problemei,
- $A$  - matricea cu parametri restricțiilor de tip inegalitate (r.t.i.),
- $m$  - numărul de r.t.i.,
- $l_i$  - vectorul coloană reprezentând limitele inferioare din r.t.i,
- $l_s$  - vectorul coloană reprezentând limitele superioare din r.t.i,
- $c$  - vectorul coloană reprezentând parametri liniari ai funcției obiectiv, care este tocmai gradientul funcției obiectiv în problema de programare liniară ( $H = 0$ ),
- $H$  - matricea pătratică simetrică reprezentând parametri pătratici ai funcției obiectiv, care este tocmai Hessianul.

În Tabelul 4.44 sunt prezentate valorile funcțiilor obiectiv obținute în urma aplicării celor două metode de optimizare,  $LP$  și  $QP$  pentru diferite valori ale numărului de cicluri de semafor. De asemenea sunt puși în evidență timpii necesari rulării algoritmilor de optimizare  $t_{LP}$  și  $t_{QP}$  pentru fiecare caz în parte pe un calculator personal cu frecvență de 2.4 GHz. S-a dorit sublinierea timpilor de rulare a ambelor metode relativ la numărul de cicluri și faze de semafor. Din acest motiv nu au fost prezentate valorile optime ale variabilelor  $x^*$  și  $\delta^*$ , notate cu  $\hat{x}^*$  și  $\hat{\delta}^*$ .

Tabelul 4.44: Valorile funcțiilor obiectiv  $J_{LP}$  și respectiv  $J_{QP}$  înregistrate în urma aplicării celor două metode de programare liniară:  $LP$  - Linear Programming,  $QP$  - Quadratic Programming

$N$	<i>LinearProgramming</i>		<i>QuadraticProgramming</i>	
	$J_{LP}$	$t_{LP}[s]$	$J_{QP}$	$t_{QP}[s]$
1	14	0.19	289	0.2
3	28	0.58	562	0.69
5	41	1.37	831	1.26
10	75	5.02	1501	5.05
20	142	33.35	2842	36.13



**4.8.4. Studii de caz legate de conducerea optimală a traficului rutier într-o intersecție, la nivelul autovehiculelor și pietonilor**

În acest subcapitol este realizat un studiu de caz comparativ între cei trei algoritmi de conducere propuși:

- metoda de programare liniară  $LP$ ,
- metoda de programare pătratică  $QP$ ,
- algoritmul de conducere LTA, funcționând în aceleași condiții restrictive ca și cele două metode de programare liniară. Principalele restricții sunt legate de viteza de plecare a autovehiculelor din coada de așteptare și de succesiunea fazelor de semafor,
- algoritmul de conducere LTA, funcționând fără restricții, după cum s-a prezentat în subcapitolele anterioare.

Rezultatele obținute în urma aplicării metodelor de conducere amintite mai sus sunt prezentate în Tabelul 4.45 și în Tabelul 4.46, urmând ca analiza rezultatelor să se realizeze în ceea ce urmează. Se menționează că pentru aceleași condiții de trafic au fost definite câte patru cazuri de test în vederea urmăririi evoluției valorilor funcției obiectiv odată cu schimbarea numărului de cicluri de semafor. De asemenea, algoritmul propus LTA, a fost testat doar în cazul cel mai defavorabil și anume: număr mare de cicluri de semafor.

Tabelul 4.45: Valorile funcțiilor obiectiv  $J_{LP}$  și a indicatorilor de calitate  $J_1$  și  $J_2$  înregistrate în urma rulării a trei algoritmi:  $LP$  - Linear Programming,  $LT A_{\mu=ct}$  - Algoritmul LTA cu condiția ca vitezele de plecare de la semafor să fie constante,  $LT A_{\mu \neq ct}$  - Algoritmul LTA fără restricții

	$LP$						$LT A_{\mu=ct}$			$LT A_{\mu \neq ct}$			
	$J_{LP}$	$\frac{J_1}{10^3}$	$J_2$	$t[s]$	$J_{LP}$	$\frac{J_1}{10^3}$	$J_2$	$t[s]$	$J_{LP}$	$\frac{J_1}{10^3}$	$J_2$	$t[s]$	
$C_1 : \lambda_v \in [1.6, 2.5], \mu_v = 4$	$N = 5, F = 5$	66	0.9	0	1.33								
	$N = 10, F = 5$	127	1.6	0	6.64								
	$N = 20, F = 5$	251	3.4	0	43.76	1024	13	0	0.2	88	23	0	0.2
	$20 * (N = 1, F = 5)$	301	2.8	0	2.8								
$C_2 : \lambda_v \in [1.6, 2.5], \mu_v = 6$	$N = 5, F = 5$	48	1.6	0	1.72								
	$N = 10, F = 5$	90	3.4	0	6.6								
	$N = 20, F = 5$	173	7	0	43.9	572	19	0	0.2	88	23	0	0.2
	$20 * (N = 1, F = 5)$	178	6.4	0	1.8								
$C_3 : \lambda_v \in [1.6, 2.5], \mu_v = 8$	$N = 5, F = 5$	33	2.4	0	1.42								
	$N = 10, F = 5$	54	5.1	0	5.15								
	$N = 20, F = 5$	98	10.4	0	28.5	160	20	0	0.2	88	23	0	0.2
	$20 * (N = 1, F = 5)$	106	10.1	0	1.9								
$C_4 : \lambda_v \in [3, 4], \mu_v = 4$	$N = 5, F = 5$	146	0.12	0	1.62								
	$N = 10, F = 5$	288	0.26	0	6.57								
	$N = 20, F = 5$	572	0.45	0	37.21	2459	13	0	0.2	1368	30	0	0.2
	$20 * (N = 1, F = 5)$	620	0.37	0	2.2								
$C_5 : \lambda_v \in [3, 4], \mu_v = 6$	$N = 5, F = 5$	117	0.96	0	1.53								
	$N = 10, F = 5$	233	1.94	0	4.84								
	$N = 20, F = 5$	465	3.92	0	27.16	2005	20	0	0.2	1368	30	0	0.2
	$20 * (N = 1, F = 5)$	494	3.42	0	2.3								
$C_6 : \lambda_v \in [3, 4], \mu_v = 8$	$N = 5, F = 5$	140	1.8	0	1.31								
	$N = 10, F = 5$	278	3.6	0	6.29								
	$N = 20, F = 5$	555	7.28	0	34.13	1527	26	0	0.2	1368	30	0	0.2
	$20 * (N = 1, F = 5)$	570	6.42	0	1.7								

Rezultatele obținute în urma rulării algoritmului de optimizare LP și a algoritmului LTA (în cele două situații - cu și fără restricții) sunt prezentate în continuare sub formă grafică doar pentru cazul de test  $C_3$ . În Figura 4.54 sunt prezentate grafic valorile variabilelor de stare obținute de-a lungul perioadei de simulare, câte un grafic pentru fiecare dintre algoritmi și situațiile simulate:  $LP$ ,  $LTA_{\mu=ct}$ ,  $LTA_{\mu \neq ct}$ . Cu alte cuvinte, această figură descrie evoluția în timp a lungimilor cozilor de așteptare pentru fiecare eveniment de trafic al intersecției conduse.

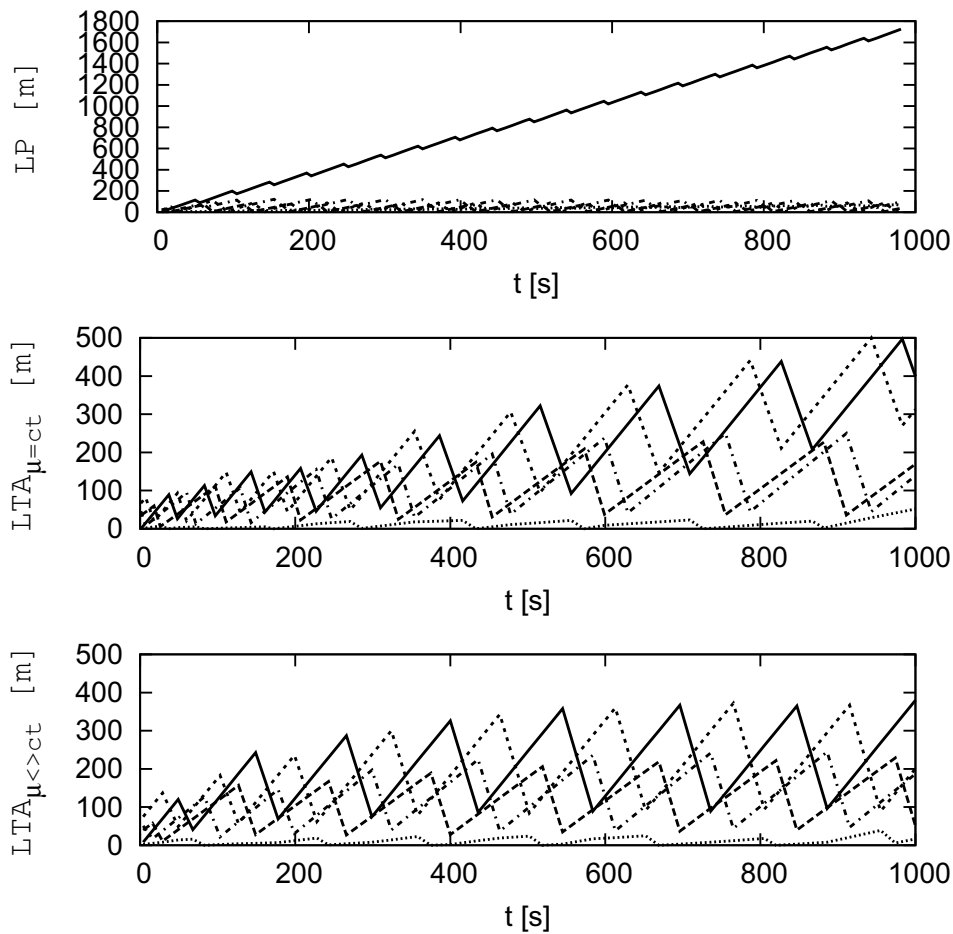


Figura 4.54: Evoluțiile în timp ale variabilelor de stare rezultate în urma utilizării metodelor LP și LTA:  $x_1$  reprezentată cu linie continuă,  $x_2$  reprezentată cu linie (---),  $x_3$  reprezentată cu linie (-.-),  $x_4$  reprezentată cu linie (...),  $x_5$  reprezentată cu linie (- -)

În Figura 4.55 sunt prezentate grafic evoluțiile în timp ale secvențelor de comandă obținute de-a lungul perioadei de simulare, câte un grafic pentru fiecare dintre algoritmi și situațiile simulate:  $LP$ ,  $LTA_{\mu=ct}$ ,  $LTA_{\mu \neq ct}$ . Această figură descrie evoluția în timp a timpilor de verde aferenți fiecărui eveniment de trafic din intersecția condusă.

Observând valorile funcției obiectiv  $J_{LP}$  din Tabelul 4.45 înregistrate pentru cele  $6 * 4 = 24$  studii de caz definite putem afirma următoarele:

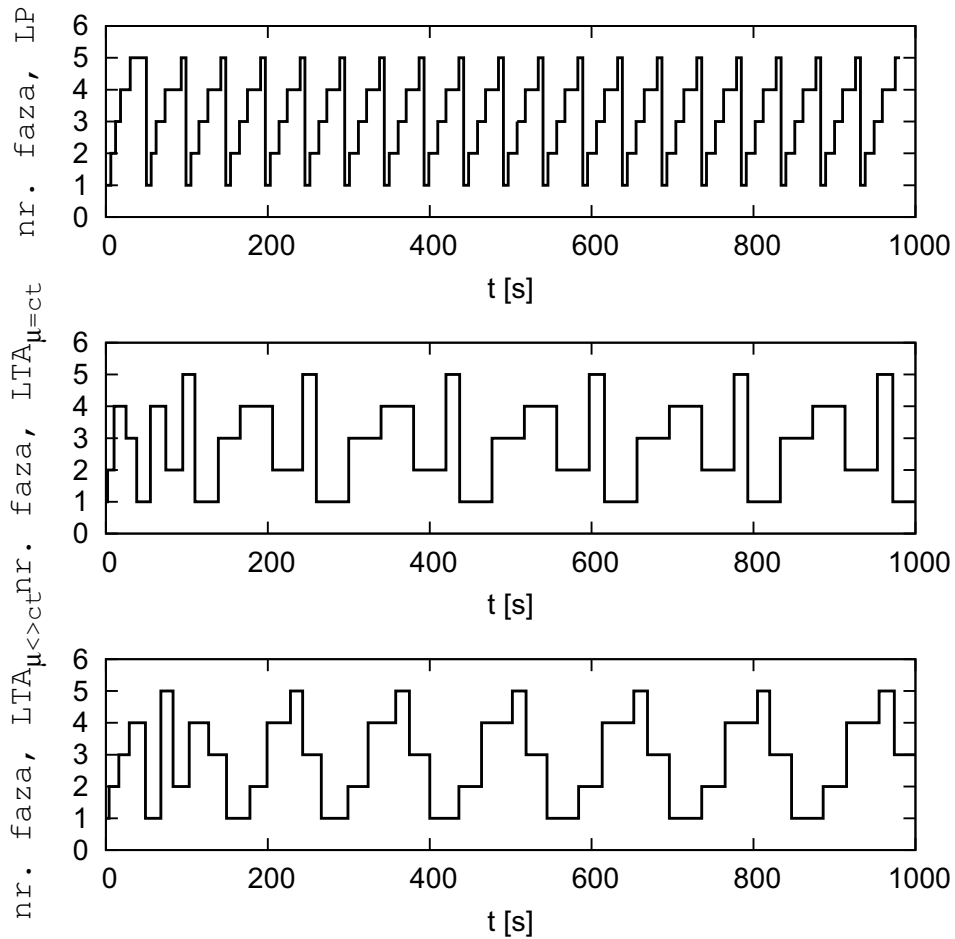


Figura 4.55: Evoluțiile în timp ale secvențelor de comandă  $\delta$  rezultate în urma utilizării metodelor LP și LTA

- timpul de rulare al algoritmilor de optimizare prin metoda de programare liniară  $LP$  crește exponențial odată cu creșterea numărului de cicluri de semafor,
- în condițiile în care vitezele de sosire ale autovehiculelor în cozile de așteptare au valori ce denotă densitate medie de trafic (studiile de caz  $C_1, C_2, C_3$ ), se observă că prin creșterea orizontului de timp și anume prin dublarea numărului de cicluri de semafor, valorile funcției obiectiv  $J_{LP}$  se îmbunătățesc procentual cu valori în intervalul  $[4, 22]$  comparativ cu situația în care numărul de cicluri de semafor rămâne neschimbat, iar metoda de conducere este apelată de două ori,
- în condiții de trafic suprasaturat (studiile de caz  $C_4, C_5, C_6$ ), prin dublarea numărului de cicluri de semafor în metoda de conducere, fapt care implică creșterea orizontului de timp, se obține o îmbunătățire a valorilor funcției obiectiv cu maxim 1.5%. Astfel, comparativ cu creșterea exponențială a timpului de rulare, îmbunătățirea valorilor funcției obiectiv este nesemnificativă,

- timpul de rulare al algoritmului de conducere în timp real propus LTA, este în medie de aproximativ nouă ori mai mic decât timpul de rulare al metodei de optimizare  $LP$ , pentru același număr de cicluri de semafor și indiferent de restricțiile legate de viteza de plecare a autovehiculelor din coada de așteptare,
- indiferent de condițiile de trafic definite, valorile funcției obiectiv  $J_{LP}$  înregistrate pentru algoritmul  $LTA_{\mu=ct}$  sunt mult mai mari decât valorile înregistrate pentru metoda de optimizare  $LP$ . Astfel, considerând viteza de plecare a autovehiculelor din coada de așteptare ca fiind constantă, metoda de conducere  $LP$  se comportă mai bine decât algoritmul în timp real LTA,
- în condiții de trafic subsaturat (densitate medie de trafic), considerând condiții de trafic reale și anume viteza de plecare a autovehiculelor din coada de așteptare ca fiind variabilă în funcție de lungimea cozii de așteptare, algoritmul de conducere în timp real LTA se comportă mult mai bine decât metoda de conducere  $LP$  în condiții de trafic restrictive (viteza de plecare a autovehiculelor din coada de așteptare este considerată constantă), valorile funcției obiectiv fiind reduse de până la 3.4 ori,
- în condiții de trafic suprasaturat (densitate mare de trafic), considerând condiții de trafic reale și anume viteza de plecare a autovehiculelor din coada de așteptare ca fiind variabilă în funcție de lungimea cozii de așteptare, algoritmul de conducere în timp real LTA nu aduce îmbunătățiri metodei de conducere  $LP$  în condiții de trafic restrictive,
- în vederea reducerii semnificative a timpului de rulare al algoritmului de conducere prin optimizare  $LP$  pentru valori mari ale numărului de cicluri de semafor pentru care se realizează conducerea traficului rutier, problema de optimizare se poate descompune în mai multe subprobleme de optimizare, fiecare subproblemă urmând a fi rezolvată pentru un număr mai mic de cicluri de semafor,
- observând valorile funcției obiectiv  $J_2$  putem afirma că toate cele patru metode minimizează timpii morți de semafor, adică în regim staționar constant  $t_m = 0$ ,
- valorile funcției obiectiv  $J_1$  indică faptul că vitezele medii înregistrate pe întreaga perioadă de simulare sunt favorabile metodei de conducere în timp real LTA.

