



ЙОРДАНКА ЛЮБОМИРОВА БОНЕВА

ОПТИМИЗИРАНЕ НА ТРАФИК В ГРАДСКА СРЕДА

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на

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“

Научен ръководител: **проф. д.т.н. Тодор Стоилов**

София, 2020 г.

Дисертацията е обсъдена и допусната до защита на разширено заседание на секция "Разпределени Информационни и Управляващи Системи (РИУС)" на ИИКТ-БАН, състояло се на 17.11.2020 г и на вътрешна защита на 01.12.2020 г..

Дисертационният труд е структуриран в увод, изложение от 4 глави, заключение, декларация за оригиналност на резултатите, списък на публикациите по дисертационния труд и библиография. Дисертационният труд е в обем от 132 страници, 37 фигури и 11 таблици, 122 цитирани литературни източника.

Защитата на дисертацията ще се състои наГ. от часа в зала на блок на ИИКТ-БАН на открито заседание на научно жури в състав:

1.
2.
3.
4.
5.

Резервни членове:

1.
2.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в стая 215 на ИИКТ-БАН, ул. "Акад. Г. Бончев", бл. 25А.

Автор: *инж. Йорданка Любомирова Бонева*

Заглавие: **ОПТИМИЗИРАНЕ НА ТРАФИК В ГРАДСКА СРЕДА**

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, 9TH 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
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 преминат 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

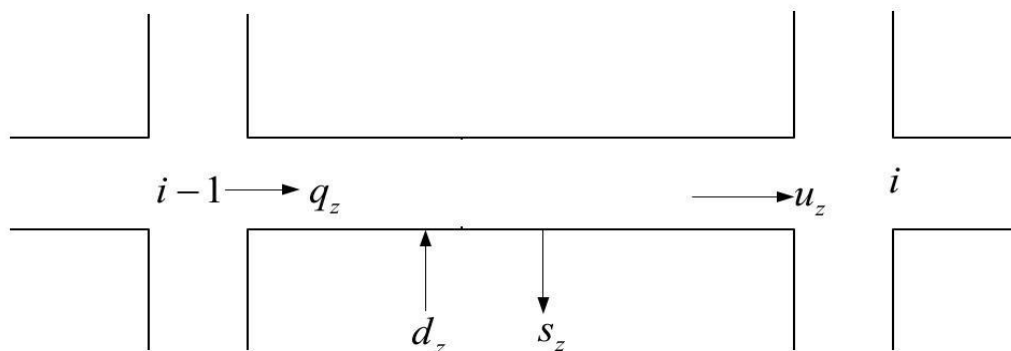
$q_z(k), u_z(k)$ = притокът и отливът от звено z в периода $[kT, (k+1)T]$

$d_z(k), s_z(k)$ = 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.

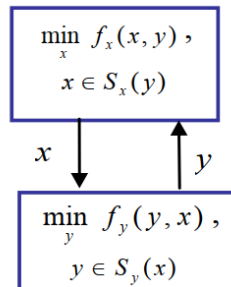
Разгледан е подхода store-and-forward, който е в основата на формулирането на модел на трафика и решаването на оптимизационна задача за избрана мрежа от кръстовища.

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

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

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.

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

което означава, че x^{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 - $f_x(x)$.

Заклучение

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

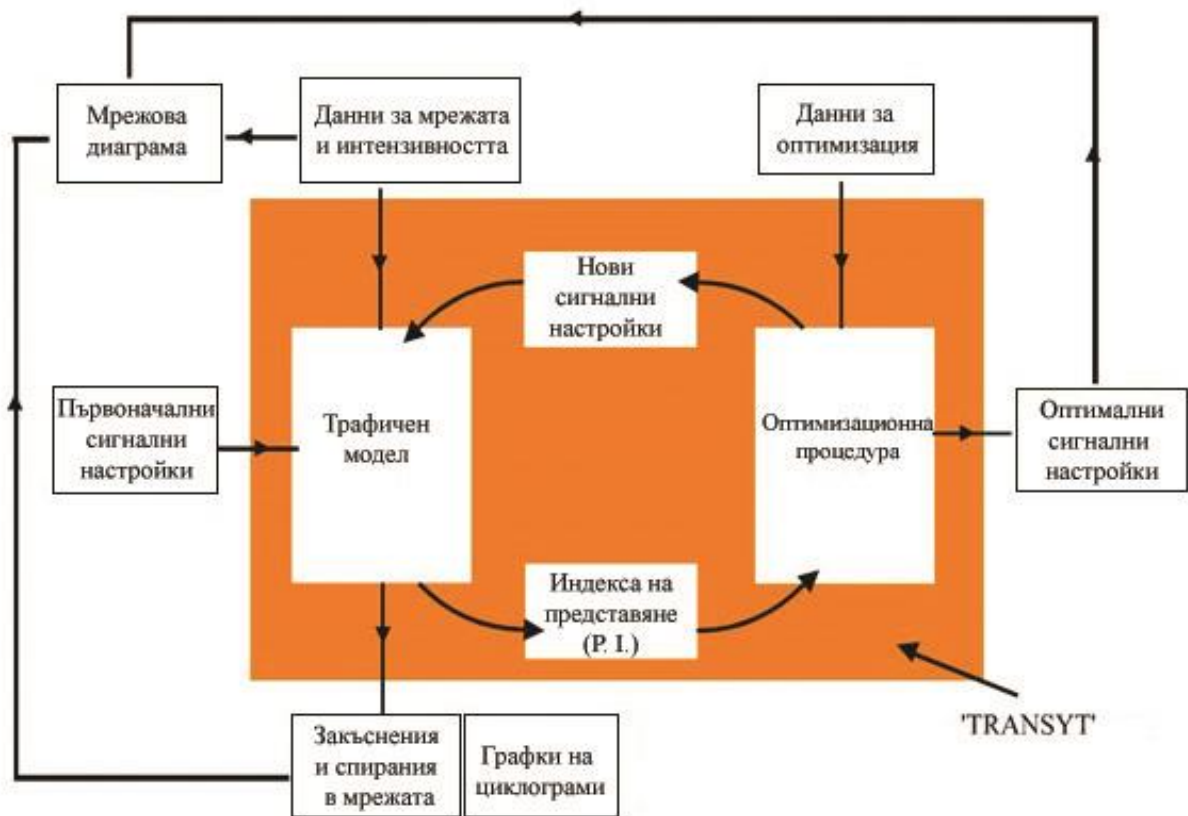
Използвани програмни пакети за моделиране и оптимизиране на трафик

