

# Abstracts of Dissertations

Institute of Information and  
Communication Technologies

BULGARIAN ACADEMY OF  
SCIENCES



4 / 2021



OPTIMIZATION OF TRAFFIC  
IN URBAN ENVIRONMENT

*Yordanka Boneva*

ОПТИМИЗИРАНЕ НА  
ТРАФИК В ГРАДСКА СРЕДА

*Йорданка Бонева*

# Автореферати на дисертации

Институт по информационни и  
комуникационни технологии

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ

ISSN: 1314-6351

Поредицата „Автореферати на дисертации на Института по информационни и комуникационни технологии при Българската академия на науките“ представя в електронен формат автореферати на дисертации за получаване на научната степен „Доктор на науките“ или на образователната и научната степен „Доктор“, защитени в Института по информационни и комуникационни технологии при Българската академия на науките. Представените трудове отразяват нови научни и научно-приложни приноси в редица области на информационните и комуникационните технологии като Компютърни мрежи и архитектури, Паралелни алгоритми, Научни пресмятания, Лингвистично моделиране, Математически методи за обработка на сензорна информация, Информационни технологии в сигурността, Технологии за управление и обработка на знания, Грид-технологии и приложения, Оптимизация и вземане на решения, Обработка на сигнали и разпознаване на образи, Интелигентни системи, Информационни процеси и системи, Вградени интелигентни технологии, Йерархични системи, Комуникационни системи и услуги и др.

### Редактори

*Геннадий Агре*

Институт по информационни и комуникационни технологии, Българска академия на науките  
E-mail: [agre@iinf.bas.bg](mailto:agre@iinf.bas.bg)

*Райна Георгиева*

Институт по информационни и комуникационни технологии, Българска академия на науките  
E-mail: [rayna@parallel.bas.bg](mailto:rayna@parallel.bas.bg)

*Даниела Борисова*

Институт по информационни и комуникационни технологии, Българска академия на науките  
E-mail: [dborissova@iit.bas.bg](mailto:dborissova@iit.bas.bg)

*Настоящото издание е обект на авторско право. Всички права са запазени при превод, разпечатване, използване на илюстрации, цитирания, разпространение, възпроизвеждане на микрофилми или по други начини, както и съхранение в бази от данни на всички или част от материалите в настоящето издание. Копирането на изданието или на част от съдържанието му е разрешено само със съгласието на авторите и/или редакторите*

*The series Abstracts of Dissertations of the Institute of Information and Communication Technologies at the Bulgarian Academy of Sciences presents in an electronic format the abstracts of Doctor of Sciences and PhD dissertations defended in the Institute of Information and Communication Technologies at the Bulgarian Academy of Sciences. The studies provide new original results in such areas of Information and Communication Technologies as Computer Networks and Architectures, Parallel Algorithms, Scientific Computations, Linguistic Modelling, Mathematical Methods for Sensor Data Processing, Information Technologies for Security, Technologies for Knowledge management and processing, Grid Technologies and Applications, Optimization and Decision Making, Signal Processing and Pattern Recognition, Information Processing and Systems, Intelligent Systems, Embedded Intelligent Technologies, Hierarchical Systems, Communication Systems and Services, etc.*

### Editors

*Gennady Agre*

Institute of Information and Communication Technologies, Bulgarian Academy of Sciences  
E-mail: [agre@iinf.bas.bg](mailto:agre@iinf.bas.bg)

*Rayna Georgieva*

Institute of Information and Communication Technologies, Bulgarian Academy of Sciences  
E-mail: [rayna@parallel.bas.bg](mailto:rayna@parallel.bas.bg)

*Daniela Borissova*

Institute of Information and Communication Technologies, Bulgarian Academy of Sciences  
E-mail: [dborissova@iit.bas.bg](mailto:dborissova@iit.bas.bg)

*This work is subjected to copyright. All rights are reserved, whether the whole or part of the materials is concerned, specifically the rights of translation, reprinting, re-use of illustrations, recitation, broadcasting, reproduction on microfilms or in other ways, and storage in data banks. Duplication of this work or part thereof is only permitted under the provisions of the authors and/or editor.*

e-ISSN: 1314-6351

© ICT-BAS 2012

[www.iict.bas.bg/dissertations](http://www.iict.bas.bg/dissertations)



**BULGARIAN ACADEMY OF SCIENCES**

## **Abstract of PhD Thesis**

# **OPTIMIZATION OF TRAFFIC IN URBAN ENVIRONMENT**

***Yordanka Lyubomirova Boneva***

**Supervisor:** Prof. Todor Stoilov

**Approved by Supervising Committee:**

Prof. Kosta Boshnakov

Prof. Idilia Bachkova

Prof. Milena Lazarova-Mitzeva

Prof. Vladimir Monov

Prof. Dimitar Karastoyanov



**INSTITUTE OF INFORMATION AND  
COMMUNICATION TECHNOLOGIES**

**Department of Distributed Information and**

**Control Systems**

## INTRODUCTION

### **Actuality of the problem:**

Actuality of the problem of optimizing the traffic in the urban environment globally is related to urban development. Actuality of problem regarding Bulgaria is related to the expansion of the capital, where more people are gathering, respectively there is greater need of cars and need of more effective and efficient traffic management. Traffic management in urban environments is performed mainly by traffic lights, which divide the flow of cars as well as pedestrians over time.

### **Object and field of research:**

The object of research in the dissertation is a network of intersections regulated by traffic lights along Shipchenski Prohod Blvd. in Sofia. The field of research is traffic in urban environments.

### **Dissertation content:**

**Chapter 1** discusses basic concepts in traffic management, as well as various models of traffic management in an urban network. Basic concepts for the dissertation are defined, such as cycle duration, green signal duration as part of the cycle (green split), offset and others. An important part of the chapter is the traffic flow models, one of which uses the principle of store-and-forward, applied to define and solve the tasks in the dissertation.

**Chapter 2** presents a bilevel optimization task for traffic management and optimization in urban environments. A previous study in the field of bilevel optimization for the purposes of traffic optimization is presented. The essence of the bilevel problem is also described.

**Chapter 3** describes experiments conducted for modeling, simulation, optimization of urban traffic on a selected part of the urban transport network. Each experiment is briefly described in summary, the results of the respective study are presented and conclusions are drawn. More than 6 experiments for traffic optimization with different accents were performed: application of optimization with TRANSYT software product, application of results from two bilevel problems in Aimsun software product, assessment of traffic indicators in the performed simulations, assessment of fuel consumption and air pollutants, complicating the computer model by adding the effect of tram stops and parking and the street, etc.

**Chapter 4** presents a comparison between the research and experiments performed in Chapter 3. Chapter 4 demonstrates the optimization of traffic on certain indicators. This chapter compares the results of bilevel optimization problems with the results of the simulation with real data and

with the results of TRANSYT. As a result of the comparisons, the relevant conclusions were made.

The conclusion summarizes the main aspects of the dissertation.

The contributions of the dissertation work are defined, the future directions of work, the scientific publications on the dissertation are presented, as well as the research projects, on which the research on the dissertation work and the cited works has been done.

### **Aim and tasks of the dissertation:**

The aim of the dissertation is to develop a formal model for solving a research problem for optimizing road traffic in an urban type of transport network.

The object of the study is a network of four connected intersections regulated by traffic lights, located on Shipchenski Prohod Boulevard in Sofia, Bulgaria.

The following tasks are set for solving in connection with the specification of the purpose of the dissertation:

- Development of a formal model of urban transport network.
- Development of a bilevel problem for management of a network of intersections;
- Defining and solving bilevel optimization problems;
- Building a computer model and simulations in the Aimsun software package;
- Testing of results without and with data from the solved optimization problem in Aimsun simulation environment;
- Evaluation of the obtained solutions by comparison with TRANSYT - a software product that is used worldwide for evaluation of management strategies in the field of road traffic.

### **Approbation of the results:**

Some of the results included in the dissertation are presented at the following international conferences: Automatics and Informatics'2019 - Sofia., CompSysTech'20 - Ruse, TechSys 2020 - Plovdiv, etc.

### **List of publications on the dissertation**

1. **Boneva Y.**, Split and Queue Optimization in Transport Network through Bi-level Optimization, CompSysTech '20: ACM International Conference Proceeding Series, Ruse, June 2020 г., ISBN: 978-1-4503-7768-3, Association for Computing Machinery (ACM), New York, USA, pp. 175-179, SJR(SCOPUS) 2019: 0,2, <https://doi.org/10.1145/3407982.3407995>, **Best**

**paper award certificate**

2. **Boneva Y.**, Cycle Length Optimization through Bi-level Optimization, 9<sup>TH</sup> International Scientific Conference “TechSys 2020” – Engineering, Technologies and Systems, Technical University of Sofia, Plovdiv Branch, 14-16 May 2020, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, ISSN:1757-8981E-ISSN:1757-899X, Volume 878, Published online: 21 July 2020, Published under license by IOP Publishing Ltd, ID: 012024, pp. 1-6, Paper OPEN ACCESS, SJR (SCOPUS) 2019: 0.2, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/878/1/012024>, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/878/1/012024/pdf>
3. **Boneva Y.**, T. Stoilov, Simulation of Tram Stops and their Influence on Traffic – Case Study in Sofia, Bulgaria, Journal "Information Technologies and Control", Online Print ISSN 1312-2622, ISSN: 2367-5357, Issue 3, SAI, 2019, pp. 19-25, DOI: 10.7546/itc-2019-0013, [http://www.aksyst.com:8081/Sai/Journal/Docum/Vol\\_3\\_03\\_2019.pdf](http://www.aksyst.com:8081/Sai/Journal/Docum/Vol_3_03_2019.pdf)
4. **Boneva Y.**, Fixed-Time Signal Timing Versus Actuated Control of Traffic Lights – Case Study of Shipchenski Prohod Blvd. in Sofia, Bulgaria, Proceedings for International Conference AUTOMATICS AND INFORMATICS’2019, 03-05 October 2019, ISSN 1313-1850, CD: ISSN 1313-1869, John Atanasoff Society of Automatics and Informatics, Sofia, Bulgaria, 2019, pp. 53 – 56.
5. **Boneva Y.**, Optimization of car traffic flow on intersections regulated by traffic lights through the simulation environment Aimsun, Journal Mechanics, Transport, Communications, ISSN 1312-3823 (print), ISSN 2367-6620 (online), vol. 16, issue 2, art. ID: 1663, Todor Kableshkov University of Transport, 2018.pp. I-1 – I-9, <https://mtc-aj.com/library/1663.pdf>

**Citation:**

*Cited paper*

**Boneva Y.**, Optimization of car traffic flow on intersections regulated by traffic lights through the simulation environment Aimsun, Journal Mechanics, Transport, Communications, ISSN 1312-3823 (print), ISSN 2367-6620 (online), vol. 16, issue 2, art. ID: 1663, Todor Kableshkov University of Transport, 2018.pp. I-1 – I-9, <https://mtc-aj.com/library/1663.pdf>

*Citing papers*

1. Ilchev Svetozar, Rumens Andreev, Zlatoliliya Ilcheva, Ekaterina Otsetova-Dudin, Three-channel laser diode driver for multimedia laser projectors, International Journal of Circuits, Systems and

Signal Processing, ISSN: 1998-4464, Vol. 14, 2020, pp. 451-459, DOI:  
10.46300/9106.2020.14.60, (SJR (SCOPUS) 2019: - 0.16, Q4)

2. Ilchev S, Andreev R, Ilcheva Z., Display of Computer-Generated Vector Data by a Laser Projector, CompSysTech '20: ACM International Conference Proceeding Series, Ruse, June 2020 г., ISBN: 978-1-4503-7768-3, Association for Computing Machinery (ACM), New York, USA, pp. 11-18, <https://doi.org/10.1145/3407982.3407990>, SJR (SCOPUS,) 2019: 0,2

### **Participation in projects:**

1. Project: “Modelling and optimization of urban traffic in network of crossroads”, Contract: KII-06-H37/6, 6.12.2019 of the Bulgarian National Science fund, Project coordinator: Prof. Krasimira Stoilova, D.Sc.
2. Project: “Contemporary digital methods and tools for exploring and modeling transport flows”, Contract: KII-06-M27/9, 17.12.2018, National Science Fund, Competition for financing of scientific researches of young scientists – 2018, Project coordinator: Assistant professor Vladimir Ivanov, Ph.D.

## Chapter 1

### TRAFFIC CONTROL MODELS

Regulation of intersections by traffic lights is one of the most effective and flexible ways to control traffic. Emerging conflicts from the movement of traffic in different directions is resolved by the principle of separation of flows over time. The advantages of regulation by traffic lights include the increased capacity of intersections and requires a simple geometric design (Teodorovic and Janic, 2017).

The city crossroads consists of a set of approaches and a common crossing area - a crossroads. The approach is part of a street consisting of one or more lanes. An approach is leading to the common intersection area of the intersection, so that the traffic on it has an advantage (r.o.w. - right of way) at the same time and a vehicle in the respective queue can expect to pass during the signal at approximately the same time, whatever band you choose. Crossroads traffic is divided into streams. Two streams are called compatible when they can safely cross the intersection at the same time; otherwise, they are called incompatible or conflicting. The signal cycle is a repetition of the main series of combinations of signals at an intersection. Its duration is called the cycle length or simply a cycle. A stage (or phase) is part of a cycle during which a set of flows takes turn. Constant lost times of several seconds are located between stages to avoid conflict between incompatible flows in successive stages (Diakaki et al., 2002).

#### *Cycle Length*

Figure 1.3.e shows the duration of the traffic light cycle (Mathew, 2014).



**Fig. 1.3.** Cycle length

#### *Green split*

Part of the green signal from the cycle is the distribution of the effective green time in each of the phases.



*Store-and-forward model*

The store-and-forward model was initially proposed by Gazis to represent the state of traffic at congested intersections and has since been used in various traffic management papers. (Gazis, (1964), Papageorgiou, (1995)). The concept is adopted from the theory of communication networks.

Link  $z$  is presented, which connects two intersections  $i - 1$  and  $i$  (figure 1.4.), The traffic dynamics of link  $z$  is given by the conservation equation (equation 1.22.), (Aboudolas et al., 2009). The queues are represented by Equation 2-8. During periods of heavy traffic, this restriction can automatically lead to an appropriate accumulation of cars in a link in order to protect the following areas of congestion. The inflow of cars to link  $z$  is represented by equation 1.23.

$$x_z(k+1) = x_z(k) + T[q_z(k) - s_z(k) + d_z(k) - u_z(k)] \quad (1.22)$$

$$0 \leq x_z(k) \leq x_{z, \max}$$

$$q_z(k) = t_{i,z} u_i(k) \quad (1.23)$$

where:  $T$  is discrete time step

$k = 0, 1, \dots$ , discrete time index

$x_z(k)$  = vehicles in link  $z$  during period  $kT$

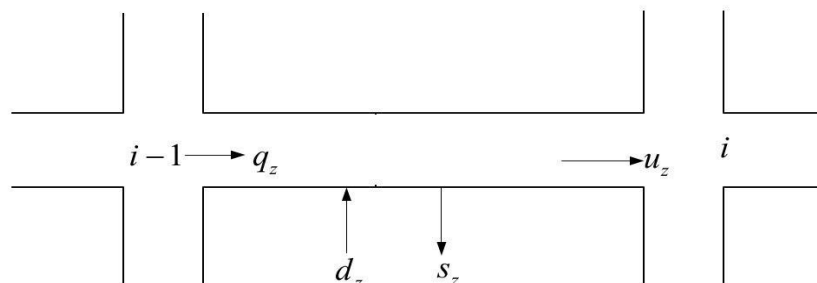
$q_z(k), u_z(k)$  = the inflow and outflow from link  $z$  during the period  $[kT, (k+1)T]$

$d_z(k), s_z(k)$  = the intensity of the arriving, respectively the intensity of the cars leaving the link  $z$

$x_{z, \max}$  = the maximum permissible length of the queue, in number of vehicles

$t_{i,z}$  = ratio of turns to link  $z$  entering junction  $i$

In Figure 1.4. an example of the store-and-forward model is shown (Liu, 2015).



**Fig. 1.4.** Store-and-Forward model

## **Conclusion**

In the first chapter an overview of some significant concepts and theoretical formulations in the field of urban traffic was made, which would lay the groundwork for further consideration of the topic. In this regard, the concepts related to regulation by traffic lights are clarified. The mathematical basis of the regulation by traffic lights is described, which is important for the definition of the optimization problems in the dissertation.

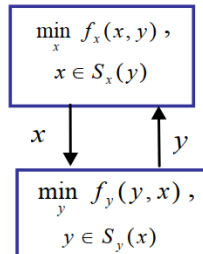
The store-and-forward model is considered, which is the basis for the formulation of a traffic model and the solution of an optimization problem for a selected network of intersections.

## Chapter 2

### ANALYSIS OF HIERARCHIC OPTIMIZATION TASKS AND MODELS

#### Bilevel Optimization

The idea of a bilevel management strategy refers to solving two optimization problems that are interrelated (Fig. 2.2), (Stoilova and Stoilov. 2020).



**Fig. 2.2.** Bilevel optimization

The problem at the upper level accepts the values of  $y = y^*$  as known parameters and finds the optimal solution  $x^*(y)$  by solving the problem

$$\begin{aligned} &f_x(x, y^*), \\ &x \in S_x(y^*). \end{aligned} \quad (2.11)$$

The solution  $x^*(y)$  is a function of the parameter  $y$ . Accordingly, the problem with the lower level accepts  $x = x^*$  as known parameters and finds a solution  $y^*(x)$  as a function of  $x$ .

These two interrelated optimization problems provide a solution to the global problem.

$$\begin{aligned} &f_x(x, y), \\ &x \in S_x(y), \\ &y \in \arg\{f_y(y, x) \in S_y(x)\} \end{aligned} \quad (2.12)$$

which means that  $x_{opt}$  is the solution of the optimization problem, where  $y$  changes the basic function  $f_x(x, y)$  and the allowable domain  $S_x(y)$ . Also,  $y$  is a solution of the low-level problem, which in turn is influenced by  $x$ . For the classical case of optimization, the objective function is only one -  $f_x(x)$ .

#### Conclusion

The second chapter discusses the achievements in the field of defining and solving bilevel optimization problems in the field of optimization of urban traffic in a network of intersections.

The formulation of a bilevel optimization problem is presented. The same formal statement was presented in the context of car traffic in urban environments, i.e., junctions controlled by traffic lights. This is important from the point of view of laying the foundation for the defined and solved bilevel problems in the same field of application in the present dissertation.

## *Chapter 3*

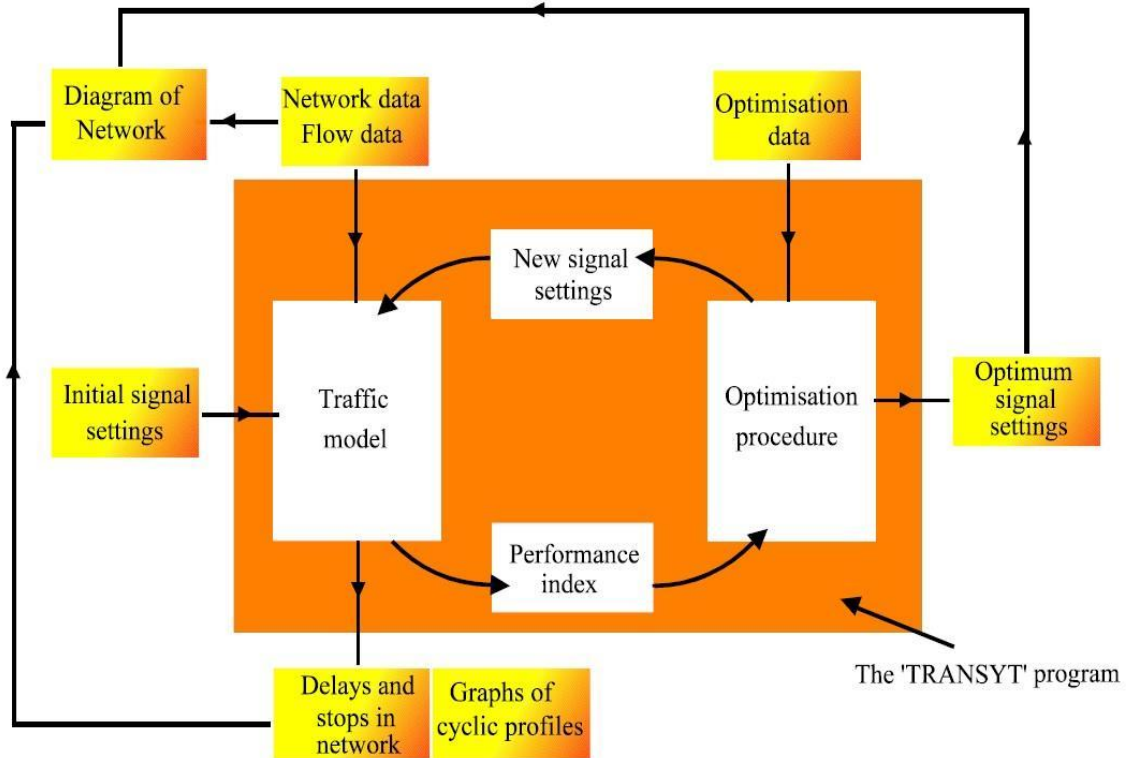
### **DEVELOPMENT OF HIERARCHIC MODELS FOR OPTIMIZATION OF TRANSPORT TRAFFIC**

#### *Used software packages for traffic modeling and optimization*

The dissertation uses three software packages - Aimsun, TRANSYT 15 and MATLAB. Aimsun and TRANSYT 15 are specialized packages for simulating and optimizing car traffic (Aimsun, (2013), Binning, (2015)). MATLAB was used for mathematical simulation of the considered group of intersections, as queues were described based on a store-and-forward model and bilevel optimization was applied. The results obtained by MATLAB for cycle duration and for green split were entered in Aimsun to check their validity.

Aimsun (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks), (Aimsun, 2013). It is able to reproduce the real features of the traffic of each network transport. It is used for the design and testing of traffic control systems, traffic management rules, access controls, location of toll devices, public transport networks, roads, the ability to work with traffic management systems tools and other real-time applications.

The software environment for optimization of fixed time signal plans - TRANSYT 15 has also been applied in the research on the task of optimizing traffic in urban environments. The operation model of TRANSYT 15 is presented in Figure 3.1. (Binning, 2015). The software calculates and optimizes a target, a function called Performance Index, part of which is the time delay and the number of car stops, the goal is to keep these two indicators to a minimum for the network so that a "green wave" is formed. In a green wave, the plateau of cars from a previous traffic light reaches the traffic light at the next intersection on a green signal and this can happen for several consecutive intersections.



**Fig. 3.1.** TRANSYT 15 optimization procedure

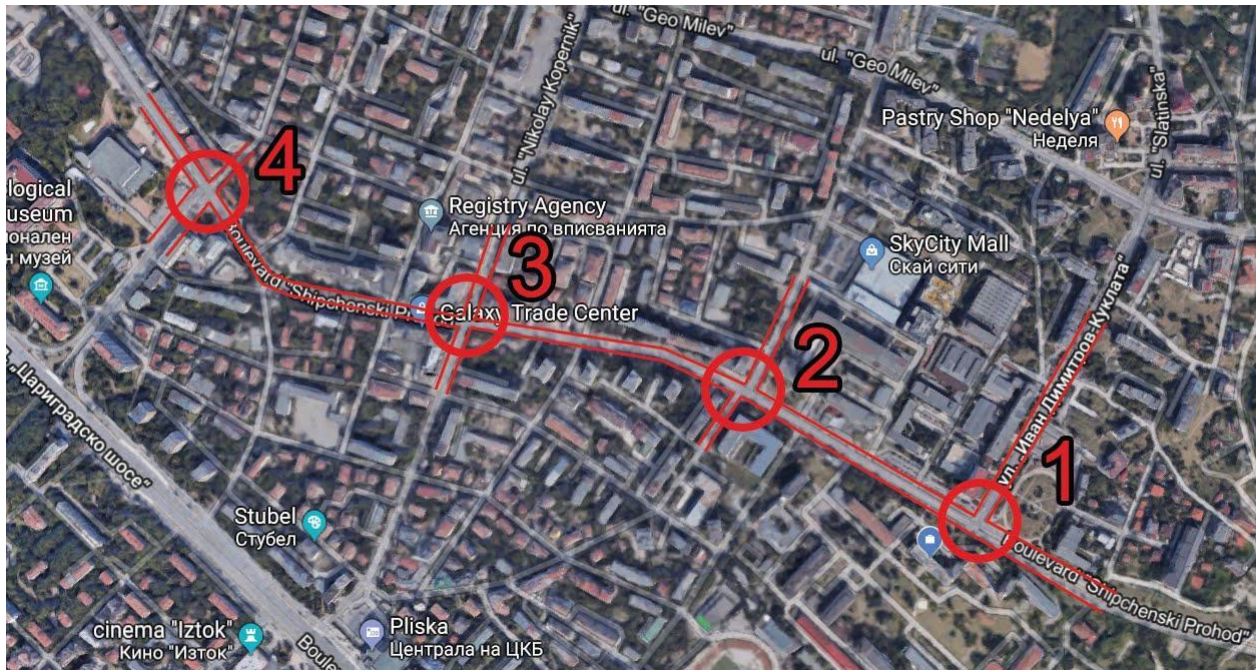
The processes described in the darker part of Figure 3.1 take place in the TRANSYT environment. Processes marked in bright rectangles are in another software package. In the case of research, this is the Aimsun software package.

Initially, a model of the transport network was created in the Aimsun package, where the initial settings of the light signaling were introduced. The created transport network is exported to TRANSYT 15. The initial Performance Index is calculated and the first iteration of an optimization procedure for reducing this Performance Index is performed. This optimization procedure leads to new traffic light settings, which are introduced in the initial model and thus the circle is closed and begins with a new iteration of Performance Index calculation, optimization, new traffic light settings and their introduction into the traffic model. The software offers the "Hill Climb" method as an optimization method.

A special program script must be written for use in a bilevel problem. The problem with bilevel optimization is solved in MATLAB environment. A special additional tool for solving bilevel tasks is included in MATLAB. The additional tool is called YALMIP. YALMIP is a free tool (<https://yalmip.github.io/>). A detailed description of this tool is given in (Lofberg, 2004).

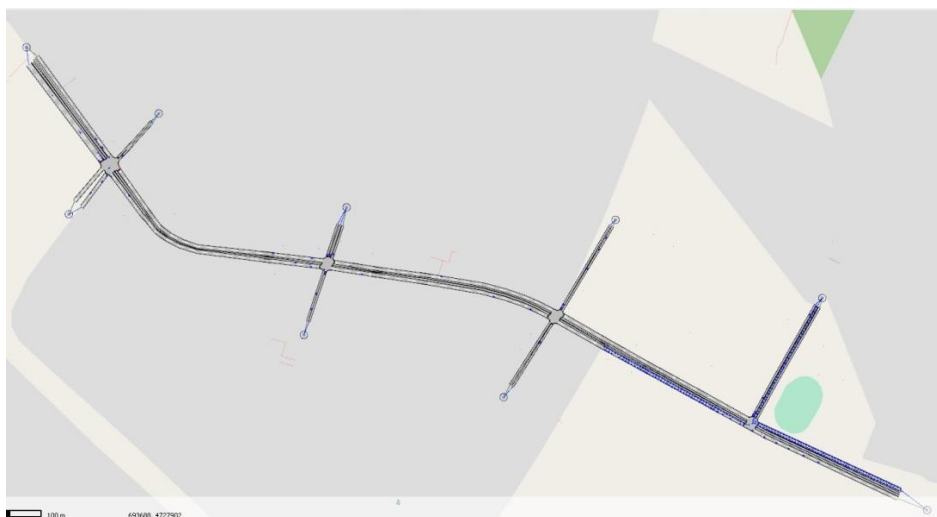
### Object of the simulation

In Figure 3.2. a view of the city network of four intersections taken from Google Maps is shown. It shows the names of some streets, shops and other sites and gives the overall impression of a dense population in terms of buildings.



**Fig. 3.2.** Image of the four connected intersections from Google Maps

In Figure 3.3. four connected traffic-light-controlled junctions modeled in the Aimsun software environment are shown. The intersections are located along Shipchenski Prohod Blvd. in the city of Sofia. The intersections are located at a relatively short distance from each other, which is a good prerequisite for reaching a green wave. The total length of the considered section is 1.5 km.



**Fig. 3.3.** Four connected traffic-light-controlled intersections in Aimsun

There are many points of interest (POI) in the area under consideration, such as offices, shopping malls, schools, kindergartens, a polyclinic and others. These points of interest are places that attract people for certain reasons. Traffic is generated in these places, both by the local population and by people from other parts of the city.