Tabelul 4.46: Valorile funcțiilor obiectiv  $J_{QP}$  și a indicatorilor de calitate  $J_1$  și  $J_2$  înregistrate în urma rulării a trei algoritmi:  $QP$  - Quadratic Programming,  $LT A_{\mu=ct}$  - Algoritm LTA cu condiția ca vitezele de plecare de la semafor să fie constante,  $LT A_{\mu \neq ct}$  - Algoritm LTA fără restricții

	QP				$LT A_{\mu=ct}$				$LT A_{\mu \neq ct}$				
	$J_{QP}$	$\frac{J_1}{10^3}$	$J_2$	$t[s]$	$J_{QP}$	$\frac{J_1}{10^3}$	$J_2$	$t[s]$	$J_{QP}$	$\frac{J_1}{10^3}$	$J_2$	$t[s]$	
$C_7 : \lambda_v \in [1.6, 2.5], \mu_v = 4$	$N = 5, F = 5$	126	0.9	0	1.19								
	$N = 10, F = 5$	2427	1.78	0	4.84								
	$N = 20, F = 5$	4759	3.59	0	30.84	750	11	0	0.2	77	24	0	0.2
	$20 * (N = 1, F = 5)$	4869	3.56	0	1.5								
$C_8 : \lambda_v \in [1.6, 2.5], \mu_v = 6$	$N = 5, F = 5$	85	1.7	0	1.39								
	$N = 10, F = 5$	1574	3.5	0	6.55								
	$N = 20, F = 5$	3008	7.12	0	42.14	444	16	0	0.2	77	24	0	0.2
	$20 * (N = 1, F = 5)$	3029	7.1	0	2.5								
$C_9 : \lambda_v \in [1.6, 2.5], \mu_v = 8$	$N = 5, F = 5$	50	2.45	0	1.19								
	$N = 10, F = 5$	771	5.13	0	4.48								
	$N = 20, F = 5$	1305	10.5	0	26.61	160	21	0	0.2	77	24	0	0.2
	$20 * (N = 1, F = 5)$	1339	10.4	0	1.6								
$C_{10} : \lambda_v \in [3, 4], \mu_v = 4$	$N = 5, F = 5$	292	0.16	0	1.28								
	$N = 10, F = 5$	5693	0.31	0	5.87								
	$N = 20, F = 5$	11227	0.62	0	34.32	1757	10	0	0.2	996	25	0	0.2
	$20 * (N = 1, F = 5)$	11388	0.84	0	2.52								
$C_{11} : \lambda_v \in [3, 4], \mu_v = 6$	$N = 5, F = 5$	245	1.03	0	1.2								
	$N = 10, F = 5$	4772	2.08	0	4.45								
	$N = 20, F = 5$	9403	4.2	0	27.58	1463	16	0	0.2	996	25	0	0.2
	$20 * (N = 1, F = 5)$	9619	4.12	0	1.8								
$C_{12} : \lambda_v \in [3, 4], \mu_v = 8$	$N = 5, F = 5$	201	1.89	0	1.26								
	$N = 10, F = 5$	3882	3.84	0	6.1								
	$N = 20, F = 5$	7615	7.75	0	34.84	1152	22	0	0.2	996	25	0	0.2
	$20 * (N = 1, F = 5)$	7749	7.65	0	2.71								

Rezultatele obținute în urma rulării algoritmului de optimizare QP și a algoritmului LTA (în cele două situații - cu și fără restricții) sunt prezentate în continuare sub formă grafică doar pentru cazul de test  $C_3$ . În Figura 4.56 sunt prezentate grafic valorile variabilelor de stare obținute de-a lungul perioadei de simulare, câte un grafic pentru fiecare dintre algoritmi și situațiile simulate:  $QP$ ,  $LTA_{\mu=ct}$ ,  $LTA_{\mu \neq ct}$ . Cu alte cuvinte, această figură descrie evoluția în timp a lungimilor cozilor de așteptare pentru fiecare eveniment de trafic al intersecției conduse.

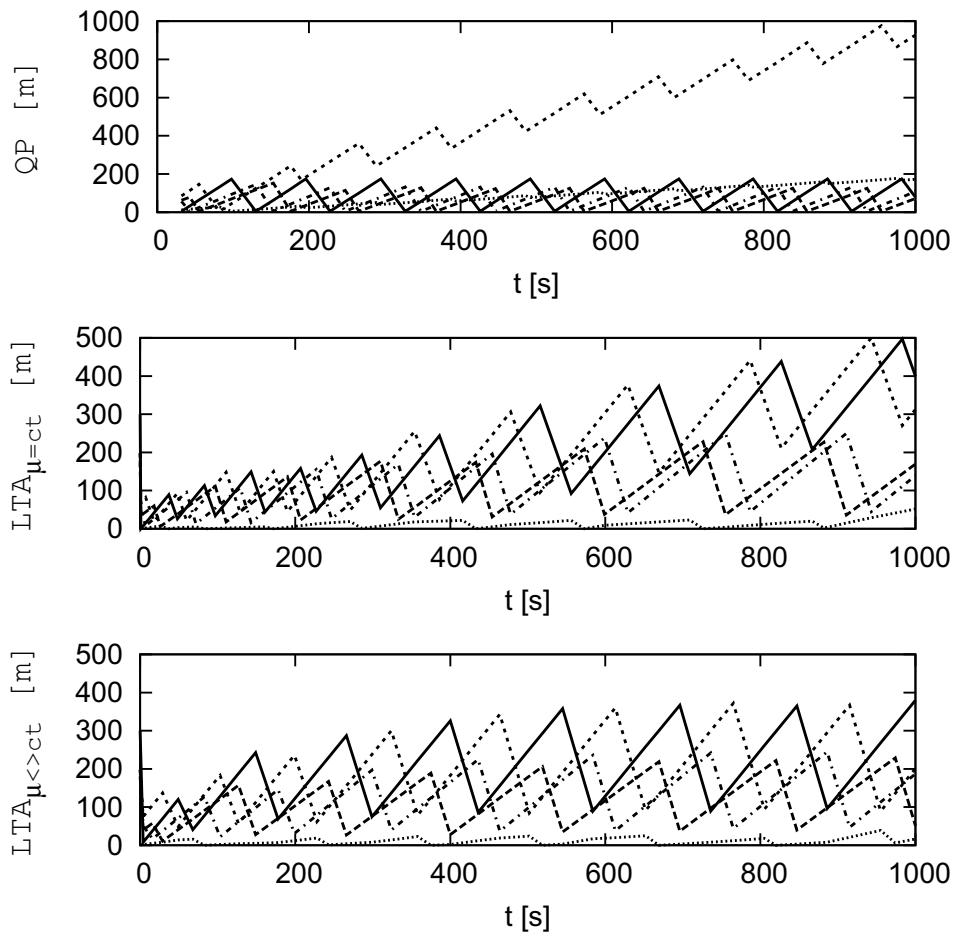


Figura 4.56: Evoluțiile în timp ale variabilelor de stare rezultate în urma utilizării metodelor QP și LTA:  $x_1$  reprezentată cu linie continuă,  $x_2$  reprezentată cu linie (---),  $x_3$  reprezentată cu linie (-.-),  $x_4$  reprezentată cu linie (...),  $x_5$  reprezentată cu linie (- -)

În Figura 4.57 sunt prezentate grafic evoluțiile în timp ale secvențelor de comandă obținute de-a lungul perioadei de simulare, câte un grafic pentru fiecare dintre algoritmi și situațiile simulate:  $QP$ ,  $LTA_{\mu=ct}$ ,  $LTA_{\mu \neq ct}$ . Această figură descrie evoluția în timp a timpilor de verde aferenți fiecărui eveniment de trafic din intersecția condusă.

Asemănător observațiilor făcute asupra valorilor funcției obiectiv  $J_{LP}$  din Tabelul 4.45, în continuare vor fi enumerate observații asupra funcției obiectiv  $J_{QP}$

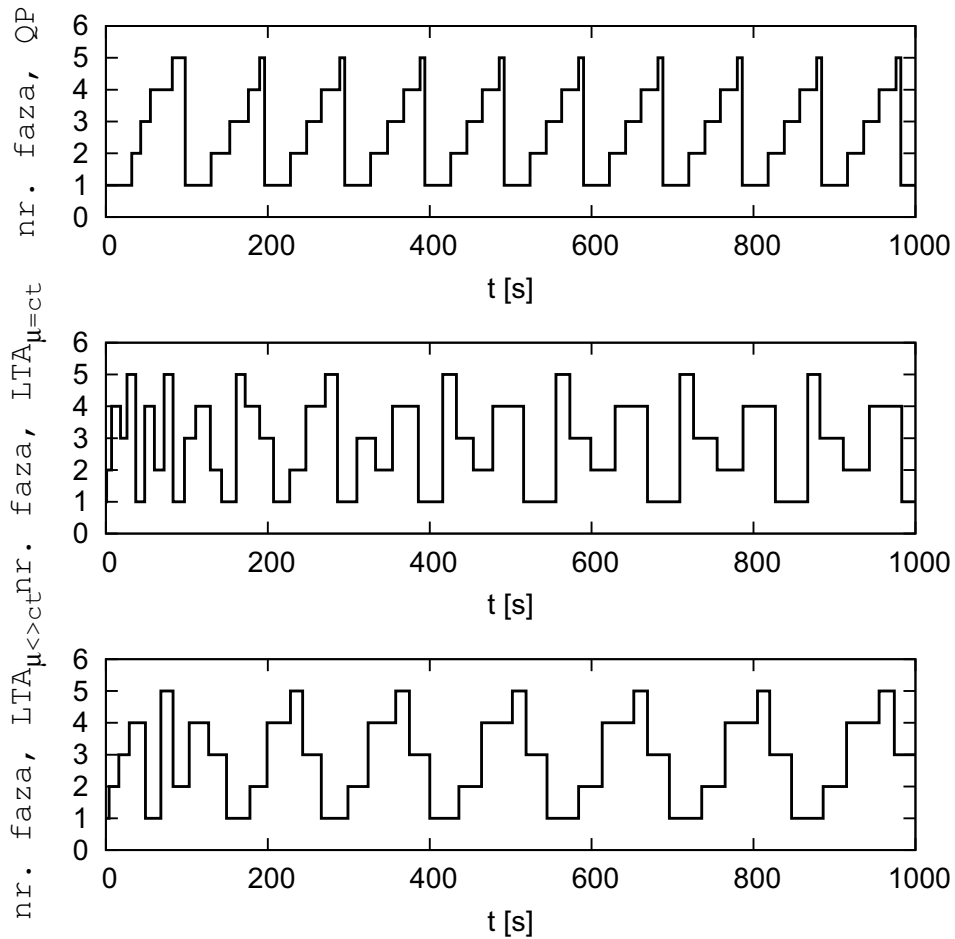


Figura 4.57: Evoluțiile în timp ale secvențelor de comandă  $\delta$  rezultate în urma utilizării metodelor QP și LTA

conform cu Tabelul 4.46:

- timpul de rulare al algoritmilor de optimizare prin metoda de programare pătratică  $QP$  crește exponențial odată cu creșterea numărului de cicluri de semafor,
- în condițiile în care vitezele de sosire ale autovehiculelor în cozile de așteptare au valori ce denotă densitate medie de trafic (studiile de caz  $C_7, C_8, C_9$ ), se observă că prin creșterea orizontului de timp și anume prin dublarea numărului de cicluri de semafor, valorile funcției obiectiv  $J_{QP}$  se îmbunătățesc procentual cu valori în intervalul  $[4, 40]$  comparativ cu situația în care numărul de cicluri de semafor rămâne neschimbat, iar metoda de conducere este apelată de două ori,
- în condiții de trafic suprasaturat (studiile de caz  $C_{10}, C_{11}, C_{12}$ ), prin dublarea numărului de cicluri de semafor în metoda de conducere, fapt care implică creșterea orizontului de timp, se obține o îmbunătățire medie a valorilor funcției



obiectiv cu aproximativ 3%. Astfel, comparativ cu creșterea exponențială a timpului de rulare, îmbunătățirea valorilor funcției obiectiv este totuși nesemnificativă,

- timpul de rulare al algoritmului de conducere în timp real propus LTA, este în medie de aproximativ doisprezece ori mai mic decât timpul de rulare al metodei de optimizare  $QP$ , pentru același număr de cicluri de semafor și indiferent de restricțiile legate de viteza de plecare a autovehiculelor din coada de așteptare,
- indiferent de condițiile de trafic definite, valorile funcției obiectiv  $J_{QP}$  înregistrate pentru algoritmul  $LTA_{\mu=ct}$  sunt mult mai mari decât valorile înregistrate pentru metoda de optimizare  $QP$ . Astfel, considerând viteza de plecare a autovehiculelor din coada de așteptare ca fiind constantă, metoda de conducere  $QP$  se comportă mai bine decât algoritmul în timp real LTA,
- în condiții de trafic subsaturat (densitate medie de trafic), considerând condiții de trafic reale și anume viteza de plecare a autovehiculelor din coada de așteptare ca fiind variabilă în funcție de lungimea cozii de așteptare, algoritmul de conducere în timp real LTA se comportă mult mai bine decât metoda de conducere  $QP$  în condiții de trafic restrictive (viteza de plecare a autovehiculelor din coada de așteptare este considerată constantă), valorile funcției obiectiv fiind reduse de până la 6.2 ori,
- în condiții de trafic suprasaturat (densitate mare de trafic), considerând condiții de trafic reale și anume viteza de plecare a autovehiculelor din coada de așteptare ca fiind variabilă în funcție de lungimea cozii de așteptare, algoritmul de conducere în timp real LTA nu aduce în general îmbunătățiri metodei de conducere  $QP$  în condiții de trafic restrictive, excepție făcând cazul în care viteza de plecare utilizată în metoda de conducere  $QP$  este scăzută,
- în vederea reducerii semnificative a timpului de rulare al algoritmului de conducere prin optimizare  $QP$  pentru valori mari ale numărului de cicluri de semafor pentru care se realizează conducerea traficului rutier, problema de optimizare se poate descompune în mai multe subprobleme de optimizare, fiecare subproblemă urmând a fi rezolvată pentru un număr mai mic de cicluri de semafor,
- observând valorile funcției obiectiv  $J_2$  putem afirma că toate cele patru metode minimizează timpii morți de semafor, adică în regim staționar constant  $t_m = 0$ ,
- valorile funcției obiectiv  $J_1$  indică faptul că vitezele medii înregistrate pe întreaga perioadă de simulare sunt favorabile metodei de conducere în timp real LTA.