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.

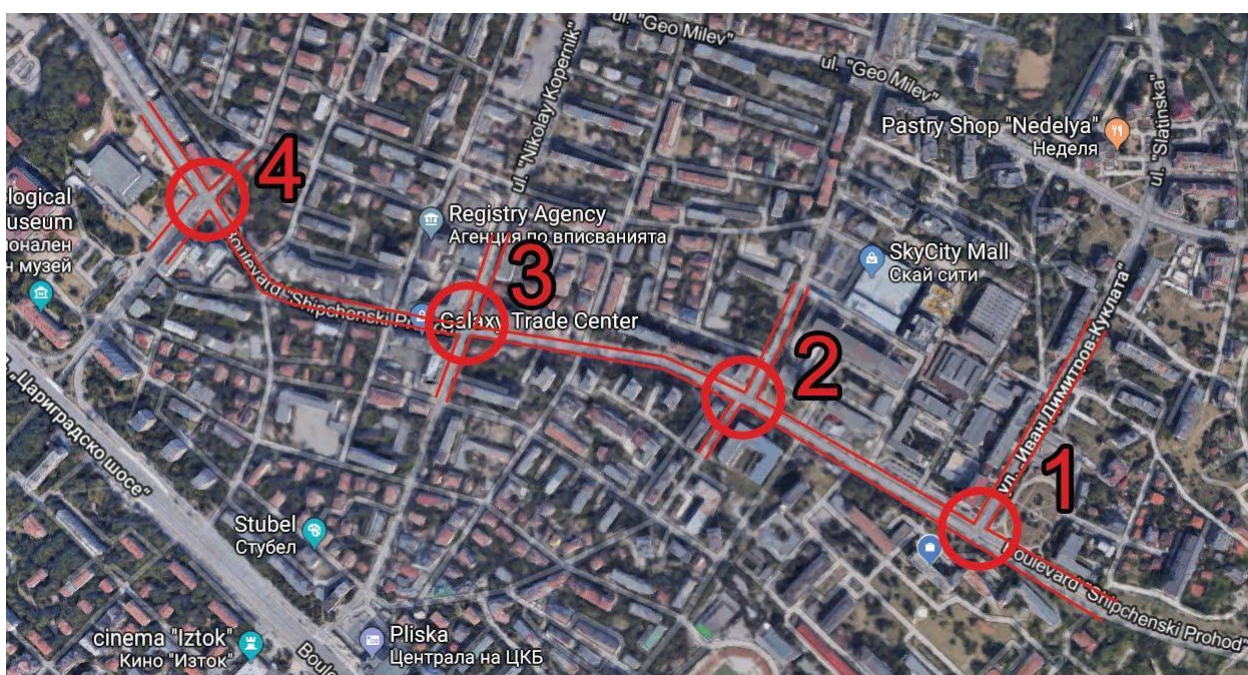
Първоначално се създава модел на транспортна мрежа в пакет Aimsun, където са въведени и първоначални настройки на светлинната сигнализация. Създадената транспортна мрежа се експортира в TRANSYT 15. Изчислява се първоначалния Performance Index и се провежда първа итерация на оптимизационна процедура за 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 Aimusn. 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.

средства и прави възможни симулации, които в реални условия биха могли да доведат до затруднения в движението, задръствания, замърсяване и неудовлетвореност във водачите. на В 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

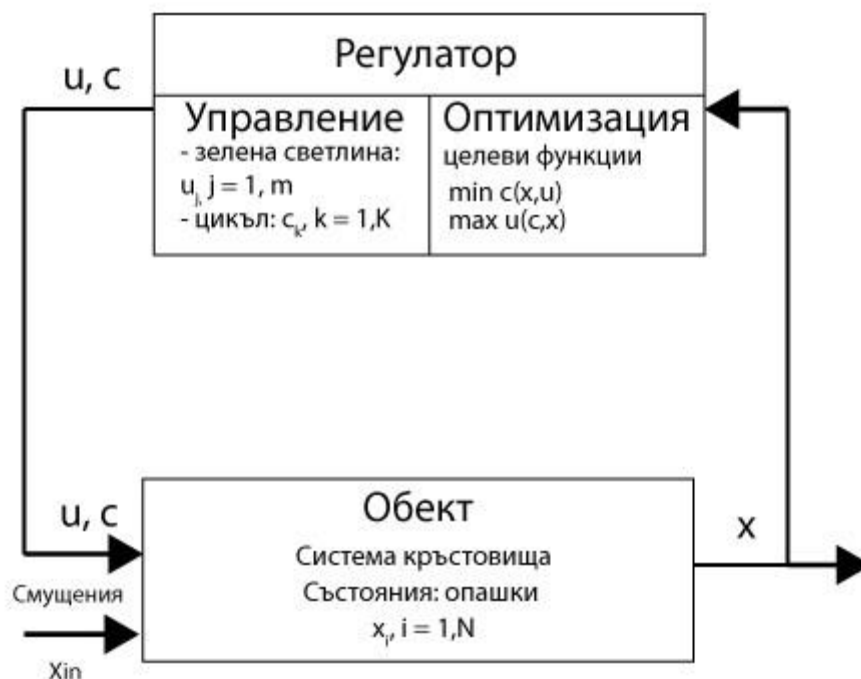
Резюме на експеримента

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 спирания	#/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 спирания		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 единадесет 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.