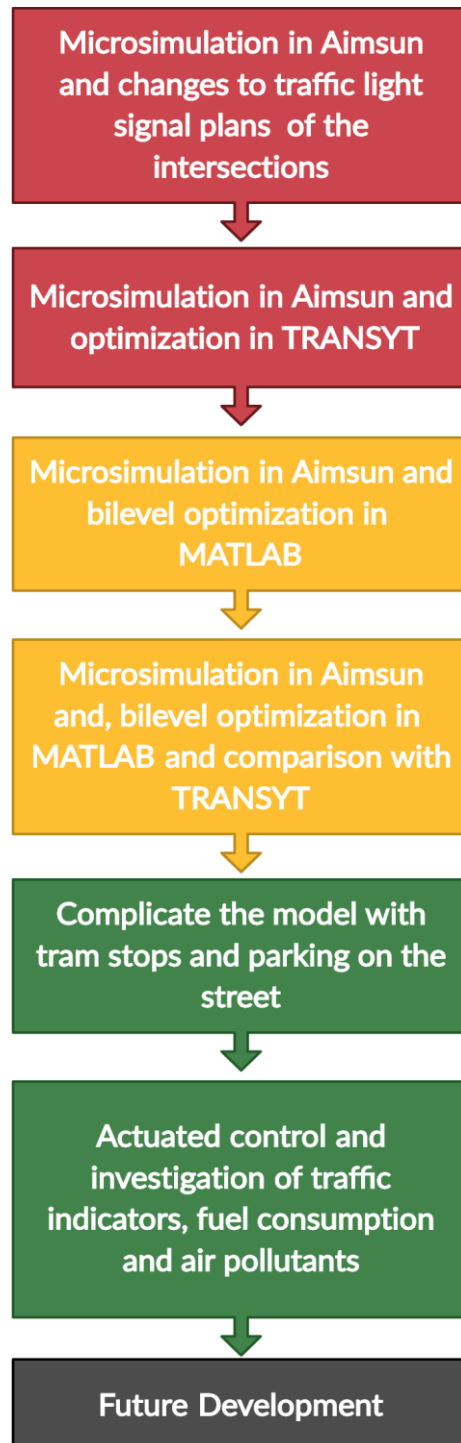
During the on-site study of the investigated section in some parts of it, overload conditions were established - queues that cannot pass completely during the green signal from the traffic light cycle and accordingly form a residual queue, which occupies part of the green time of the next cycle to pass through the intersection.

The capacity of the intersection can be exceeded, both in terms of time and space. In terms of time, congestion is observed when the duration of the green signal is not enough to pass all cars that arrived at the traffic light during the red signal, i.e., a residual queue is formed. With regard to the spatial aspect, there is talk of congestion if the queue of cars reaches the previous intersection and thus part of the green signal remains unused again, due to the inability of cars from the previous intersection to pass through it. While temporal congestion can affect an isolated intersection, spatial congestion is a sign of degradation in the network of intersections. A detailed description of the methodology for determining an oversaturated intersection by collecting information from sensors can be found in (Wu and Liu, 2010), which methodology aims to determine the severity of congestion.

### *Conducted experiments*

Figure 3.4. presents experiments conducted in connection with the dissertation. Each of these experiments will be described in detail.





**Fig. 3.4.** Review of the conducted experiments

The initial experiments put more emphasis on the use of software products, their study and application - these experiments are marked in red on the graph (first and second rectangles). The following are the most significant experiments for the dissertation work, which carry the most significant part of the applied and scientific-applied contribution. These experiments use bilevel optimization and the `solvebilevel()` function in MATLAB and test the results obtained for traffic



light control in specialized software environments for traffic simulation and optimization - in the figure they are marked in yellow (third and fourth rectangles). They are followed by experiments to complicate the model used and bring it closer to real conditions by introducing tram stops and parking on the street (fifth rectangle). Finally, there are experiments for flexible traffic management, which are done entirely in Aimsun. In addition to the good traffic indicators that these studies lead to, the aspects of fuel consumption and environmental pollution are also considered. (sixth rectangle). The directions for future development (seventh rectangle) are presented in the section "Future development", located at the end of the dissertation.

### **Optimization of car traffic at traffic-light-controlled intersections by means of Aimsun simulation environment**

#### *Summary of the experiment*

The presented experiment examines the possibility of improving traffic along Shipchenski Prohod Blvd. Dynamic microsimulation is performed. The green signal settings for the traffic lights on the boulevard and the small streets crossing the boulevard are changing. The hypothesis is that there are traffic light settings that are better than the actual ones, which will improve the performance of traffic on the boulevard and can be determined by simulation.

This study is performed solely through the use of the Aimsun simulation software product. Ten traffic indicators were compared for a network of four intersections on Shipchenski Prohod Blvd., for different settings of the green signal for the traffic lights on the boulevard and for the traffic lights on the small streets.

The results prove the hypothesis that there are better settings of traffic lights in order to improve the ten selected traffic indicators for the network of intersections, which settings were found experimentally by simulation. Four cases of traffic light settings are considered.

Base Case Scenario			10% change in green split			20% change in green split			20% change in 10% change only for T-intersection		
8744			8744			8744			8744		
	Start Time	Duration		Start Time	Duration		Start Time	Duration		Start Time	Duration
Signal 1	0	30	Signal 1	0	33	Signal 1	0	36	Signal 1	0	33
Signal 2	0	30	Signal 2	0	33	Signal 2	0	36	Signal 2	0	33
Signal 3	36	30	Signal 3	39	27	Signal 3	42	24	Signal 3	39	27
8778			8778			8778			8778		
	Start Time	Duration		Start Time	Duration		Start Time	Duration		Start Time	Duration
Signal 1	0	20	Signal 1	0	23	Signal 1	0	26	Signal 1	0	26
Signal 2	26	25	Signal 2	29	22	Signal 2	32	19	Signal 2	32	19
Signal 3	0	22	Signal 3	0	25	Signal 3	0	28	Signal 3	0	28
Signal 4	26	24	Signal 4	29	22	Signal 4	32	19	Signal 4	32	19
8845			8845			8845			8845		
	Start Time	Duration		Start Time	Duration		Start Time	Duration		Start Time	Duration
Signal 1	0	24	Signal 1	0	26	Signal 1	0	29	Signal 1	0	29
Signal 2	0	25	Signal 2	0	27	Signal 2	0	30	Signal 2	0	30
Signal 3	29	23	Signal 3	31	21	Signal 3	34	18	Signal 3	34	18
Signal 4	29	23	Signal 4	31	21	Signal 4	34	18	Signal 4	34	18
14175			14175			14175			14175		
	Start Time	Duration		Start Time	Duration		Start Time	Duration		Start Time	Duration
Signal 1	0	25	Signal 1	0	28	Signal 1	0	31	Signal 1	0	31
Signal 2	0	17	Signal 2	0	20	Signal 2	0	23	Signal 2	0	23
Signal 3	29	28	Signal 3	32	25	Signal 3	35	22	Signal 3	35	22
Signal 4	29	16	Signal 4	32	14	Signal 4	35	11	Signal 4	35	11

\*The signals in yellow has been changed

Fig.3.7. Adjustment of traffic lights for different cases

In Figure 3.11. is illustrated by comparing between the second and fourth cases from the total of four cases considered in the experiment.

10% change in green split in favor of the Boulevard				20% change in green split in favor of the Boulevard, 10% change for the T-intersection				Difference	Difference in %
Time Series	Value	Standard Deviation	Units	Time Series	Value	Standard Deviation	Units		
Delay Time - Car	42.8	34.6	sec/km	Delay Time - Car	41.96	35.65	sec/km	0.84	1.96
Density - Car	7.14	N/A	veh/km	Density - Car	7	N/A	veh/km	0.14	1.96
Flow - Car	4102	N/A	veh/h	Flow - Car	4105	N/A	veh/h	-3	-0.07
Harmonic Speed - Car	32.91	10.24	km/h	Harmonic Speed - Car	33.16	10.38	km/h	-0.25	-0.76
Input Count - Car	4204	N/A	veh	Input Count - Car	4204	N/A	veh	0	0.00
Input Flow - Car	4204	N/A	veh/h	Input Flow - Car	4204	N/A	veh/h	0	0.00
Max. Virtual Queue - Car	0	N/A	veh	Max. Virtual Queue - Car	0	N/A	veh	0	0.00
Mean Queue - Car	24.29	N/A	veh	Mean Queue - Car	23.1	N/A	veh	1.19	4.90
Mean Virtual Queue - Car	0	N/A	veh	Mean Virtual Queue - Car	0	N/A	veh	0	0.00
Missed Turns - Car	1	N/A		Missed Turns - Car	4	N/A		-3	-300.00
Number of Lane Changes - Car	418.06	N/A	#/km	Number of Lane Changes - Car	425.37	N/A	#/km	-7.31	-1.75
Number of Stops - Car	0.14	N/A	#/veh/km	Number of Stops - Car	0.14	N/A	#/veh/km	0	0.00
Speed - Car	36.09	10.79	km/h	Speed - Car	36.41	10.72	km/h	-0.32	-0.89
Stop Time - Car	31.42	31.25	sec/km	Stop Time - Car	30.81	32.3	sec/km	0.61	1.94
Total Number of Lane Changes - Car	5262	N/A		Total Number of Lane Changes - Car	5354	N/A		-92	-1.75
Total Number of Stops - Car	7392.09	N/A		Total Number of Stops - Car	7249.91	N/A		142.18	1.92
Total Travel Time - Car	88.12	N/A	h	Total Travel Time - Car	86.51	N/A	h	1.61	1.83
Total Travelled Distance - Car	2932.95	N/A	km	Total Travelled Distance - Car	2936.42	N/A	km	-3.47	-0.12
Travel Time - Car	109.4	34.87	sec/km	Travel Time - Car	108.57	35.9	sec/km	0.83	0.76
Vehicles Inside - Car	102	N/A	veh	Vehicles Inside - Car	99	N/A	veh	3	2.94
Vehicles Lost Inside - Car	0	N/A	veh	Vehicles Lost Inside - Car	0	N/A	veh	0	0.00
Vehicles Lost Outside - Car	0	N/A	veh	Vehicles Lost Outside - Car	0	N/A	veh	0	0.00
Vehicles Outside - Car	4102	N/A	veh	Vehicles Outside - Car	4105	N/A	veh	-3	-0.07
Vehicles Waiting to Enter - Car	0	N/A	veh	Vehicles Waiting to Enter - Car	0	N/A	veh	0	0.00
Waiting Time Virtual Queue - Car	0.02	0.08	sec	Waiting Time Virtual Queue - Car	0.02	0.09	sec	0	0.00

Fig. 3.11. Case 2 and Case 4 comparison - Comparison between 10% change of green signal for all intersections and the case of 20% change for all intersections and only 10% for T-intersection

### *Conclusions from the experiment*

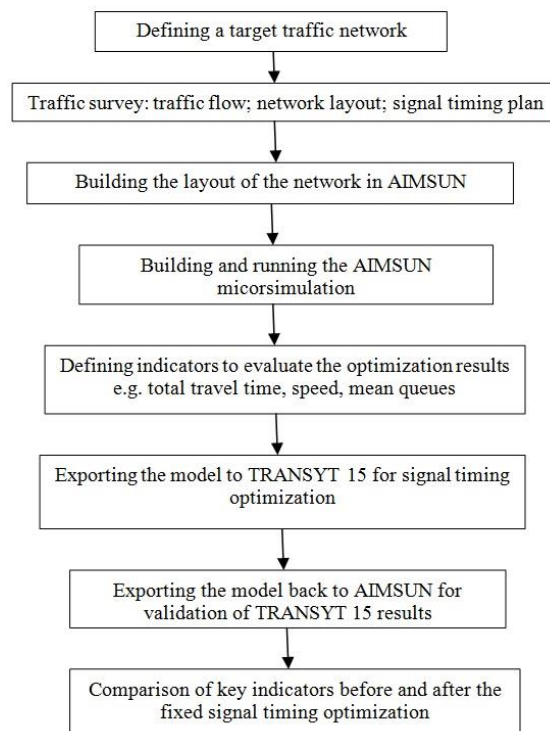
Simulating the parameters of the traffic lights saves time and money and makes possible simulations that in real conditions could lead to traffic difficulties, traffic jams, pollution and driver dissatisfaction.

In this chapter, ten traffic indicators were considered. It is clear from the research that sometimes it is necessary to consider the intersection separately within the general model. With this result, the hypothesis was proved that in an empirical way and through computer simulation better settings of the traffic lights can be found than the actual ones.

### **Improving traffic in urban environments by optimizing traffic lights**

#### *Summary of the experiment*

This experiment presents the object of study, which is modeled in the Aimsun software environment, then optimized in the TRANSYT software environment and exported back to Aimsun to validate the results. The experiment consists in optimization of the green signal and offset of traffic-light-regulated intersections, which leads to the improvement of eleven selected traffic indicators.



**Fig. 3.12.** Research workflow

There are improvements in all studied indicators after the optimization with TRANSYT (Table 3.1)

**Table 3.1.** Traffic indicators "before" and "after" optimization in TRANSYT

Traffic indicators	Before optimization in TRANSYT			After optimization in TRANSYT			Difference in %
	Units	Value	Standard Deviation	Value	Standard Deviation	Difference	
<b>Delay</b>	sec/km	51.16	40.3	36.33	35.88	-14.83	-28.99%
<b>Density</b>	veh/km	7.69	N/A	6.53	N/A	-1.16	-15.08%
<b>Flow</b>	veh/h	4095	N/A	4126	N/A	31	0.76%
<b>Harmonic Speed</b>	km/h	30.57	10.61	34.97	10.66	4.4	14.39%
<b>Queue</b>	veh	29.85	N/A	19.08	N/A	-10.77	-36.08%
<b>Number of stops</b>	#/veh/km	0.16	N/A	0.12	N/A	-0.04	-25.00%
<b>Speed</b>	km/h	34.25	11.56	38.21	10.37	3.96	11.56%
<b>Stop time</b>	sec/km	38.42	35.17	26.34	32.84	-12.08	-31.44%
<b>Total number of stops</b>		8322.87	N/A	6367.76	N/A	-1955.11	-23.49%
<b>Total travel time</b>	h	94.76	N/A	81.2	N/A	-13.56	-14.31%
<b>Travel time - car</b>	sec/km	117.76	40.53	102.96	35.96	-14.8	-12.57%

### *Conclusions from the experiment*

Optimization improvement is measured by eleven traffic indicators such as queues, speed, travel time, and more. Two cases were compared - before optimization and after optimization of traffic light signals with TRANSYT. The results show that after the optimization the traffic indicators have significantly improved, as some of the indicators reach an improvement of over 30 percent compared to the case before the optimization.

### **Optimization of the green split and the queues in the transport network through bilevel optimization**

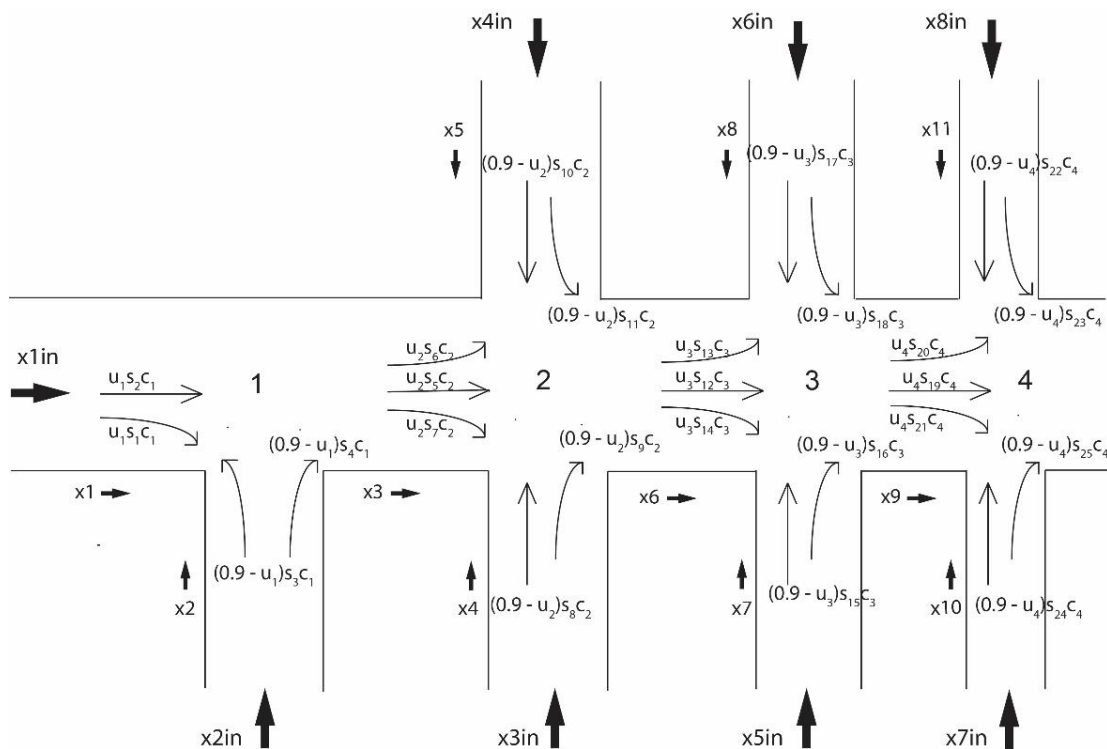
#### *Summary of the experiment*

This section describes the use of bilevel optimization, as well as the well-known store-and-forward approach to optimizing the transport network.

The need for traffic lights and the need to control them optimally have led to many studies and the invention of different approaches. The approach proposed here is based on the popular store-and-forward model. The added value of this study is that the store-and-forward model is formalized in the problem of optimizing a bilevel task. In this way, the additional parameters of the transport system are evaluated with optimal values. This study, through the application of bilevel optimization, finds the optimal duration of green splits as a value from the traffic light cycle. In

addition, vehicle queues have been kept to a minimum, but the intensity of traffic through the city network has been increased. Due to its potential advantages, bilevel optimization is used in practical areas such as portfolio optimization, optimization of railway plans, etc., (Pavlova, (2017), Stoilov et al. (2016), Stoilov and Stoilova, (2012)). This study makes a formal development of a bilevel transport model. It is demonstrated how this problem can be solved with appropriate software tools.

This study makes a composition of the store-and-forward model with an additional optimization problem, which is aimed at maximizing the flow of traffic crossing the transport network. The composition of these two problems is integrated into a two-hierarchical formal optimization model.



**Fig. 3.17.** Graphic model of the modeled urban network

The model shown in Figure 3.17. has been used as a constraint on the lower objective function, which aims to minimize queues at traffic lights. The designations of the figure are as follows:

$c_i$  - is the duration of the cycle

$u_i$  - indicates what part of the cycle is the green split

$s_i$  - is saturation flow, which is cars per hour that pass in a given direction.

$x_{1 \text{ in}} - x_{8 \text{ in}}$  - are cars entering the hour for the given approach (street)

$x_1 - x_{11}$  - are queues in front of traffic lights, measured in cars for one traffic light cycle

The aim is to minimize the queues in front of the traffic lights, the sum of all queues of  $x_1 + x_2 + \dots + x_{11}$  should be minimal, which is represented by the objective function.

The formula by which the queue in front of a traffic light is calculated is the following for  $x_1$  and it is analogous for all queues in Figure 3.17.

$$x_1 \leq x_{10} + x_{1in} - u_1 * s_2 * c_1 - u_1 * s_1 * c_1$$

The queue is equal to the cars from the previous time period at the traffic light  $x_{10}$ , plus the cars that arrive at the traffic light for a given period of time  $x_{1in}$ , minus the cars that pass through the intersection during the green signal in the right direction ( $u_1 * s_2 * c_1$ ) and turning cars ( $u_1 * s_1 * c_1$ ). The calculation of queues in this way is based on the store-and-forward model used.

The need to minimize the cycle stems from a study that a shorter traffic light cycle in an urban environment leads to better results (<https://nacto.org/>). The duration of the cycle is defined by law (Ordinance № 17, 2001) within certain limits - for minimum and maximum duration.

In Table 3.2. a comparison of the results of the simulations with a fixed time plan and with bilevel optimization is made.

**Table 3.2.** Comparison of simulation results

	<i>Current Fixed time plans</i>	<i>Bi-level optimization results</i>	
Time Series	Value	Value	Units
Delay Time	51.16	37.23	sec/km
Density	7.69	6.67	veh/km
Flow	4095	4126	veh/h
Fuel Consumption	355.53	300.6	l
Emission - CO <sub>2</sub>	874077.52	775912.65	g
Emission - NO <sub>x</sub>	1835.5	1658.83	g
Emission - PM	340.52	274.26	g
Emission - VOC	1131.69	980.42	g
Mean Queue	29.85	21.17	veh
Number of Stops	0.16	0.12	#/veh/km
Speed	34.25	38.98	km/h
Stop Time	38.42	27.73	sec/km
Total Number of Stops	8322.87	6069.72	
Total Travel Time	94.76	82.9	h
Travel Timer	117.76	103.86	sec/km

*Conclusions from the experiment*

This study develops a new formal model for controlling traffic flows in an urban environment. The problem of bilevel optimization is defined and solved. Defining a bilevel problem allows the use of two objective functions, to expand the control space of the transport task and to include a larger set of constraints.

The results of the bilevel optimization were evaluated and compared in a simulation environment with the currently established fixed plan. The network has been chosen as an important destination in the city of Sofia. The results of the bilevel optimization are compared with a set of traffic parameters. Obviously, the bilevel formalism in transport systems has great potential. All studied transport parameters give preference to the bilevel transport model.

**Cycle length optimization through bilevel optimization***Summary of the experiment*

This experiment describes the formalization of the store-and-forward model into a bilevel optimization problem. The study finds the optimal cycle length for given green spit durations. Queues in front of traffic lights are kept to a minimum. In this way, the network allows greater throughput and less congestion as a result less pollution and better traffic performance such as density, speed and more.

The results for traffic and pollution indicators are obtained from the Aimsun software product. The optimization is performed using a MATLAB script based on an additional tool called YALMIP, as well as with a modern software product TRANSYT, which is compatible with the Aimsun software package. The results show that it is wise to use the traffic optimization script, as TRANSYT only optimizes the green signal duration, but works with the cycle value from Aimsun.

In Table 3.3. a comparison of simulation data from a baseline experiment (with actual data collected), an experiment with MATLAB results, and an experiment with TRANSYT results is given.

**Table 3.3.** Comparison of traffic indicators for three cases

<i>Traffic Indicators</i>	<i>Base Case</i>	<i>MATLAB script</i>	<i>TRANSYT Optimization</i>	<i>Units</i>
Delay Time	51.16	36.4	35.51	sec/km
Density	7.69	6.91	6.27	veh/km
Flow	4095	4107	4124	veh/h
Fuel Consumption	355.53	338.06	293.98	l
CO <sub>2</sub>	875112.07	843316.7	768464.08	g
NO <sub>x</sub>	1311.3	1250.91	1130.48	g

PM (particulate matter)	223.74	210.73	174.77	g
VOC (Volatile organic compounds)	1107.33	997.88	917.66	g
Mean Queue	29.85	20.88	16.28	veh
Number of Stops	0.16	0.14	0.12	#/veh/km
Speed	34.25	37.59	38.8	km/h
Stop Time	38.42	25.48	25.76	sec/km
Total Number of Stops	8322.87	7404.37	6401.28	
Total Travel Time	94.76	85.44	77.96	h
Total Travelled Distance	2925.17	2939.58	2932.89	km
Travel Time	117.76	102.99	102.13	sec/km

### *Conclusions from the experiment*

In the experiment, a script was presented in MATLAB for optimizing the cycle length of a network of traffic lights on Shipchenski Prohod Blvd. in Sofia. The script solves a bilevel problem using the store-and-forward model as a constraint on the lower target function. A comparison is made with the results of the most modern TRANSYT optimization software. Three experiments were simulated in the Aimsun software package. In conclusion, based on the result, it can be stated that bilevel optimization has the potential to be studied in more depth as an approach for the purposes of traffic optimization.

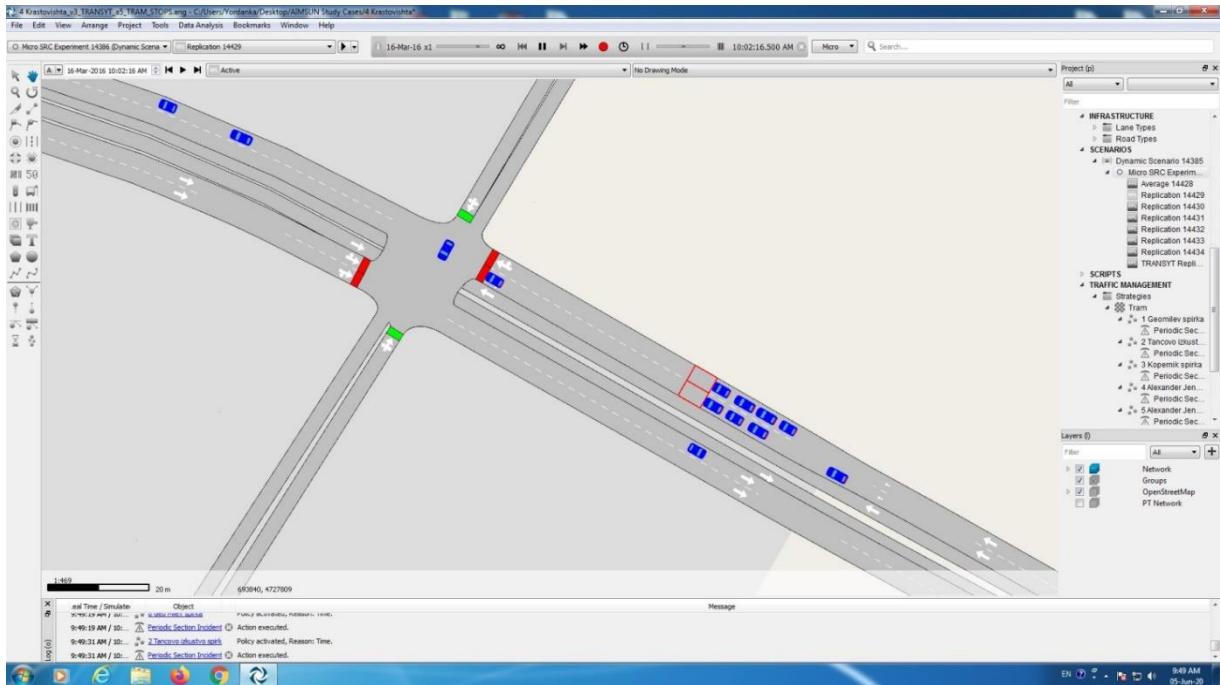
### **Complicating the model. Introduction of tram stops and street parking.**

#### *Summary of the experiment*

The experiment will result in a study on the impact of tram stops on traffic. The hypothesis is that tram stops will negatively affect traffic. However, it is more important to establish the extent of this impact, as it can serve the purposes of the city government to make informed decisions about tram schedules. Also, in a separate experiment, the computer model is further complicated by including a simulation of street parking - respectively, a comparison is made of cases without and with street parking. The capabilities of the Aimsun software package for measuring various traffic indicators, as well as indicators for fuel consumption and air pollution. The two studies are combined in this common point, as studies that complicate the studied computer model and bring it closer to the real conditions in the road network from the traffic-light regulated intersections.

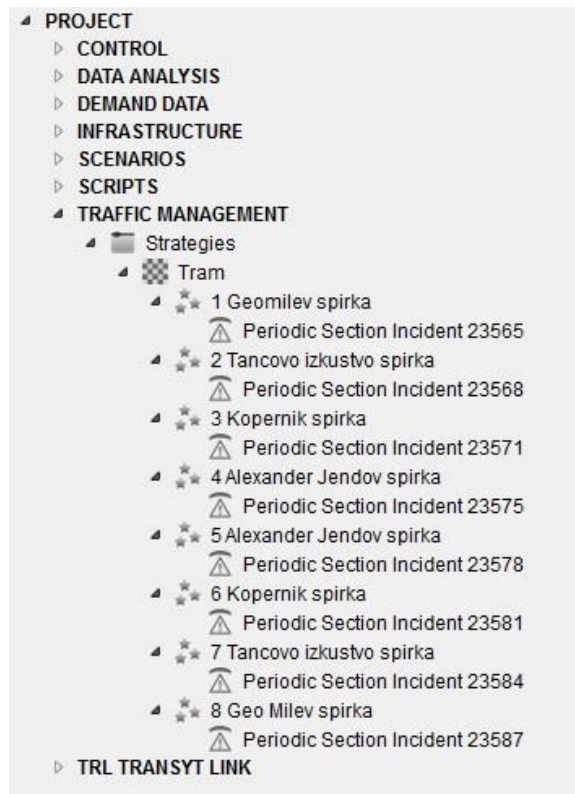
In Figure 3.18. is shown a simulation view from the Aimsun programming environment. The figure illustrates a queue of cars waiting for passengers in getting on the tram on a tram stop.