Pe baza observațiilor de mai sus, putem concluziona că metodele de optimizare liniară reprezintă o soluție de conducere a traficului rutier la nivel de intersecție doar în anumite condiții de trafic restrictive: viteza de plecare a autovehiculelor din coada de așteptare este considerată constantă, iar succesiunea fazelor de semafor este aceeași pentru fiecare ciclu de semafor. Marele dezavantaj al metodelor de optimizare liniară este acela că nu țin seama de caracterul stohastic al traficului rutier urban, iar condițiile de trafic pentru care se realizează conducerea sunt estimate, și de multe ori diferite de condițiile reale de trafic. Prin studiile de caz definite și prezentate mai sus s-a arătat că algoritmul de conducere în timp real propus LTA se comportă mult mai bine în condiții reale de trafic, decât metodele de optimizare liniară în condiții de trafic restrictive. În schimb, pentru aceleași condiții restrictive de trafic, metodele de optimizare oferă o soluție optimală în ceea ce privește conducerea traficului rutier la nivel de intersecție. Rezultatele obținute în acest subcapitol pot fi aplicate fără probleme pe studiile de caz prezentate în subcapitolele anterioare referitoare la alte condiții de trafic și alte geometrii ale intersecțiilor, concluziile fiind similare.

### 4.9. Concluzii

Pe parcursul acestui capitol a fost făcută o descriere amănunțită a metodelor de conducere implementate la nivel de agent local. Au fost prezentați toți pașii parcurși, începând de la modelare, implementare și terminând cu realizarea studiilor de caz, simularea comportamentului sistemului de transport în urma utilizării metodelor de conducere studiate și compararea rezultatelor obținute.

În prima parte s-a realizat modelarea procesului de schimbare a culorilor semafoarelor cu ajutorul unei rețele Petri și s-a modelat fluxul traficului printr-o intersecție prin monitorizarea cozilor de așteptare. Pornind de la un model anterior realizat de către De Schutter [32], s-a realizat un nou model prin extinderea celui dintâi adăugând noi facilități cum ar fi modelarea unei intersecții complexe și includerea pietonilor în model.

În cea de-a doua parte a fost prezentată atât algoritmul de conducere propus, cât și implementarea simulatorului de trafic de tip macroscopic, necesar testării soluției de conducere propuse. Simulatorul implementat permite simularea traficului rutier într-o intersecție complexă și schimbarea culorilor semafoarelor în funcție de metoda de conducere, oferind prin intermediul mai multor parametri posibilitatea obținerii condițiilor de trafic dorite. Au fost prezentate abordări noi în ceea ce constă conducerea traficului în timp real la nivel de intersecție semaforizată, și anume introducerea în metoda de conducere a pragurilor pentru timpii de așteptare limită pe culoarea roșie a semaforului alături de monitorizarea lungimilor cozilor de așteptare în timp real prin utilizarea rețelei de senzori wireless ca detector de trafic. De asemenea, prin intermediul infrastructurii rețelei de senzori wireless s-a realizat un sistem de informare a participanților la trafic în legătură cu condițiile de trafic.

În cea de-a treia parte au fost dezvoltate mai multe studii de caz pentru cinci intersecții aflate într-o zonă centrală a orașului Timișoara. A fost simulat comportamentul sistemului de transport în urma utilizării atât a algoritmului LTA, cât și a algoritmului de conducere statică de tip "split cycle", în diferite condiții de trafic, având ca scop final realizarea unui studiu comparativ între cele două soluții pe baza a trei indicatori de calitate propuși. Studiile comparative între cele două soluții au avut ca scop următoarele puncte esențiale în conducerea semaforizării traficului rutier într-o intersecție semaforizată: includerea pietonilor în metoda de conducere, condiții de trafic diferite (de la trafic subsaturat până la trafic suprasaturat), grad ridicat de complexitate al geometriilor intersecțiilor modelate. Prin indicatorii de trafic definiți, în special prin suma lungimilor cozilor de așteptare la un moment dat, au fost evidențiate îmbunătățirile aduse de către algoritmul de conducere propus algoritmului de conducere statică și posibilitatea creșterii fluxului traficului rutier printr-o intersecție semaforizată.

În ultima parte, problema conducerii traficului rutier urban la nivel de intersecție semaforizată a fost redusă la o problemă de optimizare rezolvabilă prin metode de programare liniară și pătratică. În acest sens, s-a realizat o generalizare a modelului matematic dezvoltat la începutul acestui capitol și au fost definite două funcții obiectiv, câte una pentru fiecare metodă de programare utilizată,  $LP$  și respectiv  $QP$ . Problemele de programare au fost rescrise în formă canonică, au fost descrise matricele aferente și în cele din urmă problemele au fost rezolvate prin apelarea a două funcții componente bibliotecii NAG[103], câte una pentru fiecare metodă de optimizare. Au fost definite 48 de studii de caz în vederea comparării celor două metode de optimizare în condiții restrictive de trafic și a algoritmului de conducere în timp real propus LTA. În cele din urmă au fost prezentate concluziile asupra avantajelor și dezavantajelor metodelor de optimizare propuse.

În opinia autorului principalele contribuții aferente capitolului 4 sunt următoarele:

- modelarea sistemului de conducere locală la nivel de intersecție, atât prin modelarea procesului de schimbare a semafoarelor, cât și prin abordări în modelarea matematică a traficului rutier urban prin monitorizarea cozilor de așteptare,
- realizarea unui studiu critic asupra unui model matematic dezvoltat de către deSchutter [32],
- extinderea modelului deSchutter prin adăugarea monitorizării pietonilor și generalizarea structurii intersecției modelate,
- punerea problemei de reglare în sistemul de conducere a traficului rutier urban la nivel de intersecție semaforizată,
- definirea ieșirilor de apreciere și a indicatorilor de calitate,
- proiectarea simulatorului de trafic de tip macroscopic în vederea simulării comportamentului traficului rutier la nivel de intersecție, indiferent de structura intersecției și de condițiile de trafic,
- extinderea posibilităților de simulare a condițiilor de trafic pe baza datelor recepționate de la o rețea de senzori wireless,
- proiectarea algoritmului de conducere locală LTA,
- generalizarea soluției de conducere în timp real prin utilizarea în algoritmul de conducere propus a unor variabile suplimentare cum ar fi: timpii și a pragurile limită de așteptare la semafor și măsurătorile în timp real asupra lungimilor cozilor de așteptare,
- proiectarea unui sistem de informare în timp real a participanților la trafic despre condițiile de trafic prin intermediul infrastructurii rețelei de senzori wireless,
- generalizarea soluției de conducere în timp real prin considerarea unei geometrii oricât de complexe a intersecției, indiferent de numărul străzilor care intră și ies din intersecție și de direcțiile de mers ale acestora,
- conducerea traficului în intersecție pe baza informațiilor în timp real recepționate de la rețeaua de senzori wireless legate de lungimile cozilor de așteptare atât ale autovehiculelor, cât și ale pietonilor,
- implementarea la nivel de agent a algoritmului de conducere propus,
- realizarea mai multor studii de caz prin compararea rezultatelor obținute în diferite condiții de trafic, prin simularea comportamentului sistemului de transport în urma utilizării atât a algoritmului de conducere LTA, cât și a algoritmului de conducere statică de tip "split cycle",
- interpretarea rezultatelor obținute evidențiind avantajele și dezavantajele algoritmilor propuși,
- dezvoltarea de studii comparative pe baza a cinci cazuri reale de conducere a traficului rutier urban în orașul Timișoara,
- analiza rezultatelor obținute prin simularea comportamentului sistemului de transport în urma utilizării atât a algoritmului de conducere LTA, cât și a algoritmului de conducere curent utilizat în fiecare dintre cele cinci intersecții aflate într-o zonă centrală a orașului Timișoara,

- reducerea problemei conducerii traficului rutier urban la nivel de intersecție la o problemă optimizare rezolvabilă prin metode de programare liniară și pătratică,
- generalizarea modelului matematic dezvoltat la începutul acestui capitol și definirea a două funcții obiectiv, câte una pentru fiecare metodă de programare utilizată,  $LP$  și respectiv  $QP$ ,
- definirea problemei de programare liniară în formă canonică și prezentarea matricelor aferente,
- definirea problemei de programare pătratică în formă canonică și prezentarea matricelor aferente,
- rezolvarea problemei de optimizare utilizând două funcții componente librăriei NAG[103], câte una pentru fiecare metodă de optimizare,
- efectuarea unui studiu comparativ între metodele de optimizare și algoritmul de conducere în timp real LTA, pe baza a 48 de studii de caz.

## 5. COORDONAREA LA NIVEL DE ZONĂ

### 5.1. Introducere

Conducerea locală în timp real a traficului rutier la nivel de intersecție semaforizată este limitată decizional de condițiile de trafic curente din imediata apropiere a intersecției respective. Există totuși situații în care fluidizarea traficului într-o anumită zonă urbană necesită decizii globale la nivel de zonă și nu numai locale la nivel de intersecție. În acest sens, dezvoltarea de soluții de coordonare a semafoarelor dintr-o anumită zonă a devenit necesară în vederea creșterii parametrilor de fluidizare a traficului.

Principalul avantaj al coordonării zonale asupra conducerii locale la nivel de intersecție este posibilitatea de a sincroniza fazele de semafor din intersecțiile învecinate. În felul acesta un pluton de autovehicule ar putea străbate o întregă arteră/tronson dintr-o anumită zonă urbană fără a întâmpina culoarea roșie a semaforului și implicit fără a opri pe tot parcursul traseului. Pornind de la modul de sincronizare a semafoarelor dintr-o anumită zonă, metodele de coordonare se împart în trei categorii după cum urmează [77]:

- *offline* - pe baza înregistrărilor precedente de trafic se generează planuri de sincronizare a intersecțiilor de pe o anumită arteră,
- *semi online* - coordonarea semafoarelor se face în timp real prin stabilirea fazelor de semafor și a decalajului între două intersecții vecine, având ca valoare presetată lungimea ciclului de semafor pentru fiecare intersecție,
- *online* - coordonarea se realizează în întregime în timp real fără valori presetate.

Toate cele trei tipuri de abordări de coordonare a semafoarelor au avantajele și dezavantajele lor. Metodele *offline* au marele avantaj de a necesita costuri scăzute de implementare datorită faptului că deciziile de sincronizare nu se iau în timp real, ci pe baza înregistrărilor precedente de trafic. La nivel de intersecție este necesar doar un microcontroler cu performanțe scăzute pentru a schimba culorile semafoarelor pe baza planurilor de sincronizare prestabilite. Principalul dezavantaj este acela că aceste metode sunt utile doar pentru anumite condiții normale de trafic, fără a ține seama de caracterul stohastic al traficului rutier urban, devenind astfel inutile pentru coordonarea semafoarelor în condiții de trafic diferite de cele estimate pe baza înregistrărilor anterioare. Metodele *semi online* vin ca o îmbunătățire a metodelor *offline* crescând generalitatea sistemului de sincronizare a semafoarelor pe anumite artere prin luarea de decizii în timp real legate de împărțirea fazelor de semafor și a decalajului între intersecții. Dezavantajele acestei metode sunt creșterea costurilor de implementare prin necesitatea utilizării unor metode de detecție de trafic în timp real și constrângerea în ceea ce privește durata prestabilă a unui ciclu de semafor pentru fiecare intersecție. Metodele *online* sunt adecvate condițiilor de trafic schimbătoare, oferind cea mai bună soluție de coordonare zonală prin luarea de decizii în timp real

în funcție de condițiile exacte ale traficului rutier. Principala problemă, încă în curs de rezolvare, a acestor metode este creșterea mare a costurilor de implementare odată cu numărul de intersecții monitorizate. Pentru a oferi soluții viabile, sistemul senzorial de detecție trebuie să fie de înaltă calitate, sistemele decizionale să dețină putere de calcul și memorie suficientă, iar sistemul de comunicație să fie bine pus la punct. Toate acestea duc la o creștere semnificativă a costurilor de implementare, în unele cazuri diminuând foarte mult rentabilitatea sistemului, singura soluție de viitor fiind dezvoltarea tehnologiei și reducerea costurilor echipamentelor necesare.

## 5.2. Soluție de coordonare la nivel de zonă

După cum a fost specificat în partea de arhitectură a sistemului de conducere ierarhizat, soluția de coordonare propusă are ca scop principal atât oferirea de undă verde pentru un anumit tronson prin sincronizarea semafoarelor intersecțiilor învecinate de pe respectivul tronson, cât și tratarea blocajelor în trafic. Fluidizarea traficului prin sincronizarea semafoarelor este o metodă des întâlnită în literatura de specialitate [13; 47; 86; 88; 106; 136]. Soluția propusă are două mari avantaje: oferă sincronizarea în timp real în funcție de condițiile de trafic și poate fi integrată cu soluția de conducere locală la nivel de intersecție. Cele două niveluri, local și zonal, comunică între ele, conducerea traficului realizându-se în majoritatea timpului la nivel local, doar când este nevoie și se primește mesaj de la agentul zonal atunci decizia de conducere locală se ia în funcție de necesitatea de sincronizare.

Soluția de coordonare adaugă noi condiții la soluția de conducere locală prin introducerea în bucla decizională a mesajelor de coordonare recepționate în timp real de la agentul zonal. În cele ce urmează vor fi prezentate aceste noi condiții, mesajele de coordonare și procesarea lor. În cadrul acestui capitol se ilustrează faptul că strategiile locale pot fi aplicate și la nivel de zonă. Exemplificarea este realizată pe algoritmul LTA, însă aplicarea strategiilor optime LP și QP este de asemenea posibilă fără a ridica probleme deosebite.

În Figura 5.1 este prezentată o anumită zonă rutieră urbană formată din mai multe intersecții, iar prin înlănțuirea acestora se definește un tronson pentru care se va urmări sincronizarea semafoarelor din intersecțiile componente. Se observă cele șapte intersecții dispuse de-a lungul tronsonului și direcția de deplasare a acestuia. Cele șapte intersecții formează astfel prin definiție o zonă urbană, urmând ca fiecare dintre agenții locali din aceste intersecții să interacționeze cu agentul zonal în vederea coordonării comune prin sincronizarea semafoarelor.