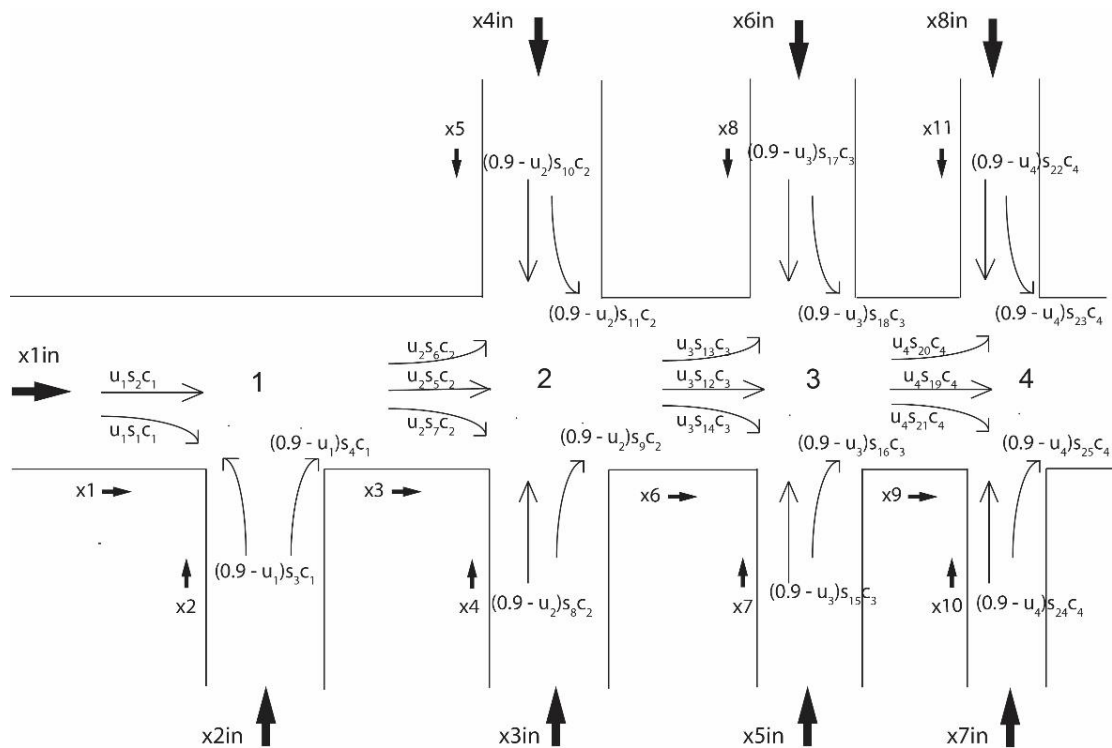
Оптимизация на зеления сигнал и опашките в транспортната мрежа чрез двуйерархична оптимизация

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.

$x1in - x8in$ – са коли влизащи на час за дадения подход (улица)

$x1 - x11$ – 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 $x1 + x2 + \dots + x11$ да е минимален, което се представя с целевата функция.

Формулата, по която се изчислява опашка пред светофар е следната за $x1$ и тя е аналогична за всички опашки от фигура 3.17.

$$x1 \leq x10 + x1in - u1*s2*c1 - u1*s1*c1$$

Опашката е равна на намиращите се от предишен времеви период коли на светофара $x10$, плюс колите които пристигат на светофара за даден период от време $x1in$, минус колите, които преминават през кръстовището по време на зеления сигнал в права посока ($u1*s2*c1$) и завиващи коли ($u1*s1*c1$). 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

	Фиксиран времеви план	Резултати от двуйерархична оптимизация	
Трафични параметри	Стойност	Стойност	Мерни единици
Времезакъснение	51.16	37.23	sec/km
Плътност	7.69	6.67	veh/km
Интензивност	4095	4126	veh/h
Консумация на гориво	355.53	300.6	l
CO₂	874077.52	775912.65	g
NO_x	1835.5	1658.83	g
PM – прахови частици	340.52	274.26	g
VOС – летливи вещества	1131.69	980.42	g
Средна опашка	29.85	21.17	veh
Брой спирания	0.16	0.12	#/veh/km
Скорост	34.25	38.98	km/h
Време в спряло състояние	38.42	27.73	sec/km
Общ брой спирания	8322.87	6069.72	
Общо пропътувано време	94.76	82.9	h
Пропътувано време за участъка	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 ₂	875112.07	843316.7	768464.08	g
NO _x	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	