**Fig. 3.18.** A queue of cars in front of a tram stop

In Fig. 3.18. the simulations of eight bus stops on Shipchenski Prohod Blvd. are presented.



**Fig. 3.18.** The periodic incidents on the section represent tram stops on Shipchenski Prohod Blvd.

*Conclusions from the experiment*

From the performed experiments, which complicate and bring closer to the real conditions the simulation model, it is clear that the tram stops do not significantly affect the traffic indicators and the pollution of the environment, while the street parking leads to more noticeable changes in the traffic indicators and negatively affects the environment.

It can be concluded that all studied traffic indicators deteriorate in the case of street parking compared to the case in which there is no street parking. Another not very obvious result is the increase in fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions, which in a careful analysis is logical due to the reduced capacity of the network and traffic jams that are formed by parking on the street.

### **Adaptive control and research of traffic indicators, fuel consumption and environmental pollution**

*Summary of the experiment*

There are different approaches related to reducing car pollution. This study focuses on traffic light signaling control policies and their impact on air pollution. A software simulation with the software products Aimsun and TRANSYT was performed. Aimsun uses the ecological model of (Panis et al. (2006), (Panis et al., (2011))). Experiments lead to the conclusion that traffic pollution may be affected by changes in traffic light signal control policies.

In Table 3.8. fuel consumption and harmful emissions by different traffic control policies are presented.

**Table 3.8.** Fuel consumption and harmful emissions by different traffic control policies

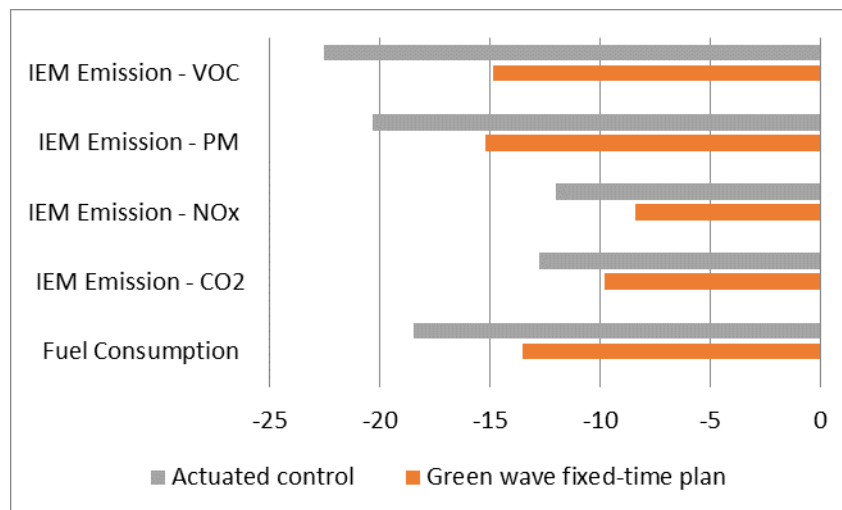
<i>Parameters - Car</i>	<i>Current signal timing plan</i>	<i>Green wave fixed-time plan</i>	<i>Actuated control</i>	<i>Units</i>
Fuel Consumption	355.53	307.52	289.86	l
IEM Emission - CO <sub>2</sub>	874077.52	788275.5	762346.78	g
IEM Emission - NO <sub>x</sub>	1835.5	1680.73	1614.73	g
IEM Emission - PM	340.52	288.71	271.36	g
IEM Emission - VOC	1131.69	963.57	876.51	g

Table 3.9. presents the relative differences of green wave fixed-time plan and actuated control compared to the current signal timing plan in terms of fuel consumption and harmful emissions.

**Table 3.9.** Fuel consumption and harmful emissions in different traffic signal policies  
(relative differences)

<i>Parameters - Car</i>	<i>Current signal timing plan (in absolute value)</i>	<i>Green wave fixed-time plan (change in %)</i>	<i>Actuated control (change in %)</i>
Fuel Consumption	355.53	-13.50	-18.47
IEM Emission - CO <sub>2</sub>	874077.52	-9.82	-12.78
IEM Emission - NO <sub>x</sub>	1835.5	-8.43	-12.03
IEM Emission - PM	340.52	-15.21	-20.31
IEM Emission - VOC	1131.69	-14.86	-22.55

Figure 3.20 illustrates the relative changes of the studied indicators for fuel consumption and air pollution depending on the type of control. The current fixed time policy is considered to be the basis (Table 3.8 and Table 3.9). In comparison, a red pole shows a fixed plan optimized for green wave, and a green pole shows actuated control policy. Figure 3.20 shows that actuated control policy leads to a reduction in fuel consumption and air pollutants to a greater extent than the observed reduction in fixed time control optimized for green wave.



**Fig. 3.20.** Relative changes in indicators depending on the type of management

Various signal policies affecting air pollution emissions have been evaluated. Microsimulations were performed with Aimsun. TRANSYT is also used to optimize the fixed time signal plan for green wave. The results of the study clearly show that when traffic in real time is taken into

account, both air pollution and fuel consumption are reduced.

## **Conclusion**

The third chapter presents the performed experiments for the dissertation. The object of optimization was presented - a network of four traffic-light-controlled intersections. The object is modeled in the Aimsun simulation environment. Description and basic information about the used software products - Aimsun, TRANSYT and MATLAB are also presented in this chapter of the dissertation.

The simulations and experiments performed are described in detail. They are related both to the collection of data on the geometry of the road network and the intensity of traffic in this network, and to the subsequent preparation of computer simulations and a formal mathematical model. Based on the models - mathematical and simulation, and the applied optimization methods, the results are evaluated.

The chapter presents two bilevel optimization problems solved by using the solvebilevel() function. The solutions are implemented in the Aimsun simulation environment and the results were derived in the form of traffic parameters to be compared with the simulation in TRANSYT. The achieved results are related to the increase of the network capacity, the reduction of the queues in front of the traffic lights and the reduction of the traffic jams. Bilevel optimization allows for more objective functions, control parameters and more constraints in the control space.

The object of study has been complicated by additions such as tram stops and street parking, which phenomena are available in real conditions. In this way, the simulation model was brought closer to the real conditions in the road network and will be the subject of more detailed future research.

Attention was also paid to the impact of the optimization of traffic on fuel consumption and indicators of air pollution. This relationship results in reduction of queues and reduction in both harmful emissions and fuel consumption. This reduction benefits society from a health perspective. Therefore, optimization of traffic in urban conditions is important not only for faster movement from one point of the city to another, but also for optimizing unwanted aspects of traffic such as air pollution.

## Chapter 4

### SIMULATION AND NUMERICAL EXPERIMENTS AND RESULTS

#### *Comparison of results from simulation experiments*

This chapter presents, in tabular and graphical form, the results of simulation and numerical experiments. These are the results of the experiments, which are described separately in the previous chapter 3. A comparison is made between the individual experiments, comparing the optimized results with the results of the experiment with basic case scenario and taking into account the improvement of several traffic indicators. In addition to the comparison between the traffic indicators, in the different experiments, a comparison was made of the fuel consumption and two environmental pollutants - carbon dioxide and particulate matter. This comparison aims to show that optimal traffic management also favors indicators of environmental pollution.

The first column of Table 4.1. presents key traffic indicators, fuel consumption and environmental pollutants. The second column of the table presents the results of the simulation of the base case scenario experiment. The third column presents the results of simulation after the introduction of data optimized by bilevel optimization, using the solvebilevel() function in MATLAB for the duration of the green splits of the studied road network. The fourth column presents the results of a simulation in which optimized cycle data is entered after bilevel optimization using the solvebilevel() function in MATLAB. The fifth column is optimization through the TRANSYT software package, which is used as a standard to evaluate a number of traffic management strategies worldwide. The last sixth column presents the units of measurement.

**Table 4.1.** Comparison of traffic indicators, fuel consumption and environmental pollution in four simulations

	<i>Current settings</i>	<i>Bilevel optimization with upper objective function green split</i>	<i>Bilevel optimization with upper objective function cycle length</i>	<i>Optimization of current settings through TRANSYT</i>	<i>Units</i>
Delay	51.16	37.23	36.4	35.51	sec/km
Density	7.69	6.67	6.91	6.27	veh/km
Flow	4095	4126	4107	4124	veh/h
Queue	29.85	21.17	20.88	16.28	veh
Speed	34.25	38.98	37.59	38.8	km/h
Total number of stops	8322.87	6069.72	7404.37	6401.28	#
Travel time	117.76	103.86	102.99	102.13	sec/km

Fuel consumption	355.53	300.6	338.06	293.98	liter
CO <sub>2</sub>	874077.52	775912.65	843316.7	768464.08	gram
PM	340.52	274.26	210.73	174.77	gram

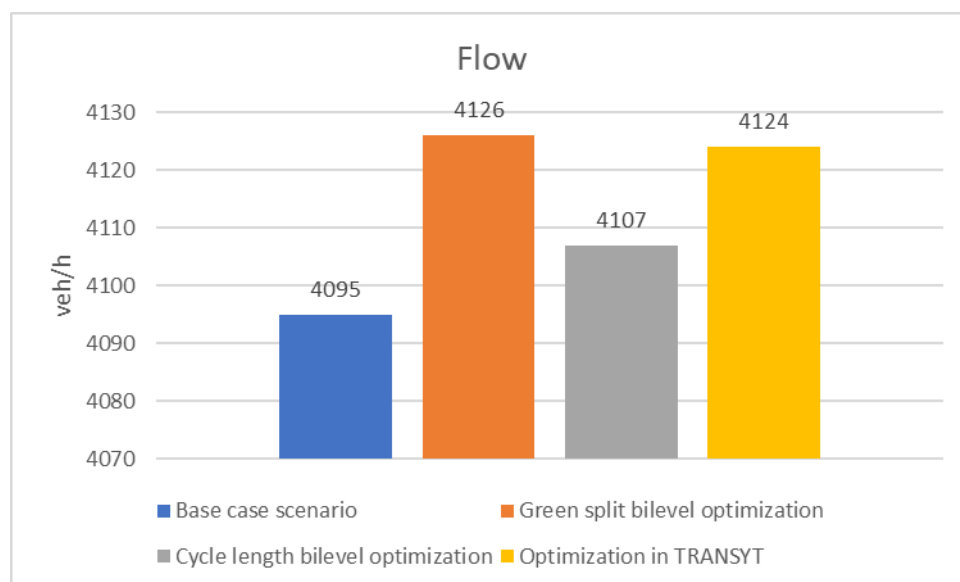
A general conclusion from the data presented in the table is that the best solutions are achieved when using the software product TRANSYT. Here, however, it is important for the study to be noticed that the differences in the numerical results of the other two experiments using bilevel optimization are very close to the results achieved with TRANSYT.

This observation leads to two significant conclusions:

- First, the bilevel optimization problem yields plausible results that are comparable to a software package that has been on the market for years and that, as mentioned, is used to evaluate different traffic management strategies.
- Second, because the results may be affected by the change in the input data, it is possible that for certain input data the dual hierarchical optimization turns out to achieve better values of the traffic indicators than are achieved with the software package TRANSYT. However, this conclusion is rather a hypothesis for future research in the field of using bilevel optimization for the purpose of improving traffic in urban environments.

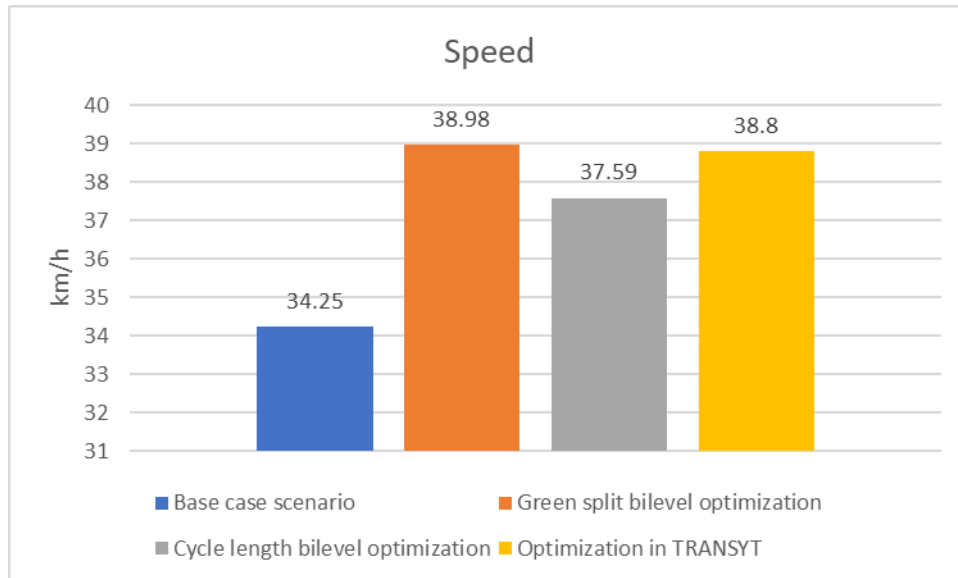
The speed of reaching a solution when using MATLAB and TRANSYT should also be mentioned. When using MATLAB, the solution of the problem is achieved several times faster than it is necessary for TRANSYT to do the optimization of the road network.

Figure 4.1 presents the traffic flow data for the four simulations. As can be seen, the lowest flow is in the experiment with base case scenario - 4095 cars / hour. Surprisingly, with this indicator, the flow of the experiment with green split optimization is the highest - 4126 cars / hour, although with a slight advantage over the optimization with TRANSYT.



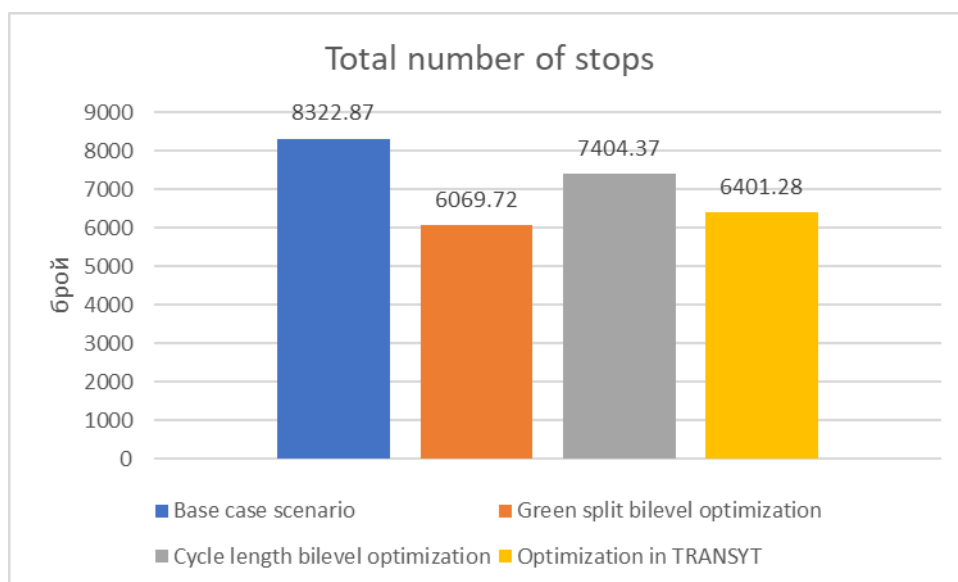
**Fig. 4.1.** Comparison of flow in four simulations

The speed shown in Figure 4.5 is the lowest for the base case experiment, and for the second time the bilevel optimization of the green split (38.98 km / h) is slightly ahead of TRANSYT (38.8 km / h). Exact values for each experiment are shown in Figure 4.5.



**Fig. 4.5.** Speed comparison in four simulations

The total number of stops is shown in Figure 4.6. He is the highest again for the first pillar of the figure. The third traffic indicator shows the best results for bilevel optimization of the green split (6069.72 number of stops) compared to TRANSYT (6401.28 number of stops).



**Fig. 4.6.** Comparison of total number of stops in four simulations

## **Conclusion**

In the fourth chapter a comparison of the results of the conducted simulations based on traffic indicators is made. This chapter is essential in terms of illustrating the benefits of bilevel optimization for urban traffic purposes. The bilevel optimization is placed in the context of a comparison with one of the oldest and most widespread software products, specifically developed for the optimization of a network of traffic-light-controlled intersections - TRANSYT.

The bilevel tasks defined and solved in this dissertation work gave close results with the results of TRANSYT, as one of the bilevel problems showed a slight advantage over TRANSYT in three indicators - flow, speed and number of stops. This gives grounds for further research in the field of using the bilevel optimization method for the purposes of optimization of urban road traffic.

## **CONCLUSION**

Congestions are often a problem related to the growth of cities and the increase in the number of vehicles. This necessitates the search for solutions to deal with the problem of congestion and difficult traffic in large cities and in particular in Sofia.

An overview of some significant concepts and theoretical statements in the field of urban traffic is made. In this regard, the concepts related to traffic-light-signal regulation are clarified. Three traffic models are considered, one of which - store-and-forward model, is the basis for the formulation of a traffic model in the selected network of intersections. Mention is also made of traffic management strategies that have been developed and implemented worldwide.

The achievements in the field of defining and solving bilevel optimization problems in the field of optimization of urban traffic in a network of intersections are considered. A bilevel optimization problem is presented. The same formal statement in the context of car traffic in urban environment - control of traffic-light-regulated junctions.

The object of optimization - a network of four traffic-light-regulated intersections. The object is modeled in the Aimsun simulation environment. For the purposes of the experiments, a field study was conducted and data on the geometry of the road network and the traffic flow in the studied section were collected.

Attention was also paid to the impact of the optimization of the traffic on fuel consumption and indicators of air pollution. This relationship is expressed in the fact that the reduction of queues and congestion reduces both harmful emissions and fuel consumption. This reduction benefits society from a health perspective. Therefore, optimization of traffic in urban conditions is important not only for faster movement from one point of the city to another, but also for optimizing unwanted



aspects of traffic such as air pollution.

Determining the duration of traffic light signals can be done using simulation models. The use of simulation software has the advantage that no real changes in traffic are required when trying out different traffic light settings. The settings are made in a simulation environment, in this dissertation the software used is Aimsun. The model and settings of traffic lights, as well as other parameters of infrastructure and traffic can undergo many changes within the computer simulation.

Another simulation software product is MATLAB, which is used for a numerical model of the object of simulation and optimization - a road network of four intersections along a main boulevard in Sofia.

The results of the solution of the bilevel problem are compared with the results of the software product TRANSYT, used worldwide for evaluation of traffic management strategies. The results show that one of the bilevel problems gives an advantage over TRANSYT in three traffic indicators. In summary, the comparisons lead to the conclusion that the solutions of the bilevel problems are closet to the solution of TRANSYT than to the results of simulation of base case scenario. Thus, with bilevel optimization, better traffic indicators are achieved than the simulation with base case scenario. The advantage of MATLAB over TRANSYT is the faster calculation, which is achieved. Bilevel optimization allows for more objective functions, control parameters and more constraints in the control space. In particular, bilevel optimization achieves greater throughput of the transport network from intersections, reduces queues at traffic lights and thus reduces congestion at traffic lights. The effects of better traffic indicators are also felt in fuel consumption and harmful emissions, which decrease with the improvement of traffic indicators.

## CONTRIBUTIONS

The contributions of the dissertation are as follows:

1. A mathematical model of road network has been made - an urban road network, regulated with traffic light signaling, in order to optimize the network. The model allows to make analytical and numerical simulations to determine the optimal values of a system of traffic lights.

2. A new mathematical model is defined through two hierarchically related tasks for optimization of urban traffic, which allows to determine the optimal values of a larger number of control variables: cycle and duration of green light of a system of intersections.

3. The light signaling of traffic lights and the cycle duration have been optimized by applying the developed hierarchical model for optimization from point 2. The results of the numerical experiments show that the obtained solutions can be determined in real time, which allows to adapt the control of traffic light system according to the dynamics of transport traffic.

4. A simulation computer model of a network of intersections has been developed. The model allows to take into account additional conditions in traffic management, which cannot be formalized analytically, such as taking into account the presence of a tram line, permission to park in a system of transport intersections.

5. A comparison of the results obtained from the analytical optimization through the developed bilevel model and the simulation results of the computer model is made. It is shown that the bilevel model allows the application of real-time control due to the faster calculation of the optimal control interactions compared to the simulation results, which require significant implementation time.

**Table Conclusion.1.** Relationship between results, structure of the dissertation and publications.

Task	Contribution	Publication	Chapter
A mathematical model of the site has been compiled - an urban road network, regulated with light signaling, in order to optimize the simulated object	Scientifically applied	1, 2	3
A new mathematical model is defined through two hierarchically connected tasks for optimization of urban traffic.	Scientifically applied	1, 2	3
The light signaling of traffic lights and the duration of the cycle have been optimized by applying the developed hierarchical model for optimization from point 2.	Scientifically applied	1, 2	3
A computer model of the object of optimization by means of a simulation environment has been developed.	Applied	4, 5	3
Complicating the computer model of the	Applied	3	3

<p>object. The model allows to take into account additional conditions in traffic management, which cannot be formalized analytically, such as taking into account the presence of a tram line, permission to park in a system of transport intersections.</p>			
<p>A comparison is made of the results obtained from the analytical optimization through the developed bilevel model and the simulation results of the computer model.</p>	Scientifically applied	2	4

## ACKNOWLEDGMENTS

I would like to express special thanks to my supervisor Prof. Todor Stoilov, DSc., for his time, useful advice and constructive criticism. I would also like to thank him for the given instructions in the field of traffic optimization in urban environments, which also determined the direction of the conducted scientific-applied research in the present dissertation.

Thanks to the colleagues:

Prof. Krasimira Stoilova, DSc,

Assoc. Prof. Dr. Boriana Vachova, PhD,

Assist. Prof. Professor Stanislav Dimitrov, PhD,

Assist. Prof. Vladimir Ivanov, PhD,

Assist. Prof. Kristina Pavlova, PhD,

Assist. Prof. Elena Paunova-Hubenova, PhD,

Assist. Prof. Elisaveta Trichtkova-Kashumova PhD,

for the provided methodological assistance, advice and recommendations.

I would also like to thank all those who directly or indirectly contributed to the realization of this dissertation.

## REFERENCES

- Aboudolas K. , M. Papageorgiou, E. Kosmatopoulos, Store-and-forward based methods for the signal control problem in large-scale congested urban road networks, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, ISSN: 0968-090X, Volume 17, Issue 2, Elsevier, 2009, pp. 163–174, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2008.10.002>,
- Aimsun Microscopic 8 Macroscopic Modelling Manual, October 2013, Copyright 2005-2013 TSS Transport Simulation Systems
- Binning James C , *TRANSYT 15 User Guide - AG70*, Issue F, TRL Limited 2013, 2014, 2015, <https://www.scribd.com/document/361136853/Transyt-15-User-Guide>
- Diakaki Christina, Markos Papageorgiou, Kostas Aboudolas, A multivariable regulator approach to traffic-responsive network-wide signal control, *Control Engineering Practice*, Volume 10, Issue 2, Elsevier, February 2002, Pages 183-195, [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(01\)00121-6](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(01)00121-6), <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0967066101001216>
- Gazis, D.C., Optimal Control of a system of Oversaturated Intersections, *Operations Research*, Vol. 12, No. 6, Special Transportation Science Issue, *INFORMS*, 1964, pp. 815-831, <https://www.jstor.org/stable/168170?seq=1>
- Panis L, Broekx S, Liu R. Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits. *Science of the Total Environment* 2006; 371: 270 – 285
- Panis L. Int, C. Beckx, S. Broekx, I. De Vlioger, L. Schrooten, B. Degraeuwe, L. Pelkmans, PM, NOx and CO2 emission reductions from speed management policies in Europe, *J. Transport Policy*, Vol. 18, Elsevier, 2011, pp. 32–37, doi:10.1016/j.tranpol.2010.05.005
- Papageorgiou, M., An Integrated Control Approach for Traffic Corridors, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 3, Issue 1, 1995, pp. 19-30, [https://doi.org/10.1016/0968-090X\(94\)00012-T](https://doi.org/10.1016/0968-090X(94)00012-T)
- Stoilova K., T. Stoilov. Integrated management of transportation by bi-level optimization. *International Conference Automatics and Informatics- ICAI*, 1-3 October 2020, Technically supported by: Technical University of Varna, IEEE by Bulgarian section and Federation of the Scientific Engineering Unions, Varna, Bulgaria – ICAI2020 (in print)].
- Stoilova K., T. Stoilov. Bi-level optimization application for urban traffic management. *Annals of Computer science and Information Systems*, Vol.21, ISSN 2300-5963. *Proceeding of the 2020 Federated Conference on Computer Science and Information Systems*, Sept. 6-9, 2020, Sofia, Bulgaria, pp.327-336
- Teodorovic Dusan, Milan Janic, *Transportation Engineering: Theory, Practice, and Modeling*, ISBN: 978-0-12-803818-5, Elsevier Inc, 2017, pp. 1-882
- ORDINANCE № 17 or 23 .07.2001 r. to regulate traffic on roads with traffic light signals, 2015, (in Bulgarian) [http://www.api.bg/files/8114/5923/5059/Naredba\\_17\\_23-07-2001\\_v\\_sila\\_2015.pdf](http://www.api.bg/files/8114/5923/5059/Naredba_17_23-07-2001_v_sila_2015.pdf)
- Pavlova K., *Dissertation: Synthesis of algorithms for optimal control of a transport system*, IICT-BAS, Sofia, 2017, pp. 1 – 133, (in Bulgarian)
- National Association of City Transportation Officials, <https://nacto.org/publication/transit-street-design-guide/intersections/signals-operations/short-signal-cycles/>  
<https://yalmp.github.io/command/solvebilevel>

## DECLARATION OF ORIGINALITY

Hereby, I declare that I have composed the presented thesis independently on my own and without any other resources than the ones indicated.

All thoughts taken directly or indirectly from external sources are properly denoted as such.

This work has neither been previously submitted to another authority nor has it been published yet.

Signature:.....

(Y. Boneva)



**БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ**

## **АВТОРЕФЕРАТ НА ДИСЕРТАЦИЯ**

за присъждане на образователна и научна степен “доктор” по научна специалност “Приложение на принципите и методите на кибернетиката в различни области на науката “

### **ОПТИМИЗИРАНЕ НА ТРАФИК В ГРАДСКА СРЕДА**

*Йорданка Любомирова Бонева*

**Ръководител:** Проф. Тодор Стоилов

**Научно жури:**

Проф. Коста Бошнаков

Проф. Идилия Бачкова

Проф. Милена Лазарова-Мицева

Проф. Владимир Монов

Проф. Димитър Карастоянов



**Институт по информационни и  
комуникационни технологии**

**Секция „Разпределени информационни и  
управляващи системи“**

## **Обща характеристика на дисертационния труд:**

### **Актуалност на проблема:**

Актуалност на проблема за оптимизиране на трафик в градска среда в глобален мащаб е свързан с развитието на градовете. Актуалност на проблема по отношение на България е свързана с разрастването на столицата София, където се струпва все повече население, от там и автомобили и нужда от по-ефективно и ефикасно управление на трафика. Управлението на трафика в градска среда се осъществява основно посредством светофарните уредби, които разделят потока на автомобили, както и на пешеходци във времето.

### **Обект и област на изследването:**

Обекта на изследване в дисертационния труд е мрежа от светлинно сигнално регулирани кръстовища по протежението на бул. Шипченски проход в гр. София. Областта на изследване е транспортен трафик в градска среда.

### **Съдържание на дисертацията:**

В **Глава 1** се разглеждат основни понятия при управление на трафика, както и различни модели за управление на трафик в градска мрежа. Дефинирани са основни за дисертационната работа понятия като продължителност на цикъла, продължителност на зеления сигнал като част от цикъла, offset и други. Важна част от главата са моделите за интензивност на трафика, един от които използва принципа store-and-forward, прилаган за дефиниране и решаване на задачите в дисертационната работа.

**Глава 2** представя йерархична оптимизационна задача за управление и оптимизиране на трафик в градска среда. Представено е досегашно изследване в областта на двуйерархична оптимизация за целите на оптимизация на трафика. Описана е и същността на двуйерархичната задача.