### Definirea matematică a tronsonului

Pornind de la definiția grafului de evenimente  $G_i(E_i, A_i)$  pentru o anumită intersecție  $i$  (4.40), prin extrapolare pentru mai multe intersecții învecinate se obține următoarea relație referitoare la mulțimea evenimentelor de trafic notată cu  $G_{zona}$ :

$$G_{zona} = G_1(E_1, A_1) \cup \dots \cup G_i(E_i, A_i) \cup \dots \cup G_{card(G_{zona})}(E_{card(G_{zona})}, A_{card(G_{zona})}), i \in \overline{1, card(G_{zona})}. \quad (5.1)$$

Pentru a putea defini riguros un anumit tronson/zonă de coordonare este necesară definirea legăturilor între oricare două intersecții vecine aparținătoare zonei respective. Pentru o modelare cât mai aproape de realitate, la mulțimea zonală a grupurilor de evenimente de trafic prezentate mai sus se vor adăuga străzile care leagă intersecțiile componente zonei. În acest sens, se va defini graful conex al zonei  $H(V, M)$ , unde  $V$  reprezintă mulțimea intersecțiilor care alcătuiesc zona, iar  $M$  este mulțimea muchiilor care leagă respectivele intersecții. Fiecare muchie/stradă conține

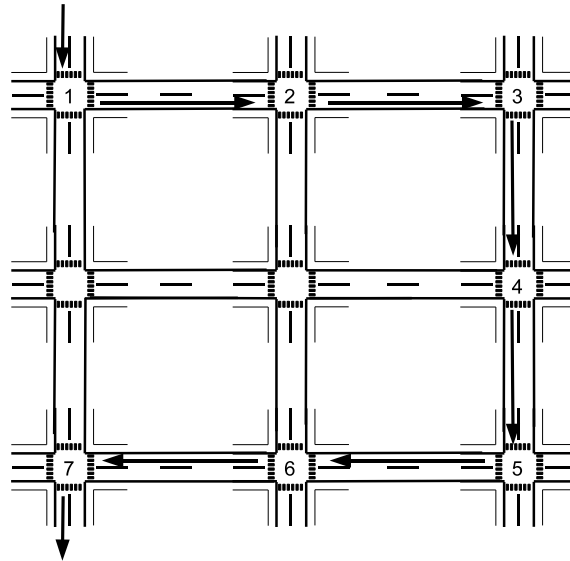


Figura 5.1: Schema de principiu relativă la sincronizarea intersecțiilor

informații legate de sensul de mers, numărul benzilor și alte informații specifice, iar prin adăugarea de direcții muchiilor grafului zonei și transformarea acestuia în graf orientat se poate defini ordinea parcurgerii intersecțiilor de pe tronsonul modelat.

Pe baza celor prezentate mai sus, modelarea unui tronson se realizează prin intermediul mulțimii  $T$  definită în:

$$T = G_{zona} \cup H(V, M). \quad (5.2)$$

Definirile prezentate mai sus referitoare la componentele unei zone urbane sunt suficiente în vederea simulării fluxului autovehiculelor și a coordonării semafoarelor din intersecțiile componente zonei respective.

### Soluția de coordonare

După cum s-a precizat în partea de arhitectură a sistemului de conducere ierarhizată, rolul agentului zonal este de coordonare a agenților locali doar în anumite situații în care este necesar. Pentru a putea lua decizii globale, automate la nivel zonă, agentul zonal va dispune de date de trafic în timp real din zona respectivă. Datele de trafic din apropierea fiecărei intersecții din zona monitorizată vor fi agregate de către agenții locali din intersecțiile respective și vor fi transmise către agentul zonal.

Pentru a se putea realiza o interacționare cât mai bună între soluția de conducere implementată la nivel de agent local și soluția de coordonare zonală, s-a ales extinderea condițiilor decizionale a soluției locale pentru a permite comunicarea între cele două tipuri de agenți. Dintre cele trei tipuri de metode de coordonare prezentate mai sus, s-a ales implementarea unei metode de coordonare *online* având următoarele caracteristici:

- coordonarea se realizează în scopul sincronizării semafoarelor aflate de-a lungul unui anumit tronson în vederea obținerii de undă verde pentru un pluton de autovehicule,

- deplasamentul între două intersecții vecine se estimează pe baza vitezei medii de deplasare și a lungimii străzii respective,
- timpii fazelor de semafor sincronizate sunt setați online în funcție de lungimile cozilor de așteptare curente din fiecare intersecție - dacă într-o anumită intersecție din cadrul zonei de coordonare, lungimea cozii de așteptare înaintea sosirii plutonului este mică, atunci timpul de verde pentru faza sincronizată va fi mai mic decât timpul de verde în situațiile în care coada de așteptare este mare,
- coordonarea se realizează doar între anumite intervale de timp,
- soluția de coordonare adaugă constrângeri soluției de conducere locală,
- considerând două intersecții succesive din zona de coordonare, prima dintre acestea care va servi plutonul de autovehicule prin alegerea fazei de semafor sincronizate va transmite mesaj de atenționare către cea de-a doua intersecție imediat ce faza de semafor sincronizată a fost aleasă,
- când agentul local dintr-o anumită intersecție primește semnal de sincronizare de la agentul local din intersecția vecină dinaintea sa, acesta începe să ia decizii de alegere a fazei de semafor sincronizate în funcție de valoarea deplasamentului dintre cele două intersecții. În tot acest răstimp toate celelalte evenimente de trafic din intersecție sunt dispecerizate după soluția de conducere locală în funcție de condițiile de trafic curente.

Deplasamentul între două intersecții învecinate sincronizate este definit după cum urmează:

$$t_{i \rightarrow i+1} = \frac{d(i, i+1) - l_{i+1}}{V_{med}(d(i, i+1) - l_{i+1})}, \quad (5.3)$$

în care conform Figurii 5.2):

- $d(i, i+1)[m]$  - lungimea în metri a străzii care leagă intersecțiile  $i$  și  $i+1$ ,
- $l_{i+1}[m]$  - lungimea cozii de așteptare pentru faza sincronizată a intersecției  $i+1$  înaintea alegerii fazei sincronizate în intersecția  $i$ ,
- $V_{med}(d(i, i+1) - l_{i+1})[m/s]$  - viteza medie a plutonului de autovehicule care trece prin intersecția  $i$  până se face joncțiunea cu ultimul autovehicul din coada de așteptare la intersecția  $i+1$ .

Momentul de timp  $t_{Start}$  la care se alege faza de semafor sincronizată în intersecția  $i+1$  în funcție de faza sincronizată din intersecția precedentă, de deplasament și de lungimea cozii de așteptare curente este calculat utilizând următoarea ecuație recurentă:

$$t_{Start}(i+1) = t_{Start}(i) + t_{i \rightarrow i+1} - t(l_{i+1}), \quad (5.4)$$

iar momentul de timp  $t_{Stop}$  la care se termină faza de semafor sincronizată depinde de lungimea cozilor de așteptare, lungimea plutonului sincronizat și timpii maximi de verde definiți pentru intersecția curentă:

$$t_{Stop}(i+1) = t_{Start}(i+1) + t(l_{i+1}) + \frac{pq(i)}{V_{med}(d(i, i+1))}, \quad (5.5)$$

unde  $pq(i)$  reprezintă lungimea în metri a plutonului de autovehicule care au trecut prin intersecția  $i$  pe faza de semafor sincronizată. Condiția necesară și suficientă pentru realizarea sincronizării este ca perioada de timp afectată fazei de semafor sincronizate



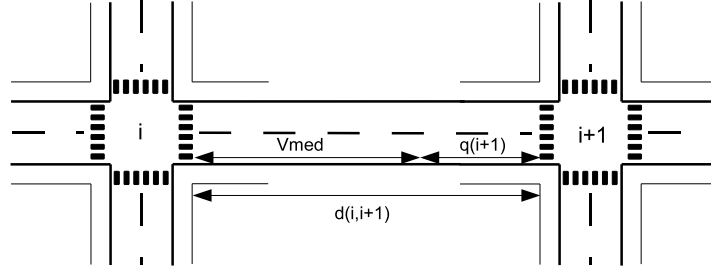


Figura 5.2: Schemă de principiu reprezentând deplasamentul între două intersecții sincronizate

să nu depășească un anumit prag limită  $t_{max}$  apriori stabilit pentru fiecare intersecție. Acest fapt este modelat sub forma inecuației:

$$t(l_{i+1}) + \frac{pq(i)}{V_{med}(d(i, i+1))} \leq t_{max}. \quad (5.6)$$

În cazuri speciale, aceste praguri limită pot fi ignorate în vederea fluidizării rapide a unui anumit tronson fără a ține seama de celelalte evenimente de trafic care intersectează platonul sincronizat.

### Definirea mesajelor - interacțiunea cu nivelul inferior și superior

În acest subcapitol vor defini tipurile de mesaje între agenții implicați în strategia de conducere ierarhizată, precizând pentru fiecare în parte rolul și utilitatea. În funcție de limbajul de implementare a metodelor de conducere și de protocoalele de comunicare alese, structura fizică a mesajelor poate diferi de la caz la caz. În acest sens, în cele ce urmează, mesajele transmise între agenți vor fi descrise formal pentru a nu depinde de factorii mai sus amintiți.

A) Mesaje între agentul local  $i$  și agentul zonal ( $LTA_i \rightarrow ZTA$ ):

- $msg_1 : \{l_i(kt) \& \bar{\lambda}_i^{(kt)} \& \bar{\mu}_i^{(kt)}\}$ ,  $k$  este intervalul de timp presetat la care se realizează transmisia,  $i$  este eveniment de trafic (autovehicule sau pietoni) din intersecția respectivă. Scopul este de a transmite la anumite intervale de timp  $k$  informații legate de lungimile cozilor de așteptare, ratele de sosire și plecare pentru fiecare eveniment de trafic din intersecție în vederea dezvoltării bazei de cunoștințe și a obținerii de date statistice;
- $msg_2 : \{(S_k, t_{S_k}) \& (S_{k+1}, t_{S_{k+1}}) \& \dots\}$ . Scopul este de a transmite la intervale apriori setate în secunde, deciziile locale legate de fazele de semafor alese și numărul de secunde aferent în vederea realizării unui istoric al schimbărilor culorilor semafoarelor în intersecție;
- $msg_3 : \{t_{start}(S_{sincr}) \& t_{S_{sincr}} \& pq(S_{sincr})\}$ ,  $S_{sincr}$  este starea/faza de semafor din intersecția  $i$  participantă la procesul de sincronizare zonală a semafoarelor, iar  $pq(S_{sincr})$  este lungimea platonului de autovehicule care trece prin intersecția  $i$ . Scopul acestui mesaj este de a semnaliza agentului zonal că în intersecția  $i$  a fost aleasă faza de semafor sincronizată, acesta urmând să informeze la rândul său agentul local din intersecția vecină  $i+1$  de apropierea platonului de autovehicule;

- $msg_4 : \{s_{i,j} \& d(i,j)\}$ ,  $s_{i,j}$  este strada dintre intersecțiile  $i$  și  $j$  pe care s-a detectat blocajul, iar  $d(i,j)$  este distanța în metri între intersecția  $i$  și locul în care s-a detectat blocajul. Scopul este de a informa agentul zonal de blocajul survenit pe o anumită stradă în vederea luării deciziilor de redirectionare sau de informare a participanților la trafic.

B) Mesaje între agentul zonal și agentul local  $i$  ( $ZTA \rightarrow LTA_i$ ):

- $msg_5 : \{t_{start}(S_{sincr}) \& t_{s_{sincr}} \& pq(S_{sincr})\}$ ,  $S_{sincr}$  este starea/faza de semafor din intersecția  $i - 1$  participantă la procesul de sincronizare zonală a semafoarelor,  $pq(S_{sincr})$  este lungimea plutonului de autovehicule care trece prin intersecția  $i - 1$ . Scopul acestui mesaj este de a semnala agentului local din intersecția  $i$  că a fost aleasă faza de semafor sincronizată în intersecția vecină  $i - 1$  și că plutonul de autovehicule se deplasează înspre această intersecție;
- $msg_6 : \{s(i,j)\}$ ,  $s_{i,j}$  este strada dintre intersecțiile  $i$  și  $j$  pe care s-a detectat blocaj. Scopul este de a informa agentul local din intersecția  $i$  că respectiva stradă este blocată, urmând ca acesta să ia decizii de a elimina din soluția de conducere evenimentele de trafic care au ca ieșiri strada  $s_{i,j}$ .

C) Mesaje între agentul zonal și ecranele de informare din zonă :

- $msg_7 : \{s(i,j) \& l_{s(i,j)}\}$ ,  $l_{s(i,j)}$  este lungimea cozii de așteptare pe strada care leagă intersecțiile  $i$  și  $j$ . Scopul este de a informa participanții la trafic în legătură cu gradul de aglomerare pe anumite străzi din zona respectivă;
- $msg_8 : \{s(i,j)\}$ . Informează participanții la trafic că strada care leagă intersecțiile  $i$  și  $j$  este blocată temporar din diferite motive.

D) Mesaje între agentul zonal  $i$  și agentul metropolitan ( $ZTA_i \rightarrow CTA$ ):

- $msg_9 : \{msg_1 \& msg_2\}$ . Scopul este de a salva datele de trafic și deciziile locale luate la nivelul tuturor intersecțiilor monitorizate în vederea statisticilor de trafic;
- $msg_{10} : \{msg_3 \& msg_4\}$ . Scopul este de a salva deciziile zonale la nivelul tuturor zonelor monitorizate în vederea realizării statisticilor de trafic.

E) Mesaje între agentul metropolitan și agentul zonal  $i$  ( $CTA \rightarrow ZTA_i$ ):

- $msg_{11}$  : start sincronizare. Scopul este pornirea sincronizării semafoarelor din zonă  $i$ ;
- $msg_{12}$  : stop sincronizare. Scopul este oprirea sincronizării semafoarelor din zona  $i$ ;
- $msg_{13}$  : bloc  $\{s(j,k)\}$ . Comunică agentului zonal că strada din zona respectivă care leagă intersecțiile  $j$  și  $k$  este blocată temporar din diferite motive;
- $msg_{14}$  : debloc  $\{s(j,k)\}$ . Comunică agentului zonal că strada din zona respectivă care leagă intersecțiile  $j$  și  $k$  nu mai este blocată;

### 5.2.1. Sincronizarea semafoarelor

Pe baza mesajelor și a cerințelor a fost efectuată extinderea simulatorul de trafic de tip macroscopic prezentat în capitolul anterior în vederea sincronizării semafoarelor instalate în mai multe intersecții învecinate. S-a adăugat un nou modul prin care sistemul de conducere local dintr-o anumită intersecție este informat de către sistemul de coordonare zonal în legătură cu momentul la care plutonul de autovehicule îndreptându-se dinspre intersecția învecinată precedentă a primit culoarea verde a semaforului. De asemenea s-au adăugat facilități de definire a tranșonului pentru care se dorește sincronizarea semafoarelor, prin definirea șirului de intersecții prin care trece acesta. Pe baza informațiilor legate de lungimile cozilor de așteptare în timp real și estimând timpul necesar plutonului de autovehicule pentru a ajunge în respectiva intersecție s-a implementat algoritmul de coordonare propus prin sincronizarea semafoarelor.

Pentru a arăta interacțiunea dintre sistemul de coordonare zonal și cel de conducere local, au fost imaginate câteva studii de caz în care se dorește sincronizarea semafoarelor aflate pe o anumită zonă/tronșon în vederea obținerii unei verzi. Conducerea semaforizării din fiecare intersecție se realizează local cu excepția mesajelor de sincronizare recepționate de la sistemul zonal de coordonare. În cele ce urmează s-a realizat un studiu comparativ între rezultatele obținute prin simularea comportamentului sistemului de transport în urma utilizării atât a soluției locale de conducere propuse, cât și a soluției de sincronizare propusă, în diferite condiții de trafic.