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

Изводи от експеримента

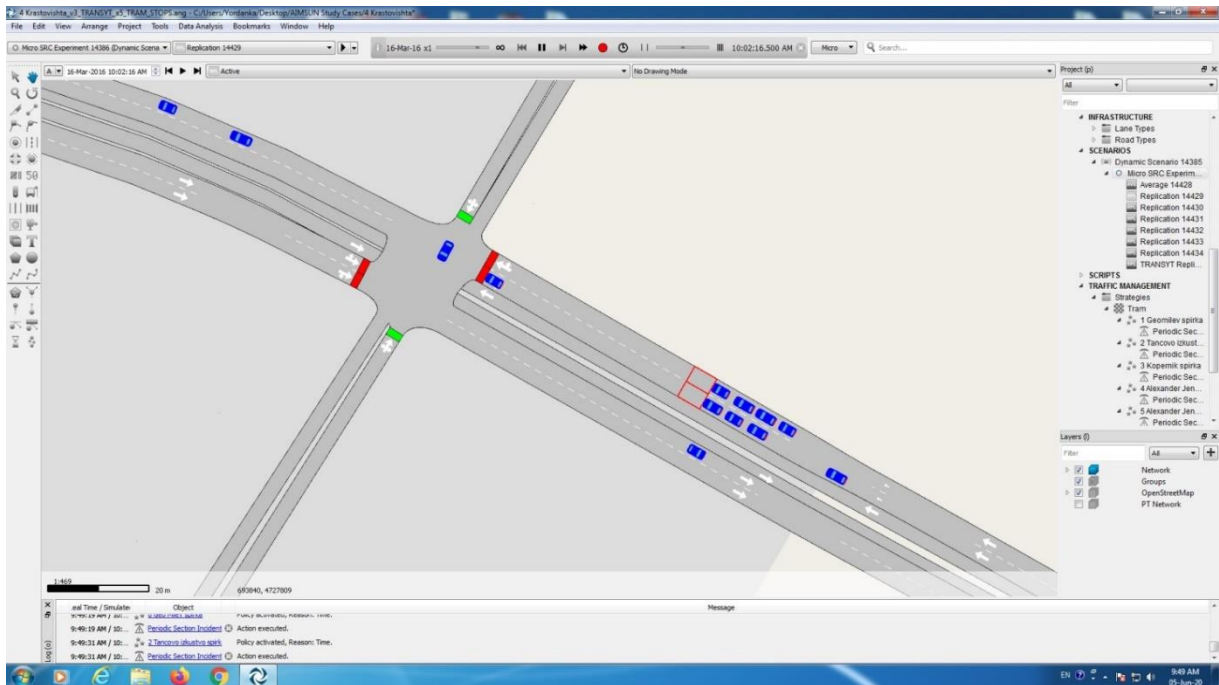
В експеримента беше представена скрипт в MATLAB за оптимизиране на дължината на цикъла на мрежа от светофари по бул. Шипченски проход в София. Скриптът решава проблем на две нива, използвайки подхода store-and-forward като ограничение за долната целева функция. Прави се сравнение с резултатите на най-съвременния 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

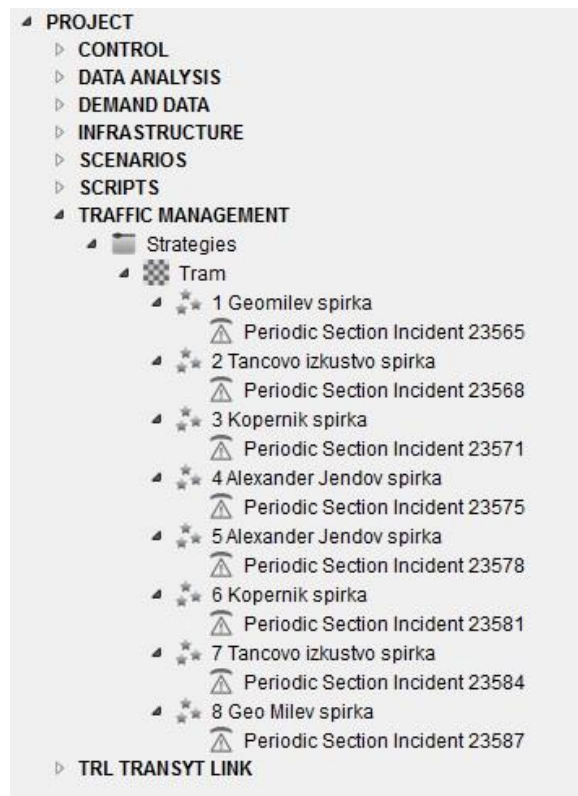
Експериментът ще резултати от проучване относно влиянието на трамвайните спирки върху движението. Хипотезата е, че трамвайните спирки ще повлияят отрицателно на движението. По-важно е обаче да се установи степента на това влияние, тъй като това може да служи за целите на управлението на града за вземане 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 CO₂, 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.