В **Глава 3** са описани проведени експерименти за моделиране, симулиране, оптимизиране на градски трафик върху избран обект от градска транспортна мрежа. Всеки експеримент е описан накратко в резюме, представени са резултати от съответното изследване и са направени изводи. Направени са над 6 експеримента за оптимизиране на трафика с различни акценти: прилагане на оптимизация с програмен продукт TRANSYT, прилагане на резултати от две двуйерархични задачи в програмния продукт Aimsun, оценка на трафични показатели при извършените симулации, оценка на консумацията на гориво и замърсителите на въздуха, усложняване на компютърния модел посредством добавяне на



ефекта от трамвайни спирки и паркиране и улицата и др.

**Глава 4** представя сравнение между извършените изследвания и експерименти в Глава 3. Глава 4 демонстрира оптимизацията на трафика по определени показатели. В тази глава са сравнени резултатите от двуйерархични оптимизационни задачи с резултатите от симулацията с реални данни и с резултатите от TRANSYT. В резултат на сравненията са направени и съответните изводи.

В заключението са обобщени основни аспекти на дисертационната работа. Направен е и преглед на основните изводи.

Дефинирани са приносите на дисертационния труд, бъдещите насоки на работа, представени са научните публикации по дисертацията, както и научно-изследователските проекти, по които е работено във връзка с изследванията по дисертационната работа и цитирания.

### **Цел и задачи на дисертацията:**

**Цел** на дисертационната работа е да се разработи математически модел за решаване на изследователска задача за оптимизиране на пътен трафик в градски тип транспортна мрежа.

Обект на изследването е мрежа от четири свързани, светлинно регулирани кръстовища, разположени по булевард „Шипченски проход“ в град София, България.

Поставени са за решаване следните **задачи** във връзка с конкретизиране на целта на дисертационната работа:

- Разработване на математически модел на транспортна мрежа от градски тип.
- Разработване на йерархичен модел за управление на мрежа от кръстовища;
- Дефиниране и решаване на йерархични оптимизационни задачи;
- Изграждане на компютърен модел и симулации в програмния пакет Aimsun;
- Изпробване на резултати без и с данни от решената оптимизационна задача в симулационна среда Aimsun;
- Оценка на получените решения посредством сравнение TRANSYT – програмен продукт, който се използва в световен мащаб за оценка на управляващи стратегии в областта на автомобилния трафик.

### **Апробация на резултатите:**

Част от резултатите, включени в дисертационния труд, са представени на следните международни конференции: Automatics and Informatics'2019 - София., CompSysTech'20 - Русе, TechSys 2020 – Пловдив и др.

## Списък на публикациите по дисертацията

1. **Boneva Y.**, Split and Queue Optimization in Transport Network through Bi-level Optimization, CompSysTech '20: ACM International Conference Proceeding Series, Ruse, June 2020 г., ISBN: 978-1-4503-7768-3, Association for Computing Machinery (ACM), New York, USA, pp. 175-179, SJR(SCOPUS) 2019: 0,2, <https://doi.org/10.1145/3407982.3407995>, (Отличен и награден с кристална статуетка доклад в съответната сесия)
2. **Boneva Y.**, Cycle Length Optimization through Bi-level Optimization, 9<sup>TH</sup> International Scientific Conference “TechSys 2020” – Engineering, Technologies and Systems, Technical University of Sofia, Plovdiv Branch, 14-16 May 2020, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, ISSN:1757-8981E-ISSN:1757-899X, Volume 878, Published online: 21 July 2020, Published under licence by IOP Publishing Ltd, ID: 012024, pp. 1-6, Paper OPEN ACCESS, SJR (SCOPUS) 2019: 0.2, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/878/1/012024>, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/878/1/012024/pdf>
3. **Boneva Y.**, T. Stoilov, Simulation of Tram Stops and their Influence on Traffic – Case Study in Sofia, Bulgaria, Journal "Information Technologies and Control", Online Print ISSN 1312-2622, ISSN: 2367-5357, Issue 3, SAI, 2019, pp. 19-25, DOI: 10.7546/itc-2019-0013, [http://www.aksyst.com:8081/Sai/Journal/Docum/Vol\\_3\\_03\\_2019.pdf](http://www.aksyst.com:8081/Sai/Journal/Docum/Vol_3_03_2019.pdf)
4. **Boneva Y.**, Fixed-Time Signal Timing Versus Actuated Control of Traffic Lights – Case Study of Shipchenski Prohod Blvd. in Sofia, Bulgaria, Proceedings for International Conference AUTOMATICS AND INFORMATICS'2019, 03-05 October 2019, ISSN 1313-1850, CD: ISSN 1313-1869, John Atanasoff Society of Automatics and Informatics, Sofia, Bulgaria, 2019, pp. 53 – 56. . (Представен като най-добър доклад в съответната сесия)
5. **Бонева Йорданка**, Оптимизация на автомобилен трафик на светлинно регулирани кръстовища посредством симулационна среда Aimsun, Научно списание „Механика Транспорт Комуникации“, ISSN 1312-3823 (print), ISSN 2367-6620 (online), том 16, брой 2, 2018 г, статия № 1663, ВТУ „Тодор Каблешков“, стр. I-1 – I-9. <https://mtc-aj.com/library/1663.pdf>

## Цитирания:

### *Цитиран труд*

**Бонева Йорданка**, Оптимизация на автомобилен трафик на светлинно регулирани кръстовища посредством симулационна среда Aimsun, Научно списание „Механика Транспорт Комуникации“, ISSN 1312-3823 (print), ISSN 2367-6620 (online), том 16, брой 2,

2018 г, статия № 1663, ВТУ „Тодор Каблешков“, стр. I-1 – I-9, <https://mtc-aj.com/library/1663.pdf>

#### *Място на цитиране*

1. Ilchev Svetozar, Rumens Andreev, Zlatoliliya Ilcheva, Ekaterina Otsetova-Dudin, Three-channel laser diode driver for multimedia laser projectors, International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing, ISSN: 1998-4464, Vol. 14, 2020, pp. 451-459, DOI: 10.46300/9106.2020.14.60, (SJR (SCOPUS) 2019: - 0.16, Q4)
2. Ilchev S, Andreev R, Ilcheva Z., Display of Computer-Generated Vector Data by a Laser Projector, CompSysTech '20: ACM International Conference Proceeding Series, Ruse, June 2020 г., ISBN: 978-1-4503-7768-3, Association for Computing Machinery (ACM), New York, USA, pp. 11-18, <https://doi.org/10.1145/3407982.3407990>, SJR (SCOPUS,) 2019: 0,2

#### **Участие в проекти:**

1. Проект с ФНИ, КП-06-Н37/6 от 6.12.2019, Моделиране и оптимизация на градски трафик в мрежа от кръстовища (Modelling and optimization of urban traffic in network of crossroads), Финансираща институция: ФНИ, Ръководител: проф. д.т.н. Красимира Петрова Стоилова
2. Договор КП-06-М27/9 от 2018г. Съвременни цифрови методи и средства за изследване и моделиране на транспортни потоци, "Конкурс за финансиране на научни изследвания на млади учени и докторанти - 2018 г.- 2020 г., Финансираща институция: ФНИ, Ръководител: гл. асистент д-р В. Иванов.

## Глава 1

**МОДЕЛИ НА УПРАВЛЕНИЕ НА ТРАНСПОРТЕН ТРАФИК**

Светлинната регулация е един от най-ефективните и гъвкави начини за управление на трафика. Възникващите конфликти от движението на трафика в различни посоки е решено чрез принципа разделяне на потоците по време. Предимствата на светлинната регулация включват движение на трафика в определена последователност, повишен капацитет на кръстовищата и изисква прост геометричен дизайн (Teodorovic и Janic, 2017).

Градската мрежа включва няколко улици, които се пресичат в кръстовища, които могат или не могат да бъдат управлявани от светлинна сигнализация. Градското кръстовище се състои от набор от подходи и обща зона на пресичане - кръстовище. Подходът е част от улица, състояща се от една или повече ленти. Подстъп (англ. approach) е водещи до общата зона на пресичане на кръстовището, така че трафикът върху него има предимство (англ. r.o.w.) едновременно и превозно средство, в съответната опашка може да очаква да премине по време на сигнала приблизително по същото време, каквато и лента да избере. Трафикът на кръстовище се разделя на потоци. Поток е най-малката част от разглеждания трафик и се образува от всички превозни средства, които пресичат кръстовището от един и същи подстъп. Два потока се наричат съвместими когато могат спокойно да преминават кръстовището едновременно; в противен случай те се наричат несъвместими или конфликтни. Цикълът на сигнала е едно повторение на основната серия от комбинации от сигнали на кръстовище. Продължителността му се нарича времетраене на цикъла или просто цикъл. Етап (или фаза) е част от цикъла, по време на който един набор от потоци има предимство. Константни загубени времена (англ. constant lost times) от няколко секунди са разположени между етапите, за да се избегнат конфликт между несъвместими потоци на последователни етапи (Diakaki и др., 2002).

*Цикъл на светофара*

На фигура 1.3.е показана продължителността на цикъла на светофара (Mathew, 2014).



**Фиг. 1.3.** Продължителност на цикъла

*Част на зеления сигнал от цикъла (англ. Green splitting)*

Част на зеления сигнал от цикъла е разпределение на ефективното зелено време във всяка от фазите.

*Подходът store-and-forward*

Подходът store-and-forward първоначално е предложен от Gazis за представяне на състоянието на трафика при претоварени кръстовища и от тогава се използва в различни трудове свързани с управление на трафика. (Gazis, (1964), Papageorgiou, (1995)). Концепцията е възприето от теорията на комуникационните мрежи.

Представено е звено  $z$ , което свързва две кръстовища  $i - 1$  и  $i$  (фигурата 1.4.), динамиката на трафика на звено  $z$  е дадена посредством уравнението за запазване (уравнение 1.22.), (Aboudolas и др., 2009). Опашките са представени посредством уравнение 2-8. По време на периоди на висока натовареност това ограничение може автоматично да доведе до подходящо натрупване на коли в дадено звено, за да се предпазят следващите след него области от претоварване. Приливът на коли към звено  $z$  е представен посредством уравнение 1.23.

$$x_z(k+1) = x_z(k) + T[q_z(k) - s_z(k) + d_z(k) - u_z(k)] \quad (1.22)$$

$$0 \leq x_z(k) \leq x_{z, \max}$$

$$q_z(k) = t_{i,z} u_i(k) \quad (1.23)$$

където:  $T$  е дискретната времева стъпка

$k = 0, 1, \dots$ , дискретен времеви индекс

$x_z(k)$  = броят превозни средства в звено  $z$  по време на  $kT$

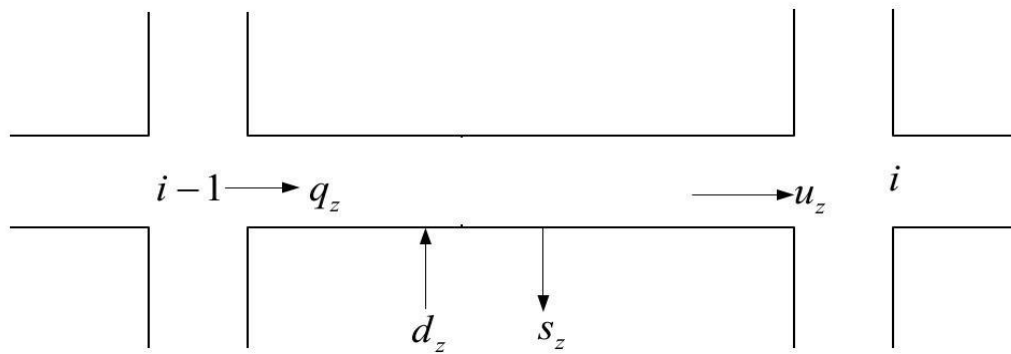
$q_z(k), u_z(k)$  = притокът и отливът от звено  $z$  в периода  $[kT, (k+1)T]$

$d_z(k), s_z(k)$  = интензивността на пристигащите, съответно интензивността на излизащите автомобили от звено  $z$

$x_{z, \max}$  = максимално допустимата дължина на опашката, в брой превозни средства

$t_{i,z}$  = съотношение на завиващите към звено  $z$ , които навлизат в кръстовище  $i$

На фигура 1.4. е показан пример за модела Store-and-Forward (Liu, 2015).



**Фиг. 1.4.** Пример за модела Store-and-Forward

### Заклучение

В глава първа бе направен обзор на по-значими понятия и теоретични постановки в областта на трафика в градска среда, което да постави основата за по-нататъшното разглеждане на темата. В тази връзка са изяснени понятия, свързани със светлинно сигнално регулиране. Описана е математическата основа на светлинното сигнално регулиране, която е важна за дефинирането на оптимизационните задачи в дисертационната работа.

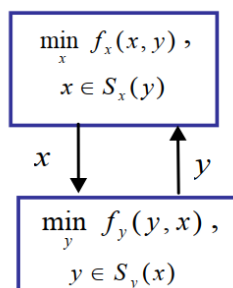
Разгледан е подхода store-and-forward, който е в основата на формулирането на модел на трафика и решаването на оптимизационна задача за избрана мрежа от кръстовища.

## Глава 2

## АНАЛИЗ НА ЙЕРАРХИЧНИ ОПТИМИЗАЦИОННИ ЗАДАЧИ И МОДЕЛИ

## Двуйерархична оптимизация

Идеята за двуйерархична стратегия за управление се отнася до решаването на две задачи за оптимизация, които са взаимосвързани (Фиг. 2.2), (Stoilova и Stoilov. 2020).



Фиг. 2.2. Двуйерархична оптимизация

Задачата на горното ниво приема стойностите на  $y = y^*$  като известни параметри и намира оптимално решение  $x^*(y)$  чрез решаване на задачата

$$\begin{array}{l} f_x(x, y^*), \\ x \in S_x(y^*). \end{array} \quad (2.11)$$

Решението  $x^*(y)$  е функция на параметъра  $y$ . Съответно, задачата с по-ниското ниво приема  $x = x^*$  като известни параметри и намира решение  $y^*(x)$  като функция на  $x$ .

Тези две взаимосвързани задачи за оптимизация дават решение на глобалната задача.

$$\begin{array}{l} f_x(x, y), \\ x \in S_x(y), \\ y \in \arg\{f_y(y, x) \in S_y(x)\} \end{array} \quad (2.12)$$

което означава, че  $x^{\text{opt}}$  е решението на задачата за оптимизация, където  $y$  променя основната функция  $f_x(x, y)$  и допустимата област  $S_x(y)$ . Също така,  $y$  е решение на задачата от ниско ниво, повлияно от своя страна от  $x$ . За класическия случай на оптимизация целевата функция е само една -  $f_x(x)$ .

## **Заключение**

Във втора глава са разгледани постиженията в областта на дефинирането и решаването на двуйерархични оптимизационни задачи в областта на оптимизацията на градски трафик в мрежа от кръстовища.

Представена е формалната постановка на една двуйерархична оптимизационна задача. Същата формална постановка, бе представена в контекста на автомобилния трафик в градска среда т.е. управлението на светлинно сигнално регулирани кръстовища. Това е важно, от гледна точка на поставяне основата на дефинираните и решени двуйерархични задачи в същата област на приложение в настоящата дисертационна работа.

Формалната постановка на двуйерархичната задача и контекста на приложение са същите за дисертационната работа. Разликата от разгледаната в тази точка задача е в дефинирането на целевите функции и логиката на избор на параметри за горната и долната целеви функции.



### Глава 3

## РАЗРАБОТВАНЕ НА ЙЕРАРХИЧНИ МОДЕЛИ ЗА ОПТИМИЗИРАНЕ НА ТРАНСПОРТЕН ТРАФИК

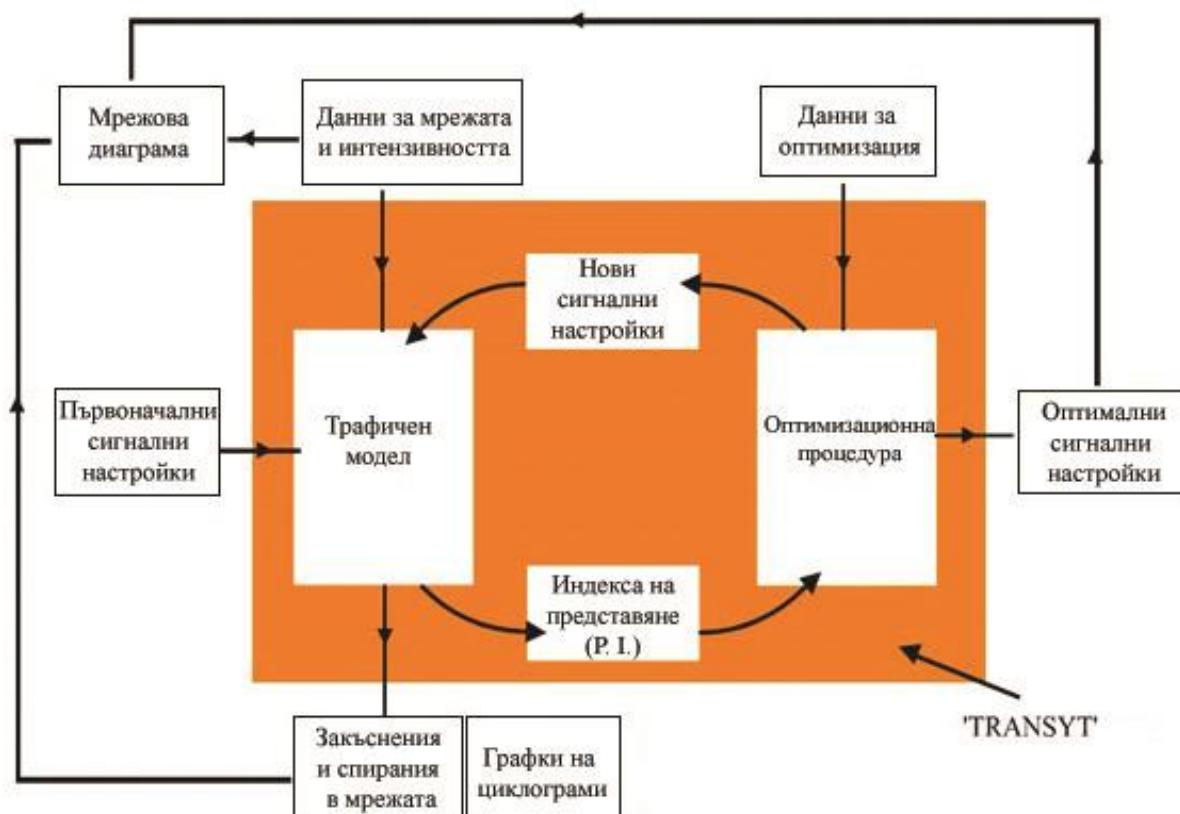
### Използвани програмни пакети за моделиране и оптимизиране на трафик

В дисертацията са използвани три софтуерни пакета – Aimsun, TRANSYT 15 и MATLAB. Aimsun и TRANSYT 15 са специализирани пакети за симулиране и съответно оптимизиране на автомобилен трафик (Aimsun, (2013), Binning, (2015)). MATLAB е използван за математическо симулиране на разглеждана група от кръстовища, като са описани опашки на база на store-and-forward модел и е приложена двуйерархична оптимизация. Резултатите, получени от MATLAB за продължителност на цикъла и за зелена светлина са въведени в Aimsun за валидация на тяхната валидност и превъзходство спрямо измерванията преди оптимизация.

Aimsun (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks- Усъвършенстван интерактивен микроскопски симулатор за градски и не-градски мрежи), (Aimsun, 2013). Той е в състояние да възпроизведе реалните особености на трафика на всеки мрежов транспорт. Използван е за проектирането и тестването на системите за управление на движението, правилата за управление на трафика, контролите за достъп, местоположението на устройствата за таксуване на изминат участък, мрежите за обществен транспорт, пътните платна, възможностите за работа заедно със системите за управление на превозните средства и други приложения в реално време.

Софтуерната среда за оптимизация на светлинната регулация - TRANSYT 15 също е приложена в изследванията по задачата за оптимизиране на трафик в градска среда.

Моделът на работа на TRANSYT 15 е представен на фигура 3.1. (Binning, 2015). Софтуерът пресмята и оптимизира целева, функция наречена Performance Index, част от която е времезакъснението и броя спирания на автомобилите, целта е тези два показателя да са минимални за мрежата, така че да се образува “зелена вълна”. При зелена вълна платото от автомобили от предходен светофар достига светофара на следващото кръстовище на зелен сигнал и това може да се случи за няколко последователни кръстовища.



**Фиг. 3.1.** Процедура по оптимизация в TRANSYT 15

Процесите, описани в по-тъмния участък от фигура 3.1 протичат в средата TRANSYT. Процесите, отбелязани в светли правоъгълници са в друг софтуерен пакет. В случая за направените изследвания, това е софтуерният пакет Aimsun.

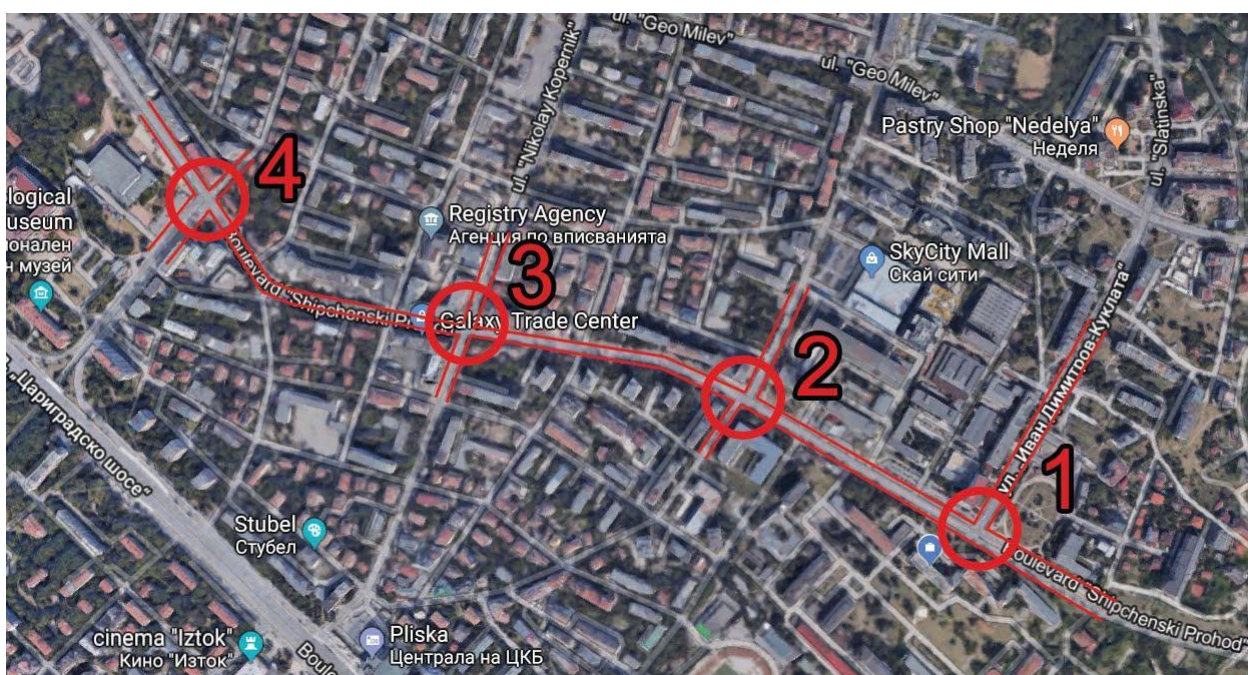
Първоначално се създава модел на транспортна мрежа в пакет Aimsun, където са въведени и първоначални настройки на светлинната сигнализация. Създадената транспортна мрежа се експортира в TRANSYT 15. Изчислява се първоначалния Performance Index и се провежда първа итерация на оптимизационна процедура за намаляване на този Performance Index. Тази оптимизационна процедура води до нови настройки на светофара, които се вкарват в началния модел и по този начин кръга се затваря и се почва с нова итерация по пресмятане на Performance Index, оптимизация, нови настройки на светофарите и тяхното въвеждане в модела на трафика. Софтуерът предлага метода на „най-стръмното спускане“ като оптимизационен метод.

Трябва да се напише специален скрипт на програмата, който да се използва при двуйерархичната оптимизация. Проблемът с двуйерархичната оптимизация е решен в средата MATLAB. В MATLAB е включен специален допълнителен инструмент за решаване на подобни задачи. Допълнителният инструмент се нарича YALMIP. YALMIP е безплатен инструмент, който улеснява дефинирането и решаването на задачи за оптимизация

(<https://yalmp.github.io/>). Подробно описание на този инструмент е дадено в (Lofberg, 2004). Други подходи за решаване на оптимизационни проблеми, свързани с пътния трафик, са обсъдени в (Стоилов и др. (2017), Балабанов и др. (2016), Casas и др., (2010), Ghadiri и др. (2019)).

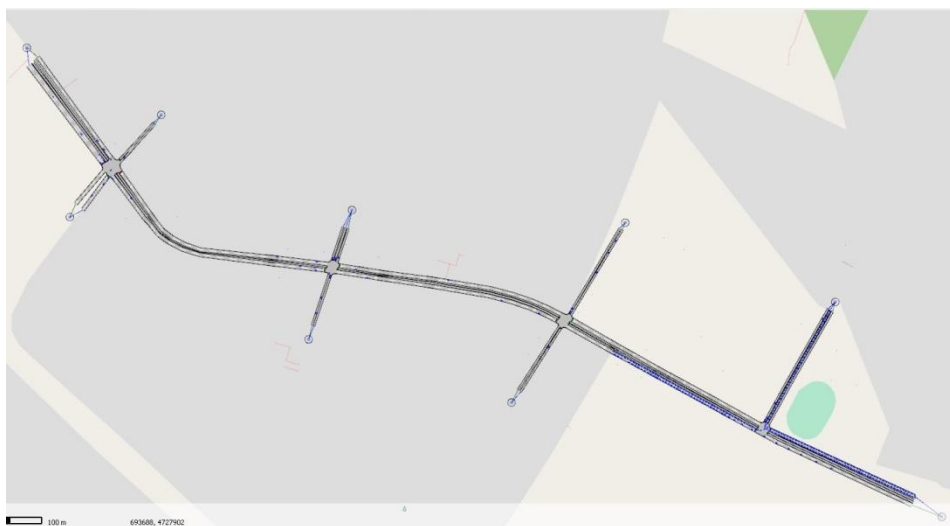
### Обект на симулацията

На фигура 3.2. е показан изглед на градската мрежа от четири кръстовища взет от Google Maps. На нея се виждат наименованията на някои улици, на търговски и други обекти и се получава цялостно впечатление за гъста населеност от гледна точка на сгради.



**Фиг. 3.2.** Изображение на четирите свързани кръстовища от Google Maps

На фигура 3.3. са показани четири свързани светлинно регулирани кръстовища, моделирани в софтуерната среда Aimsun. Кръстовищата се намират по протежението на бул. Шипченски проход в град София. Кръстовищата се намират на относително малко разстояние едно от друго, което е добра предпоставка за достигането на зелена вълна. Общата дължина на разглеждания участък е 1.5 км.



**Фиг. 3.3.** Четири свързани светлинно регулирани кръстовища в Aimsun

В разглеждания участък има много точки на интерес (Points of Interest) като офиси, търговски центрове, училища, детски градини, поликлиника и други. Тези точки на интерес са места, които по определени причини привличат хора. На тези места се генерира трафик, както от местното население, така и от хора от други райони на града.

При извършеното на място проучване на изследвания участък в някои части от него са установени условия на пренатоварване - опашки, които не могат да преминат изцяло по време на зеления сигнал от светофарния цикъл и съответно формират остатъчна опашка, която заема част от зеленото време на следващия цикъл, за да премине през кръстовището.

Капацитетът на кръстовището може да бъде надвишен, както по отношение на времеви аспект, така и по отношение на пространство. По отношение на времеви аспект, пренатоварването се наблюдава, когато продължителността на зеления сигнал не е достатъчна, за да преминат всички коли, пристигнали пред светофара по време на червения сигнал т.е. формира се остатъчна опашка. По отношение на пространствения аспект се говори за пренатоварване, ако опашката от коли достига предходното кръстовище и по този начин част от зеления сигнал остава отново неизползвана, поради невъзможността колите от предходното кръстовище да преминат през него. Докато времето пренатоварване може да засяга изолирано кръстовище, пространственото пренатоварване е признак за деградация в мрежата от кръстовища.

Подробно описание на методологията за определяне на пренатоварено кръстовище посредством събиране на информация от сензори, може да бъде намерено в (Wu и Liu, 2010), която методология има за цел и да определи сериозността на пренатоварването.

## Проведени експерименти

Фигура 3.4. представя проведени експерименти във връзка с дисертационния труд. Всеки един от тези експерименти ще бъде подробно описан в по-нататъшното изложение.