În Figurile 5.3, 5.4, 5.5 și în Tabelele 5.1, 5.2, 5.3 sunt prezentate rezultatele obținute prin simularea comportamentului sistemului de transport în urma utilizării atât a soluției de coordonare prin sincronizarea semafoarelor pentru trei intersecții vecine, cât și a soluției propuse de conducere locală. Aceste figuri conțin câte trei grafice reprezentând comparația între soluția locală propusă LTA și soluția de coordonare pentru fiecare dintre ieșirile de apreciere:  $v_m$ ,  $t_m$  și  $l_c$ . Comparația între cele două soluții este realizată grafic cu ajutorul a două funcții, soluția LTA fiind desenată cu linie punctată, iar soluția de coordonare este desenată cu line continuă. În primul rând se observă din Figura 5.3 și din Tabelul 5.1 că pentru intersecția sincronizată numărul unu, nu există diferențe între cele două soluții comparate datorită faptului că această intersecție nu este influențată de sincronizare, ci doar stabilește sincronizarea intersecțiilor următoare. Urmărind Figurile 5.4, 5.5 și Tabelele 5.2, 5.3, se observă o scădere a vitezei medii de deplasare pe culoarea verde a semaforului în defavoarea soluției de sincronizare pentru ambele intersecții, numărul doi și numărul trei. Acest fapt se motivează prin creșterea timpului afectat fazelor de semafor sincronizate indiferent de celelalte evenimente de trafic. Variațiile ieșirilor de apreciere a timpilor morți  $t_m$  indică de asemenea că soluția de conducere locală este mai performantă prin minimizarea acestor ieșiri la valorarea  $t_m = 0$ . Totuși în ceea ce privește variațiile ieșirii de apreciere  $l_c$  se observă că soluția de coordonare prin sincronizarea semafoarelor aduce mari îmbunătățiri soluției de conducere locale, reducând suma lungimilor cozilor de așteptare cu până la 2000%. Motivul este că soluția de coordonare servește mult mai bine în condițiile de trafic în care există cerere mare pe tronșonul pe care se realizează sincronizarea semafoarelor și cerere mică pe restul străzilor care intră în intersecție.

Tabelul 5.1: Indicatori de calitate în condiții de densitate mare de trafic doar pentru faza de semafor sincronizată aferentă intersecției sincronizate nr. 1

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Sincronizare</b>	56460	89	1603
<b>LTA</b>	53298	0	1570

În Figura 5.6 sunt prezentate secvențele de comandă  $\delta$  pentru fiecare dintre

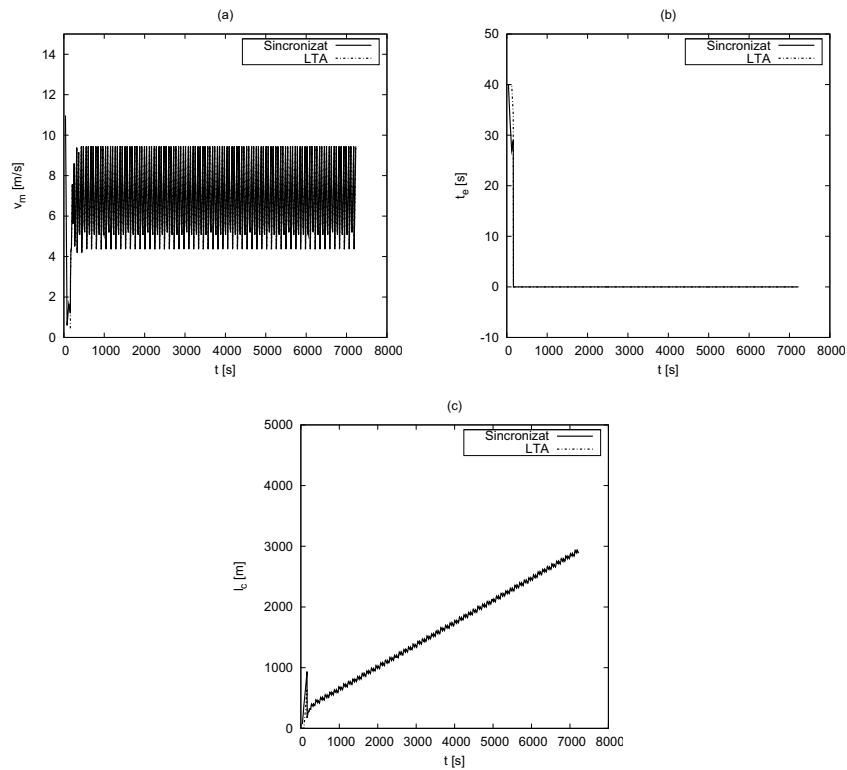


Figura 5.3: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de densitate mare de trafic doar pentru faza de semafor sincronizată aferentă intersecției sincronizate nr. 1

cele trei intersecții monitorizate. În acest mod se poate observa decalajul între momentele de timp la care se aleg fazele de semafor sincronizate între oricare două intersecții, cât și durata acestora.

Urmărind datele de trafic prezentate în Figurile 5.3, 5.4, 5.5 și Tabelele 5.1, 5.2, 5.3 putem concluda că soluția de coordonare zonală prin sincronizarea semafoarelor este utilă când densitatea traficului este crescută pe un anumit tronson, reducând semnificativ sumele lungimilor cozilor de așteptare în intersecțiile implicate în sincronizare.

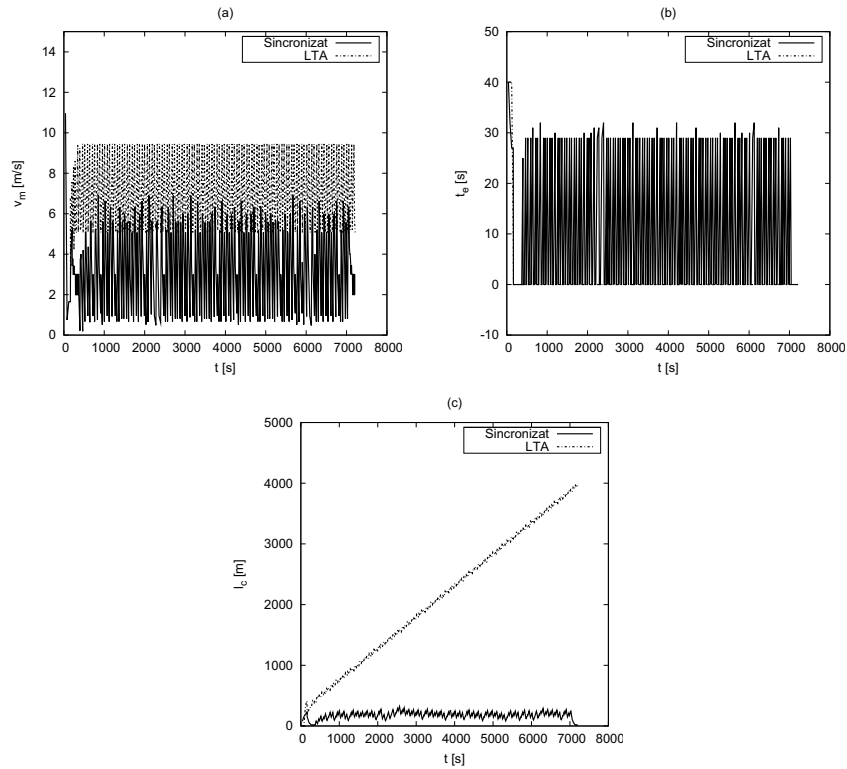


Figura 5.4: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de densitate mare de trafic doar pentru faza de semafor sincronizată aferentă intersecției sincronizate nr. 2

Tabelul 5.2: Indicatori de calitate în condiții de densitate mare de trafic doar pentru faza de semafor sincronizată aferentă intersecției sincronizate nr. 2

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Sincronizare</b>	18630	3337	188
<b>LTA</b>	52872	0	2075

Tabelul 5.3: Indicatori de calitate în condiții de densitate mare de trafic doar pentru faza de semafor sincronizată aferentă intersecției sincronizate nr. 3

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Sincronizare</b>	19746	2931	159
<b>LTA</b>	53310	0	1575

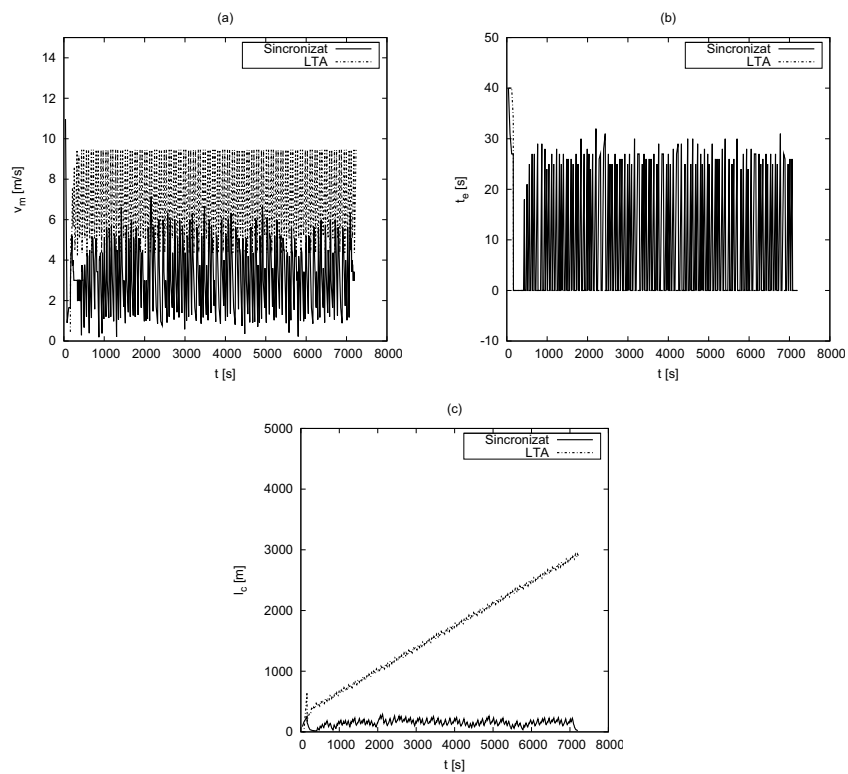


Figura 5.5: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de densitate mare de trafic doar pentru faza de semafor sincronizată aferentă intersecției sincronizate nr. 3

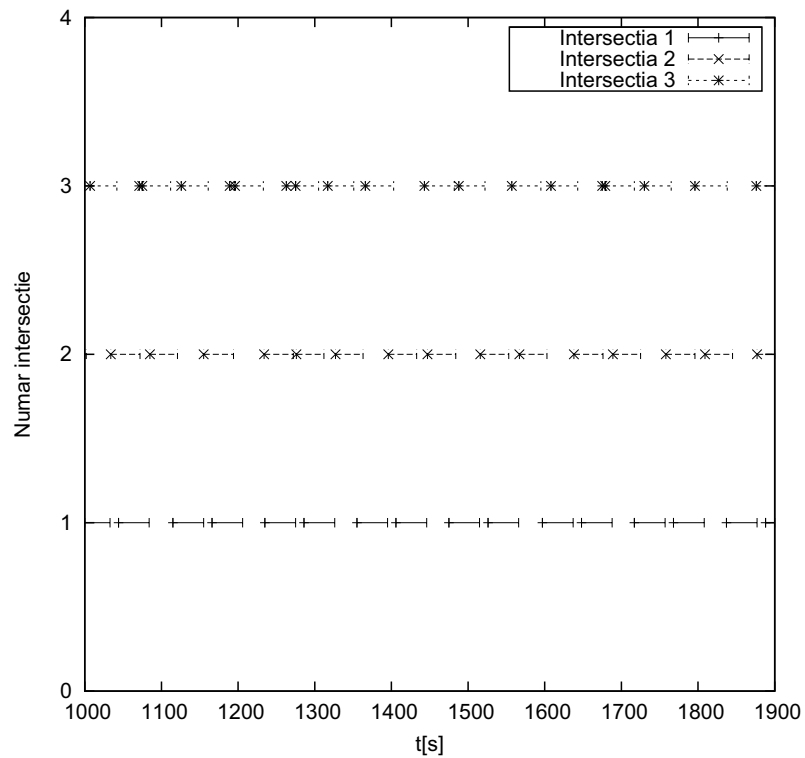


Figura 5.6: Evoluțiile în timp ale secvențelor de comandă  $\delta$  aferente fazelor de semafor sincronizate

### 5.2.2. Tratarea blocajelor

Utilizarea rețelei de senzori wireless propusă ca detector de trafic rutier urban face posibilă detecția blocajelor în trafic survenite din diferite motive cum ar fi accidente, autovehicule defecte, servicii de reparație/mentenanță a carosabilului sau orice alte motive. Deținând astfel o tehnologie de detecție în timp real a blocajelor în trafic, se vor putea lua decizii de asemenea în timp real de tratare a acestor blocaje prin ocolirea zonei respective până la remediere.

Cea mai bună soluție de tratare a acestor blocaje este ca agentul de coordonare zonal să primească informațiile necesare de la nivelul senzorial sau de la nivelul metropolitan, urmând a se lua decizii de coordonare a agenților locali din apropierea respectivului blocaj. Până la remedierea blocajului pe o anumită stradă sau într-o anumită intersecție, agentul zonal va impune agenților locali neservirea evenimentelor de trafic cu ieșire spre strada/intersecția respectivă și de asemenea va informa participanții la trafic despre acest fapt prin intermediul ecranelor de informare.

Evitarea creșterii numărului de autovehicule blocate în trafic este o problemă foarte importantă în fluidizarea traficului rutier urban, chiar dacă pentru aceasta sunt necesare soluții de schimbare a strategiilor de conducere utilizate înaintea detectării blocajului. Marele avantaj al sistemului de conducere ierarhizat propus este acela că poate lua decizii de conducere în timp real și poate elimina sau adăuga anumite evenimente de trafic în funcție de necesitățile impuse de către agentul de conducere zonal.

În continuare se va prezenta un studiu comparativ la nivel de intersecție între comportamentul soluției de conducere locală și cea de coordonare zonală în situația în care există un blocaj pe o anumită stradă care întârzie în intersecție. Prin acest studiu se urmărește cu cât ar scădea performanțele de fluidizare a soluției de conducere locale propuse în cazul detectării unui blocaj în trafic, fără a se ține seama de importanța majoră de a evita creșterea numărului de autovehicule implicate în blocaj. Evitarea acestei creșteri se realizează schimbând posibilitățile curente de traversare a intersecției prin eliminarea anumitor direcții asociate blocajelor.

În Figura 5.7 și în Tabelul 5.4 sunt prezentate rezultatele simulării pentru studiul de caz în care majoritatea grupurilor de evenimente din intersecție au densități mari de trafic. Din graficele 5.7(a) și 5.7(b) se observă o îmbunătățire semnificativă în ceea ce privește creșterea vitezei medii de deplasare pe culoarea verde a semaforului și reducerea timpilor morți de semafor în favoarea soluției de coordonare zonală cu aproximativ 50%. Aceasta se datorează faptului că soluția de conducere locală nu ține seama de blocajul de trafic și se alocă o fază de semafor inutilă până la deblocare. Din graficul 5.7(c) se observă că valorile ieșirii de apreciere  $l_c$  sunt identice pentru ambele soluții de conducere după aproximativ o treime din timpul de simulare.

În Figura 5.8 și în Tabelul 5.5 sunt prezentate rezultatele simulării pentru studiul de caz în care majoritatea grupurilor de evenimente din intersecție au densități medii de trafic. Din graficul 5.8(a) se observă că valoarea medie a ieșirii de apreciere  $v_m$  este cu aproximativ 10% mai mare în favoarea soluției de coordonare. Din graficul 5.8(b) se observă o îmbunătățire semnificativă în ceea ce privește reducerea timpilor morți de semafor în favoarea soluției de coordonare zonală cu aproximativ 50%. Din graficul 5.8(c) se observă de asemenea o îmbunătățire semnificativă în ceea ce privește reducerea sumei lungimilor cozilor de așteptare în favoarea soluției de coordonare zonală de cel puțin 25 de ori.