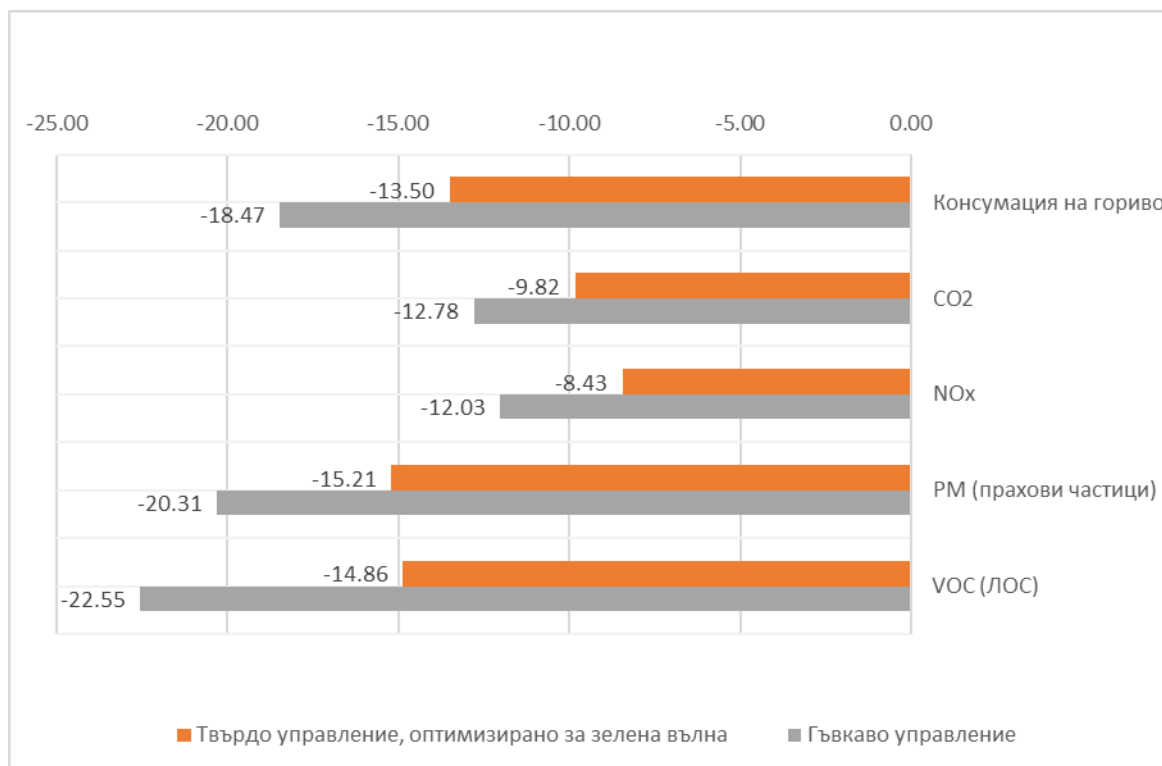
	Настоящо твърдо управление	Твърдо управление, оптимизирано за зелена вълна	Гъвкаво управление на светофарите	Мерни единици
Консумация на гориво	355.53	307.52	289.86	l
CO ₂ (въглероден диоксид)	874077.52	788275.5	762346.78	g
NO _x (азотни оксиди)	1835.5	1680.73	1614.73	g
PM (прахови частици)	340.52	288.71	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 ₂ (въглероден диоксид)	874077.52	-9.82	-12.78
NO _x (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 червен 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
Времезакъснение	51.16	37.23	36.4	35.51	sec/km
Плътност	7.69	6.67	6.91	6.27	veh/km
Интензивност	4095	4126	4107	4124	veh/h
Опашка	29.85	21.17	20.88	16.28	veh
Скорост	34.25	38.98	37.59	38.8	km/h
Общ брой спирания	8322.87	6069.72	7404.37	6401.28	брой
Време за пътуване през участъка	117.76	103.86	102.99	102.13	sec/km
Консумация на гориво	355.53	300.6	338.06	293.98	liter
CO2	874077.52	775912.65	843316.7	768464.08	gram
Прахови частици	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.

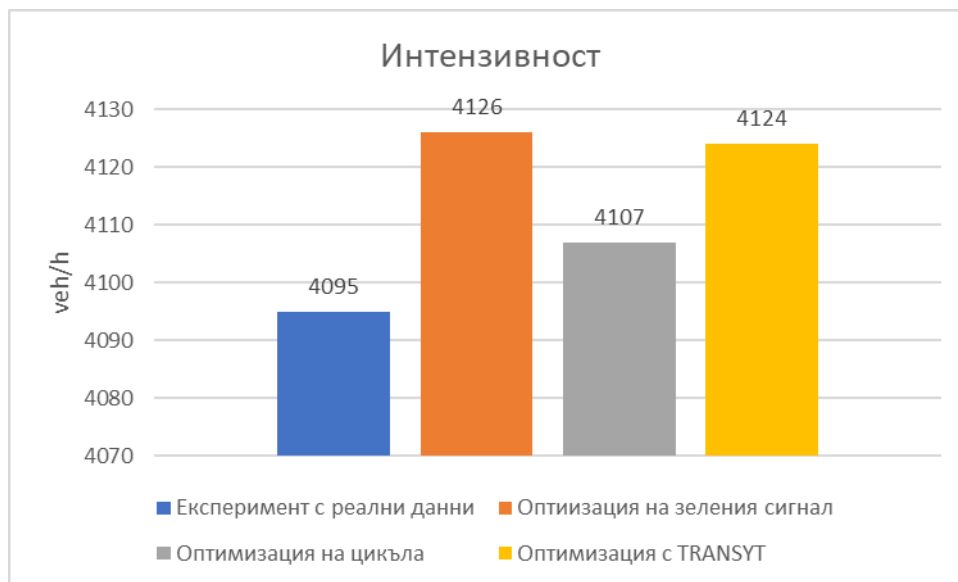
Това наблюдение води до два съществени извода:

- 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

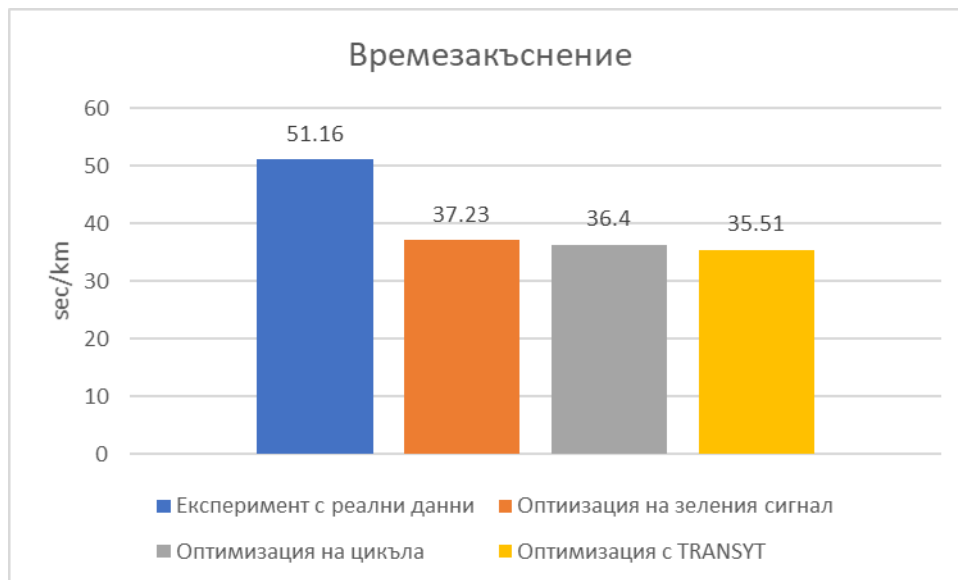
MATLAB и TRANSYT. При използване на MATLAB решението на задачата се постига няколко пъти по-бързо, отколкото е нужно на TRANSYT, да направи оптимизацията на пътната мрежа.