**Фиг. 3.4.** Преглед на направените експерименти

Първоначалните експерименти наблягат повече на ползването на програмните продукти, тяхното изучаване и прилагане – тези експерименти са обозначени в червено на графиката (първи и втори правоъгълник). Следват същинските експерименти за дисертационния труд, които носят по-значителната част от приложния и научно-приложния принос. Тези така

наречени същински експерименти използват двуйерархична оптимизация и функцията `solvebilevel()` в MATLAB и тестват получените резултати за светлинната регулация в специализираните програмни среди за симулация и оптимизация на трафик – на фигурата са обозначени в жълто (трети и четвърти правоъгълник). След тях следват извършени експерименти за усложняване на използвания модел и доближаването му до реални условия с въвеждане на трамвайни спирки и паркиране на улицата.(пети правоъгълник). Накрая са поставени експерименти за гъвкаво управление на трафика, които са направени изцяло в Aimsun. Освен добрите трафични показатели, до които водят тези изследвания, се разглеждат и аспектите консумация на гориво и замърсяване на околната среда. (шести правоъгълник). Посоките за бъдещо развитие (седми правоъгълник) са представени в частта „Бъдещо развитие“, намиращ се към края на дисертационната работа.

### **Оптимизация на автомобилен трафик на светлинно регулирани кръстовища посредством симулационна среда Aimsun**

#### *Резюме на експеримента*

В представения експеримент се изследва възможността за подобрене на трафика по протежението на бул. Шипченски проход. Извършва се динамична микросимулация. Променят се настройките на зеления сигнал за светофарите на булеварда и малките улици пресичащи булеварда. Хипотезата е, че съществуват настройки на светофарите, които са по-добри от действителните, които ще подобрят показателите на трафика по булеварда и могат да бъдат установени посредством симулация.

Това изследване се провежда само и единствено посредством използване на симулационен програмен продукт Aimsun. Сравнени са 10 показателя на трафика за мрежа от 4 кръстовища по бул. Шипченски проход, за различни настройки на зеления сигнал за светофарите на булеварда и за светофарите на малките улички.

Резултатите доказват хипотезата, че съществуват по-добри настройки на светофарните уредби с оглед на подобряване на 10-те избрани показателя на трафика за мрежата от кръстовища, които настройки са открити експериментално чрез симулация. Разгледани са четири случая на настройки на светофарната сигнализация.



Референтен Модел				10% промяна в зелен сигнал			20% промяна на зелен сигнал			20% промяна и 10% за T-образно		
<b>8744</b>				<b>8744</b>			<b>8744</b>			<b>8744</b>		
	Start Time	Duration			Start Time	Duration			Start Time	Duration		
Сигнал 1	Signal 1	0	30	Signal 1	0	33	Signal 1	0	36	Signal 1	0	33
Сигнал 2	Signal 2	0	30	Signal 2	0	33	Signal 2	0	36	Signal 2	0	33
Сигнал 3	Signal 3	36	30	Signal 3	39	27	Signal 3	42	24	Signal 3	39	27
<b>8778</b>				<b>8778</b>			<b>8778</b>			<b>8778</b>		
	Start Time	Duration			Start Time	Duration			Start Time	Duration		
Сигнал 1	Signal 1	0	20	Signal 1	0	23	Signal 1	0	26	Signal 1	0	26
Сигнал 2	Signal 2	26	25	Signal 2	29	22	Signal 2	32	19	Signal 2	32	19
Сигнал 3	Signal 3	0	22	Signal 3	0	25	Signal 3	0	28	Signal 3	0	28
Сигнал 4	Signal 4	26	24	Signal 4	29	22	Signal 4	32	19	Signal 4	32	19
<b>8845</b>				<b>8845</b>			<b>8845</b>			<b>8845</b>		
	Start Time	Duration			Start Time	Duration			Start Time	Duration		
Сигнал 1	Signal 1	0	24	Signal 1	0	26	Signal 1	0	29	Signal 1	0	29
Сигнал 2	Signal 2	0	25	Signal 2	0	27	Signal 2	0	30	Signal 2	0	30
Сигнал 3	Signal 3	29	23	Signal 3	31	21	Signal 3	34	18	Signal 3	34	18
Сигнал 4	Signal 4	29	23	Signal 4	31	21	Signal 4	34	18	Signal 4	34	18
<b>14175</b>				<b>14175</b>			<b>14175</b>			<b>14175</b>		
	Start Time	Duration			Start Time	Duration			Start Time	Duration		
Сигнал 1	Signal 1	0	25	Signal 1	0	28	Signal 1	0	31	Signal 1	0	31
Сигнал 2	Signal 2	0	17	Signal 2	0	20	Signal 2	0	23	Signal 2	0	23
Сигнал 3	Signal 3	29	28	Signal 3	32	25	Signal 3	35	22	Signal 3	35	22
Сигнал 4	Signal 4	29	16	Signal 4	32	14	Signal 4	35	11	Signal 4	35	11

Фиг.3.7. Настройка на светофарните уредби за различните случаи.

На фигура 3.11. е илюстрирано сравнени между втори и четвърти случай от общо разглежданите 4 случай в разглеждания експеримент.

10% промяна на зелен сигнал в полза на светофарите на булеварда				20% промяна на зелен сигнал в полза на светофарите на булеварда, 10% промяна за T-образно кръстовище				Разлика		Разлика в %	
Time Series	Value	Standard Deviation	Units	Time Series	Value	Standard Deviation	Units				
Време за забавяне - кола	Delay Time - Car	42.8	34.6	sec/km	Delay Time - Car	41.96	35.65	sec/km	0.84	1.96	
Плътност - кола	Density - Car	7.14	N/A	veh/km	Density - Car	7	N/A	veh/km	0.14	1.96	
	Flow - Car	4102	N/A	veh/h	Flow - Car	4105	N/A	veh/h	-3	-0.07	
Хармонична скорост - кола	Harmonic Speed - Car	32.91	10.24	km/h	Harmonic Speed - Car	33.16	10.38	km/h	-0.25	-0.76	
	Input Count - Car	4204	N/A	veh	Input Count - Car	4204	N/A	veh	0	0.00	
	Input Flow - Car	4204	N/A	veh/h	Input Flow - Car	4204	N/A	veh/h	0	0.00	
	Max. Virtual Queue - Car	0	N/A	veh	Max. Virtual Queue - Car	0	N/A	veh	0	0.00	
Средна опашка - кола	Mean Queue - Car	24.29	N/A	veh	Mean Queue - Car	23.1	N/A	veh	1.19	4.90	
	Mean Virtual Queue - Car	0	N/A	veh	Mean Virtual Queue - Car	0	N/A	veh	0	0.00	
	Missed Turns - Car	1	N/A		Missed Turns - Car	4	N/A		-3	-300.00	
	Number of Lane Changes - Car	418.06	N/A	#/km	Number of Lane Changes - Car	425.37	N/A	#/km	-7.31	-1.75	
Брой спирки - кола	Number of Stops - Car	0.14	N/A	#/veh/km	Number of Stops - Car	0.14	N/A	#/veh/km	0	0.00	
Скорост - кола	Speed - Car	36.09	10.79	km/h	Speed - Car	36.41	10.72	km/h	-0.32	-0.89	
Време в спряло състояние - кола	Stop Time - Car	31.42	31.25	sec/km	Stop Time - Car	30.81	32.3	sec/km	0.61	1.94	
	Total Number of Lane Changes - Ca	5262	N/A		Total Number of Lane Changes - Ca	5354	N/A		-92	-1.75	
Общ брой спиране - кола	Total Number of Stops - Car	7392.09	N/A		Total Number of Stops - Car	7249.91	N/A		142.18	1.92	
Общо време за пътуване - кола	Total Travel Time - Car	88.12	N/A	h	Total Travel Time - Car	86.51	N/A	h	1.61	1.83	
	Total Travelled Distance - Car	2932.95	N/A	km	Total Travelled Distance - Car	2936.42	N/A	km	-3.47	-0.12	
Време за пътуване - кола	Travel Time - Car	109.4	34.87	sec/km	Travel Time - Car	108.57	35.9	sec/km	0.83	0.76	
	Vehicles Inside - Car	102	N/A	veh	Vehicles Inside - Car	99	N/A	veh	3	2.94	
	Vehicles Lost Inside - Car	0	N/A	veh	Vehicles Lost Inside - Car	0	N/A	veh	0	0.00	
	Vehicles Lost Outside - Car	0	N/A	veh	Vehicles Lost Outside - Car	0	N/A	veh	0	0.00	
	Vehicles Outside - Car	4102	N/A	veh	Vehicles Outside - Car	4105	N/A	veh	-3	-0.07	
	Vehicles Waiting to Enter - Car	0	N/A	veh	Vehicles Waiting to Enter - Car	0	N/A	veh	0	0.00	
	Waiting Time Virtual Queue - Car	0.02	0.08	sec	Waiting Time Virtual Queue - Car	0.02	0.09	sec	0	0.00	

Фиг. 3.11. Случай 2 и случай 4 сравнение - Сравнение между 10% промяна на зеления сигнал за всички кръстовища и случая с 20% промяна за всички кръстовища и само 10% за T-образно кръстовище

Изводи от експеримента

Симулационното променяне на параметрите на светофарните уредби пести време и

средства и прави възможни симулации, които в реални условия биха могли да доведат до затруднения в движението, задръствания, замърсяване и неудовлетвореност във водачите. На тази точка бяха разгледани 10 показателя на трафика. От изследването става ясно, че понякога се налага и отделно разглеждане на кръстовището в рамките на общия модел. С този резултат беше доказана хипотезата, че по емпиричен начин и чрез компютърна симулация могат да бъдат намерени по-добри настройки на светофарната уредба от реално действащите.

## Подобрение на трафика в градска среда чрез оптимизация на светофарната сигнализация

### Резюме на експеримента

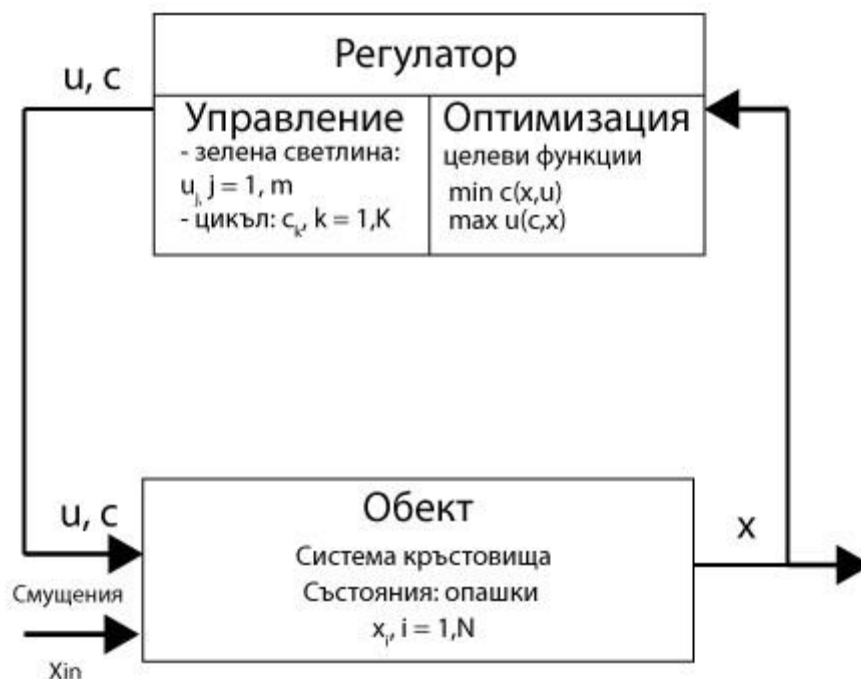
Този експеримент представя обекта на изследването, който е моделиран в програмна среда Aimsun, след това оптимизиран в софтуерната среда TRANSYT и експортиран обратно към Aimsun за валидиране на резултатите. Експериментът се състои в оптимизация на зеления сигнал и offset на светлинно регулирани кръстовища, което води до подобряване на единадесет избрани трафични индикатори.



Фиг. 3.12. Работен процес при изследването



Оптимизацията и управлението на системата кръстовища е представена като система за автоматично управление на блокова схема фиг 3.13.



**Фиг 3.13** Блокова схема за автоматично управление на система, представляваща градска пътна мрежа

Наблюдават се подобрения на всички изследвани показатели след оптимизацията с TRANSYT (Таблица 3.1)

Таблица 3.1.: Трафични индикатори „преди“ и „след“ оптимизация в TRANSYT

Трафични индикатори	Преди оптимизация в TRANSYT			След оптимизация в TRANSYT			
	Мерни единици	Стойност	Стандартно отклонение	Стойност	Стандартно отклонение	Разлика	Разлика в %
Времетрае	sec/km	51.16	40.3	36.33	35.88	-14.83	-28.99%
Плътност	veh/km	7.69	N/A	6.53	N/A	-1.16	-15.08%
Интензивност	veh/h	4095	N/A	4126	N/A	31	0.76%
Хармонична скорост	km/h	30.57	10.61	34.97	10.66	4.4	14.39%
Опашка	veh	29.85	N/A	19.08	N/A	-10.77	-36.08%
Брой спираня	#/veh/km	0.16	N/A	0.12	N/A	-0.04	-25.00%
Скорост	km/h	34.25	11.56	38.21	10.37	3.96	11.56%
Време в спряло състояние	sec/km	38.42	35.17	26.34	32.84	-12.08	-31.44%
Общ брой спираня		8322.87	N/A	6367.76	N/A	-1955.11	-23.49%
Общо пропътувано време	h	94.76	N/A	81.2	N/A	-13.56	-14.31%
Пропътувано време от една кола	sec/km	117.76	40.53	102.96	35.96	-14.8	-12.57%

*Изводи от експеримента*

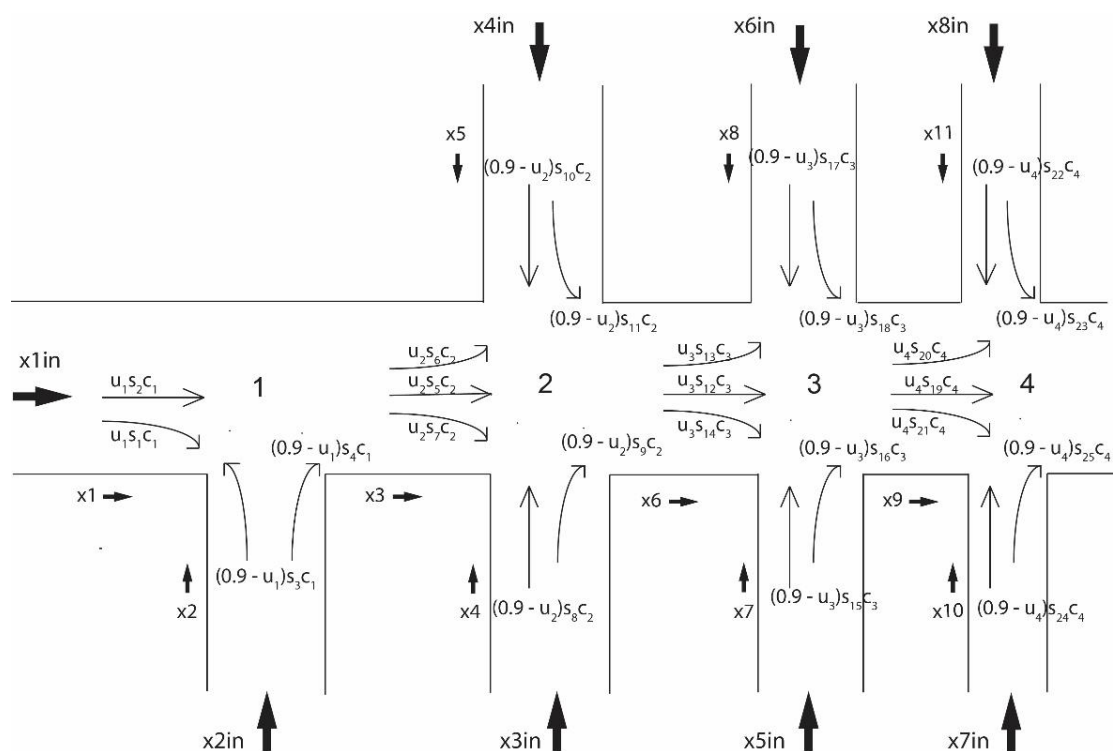
Подобрението от оптимизацията се измерва с единнадесет показателя на трафика като опашки, скорост, време на пътуване и др. Два случая са сравнени - преди оптимизация и след оптимизиране на светлинните сигнали с TRANSYT. Резултатите показват, че след оптимизацията трафик индикаторите са се подобрили значително, като някои от показателите, достигат подобрене от над 30 процента в сравнение със случая преди оптимизация.

**Оптимизация на зеления сигнал и опашките в транспортната мрежа чрез двуйерархична оптимизация***Резюме на експеримента*

Настоящата точка описва използването на двуйерархична оптимизация, както и добре познатия store-and-forward подход за оптимизиране на транспортната мрежа

Нуждата от светофар и необходимостта да се управлява по оптимален начин са довели до множество изследвания и изобретяването на различни подходи. Подходът, предложен тук, се основава на популярния модел store-and-forward. Добавената стойност на това изследване е, че подходът store-and-forward е формализиран в проблема за оптимизация на двуйерархична задача. По този начин допълнителните параметри на транспортната система се оценяват с оптимални стойности. Това изследване чрез прилагането на двуйерархична оптимизация намира оптималната продължителност на зелените светлини като стойност от цикъла на светофара. Освен това опашките на превозните средства са сведени до минимум, но интензивността на трафика през градската мрежа е увеличен. Поради потенциалните си предимства, двуйерархичната оптимизация се използва в практически области като оптимизация на портфолио, оптимизация на железопътни планове и др., (Павлова, (2017), Stoilov и др. (2016), Stoilov и Stoilova, (2012)). Това изследване прави формално разработване на двуйерархичен транспортен модел. Демонстрирано е как този проблем може да бъде решен с подходящи програмни инструменти.

Това изследване прави композиция от подхода store-and-forward с допълнителен проблем с оптимизацията, който е насочен към максимизиране на потока на трафика, пресичащ транспортната мрежа. Композицията на тези два проблема е интегрирана в двуйерархичен оптимизационен модел.



Фиг. 3.17. Графичен модел на разглежданата градска мрежа

Показаният модел на фигура 3.17. е използван като ограничение за долната целева функция, целяща минимизиране на опашките пред светофарите. Обозначенията на фигурата са както следва:

$c_i$  – е продължителността на цикъла

$u_i$  – обозначава каква част от цикъла представлява зеленият сигнал

$s_i$  – е saturation flow (поток на насищане), който представлява коли на час, които преминават по даденото направление.

$x_{1in} - x_{8in}$  – са коли влизащи на час за дадения подход (улица)

$x_1 - x_{11}$  – са опашки пред светофарите, измерени в коли за един цикъл на светофара

Целта е да се минимизират опашките пред светофарите т.е. сборът от всички опашки от  $x_1 + x_2 + \dots + x_{11}$  да е минимален, което се представя с целевата функция.

Формулата, по която се изчислява опашка пред светофар е следната за  $x_1$  и тя е аналогична за всички опашки от фигура 3.17.

$$x_1 \leq x_{10} + x_{1in} - u_1*s_2*c_1 - u_1*s_1*c_1$$

Опашката е равна на намиращите се от предишен времеви период коли на светофара  $x_{10}$ , плюс колите които пристигат на светофара за даден период от време  $x_{1in}$ , минус колите, които преминават през кръстовището по време на зеления сигнал в права посока ( $u_1*s_2*c_1$ ) и завиващи коли ( $u_1*s_1*c_1$ ). Изчисляването на опашки по този начин се основава на

използвания подход store-and-forward.

Нуждата от минимизиране на цикъла произтича от изследване, според което по-късият цикъл на светофара в градска среда води до по-добри резултати (<https://nacto.org/>).

Продължителността на цикъла е дефинирана от закона (Наредба № 17, 2001) в определени рамки – за минимална и максимална продължителност.

На таблица 3.2. е направено сравнение на резултатите от симулациите с фиксиран времеви план и при двуйерархична оптимизация.

Таблица 3.2.: Сравнение на резултатите от симулацията

	<b>Фиксиран времеви план</b>	<b>Резултати от двуйерархична оптимизация</b>	
<b>Трафични параметри</b>	Стойност	Стойност	Мерни единици
<b>Време закъснение</b>	51.16	37.23	sec/km
<b>Плътност</b>	7.69	6.67	veh/km
<b>Интензивност</b>	4095	4126	veh/h
<b>Консумация на гориво</b>	355.53	300.6	l
<b>CO<sub>2</sub></b>	874077.52	775912.65	g
<b>NO<sub>x</sub></b>	1835.5	1658.83	g
<b>PM – прахови частици</b>	340.52	274.26	g
<b>VOС – летливи вещества</b>	1131.69	980.42	g
<b>Средна опашка</b>	29.85	21.17	veh
<b>Брой спирания</b>	0.16	0.12	#/veh/km
<b>Скорост</b>	34.25	38.98	km/h
<b>Време в спряло състояние</b>	38.42	27.73	sec/km
<b>Общ брой спирания</b>	8322.87	6069.72	
<b>Общо пропътувано време</b>	94.76	82.9	h
<b>Пропътувано време за участъка</b>	117.76	103.86	sec/km

#### *Изводи от експеримента*

Това изследване разработва нов математически модел за управление на трафични потоци в градска среда. Определена и решена е задача на двуйерархична оптимизация. Дефинирането двуйерархична задача позволява да се постигнат две целеви функции, да се разшири дефиниционната област на управляващите въздействия на транспортната задача и да се включи по-голям набор от ограничения.

Резултатите от двуйерархичната оптимизация са оценени и сравнени в симулационна среда с установения понастоящем фиксиран план. Мрежата е избрана като важно

направление в град София. Резултатите от йерархичната оптимизация са сравнени с набор от параметри на трафика. Очевидно, двуйерархичният формализъм в транспортните системи има голям потенциал. Всички изследвани транспортни параметри дават предимство на двуйерархичния транспортен модел.

### Оптимизация на продължителността на цикъла чрез двуйерархична оптимизация

#### Резюме на експеримента

Този експеримент описва формализацията на store-and-forward подхода в двуйерархичен оптимизационен проблем. Проучването открива оптималната продължителност на дължината на цикъла по зададени продължителности на зеления сигнал. Опашките пред светофарите са сведени до минимум. По този начин мрежата позволява по-голяма пропускателна способност и по-малко задръствания в резултат на това по-малко замърсяване и по-добри показатели на трафика като забавяне, плътност, скорост и др.

Резултатите за индикатори на трафика и замърсяване се получават от програмния продукт Aimsun. Оптимизацията се извършва чрез MATLAB скрипт, базиран на допълнителния инструмент, наречен YALMIP, както и със съвременен програмен продукт TRANSYT, който е съвместим със програмния пакет Aimsun. Резултатите показват, че е разумно да се използва скриптът за оптимизиране на трафика, тъй като TRANSYT оптимизира само продължителността на зеления сигнал, но работи със стойността на цикъла от Aimsun.

На таблица 3.3. са сравнение симулационни данни от основен експеримент (с реално събрани данни), експеримент с резултати от MATLAB и експеримент с резултати от TRANSYT.

Таблица 3.3. Сравнение на показателите за трафик за три случая

Индикатори на трафика	Основен експеримент	MATLAB скрипт	TRANSYT оптимизация	Мерни единици
Времетрае	51.16	36.4	35.51	sec/km
Плътност	7.69	6.91	6.27	veh/km
Интензивност	4095	4107	4124	veh/h
Консумация на гориво	355.53	338.06	293.98	l
CO <sub>2</sub>	875112.07	843316.7	768464.08	g
NO <sub>x</sub>	1311.3	1250.91	1130.48	g
PM (прахови частици)	223.74	210.73	174.77	g
VOС (летливи вещества)	1107.33	997.88	917.66	g
Средна опашка	29.85	20.88	16.28	veh
Брой спирания	0.16	0.14	0.12	#/veh/km
Скорост	34.25	37.59	38.8	km/h
Време в спряно състояние	38.42	25.48	25.76	sec/km
Общ брой спирания	8322.87	7404.37	6401.28	

<b>Общо пропътувано време</b>	94.76	85.44	77.96	h
<b>Обща пропътувана дистанция</b>	2925.17	2939.58	2932.89	km
<b>Време за пътуване</b>	117.76	102.99	102.13	sec/km

### *Изводи от експеримента*

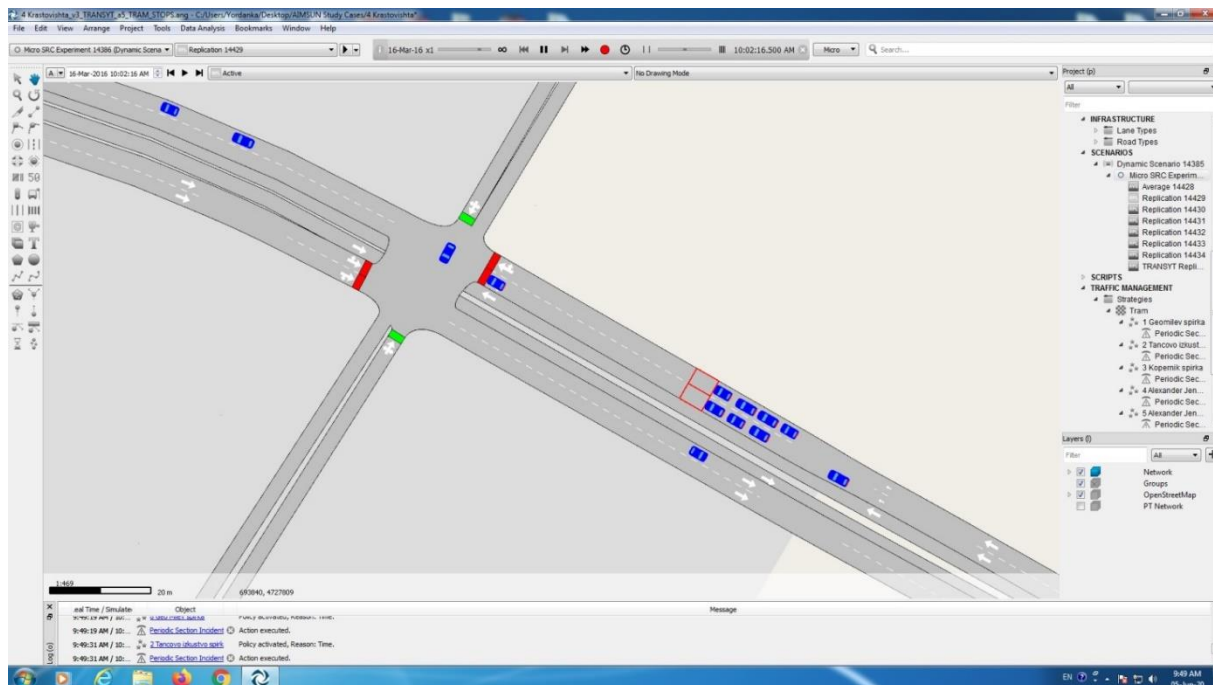
В експеримента беше представена скрипт в MATLAB за оптимизиране на дължината на цикъла на мрежа от светофари по бул. Шипченски проход в София. Скриптът решава проблем на две нива, използвайки подхода store-and-forward като ограничение за долната целева функция. Прави се сравнение с резултатите на най-съвременния софтуер за оптимизация TRANSYT. Три експеримента са симулирани в софтуерния пакет Aimsun. Като заключение въз основа на резултата може да се посочи, че двуйерархичната оптимизацията има потенциал да бъде проучена по-задълбочено като подход за целите на оптимизацията на трафика.