În Figura 5.9 și în Tabelul 5.6 sunt prezentate rezultatele simulării pentru studiul de caz în care majoritatea grupurilor de evenimente din intersecție au densități mici de trafic. Din graficul 5.9(a) se observă că valorile ieșirii de apreciere  $v_m$  sunt identice pentru ambele soluții de conducere. Din graficul 5.9(b) se observă o îmbunătățire semnificativă în ceea ce privește reducerea timpilor morți de semafor în favoarea soluției de coordonare zonală cu aproximativ 50%. Din graficul 5.9(c) se observă de asemenea o îmbunătățire semnificativă în ceea ce privește reducerea



sumeii lungimilor cozilor de așteptare în favoarea soluției de coordonare zonală de cel puțin 350 de ori.

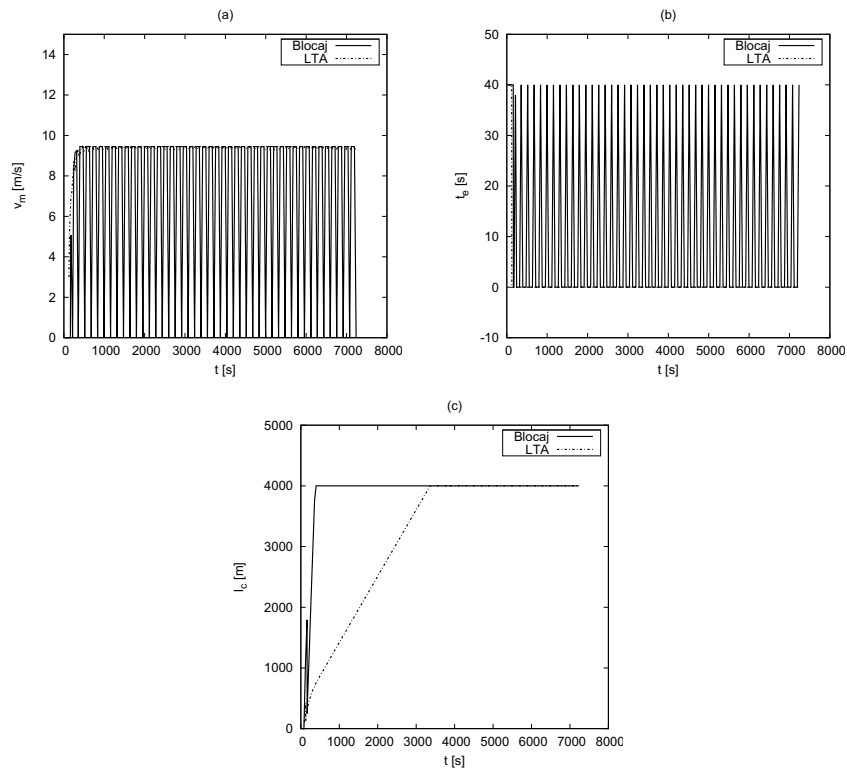


Figura 5.7: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$ (c), în condiții de densitate mare de trafic și o stradă blocată

Tabelul 5.4: Indicatori de calitate în condiții de densitate mare de trafic și o stradă blocată

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Blocaj</b>	46872	1680	3688
<b>LTA</b>	62502	0	3111

Urmărind datele de trafic prezentate în Figurile 5.7, 5.8, 5.9 și în Tabelele 5.4, 5.5, 5.6 putem concluda că soluția de coordonare zonală este utilă în cazul blocajelor de trafic indiferent de condițiile de trafic, reducând semnificativ sumele lungimilor cozilor de așteptare la nivel de intersecție.

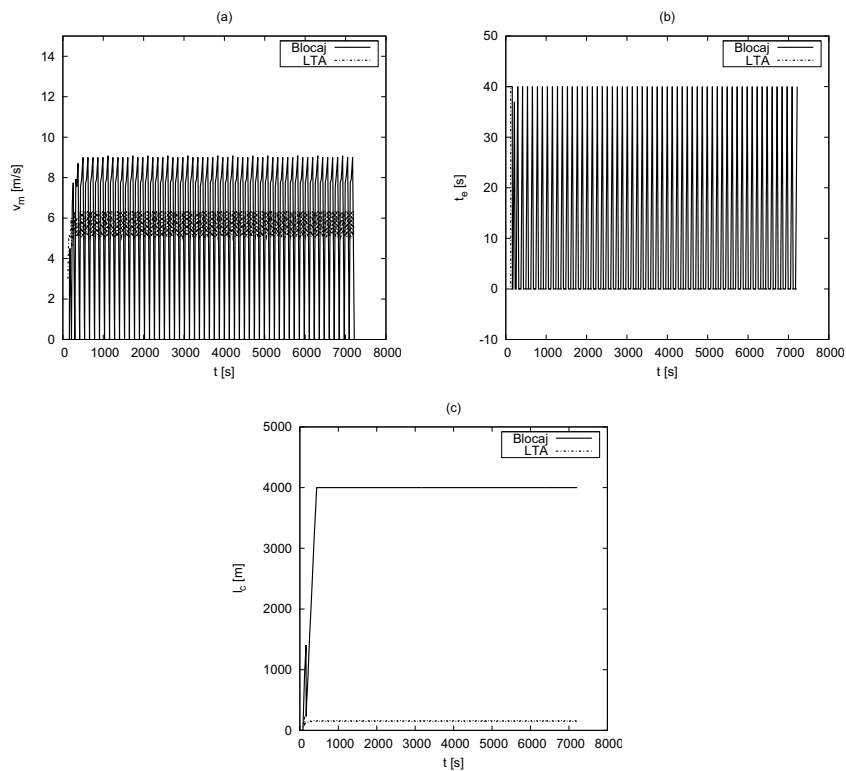


Figura 5.8: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$  (c), în condiții de densitate medie de trafic și o stradă blocată

Tabelul 5.5: Indicatori de calitate în condiții de densitate medie de trafic și o stradă blocată

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Blocaj</b>	37308	2160	3682
<b>LTA</b>	37074	0	140

Tabelul 5.6: Indicatori de calitate în condiții de densitate mică de trafic și o stradă blocată

	$J_1$	$J_2$	$J_3$
<b>Blocaj</b>	17322	3960	3696
<b>LTA</b>	15846	0	10

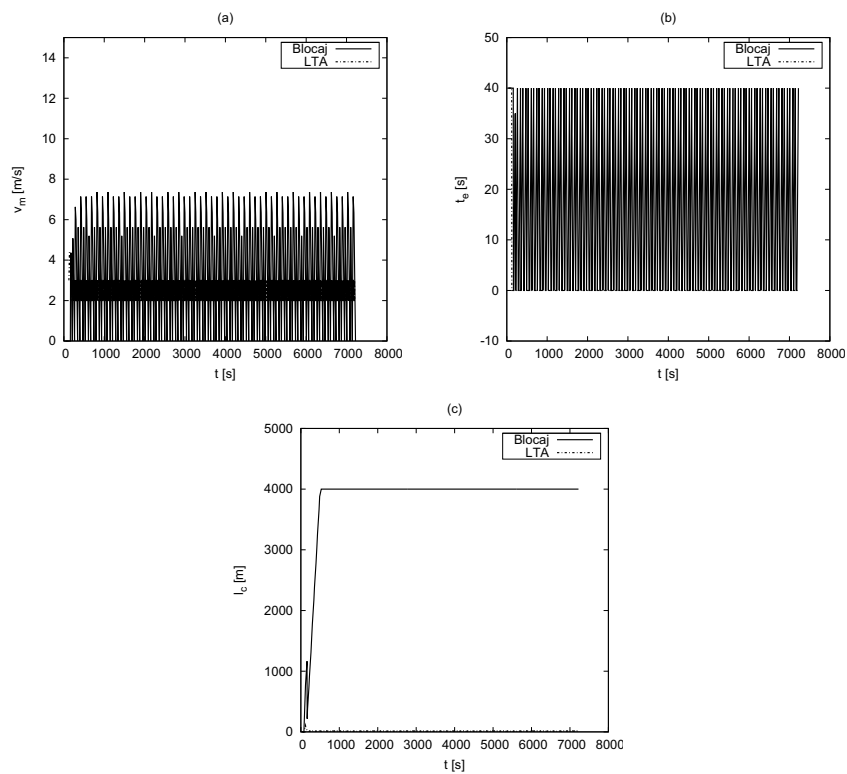


Figura 5.9: Variațiile în timp ale ieșirilor  $v_m$  (a),  $t_m$  (b),  $l_c$ (c), în condiții de densitate mică de trafic și o stradă blocată

### 5.3. Concluzii

În cadrul acestui capitol au fost prezentate rezultatele obținute în urma aplicării soluției de coordonare zonală a semafoarelor și interacțiunea acestora cu nivelul inferior și nivelul superior. Utilizând simulatorul de trafic implementat, s-a realizat o comparație în ceea ce privește fluidizarea traficului rutier, între situația în care este utilizată soluția de coordonare prin sincronizarea semafoarelor și situația în care conducerea semafoarelor se realizează la nivel local fără coordonare zonală.

S-a realizat o descriere a soluției de coordonare propusă prin sincronizarea semafoarelor intersecțiilor învecinate. De asemenea au fost prezentate alte aplicabilități practice ale soluției de coordonare zonală cum ar fi blocarea accesului atât la cerere pe anumite tronsoane pentru lucrări de mentenanță, cât și automatizat pe baza datelor recepționate de la rețeaua de senzori wireless. S-a realizat detecția blocajelor de trafic și informarea participanților la trafic asupra condițiilor de trafic (aglomerări, blocaje) prin intermediul infrastructurii rețelei de senzori wireless.

Au fost prezentate metodele de interacționare dintre nivelurile arhitecturii de conducere propuse în capitolele anterioare, evidențiind utilitatea și aplicabilitatea coordonării zonale prin sincronizarea semafoarelor pentru anumite condiții de trafic care necesită undă verde pe anumite tronsoane. S-a dovedit prin rezultatele obținute în urma simulărilor că aceste sincronizări sunt necesare în cazul densităților mari de trafic pe anumite străzi/tronsoane, fiind principala soluție de decongestionare în astfel de situații.

Concluzionând, în acest capitol s-a demonstrat importanța integrării soluției de coordonare zonală cu soluția de conducere locală la nivel de agent și îmbunătățirea performanțelor sistemului integrat de conducere.

În opinia autorului principalele contribuții aferente capitolului 5 sunt următoarele:

- exinderea soluției de conducere locală LTA,
- coordonarea traficului într-o zonă urbană prin sincronizarea în timp real a semafoarelor din intersecțiile care alcătuiesc zona respectivă,
- tratarea la nivel de agent zonal în timp real a blocajelor de trafic apărute în apropierea intersecțiilor aflate în aria de acoperire a agentului,
- luarea deciziilor de coordonare în timp real pe baza condițiilor curente de trafic,
- prezentarea interacțiunii dintre nivelurile sistemului de conducere ierarhizat prin descrierea procesului de comunicare prin intermediul mesajelor,
- extinderea simulatorului de trafic macroscopic prezentat anterior în vederea modelării și simulării comportamentului traficului rutier la nivel de zonă urbană,
- realizarea unui studiu comparativ între soluția de conducere locală propusă și soluția de coordonare prin sincronizarea semafoarelor,
- realizarea unui studiu comparativ între soluția de conducere locală propusă și soluția de coordonare în situații de blocaj de trafic,
- interpretarea rezultatelor obținute în urma simulărilor.

## **6. CONCLUZII**

### **6.1. Contribuții personale**

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

#### **Contribuțiile aferente capitolului 2:**

- Realizarea unei sinteze asupra tehnologiilor și metodelor curent utilizate în conducerea traficului rutier urban;
- Definirea și realizarea unei sinteze asupra Sistemelor Inteligente de Transport rutier;
- Realizarea unui studiu critic asupra conceptelor de modelare a traficului rutier urban;
- Clasificarea metodelor de modelare punctând utilitatea fiecăreia dintre ele relativ la tipurile de trafic urmărite;
- Elaborarea unei sinteze asupra evoluției modelării traficului rutier;
- Descrierea principalelor caracteristici considerate de către autor necesare a fi îndeplinite în vederea modelării traficului rutier urban;
- Realizarea unui studiu critic asupra metodelor de modelare studiate;
- Analiza critică asupra metodelor de conducere utilizate până în prezent în conducerea traficului rutier urban și prezentarea principalelor avantaje și dezavantaje;
- Analiza metodelor și produselor software utilizate în simularea comportamentului traficului rutier urban;
- Prezentarea noțiunilor teoretice sprijinite pe 33 de relații utile în realizarea conducerii traficului rutier urban.

#### **Contribuțiile aferente capitolului 3:**

- Proiectarea și elaborarea unei arhitecturi de conducere ierarhizate pe trei niveluri aplicabilă în conducerea distribuită a traficului rutier urban. Prezentarea celor trei niveluri/agenți de conducere: local, zonal și metropolitan;

- Utilizarea unei rețele de senzori wireless atât ca detector de trafic, cât și ca sistem de informare a participanților la trafic. Descrierea protocolului de comunicare ales, a componentelor rețelei de senzori și a senzorilor de tip magnetometru utilizați. Compararea soluției de detecție propusă pe bază de magnetometre cu alte soluții existente;
- Realizarea unei paralele între agentul de conducere locală LTA și agentul de circulație din intersecție;
- Definirea rețelelor de senzori wireless, împreună cu istoricul și aplicabilitatea acestora, pe baza studiului bibliografic;
- Descrierea componentelor rețelei de senzori wireless propusă ca detector de trafic rutier urban;
- Extinderea abordărilor curente prin adăugarea de ecrane de informare de-a lungul carosabilului și integrarea acestora cu rețeaua de senzori wireless;
- Extinderea sistemelor de semaforizare utilizate în prezent prin conectarea la sistemul de conducere a sistemului de informare suplimentară în timp real a participanților la trafic asupra condițiilor de trafic și asupra timpilor de așteptare;
- Realizarea unui studiu asupra posibilităților de securizare a rețelei de senzori wireless prin descrierea vulnerabilităților și a metodelor de protecție.

#### Contribuțiile aferente capitolului 4:

- Modelarea sistemului de conducere locală la nivel de intersecție, atât prin modelarea procesului de schimbare a semafoarelor, cât și prin abordări în modelarea matematică a traficului rutier urban monitorizând cozile de așteptare;
- Realizarea unui studiu critic asupra modelului matematic dezvoltat de către deSchutter [32];
- Extinderea modelului deSchutter prin adăugarea monitorizării pietonilor și generalizarea structurii intersecției modelate;
- Punerea problemei de reglare în sistemul de conducere a traficului rutier urban la nivel de intersecție;
- Definirea ieșirilor de apreciere și a indicatorilor de calitate;
- Proiectarea simulatorului de trafic de tip macroscopic în vederea simulării comportamentului traficului rutier la nivel de intersecție semaforizată, indiferent de structura intersecției și de condițiile de trafic;
- Extinderea posibilităților de simulare a condițiilor de trafic pe baza datelor recepționate de la o rețea de senzori wireless;
- Proiectarea algoritmului LTA de conducere locală în timp real a traficului rutier urban la nivel de intersecție semaforizată;
- Proiectarea unui sistem de informare în timp real a participanților la trafic despre condițiile de trafic prin intermediul infrastructurii rețelei de senzori wireless;
- Generalizarea soluției de conducere în timp real prin considerarea unei geometrii oricât de complexe a intersecției semaforizate, indiferent de numărul străzilor care intră și ies din intersecție și de direcțiile de mers ale acestora;

- Conducerea traficului în intersecție pe baza informațiilor în timp real recepționate de la rețeaua de senzori wireless legate de lungimile cozilor de așteptare atât ale autovehiculelor, cât și ale pietonilor;
- Implementarea la nivel de agent local a algoritmului de conducere propus;
- Realizarea mai multor studii de caz prin compararea rezultatelor obținute în diferite condiții de trafic; prin simularea comportamentului sistemului de transport în urma utilizării atât a algoritmului de conducere în timp real LTA, cât și a algoritmului de conducere statică de tip "split cycle";
- Interpretarea rezultatelor obținute evidențiind avantajele și dezavantajele algoritmului LTA;
- Dezvoltarea de studii comparative pe baza a cinci cazuri reale de conducere a traficului rutier urban în orașul Timișoara;
- Analiza rezultatelor obținute prin simularea comportamentului sistemului de transport în urma utilizării atât a soluției de conducere propuse, cât și a soluției de conducere curent utilizată în fiecare dintre cele cinci intersecții aflate într-o zonă centrală a orașului Timișoara;
- Reducerea problemei conducerii traficului rutier urban la nivel de intersecție la o problemă de optimizare prin metode de programare liniară și pătratică;
- Generalizarea modelului matematic dezvoltat la începutul acestui capitol și definirea a două funcții obiectiv, câte una pentru fiecare metodă de programare utilizată,  $LP$  și respectiv  $QP$ ;
- Definirea problemei de programare liniară în formă canonică și prezentarea matricelor aferente;
- Definirea problemei de programare pătratică în formă canonică și prezentarea matricelor aferente;
- Rezolvarea problemei de optimizare utilizând două funcții componente librării NAG[103], câte una pentru fiecare metodă de optimizare;
- Realizarea unui studiu comparativ între metodele de optimizare și soluția de conducere în timp real LTA, pe baza a 48 de studii de caz.