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.



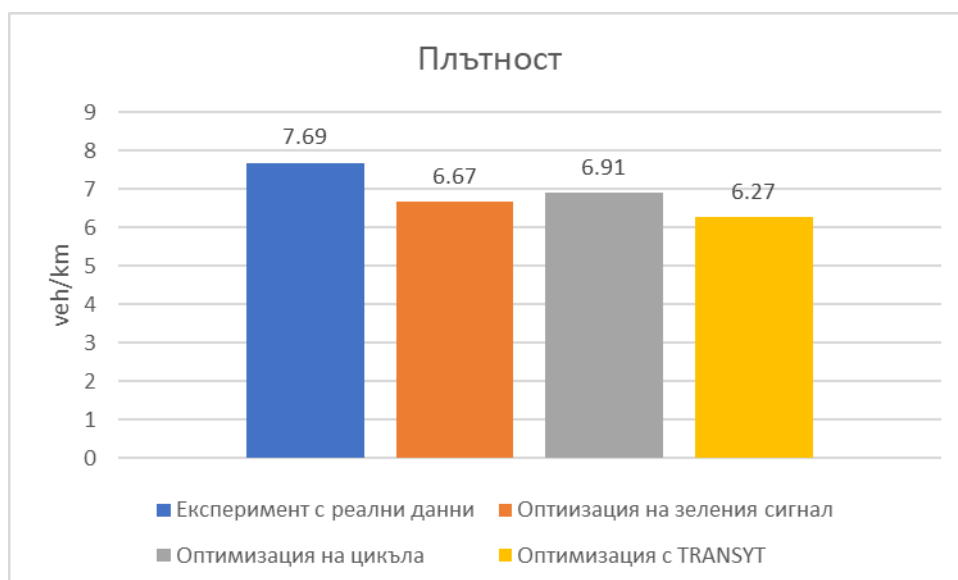
Фиг. 4.1. Сравнение на интензивността при четири симулации

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.



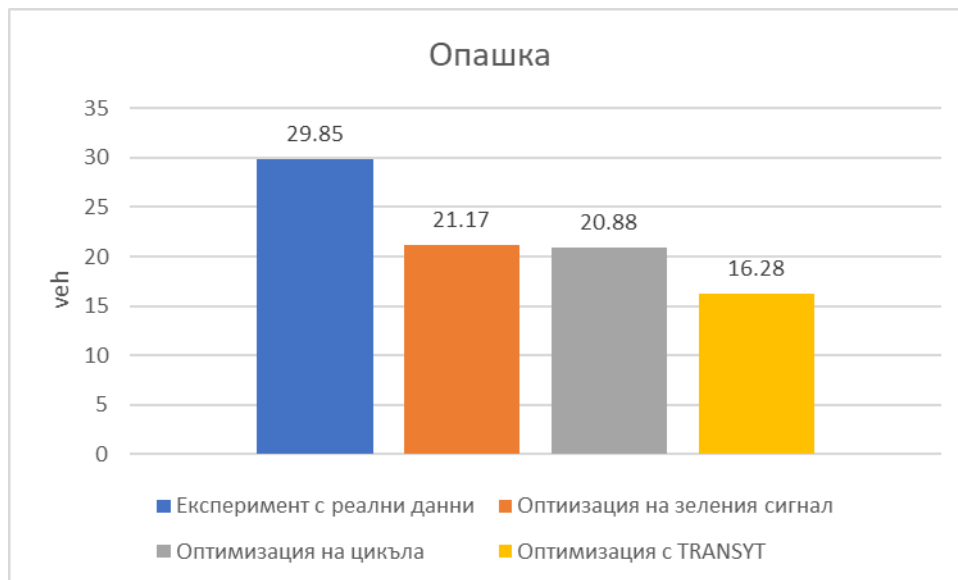
Фиг. 4.2. Сравнение на времезакъснението при четири симулации

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.



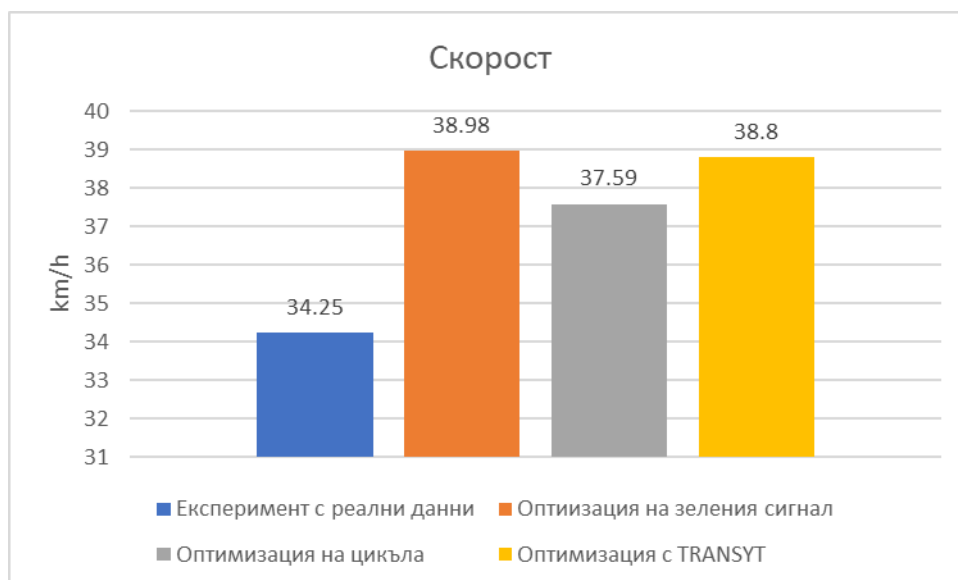
Фиг. 4.3. Сравнение на плътността при четири симулации