### **Усложняване на модела. Въвеждане на трамвайни спирки и паркиране на улицата.**

#### *Резюме на експеримента*

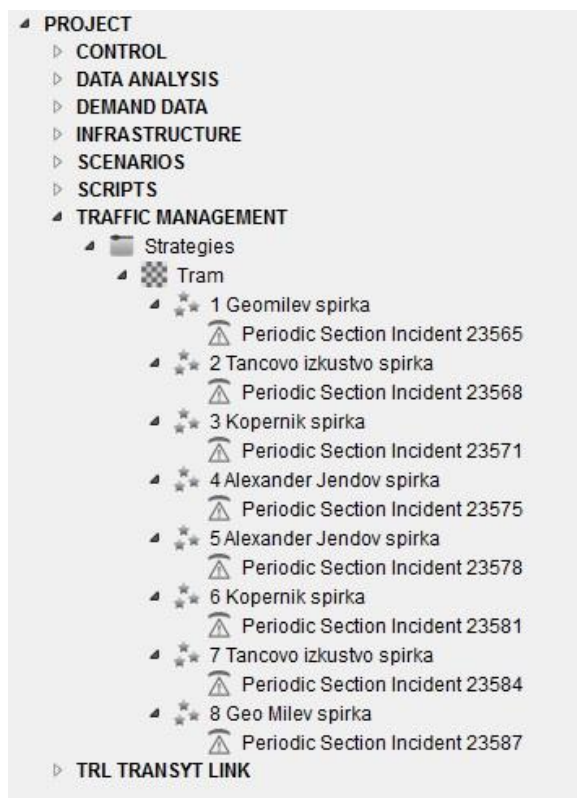
Експериментът ще резултати от проучване относно влиянието на трамвайните спирки върху движението. Хипотезата е, че трамвайните спирки ще повлияят отрицателно на движението. По-важно е обаче да се установи степента на това влияние, тъй като това може да служи за целите на управлението на града за вземане на информирани решения относно разписанията на трамваите. Също така в отделен експеримент компютърният модел е усложнен допълнително като е включена и симулация на паркирането на улицата – съответно се прави сравнение на случаите без и с паркиране на улицата. Възможностите на софтуерния пакет Aimsun за измерване на различни индикатори на трафика, както и индикатори за разхода на гориво и замърсяването на въздуха. Двете проучвания са обединени в тази обща точка, като проучвания, които усложняват изследвания компютърен модел и го доближават повече до реалните условия в пътната мрежа от посочените кръстовища.

На фигура 3.17. е представен изглед от симулация в програмната среда Aimsun. Фигурата илюстрира опашка от автомобили, чакащи пътници да се качат на трамвайна спирка.



Фиг. 3.18. Опашка от автомобили пред трамвайна спирка

На Фиг. 3.19. са представени симулациите на осем спирки по бул. Шипченски проход.



Фиг. 3.19. Периодичните инциденти в участъка представляват трамвайни спирки по бул. Шипченски проход

*Изводи от експеримента*

От направените експерименти, които усложняват и доближават до реалните условия симулационния модел, става ясно, че трамвайните спирки не влияят значително на трафичните показатели и замърсяването на околната среда, докато паркирането на улицата води до по-осезаеми промени в трафичните показатели и влияе отрицателно на околната среда.

Може да се направи заключение, че всички изследвани трафични индикатори се влошават в случай на улично паркиране в сравнение със случая, в който няма паркиране на улицата. Друг не особено очевиден резултат е увеличаването на разхода на гориво и емисиите на CO<sub>2</sub>, което при внимателен анализ е логично поради намаления капацитет на мрежата и задръстванията, които се образуват чрез паркиране на улицата.

**Гъвкаво управление и изследване на трафични индикатори, консумация на гориво и замърсяване на околната среда.***Резюме на експеримента*

Съществуват различни подходи, свързани с намаляване на замърсяването от автомобилен трафик. Това изследване се фокусира върху политиките за управление светлинната сигнализация и тяхното въздействие върху замърсяването на въздуха. Проведена е софтуерна симулация програмните продукти Aimsun и TRANSYT. Aimsun използва екологичния модел на (Panis и др. (2006), (Panis и др., (2011)).

Използван е микроскопичен модел за симулация на трафика за оценка на въздействието върху околната среда от прилагането на различни политики за синхронизиране на сигнала. Експериментите водят до заключението, че замърсяването на трафика може да бъде повлияно от промени в политиките за управление на светлинната сигнализация.

На таблица 3.8. са представени консумацията на гориво и вредните емисии при различно управление на трафика – 1) твърд режим на управление; 2) твърд режим на управление, оптимизиран за зелена вълна; 3) гъвкаво управление.



Таблица 3.8. Консумация на гориво и вредни емисии при различно управление на трафика.

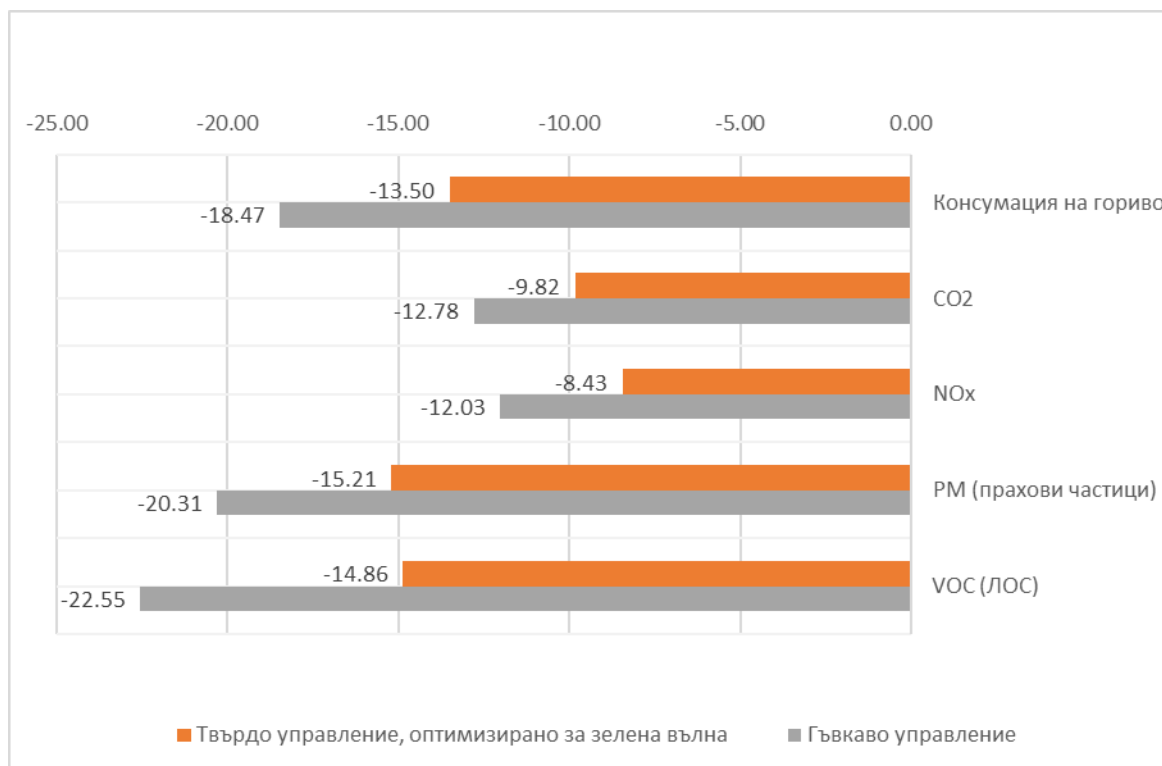
	Настоящо твърдо управление	Твърдо управление, оптимизирано за зелена вълна	Гъвкаво управление на светофарите	Мерни единици
Консумация на гориво	355.53	307.52	289.86	l
CO <sub>2</sub> (въглероден диоксид)	874077.52	788275.5	762346.78	g
NO <sub>x</sub> (азотни оксиди)	1835.5	1680.73	1614.73	g
PM (прахови частици)	340.52	288.71	271.36	g
VOC (ЛОС)	1131.69	963.57	876.51	g

Таблица 3.9. представя относителните разлики на твърдото управление с оптимизация за зелена вълна и гъвкавото управление на светофарите в сравнение с графа “Настоящо твърдо управление” по отношение на консумацията на гориво и вредни емисии.

Таблица 3.9. Консумация на гориво и вредни емисии при различно управление на трафика (относителни разлики).

	Настоящо твърдо управление	Твърдо управление, оптимизирано за зелена вълна	Гъвкаво управление на светофарите
Консумация на гориво	355.53	-13.50	-18.47
CO <sub>2</sub> (въглероден диоксид)	874077.52	-9.82	-12.78
NO <sub>x</sub> (азотни оксиди)	1835.5	-8.43	-12.03
PM (прахови частици)	340.52	-15.21	-20.31
VOC (ЛОС)	1131.69	-14.86	-22.55

На фигура 3.20 са илюстрирани относителните промени на изследваните показатели за консумация на гориво и замърсяване на въздуха в зависимост от типа управление. За базово се приема настоящето твърдо управление (Табл. 3.8 и Табл. 3.9). В сравнение с него, с чевен стълб е показано твърдо управление, оптимизирано за зелена вълна, а със зелен стълб – гъвкаво управление. На фигура 3.20 се вижда, че гъвкавото управление довежда до намаляване на консумацията на гориво и на замърсителите на въздуха в по-голяма степен, отколкото е наблюдаваното намаление при твърдото управление, оптимизирано за зелена вълна.



**Фиг. 3.20.** Относителни промени при показателите в зависимост от типа управление

### *Изводи от експеримента*

Оценени са различни настройки за синхронизация на сигнала, влияещи върху емисиите на замърсяване на въздуха. Направени са микросимулации с Aimsun. TRANSYT също се използва за оптимизиране на твърдото управление на светофарната уредба за зелена вълна. Резултатите от изследването ясно показват, че в случая когато се взема предвид реалния трафик към даден момент, намаляват както замърсяването на въздуха, така и разходът на гориво.

### **Заклучение**

В трета глава са представени извършените експерименти по дисертационната работа. Представен бе обектът на оптимизация – мрежа от четири светлинно регулирани кръстовища. Обектът е моделиран в симулационната среда Aimsun. Описание и основна информация за използваните програмни продукти – Aimsun, TRANSYT и MATLAB също е представена в тази глава от дисертационната работа.

Подробно са описани проведените симулации и експерименти. Те са обвързани, както със събиране на данни за геометрия на пътната мрежа и интензивността на трафика в този участък, така и с последващото изграждане на компютърни симулации и математически

модел. Въз основа на съставените модели – математически и симулационни, и приложените оптимизационни методи, се прави оценка на резултатите.

В главата са представени програмните кодове на две двуйерархични оптимизационни задачи, използващи функцията `solvebilevel()`. Решенията от изпълнението на тези кодове са приложени в симулационна среда `Aimsun` и са изведени резултати под формата на трафични параметри, които да се сравнят със симулация в `TRANSYT`. Постигнатите резултати са свързани с увеличаване на пропускателната способност на мрежата, намаляване на опашките пред светофарите и намаляване на задръстванията. Двуйерархичната оптимизация дава възможност за повече целеви функции, управляващи параметри и повече ограничения в управляваното пространство. Подробно сравнение на резултатите от приложението на оптимизационните методи е дадено в глава четири.

Обектът на изследване бе усложнен с допълнения като трамвайни спирки и паркиране на улицата, които явления са налични в реалните условия. По този начин симулационният модел бе доближен до реалните условия в пътната мрежа и ще е обект на по-подробни бъдещи изследвания.

Обърнато бе внимание и на влиянието на оптимизацията на трафика на обекта върху консумацията на гориво и показателите за замърсяване на въздуха. Тази взаимовръзка се изразява в това, че с намаляването на опашките и задръстванията се намаляват и вредните емисии, и консумацията на гориво. Това намаление носи ползи за обществото от гледна точка на здравен аспект. Затова оптимизацията на трафика в градски условия е важна не само за по-бързо придвижване от една до друга точка на града, но и за оптимизиране на нежеланите аспекти на трафика като замърсяване на въздуха.

## Глава 4

### СИМУЛАЦИОННИ И ЧИСЛЕНИ ЕКСПЕРИМЕНТИ, И РЕЗУЛТАТИ

#### Сравнение на резултати от симулационни експерименти

В настоящата глава са представени, в табличен и графичен вид, резултатите от симулационни и числени експерименти. Това са резултати от експериментите, които са описани самостоятелно в предходната глава 3. Направено е сравнение между отделните експерименти, като се прави сравнение на оптимизираните резултати с резултатите от експеримента с реални данни и отчита подобрението на няколко трафични показатели. Освен сравнение между трафичните показатели, при различните експерименти, е направено и сравнение на консумацията на гориво и два замърсителя на околната среда – въглероден диоксид и прахови частици. С това сравнение се цели да се покаже, че оптималното управление на трафика благоприятства и показатели за замърсяване на околната среда.

Първата колона на таблица 4.1. представя основни трафични показатели, консумацията на гориво и замърсители на околната среда. Втората колона от таблицата представя резултати от симулацията на експеримента с реални данни. Трета колона представя резултати от симулация след въвеждане на оптимизирани посредством двуйерархична оптимизация данни, чрез функцията `solvebilevel()` в MATLAB за продължителност на зелените светлини на светофарите от изследваната пътна мрежа. Четвъртата колона представя резултати от симулация, в която са въведени оптимизирани данни за цикъла след двуйерархична оптимизация посредством функцията `solvebilevel()` в MATLAB. Петата колона представлява оптимизация посредством софтуерния пакет TRANSYT, който се използва като стандарт за оценка на редица стратегии за управление на трафика в световен мащаб.

Последната шеста колона представя мерните единици. В нея внимание трябва да се обърне на съкращението `veh` (англ. `vehicles`) – превозни средства или в този дисертационен труд - коли. Изразходваното гориво се измерва за всички превозни средства, за целия период на симулацията и мерната единица е литри. Двата споменати замърсители на въздуха се измерват в грамове.

Таблица 4.1.: Сравнение на трафични показатели, консумация на гориво и замърсяване на околната среда при четири симулации

	Текущи настройки (условно наречен експеримент с реални данни)	Двуйерархична оптимизационна задача с горна целева функция, максимизираща зеления сигнал	Двуйерархична оптимизационна задача с горна целева функция, минимизираща цикъла	Оптимизация на текущите настройки посредством TRANSYT	Мерни единици
<b>Времезакъснение</b>	51.16	37.23	36.4	35.51	sec/km
<b>Плътност</b>	7.69	6.67	6.91	6.27	veh/km
<b>Интензивност</b>	4095	4126	4107	4124	veh/h
<b>Опашка</b>	29.85	21.17	20.88	16.28	veh
<b>Скорост</b>	34.25	38.98	37.59	38.8	km/h
<b>Общ брой спирания</b>	8322.87	6069.72	7404.37	6401.28	брой
<b>Време за пътуване през участъка</b>	117.76	103.86	102.99	102.13	sec/km
<b>Консумация на гориво</b>	355.53	300.6	338.06	293.98	liter
<b>CO2</b>	874077.52	775912.65	843316.7	768464.08	gram
<b>Прахови частици</b>	340.52	274.26	210.73	174.77	gram

Общ извод от представените данни в таблицата е, че най-добри решения се достигат при използване на софтуерния продукт TRANSYT. Тук обаче важно за направеното изследване е наблюдението, че разликите в числените резултати от другите два експеримента, използващи двуйерархична оптимизация се доближават изключително много до постигнатите резултати с TRANSYT.

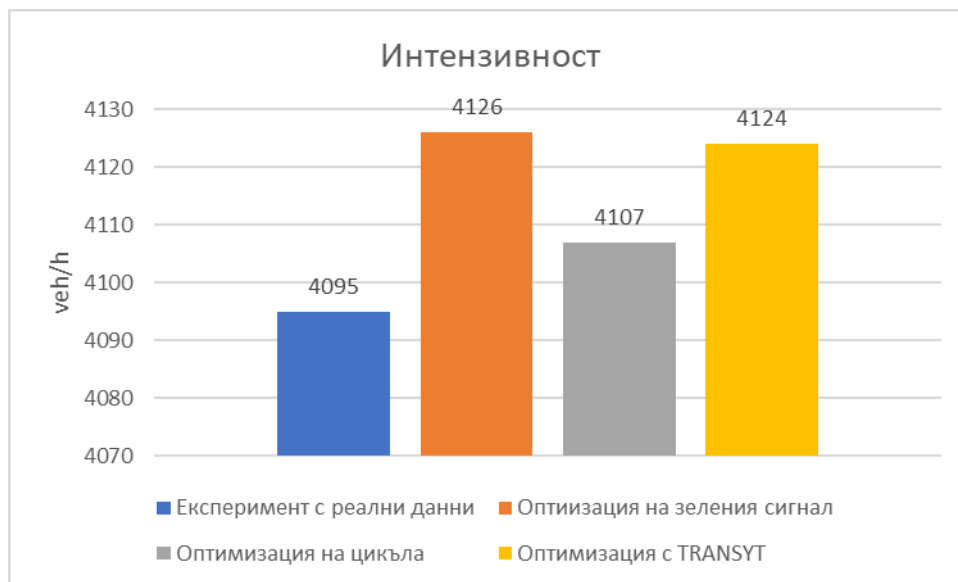
Това наблюдение води до два съществени извода:

- Първо, формалният модел за двуйерархичната задача, дава правдоподобни резултати, които са сравними със софтуерен пакет, който е от години на пазара, и който, както беше споменато, се използва при оценка на различни стратегии за управление на трафика.
- Второ, тъй като резултатите може да се влияят от изменението във входните данни, е възможно при определени входни данни двуйерархичната оптимизация да се окаже, че постига по-добри стойности на трафичните показатели, отколкото се постигат със софтуерния пакет TRANSYT. Този извод, обаче, по-скоро има характер на хипотеза за бъдещи изследвания в областта на използването на двуйерархичната оптимизация за целите на подобряване на трафика в градска среда.

Трябва да се спомене също и бързината на достигане до решение при използване на

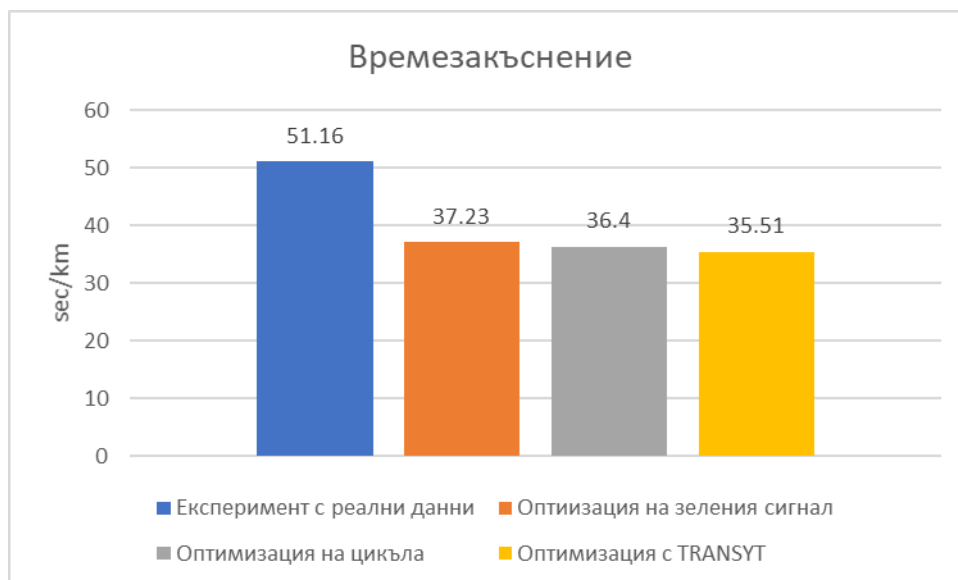
MATLAB и TRANSYT. При използване на MATLAB решението на задачата се постига няколко пъти по-бързо, отколкото е нужно на TRANSYT, да направи оптимизацията на пътната мрежа.

На фигура 4.1 са представени данните за интензивността на трафика при четирите симулации. Както се забелязва, най-ниска интензивност има при експеримента с реални данни – 4095 коли/час. Изненадващо при този показател интензивността при експеримента с оптимизация на зеления сигнал е най-висока – 4126 коли/час, макар и с незначителна преднина спрямо оптимизацията с TRANSYT.



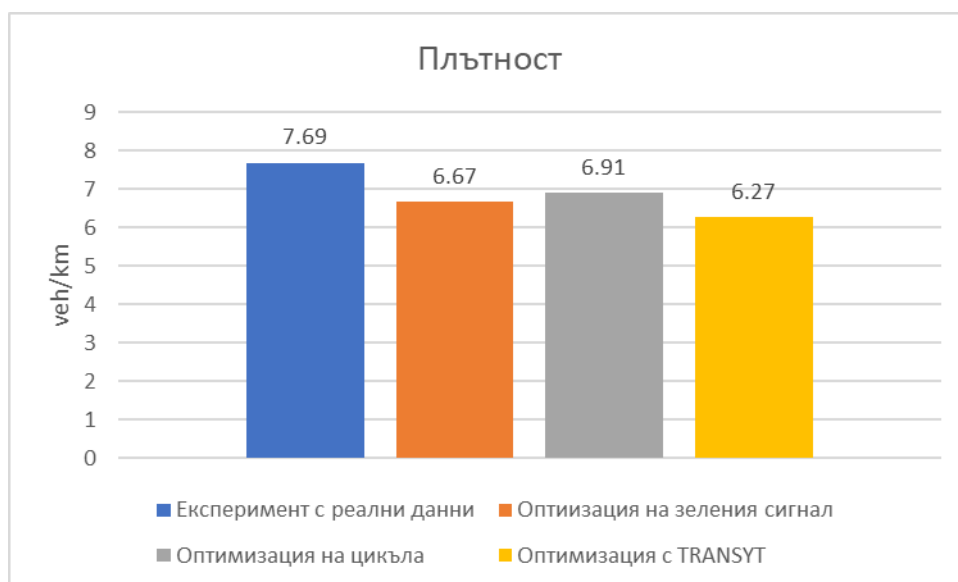
**Фиг. 4.1.** Сравнение на интензивността при четири симулации

Фигура 4.2. представя показателя времезакъснение. По този показател отново най-лош резултат е за експеримента с реални данни (51.16 sec/km). Най-добър е за TRANSYT (35.51 sec/km), но експериментите с двуйерархична оптимизация показва близки до TRANSYT стойности, както може да се види на фигурата.



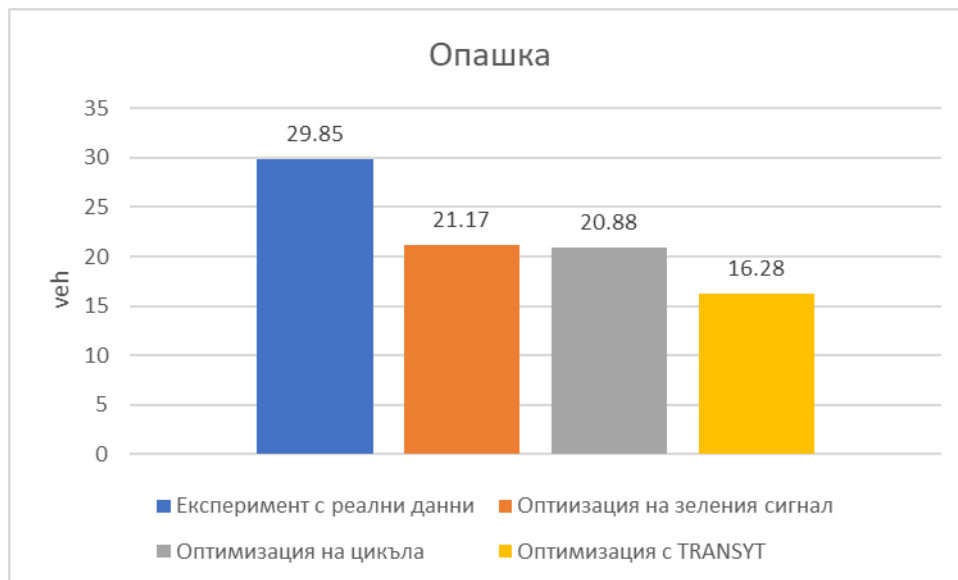
**Фиг. 4.2.** Сравнение на времезакъснението при четири симулации

Показателят плътност е представен на фигура 4.3. Плътността е с най-лоша стойност за първи стълб – експеримент с реални данни и най-добра за TRANSYT, последен стълб. При двуйерархичните оптимизации на зеления сигнал и на цикъла на светофара, предимството е за оптимизацията на зеления сигнал.



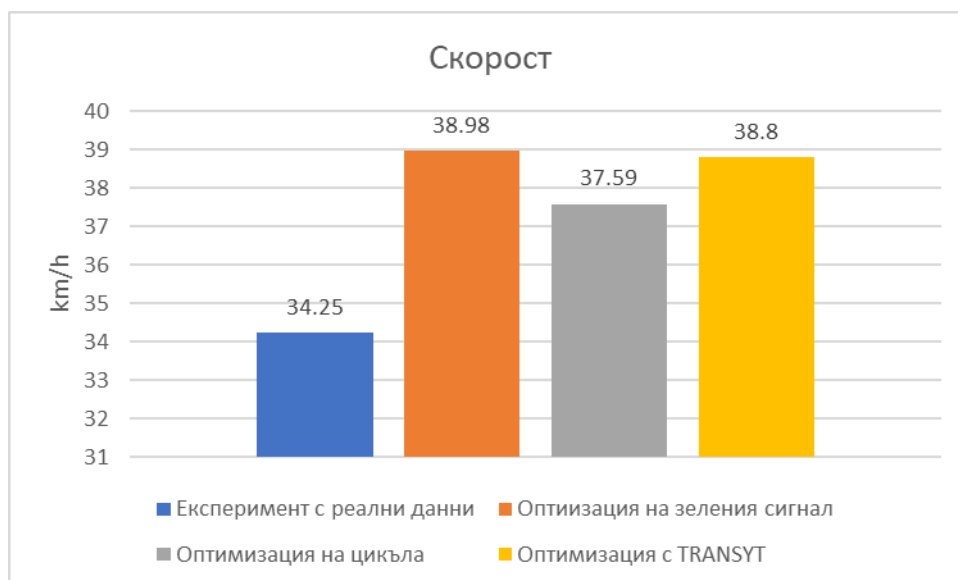
**Фиг. 4.3.** Сравнение на плътността при четири симулации

Опашката, представена на фигура 4.4, измерена в коли е най-дълга при експеримента с реални данни и най-къса при експеримента с TRANSYT. Двуйерархичната оптимизация дава сравнително задоволителни резултати, клонящи повече към резултата на TRANSYT.



**Фиг. 4.4.** Сравнение на опашки при четири симулации

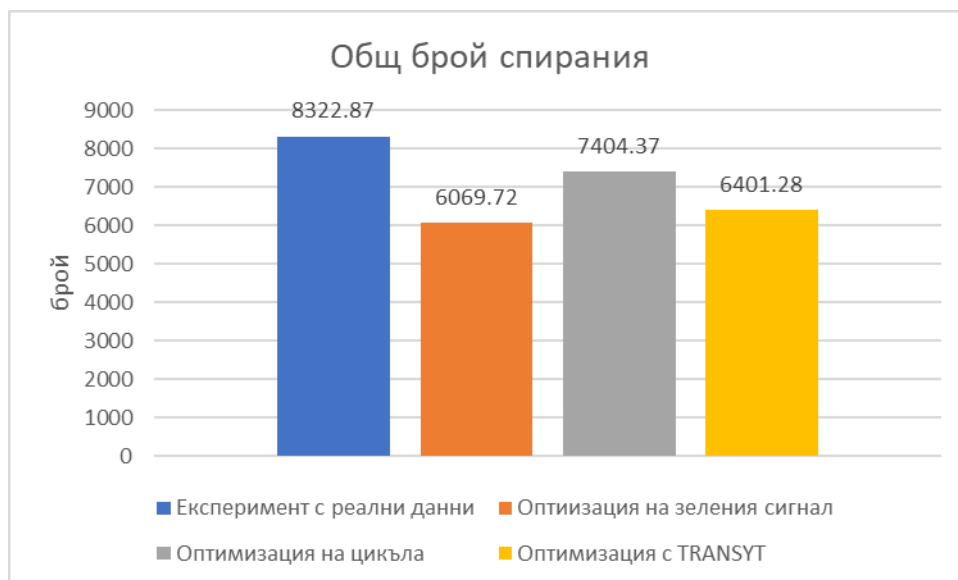
Скоростта, представена на фигура 4.5., е най-ниска за експеримента с реални данни и за втори път двуйерархичната оптимизация на зеления сигнал (38.98 km/h) изпреварва с малко TRANSYT (38.8 km/h). Точни стойности за всеки експеримент са видни на фигура 4.5.