#### Contribuțiile aferente capitolului 5:

- Exinderea soluției de conducere locală LTA;
- Coordonarea traficului într-o zonă urbană prin sincronizarea în timp real a semafoarelor din intersecțiile care alcătuiesc zona respectivă;
- Tratarea în timp real la nivel de agent zonal a blocajelor de trafic apărute în apropierea intersecțiilor aflate în aria de acoperire a agentului;
- Luarea deciziilor de coordonare în timp real a traficului rutier pe baza condițiilor curente de trafic;
- Prezentarea interacțiunii dintre nivelurile sistemului de conducere ierarhizată descriind procesul de comunicare prin intermediul mesajelor;
- Extinderea simulatorului de trafic macroscopic prezentat anterior în vederea modelării și simulării comportamentului traficului rutier la nivel de zonă urbană;

- Realizarea unui studiu comparativ între soluția de conducere locală LTA și soluția de coordonare prin sincronizarea semafoarelor;
- Realizarea unui studiu comparativ între soluția de conducere locală LTA și soluția de coordonare în situații de blocaj de trafic;
- Interpretarea rezultatelor obținute în urma simulărilor.

O bună parte din contribuții a fost validată prin prezentarea și publicarea a 9 lucrări la care autorul tezei este coautor, dintre care la 4 este prim autor. Acestea sunt structurate după cum urmează:

- 5 lucrări publicate sau în curs de publicare în volumele unor conferințe indexate ISI Proceedings,
- 2 lucrări publicate într-o revistă de categoria B recunoscută de CNCSIS,
- 2 lucrări publicate în volumele unor conferințe internaționale neindexate.

## 6.2. Direcții de cercetare generate de studiile efectuate

Principalele direcții de cercetare avute în vedere de autorul tezei sunt:

- Efectuarea unor studii asupra extinderii agentului local la nivel de intersecție prin îmbunătățirea soluției de conducere locale LTA în anumite condiții particulare de trafic,
- Îmbunătățirea structurii rețelei de senzori wireless și eventual a protocoalelor de comunicare, din punct de vedere al tehnologiei și a topologiilor de rețea,
- Îmbunătățirea performanțelor asigurate de soluția de coordonare zonală,
- Propunerea unor metode de agregare a datelor de trafic la nivel de intersecție,
- Implementarea hardware a soluției de conducere a unei intersecții semaforizate utilizând soluția de conducere locală propusă și softwareul de simulare.



## Bibliografie

- [1] R. Arnott, T. Rave, and R. Schob, *Alleviating Urban Traffic Congestion*. MIT Press, 2005. 7
- [2] O. Bantias, D. Curiac, and A. Doboli, "Security protocols for distributed wireless sensor networks," in *The 7th International Conference on Technical Informatics*, 2006, pp. 297--300. 70
- [3] O. Bantias, D. Curiac, and R. E. Precup, "Sensor networks architecture for vehicles and pedestrians traffic control," in *Scientific Bulletin of Politehnica University of Timisoara*, vol. Transactions on Automatic Control and Computer Science, Nr. 51, 2006, pp. 11--16. 42, 81, 94
- [4] O. Bantias, R. E. Precup, and D. Curiac, "Problem setting and modeling in vehicles and pedestrians traffic control using sensor networks," *4th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics*, vol. Transactions on Automatic Control and Computer Science, Nr. 51, pp. 83--88, 2007. 78, 81
- [5] -----, "Multiagent architecture applied in decentralized real-time urban road traffic control," *5th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics*, vol. To be published, 2009. 94
- [6] R. Barlovic, J. Esser, K. Froese, W. Knospe, L. Neubert, M. Schreckenberg, and J. Wahle, "Online traffic simulation with cellular automata," 1999, pp. 117--134. 24
- [7] L. D. Baskar, B. De Schutter, and H. Hellendoorn, "Decentralized traffic control and management with intelligent vehicles," in *Proceedings of the 9th TRAIL Congress 2006 - TRAIL in Motion*, 2006, pp. 29--37. 23
- [8] -----, "Hierarchical traffic control and management with intelligent vehicles," in *Proceedings of the 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2007, pp. 834--839. 6, 23
- [9] T. Bellemans, B. De Schutter, and B. De Moor, "Models for traffic control," in *Journal A*, vol. 43, 2002, pp. 13--22. 19, 21, 22
- [10] S. Benjaafar, K. Dooley, and W. Setyawan, "Cellular automata for traffic flow modeling," in *Department of Mechanical Engineering, University of Minnesota Minneapolis, MN 55455*, 1997, pp. 1--37. 24
- [11] Berkeley WEBS. [Online]. Disponibil la: <http://local.cs.berkeley.edu/webs/> 39
- [12] F. Boillot, J. M. Blossville, J. B. Lesort, V. Motyka, M. Papageorgiou, and S. Sellam, "Optimal signal control of urban traffic networks," in *Proceedings of 6th IEE International Conference, Road Traffic Monitoring and Control*, 1992, pp. 75--79. 32
- [13] F. Boillot, S. Midenet, and J. Pierrelee, "The real-time urban traffic control system cronos: Algorithm and experiments," in *Elsevier, Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2006, pp. 18--38. 32, 182

- [14] D. Boyce, D.-H. Lee, and B. Ran, "Analytical models of the dynamic traffic assignment problem," in *Networks and Spatial Economics*, vol. 1, 2001, pp. 377--390. 78
- [15] A. Campbell, S. Eisenman, N. Lane, E. Miluzzo, and R. Peterson, "People-centric urban sensing," in *Proceedings of 2nd Annual International Workshop on Wireless Internet*, 2006. 48
- [16] S. A. Camtepe and B. Yener, "Key distribution mechanisms for wireless sensor networks: a survey," in *Rensselaer Polytechnic Institute, Computer Science Department, Technical Report TR-05-07*, 2005. 70
- [17] CARE - European Road Accident Database. [Online]. Disponibil la: [ec.europa.eu/transport/care](http://ec.europa.eu/transport/care) 7
- [18] M. Cartwright, "Cloudbusting," in *ITS International*, April 2008, pp. 35--36. 7
- [19] A. Chakrabarty, A. Sabharwal, and B. Aazhang, "Using predictable observer mobility for power efficient design of a sensor network," in *Proceedings of Second International Workshop on Information processing in Sensor Networks*, 2003. 48
- [20] B. Chopard, A. Dupuis, and P. Luthi, "A cellular automata model for urban traffic and its application to the city of geneva," in *Proceedings of Traffic and Granular Flow*, 1997. 24
- [21] S. Coleri, A. Puri, and P. Varaiya, "Pedamacs: Power efficient and delay aware medium access protocol for sensor networks," in *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 5, 2006, pp. 920--930. 41
- [22] Crossbow. [Online]. Disponibil la: <http://www.xbow.com> 41, 62
- [23] Crossbow blog. [Online]. Disponibil la: <http://blog.xbow.com/xblog> 54, 63
- [24] R. Cunningham, J. Dowling, A. Harrington, V. Reynolds, R. Meier, and V. Cahill, "Self-optimization in a next-generation urban traffic control environment," in *ERCIM News - Special: Emergent Computing*, vol. 64, January 2006, pp. 55--56. 6
- [25] D. Curiac, O. Baniias, F. Dragan, C. Volosencu, and O. Dranga, "Malicious node detection in wireless sensor networks using an autoregression technique," in *The Third International Conference on Networking and Services*, 2007, pp. 17--22. 70, 72
- [26] D. Curiac, M. Plastoi, O. Baniias, C. Volosencu, R. Tudoroiu, and A. Doboli, "Combined malicious node discovery and self-destruction technique for wireless sensor networks," in *The Third International Conference on Sensor Technologies and Applications, SENSORCOMM 2009, to be published*, 2009. 70
- [27] D. Curiac, F. Dragan, O. Baniias, and D. Iercan, "A knowledge based system approach in securing distributed wireless sensor networks," in *Scientific Bulletin of Politehnica University of Timisoara*, vol. Transactions on Automatic Control and Computer Science, Nr. 51, 2006, pp. 17--20. 70
- [28] C. Daganzo, "The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with hydrodynamic theory," in *Institute of Transportation Studies*, vol. 28B(4), 1993, pp. 269--287. 23
- [29] M. Danech-Pajouh, "Road traffic indicators as a performance guide," in *Proceedings of IEEE Intelligent Transportation Systems*, 2001, pp. 1132--1136. 29
- [30] G. B. Dantzig, *Linear Programming and Extensions*. Princeton University Press, 1998. 164

- [31] P. De, A. Raniwala, S. Sharma, and T. Chiueh, "Mint: A miniaturized network testbed for mobile wireless research," in *Proceedings of IEEE Infocom*, 2005. 48
- [32] B. De Schutter, "Optimal traffic light control for a single intersection," in *Proceedings of the American Control Conference*, 1999, pp. 2195--2199. 77, 78, 85, 178, 179, 198
- [33] B. De Schutter and B. De Moor, "Optimal traffic light control for a single intersection," in *Proceedings of the 1997 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications NOLTA'97*, vol. 1, Hawaii, USA, 1997, pp. 1085--1088. 78
- [34] -----, "Optimal traffic light control for a single intersection," in *European Journal of Control*, 1998, pp. 260--276. 161, 164
- [35] B. Deb, S. Bhatnagar, and B. Nath, "Information assurance in sensor networks," in *Proceedings of the 2nd ACM International Conference on Wireless Sensor Networks and Applications*, 2003, pp. 160--168. 69
- [36] A. Di Febbraro, D. Giglio, and N. Sacco, "Urban traffic control structure based on hybrid petri nets," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 5, 2004, pp. 224--237. 24
- [37] Diffie-Hellman Key Agreement Method. [Online]. Disponibil la: <http://tools.ietf.org/html/rfc2631> 50
- [38] J. Dijkstra, H. Timmermans, and A. Jessurun, "A multi-agent cellular automata system for visualising simulated pedestrian activity," *Proceedings of the Fourth International Conference on Cellular Automata for Research and Industry: Theoretical and Practical Issues on Cellular Automata*, pp. 29--36, 2000. 24
- [39] G. Dini and I. Savino, "An efficient key revocation protocol for wireless sensor networks," in *World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, 2006. 70
- [40] A. Daboli, D. Curiac, D. Pescaru, S. Daboli, W. Tang, C. Volosencu, M. Gilberti, O. Baniyas, and C. Istin, "Cities of the future: Employing wireless sensor networks for efficient decision making in complex environments," in *CEAS Technical Report Nr 831*, Stony Brook University, 2008. 47
- [41] W. Dongli, Z. Yan, and H. Xiaoyang, "Radial basis function neural network-based model predictive control for freeway traffic systems," in *International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications*, vol. 2, no. 4, 2007, pp. 370--388. 13
- [42] J. Douceur, "The sybil attack," in *Proceedings of the IPTPS*, 2002. 71
- [43] W. Du, L. Fang, and P. Ning, "Lad: Localization anomaly detection for wireless sensor networks," in *Journal of Parallel and Distributed Computing (JPDC)*, vol. 66, 2006, pp. 874--886. 72
- [44] H. Dubois-Ferriere, M. Grossglauser, and M. Vetterli, "Age matters: Efficient route discovery in mobile ad hoc networks using encounter ages," in *Proceedings of MobiHoc*, 2003. 48
- [45] S. Eisenman, N. Lane, E. Miluzzo, R. Peterson, G. Ahn, and A. Campbell, "The bikenet mobile sensing system for cyclist experience mapping," in *Proceedings of Sensys*, 2007. 48
- [46] Ertico ITS Europe. [Online]. Disponibil la: <http://www.ertico.com> 13, 46
- [47] K. O. et all, "Evaluation of adaptive control strategies for nj highways," in *Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation, FHWA-NJ-2006-001*, 2006. 32, 182

- [48] A. D. Febraro and N. Sacco, "On modelling urban transportation networks via hybrid petri nets," in *Elsevier, Control Engineering Practice*(12), 2004, pp. 1225--1239. 24
- [49] A. Fernandez-Caballero, F. J. Gomez, and J. Lopez-Lopez, "Knowledge-based road traffic monitoring," in *Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 4528, 2007, pp. 182--191. 13
- [50] D. G. Florina, "Simulation-based evaluation of advanced traveler information services," Master's thesis, MIT, 2004. 23
- [51] N. H. Gartner, "Road traffic control: Progression methods," in *Concise Encyclopedia of Traffic and Transportation Systems*, edited by M. Papageorgiou, Pergamon Press, 1991, pp. 391--396. 32
- [52] N. H. Gartner, S. F. Assmann, F. Lasaga, and D. L. Hom, "A multiband approach to arterial traffic signal optimization," in *Transportation Research B*, vol. 25, 1991, pp. 55--74. 32
- [53] P. E. Gill, W. Murray, M. A. Saunders, and M. H. Wright, "Inertia-controlling methods for general quadratic programming," in *Society for Industrial and Applied Mathematics*, vol. 33, 1991, pp. 1--36. 167
- [54] K. Greene, "A wireless sensor city," in *MIT Technology Review*, 2007. 48
- [55] B. D. Greenshield, "A study of traffic capacity," in *Highway Research Board Proceedings*, 1934. 15
- [56] C. Hartung, J. Balasalle, and R. Han, "Node compromise in sensor networks: The need for secure systems," in *Department of Computer Science University of Colorado, Technical Report CU-CS-990-05*, 2005. 70
- [57] B. Haut and G. Bastin, "A second order model for road traffic networks," in *Proceedings of the 8th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, 2005, pp. 174--184. 78
- [58] A. Hegyi, "Model predictive control for integrating traffic control measures," Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, TRAIL Thesis Series, 2004. 23
- [59] A. Hegyi, B. De Schutter, and H. Hellendoorn, "Model predictive control for optimal coordination of ramp metering and variable speed limits," in *Transportation Research Part C*, vol. 13, 2005, pp. 185--209. 78
- [60] A. Hegyi, B. De Schutter, and J. Hellendoorn, "Optimal control of freeway networks with bottlenecks and static demand," in *Transportation Research Record no. 1925*, 2005, pp. 29--37. 23
- [61] D. Helbing, "Gas-kinetic derivation of navier-stokes-like traffic equations," in *Physical Review*, vol. E53, no. 3, 1996, pp. 2266--2381. 23
- [62] S. Hoogendoorn, B. De Schutter, and H. Schuurman, "Decision support in dynamic traffic management. real-time scenario evaluation," in *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, vol. 3, 2003, pp. 21--38. 23
- [63] R. Hughes, H. Huang, C. Zegeer, and M. Cynecki, "Evaluation of automated pedestrian detection at signalized intersections," in *U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-00-097*, 2001, pp. 1--27. 65
- [64] B. Hull, V. Bychkovsky, K. Chen, M. Goraczko, A. Miu, E. Shih, Y. Zhang, H. Balakrishnan, and S. Madden, "Cartel: A distributed mobile sensor computing system," in *Proceedings of ACM SenSys*, 2006. 48

- [65] P. B. Hunt, D. L. Robertson, and R. D. Bretherton, "The scoot on-line traffic signal optimization technique," in *Traffic Engineering Control*, vol. 23, 1982, pp. 190--192. 34
- [66] IEEE Intelligent Transportation Systems Society. [Online]. Disponibil la: <http://www.ewh.ieee.org/tc/its/> 13
- [67] IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. [Online]. Disponibil la: <http://ieeexplore.ieee.org/> 13
- [68] G. Improta and G. E. Cantarella, "Control systems design for an individual signalised junction," in *Transportation Research B*, vol. 18, 1984, pp. 147--167. 31
- [69] Inventia primului semafor. [Online]. Disponibil la: <http://www.ideafinder.com/history/inventions/trafficlight.htm> 5
- [70] ITS America. [Online]. Disponibil la: <http://www.itsa.org/> 13
- [71] ITS International. [Online]. Disponibil la: <http://www.itsinternational.com> 14
- [72] R. Jain and J. M. Smith, "Modeling vehicular traffic flow using m/g/c/c state dependent queuing models," in *Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Massachusetts Amherst 01003*, 1996, pp. 1--41. 24, 48
- [73] L. James and D. Nahl, *Road Rage and Aggressive Driving*. Prometheus Books, 2000. 7
- [74] A. Kansal, A. Somasundara, S. Jea, M. Srivastava, and D. Estrin, "Intelligent fluid infrastructure for embedded networks," in *Proceedings of MobiSys, 2004*. 48
- [75] C. Karlof, N. Sastry, and D. Wagner, "Tinysec: A link layer security architecture for wireless sensor networks," in *Second ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, 2004. 71
- [76] R. Katwijk, "Multi-agent look-ahead traffic-adaptive control," Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, TRAIL Thesis Series, 2008. 78
- [77] L. A. Klein, M. K. Mills, and D. R. Gibson, "Traffic detector handbook: Third edition-volume i," in *US Department of Transportation, FHWA-HRT-06-108*, 2006, pp. 1--291. 40, 55, 181
- [78] N. Komninos, "The architecture of intelligent cities," in *Conference Proceedings Intelligent Environments*, 2006, pp. 53--61. 47
- [79] A. Kotsialos, M. Papageorgiou, and A. Messmer, "Optimal co-ordinated and integrated motorway network traffic control," in *Proceedings of the 14th International Symposium of Transportation and Traffic Theory*, 1999, pp. 621--644. 23
- [80] R. Kroon, "Dynamical vehicle routing using ant based control," Master's thesis, Delft University of Technology, 2002. 23
- [81] J. Kuester and J. Mize, "Optimization techniques with fortran," in *McGraw-Hill Book Company, Chapter 10: Multivariable Constrained Methods*, 1973, pp. 368--385. 33
- [82] J. LeBrun, C. Chuah, D. Ghosal, and H. M. Zhang, "Knowledge-based opportunistic forwarding in vehicular wireless ad hoc networks," in *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference*, vol. 4, 2005, pp. 2289--2293. 38, 48

- [83] D.-H. Lee, *Urban and Regional Transportation Modeling. Essays in Honor of David Boyce*. Edward Edgar Publishing, 2004. 6
- [84] U. Lee, E. Magistretti, B. Zhou, M. Gerla, P. Bellavista, and A. Corradi, "Mobeyes: Smart mobs for urban monitoring with vehicular sensor networks," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 13, 2006, pp. 52--57. 48
- [85] Y. Li, M. T. Thai, and W. Wu, "Wireless sensor networks and applications." Springer, 2008. 50
- [86] L. C. Liao, "A review of the optimized policies for adaptive control strategy (opac)," in *University of California, Berkeley, UCB-ITS-PWP-98-9*, 1998. 32, 33, 182
- [87] M. Lighthill and G. Whitham, "On kinematic waves, ii. a theory of traffic flow on long crowded roads," in *Proceedings of the Royal Society*, 1955, pp. 317--345. 18
- [88] J. D. C. Little, "The synchronization of traffic signals by mixedinteger-linear-programming," in *Operations Research*, vol. 14, 1966, pp. 568--594. 32, 182
- [89] J. D. C. Little, M. D. Kelson, and N. H. Gartner, "Maxband: A program for setting signals on arteries and triangular networks," in *U.S. Department of Transportations*, 795, 1981. 32
- [90] D. Liu and P. Ning, "Establishing pairwise keys in distributed sensor networks," in *Proceedings of the 10th ACM Conference on Computer and Communications Security*, 2003, pp. 52--61. 70
- [91] Z. Liu, "A survey of intelligence methods in urban traffic signal control," in *International Journal of Computer Science and Network Security*, vol. 7, July 2007, pp. 105--112. 13
- [92] E. Mancinelli, G. Cohen, S. Gaubert, J.-P. Quadrat, and E. Rofman, "On traffic light control of regular towns," in *INRIA Rocquencourt, Rapport de recherche no. 4276*, 2001, pp. 1--15. 24
- [93] V. Marchau, "Technology assessment of automated vehicle guidance - prospects for automated driving implementation," Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, TRAIL Thesis Series, 2000. 23
- [94] V. D. Markham, "U.s. national report on population and the environment," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2006. 7
- [95] A. May, *Traffic Flow Fundamentals*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1990. 19
- [96] B. Meffert, R. Blaschek, U. Knauer, R. Reulke, F. Winkler, and A. Schischmanow, "Monitoring traffic by optical sensors," in *Proceedings of 2nd International Conference on Intelligent Computing and Information Systems*, 2005, pp. 9--14. 37
- [97] A. J. Menezes, P. C. van Oorschot, and S. A. Vanstone, *Handbook of Applied Cryptography*. CRC Press, 1996. 50
- [98] A. Messmer and M. Papageorgiou, "Metanet: a macroscopic simulation program for motorway networks," in *Traffic Engineering and Control*, vol. 31, 1970, pp. 466--470. 23
- [99] E. A. Mueller, "Aspects of the history of traffic signals," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 19, February 1970, pp. 6--17. 5
- [100] R. Murty, A. Gosain, M. Tierney, A. Brody, A. Fahad, J. Bers, and M. Welsh, "Citysense: A vision for an urban-scale wireless networking testbed," in *Harvard Technical Report TR-13-07*, 2007. 48

- [101] K. Nagel and M. Schreckenberg, "Online traffic simulation with cellular automata," in *Journal of Physics 2*, 1999, pp. 2221--2229. 24, 25
- [102] M. Nekovee, "Sensor networks on the road: the promises and challenges of vehicular adhoc networks and vehicular grids," in *Proceedings of Workshop on Ubiquitous Computing and eResearch*, 2005. 38
- [103] Numerical Algorithms Group. [Online]. Disponibil la: <http://www.nag.co.uk/> 167, 178, 180, 199
- [104] M. Papageorgiou, "Overview of road and motorway traffic control strategies," in *Proc. of 10th Jubilee Meeting of the EURO Working Group on Transportation*, 2005, pp. 34--50. 6, 24, 29, 30, 75
- [105] M. Papageorgiou, J. Blosseville, and H. Hadj-Salem, "Modelling and real-time control of traffic flow on the southern part of boulevard peripherique in paris: Part i: Modelling," in *Transportation Research A*, vol. 24A, no. 5, 2002, pp. 345--359. 19, 21, 22
- [106] M. Papageorgiou, C. Diakaki, V. Dinopoulou, A. Kotsialos, and Y. Wang, "Review of road traffic control strategies," in *Proceedings of the IEEE*, Vol. 91, No. 12, 2003, pp. 2043--2067. 6, 28, 32, 182
- [107] Paramics. [Online]. Disponibil la: <http://www.paramics-online.com> 27
- [108] W. Pattara-atikom, P. Pongpaibool, and S. Thajchayapong, "Estimating road traffic congestion using vehicle velocity," in *ITS Telecommunications Proceedings*, June 2006, pp. 1001--1004. 5
- [109] H. Payne, "Models of freeway traffic and control," in *Simulation Council Proceedings*, 1971, pp. 51--61. 20
- [110] A. Perrig, R. Szewczyk, V. Wen, D. Culler, and J. D. Tygar, "Spins: Security protocols for sensor networks," in *Mobile Computing and Networking*, 2001, pp. 189--199. 68
- [111] A. Perrig, R. Szewczyk, V. Wen, D. Culler, and J. Tygar, "Spins: Security protocols for sensor networks," in *Mobile Computing and Networking*, 2001, pp. 189--199. 70, 71
- [112] Protocolul de la Kyoto. [Online]. Disponibil la: <http://ec.europa.eu/environment/climat/kyoto.htm> 7
- [113] PTV Traffic Mobility Logistics. [Online]. Disponibil la: [www.ptv.de](http://www.ptv.de) 27
- [114] M. Ramming, "Network knowledge and route choice," Ph.D. dissertation, MIT, 2002. 23
- [115] P. Richards, "Shockwaves on the highway," in *Operations Research*, vol. 4, 1956, pp. 42--51. 18
- [116] Road rage. [Online]. Disponibil la: <http://www.roadragers.com/> 7
- [117] D. I. Robertson, "Transyt method for area traffic control," in *Traffic Engineering Control*, vol. 10, 1969, pp. 276--281. 32
- [118] K. Sakamoto, M. Kobayashi, S. Nishimura, and T. Nakahara, "Its for safety driving on roadways," in *SEI Technical Review*, vol. 61, January 2006, pp. 53--59. 13
- [119] K. Sanzgiri, B. Dahill, B. Levine, and E. Belding-Royer, "A secure routing protocol for ad hoc networks," in *International Conference on Network Protocols*, 2002, pp. 189--199. 68, 71

- [120] A. Senart, M. Karpinski, M. Wieckowski, and V. Cahill, "Using sensor networks for pedestrian detection," in *IEEE Consumer Communications and Networking Conference*, 2008, pp. 697--701. 65
- [121] SENSYS. [Online]. Disponibil la: <http://www.sensysnetworks.com> 62
- [122] K. Sohraby, D. Minoli, and T. Znati, in *Wireless sensor networks: technology, protocols, and applications*, 2007, pp. 26--28. 52, 53
- [123] C. Stamatiadis and N. H. Gartner, "Multiband-96: A program for variable bandwidth progression optimization of multiarterial traffic networks," in *U.S. Department of Transportation, Record 1554*, 1996. 32
- [124] R. S. Sutton and A. G. Barto, *Reinforcement Learning: An Introduction*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1998. 6
- [125] C. Tampere, "Human-kinetic multiclass traffic flow theory and modelling with application to advanced driver assistance systems in congestion," Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, TRAIL Thesis Series, 2004. 23
- [126] F. Teklu, A. Sumalee, and D. Watling, "A genetic algorithm approach for optimizing traffic control signals considering routing," in *Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 22, no. 1, 2007, pp. 31--43. 13
- [127] A. Teo and G. Singh, "Evaluation of the xmesh routing protocol in wireless sensor networks," in *Circuits and Systems. 49th IEEE International Midwest Symposium*, vol. 2, 2006, pp. 113--117. 63
- [128] L. Tong, Q. Zhao, and S. Adireddy, "Sensor networks with mobile agents," in *Proceedings IEEE 2003 MILCOM*, 2003, pp. 688--694. 57
- [129] Traffic signal controllers. [Online]. Disponibil la: <http://www.trafsig.com/McCainProducts.html> 66
- [130] Traffic signal equipment. [Online]. Disponibil la: <http://www.wpsignal.com/tse/tse.htm> 66
- [131] Traffic Technology International. [Online]. Disponibil la: [http://www.ukipme.com/mag\\_traffic.htm](http://www.ukipme.com/mag_traffic.htm) 13
- [132] Trafficware. [Online]. Disponibil la: <http://www.trafficware.com> 28
- [133] Transport for London. [Online]. Disponibil la: <http://www.tfl.gov.uk/> 46
- [134] Transport Research Laboratory. [Online]. Disponibil la: <http://www.trlsoftware.co.uk> 27, 34
- [135] Transportation Engineering. Online lab manual. [Online]. Disponibil la: [http://www.webs1.uidaho.edu/niatt\\_labmanual/index.htm](http://www.webs1.uidaho.edu/niatt_labmanual/index.htm) 16
- [136] TRANSYT. [Online]. Disponibil la: <http://www.trlsoftware.co.uk/products/detail.asp?aid=4&c=2&pid=66> 32, 182
- [137] TSS-Transport Simulation Systems. [Online]. Disponibil la: <http://www.tss-bcn.com/products.html> 27
- [138] US Department of Transportation, Traffic Light Synchronization Program. [Online]. Disponibil la: <http://www.dot.ca.gov/hq/traffops/sysmgtp/TLSP> 46
- [139] R. van Katwijk, P. van Koningsbruggen, B. De Schutter, and J. Hellendoorn, "Test bed for multiagent control systems in road traffic management," in *Transportation Research Record*, vol. no. 1910, 2005, pp. 108--115. 78
- [140] N. Vandaele, T. van Woensel, and A. Verbruggen, "A queueing based traffic flow model," in *Transportation Research-D: Transport and environment, Vol. 5, nr. 2*, 2000, pp. 121--135. 24



- [141] C. Volosencu, D. Curiac, O. Baniac, A. Doboli, and O. Dranga, "Knowledge based system for reliable perimeter protection using sensor networks," in *International Conference on Wireless Information Networks and Systems*, 2007, pp. 51--56. 70
- [142] E. G. Wagner and E. G. Wagner, "Simulating traffic with queueing models," 2003, pp. 1--17. 24
- [143] M. Wiering, J. van Veenen, J. Vreeken, and A. Koopman, "Intelligent traffic light control. technical report uu-cs-2004-029," in *Institute of Information and Computing Sciences, Utrecht University*, July 2004. 13
- [144] Wireless Sensor Networks. [Online]. Disponibil la: [http://en.wikipedia.org/wiki/Sensor\\_networks](http://en.wikipedia.org/wiki/Sensor_networks) 51
- [145] A. D. Wood and J. Stancovic, "Denial of service in sensor networks," in *Computer - The flagship publication of the IEEE Computer Society*, 2002, pp. 54--62. 72
- [146] R. Yasdi, "Prediction of road traffic using a neural network approach," in *Neural Computing and Applications*, vol. 8, no. 2, May 1999, pp. 135--142. 13
- [147] Y. Hu, A. Perrig, and D. Johnson, "A defense against wormhole attacks in wireless ad hoc networks," in *Proceedings of INFOCOM*, 2003, pp. 1976--1986. 71
- [148] E. Yoneki, "Evolution of ubiquitous computing with sensor networks in urban environments," in *Proceedings of UbiComp*, 2005. 48
- [149] S. Zhu, S. Setia, and S. Jajodia, "Efficient security mechanisms for large-scale distributed sensor networks," in *10th ACM Conference on Computer and Communications Security*, 2003, pp. 62--72. 70