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.



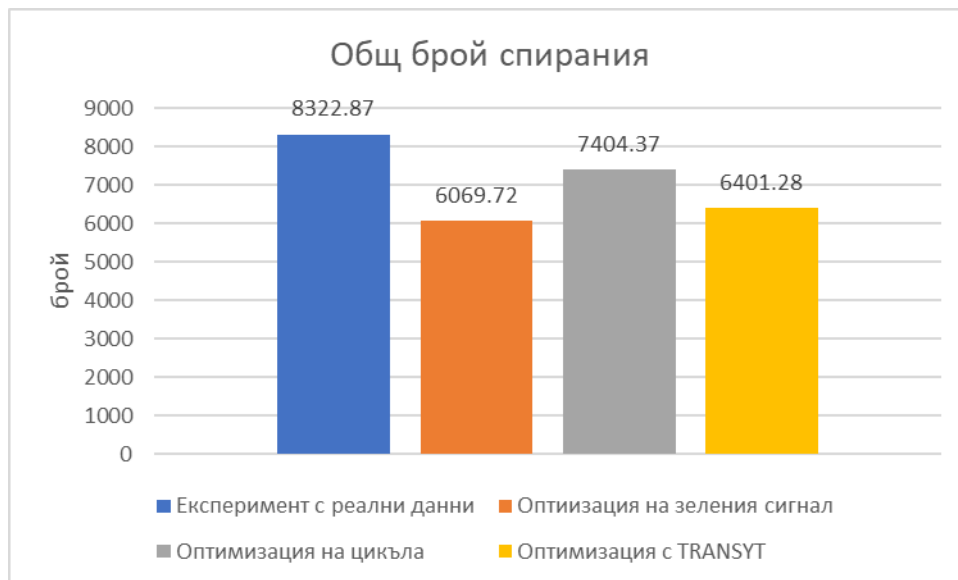
Фиг. 4.4. Сравнение на опашки при четири симулации

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.



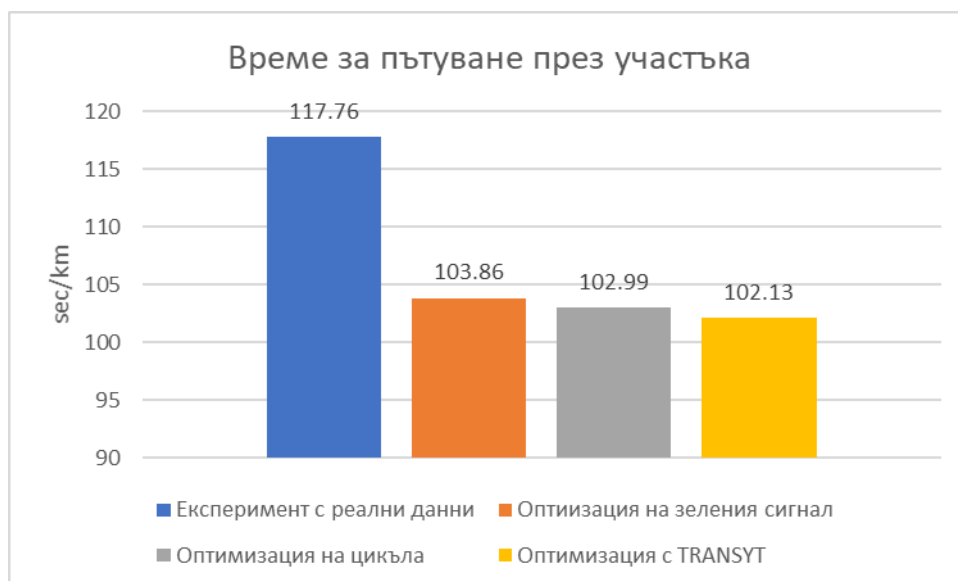
Фиг. 4.5. Сравнение на скоростта при четири симулации