**Фиг. 4.5.** Сравнение на скоростта при четири симулации

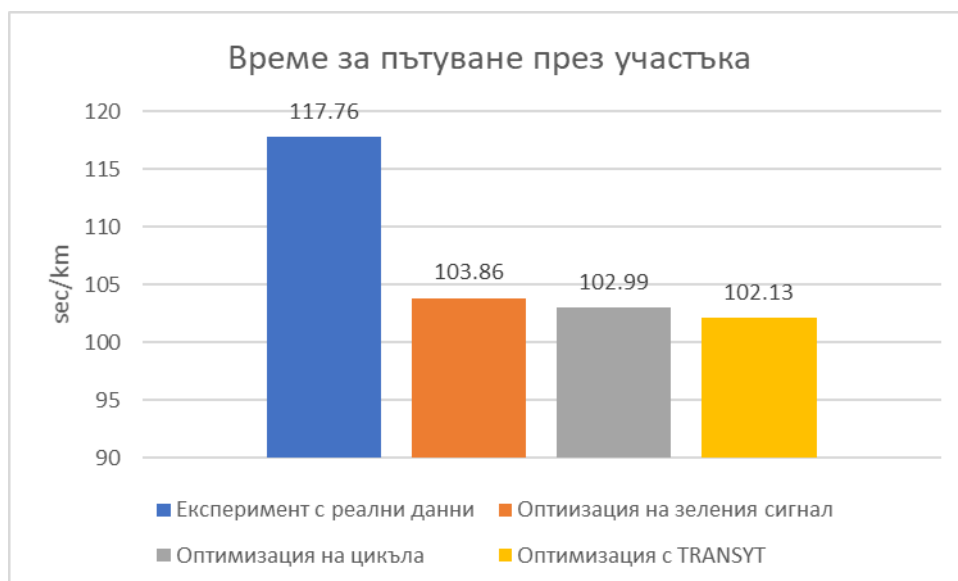
Общия брой спирания е представен на фигура 4.6. Най-висок е той отново за първи стълб от фигурата. Трети трафичен показател показва най-добри резултати при двуйерархична оптимизация на зеления сигнал (6069.72 брой спирания) спрямо TRANSYT (6401.28 брой спирания).





**Фиг. 4.6.** Сравнение на общ брой спирания при четири симулации

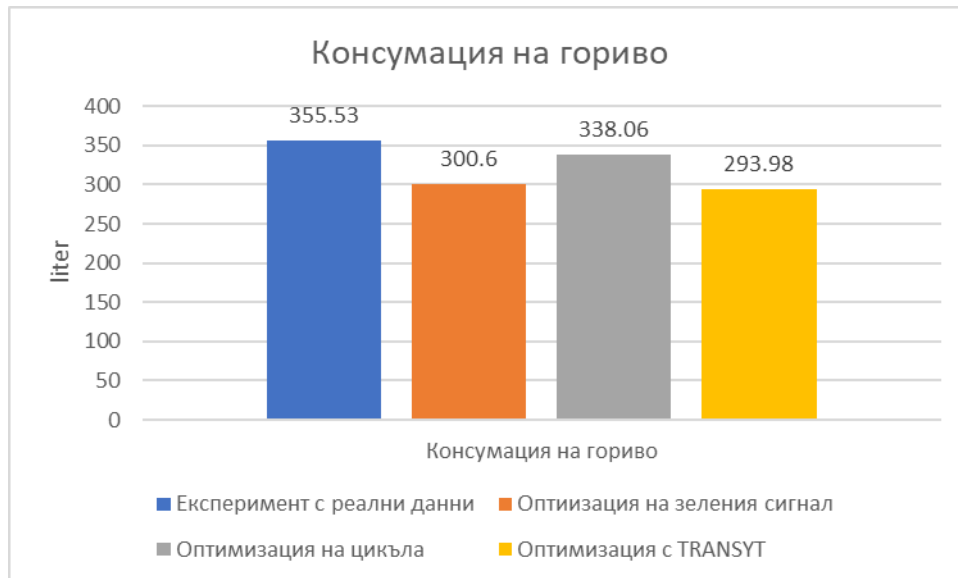
Времето за пътуване през участъка е представено на фигура 4.7. Най-продължително е пътуването при експеримента с реални данни, а най-кратко при TRANSYT, като стойностите за двете двуйерархични оптимизации са много близко до стойността на този показател за TRANSYT (102.13 sec/km). Тук двуйерархичната оптимизация на цикъла на светофара дава по-добри резултати от двуйерархичната оптимизация на зеления сигнал.



**Фиг. 4.7.** Сравнение на време за пътуване през участъка при четири симулации

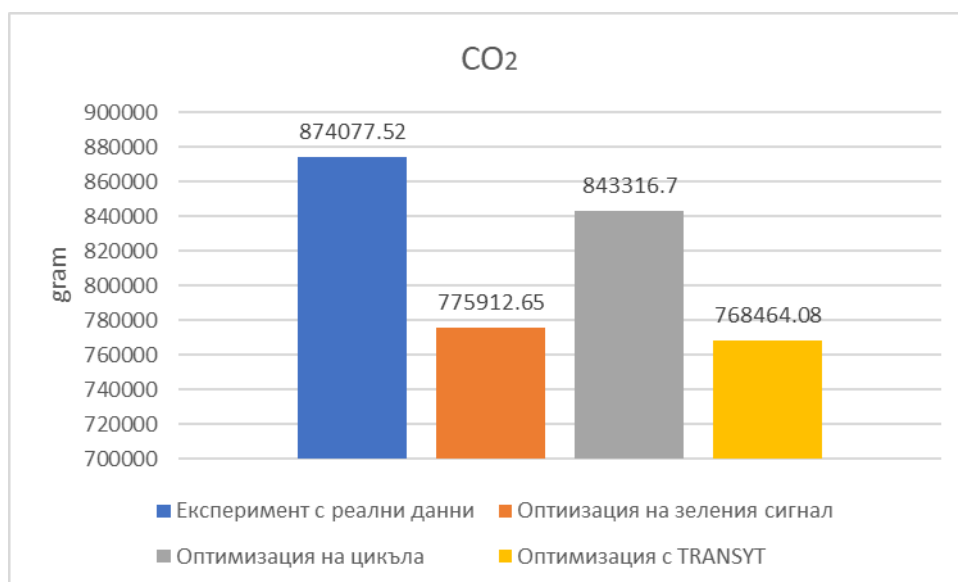
Консумацията на гориво за четирите експеримента е представена на фигура 4.8. Най-висока е консумацията на гориво за първи стълб, а най-ниска за симулацията с TRANSYT

(293.98 liters). Двуйерархичната оптимизация на зеления сигнал, във втори стълб, също дава приемливо нисък резултат (300.6 liters), приближаващ се до резултата в стълба на TRANSYT.



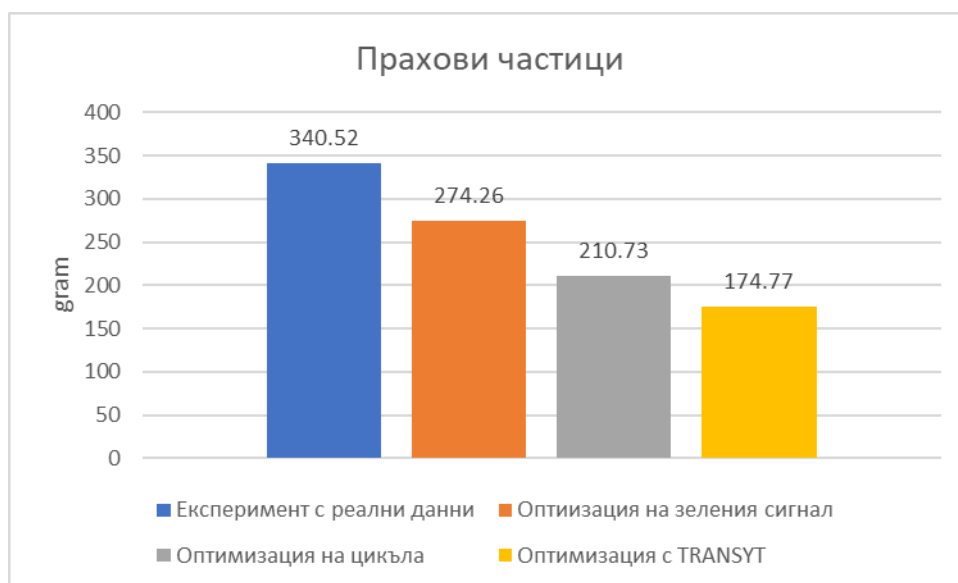
**Фиг. 4.8.** Сравнение на консумация на гориво при четири симулации

Замърсителят на въздуха, въглероден диоксид, е представен на фигура 4.9. Както е видно от фигурата, замърсяването е най-високо при първи стълб и най-ниско при четвърти – експеримента с TRANSYT. Като отново трябва да се отбележи близостта на резултатите на TRANSYT с тези на двуйерархичната оптимизация на зеления сигнал.



**Фиг. 4.9.** Сравнение на CO<sub>2</sub> при четири симулации

Замърсеността на въздуха с прахови частици в следствие трафика е показана на фигура 4.10. Най-висока замърсеност има в експеримента с реални данни, а най-ниска при TRANSYT (174.77 grams).



**Фиг. 4.10.** Сравнение на прахови частици при четири симулации

От представените графики се стига до извода, че експеримента с реални данни дава най-незадоволителни резултати при абсолютно всички показатели. Като очевидна тенденция от графиките е и близостта на резултатите от двете двуйерархични оптимизации с резултатите от оптимизацията с TRANSYT.

### Заклучение

В четвърта глава е направено сравнение на резултатите от проведените симулации по различни трафични показатели. Тази глава е съществена от гледна точка да онагледяване на ползите от двуйерархичната оптимизация за целите на градския трафик.

Двуйерархичната оптимизация е поставена в контекст на сравнение с един от най-старите и най-разпространени програмни продукти, конкретно разработен за оптимизиране на мрежа от светлинно регулирани кръстовища – TRANSYT.

Дефинираните и решени в тази дисертационна работа двуйерархични задачи, дадоха близки резултати с резултатите на TRANSYT, като една от двуйерархичните задачи показва леко предимство пред TRANSYT по три показателя - интензивност, скорост и брой спирания. Това дава основание за по-нататъшна изследователска дейност в областта на използването на двуйерархичния оптимизационен метод за целите на оптимизация на автомобилен градски трафик.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Затрудненото придвижване е често разглеждан проблем, свързан с разрастването на градовете и увеличаването на броят превозни средства. Това налага търсенето на решения за справяне с проблема със задръстванията и затруднения трафик в големите градове и в частност в София.

Направен е обзор на по-значими понятия и теоретични постановки в областта на трафика в градска среда. В тази връзка са изяснени понятия, свързани със светлинно сигнално регулиране. Разгледан са и три модела на трафика, от които един - store-and-forward модела, е в основата на формулирането на модел на трафика в избраната мрежа от кръстовища. Споменати са и стратегии за управление на трафика, които са разработени и се прилагат в световен мащаб.

Разгледани са постиженията в областта на дефинирането и решаването на двуйерархични оптимизационни задачи в областта на оптимизацията на градски трафик в мрежа от кръстовища. Представена е двуйерархична оптимизационна задача. Същата формална постановка в контекста на автомобилния трафик в градска среда т.е. управлението на светлинно сигнално регулирани кръстовища. Разликата от подобни изследвания в дефинирането на целевите функции и логиката на избор на параметри за горната и долната целеви функции.

Обектът на оптимизация – мрежа от четири светлинно регулирани кръстовища. Обектът е моделиран в симулационната среда Aimsun. За целите на експериментите е било поведено полево проучване като са събрани данни за геометрия на пътната мрежа и интензивността на трафика в проучвания участък.

Обърнато бе внимание и на влиянието на оптимизацията на трафика на обекта върху консумацията на гориво и показателите за замърсяване на въздуха. Тази взаимовръзка се изразява в това, че с намаляването на опашките и задръстванията се намаляват и вредните емисии, и консумацията на гориво. Това намаление носи ползи за обществото от гледна точка на здравен аспект. Затова оптимизацията на трафика в градски условия е важна не само за по-бързо придвижване от една до друга точка на града, но и за оптимизиране на нежеланите аспекти на трафика като замърсяване на въздуха.

Определяне на продължителността на светлинните сигнали може да се извърши чрез симулационни модели. Използването на симулационен софтуер има предимството, че не се налагат реални промени в движението при изпробването на различни варианти на настройки на светофарите. Настройките се извършват в симулационна среда, при тази дисертационна

работа използваният програмен продукт е Aimsun. Моделът и настройките на светофарните уредби, както и други параметри на инфраструктура и трафик могат да претърпят множество промени в рамките на компютърната симулация.

Друг симулационен програмен продукт е MATLAB, който е използван за математически модел на обекта на симулиране и оптимизация – пътна мрежа от четири кръстовища по протежението на главен булевард в София.

Резултатите от решението на двуйерархичната задача са сравнени с резултатите на програмния продукт TRANSYT, използван в световен мащаб за оценка на стратегии за управление на трафика. Резултатите показват, че една от двуйерархичните задачи дава предимство пред TRANSYT по три трафични показателя. Като обобщение от направените сравнения се стига до извода, че решенията на двуйерархичните задачи се приближават до решението на TRANSYT повече, отколкото до резултатите от симулация с реални данни. По този начин, с двуйерархична оптимизация, се постигат по-добри трафични показатели от симулацията с реални данни. Предимство на MATLAB пред TRANSYT е по-бързото изчисление, което се постига с използването на MATLAB и функцията solvebilevel().

Двуйерархичната оптимизация дава възможност за повече целеви функции, управляващи параметри и повече ограничения в управляваното пространство. В частност двуйерархичната оптимизация постига по-голяма пропускателна способност на транспортната мрежа от кръстовища, намалява опашките пред светофарите и чрез това се намаляват и задръстванията пред светофарите. Ефектите от по-добрите трафични показатели се усещат и при разхода на гориво и вредните емисии, които намаляват с подобряването на трафичните показатели.

## НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Приносите на дисертационния труд са както следва:

1. Съставен е математически модел на обект – градска пътна мрежа, регулирана със светлинна сигнализация, с цел оптимизация на обекта. Моделът позволява да се правят аналитични и числени симулации за определяне на оптимални стойности на система от светофари.

2. Дефиниран е нов математически модел чрез две йерархично свързани задачи за оптимизиране на градски трафик, което позволяват да се определят оптималните стойности на по-голям брой управляващи променливи: цикъл и продължителност на зелена светлина на система от кръстовища.

3. Оптимизирана е светлинната сигнализация на светофарни уредби и продължителността на цикъла чрез прилагане на разработения йерархичен модел за оптимизация от т. 2. Резултатите от числените експерименти показват, че получаваните решения може да се определят в реално време, което позволява да се адаптира управлението на система светофари съгласно динамиката на транспортния трафик.

4. Разработен е симулационен компютърен модел на мрежа от кръстовища. Моделът позволява да се отчитат допълнителни условия при управлението на трафика, които не може да се формализират аналитично като отчитане наличието на трамвайна линия, разрешение за паркиране в система от транспортни кръстовища.

5. Направено е сравнение на резултатите, получени от аналитичната оптимизация чрез двуйерархичния разработен модел и симулационните резултати на компютърния модел. Показано е, че двуйерархичният модел позволява прилагане на управление в реално време в следствие по-бързото изчисляване на оптималните управляващи взаимодействия в сравнение със симулационните резултати, които изискват значително време за провеждане.

Научно-приложните и приложните резултати от дисертационния труд са приложени при разработването на договори: КП-06-Н37/6 от 6.12.2019 – “Моделиране и оптимизация на градски трафик в мрежа от кръстовища” и КП-06-М27/9 от 2018г. – “Съвременни цифрови методи и средства за изследване и моделиране на транспортни потоци”. Подробно описание на договорите е представено в раздел “Участие в проекти”.

**Таблица Закл.1.** Връзка между резултати, структура на дисертационния труд и направени публикации.

Задача	Тип принос	Публикация	Глава
Съставен е математически модел на обект – градска пътна мрежа, регулирана със светлинна сигнализация, с цел оптимизация на обекта. Моделът позволява да се правят аналитични и числени симулации за определяне на оптимални стойности на система от светофари.	Научно-приложен	1, 2	3
Дефиниран е нов математически модел чрез две йерархично свързани задачи за оптимизиране на градски трафик. което позволяват да се определят оптималните стойности на по-голям брой управляващи променливи: цикъл и продължителност на зелена светлина на система от кръстовища.	Научно-приложен	1, 2	3
Оптимизирана е светлинната сигнализация на светофарни уредби и продължителността на цикъла чрез прилагане на разработения йерархичен модел за оптимизация от т. 2.	Научно-приложен	1, 2	3
Разработен е симулационен компютърен модел на мрежа от кръстовища.	Приложен	4, 5	3
Усложняване на компютърния модел на обекта. Моделът позволява да се отчитат допълнителни условия при управлението на трафика, които не може да се формализират аналитично като отчитане наличието на трамвайна линия, разрешение за паркиране в система от транспортни кръстовища	Приложен	3	3
Направено е сравнение на резултатите, получени от аналитичната оптимизация чрез двуйерархичния разработен модел и симулационните резултати на компютърния модел.	Научно-приложен	2	4

## БЪДЕЩО РАЗВИТИЕ

Въз основа на получените резултати от приложения подход за оптимизиране на трафик в градска среда, изследванията ще се развиват в няколко насоки:

- Усложняване на формалния двуйерархичен модел. Изследване на горни целеви функции на двуйерархичните оптимизационни задачи, които в настоящата дисертация засягат продължителността на зеления сигнал и продължителността на цикъла на светофарите.
- Извършване на експерименти и симулации с новите горни целеви функции в програмни продукти Aimsun, TRANSYT, MATLAB и др.
- Прилагане на двуйерархична оптимизация и сравняването ѝ с оптимизация в TRANSYT върху друг участък от транспортната мрежа в град София. Целта е, да се отчете влиянието на геометрията и интензивността на движението в различен от изследвания транспортен участък върху получените резултати от оптимизационните експерименти.



## БЛАГОДАРНОСТИ

Бих искала да изкажа специални благодарности на научния си ръководител проф. д.т.н. Тодор Стоилов, за отделеното време, полезните съвети и отправените градивни критики. Благодаря и за дадените напътствия в областта на оптимизиране на трафик в градска среда, които определиха и насоката на проведените научно-приложни изследвания в настоящия дисертационен труд.

Благодаря на колегите: проф. д.т.н. Красимира Стоилова, доц. д-р Боряна Вачова, гл. ас. д-р Станислав Димитров, гл. ас. д-р Владимир Иванов, гл. ас. д-р Кристина Павлова, гл. ас. д-р Елена Паунова-Хубенова и гл. ас. д-р Елисавета Тричткова-Кашъмова за оказаната методологична помощ, съвети и препоръки.

Също така благодаря и на всички, които пряко или косвено са допринесли за реализирането на този дисертационен труд.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Aboudolas K. , M. Papageorgiou, E. Kosmatopoulos, Store-and-forward based methods for the signal control problem in large-scale congested urban road networks, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, ISSN: 0968-090X, Volume 17, Issue 2, Elsevier, 2009, pp. 163–174, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2008.10.002>,
- [2] Aboudolas, K., и др., A rolling-horizon quadratic-programming approach to the signal control problem in large-scale congested urban road networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2010. 18 (5): p. 680-694, <https://core.ac.uk/download/pdf/207942582.pdf>
- [3] Aboudolas, K., M. Papageorgiou, and E. Kosmatopoulos, Control and Optimization Methods for Traffic Signal Control in Large-scale Congested Urban Road Networks, in *American Control Conference- ACC '07*, 2007, 9-13 July 2007, New York, NY, USA, <http://eprints.gla.ac.uk/81380/1/81380.pdf>
- [4]. Aimsun Microscopic 8 Macroscopic Modelling Manual, October 2013, Copyright 2005-2013 TSS Transport Simulation Systems
- [5] Aavani P., Mithun K Sawant, Sneha Sawant, Rohit S Deshmukh, A Review on Adaptive Traffic Controls Systems, *International Journal of Latest Engineering and Management Research (IJLEMR)*, ISSN: 2455-4847, Volume 02, Issue 01, January 2017, pp. 52-57
- [6]. Alexandrov A., Monov, V. Method for Adaptive Node clustering in AD HOC Wireless Sensor Networks”. *Communications in Computer and Information Science*, 1, Springer, 2018, ISBN:978-3-319-99446-8, ISSN:1865-0929, DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99447-5\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99447-5_22), pp. 257-263
- [7]. Balabanov A., Stoilov T., Boneva Y.. Linear-Quadratic-Gaussian Optimization of Urban Transportation Network with application to Sofia Traffic Optimization. *Journal Cybernetics and Information Technologies*, 16, 3, ИКТ-BAS, 2016, ISSN:1311-9702, DOI:10.1515/cait-2015-0013, 165-184. SJR:0.17
- [8] Barisone, A., Davide Giglio, R. Minciardi, R. Poggi, A macroscopic traffic model for real-time optimization of signalized urban areas. in *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control*. Vol. 1, DOI: 10.1109/CDC.2002.1184622, IEEE Xplore, pp. 900 – 903, 2002
- [9] Berg, M., A. Hegyi, B. de Schutter, H. Hellendoorn, Integrated Traffic Control for Mixed Urban and Free Way Networks: A Model Predictive Control Approach, *European Journal of Transport and Infrastructure Research-EJTIR*, Vol. 7, No 3, 2007, pp. 223-250, DOI: 10.18757/ejtir.2007.7.3.3390
- [10]. Binning James C , *TRANSYT 15 User Guide - AG70*, Issue F, TRL Limited 2013, 2014, 2015, <https://www.scribd.com/document/361136853/Transyt-15-User-Guide>
- [11] Bretherton, D., Bodger, M., Baber, N., SCOOT – the future, In: *Proc. of the 12th IEEE International Conference on Road Transport Information and Control*, ISBN: 0 86341 386 2, London,UK, IEEE Xplore, 2004. DOI: 10.1049/cp:20040045, pp. 301–306.
- [12]. Casas, J., Ferrer, J. L., Garcia, D., Perarnau, J., & Torday, A. (2010). “Traffic simulation with Aimsun”. In *Fundamentals of traffic simulation* (pp. 173-232). Springer New York.
- [13] Csikós Alfréd, Tamás Tettamanti, István Varga, Nonlinear gating control for urban road traffic network using the network fundamental diagram, *Journal of Advanced Transportation*, Volume 49, Issue 5, August 2015, John Wiley & Sons, Ltd., pp. 597-682, <https://doi.org/10.1002/atr.1291>, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/atr.1291>
- [14] Daganzo, C.F., The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1994. Volume 28, Issue 4, August 1994, pp. 269-287, [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(94\)90002-7](https://doi.org/10.1016/0191-2615(94)90002-7)
- [15] Daganzo, C.F., The cell transmission model, part II: Network traffic. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1995. Volume 29, Issue 2, April 1995, Pages 79-93, [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(94\)00022-R](https://doi.org/10.1016/0191-2615(94)00022-R)
- [16] Diakaki, C, Integrated control of traffic flow in corridor networks, Ph.D. thesis, Department of Production Engineering and Management, Technical University of Crete, Chania, Greece, 1999, pp. 1-204. [https://www.researchgate.net/publication/270751666\\_Integrated\\_Control\\_of\\_Traffic\\_Flow\\_in\\_Corridor\\_Networks](https://www.researchgate.net/publication/270751666_Integrated_Control_of_Traffic_Flow_in_Corridor_Networks)
- [17] Diakaki Christina, Markos Papageorgiou, Kostas Aboudolas, A multivariable regulator approach to traffic-responsive network-wide signal control, *Control Engineering Practice*, Volume 10, Issue 2, Elsevier, February 2002, Pages 183-195, [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(01\)00121-6](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(01)00121-6), <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0967066101001216>
- [18] Diakaki, C., V. Dinopoulou, K. Aboudolas, M. Papageorgiou, E. Shabat, E. Seider, A. Leibov. Extension and New Applications of the Traffic Signal Control Strategy TUC, In: *Transportation Research Record*, No 1856, 2003, pp. 202-211
- [19] Farzaneh, M. and H. Rakha, Procedures for calibrating TRANSYT platoon dispersion model, *Journal of Transportation Engineering-Asce*, 2006. Vol. 132, Issue (7), pp. 548-554, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:7(548).
- [20]. Feng Huifang, Fengshan Bai, Youji Xu, Identification of critical roads in urban transportation network based on GPS trajectory data, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Volume 535, 1 December 2019, 122337, <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.122337>,

- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437119313470>
- [21]. Forehead H, N. Huynh, Review of modelling air pollution from traffic at street-level - The state of the science, j. Environmental Pollution, Vol. 241 (2018), ISSN: 0269-7491, Elsevier, pp. 775- 786. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.06.019>
- [22]. Gartner, N. H., OPAC: A demand-responsive strategy for traffic signal control, Transportation Research Record (906), 1983, pp. 75–84, [https://www.researchgate.net/publication/243768686\\_OPAC\\_A\\_Demand-responsive\\_Strategy\\_for\\_Traffic\\_Signal\\_Control](https://www.researchgate.net/publication/243768686_OPAC_A_Demand-responsive_Strategy_for_Traffic_Signal_Control)
- [23]. Gartner, N.H., C.J. Messer, A.K. Rathi, Traffic flow theory: A state-of-the-art report, Committee on Traffic Flow Theory and Characteristics (AHB45), 2001, [https://www.researchgate.net/publication/248146380\\_Traffic\\_Flow\\_Theory\\_A\\_State-of-the-Art\\_Report](https://www.researchgate.net/publication/248146380_Traffic_Flow_Theory_A_State-of-the-Art_Report).
- [24]. Gazis D. C., Modeling and Optimal Control of Congested Transportation Systems, An International Journal Networks, John Wiley & Sons, Inc , Volume4, Issue2, 1974, pp. 113-124, <https://doi.org/10.1002/net.3230040203>
- [25]. Gazis, D.C., Optimal Control of a system of Oversaturated Intersections, Operations Research, Vol. 12, No. 6, Special Transportation Science Issue, INFORMS, 1964, pp. 815-831, <https://www.jstor.org/stable/168170?seq=1>
- [26]. Gazis, D. C., Potts, R. B., The oversaturated intersection, In: Proc. of the 2nd International Symposium on Traffic Theory, London, UK, 1963, pp. 221–237.
- [27]. Gegov E., Postorino M., Gegov A. , Vatchova B.. Space independent community detection in airport networks. Complex Systems. Relationships between Control, Communications and Computing. Studies in Systems, Decision and Control. Editor Dimirovski G.M.. 55, Springer, 2016, ISBN:“978-3-319-28860-4”, DOI:10.1007/978-3-319-28860-4, 211-248
- [28]. Ghadiri Mehdi, Amir Abbas Rassafi, BabakMirbaha, The effects of traffic zoning with regular geometric shapes on the precision of trip production models, Journal of Transport Geography, Elsevier Ltd, Volume 78, June 2019, pp. 150-159, <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2019.05.018>,
- [29]. Giannakos Lazaros, Evangelos Mintsis, Socrates Basbas, George Mintsis, Christos Taxiltaris, Simulating traffic and environmental effects of pedestrianization and traffic management. A comparison between static and dynamic traffic assignment, 3rd CSUM 2016, Volos, Greece, j. Transportation Research Procedia, Vol. 24, Elsevier, 2017, pp. 313–320, doi: 10.1016/j.trpro.2017.05.105
- [30]. Glomb, A.J., Dispersion of traffic platoons, The University of Arizona: United States – Arizona, 1989, p. 139, [https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/277138/azu\\_td\\_1338835\\_sip1\\_m.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/277138/azu_td_1338835_sip1_m.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [31]. Gündoğan Fatih, Zekai Karagoz, Nihat Kocyigit, Abdullah Karadag, Halim Ceylan, and Yetiş Şazi Murat, An Evaluation of Adaptive Traffic Control System in Istanbul, Turkey, Journal of Traffic and Logistics Engineering Vol. 2, No. 3, September 2014, Engineering and Technology Publishing, pp. 198 – 201, doi: 10.12720/jtle.2.3.198-201
- [32]. Henry J.J., J.L.Farges, J.Tuffal, The PROLYN Real Time Traffic Algorithm, Control in Transportation Systems, Proceedings of the 4th IFAC/IFIP/IFORS Conference, Baden-Baden, Federal Republic of Germany, 20–22 April 1983, pp. 305-310, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-029365-3.50048-1>
- [33]. Homolova, J. Traffic Flow Control, pp. 1-6, <http://library.utia.cas.cz/prace/20050107.pdf>
- [34]. Hunt, P., Robertson, D I, Bretherton, R D, Royle M C, The SCOOT on-line traffic signal optimisation technique, Traffic Engineering & Control, ISSN: 0041-0683, Volume 23, Issue Number: 4, 1982.
- [35]. Ilchev S., R. Andreev, Z. Ilcheva, HybridNET Management and Sensor Data Acquisition System, in IoT 2017: 7th International Conference on the Internet of Things, Linz, Austria, October 22-25, 2017, pp. 32:1 - 32:2, ACM Digital Library, ISBN: 978-1-4503-5318-2, DOI: 10.1145/3131542.3140268.
- [36]. Ivanov V., K. Stoilova, “Traffic Lights Control Using Measured Characteristics of Urban Traffic in Real Time”, Scientific Proceedings of XIV International Congress MACHINES. TECHNOLOGIES. MATERIALS. 2017 - Summer Session, Print ISSN 2535-0021, Year I, Vol. VI, pp. 435-438 (in Bulgarian)
- [37]. Ivanova Yoana, Simulation modelling and assessing the impact of cyberattacks on urban automobile transport systems, International Journal on Information Technologies & Security, ISSN 1313-8251, № 3, 2017, pp. 117-142, <http://ijits-bg.com/contents/IJITS-No3-2017/2017-N3-09.pdf>
- [38]. Ivanova Veronika, Ani Boneva, Yordan Doshev, Stoyan Ivanov, Plamen Vasilev, Multifunctional Operating Station Based on Tcl/Tk and its Applications, Proceedings of the 6th IEEE International Conference “Big Data, Knowledge and Control Systems Engineering” (BdKCSE’2019), Sofia, Bulgaria, IEEE, 27 February 2020, Electronic ISBN: 978-1-7281-6481-6, Print on Demand (PoD) ISBN: 978-1-7281-6482-3, pp. 1-7, DOI: 10.1109/BdKCSE48644.2019.9010662, <https://ieeexplore.ieee.org/document/9010662>
- [39]. Ole Witt-Hansen, On queue accumulation in highways and near traffic lights: A theoretical analysis, 2008, pp. 1-12, [http://olewithhansen.dk/Mathematics/On\\_queues\\_on\\_highways\\_and\\_before\\_traffic\\_lights.pdf](http://olewithhansen.dk/Mathematics/On_queues_on_highways_and_before_traffic_lights.pdf)
- [40]. Kashani, H. R., G. N. Saridis. Intelligent Control for Urban Traffic Systems, Automatica, Vol. 19, No 2, Elsevier, 1983, pp. 191-197, [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(83\)90091-2](https://doi.org/10.1016/0005-1098(83)90091-2)
- [41]. Kariotia Eleni, Socrates Basbas, Evangelos Mintsis, George Mintsis, Christos Taxiltaris, Traffic and environmental impacts of traffic incidents on Thessaloniki’s inner ring road, 3rd Conference on Sustainable Urban Mobility, 3rd CSUM 2016, 26 – 27 May 2016, Volos, Greece, j Transportation Research Procedia , Vol. 24 (2017), Elsevier, pp. 288–295 <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.120>

- [42] Kesur Khewal Bhupendra, Optimization of mixed cycle length traffic signals, *Journal of Advanced Transportation*, Volume 48, Issue 5, August 2014, pp. 431-442, <https://doi.org/10.1002/atr.1190>, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/atr.1190>
- [43] Lowrie, P R, The Sydney coordinated adaptive traffic system - principles, methodology, algorithms, *International Conference on Road Traffic Signalling*, London, United Kingdom, ISBN: 0852962592, 1982, pp. 67-70, <https://trid.trb.org/view.aspx?id=1188851>
- [44] Lofberg J., 2004. YALMIP : A Toolbox for Modeling and Optimization in MATLAB. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design (CACSD)*. 2-4 Sept. 2004, Taipei, Taiwan, September 24, 2004, IEEE Xplore, Print ISBN:0-7803-8636-1, 2005, pp. 284 - 289 , DOI: 10.1109/CACSD.2004.1393890, <https://ieeexplore.ieee.org/document/1393890>.
- [45] Lee Jaeyoung, Mohamed Abdel-Aty, Ximiao Jiang, Development of zone system for macro-level traffic safety analysis, *Journal of Transport Geography*, Volume 38, Elsevier Ltd, June 2014, pp. 13-21, <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.04.018>,
- [46]. Likaj Ramë, Ahmet Shala; Merita Mehmetaj; Pajazit Hyseni, Xhevahir Bajrami, Application of graph theory to find optimal paths for the transportation problem, *IFAC Proceedings Volumes*, Volume 46, Issue 8, 2013, pp. 235-240, <https://doi.org/10.3182/20130606-3-XK-4037.00031>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S147466701634246X>
- [47] Li, Z., Modeling Arterial Signal Optimization with Enhanced Cell Transmission Formulations. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 137, Issue 7, 2011, pp. 445-454. <https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%29TE.1943-5436.0000232>
- [48] Liu Gang, Development and Evaluation of Model-Based Adaptive Signal Control for Congested Arterial Traffic, Doctor of Philosophy Thesis in Transportation Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering University of Alberta, 2015, pp. 1-139, DOI: <https://doi.org/10.7939/R3736M938>
- [49] Lo, H.K., A novel traffic signal control formulation, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Volume 33, Issue 6, 1999, pp. 433-448, [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(98\)00049-4](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(98)00049-4)
- [50] Lo, H.K., A Cell-Based Traffic Control Formulation: Strategies and Benefits of Dynamic Timing Plans, *Transportation Science*, Vol. 35, No. 2, 2001, <https://doi.org/10.1287/trsc.35.2.148.10136>
- [51] Lo, H.K., E. Chang, Y.C. Chan, Dynamic network traffic control, *Transportation Research Part A-Policy and Practice*, ISSN: 0965-8564, Vol. 35A, No. 8, Elsevier, 2001, pp. 721-744.
- [52] Lo, H. A. Chow, Control Strategies for Oversaturated Traffic, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 130, Issue 4, 2004, pp. 466-478.
- [53] Lowrie, P. R., SCATS: The Sydney co-ordinated adaptive traffic system—Principles, methodology, algorithms, In: *Proc. of the IEEE International Conference on Road Traffic Signalling*. London, England, 1982, pp. 67–70
- [54] Maher, M., A comparison of the use of the cell transmission and platoon dispersion models in TRANSYT 13, *Transportation Planning and Technology*, Vol. 34, ISSUE 1, 2011, pp. 71-85, <https://doi.org/10.1080/03081060.2011.530830>
- [55] Manar, A. K. Baass, Traffic Platoon Dispersion Modeling on Arterial Streets, *Transportation Research Record*, *Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1566, 1996. pp. 49-53, <https://doi.org/10.1177/0361198196156600106>
- [56] Mathew Tom V., *Transportation systems engineering*, Chapter 34: Design Principles of Traffic Signa, IIT Bombay, February 19, 2014, pp. 34.1- 34.13, [https://nptel.ac.in/content/storage2/courses/105101008/downloads/cete\\_34.pdf](https://nptel.ac.in/content/storage2/courses/105101008/downloads/cete_34.pdf)
- [57] Michalopoulos, P.G, V. Pisharody, Platoon Dynamics on Signal Controlled Arterials, *Transportation Science*, Volume 14, Issue 4, 1980, pp. 365-396, <https://www.jstor.org/stable/25767992?seq=1>
- [58]. Mintsis E, Belibassakis M, Mintsis G, Basbas S, Pitsiava-Latinopoulou M. The use of a transport simulation model (Aimsun) to determine the environmental effects of pedestrianization and traffic management in the center of Thessaloniki. *European Journal of Environmental Sciences*, Vol. 6, No. 1: 25-29
- [59] Mirchandani, P., Head, L., RHODES—A real-time traffic signal control system: Architecture, algorithms, and analysis. In: *TRISTAN III (Triennial Symposium on Transportation Analysis)*, Vol. 2. 1998, pp. 1-15
- [60] Mirchandani, P., Wang, F. Y., RHODES to intelligent transportation systems, *IEEE Intelligent Systems*, Vol. 20, Issue 1, 2005, pp. 10–15, DOI: 10.1109/MIS.2005.15
- [61] Mohan Ranju, Gitakrishnan Ramadurai, State-of-the art of macroscopic traffic flow modelling, *International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics*, ISSN: 0975-0770 (Print) 0975-5616 (Online), Volume 5, Issue 2–3, Springer, September 2013, pp 158–176, DOI <https://doi.org/10.1007/s12572-013-0087-1>
- [62]. NEMA Standards Publication TS 2-2003 Traffic Controller Assemblies with NTCIP Requirements, National Electrical Manufacturers Association, Virginia, 2003, pp. 1 -246, <http://www.peaktraffic.com/portal/sites/default/files/NEMA%20TS2-2003.pdf>,
- [63] Ngoduy D., Multiclass first order modeling of traffic networks using discontinuous flow-density relationships, *Journal Transportmetrica*, Volume 6, Issue 2, 2010, Pages 111-125, <https://doi.org/10.1080/18128600903251334>
- [64]. Panis L, Broekx S, Liu R. Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits. *Science of the Total Environment* 2006; 371: 270 – 285
- [65]. Panis L. Int, C. Beckx, S. Broekx, I. De Vliieger, L. Schrooten, B. Degraeuwe, L. Pelkmans, PM, NOx and CO2 emission reductions from speed management policies in Europe, *J. Transport Policy*, Vol. 18, Elsevier, 2011, pp.

- 32–37, doi:10.1016/j.tranpol.2010.05.005
- [66] Papageorgiou, M., An Integrated Control Approach for Traffic Corridors, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 3, Issue 1, 1995, pp. 19-30, [https://doi.org/10.1016/0968-090X\(94\)00012-T](https://doi.org/10.1016/0968-090X(94)00012-T)
- [67] Papageorgiou, M., A. Kotsialos. Freeway Ramp Metering: An Overview., In: *IEEE Intelligent Transportation Systems. Conference Proceedings*, 2000, pp. 228-239
- [68] Papageorgiou Markos, Overview of Road Traffic Control Strategies, *IFAC Proceedings Volumes*, Volume 37, Issue 19, October 2004, Springer, Pages 29-40, [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)30657-2](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)30657-2)
- [69] Papageorgiou M., C. Diakaki; V. Dinopoulou; A. Kotsialos; Yibing Wang, Review of road traffic control strategies, *Proceedings of the IEEE*, Print ISSN: 0018-9219, Electronic ISSN: 1558-2256 Volume: 91, Issue: 12, Dec. 2003, IEEE pp. 2043– 2067, DOI: 10.1109/JPROC.2003.819610, <https://ieeexplore.ieee.org/document/1246386>
- [70] Pavlis, Y., W.W. Recker, Inconsistencies in the problem of optimal signal control for surface street networks, in *ItsC 2004: 7th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings*, IEEE: New York, 2004, pp. 361-366, DOI: 10.1109/ITSC.2004.1398925
- [71]. Pavlova K., B. Vatchova, E. Paunova, Quantitative evaluation of throughput capabilities in transportation graph under limited output data conditions, *journal Bulgarian science*, issue 107, ISSN:1314-1031, March 2018, pp. 45-52. (in Bulgarian)
- [72]. Psaltoglou Artemis, Eusebi Calle, Enhanced connectivity index – A new measure for identifying critical points in urban public transportation networks, *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, Volume 21, June 2018, pp. 22-32, <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2018.02.003>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874548218300180>
- [73] Rakha, H., M. Farzaneh, Macroscopic modeling of traffic dispersion: Issues and proposed solutions. in *Transportation Research Board Annual Meeting*, 2005, pp. 1-28, [https://www.researchgate.net/publication/229043604\\_Macroscopic\\_Modeling\\_of\\_Traffic\\_Dispersion\\_Issues\\_and\\_Proposed\\_Solutions](https://www.researchgate.net/publication/229043604_Macroscopic_Modeling_of_Traffic_Dispersion_Issues_and_Proposed_Solutions)
- [74] Rakha, H., M. Farzaneh, Issues and solutions to macroscopic traffic dispersion modeling, *Journal of Transportation Engineering*, ISSN (online): 1943-5436, Vol. 132, ISSUE 7, 2006, pp. 555-564, <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-947X%282006%29132%3A7%28555%29>
- [75]. Saidallah Mustapha, Abdeslam El Fergougui and Abdelbaki Elbelhiti Elalaoui, A Comparative Study of Urban Road Traffic Simulators, *MATEC Web of Conferences* 81, 05002, ICTTE, 2016, pp. 2- 6, DOI: 10.1051/mateconf/20168105002
- [76] Singh M. G., H. Tamura, Modelling and hierarchical optimization for oversaturated urban road traffic networks, *International Journal of Control*, Print ISSN: 0020-7179, Online ISSN: 1366-5820, Vol. 20, No. 6, 1974, pp. 913-934, DOI: 10.1080/00207177408932791, <http://dx.doi.org/10.1080/00207177408932791>
- [77] Sinha Ankur, Pekka Malo, Kalyanmoy Deb, A Review on Bilevel Optimization: From Classical to Evolutionary Approaches and Applications, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Volume: 22, Issue: 2, April 2018, INSPEC Accession Number: 17682856, IEEE, pp. 276 – 295, DOI: 10.1109/TEVC.2017.2712906, <https://ieeexplore.ieee.org/document/7942105>
- [78]. Stoilov T., K. Stoilova, K. Nikolov Bi-level Modelling of Arterial Traffic Control. Preprints of IFAC Symposium “Control in Transportation Systems, Sofia, Bulgaria, 2012, p.126-131; IFAC Papers on-line - DOI 10.3182/20120912-3-BG-2031.00046, Vol.13 part 1, ISBN 978-3-902823-13-7, pp.231-236
- [79]. Stoilov T., Stoilova K., Stoilova V. Bi-level Formalization of Urban Area Traffic Lights Control. *Studies in Computational Intelligence. Book: Innovative Approaches and Solutions in Advanced Intelligent Systems*. Margenov S. и др. Editors, Vol. 648, Springer, 2016, ISBN:978-3-319-32206-3, ISSN:1860-949X, DOI:10.1007/978-3-319-32207-0\_20, 303-318. SJR:0.19
- [80]. Stoilov Todor, Krasimira Stoilova, Markos Papageorgiou, Ioannis Papamichail, Bi-Level Optimization in a Transport Network, *Cybernetics and Information Technologies • Volume 15, No 5, Special Issue on Control in Transportation Systems*, Print ISSN: 1311-9702; Online ISSN: 1314-4081, Marin Drinov BAS, Sofia, 2015, pp. 37 – 49, SJR:212, DOI:10.1515/cait-2015-0023
- [81] Stoilov T., K. Stoilova, Portfolio Risk Management Modelling by Bi-level Optimization, chapter 5 in *Handbook in decision making, vol 2 Risk management in decision making*, ed. J.Lu, L.Jain, G.Zhang, *Intelligent systems reference library vol.33*. Springer – Verlag, Berlin, Heidelberg, ISSN1868-4394, ISBN 978-3-642-25755-1, 2012, p.91-110.
- [82] Stoilova K., T. Stoilov. Integrated management of transportation by bi-level optimization. *International Conference Automatics and Informatics- ICAI, 1-3 October 2020*, Technically supported by: Technical University of Varna, IEEE by Bulgarian section and Federation of the Scientific Engineering Unions, Varna, Bulgaria – ICAI2020 (in print)].
- [83] Stoilova K., T. Stoilov. Bi-level optimization application for urban traffic management. *Annals of Computer science and Information Systems*, Vol.21, ISSN 2300-5963. Proceeding of the 2020 Federated Conference on Computer Science and Information Systems, Sept. 6-9, 2020, Sofia, Bulgaria, pp.327-336
- [84] Stoilova K., T. Stoilov, K. Pavlova. Traffic Management of Urban Network by Bi-level Optimization. *Journal "Information Technologies and Control"*, Online ISSN: 2367-5357, Issue 4, 2019, pp.12-21
- [85]. Stoilova K., T. Stoilov, VI. Ivanov. Bi-Level Optimization as a Tool for Implementation of Intelligent Transportation Systems. *CIT*, vol.17, No2, 2017, pp 97-105. Print ISSN: 1311-9702; Online ISSN: 1314-4081

DOI: 10.1515/cait-2017-0019.

- [86] Tamura, H., Decentralized Optimization for Distributed Lag Models of Discrete Systems, Automatica, Volume 11, Issue 6, Elsevier, November 1975, pp. 593-602, [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(75\)90073-4](https://doi.org/10.1016/0005-1098(75)90073-4)
- [87]. Teodorovic Dusan, Milan Janic, Transportation Engineering: Theory, Practice, and Modeling, ISBN: 978-0-12-803818-5, Elsevier Inc, 2017, pp. 1-882
- [88]. Tsay Huel-Sheng, Hy-Fu Kang and Chien-Hua Hsiao, Algorithm for Estimating Queue Lengths and Stop Delays at Signalized Intersections, Transportation Research Record 1324, pp. 123 – 129, <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1991/1324/1324-014.pdf>
- [89]. Tettamanti Tamás, Advanced Methods for Measurement and Control in Urban Road Traffic Networks, Department of Control for Transportation and Vehicle Systems Budapest University of Technology and Economics, Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, March 11, 2013, pp. 1-114 [https://www.researchgate.net/publication/258513013\\_Advanced\\_Methods\\_for\\_Measurement\\_and\\_Control\\_in\\_Urban\\_Road\\_Traffic\\_Networks\\_Thesis\\_by](https://www.researchgate.net/publication/258513013_Advanced_Methods_for_Measurement_and_Control_in_Urban_Road_Traffic_Networks_Thesis_by)
- [90]. Transyt -Aimsun Link (Version 2), User Guide, Issue B by James C Binning, Copyright Copyright TRL Limited 2010, 2013.
- [91]. Tu Ran, Islam Kamel, An Wang, Baher Abdulhai, Marianne Hatzopoulou, Development of a hybrid modelling approach for the generation of an urban on-road transportation emission inventory, j. Transportation Research Part D, Vol. 62 (2018) , ISSN: 1361-9209, Elsevier, pp. 604–618 , DOI: 10.1016/j.trd.2018.04.011
- [92]. Venkateswaran Shekar, Lance Fiondella, Graph Extraction and Demand Profiling Applications for Transportation Network Research, Procedia Engineering, Volume 159, 2016, pp. 148-157, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.146>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816322949>
- [93] Wang Xuesong, QingyaZhou, JunguangYang, ShikaiYou, YangSong, MeigenXue, Macro-level traffic safety analysis in Shanghai, China, Accident Analysis & Prevention, Volume 125, Elsevier, April 2019, Pages 249-256, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.02.014>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0001457519302441>
- [94] Wei-Hua, L., W. Chenghong, An enhanced 0-1 mixed-integer LP formulation for traffic signal control, Intelligent Transportation Systems, IEEE, Vol. 5, Issue 4, 2004, pp. 238-245, DOI: 10.1109/TITS.2004.838217
- [95] Wesley Ceulemans, Magd A. Wahab, Kurt De Proft and Geert Wets, Modelling Traffic Flow with Constant Speed using the Galerkin Finite Element Method, Proceedings of the World Congress on Engineering 2009, ISBN:978-988-18210-1-0, Vol II, WCE 2009, July 1 - 3, 2009, London, U.K., pp. 1-7, <https://pdfs.semanticscholar.org/345a/e4f760c37031be58854ff3e844865c9d81e8.pdf>
- [96] Wong S.C., W.T.W., Jianmin Xu, C.O. Tong, A Time-dependent TRANSYT Traffic Model for Area Traffic Control. Conference: Second International Conference on Transportation and Traffic Studies (ICTTS ), Traffic and Transportation Studies, 2000, DOI: 10.1061/40503(277)90
- [97] Wu Xinkai , Henry X. Liu , Douglas Gettman, Identification of oversaturated intersections using high-resolution traffic signal data, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 18, Issue 4, Elsevier, August 2010, pp. 626-638, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2010.01.003>
- [98] Yin, H., S. C. Won , J. Xu, C. K. Won . Urban Traffic Flow Prediction Using a Fuzzy Neural Approach, Transportation Research, Part C, Volume 10, Issue 2, 2002, pp. 85-98, [https://doi.org/10.1016/S0968-090X\(01\)00004-3](https://doi.org/10.1016/S0968-090X(01)00004-3)
- [99] Yu, L. Platoon dispersion and calibration under advanced traffic control strategies. in Proceedings of the 1997 Conference on Traffic Congestion and Traffic Safety in the 21st Century, June 8, 1997 - June 11, 1997, Chicago, IL, USA: ASCE, pp. 507-5013
- [100] Yu, L., Calibration of Platoon Dispersion Parameters on the Basis of Link Travel Time Statistics. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, ISSN: 0361-1981, Issue Number: 1727, 2000. pp. 89-94, <https://trid.trb.org/view/671637>
- [101] Zhang, L., Y. Yin, and Y. Lou, Robust Signal Timing for Arterials Under Day-to-Day Demand Variations, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2192, Issue 1, 2010: pp. 156-166, <https://doi.org/10.3141/2192-15>
- [102] Анто́в А., Транспортно моделиране 101: Практическо ръководство, ISBN: 978-619-90849-0-8 (печатна), ISBN: 978-619-188-109-3 (PDF формат), София, 2017, стр. 1-199 [http://infrarch.com/doc/Antov%20\(2017\)%20-%20Transport%20Modelling%20101.pdf](http://infrarch.com/doc/Antov%20(2017)%20-%20Transport%20Modelling%20101.pdf)
- [103]. Бонева Й., Симулиране на автомобилен трафик на светлинно регулирани кръстовища, Сборник доклади на международна конференция по Автоматика и Информатика'2018, София, 4-6 Октомври 2018, САИ Джон Атанасов, 2018, ISSN:1313-1850, CD: ISSN 1313-1869, стр. 143-146
- [104]. Бонева Йорданка, Оптимизация на автомобилен трафик на светлинно регулирани кръстовища посредством симулационна среда Aimsun, Научно списание „Механика Транспорт Комуникации“, ISSN 1312-3823 (print), ISSN 2367-6620 (online), том 16, брой 2, 2018 г, статия № 1663, ВТУ „Тодор Каблешков“, стр. I-1 – I-9. <https://mtc-aj.com/library/1663.pdf>
- [105]. Георгиев Георги, Доброслав Симеонов, Определяне и оптимизиране на пропускателната способност на светлинно сигнално регулирани кръстовища, Научно списание „ Механика, Транспорт, Комуникации“, ISSN 2367-6620 (online) ISSN 1312-3823 (print), том 14, брой 3/3, статия № 1356, 2016, ВТУ, София, стр.

- VIII-21 – VIII-32, <https://mtc-aj.com/library/1356.pdf>
- [106]. Иванов В. Измерване на характеристики на транспортен трафик. Proceedings of Trans&MOTAUTO'2017, 26.6-1.07.2017, Burgas, Bulgaria, ISSN 1313-5031 (Print), ISSN 2535-0307(online), yer1, issue 2(2), Sofia, Bulgaria, pp.112-115
- [107]. Иванчев Димитър, Гюнтер Неглер, Мрежово оптимизиране, ISBN 954-438-028 -0, Технически университет – София, Издателство на ТУ, София, 1993, стр. 1-206
- [108] Маджарски Е. М., Салиев Д. Н., Младенов Г. Д., Станев Г. Р., Оптимизиране на движението на светлинно регулирано кръстовище с голямо транспортно натоварване, Proceedings of Trans&MOTAUTO'09, 2009, стр. 77-80, [https://e-university.tu-sofia.bg/e-publ/files/3503\\_17\\_96.madjarski.tm09.pdf](https://e-university.tu-sofia.bg/e-publ/files/3503_17_96.madjarski.tm09.pdf)
- [109] НАРЕДБА № 17 от 23 .07.2001 г. за регулиране на движението по пътищата със светлинни сигнали Обн. - ДВ, бр. 72 от 17.08.2001 г.; доп., бр. 18 от 05.03.2004 г.; изм. и доп., бр. 35 от 15.05.2015 г., в сила от 18.05.2015 г.  
[http://www.api.bg/files/8114/5923/5059/Naredba\\_17\\_23-07-2001\\_v\\_sila\\_2015.pdf](http://www.api.bg/files/8114/5923/5059/Naredba_17_23-07-2001_v_sila_2015.pdf)
- [110] Николова Христина Интелигентни транспортни системи: Политика и практика за внедряване, ISBN 978-954-644-978-0, Изд. комплекс – УНСС, София, 2007, стр. 1-248.
- [111] Николова Христина, Марта Клисурова, Интелигентни транспортни системи в градска среда, ISBN 978–954-644-813-2, Изд. комплекс- УНСС, София, 2015, стр. 1-127.
- [112] Павлова К., Дисертация за придобиване на образователната и научна степен „доктор“ по докторска програма „Приложение на принципите и методите на кибернетиката в различни области на науката“, професионално направление: 5.2. „Електротехника, електроника, автоматика“, Синтез на алгоритми за оптимално управление на транспортна система, ИИКТ-БАН, секция „Йерархични системи, София, 2017, стр. 1 - 133
- [113]. Панайотова Галина, Математическо моделиране, ISBN 978-619-185-037-2, София (Уни Бит), Изд. „За буквите-О-писменехъ“, 2014, стр. 1-225.
- [114] Салиев Дурхан, Алгоритъм за оптимизация на фазите и цикъла на светлинно регулирани кръстовища при промяна на параметрите, определящи тяхната продължителност, Научна конференция с международно участие по авиационна, автомобилна и железопътна техника и технологии Бул Транс-2010, 24-26 September 2010, България, Созопол, ISSN 1313-955X, стр. 313-316,  
[https://e-university.tu-sofia.bg/e-publ/files/3510\\_D\\_Saliev\\_Sozopol\\_END.pdf](https://e-university.tu-sofia.bg/e-publ/files/3510_D_Saliev_Sozopol_END.pdf)
- [115]. Стоилов Т., Вачова Б., Бонева Й., Паунова Е. Оптимизация и интелигентно управление на автомобилен трафик - Моделиране на трафик. Научен отчет по проект: „AComIn: Advanced Computing for Innovation“, Институт по информационни и комуникационни технологии. БАН, 2015. стр. 144-153  
[http://www.iict.bas.bg/acomin/docs/deliverables/D01-192/13\\_Boryana-Yordanka-Elena-pp144-153.pdf](http://www.iict.bas.bg/acomin/docs/deliverables/D01-192/13_Boryana-Yordanka-Elena-pp144-153.pdf)
- [116]. Тодорова Мирена, Борис Гюров, Моделиране на сигнализирането на четириклонно кръстовище чрез разработване на EXCEL ADD-INS, списание „ Механика, Транспорт, Комуникации“, ISSN 2367-6620 (online) ISSN 1312-3823 (print), том 16, брой 3/1, статия № 1600, 2018, ВТУ, София, стр. I-8 – I-15, <https://mtc-aj.com/library/1600.pdf>
- [117]. Тодорова Мирена, Усъвършенстване на нормативна база с цел подобряване на управление на движението в градовете, Научно списание „ Механика, Транспорт, Комуникации“, ISSN 2367-6620 (online) ISSN 1312-3823 (print), том 14, брой 3/1, статия № 1308, 2016, ВТУ, София, стр. I-16 – I-22, <https://mtc-aj.com/library/1308.pdf>
- [118] Тодорова Мирена, Определянето на броя и вида на фазите по „Метод на сумата на фазовите коефициенти, Научно списание „ Механика, Транспорт, Комуникации“, ISSN 2367-6620 (online) ISSN 1312-3823 (print), том 15, брой 3, статия № 1444, 2017, ВТУ, София, стр. I-8 – I-14, <https://mtc-aj.com/library/1444.pdf>
- [119]. Трендафилов Златин, Анализ на методите за определяне на фазите на светофарните уредби, Научно списание „ Механика, Транспорт, Комуникации“, ISSN 2367-6620 (online) ISSN 1312-3823 (print), том 15, брой 3, статия № 1446, 2017, ВТУ, София, стр. I-21 – I-27, <http://www.mtc-aj.com/library/1446.pdf>
- [120]. Трендафилов Златин, Симулационен модел за анализ на адаптивното управление на светофарни уредби, Научно списание „ Механика, Транспорт, Комуникации“, ISSN 2367-6620 (online) ISSN 1312-3823 (print), том 16, брой 3/1, статия № 1601, 2018, ВТУ, София, стр. I-17 – I-22, <https://mtc-aj.com/library/1601.pdf>
- [121] National Association of City Transportation Officials, <https://nacto.org/publication/transit-street-design-guide/intersections/signals-operations/short-signal-cycles/> - (посетен на 14.11.2020)
- [122] <https://yalmip.github.io/command/solvebilevel> - (посетен на 14.11.20202)



### **Декларация за оригиналност на резултатите**

Декларирам, че настоящата дисертация съдържа оригинални резултати, получени при проведени от мен научни изследвания {с подкрепата и съдействието на научния ми ръководител}. Резултатите, които са получени, описани и/или публикувани от други учени, са надлежно и подробно цитирани в библиографията.

Настоящата дисертация не е прилагана за придобиване на научна степен в друго висше училище, университет или научен институт.

Подпис:



# Abstracts of Dissertations

Number 4, 2021

---

INSTITUTE OF INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES  
BULGARIAN ACADEMY OF SCIENCES

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ

ИНСТИТУТ ПО ИНФОРМАЦИОННИ И КОМУНИКАЦИОННИ ТЕХНОЛОГИИ

---

Брой 4, 2021

# Автореферати на дисертации