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

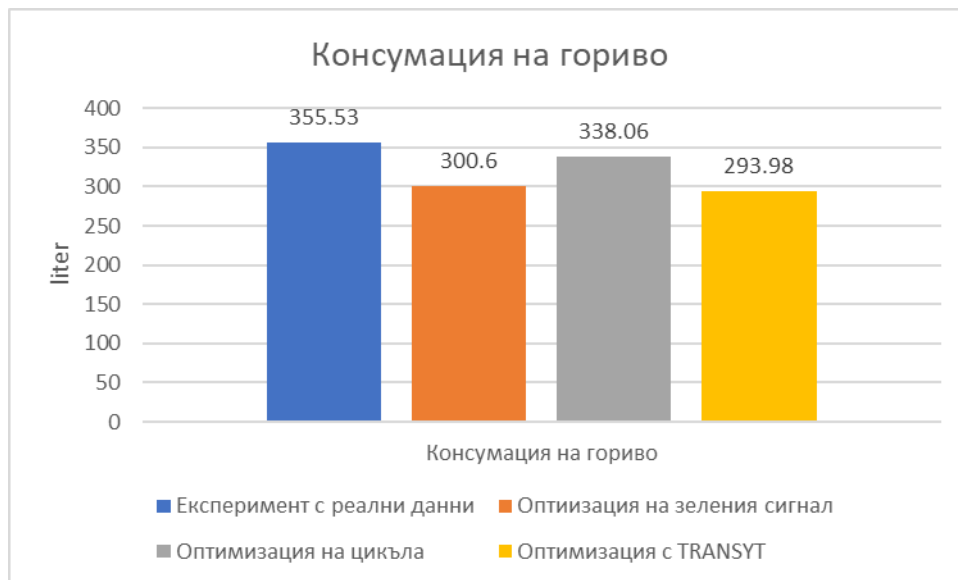
Времето за пътуване през участъка е представено на фигура 4.7. Най-продължително е пътуването при експеримента с реални данни, а най-кратко при TRANSYT, като стойностите за двете двуйерархични оптимизации са много близко до стойността на този показател за TRANSYT (102.13 sec/km). Тук двуйерархичната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

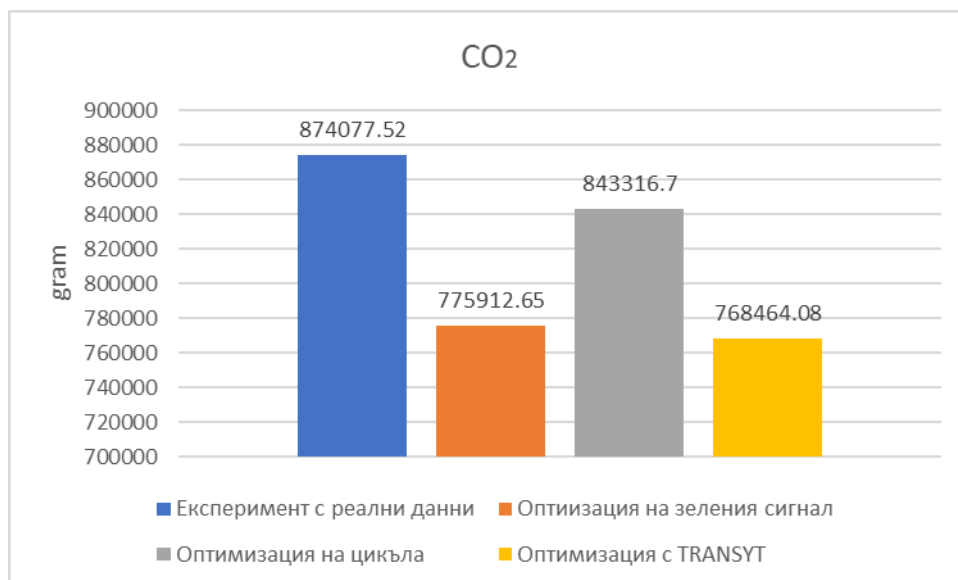
Консумацията на гориво за четирите експеримента е представена на фигура 4.8. Най-висока е консумацията на гориво за първи стълб, а най-ниска за симулацията с TRANSYT

(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.



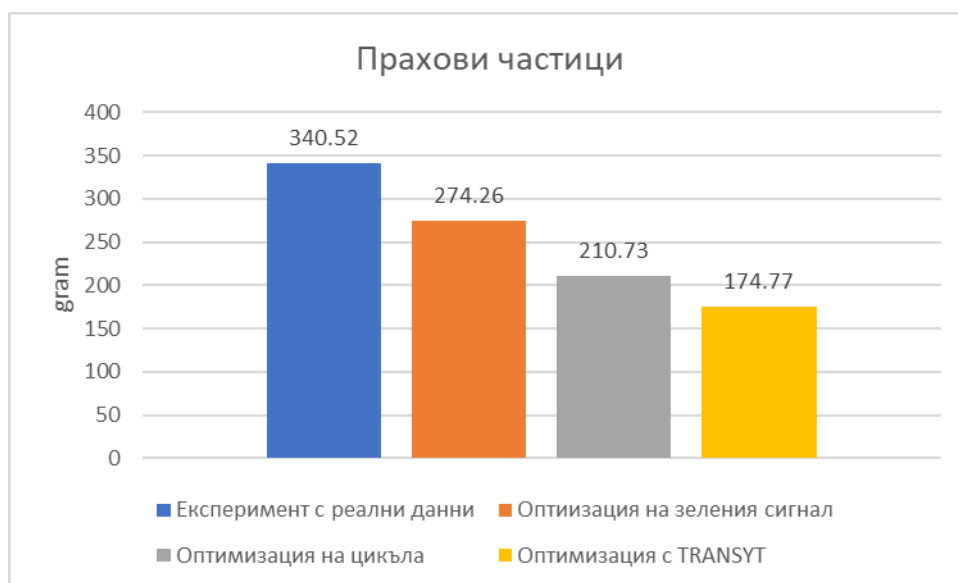
Фиг. 4.8. Сравнение на консумация на гориво при четири симулации

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 CO₂ 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, 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
- [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
- [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.
- [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
- [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://olewitt-hansen.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*, Volume48, Issue5, 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, MohamedAbdel-Aty, XimiaoJiang, 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
- [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, Verginia, 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 Vlieger, 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
- [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
- [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, Qingya Zhou, Junguang Yang, Shikai You, Yang Song, Meigen Xue, 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
- [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
- [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
- [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
- [116]. Тодорова Мирена, Борис Гюров, Моделиране на сигнализирането на четирикълно 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: