



Дисертация

за

присъждане на образователна и научна степен
“доктор”

на

инж. Теодора Мечева

Тема: Методи и средства за изграждане на
интелигентна пътна транспортна система

Професионално направление: 5.3 Комуникационна и компютърна техника

Научна специалност: Компютърни системи, комплекси и мрежи

Научен ръководител: доц. д-р. инж. Николай Каканаков

Пловдив, 2023

Съдържание

Абстракт	8
Въведение	9
1 Литературен обзор	10
1.1 Технологични предпоставки	11
1.1.1 Работа в реално време	11
1.1.2 Интернет на нещата	15
1.1.3 Автомобилни ad-hoc мрежи (Vehicular ad-hoc networks, VANET)	21
1.2 Методи за анализ и проектиране на ИПТС	26
1.3 Моделиране на шофьорските навици	27
1.4 Избор на трафик симулатор	28
1.5 Ефективност на пътния трафик	32
1.6 Изводи	35
Цели и задачи	37
2 Архитектура на ИПТС	38
2.1 VANET	38
2.2 Възприемащ слой	38
2.3 Мрежов слой	39
2.4 Поддържащ слой	39
2.5 Приложен слой	41
2.6 Киберсигурност	45
2.7 Управление	47
2.8 Изводи	47
3 Моделиране на шофьорските навици в симулация на пътния трафик	49
3.1 Реализация на методологията	50
3.1.1 Пътна мрежа	50
3.1.2 Натоварване на пътната мрежа	50
3.1.3 Изследвани параметри	52
3.1.4 Програмна реализация	54
3.2 Резултати	55
3.2.1 Резултати от основен набор данни	55
3.2.2 Резултати от разширен набор данни	58
3.3 Изводи	61

4	Математическо моделиране на пътни мрежи	63
4.1	Основни понятия в Network Calculus	63
4.2	Експеримент	66
4.2.1	Пътни мрежи	66
4.2.2	Програмна реализация	70
4.3	Резултати	71
4.3.1	Съпоставка между синтетични и реални натоварвания	71
4.3.2	Криви на обслужване на база входни и изходни криви	73
4.3.3	Виртуално закъснение и запас	77
4.3.4	Криви на обслужване при конкатенация на пътни мрежи	78
4.4	Изводи	79
5	Методи за оптимизиране на пътния трафик	81
5.1	Експеримент	81
5.1.1	Програмна реализация	81
5.2	Резултати	82
5.2.1	Оптимизирани светофарни цикли	82
5.2.2	Безпилотни превозни средства	83
5.3	Изводи	83
6	Изводи	88
	Приноси	91
	Публикации, свързани с дисертационния труд	92
7	Библиография	93
	Приложения	110
	А.Криви на пристигане, симулационни и полуаналитични криви на напускане	110
	В.Средно виртуално закъснение между полуаналитични и симулационни криви	116
	С.Криви на обслужване	117
	Д.Максимален запас	119
	Е.Максимално виртуално закъснение	120
	Ф.Средна грешка и средно виртуално закъснение при конкатенация	121

Списък с фигури

1	IoT архитектура(32)	16
2	Cloud-Fog-Edge	18
3	VANET network architecture	22
4	DSRC VANET мрежова архитектура	23
5	LTE-V2X VANET мрежова архитектура	24
6	4-стъпков модел за генериране OD матрица	29
7	ИПТС архитектура	38
8	Методология за намиране на параметри, моделиращи шофьорските навици	49
9	Пътната мрежа между бул. „Руски” - бул. „Освобождение” - бул. „Кн. Мария Луиза”- бул. „Христо Ботев“ и булевард „Санкт Петербург“	51
10	Позиции на виртуални детектори	51
11	Циклограма за управление на светофар	51
12	Пътния трафик за периода 15 - 27 януари 2021 за кръстовището бул. "Менделев" - бул. "Санкт Петербург"	52
13	Rate-latency крива на обслужване (81)	64
14	Минимална крива на обслужване(163)	64
15	Виртуално закъснение и запас(163)	65
16	Конкатенация на възли	65
17	Пътна мрежа между бул.„Руски” - бул.„Освобождение” - ул.„Гладстон” и бул. „Кн. Мария Луиза” бул. „Христо Ботев“ и бул. „Санкт Петербург“.	67
18	кръстовищата на бул. “Източен” - бул. “Христо Ботев”; бул. ”Менделеев” - бул. ”Санкт Петербург”; бул. ” Санкт Петербург” - ул. ”Лев Толстой”; кръговото кръстовище на ”Метро”.	69
19	Изт.-Менд - реални натоварвания - почивни дни	72
20	Изт.-Менд - реални натоварвания - работни дни	72
21	Съпоставка на реални и синтетични данни - Изт.-Менд	72
22	Полуаналитични и симулационни криви на напускане и криви на пристигане	73
23	Средни виртуални закъснения между полуаналитичните и симулационни криви на напускане	74
24	Полуаналитични и симулационни криви на напускане при реални и синтетични натоварвания	74
25	Криви на обслужване при различни натоварвания	75
26	Криви на обслужване Изт.-Менд. - реални данни	75
27	Минимални криви на обслужване - синтетични данни	76
28	Синтетични и реални криви на пристигане за Изт.-Менд. 18d	76
29	Максимално виртуално закъснение Изт.-Менд. - реално натоварване	77

30	Максимален запас Изт.-Менд. - реално натоварване	77
31	Максимално виртуално закъснение и максимален запас - синтетични натоварвания	78
32	Интегрални криви на обслужване	78
33	Полуаналитични и симулационни криви на напускане при конкатенация на възли	79
34	Грешка и виртуално закъснение между полуаналитична и симулационна крива на напускане при конкатенация на пътни мрежи	79
35	Максимално виртуално закъснение - оптимизирани светофарни цикли	84
36	Максимален запас - оптимизирани светофарни цикли	85
37	Максимално виртуално закъснение - автономни автомобили	86
38	Максимален запас - автономни автомобили	87
39	Криви на пристигане, симулационни и полуаналитични криви на напускане с период 0.1 на пътните мрежи от фигура 17	110
40	Криви на пристигане, симулационни и полуаналитични криви на напускане с период 0.1 на пътните мрежи от фигура 18	111
41	Криви на пристигане, симулационни и полуаналитични криви на напускане с период 0.3 на пътните мрежи от фигура 17	112
42	Криви на пристигане, симулационни и полуаналитични криви на напускане с период 0.3 на пътните мрежи от фигура 18	113
43	Криви на пристигане, симулационни и полуаналитични криви на напускане с период 1 на пътните мрежи от фигура 17	114
44	Криви на пристигане, симулационни и полуаналитични криви на напускане с период 1 на пътните мрежи от фигура 18	115
45	Криви на обслужване на пътните мрежи от фигура 17, при различни натоварвания	117
46	Криви на обслужване на пътните мрежи от фигура 18 при различни натоварвания	118
47	Криви на пристигане, симулационни и полуаналитични криви на напускане с период 0.1	122

Списък с таблици

1	Комуникационни стандарти за работа в реално време	13
1	Комуникационни стандарти за работа в реално време	14
1	Комуникационни стандарти за работа в реално време	15
2	Симулатори за пътен трафик	30
2	Симулатори за пътен трафик	31
3	Услуги на ИПТС поддържащ слой	40
4	Услуги на ИПТС приложен слой	41
4	Услуги на ИПТС приложен слой	42
4	Услуги на ИПТС приложен слой	43
4	Услуги на ИПТС приложен слой	44
5	Киберсигурност в ИПТС	45
5	Киберсигурност в ИПТС	46
6	Рутиращи алгоритми	53
7	Car-following модели	53
8	Параметри	53
8	Параметри	54
9	Резултати - основен набор данни	55
9	Резултати - основен набор данни	56
9	Резултати - основен набор данни	57
9	Резултати - основен набор данни	58
10	Резултати - разширен набор данни	58
10	Резултати - разширен набор данни	59
10	Резултати - разширен набор данни	60
10	Резултати - разширен набор данни	61
11	Средно виртуално закъснение между полуаналитични и симулационни криви на напускане в секунди	116
12	Максимален запас при синтетични натоварвания в брой превозни средства	119
13	Максимално виртуално закъснение при синтетични натоварвания, в секунди	120
14	Средно виртуално закъснение между полуаналитична и симулационна крива на напускане при конкатенация на възли, в секунди	121
15	Средна грешка между полуаналитична и симулационна крива на напускане при конкатенация на възли, в %	121

Methods and means for Intelligent Road Transport System implementation

Engineer Teodora Mecheva

Demographic, social and cultural changes and the technological progress predetermine the emergence of Intelligent Road Transport System (IRTS). IRTS can be considered as an Internet of Things sub-domain. The technological foundations of IRTS are IoT, real-time control systems and vehicle ad-hoc networks (VANET). In the analysis and design processes mathematical and simulation methods are applied.

The objectives of the present work are the study of the methods and means of implementing an Intelligent Road Transport System, the opportunities for transferring concepts for analysis and design, and the applicability of technologies for achieving efficient traffic.

In the **literature review** (chapter 1) the main technological prerequisites that represent the foundation of IRTS, methods of analysis and design, simulation capabilities with focus on driving habits, opportunities for mathematical modelling, and main trends in road traffic flow management are examined. The road traffic simulator - SUMO - is selected for the purpose of the experiments by comparative analysis.

In **chapter 2** a four layer IRTS architecture based on the standard Internet of Things design in which VANET and cybersecurity play central role is proposed. Real time data fusion in floating vehicles creates a new perspective which emerge technological solutions and new strategies for safety and efficiency. Most of the IRTS applications have very high cybersecurity requirements combined with hard real time constrains. The imposition of standards for a comprehensive architecture, as well as specific security standards, is one of the key steps in the IRTS architecture evolution.

In **chapter 3** methodology for modelling driving habits in road traffic simulation, based on real data for the traffic load is proposed. The methodology is implemented on SUMO and Python. After analysing the simulation results, a car-following model, routing algorithm and their parameters that model the manner of driving in the city of Plovdiv are chosen.

In **chapter 4** the applicability of the mathematical apparatus Network Calculus in the analysis of road networks is examined. Based on the conducted experiments, it is concluded that the maximum virtual delay and the maximum backlog are applicable in the analysis of road networks with different granularity, while RSPEC service curves are applicable only when small sections of the road network are analysed.

In **chapter 5** the effectiveness of two methods for improving road throughput - autonomous vehicles and optimised traffic light cycles - by comparing maximum virtual delay and maximum backlog is investigated. Based on the conducted experiments is concluded that adapted traffic light cycles and autonomous vehicles would increase road throughput.

Въведение

Нарастването на световното население задвижва растежа на икономиката и налага необходимост от незабавни мерки за справяне с потенциалната екологична криза. Транспортът, като основна част на почти всяка човешка дейност, е силно повлиян от тези тенденции. Автомобилният транспорт, като най-популярен и леснодостъпен, е най-силно засегнат.

Възникването на интелигентната транспортна система, като подсистема на Умния град и Интернет на нещата е естествено следствие от технологичния прогрес и социалните и демографски промени.

Концепцията за Интелигентен град съдържа в себе си противоречие - от една страна тя се основава на разбирането, че урбанизацията и глобализацията биха дали отговор на много от въпросите, засягащи екологичността, като в същото време ще повишат качеството на живот на потребителите, но от друга страна, концентрирането на големи групи от населението в малка площ, засилва някои негативни тенденции като влошаване на качеството на въздуха, задръствания и повишен брой пътни инциденти. Очакванията са интелигентната транспортна система да даде отговор тези негативни следствия, като излезе извън пределите на Интелигентния град, съчетавайки идеята за свързаност и гъвкавост на транспортирането на хора и товари, както в градска, така и в извънградска среда. От технологична гледна точка интелигентната транспортна система се свързва със съчетаването на информационни и комуникационни технологии, технологии за позициониране и автоматизация, а от потребителска - с предоставянето на завършена гъвкава услуга, съчетаваща различни доставчици, по прозрачен за потребителя начин.

По отношение на автомобилния транспорт една от основните цели е да се увеличи максимално експлоатационният капацитет на пътните мрежи, предлагайки подобрена производителност, така че да може да се избегне необходимостта от изграждане на допълнителен пътен капацитет. Повишаването на ефективността може също да послужи за намаляване на емисиите, повишаване на безопасността, генериране на социални ползи като достъпност, по-добро изживяване за потребителите и намаляване на икономическите разходи.

Изграждането на интелигентна пътна транспортна система включва разработване, оценка, анализ и интегриране на нови сензорни, информационни и комуникационни технологии и концепции за постигане на целите на пътния транспорт. В световен мащаб правителствени и частни организации си сътрудничат за разработване на закони, стандарти и технологии в областта.

1 Литературен обзор

Идеята за интелигентна транспортна система (ИТС) се ражда през 80-те години на миналия век. Социалните, демографски и културни промени, от една страна, и технологичното развитие, от друга, оформят идеята за съвременния интелигентен транспорт. Докато ИТС се реализират с технологични средства, в процесите на анализ и проектиране, най-често се прилагат математически и симулационни методи. Натрупаният опит за вече познати технологии като системи за контрол, безжични комуникации, изчисления в разпределена среда са фундамента на ИТС (102; 103; 134).

Свързаността е една от отличителните черти на ИТС. Изразява се в развитието на интегрирани мобилни услуги, все по-честото използване на интермодален транспорт и навлизането на свързани превозни средства (28; 29; 80; 180).

Интермодалният транспорт допринася за екологичност и ефективност чрез координация на няколко вида транспорт (177). При превоз на товари най-често се интегрират автомобилен, воден и железопътен транспорт (44; 92; 180). В пътническият транспорт съществуват добре изградени връзки между въздушен, сухопътен и железопътен транспорт. Съвременните летищни терминали са пример за интермодални станции (55; 130).

Идеята за координация и свързаност се доразвива от концепцията Мобилността като услуга (Mobility as a Service - MaaS). MaaS се основава на интегрирането на услуги за мобилност, които се предлагат от различни доставчици. Друга отличителна черта на MaaS е преместване на фокуса от модел на притежание към модел на използване, чрез интегрирана платформа, основана на идеята плащане при получаване (30).

Претоварването на пътната транспортна мрежа и напредъкът в областта на безпилотните летателни апарати, (БЛА, Unmanned Aerial Vehicles - UAV) правят идеята за *въздушна мобилност* все по-популярна. Към момента БЛА са приложими най-вече за доставка на товари и наблюдение на трафика (129). Възможностите за координация на големи клъстери от БЛА и техните съвместни способности ги правят незаменими за цели като картографиране и осигуряване на въздушни комуникационни възли при извънредни ситуации. Въпреки че съществуват реализирани пилотни проекти за въздушна градска мобилност, необходимостта от сигурен енергиен източник, глобалното планиране на траекторията и създаването на правни норми, забавят масовото прилагане на тази идея (12; 73; 133; 154; 162).

Въпреки изброените възможности пътния транспорт и притежанието на лично превозно средство продължава да е предпочитано решение, а задръстванията и

инцидентите на пътя нарастват всяка година (39; 60; 110; 126).

Съществуващите реализации на системи за интелигентен пътен транспорт включват информационни услуги, системи за оптимизация на градския и междуградски трафик, екологична мобилност, обществен транспорт, свързани и автоматизирани превозни средства, събиране на пътни такси, електронно плащане, логистика, безопасност и контрол, събиране на данни с цел научноизследователска и развойна дейност. Сред големите ИТС проекти, които вече са в действие са Border Information Flow Architecture (BIFA) в Канада, Research and Innovative Technology Administration (RITA) в САЩ, Dedicated Road Infrastructure for Vehicle safety in Europe (DRIVE) в Европа и Transport for London в Англия (18; 40; 71; 161; 179).

Според целите услугите, които предоставя съвременната интелигентна пътна транспортна система могат да бъдат отнесени към една от следните групи: ефективност, безопасност и комфорт на пътниците (5; 39; 60; 116; 126; 158).

1.1 Технологични предпоставки

Архитектурите на съвременните ИТС съчетават познати технологични средства. От потребителска гледна точка ИТС може да се разглежда като подобласт на Интернет на нещата, характеризираща се с високи изисквания към киберсигурността и работа в реално време. Ключова технология, характерна за транспорта, която е част от почти всички съвременни разработки на транспортни системи е VANET (101; 111).

1.1.1 Работа в реално време

Често системите, съчетаващи функции за управление и контрол на външни процеси имат за цел да осигурят изпълнение на задачите в строги времеви граници. Спазването на такива граници се нарича работа в реално време. Системата за контрол трябва да обработва и реагира на събитията и информацията, генерирани от контролираната система, в гарантиран срок. Областите на приложение са разнообразни: роботика, наблюдение, контрол на процеси, управление на електропреносната мрежа, интелигентен транспорт и други (84; 172).

Основни характеристики на системите за работа в реално време (СРВ) са времето за изпълнение на дадена задача, най-лошото време за изпълнение (worst case time), отклонението във времето при изпълнение на дадена задача (jitter). СРВ се класифицират според начина, по който са поставени времевите ограничения. При твърдите СРВ отклонението от поставените ограничения се счита за грешка. При меките СРВ има краен срок, но той е пожелателен, а не задължителен.

Сроковете могат да съдържат различни нива на толерантност и дори статистическо разпределение на времето за реакция с различна степен на приемливост. При твърди изисквания за работа в реално време е необходимо всеки от компонентите на реално времевата услуга да премине определени стандартизирани тестове. Примери за това са автомобилната и авиационната индустрия (66).

Операционни системи за работа в реално време

Важен компонент на повечето реално времеви системи са операционните системи за работа в реално време (ОСРВ, Real Time Operating System, RTOS). При ОСРВ потребителските програми имат достъп до ядрото, като по този начин разработчиците могат да осъществят контрол върху ресурсите на КС без намесата на ОС и по този начин да гарантират крайни срокове за изпълнение на дадени задачи. В сравнение с операционните системи с общо предназначение (ОСОП), те се характеризират с: по-добра надеждност; мащабируемост; намалени изисквания за памет; специфични политики за планиране. Добрата операционна система в реално време избягва внедряването на ядрото като голяма, монолитна програма. Вместо това основните услуги на ядрото са намалени, а на потребителя се предоставя възможност да избира между голям набор допълнителни услуги. Това ниво на конфигурируемост на изпълнение допринася за гъвкавостта на системата (132).

При меки изисквания за работа в реално време би могло да се използва операционна система с общо предназначение с опция за работа в реално време (Например Windows CE Embedded, Real Time Application Interface (RTAI), Xenomai). Примери за ОСРВ, които отговарят на международни стандарти за системи за сигурност и са приложими в автомобилната индустрия са VxWorks, QNX Neutrino, Qplus-AIR (49; 85; 157).

Комуникации в реално време

Друг ключов компонент в предоставянето на реално времеви услуги е комуникационният слой. Осъществяването на комуникация в строга времева рамка често е свързано и с изисквания за ниска консумация на енергия, осигуряване на надеждна комуникация, защита от кибератаки. Безжичната комуникация е предпочитана, като в някои случаи топологията е динамична и подложена на външни смущения (151).

Таблица 1 представя някои комуникационни стандарта, отговарящи на изискването на работа в реално време. От жичните стандарти PROFIBUS, HART и TTEthernet са с общо предназначение, а CAN и Flex Ray са приложими само

във вътрешни за автомобила мрежи. От безжичните - Wireless HART е с общо предназначение, а IEEE 802.11p и LTE C-V2X са технологии, осъществяващи комуникация превозно средство към превозно средство и превозно средство към инфраструктура (2; 155).

Таблица 1: Комуникационни стандарти за работа в реално време

Стандарт	Приложение	Скорост и обхват	Преносна среда
PROFIBUS	<ul style="list-style-type: none"> ● Използва се за управление на сензори и изпълнителни механизми и наблюдение на измервателно оборудване чрез централизиран контролер в автоматизирани приложения за производството; ● Обхваща физическия, каналния и приложния слой от OSI модела; 	<ul style="list-style-type: none"> ● Скорости – 9,6 kbps до 12 000 kbps ● Обхват – 100 – 1200 	усукана двойка
Highway Addressable Remote Transducer (HART)	<ul style="list-style-type: none"> ● Приложим е както в малки приложения за автоматизация, така и във високо усъвършенствани индустриални приложения; ● прилага се както за аналогови, така и за цифрови измервателни уреди; ● поддържа 2 режима на работа – точка-точка и multi-drop; 	<ul style="list-style-type: none"> ● Скорост - 1,2 kbps ● Обхват – до 3000 м 	усукана двойка
TTEthernet	<ul style="list-style-type: none"> ● Поддържа както реално времеви, така и не реално времеви приложения; ● Поддържа критични по отношение на сигурността приложения (fly-by-wire, drive-by wire); ● Съвместим със стандартния Ethernet; 	<ul style="list-style-type: none"> ● Скорости - 100 Mb/s, 1Gb/s, 10Gb/s ● Обхват – до 100m 	усукана двойка, оптичен кабел

Таблица 1: Комуникационни стандарти за работа в реално време

Стандарт	Приложение	Скорост и обхват	Преносна среда
Control Area Network - CAN	<ul style="list-style-type: none"> • Прилага се във вътрешни за автомобила мрежи; • Слабо място е киберсигурността; 	<ul style="list-style-type: none"> • Скорост - 1000 kbps; • Обхват - 40m 	<ul style="list-style-type: none"> • 2 усукани двойки
Flex Ray	<ul style="list-style-type: none"> • Прилага се във вътрешни за автомобила мрежи; • В каналния слой мрежата е разделена на статичен и динамичен сегмент; • По-надежден и по-сигурен от CAN, но по-скъп; 	<ul style="list-style-type: none"> • Скорост - 10000 kbps; • Обхват - 22m; 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 или 2 усукани двойки
Wireless HART	<ul style="list-style-type: none"> • безжична мрежова технология за работа в реално време, приложима в мониторинг и контрол на процеси; • базира се на IEEE 802.15.4 (Zigbee); • многоканално Time Division Multiple Access (TDMA) предаване; 	<ul style="list-style-type: none"> • Скорости - 250 kbps; • Обхват - 60-90 метра 	<ul style="list-style-type: none"> • въздух

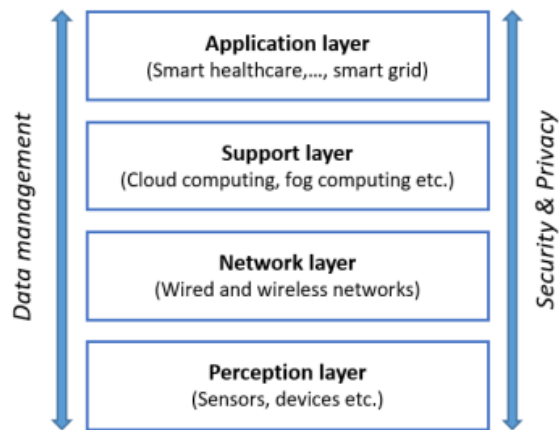
Таблица 1: Комуникационни стандарти за работа в реално време

Стандарт	Приложение	Скорост и обхват	Преносна среда
IEEE 802.11p	<ul style="list-style-type: none"> • Стандарт за автомобилни ad hoc мрежи, базиран на WiFi; • RV характеристики все още са обект на изследване, поради динамичната топология на мрежата, ненадеждността на възлите, смущенията и обезпечаването на киберсигурност; 	<ul style="list-style-type: none"> • Скорости – Япония: 1–4Mb/s; Европа: 250 Kb/s; САЩ: 3–27Mb/s • Обхват – Япония: 30 метра; Европа: 15–20 метра; САЩ: 1000 метра 	въздух
LTE C-V2X	<ul style="list-style-type: none"> • Стандарт за автомобилни ad hoc мрежи, базиран на клетъчна технология; • RV характеристики все още са обект на изследване, поради динамичната топология на мрежата, ненадеждността на възлите, смущенията и обезпечаването на киберсигурност; 	<ul style="list-style-type: none"> • Скорости – 150 Mbps downlink и 50 Mbps uplink; • Обхват: до 500м; 	въздух

1.1.2 Интернет на нещата

Интернет на нещата е мрежа от физически обекти, които съдържат вградени технологии като сензори и комуникационни интерфейси и изчисления в разпределена среда за предоставяне на услуги във всеки аспект от живота. IoT е синоним

на продукти, свързани с концепцията за интелигентен дом, интелигентно здравеопазване, интелигентен град и т.н. Много от тези области имат подобни характеристики и са изправени пред подобни предизвикателства. Заемането на технологии между подобласти на IoT е обичайно, но трябва да се обмисли добре и да се проучи на практика. Въпреки приликите, дори в една и съща област изискванията за обхват, работа в реално време, надеждност и сигурност варират. Наложилата се архитектура за IoT включва сензорен слой, мрежов слой, поддържащ слой и приложен слой. Сигурността и управлението на данните имат отношение към всеки от четирите слоя (Фигура 1) (32; 33; 93).



Фигура 1: IoT архитектура(32)

Слой за възприемане (Perception layer)

Слоят за възприемане, наричан още сензорен слой събира данни за заобикалящия свят и предава получената информация към мрежовия слой. Технологиите за събиране на данни включват сензори, сензорни мрежи, системи за събиране на данни и потребителски устройства (33; 146; 181).

Процесът на извличане на данни може да включва първична обработка и сливане на данни от няколко източника. В случаите, когато липсват данни се използват времеви и пространствени корелации (70; 150; 161).

Използването на пасивни данни (като данни за достъп до Интернет, данни от социални мрежи или данни за мобилността на потребителите) допринася за гъвкавостта на крайната услугата. Един от източниците на пасивни данни са MANET (Mobile Ad Hoc Networks). Това са безжични peer-to-peer мрежи, които играят роля при физическото локализиране на обекти. MANET се състоят от възли

като мобилни телефони, планшети, компютри или други устройства, които могат да се свързват помежду си без да използват инфраструктура (70; 125).

Мрежов слой (Network layer)

Мрежовият слой (Network layer) предава данните, събрани от възприемащия слой към слоя за обработка на данни. Характерно за мрежовият слой е разнообразието от жични и безжични комуникационни стандарти (36; 148).

Безжичните стандарти играят важна роля. Разнообразните технологии за безжична комуникация си сътрудничат и се конкурират в зависимост от сферата на приложение и конкретните специфики. Стектът протоколи на Интернет на нещата обединява протоколи от Приложен слой (COAP, MQTT, XMPP и Web-сокети), Мрежов слой (6LoWPAN, IPv4 / IPv6 и RPL) и Физически и Канален слой (IEEE 802.11, BLE, LTE). В IoT често се използват хетерогенни мрежови протоколи на физическия и канален слой, които използват различни стратегии за контрол на достъпа на средата. Оперативната съвместимост между тези протоколи е важна, за да осигури безпроблемна интеграция (64; 69; 171).

Критериите за избор са: обхват, скорост и обем на данните, работа в реално време, надеждност и наличност, сигурност, мащабируемост, оперативна съвместимост и поддръжка (11).

MANET могат да се считат и за част от възприемащия слой в случаите когато предоставят данни свързани с физическото местоположение, които подлежат на предварителна обработка. За реализиране на мултихот комуникация се експериментира със специализирани протоколи в мрежовия слой, които да отговорят на изискванията за енергоефективност, работа в реално време и сигурност (125).

Поддържащ слой (Support layer)

Поддържащият слой извършва анализ и съхранение на данните. Той предоставя услуги за разнообразните приложения (48; 62).

Данните в Интернет на нещата отговарят на всички характеристики на *Големите данни (Big Data)*. По дефиниция Големите данни се характеризират с 3V (volume, velocity, variety – обем, скорост, разнообразие). Това означава, че размерът на данните е голям, данните в повечето случаи ще бъдат създадени бързо и ще съществуват в множество типове и ще бъдат извлечени от различни източници и с различна скорост. При сливането на тези разнородни, но свързани данни, се достига до информация, която не може да бъде извлечена ако данните не бъдат изследвани в цялост. Това води до налагане на NoSQL модели на данни, развитие на анализа на

данни и навлизане на облачните технологии (Cloud computing) (4; 16; 91; 128).

Облачните изчисления предлагат подходящи рамки за групиране на големи данни, както и ефективно разпределени бази данни за тяхното съхранение и обработка. Голямото предимство на Cloud-a е, че ресурсите могат да бъдат оптимално разпределяни и динамично увеличавани или намалявани благодарение на технологии за виртуализация. Наред с предимствата обаче, има някои ограничения като увеличаване на латентността и предизвикателства за киберсигурността. Добавянето на междинни слоеве и извършването на някои изчисления в близост до мястото за извличане на данни (Fog и Edge изчисления) облекчават тези недостатъци. По този начин Облакът се превръща от централизирана услуга в услуга, независима от местоположението. Налага се концепцията Cloud-Fog-Edge (Фигура 2). Масшабируемостта, производителността, поверителността и сигурността, са основни метрики при изчисленията в разпределена среда (3; 17; 170).



Фигура 2: Cloud-Fog-Edge

Анализът на данните (Data mining) обединява техники за обработката на структурирани, полуструктурирани и неструктурирани данни, чрез откриване на корелации и модели, класификация и клъстериране, анализ на отклонения, статистически методи, методи за машинно обучение, сливане на данни (data fusion), таксономии и онтологии, данни от различни нива на абстракция. Сътрудничеството между многообразни техники за анализ на данните формира нова мултидисциплинарна наука - наука за данните (Data Science), която обединява инженерни, статистически, компютърни, математически подходи и информационни науки (4; 25; 28; 91).

Приложен слой (Application layer)

Приложният слой отговаря за предоставянето на интелигентни и практични услуги на потребителите, въз основа на техните персонализирани изисквания. Мобилността, обхватът, консумацията на енергия, изискванията към киберсигурност и работа в реално време, изискванията за скорост и обем на данните, устойчивостта и гъвкавостта са основни показатели. Особено внимание се обръща на мащабируемостта и гъвкавостта (107; 173).

Пример за приложения, изискващи ниска консумация на енергия и малък обхват са интелигентни сгради и интелигентно водоснабдяване. Приложенията от областта на интелигентния пътен транспорт изискват голям обхват, имат нисък толеранс към закъснения от край до край, но нямат изисквания за консумираната енергия. Безпилотни летящи превозни средства изискват голям обхват и ниска консумация на енергия (64; 69; 162).

Изискванията за работа в реално време и обем на данните варират дори в рамките на един и същи тип услуга. Например при безпилотните летателни апарати, приложенията, предаващи контролни и телеметрични данни генерират малък обем данни, но с твърди изисквания за работа в реално време, за разлика от предаването на видео и изображения, където е точно обратното (64).

Повечето от приложенията в IoT имат средни до високи изисквания за сигурност. Високите изисквания към киберсигурността води до допълнително забавяне и консумация на енергия и усложнен процес на тест и валидация (31; 64; 176).

Мобилността е друга важна характеристика на голяма част от IoT приложенията. Някои системи имат ниска или средна мобилност, като мониторинг на газопроводи и интелигентно водоснабдяване, докато други като интелигентен транспорт и безпилотни летателни апарати са много динамични (26; 64).

Киберсигурност (Security & Privacy)

Киберсигурността в IoT системите е изправена пред редица предизвикателства, поради тяхната високата хетерогенност, нуждата от разширяемост, мобилност и изменчивост, изискванията за ниска консумация на енергия и ограничени изчислителни ресурси, изискванията за гъвкавост при политиката за контрол на достъпа, нуждата от анонимна автентификация и оторизация на многобройните устройства и потребители в системата, възникването на Cloud – Fog – Edge парадигмата, наличието на Големи данни и липсата на общоприети стандарти (32; 74).

Прилагат се класически подходи като криптография и мрежова сегментация,

както и иновативни техники като изкуствен интелект, машинно обучение, блокчейн, Security-by-contract, сливане на данни, онтологии, теорията на игрите. Нетехнологичният аспект в IoT сигурността се изразява във внимателно обмисляне на политиката на оторизация, изработване на общоприети стандарти, управление, законови норми, регулация, информираност и образование (21; 34; 43; 50; 51; 63; 104; 160).

Криптографските методи са сърцето на киберсигурността. Традиционните алгоритми и стандарти за криптиране не винаги са приложими в IoT, тъй като не могат да отговорят на изискванията за ниска латентност и надеждност. Ето защо се разработват леки криптографски алгоритми (23; 51; 63).

Мрежовото сегментиране е друг класически подход, който подобрява, както мрежовата сигурност, така и ефективността. Когато говорим за сегментиране в MANET, трябва да вземат предвид, мобилността, динамичното присъединяване и изискванията за анонимност. В зависимост от целите и ситуацията при сегментиране в MANET могат да се вземат предвид различни показатели – поведенческа характеристика, базирана на исторически данни, ресурси, местоположение и т.н. (43; 51).

Класическите подходи като криптография и мрежово сегментиране намират приложение най-вече в поддържащия слой на Интернет на нещата (51; 63).

Blockchain е изключително популярна технология в последно време. По отношение на IoT, едно от основните му приложения е в решения за анонимно удостоверяване в MANET, базирани на репутация на възлите. Друг вариант за прилагане на блокчейн е поддържащия слой, като защитено хранилище за данни (21; 23; 34; 38; 99).

Fog технологията е друго решение на проблема с анонимната автентификация в MANET. Предимствата на Fog са, че процесът на удостоверяване на възлите от легитимната страна се разпределя и по този начин се увеличава бързодействието и се намалява разпространението на лична информация (32; 47; 53).

Прилагането на няколко допълващи се метода за анонимна автентификация е добър подход за защита на MANET. Авторите на (68), например предлагат валидиране на псевдоними във MANET, базирано на Bloom Filter, като включват спомагателни методи – запитване на доверената страна и списък с нелегитимни участници.

Парадигмата за Security-by-contract се основава на избор на политика за сигурност спрямо изискванията на приложението. Този подход е възможно решение на много от задачите на сигурността в сензорния слой (47).

Сливането на данни от сензори може намалява неяснотата в данните и по този

начин може да допринесе за киберсигурността във възприемащия слой (51).

Поради сложността на IoT е необходим холистичен подход за киберсигурност, който да действа на много нива, ето защо често се прилагат методи от групата на изкуствения интелект, като машинно обучение, онтологии и теория на игрите (8; 50; 104; 160).

Управление на данни (Data management)

Управлението на данните играе роля във всеки един от изброените слоеве. Етапите на извличане, анализ и интерпретация на данни в контекста на IoT придобиват нов смисъл. Етапът на извличане включва допълнителни дейности като подбор, пречистване и трансформация. В етапът на анализ се налагат техники от областта на Наука за данните. Интерпретацията на данните често е обогатена с оценка и действие. Фазата на интерпретация може да взаимодейства с етапа на анализ на данните и да формира кратък затворен цикъл. Основни метрики при управлението на данни са производителност, мащабируемост, еластичност, наличност, консистентност и възможности за трансформиране на формата на данните (10; 33; 141; 144; 175).

Умен град (Smart city)

Умен град е подсистема на Интернет на нещата, в която има тясно сътрудничество между много от подобластите на IoT, като интелигентно здравеопазване, интелигентно образование, интелигентна администрация, интелигентен транспорт и т.н. Основна цел на Умния град е постигане на устойчиво развитие чрез оптимално използване на ресурсите и по-добро качество на живот. Въпреки че това е развиваща се идея пред която стоят много икономически, екологични и социални предизвикателства, съществуват голям брой реализирани проекти за интелигентни градове и много други са в процес на разработка. Постигането на устойчива и ефективна градска мобилност е един от приоритетите на Умния град (94; 112; 122).

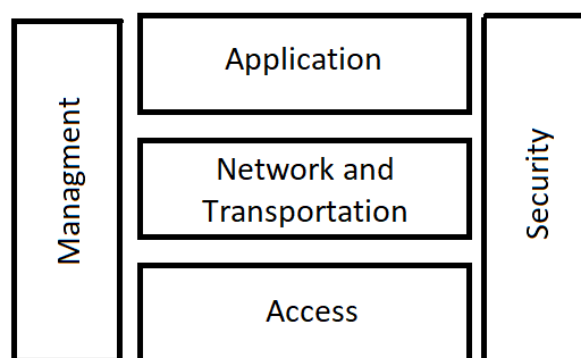
1.1.3 Автомобилни ad-hoc мрежи (Vehicular ad-hoc networks, VANET)

Автомобилните ad-hoc мрежи (Vehicular ad-hoc networks, VANET) са подвид на MANET, в който възлите са превозни средства. Автомобилите обменят кратки съобщения, наречени маяци (beacons), през определени периоди. Маяците съдържат важна информация за превозните средства и околната среда (посока, ускорение, скорост, пътни условия, метеорологични условия и т.н.). Сливането на тази информация в реално време създава нова перспектива за ситуацията на пътя.

Отличителни черти на VANET са:

- *Хетерогенност на мрежата* - може да е свързана с различната плътност на мрежата в случай на задръствания в големия град и спокойния трафик в слабо населените райони, както и с различното оборудване на превозните средства и наличието на необорудвани превозни средства.
- *Киберсигурност и необходимост от комуникация в реално време* - те са пряко свързани с физическата безопасност на пътниците.
- *Мобилност* - Динамичната мрежова топология е една от най-разпознаваемите характеристики на VANET. Честото присъединяване и напускане на възли налага времева рамка за комуникация и необходимост от често и навременно автентифициране.
- *Големи данни* - данните във VANET отговарят на характеристиките на Big data – обем, скорост, разнообразие.
- *Изискване за анонимност* - анонимността на потребителите и устройствата е свързана с политиките за сигурност и защита на личните данни, но също има отношение към бързодействието, мобилността и хетерогенността (32; 74).

Изброените особености налагат нуждата от съгласуван дизайн на мрежовата архитектура, за да се увеличи максимално надеждността и устойчивостта. При дизайна на VANET архитектури се разграничават три нива: ниво на достъп (Access layer) - съответстващо на физическия и канален слой в OSI модела, мрежов и транспортен слой и приложен слой. Сигурността и управлението имат отношение и към трите слоя (Фигура 3) (52; 61).

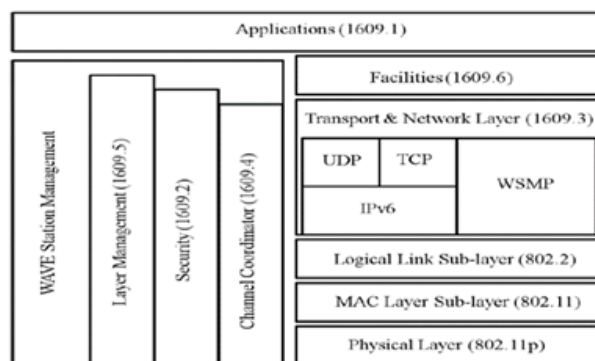


Фигура 3: VANET network architecture

Слой за достъп (Access layer)

Най-популярните технологии в слоя за достъп са DSRC 802.11p и LTE-V2X(96; 159).

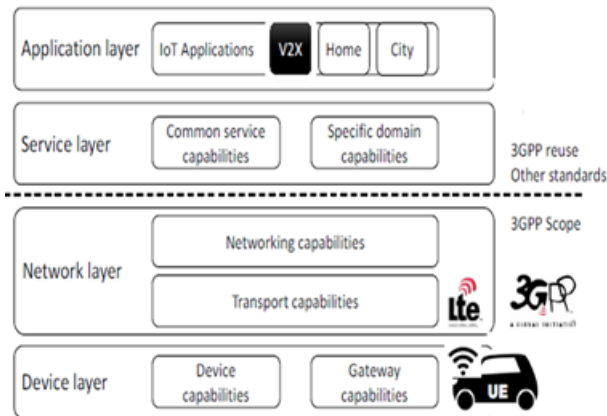
Dedicated Short Range Communication - DSRC 802.11p е част от Фамилията стандарти IEEE 1609 Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) (фигура 4). WAVE не предвижда алтернатива за MAC. DSRC 802.11p дефинира два типа комуникация – превозно средство – превозно средство и превозно средство –инфраструктура. Схемите за модулация и кодиране се наследяват от IEEE 802.11a. Носещата честота е разделена на шест обслужващи и един контролен канали. Контролният канал се използва в случай на спешност (продиктувана от приложенията за сигурност) и за контролни съобщения, във всички останали случаи се използват комуникационните канали. Обхватът на предаване на съобщенията е до 1км. На канално ниво стандартът предлага ненадеждна услуга, състояща се в излъчване на кадър към възлите в обхвата на подателя, с един хоп. Това налага използването на политики за сигурност и контрол на достъпа в по-високите нива (52; 159).



Фигура 4: DSRC VANET мрежова архитектура

Алтернатива на 802.11p е *клетъчната LTE-V2X* технология, разработка на SAE (Society of Automotive Engineers). Дефинира се от Long Term Evaluation Standard издание 14 и 15 за 4G и издание 16+ за 5-то и по-високо поколение мрежи. Стандартът дефинира 4 типа комуникация: превозно средство – превозно средство (vehicle-to-vehicle), превозно средство – инфраструктура (vehicle-to-infrastructure), превозно средство - мрежа (vehicle-to-network), превозно средство пешеходец (vehicle-to-pedestrian). V2X дефинира комуникация във физическия и каналния слой, в по-високите слоеве препоръчва WAVE или друг стандарт (фигура 5). V2X дефинира два режима на работа: режим 4 - Unmanaged Mode - директна комуникация за обмен на критични по време данни през PC5 интерфейс на разстояния до 1 км за V2V, V2P, V2I комуникация; и режим 3 - Managed Mode - за комуникация на разстояние по-голямо от 1км, които не са критични по отношение на време. Превозните средства, работещи в режим 4, трябва да използват общ набор от параметри, така че да могат да комуникират помежду си. Съобщенията се предават през споделени канали.

Схемата за планиране включва постоянен процес на резервация, с който превозните средства уведомяват съседните превозни средства за избраните и резервирани канали. Данните и контролната информация се капсулират в транспортни блокове (Transport Blocks) (26; 139).



Фигура 5: LTE-V2X VANET мрежова архитектура

Мрежов и транспортен слой (Network and Transportation layer)

В мрежовия и транспортен слой се разграничават два случая на маршрутизиране - в градска и извънградска среда. Използват се протоколи за маршрутизиране на база на рутване според локацията. В извънградска среда се взема предвид високата относителна скорост на движение, а в градска среда - многото препятствия, които могат да нарушат комуникацията. Показателите, според които се оценяват маршрутизиращите протоколи са съотношение на успешно доставени пакети спрямо общия брой предадени пакети и скорост на проникване на пакети. Ad-hoc протоколите за маршрутизиране са три вида: управлявани от таблица (проактивни), при поискване (реактивни) и базирани на местоположение (15; 123; 147).

Проактивните маршрутизиращи протоколи са векторни (базирани на алгоритъма на Bellman-Ford) и клъстерни (изграждащи йерархия) (15; 123; 147).

Реактивните протоколи установяват маршрут винаги, когато се генерира заявка за маршрутизиране и рядко или никакви актуализации по време на поддръжката на маршрута (15; 123; 147).

Техниката за *маршрутизиране, базирана на позициониране*, се възползва от информацията за местоположението. Географското маршрутизиране често съчетава методи от групата на изкуствения интелект като swarm стратегии и различни техники за предотвратяване на broadcast буря (15; 123; 147).

Приложен слой (Application layer)

В приложния слой се разграничават три групи съобщения според целите на приложенията и изисквания към киберсигурност и работата в реално време:

- *Безопасност* - към тази група се отнасят критични съобщения (например смяна на лентата или известие за злополука) с високи изисквания към киберсигурността и твърди изисквания за работа в реално време;
- *Планиране на маршрута* - съобщения носещи информация за обстановката на пътя. Тези съобщения се използват от приложенията, които целят подобряване на ефективността на трафика, например кооперативна навигация или интелигентни светофари. Те имат по-ниски изисквания към киберсигурността и меки изисквания за работа в реално време;
- *Информираност и развлечение* на потребителите (Infotainment)- тази група позволява на потребителите да използват услугите на крайпътните устройства и да използват мрежата за да използват видео, игри, разговори и т.н. Въпреки че тази група услуги много приличат на стандартните мобилни услуги, трябва да се има предвид, че пробив в сигурността може да засегне някоя от другите две групи. Тази група съобщения нямат изисквания за работа в реално време (31; 95).

VANET сигурност (Security)

Основното предизвикателство за VANET киберсигурността е осигуряване на анонимна автентификация. Двата най-популярни VANET стандарта - WAVE и C-V2X дават различно решение на този въпрос (95; 96; 123).

WAVE описва механизъм за удостоверяване, базиран на списък от йерархични сертификати. Той дефинира конкретни криптографски примитиви. Експерименталните изследвания сочат, че при големи натоварвания на мрежата, процедурата, описана в стандарта, не отговаря на времевите ограничения (31; 95; 96).

C-V2X дефинира два режима на работа - режим 4 (Unmanaged Mode) и режим 3 (Managed Mode). Стандартните механизми за сигурност на LTE стандартите са приложими в режим 3. В режим 4 проблемите със сигурността остават неразрешени. Стандартът поставя изисквания за защита от дублиране, цялостност, поверителност и предвижда използването на псевдоними. Той очертава изискванията, но не дава препоръки за конкретни механизми (26; 95; 96).

VANET управление (Management)

VANET управлението има отношение към всеки от трите слоя - за достъп, мрежов и транспортен, приложен. В слоя на достъп важна роля играе механизмът за достъп до съобщителната среда. В мрежовия, транспортния и приложния слой от ключово значение е контролът над механизмите за сигурност. Сегментирането на мрежата е пример за механизъм за сигурност, който трябва да бъде внимателно контролиран, поради опасност от нарастваща сложност на логическата йерархия на мрежата (108; 123).

1.2 Методи за анализ и проектиране на ИПТС

Математическо и симулационно моделиране са най-често използваните методи при проектиране и анализ на Интелигентна пътна транспортна система. Насочени експерименти се прилагат по-рядко, обикновено в етапа на тест и валидация. Степента на съответствие между модела и реалния обект определят валидността на модела (14; 59; 76; 105; 131).

Математическото моделиране е инструмент, чрез който може да се изследват избрани характеристики на система или явление. Математическият модел играе двойствена роля - от една страна пресъздава реалните процеси и явления, а от друга предоставя инструмент за решаване на поставени задачи. В ИТС често се заимстват методи от други области, или се намират нови приложения на използвани вече техники. За представяне на пътната мрежа най-често се използват графи или опашки. Поведението на шофьорите може да се раздели на компоненти, за да се моделира и настрои прецизно (145; 156).

Симулационното моделиране е математическо моделиране, реализирано с програмни средства. Симулацията е основният подход при представяне на системи, в които реалните експерименти са трудни и скъпи за извършване. Моделите за симулация на пътният трафик обикновено са базирани на агенти. Това ги прави подходящи за динамично обогатяване, изграждане на многостепенни хетерогенни модели, интегриране на човешко поведение. С усложняване на моделите обаче, се усложнява и процесът на валидиране и калибриране (103; 124).

Статии (14), (75) и (131) използват математически модели за мрежов анализ, а (76), (59) и (105) съчетават математическо и симулационно моделиране.

Авторите на (14) предлагат методи за математическо моделиране на потоци в логистични мрежи. Мрежите са представени като графи. Методът е приложим при движение по пътищата, транспортиране на течни и газообразни материали по тръбопроводи, електрически мрежи или икономически анализи.

Авторите на (131) предлагат модел за функциониране на производствено-транспортна верига за доставка на стоки с железопътен транспорт, базиран на логистика и системен анализ. Моделът определя времевите и количествените показатели на товарния поток.

Авторите на (75) предлагат математически модел за планиране на транспортна мрежа на територията на горски фонд, на база на качествен анализ, като се взимат предвид икономически и екологични показатели.

Авторите на (76) представят агентно базиран логически алгоритъм на светофари. Експериментът се извършва чрез SUMO.

Авторите на (59) предлагат хибридна стратегия за облекчаване на задръстванията на входа на летище, базирана на регулиране на транспортния капацитет и насочване на пътниците, като изучава модели, базирани на теория на опашките. Резултатите от симулацията показват, че предложената стратегия може да облекчи претоварването на опашката за дневни и вечерни сценарии и ефективно да подобри ефективността на евакуацията.

Авторите на (105) проектират и тестват базирана на симулация интелигентна транспортна система за прогнозиране на моделите на трафика въз основа на децентрализиран модел.

1.3 Моделиране на шофьорските навици

Моделът на поведението на водача е важен компонент от модела на пътният трафик. Задачата за управление на пътно превозно средство може да се разглежда като набор от подзадачи - планиране на пътуването, избор на цели и маршрут, избягване на препятствия, дистанцията между автомобилите, изпреварване, избор на скорост и т.н. Начинът, по който водачът се справя с тези задачи, се влияе от много фактори като настроение, умора, реакция на неблагоприятни условия и др (46; 153). Връзките между външните фактори и начина, по който водачите изпълняват различни задачи също може да бъде представен в модела (45; 115; 120; 174).

В симулационния модел поведението на шофьорите се отразява от алгоритъма за маршрутизиране и car-following модела. Алгоритъмът за маршрутизиране описва траекторията на превозните средства, а car-following модела - време-пространствените координати (13; 86; 106; 120).

Алгоритмите за маршрутизиране представят пътните мрежи като претеглени графи и приемат като входни данни броя на превозните средства или съотношението между трафик потоците в дадени места. Често използвани алгоритми за маршрутизиране са A-star, Kruskal и Dijkstra (13).

Car-following моделите отразяват характеристики като ускорение, забавяне, шофьорски навици и т.н. Примери за популярни car-following модели са Gipps, Krauss и Widermann (86; 106; 120).

Извличането на данни за поведението на шофьорите може да е свързано с насочено изследване или анализ на вече налични данни, извлечени с друга цел (7; 115; 153; 174).

Например, (153), (67) и (167) изследват зависимостта между информационните системи и поведението на водачите.

Авторите на (174) и (45) изследват ефекта от разсейването по време на шофиране.

Авторите на (7), (98) и (42) изследват характеристики на шофьорите, които влияят върху пътнотранспортни произшествия в различните култури. И трите проучвания заключват, че факторите, които повлияват безопасността на движението, варират значително в различните култури .

В статии (115), (46) и (97) е изследвано приложението на техники за машинно обучение върху данни, описващи поведението на шофьорите. Всички приложени методи – филтър на Калман, линейна регресия, логистична регресия, градиентно усилване и случайна гора дават добри резултати.

1.4 Избор на трафик симулатор

Изграждането на симулационен модел на пътния трафик включва различни компоненти – пътна мрежа, данни за трафик потоците, избор на инструмент за симулация (трафик симулатор), модел на взаимодействие между агенти, модел на поведението на шофьорите. Изборът на симулатор е определящ, тъй като всеки продукт има набор от възможности за представяне на времето, гранулярност, car-following модел, формат на представяне на входните данни и т.н. Друга важна характеристика е начинът на дистрибуция – комерсиална или със свободен достъп (9; 76; 124).

В зависимост от гранулярността симулационните модели на пътния трафик са микроскопични, макроскопични и мезоскопични. Микроскопичните модели се характеризират с подробно описание на околната среда, разнообразие от параметри и детайлни входни данни. В макроскопичните, голяма част от характеристиките се предават в обобщен вид. Мезоскопичните модели съчетават микро и макро модели, същественото в създаването им е да бъде избрано кои характеристики да бъдат представени обобщено и кои детайлно. Най-често се прилагат микромоделите (37; 103; 124).

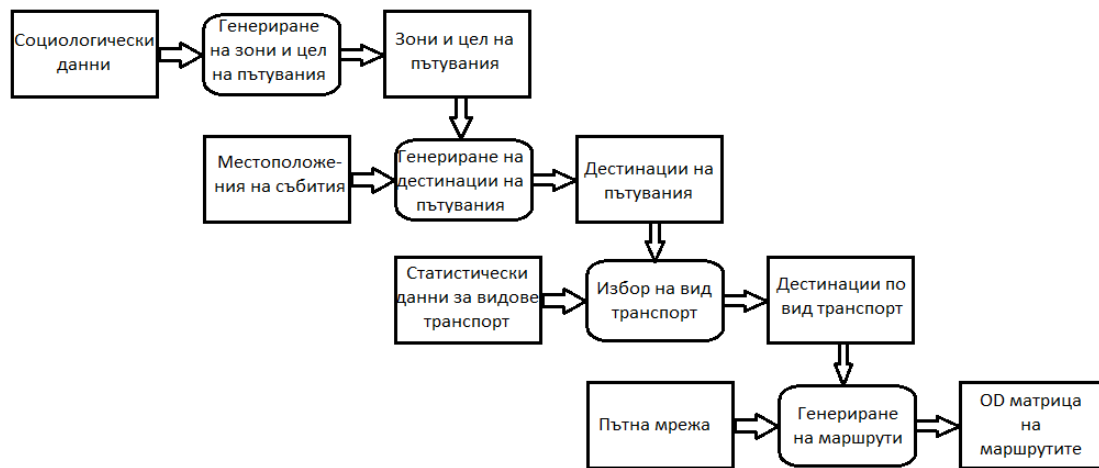
Специално внимание се обръща на моделите, описващи време-пространствените

координати на автомобила (car-following model). Използването на реални данни, и съчетаването на конвенционални и нетрадиционни подходи като обучение с подсилване и невронни мрежи повишава достоверността на модела (19; 24; 90; 127; 178)

Изборът на подходящи данни и тяхното адаптиране към симулатора е една от трудните задачи при симулиране на пътния трафик. Най-често използваната форма за представяне на входните данни е матрицата произход-дестинация (Origin-Destination matrix - OD matrix) (77).

Класическият подход за намиране на матрицата произход-дестинация е така нареченият четиристъпков модел. В него моделирания регион се разделя на зони (Traffic Analysis Zones - TAZ). Дефинирането на зони зависи от целите и спецификата на текущата задача. Всяка зона се описва чрез броя на своите жители и социално-демографски характеристики (ниво на доходите, собственост на автомобил, размер и структура на домакинството). Първите три стъпки представят в различна детайлност нуждата от мобилност в дадения регион, а четвъртата стъпка прогнозира ситуацията на пътя (77; 78).

Фигура 6 представя класическият 4-стъпков модел.



Фигура 6: 4-стъпков модел за генериране OD матрица

В първата стъпка се определят зоните и целите на пътуванията, обикновено чрез използване на социологически данни. Във втората стъпка се определят дестинациите на пътуванията въз основа на местоположения на събития. В третата стъпка се определя вида транспорт за всяко пътуване на база на статистическа информация. В последната стъпка се изчисляват матриците произход-дестинация, които описват конкретни маршрути (77).

За да се избере най-подходящия продукт е направено сравнение на някои от най-често използваните симулатори на трафик с фокус върху свободните дистрибуции (Таблица 2).

Таблица 2: Симулатори за пътен трафик

Симулатор	Начин на разпространение	Гранулярност	Представяне на времето	Car-following модел	Входни данни	Изходни данни
AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks)	Комерсиален	Микро Мезо Макро	Дискретно	Gipps	Матрици за вход-изход; Състояния на трафика	времена на пътуване, плътност и скорост на потока, закъснения, спирания, заетост на пътните ленти
PTV VIS-SIM (PTV Verkehr in Städten – Simulation)	Комерсиален	Микро	Непрекъснато	Микромодел базиран на клетъчни автомати	Класически 4-стъпков модел	шум, емисии, динамични планове за светофарните циклограми
TRANSIMS (TRansportation ANalysis and SIMulation System)	Свободен	Микро	Непрекъснато	Wiedeman	Класически 4-стъпков модел	точно местоположение на пътуващите във всеки момент, обобщени данни

Таблица 2: Симулатори за пътен трафик

Симулатор	Начин на разпространение	Гранулярност	Представяне на времето	Car-following модел	Входни данни	Изходни данни
MATSim (Multi-Agent Transport Simulation)	Свободен	Микро Мезо Макро	Дискретно	Модел, базиран на опашки	Класически 4-стъпков модел	брой пътувания и продължителност на пътуване, за цялата мрежа и в определени точки
MovSim (Multi-model open-source vehicular-traffic Simulator)	Свободен	Микро	Дискретно	IDM, ACC, Gipps, Krauss, клетъчни автомати	Брой превозни средства за единица време	данни от детектори, пространствено-времеви данни, floating car data, разход на гориво
SUMO (Simulator of Urban Mobility)	Свободен	Микро Мезо	Непрекъснато	Krauss, Wagner, Kerner, Wiedemann, IDM, Meso	синтетични данни, 4-стъпков модел, потоци и съотношения между потоци,	брой превозни средства, скорост, закъснения, емисии, floating car data, разход на гориво

Некомерсиалните симулатори са много по-гъвкави и достъпът до инструменти и документация е по-лесен. Въпреки че повечето комерсиални продукти предлагат студентски лиценз и демо версия, тези версии обикновено са ограничени по време, функционалност и мащаб на пътната мрежа. По отношение на представянето на времето – половината от разгледаните симулатори са с дискретно, а другата

половина с непрекъснато представяне на времето. В случаите с непрекъснато представяне на времето симулационната стъпка може да се конфигурира и това влияе на детайлността на изследването и на крайния резултат. Всички разгледани симулатори предлагат микро модел. Мезо и макро моделите се предлагат по-рядко за референтни изследвания. Повечето симулатори предлагат един car-following модел, докато MovSim и SUMO разполагат с различни опции. Почти всички симулатори предлагат класическия 4-стъпков модел за представяне на входните данни. SUMO и AIMSUN разполагат с повече от една опции. По отношение на представянето на входните данни SUMO е най-гъвкав. По отношение на представянето на изходните данни всички разгледани симулатори предлагат гама от възможности (6; 100; 113; 114; 137; 152; 165).

За извършване на симулационните експерименти в дисертацията е избран симулатора за пътен трафик SUMO. Наборът от много допълнителни инструменти и добре организирана документация, отворената и гъвкава концепция са сред основните предимства на SUMO, посочени в литературата (87). Основна причина за избора на SUMO в това изследване са многото опции за представяне на входните и изходни данни и разнообразието от car-following модели.

1.5 Ефективност на пътния трафик

Проблемът със задръстванията нараства всяка година, поради икономическия растеж и засилената урбанизация. Една от важните цели на ИПТС е ефективно управление на съществуващите инфраструктури. Мерките за оптимизиране на пътния трафик включват както конвенционални средства, като насърчаване на използването на обществен транспорт и оптимизиране на светофарните цикли, така и високотехнологични решения като автоматизирано шофиране, усъвършенствани навигационни системи, системи за контрол на трафика, системи за контрол на паркиранията (5; 83; 110; 116; 119; 143; 149).

Както беше отбелязано в точка 1.1.3 според целите си ИПТС приложенията се делят на три групи: безопасност, ефективност, информираност и забавление. Въпреки че тези групи в голяма степен се припокриват това разделение е важно, тъй като има отношение към изискванията за бързодействие, работа в реално време и киберсигурността.

Мерките за намаляване на пътните инциденти включват планиране и наблюдение на глобално и национално ниво, автоматизирани системи за предупреждения и реакции в случай на възникване на инциденти (20; 88; 109; 117; 169).

Интересът към информационно-развлекателните системи (Infotainment systems)

в транспорта непрекъснато расте, поради навлизането на транспортни средства с все по-висока степен на автоматизирано управление и свързаност и връзката между информираността на водача, ефективността и безопасността (79; 126).

В приложенията за ефективност се разграничават две подзадачи - рутиране на пътните потоци и управление във времето. Ефективното рутиране на потоците може да се постигне чрез кооперативно навигиране или VMS (Variable Message Signs), а управлението във времето (15) - чрез кооперативно автоматизирано шофиране или светофари (1; 72).

Светофари

Повече от век светофарите са едно от най-разпространените средства за управление на пътните потоци. Продължителността и последователността на светлинните сигнали, подавани от пътните светофари, се изобразяват с циклограма, която определя какъв светлинен сигнал трябва да подава всеки светофар във всеки момент от светофарния цикъл. Определянето на времената в циклограмата обикновено се определя на база дължините на опашките. Най-популярният метод за определяне времената на циклограми е алгоритъмът на Webster (168; 183).

Статичните методи за управление на светофарите използват предварително програмирани дневни графици. Този подход за контрол се използва широко тъй като е евтин и лесен за изпълнение. Технологиите за динамично управление на светофарите регулира времето на червените, жълтите и зелените светлини, така че да съответстват на промените на трафика в реално време. Техниките за оптимизиране на светофарните цикли според натоварването са приложими както при статично, така и при динамично регулиране, разликата е в честотата на извличане на данните и извършване на изчислението. Могат да бъдат адаптирани циклите на изолирани светофари или да бъдат координирани групи от светофари. Информацията може да бъде предоставена на шофьорите чрез конвенционален светофар или на дисплея на автомобила (27; 164; 166).

При статично управление на светофарите в зависимост от очакваното натоварване на пътната мрежа в различни часове от денонощието или при определени събития може да бъде задавана различна продължителност на червените жълти и зелени времена. При четири- и пет- фазно регулиране на движението продължителността на светофарния цикъл е не по-голяма от 120s (176; 182).

При динамично управление данните за трафика се извличат в реално време и върху тях се прилагат техники за оптимизация на трафика, които управляват адаптиращите се светофари. Данните за трафика обикновено се снемат чрез

сензори. Друга възможност са данни от потребителски устройства или свързани автомобили. Процесът се актуализира на всеки няколко минути. Примери за системи за адаптивен контрол на светофари са SCATS (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System) в Австралия и SCOOT (Split Cycle Offset Optimization Technique) в Англия (22; 142).

Автоматизирано шофиране

Автоматизираните превозни средства предоставят различни форми на съдействие на водача, като адаптивен круиз контрол (Adaptive Cruise Control - ACC), антиблокираща спирачна система (Anti-lock Braking System - ABS), система за контрол на сцеплението (Traction Control System - TCS) и др. Пълната автоматизация изключва намесата на шофьора. Различните нива на автоматизация са категоризирани в йерархия, описана от Society of Automotive Engineers (SAE) (41; 140).

Очаква се навлизането на напълно автоматизираните превозни средства да намали инцидентите на пътя и да повиши ефективността на трафика. Тази тенденция обаче би могла да доведе до някои нежелани последици като все по-голямо потребление. Трудно е да се предвиди какви биха били ефектите на тази технология в преходния период, когато част от превозните средства ще са напълно автоматизирани, а останалите ще са ръчноуправляеми (54; 57; 121).

Предсказването на поведението на околните превозни средства и информацията за заобикалящата среда е една от важните задачи при проектиране на автономни превозни средства (65). Автомобилни ad-hoc мрежи дават възможност част от ИПТС приложенията да използват глобална логика. Свързаността на превозните средства може да предостави допълнителни ползи за автономното шофиране, тъй като комуникацията подобрява перспективата за заобикалящата среда. Вече са налице разработки на свързан автоматизиран пътнически транспорт в зони с ограничен достъп, въпреки това масовото навлизане на кооперативното автоматизирано шофиране (Cooperative Adaptive Cruise Control - CACC) е възпрепятствано от нерешени въпроси, свързани с киберсигурността, законодателството и налагането на общоприети стандарти (56; 167).

Едно от полезните приложения на кооперативно автоматизирано шофиране е формирането на групи от превозни средства (vehicle platoons). Очаква се движението в група да допринесе за ефективността, безопасността и комфорта. При движението на превозни средства в група, автоматизираните или частично автоматизирани свързани превозни средства се движат във формации с дистанция от 3 до 10 метра.

Движението в група позволява да се спести гориво чрез намаляване на триенето в предната част на автомобилите и турбулентния поток на опашката. Превозните средства във вътрешността на групата имат най-големи преимущества (22; 58; 89).

1.6 Изводи

Предпоставките за развитие на ИПТС от една страна са бързо развиващите се технологии, а от друга - все по-нарастващата нужда на потребителите от мобилност и концентрацията на голяма част от населението в градовете.

Основните тенденции в ИПТС са свързаност и автоматизация. Свързаността се изразява в предлагане на интегрирани услуги, независещи от доставчиците, свързани превозни средства и обмен на информация в реално време. Автоматизацията се свързва с пътища, оборудвани със сензори и системи за наблюдение, използване на облачни услуги и превозни средства с висока степен на автономност.

Технологичните предпоставки за развитие на ИПТС са развитието на системите за контрол, Интернет на нещата и автомобилните ad-hoc мрежи.

Работа в реално време е концепция, която засяга ИПТС на много нива. Изпълнение на дадена задача в реално време, означава гарантирано получаване на резултат в определена времева рамка. Когато този срок е задължителен, тоест при неизпълнението му се счита, че задачата не е изпълнена, се счита, че изискванията за работа в реално време са твърди, а когато е само пожелателен - меки.

Важен компонент на ИПТС услугите, отговарящи на изискванията за работа в реално време, са комуникациите в реално време - жичните комуникации между инфраструктурните устройства и във вътрешната за автомобила мрежа и безжичните VANET комуникации. От друга страна се налага тенденцията бордовите устройства в съвременните превозни средства да гарантират работа в реално време чрез операционна система за работа в реално време. В случаите на отдалечено изпълнение на дадена услуга се поставя краен срок за изпълнение на цялата задача, който включва локалните и отдалечено извършени операции, както и времето за осъществяване на комуникацията.

Наложилата се широко четирислойна архитектура за Интернет на нещата е една от предпоставките за възникване на ИПТС. Възприемащия слой събира данни от околната среда. Разнородните данни (структурирани, полуструктурирани и неструктурирани), се предават на поддържащия слой, чрез жична или безжична комуникация. В поддържащия слой, с помощта на подходяща инфраструктура върху данните се извършват различни операции (класифициране, пречистване, анализ). Резултатите от извършения анализ достигат до потребителя чрез

приложния слой. Киберсигурността и управлението имат отношение към всеки от четирите слоя. ИПТС са една от подобластите на Интернет на нещата, в която се поставя особен акцент на киберсигурността, тъй като тя е пряко свързана с физическата безопасност на потребителите.

Свързаността и динамиката в ИПТС в голяма степен се дължат на автомобилните ad-hoc мрежи - VANET. Те са безжични мрежи, в които превозните средства комуникират на принципа равен-равен. Мрежовата архитектура е трислойна - във възприемащия слой на VANET се конкурират две технологии - IEEE 802.11.p и клетъчната V2X комуникация. Ad-hoc рутиращите протоколи са реактивни, проактивни и базирани на географско рутирание. Протоколите, базирани на географско рутирание често се съчетават с иновативни техники от групата на изкуствения интелект, в такива случаи рутиранието засяга и приложния слой. Според изискванията за киберсигурност и работа в реално време, VANET приложенията се делят на три групи: за безопасност, ефективност и информираност и забавление на потребителите.

Математическо и симулационно моделиране са най-често използваните методи в анализа и проектирането на Интелигентни пътни транспортни системи. Важна стъпка при изграждане на симулационен модел е изборът на симулатор. Моделирането на шофьорските навици е компонент от симулационния модел, който изисква особено внимание, поради спецификите на маниера на шофиране в различните култури и необходимостта от въвеждането на реални данни за трафика.

След направения анализ на някои от често използваните симулатори на пътен трафик за по-нататъшните експерименти в дисертацията е избран симулатора със свободен достъп SUMO, поради неговата достъпност, модулност и богатият набор от възможности за въвеждане на входни и извеждането на изходни данни и моделиране на навиците на шофьорите.

Навлизането на технологични решения променя конвенционални средства за управление на трафика като светофари и пътни знаци и налага нови технологии като свързани автоматизирани превозни средства, интелигентни светофари, движение в platoon. Ефектите върху пътната безопасност и ефективността на трафика се очаква да бъдат позитивни.

Част от представените в тази глава резултати са публикувани в P1, P2, P3, P4 и P5 6.

Цели и задачи

Целите на настоящия труд са изследване на методите и средствата за реализиране на интелигентни пътни транспортни системи, възможностите за трансфер на похвати за анализ и проектиране и приложимостта на технологии за оптимизиране на трафика.

За постигане на тези цели в настоящия труд са поставени следните задачи:

1. Да се оценят възможностите за приложение на архитектурата на Интернет на нещата в интелигентна пътна транспортна система: да се проектира абстрактен модел, базиран на стандартната IoT архитектура, включващ VANET и предлагащ интегрирани потребителски услуги на базата на Edge-Fog-Cloud.
2. Да се изследват възможностите за изграждане на симулационен модел на пътна мрежа, включващ параметри, описващи маниера на шофиране: да се предложи и реализира методология за извеждане на параметри, описващи шофьорските навици в симулационен модел на трафика.
3. Да се предложи аналитичен модел за изследване на пропускателната способност на пътната мрежа: да се изследва приложимостта на предложения аналитичен модел над пътни мрежи с различна гранулярност.
4. Да се предложат методи за оптимизация на пропускателната способност на пътната мрежа и да се изследва тяхната ефективност: да се изследва ефективността на предложените методи с помощта на математически и симулационен анализ.

2 Архитектура на ИПТС

ИПТС е един от компонентите на Интернет на нещата. Това води до заимстване на идеи и сътрудничество, промени в утвърдени методи като управление на светофарите, събиране на пътни такси, събиране на данни за трафика и възникване на нови решения като комуникация между движещи се автомобили, безпилотни превозни средства, движение в platoon, кооперативно шофиране, транспорт с безпилотни летателни апарати.

Описаната в точка 1.1.2 архитектура би могла да се приложи в ИПТС, като към всеки от слоевете се добавят специфики, характерни само за транспорта. Тъй като автомобилните ad-hoc мрежи заемат централно място в концепцията за ИПТС е добавен VANET слой - фигура 7.



Фигура 7: ИПТС архитектура

2.1 VANET

Поради ключовата роля и многостранността на VANET, настоящата ИПТС архитектура разграничава отделен VANET слой, който действа на нивото на мрежовия и възприемачия слой. Данните от VANET може да се слоят или да бъдат предадени в суров вид на поддържащия слой.

2.2 Възприемащ слой

Слоят на възприемане на ИПТС събира данни от околния свят, взаимодействайки с потребителски устройства, сензори в превозни средства и инфраструктурни устройства. Детекторите, вградени в пътната настилка, като магнитометри, пневматични тръбни, пиезоелектрични или индуктивни рамки, са надеждни и

удобни. Недостатъкът при тях е усложнения монтаж, което ги прави и по-скъпи в сравнение със събирането на видео данни, инфрачервени, микровълнови, ултразвукови, акустични и лазерни детектори. Сензорното оборудване, инсталирано в автомобила, се използва основно за събиране на данни като скорост на превозното средство, ускорение, местоположение, посока на движение.

Сливането на данни във възприемачия слой на ИПТС допринася за ефективността и сигурността на системата. Пример за сливане на данни в това ниво са данни от пътни метеорологични станции, системи за детектиране и обработка на видеоизображение и данни от безпилотни летателни апарати. Често прилагани методи за сливане на данни са Central Limit Theorem, Филтър на Калман (Kalman filter), Байесови мрежи (Bayesian networks), теория на Демпстър-Шафър (Dempster-Shafer).

2.3 Мрежов слой

Мрежовият слой е сложна сплав от кабелни и безжични технологии. Той включва инфраструктурна мрежа и комуникационната мрежа в превозните средства. Мрежовият слой събира информация от възприемачия слой и предава данни към поддържащия. Класификацията на VANET услугите може да се приложи за услугите на ИПТС мрежовия слой - обособени са три групи - безопасност, ефективност, информираност и забавление - според изискванията за киберсигурност и работа в реално време.

2.4 Поддържащ слой

Поддържащият слой в ИПТС извлича данни от мрежовия слой, обработва ги чрез средствата от областта на наука за данните и предоставя услуги на приложния слой. Обработката се извършва локално (в самото превозно средство, в крайпътни единици – Road Side Unit - RSU), във Fog или Cloud, в зависимост от техните времеви и пространствени специфики и съображения за сигурност.

В контекста на ИПТС архитектурата Cloud-Fog-Edge придобива нови измерения поради високите изисквания за сигурност и надеждност, навлизането на VANET и изобилието от сензори и сложни системи за наблюдение. Облачният слой е децентрализиран мулти-облак, обединяващ услуги на различни доставчици. Fog обхваща превозни средства и RSU. Важна роля играят обобщените данни от VANET.

Основната разлика между двата слоя е, че Cloud включва външен доставчик на услуги, докато Fog е персонализирана разработка и напълно отговаря на изискванията за киберсигурност и работа в реално време. Edge отговаря за

локалната обработка в случаи на необходимост от незабавна реакция. Повечето операции изискващи реакция в кратки срокове и твърда работа в реално време са свързани със безопасността на потребителите и се извършват локално, в превозното средство. В такива случаи операционната система за работа в реално време е важен фактор за успешно завършване на задачата в срок.

Основната характеристика на ИПТС услугите на поддържащия слой е в къде се извършва обработката на данните: Fog, Cloud или Edge. Често се случва обработката на данните да се извърши разпределено. Таблица 3 дава пример за някои типични ИПТС услуги на поддържащия слой.

Таблица 3: Услуги на ИПТС поддържащ слой

Услуга	Edge	Fog	Cloud
Контрол на сцеплението (TCS)	✓	✗	✗
Мониторинг на здравината на пътната настилка	✓	✓	✓
Мониторинг на пътните потоци	✓	✓	✓
Мониторинг на метеорологични условия	✓	✓	✓
Оптимизиране на маршрути	✓	✓	✓
Бързо стигане до дестинация	✓	✓	✓
Пренасочване на трафик	✓	✓	✓
Мониторинг на поведението на шофьорите	✓	✓	✓
Система за разпознаване на регистрационни номера - Automated License Plate Recognition (ALPR) system	✓	✓	✗
Проследяване на товари	✓	✓	✗
Исторически отчети за трафик	✗	✗	✓
Достъп до отдалечени ресурси (музика, филми, игри и т.н.), изискващи комуникация в реално време	✗	✗	✓

Контрол на сцеплението е типично приложение на ИПТС поддържащия слой, което се изпълнява изцяло локално.

Примери за услуги на ИПТС поддържащ слой, които могат да обхванат Fog,

Cloud и Edge са: мониторинг на здравината на пътната настилка, мониторинг на пътните потоци, мониторинг на метеорологичните условия, оптимизиране на маршрути, бързо стигане до дестинация, пренасочване на трафик, мониторинг на поведението на шофьорите.

Система за разпознаване на регистрационните номера и проследяване на товари имат отношение към Edge и Fog.

Исторически отчети за трафика, достъп до библиотеки, игри, новинарски платформи, музика, филми, възможности за провеждане на видеоконференции са пример за услуги, изпълняващи се изцяло в Cloud.

2.5 Приложен слой

Повечето ИПТС приложения са свързани с повече от една услуга на поддържащия слой. Таблица 4 представя примери за услуги на ИПТС приложен слой, тяхната връзка с поддържащия слой, времевите характеристики на данните, към кой тип ИПТС услуги принадлежат според целите и начинът, по който резултатът от услугата стига до потребителя.

Таблица 4: Услуги на ИПТС приложен слой

Услуга	Услуга на поддържащ слой	Времеви характеристики на данните	Тип ИПТС услуга	Индикация
Локално автономно управление на автомобила	Контрол на сцеплението, ABS и др.	<ul style="list-style-type: none"> Данни, извлечени в реално време 	Безопасност	Задейства управляващи системи в автомобила
Информационна система за състоянието на пътната инфраструктура	<ul style="list-style-type: none"> Мониторинг на метеорологичните условия; Мониторинг състоянието на пътната настилка. 	<ul style="list-style-type: none"> Данни, извлечени в реално време 	<ul style="list-style-type: none"> Безопасност; Ефективност; 	<ul style="list-style-type: none"> VMS; на автомобилното табло; на мобилни устройства.

Таблица 4: Услуги на ИПТС приложен слой

Услуга	Услуга на поддържащ слой	Времеви характеристики на данните	Тип ИПТС услуга	Индикация
Предсказване на натовареността на трафика в реално време	<ul style="list-style-type: none"> • Мониторинг на метеорологичните условия; • Мониторинг на здравината на пътната настилка; • Мониторинг на поведението на шофьорите; • Исторически отчети за трафик. 	<ul style="list-style-type: none"> • Исторически данни; • Данни, извлечени в реално време. 	<ul style="list-style-type: none"> • Безопасност; • Ефективност; 	<ul style="list-style-type: none"> • на автомобилното табло; • на мобилни устройства.
Система за измерване на тегло в движение	<ul style="list-style-type: none"> • Данни от сензорите за измерване на тегло; • Слива данните с ALPR системата. 	<ul style="list-style-type: none"> • Исторически данни; • Данни, извлечени в реално време. 	<ul style="list-style-type: none"> • Безопасност; • Ефективност; 	При нарушение информира контролните органи

Таблица 4: Услуги на ИПТС приложен слой

Услуга	Услуга на поддържащ слой	Времеви характеристики на данните	Тип ИПТС услуга	Индикация
Интелигентни светофари	<ul style="list-style-type: none"> • Мониторинг на трафика в реално време; • Мониторинг на поведението на шофьорите; • Исторически отчети за трафик; • Информация за социални събития. 	<ul style="list-style-type: none"> • Исторически данни; • Данни, извлечени в реално време. 	<ul style="list-style-type: none"> • Безопасност; • Ефективност; 	<ul style="list-style-type: none"> • конвенционални светофари; • VMS; • на автомобилното табло.
Глобална навигационна система	<ul style="list-style-type: none"> • Мониторинг на метеорологичните условия; • Мониторинг на здравината на пътната настилка; • Мониторинг на поведението на шофьорите; • Отчети за трафик; • Пренасочване на трафик; • Проследяване на товари 	<ul style="list-style-type: none"> • Исторически данни; • Данни, извлечени в реално време. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ефективност; • Информационност 	<ul style="list-style-type: none"> • VMS; • на автомобилното табло; • на мобилни устройства.

Таблица 4: Услуги на ИПТС приложен слой

Услуга	Услуга на поддържащ слой	Времеви характеристики на данните	Тип ИПТС услуга	Индикация
Кооперативно автоматизирано шофиране	<ul style="list-style-type: none"> • Мониторинг на метеорологичните условия; • Мониторинг на здравината на пътната настилка; • Мониторинг на поведението на шофьорите; • Отчети за трафик; • Пренасочване на трафик; • Проследяване на товари 	<ul style="list-style-type: none"> • Исторически данни; • Данни, извлечени в реално време. 	<ul style="list-style-type: none"> • Безопасност; • Ефективност; 	Задейства системите за управление на превозните средства
Игри, библиотеки, новинарски платформи, видео конференции, музика и филми	Достъп до отдалечени ресурси	<ul style="list-style-type: none"> • Исторически данни; 	Информационност и забавление	<ul style="list-style-type: none"> • на автомобилното табло; • на мобилни устройства.

Информационна система за състоянието на пътната инфраструктура, системата за предсказване на натовареността на трафика в реално време, системата за измерване на тегло в движение, интелигентни светофари, кооперативно автоматизирано шофиране, са типични услуги на ИПТС приложния слой от групата на безопасност и ефективност, които използват повече от една услуги на поддържащия слой.

Глобалната навигационна система се отнася до ефективността и информираността.

Локалното автономно управление на автомобила е типична услуга от групата на безопасността, изискваща незабавна реакция с твърди изисквания за работа в реално време, която задължително се извършва локално в превозното средство.

Игри библиотеки, новинарски платформи, конференции, музика и филми са услуги от групата на информираността и забавлението, чието търсене все повече нараства с нарастване на нивото на автоматизация.

2.6 Киберсигурност

Киберсигурността има отношение към всеки един от ИПТС архитектурните слоеве. Таблица 5 представя уязвимите места, примери за киберетаки и технологии за защита.

Таблица 5: Киберсигурност в ИПТС

Архитектурен слой	Задачи на киберсигурността	Кибератака	Средства
VANET	Анонимна автентификация	<ul style="list-style-type: none"> • Sybil Attacks; • Denial-of-Service; • Man-in-the-Middle; • Eavesdropping; • Routing attacks; 	<ul style="list-style-type: none"> • Блокчейн • Модели, базирани на репутация • Теория на игрите • Комбинации от методи
Възприемащ	Проблеми при конфигуриране и инициализиране на устройства	<ul style="list-style-type: none"> • Denial-of-Service; • Spoofing. 	<ul style="list-style-type: none"> • Security-by-contract; • Sensor fusion.

Таблица 5: Киберсигурност в ИПТС

Архитектурен слой	Задачи на киберсигурността	Кибератака	Средства
Мрежов	Вътрешната за автомобила мрежа	<ul style="list-style-type: none"> • Denial-of-Service 	<ul style="list-style-type: none"> • Конвенционални средства; • Нови мрежови стандарти.
Поддържащ	Защита на Fog	Атаки срещу Fog;	Адаптирани конвенционални методи
Приложен	<ul style="list-style-type: none"> • Сложен модел на данните; • Защита на системи с ИИ 	<ul style="list-style-type: none"> • Data poisoning; • Environmental Perturbations; • Policy manipulation 	<ul style="list-style-type: none"> • Машинно обучение; • Онтологии; • Теория на игрите.

Във *VANET* основното предизвикателство е осигуряване на анонимна автентификация. Една от най-бързо развиващите се технологии за анонимно удостоверяване, с която широко се експериментира е блокчейн. Друг отговор на въпроса за намаляване на ресурсите при анонимно удостоверяване са изчисленията във Fog. Запазването на уязвимата информация за идентичността на устройства и потребители близо до слоя на извличане би ограничило риска от атаки. Най-вероятно отговорът на въпроса с анонимната автентификация в мрежовия слой на ИПТС е в използването на няколко допълващи се технологии, например блум филтър като основен метод и черен списък и заявка към легитимната страна като спомагателни методи.

Във *възприемачия слой* са възможни проблеми при конфигуриране и инициализиране на устройства, поради използването на мобилни потребителски устройства и техника с общо предназначение.

Концепцията за Security-by-contract е обещаваща технология в този слой, тъй като предоставя възможност за конфигурируема стратегия за сигурност.

Най-сериозното предизвикателство пред киберсигурността в *мрежовия слой* на ИПТС е осигуряването на вътрешната за автомобила мрежа, тъй като голяма част

от стандартите не са предназначени да функционират по свързан начин. Атаката на това ниво би могла да доведе до некоректно функциониране на превозното средство и да застраши физическата безопасност на пътниците. Налагането на стандарт за киберсигурност ще отнеме време. В преходния период конвенционалните методи за сигурност ще изиграят важна роля.

В *поддържащия слой* данните се обработват в Fog, Cloud или Edge в зависимост от техните времеви и пространствени специфики и съображения за сигурност. Като нововъзникваща технология, структурите Fog представляват нови предизвикателства за сигурността, тъй като са по-трудни за защита от централизирания облак. Съществуващите практики за сигурност и поверителност в облак не могат да бъдат приложени директно към изчисленията с Fog поради неговите характеристики, като мобилност, хетерогенност и географските мащаби.

В поддържащия слой на ИПТС приложение намират конвенционалните методи за сигурност като криптография и мрежово сегментиране, които обаче трябва да бъдат адаптирани към нуждите на системата.

Данните на ИПТС *приложното ниво* отговарят на всички характеристики на Големи данни, което е и предпоставка за прилагане на Изкуствен интелект. Това превръща защитата на ИПТС приложния слой в комплексна задача, обхващаща разнородни предпоставки.

В този слой се работи с холистични подходи и стратегии за сигурност. Изкуствен интелект, машинно обучение, онтологии и теория на игрите са инструменти, които са намерили приложение в решенията за киберсигурност в Интернет на нещата. Тяхното приложение и адаптиране към ИПТС трябва да бъдат подробно проучени.

2.7 Управление

Управлението на ИПТС е свързано с безпроблемното опериране на системата, налагането на международни и локални законодателство и стандарти и проследяването на тяхното изпълнение. В случаите на възникване на извънредна ситуация е необходимо осигуряване на динамично поддържане и безпроблемна работа. Този аспект на ИПТС обединява усилията на бизнеса, администрацията и местните власти, а също засяга информираност, образование и координация на процесите на глобално ниво.

2.8 Изводи

Предложена е четирислойна ИПТС архитектура, базирана на стандартната архитектура на Интернет на нещата. Тъй като автомобилните ad-hoc мрежи заемат

централно място в концепцията за ИПТС е добавен VANET слой.

VANET са вид peer-to-peer мрежи, в които възлите (превозните средства) обменят кратки съобщения, които съдържат важна информация за превозните средства и околната среда. Сливането на тази информация в реално време създава нова перспектива за ситуацията на пътя и е основна предпоставка за възникване на технологични решения и нови стратегии за безопасност и ефективност на пътния трафик.

Възприемащия слой в ИТС, събира данни за хора, превозни средства, пътища и околната среда. Събраните данни се предават на поддържащия слой, чрез жична или безжична комуникация, където се обработват съобразно изискванията за киберсигурност и работа в реално време. Резултатите достигат до приложния слой под формата на индикация в автомобила или пътната инфраструктура, чрез мобилно устройство или дори задвижване на система в автомобила.

Дадени са примери за услуги на ИПТС поддържащ и приложен слой и връзките между тях. Основна характеристика на услугите на ИПТС поддържащия слой е мястото на извършване на изчисленията - Fog, Cloud или Edge. Услугите на приложния слой използват услуги от поддържащия слой, в зависимост от целите на приложенията (безопасност, ефективност, информираност и забавление).

Киберсигурността в ИПТС има пряко отношение към безопасността на участниците в движението и е ключов фактор за надеждното и безпроблемно функциониране на системата. Основните заплахи пред ИПТС киберсигурността е осигуряване на системи, които не са били предназначени да функционират по свързан и споделен начин, като вътрешната за автомобила мрежа и сензорни устройства, както и нови технологии, като Fog и VANET, които не са достатъчно зрели. За целите на ИПТС киберсигурността се експериментира с комбиниране на класически и иновативни подходи и често се заимстват техники, приложими в други IoT домейни.

Управлението на ИПТС е свързано с изработване на законодателство и стандарти и проследяване на тяхното изпълнение, както и осигуряване на безпроблемна работа на системата в извънредни ситуации по прозрачен за потребителя начин.

Част от представените в тази глава резултати са публикувани в P1 и P2 6.

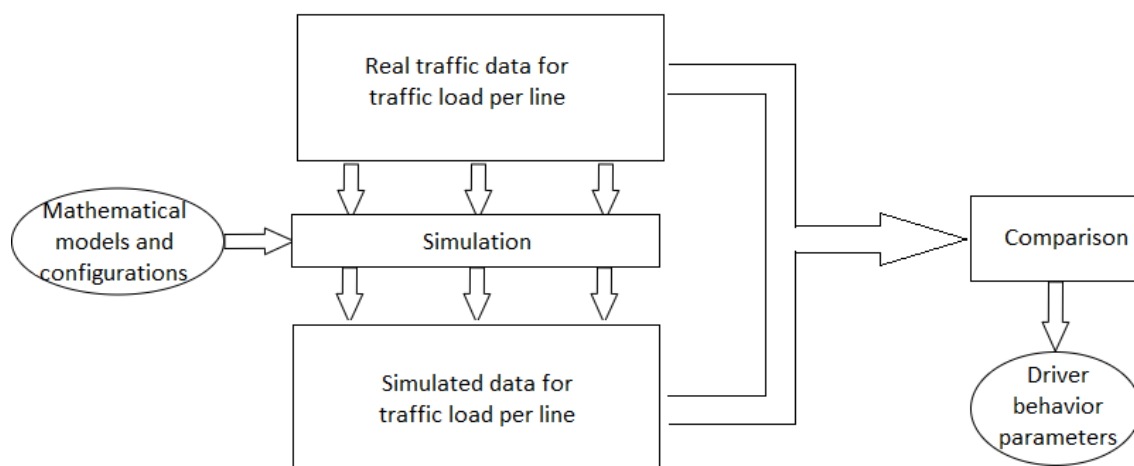
3 Моделиране на шофьорските навици в симулация на пътния трафик

Както беше отбелязано в 1.3, маниерът на шофиране може значително да повлияе на пропускателната способност на пътната мрежа, а в следствие и на мерките за оптимизиране на трафика. При изграждане на симулационни модели е важно да се вземе предвид начинът на шофиране в даден район. Шофьорските навици се представят от математически модели, които е необходимо да бъдат настроени чрез конфигурируеми параметри.

Предложена е методология, която избира математически модели и техните конфигурационни параметри, които най-добре отразяват навиците на шофиране на базата на входни данни за броя преминали превозни средства през дадена пътна лента.

В случаите, когато данните са зададени за много местоположения, математическите модели могат да изпитат определени затруднения и в резултат на това симулираните стойности да се отклоняват от зададените. Предложената методология избира математически модели и техните параметри, при които отклонение между входните и симулираните стойности е най-малко.

Фигура 8 изобразява схема на методологията. Входните данни за симулатора са реални данни за броя преминали автомобили през дадена пътна лента за определен интервал от време. Задават се различни математически модели и техни конфигурационни параметри. Разминаването между симулираното и реалното натоварване се изчислява в проценти.



Фигура 8: Методология за намиране на параметри, моделиращи шофьорските навици

3.1 Реализация на методологията

Предложената реализация избира алгоритъм за маршрутизиране, car-following модел, и техните параметри, които най-точно отразяват навиците на водача, като избира комбинацията с най-малкото отклонение между входните и симулираните стойности.

Входните данни за симулатора са: пътна карта, циклограми на светофарите и натоварванията на пътните линии в брой автомобили. Експериментира се с 4 car-following модела, 3 маршрутизиращи алгоритъма и техните параметри. Всеки вектор на декартовото произведение на възможните car-following модел, алгоритъм за маршрутизиране и техните параметри са вход за симулационен експеримент.

Например, конфигурацията (Krauss, minGap=1m, tau=2m, Dijkstra, стъпка=10s) е входен вектор за симулация. Това означава, че симулацията използва car-following модел Krauss с минимално разстояние в спряло състояние - 1m и минимално разстояние при движение - 2m; Алгоритъм за маршрутизиране Dijkstra със стъпка на преизчисляване на маршрута - 10s. След изпълнение на симулацията, информацията за броя автомобили, преминали през всяка лента, се сравнява с входните данни. Несъответствието между тези две стойности в проценти се изчислява за всяка пътна лента. Средната стойност на несъответствията за определена симулация е метрика за валидността на конфигурацията. Счита се, че конфигурация с най-малко несъответствие отговаря най-добре на навиците на шофиране.

3.1.1 Пътна мрежа

Частта от пътната мрежа в гр. Пловдив между булевард „Руски“ (на изток), булевард „Освобождение“ (на запад), ул. „Гладстон“ и булевард „Княгиня Мария Луиза“ (на север) и „Булевард „Христо Ботев“ и булевард „Санкт Петербург“ (на юг) е интегрирана в SUMO - фигура 9.

3.1.2 Натоварване на пътната мрежа

Данните за натоварването на трафика в експеримента се получават чрез виртуални детектори, изградени на базата на пътни камери, предоставени от Община Пловдив под формата на справки в Excel формат. Всеки отчет съдържа информация за броя превозни средства, навлезли в дадено кръстовище за час.

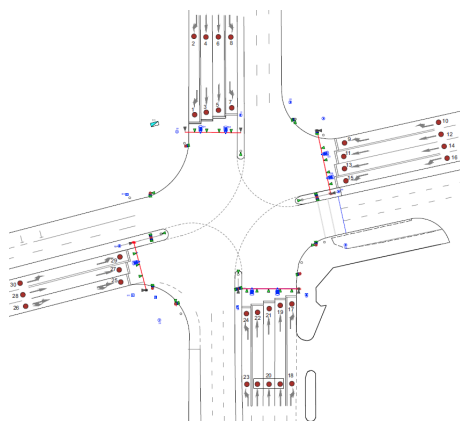
Фигура 10 показва позицията на детекторите на едно от изследваните кръстовища.

За продължителността на светофарните циклограми са използвани данни от документацията на Община Пловдив - фигура 11.

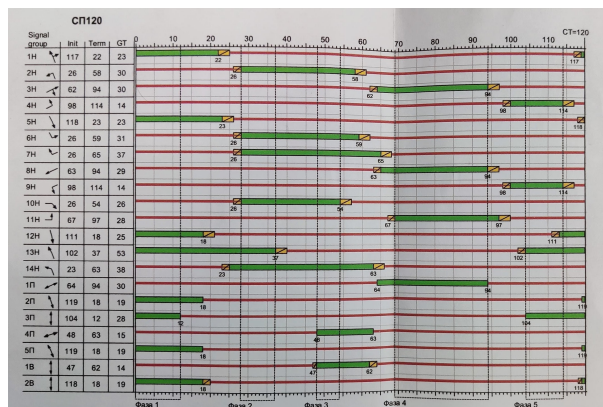
3 Моделиране на шофьорските навици в симулация на пътния трафик



Фигура 9: Пътната мрежа между бул. „Руски” - бул. „Освобождение” - бул. „Кн. Мария Луиза”- бул. „Христо Ботев“ и булевард „Санкт Петербург“



Фигура 10: Позиции на виртуални детектори

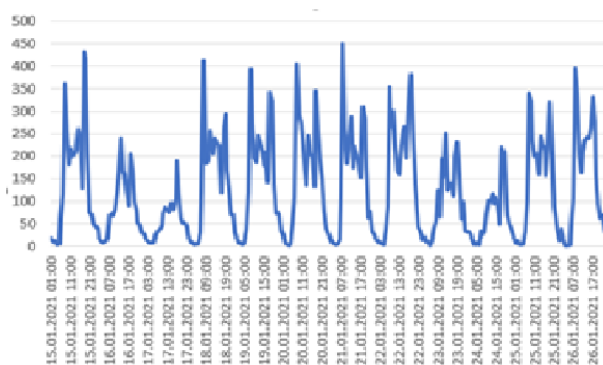


Фигура 11: Циклограма за управление на светофар

3 Моделиране на шофьорските навици в симулация на пътния трафик

Извършени са експерименти с отчети за 8 кръстовища за периода от 15 януари до 27 януари 2021 г. Формиран е разширен набор данни, като към основните отчети са добавени отчети за периода 19 февруари - 19 март 2021 г. за 3 от кръстовищата. С разширения набор данни са извършени допълнителни експерименти.

Фигура 12 изобразява натоварването на пътната мрежа за периода 15 януари до 27 януари 2021. Ясно се виждат сутрешните и следобедните пикови часове, както и разликата в натоварванията между работни и почивни дни.



Фигура 12: Пътния трафик за периода 15 - 27 януари 2021 за кръстовището бул. "Менделев" - бул. "Санкт Петербург"

Тъй като се наблюдава повтарящ се модел на трафика са обособени два набора от данни, съответстващи на работни и на почивни дни. Всеки набор от данни е групиран по часове. Средната стойност на всяка група е вход за пътна лента от симулацията.

3.1.3 Изследвани параметри

За целите на изследването са избрани 3 алгоритъма за маршрутизиране и 4 car-following модела и техните конфигурационни параметри. Изследвани са всички три алгоритъма за маршрутизиране (таблица 6), които са налични в SUMO и всички четири car-following модела (таблица 7), които имат стабилна реализация и не повече от 6 входни параметъра. Наборът от изследвани параметри (таблица 8) е избран така, че стойностите по подразбиране да принадлежат към набора и да не са екстремуми.

3 Моделиране на шофьорските навици в симулация на пътния трафик

Таблица 6: Рутиращи алгоритми

Алгоритъм	Описание
Dijkstra	Най-простият и най-бавният
Astar	Ограничава времето на пътуването и често е по-бърз от Dijkstra
Contraction Hierarchies	Много ефективен при голям брой заявки

Таблица 7: Car-following модели

Модел	Бележки	Параметри
Krauss	Класическият Krauss модел	minGap, tau
Модифициран Krauss	Разширен модел на Krauss - използва 6 вместо 2 параметъра	minGap, accel, decel, emergencyDecel, sigma, tau
Wagner	Модел на Peter Wagner, базиран на точки на активност	minGap, tau
Wiedemann	В процес на разработка	minGap, tau, security, estimation

Таблица 8: Параметри

Параметър	Бележки	Стойност по подразбиране	Изследвани стойности	Мерна единица
minGap	Минимално разстояние в спрявло състояние	2.5	1, 1.5, 2, 2.5, 3	m
accel	Възможност за ускорение	2.6	2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9	m/s ²
decel	Възможност за намаляване на скоростта	4.5	4, 4.3, 4.5, 4.8, 5, 5.3, 15.5, 5.8	m/s ²
emergencyDecel	Възможност за намаляване на скоростта в случай на спешност	-	decel+1	m/s ²

3 Моделиране на шофьорските навици в симулация на пътния трафик

Таблица 8: Параметри

Параметър	Бележки	Стойност по подразбиране	Изследвани стойности	Мерна единица
sigma	Несъвършенство при шофиране	0.5	0,0.25,0.5,0.75,1	-
tau	Минимално разстояние движение	-	0.25, 0.5, 0.75, 0.9, 1,1.25	s
security	Склонност шофьорите сигурно шофиране	на - към	1,2,3,4,5	-
estimation	Възможност на шофьорите правилно да оценят ситуацията	-	1,2,3,4,5	-

3.1.4 Програмна реализация

Подготовката на входните данни, стартирането на симулациите и обработката на изходните данни са автоматизирани чрез няколко Python скрипта (налични на <https://github.com/tmecheva/SumoTD>):

ControllerReports.py преобразува общинските отчети в два входни за симулатора файла в CSV (Comma-separated Values формат) – wCFG.csv – за работни дни и hCFG.csv – за почивни дни, като изчислява средните стойности на натоварванията (в брой преминали автомобили за всяка пътна лента) за всеки час от денонощието.

CallFlowrouter.py изчислява набор от маршрути на база на данните от детекторите. Скриптът използва допълнителния инструмент flowrouter, като задава различни интервали на изчисление на маршрутите (задават се стойности 10, 20, 30, 40 и 50 минути).

TrafficDemand.py задава car-following модели и техни параметри, чрез допълнителния инструмент duarouter. Генерира се DUAout.xml, който съдържа информацията за трафик натоварването за SUMO симулацията. След изпълнение на симулациите резултата от всяка симулация се запазва в папка, именувана според съответната конфигурация.

CalculateDiscr.py сравнява броя на симулираните превозни средства с входните данни в съответния CSV входен файл и изчислява средното несъответствие за всяка

3 Моделиране на шофьорските навици в симулация на пътния трафик

симулация и генерира два изходни файла - със средните разминавания за всяка симулация (Error.csv) и минималното разминаване за всеки от car-following моделите при съответната конфигурация (MinError.csv).

TestSim.py извършва автоматизирано тестване на коректното изпълнение на симулациите с конкретните конфигурации.

Останалата част от валидирането на кода е извършена ръчно.

3.2 Резултати

Изпълнени са общо 5532 симулации. Използване е стъпка на симулация по подразбиране - 1, тъй като по-прецизна стъпка на симулация би изисквала много повече изчислителни ресурси (136).

Изпълнени са всички 450 възможни симулации с различните конфигурации за *interval* *minGap* и *tau* за моделите Krauss и Wagner за почивни и работни дни в основния и разширен набор данни. Както се вижда от таблици 9 и 10 всички минимални стойности на разминаването се наблюдават при една и съща конфигурация - *interval=10 minGap=1.5 tau=0.25*, както за работни, така и за почивни дни в разширения и в основния набор данни.

За да се намали броя на изпълнените симулации, за моделите Wiedemann и модифициран Krauss са фиксирани стойностите на *interval=10, minGap=1.5 u tau=0.25* и са изчерпани останалите съответно 108 и 375 конфигурации, както за работни, така и за почивни дни в основния и разширен набор данни.

3.2.1 Резултати от основен набор данни

Таблица 9 показва минималните разминавания между симулирани и зададени стойности при основен набор данни.

Таблица 9: Резултати - основен набор данни

Car-following модел	Набор данни	Рутирац алгоритъм	Общ брой симулации	Брой изпълнени симулации	Конфигурация	Минимално разминаване, %
Krauss	Работни дни	Dijkstra	150	150	interval=10 minGap=1.5 tau=0.25	4.113

3 Моделиране на шофьорските навици в симулация на пътния трафик

Таблица 9: Резултати - основен набор данни

Car-following модел	Набор данни	Рутирац алгоритъм	Общ брой симулации	Брой изпълнени симулации	Конфигурация	Минимално разминаване, %
		A-star	150	150	interval=10 minGap=1.5 tau=0.25	4.113
		Contraction hierarchies	150	150	interval=10 minGap=1.5 tau=0.25	4.113
		Dijkstra	150	150	interval=10 minGap=1.5 tau=0.25	4.231
Wagner	Работни дни	A-star	150	150	interval=10 minGap=1.5 tau=0.25	4.231
		Contraction hierarchies	150	150	interval=10 minGap=1.5 tau=0.25	4.231
		Dijkstra	5400	36	security=1 estim=1	3.851
Wiedemann	Работни дни	A-star	5400	36	security=1 estim=1	3.851
		Contraction hierarchies	5400	36	security=1 estim=1	3.851
		Dijkstra	18750	125	accel=2.5 decc=4.3 sigma=0	4.385
Модифициран Краусс	Работни дни	A-star	18750	125	accel=2.5 decc=4.3 sigma=0	4.385

3 Моделиране на шофьорските навици в симулация на пътния трафик

Таблица 9: Резултати - основен набор данни

Car-following модел	Набор данни	Рутирац алгоритъм	Общ брой симулации	Брой изпълнени симулации	Конфигурация	Минимално разминаване, %
		Contraction hierarchies	18750	125	accel=2.5 decc=4.3 sigma=0	4.385
Krauss	Почивни дни	Dijkstra	150	150	interval=10 minGap=1.5 tau=0.25	4.525
		A-star	150	150	interval=10 minGap=1.5 tau=0.25	4.525
		Contraction hierarchies	150	150	interval=10 minGap=1.5 tau=0.25	4.525
Wagner	Почивни дни	Dijkstra	150	150	interval=10 minGap=1.5 tau=0.25	4.770
		A-star	150	150	interval=10 minGap=1.5 tau=0.25	4.770
		Contraction hierarchies	150	150	interval=10 minGap=1.5 tau=0.25	4.770
Wiedemann	Почивни дни	Dijkstra	5400	36	security=1 estim=1	4.550
		A-star	5400	36	security=1 estim=1	4.550
		Contraction hierarchies	5400	36	security=1 estim=1	4.550
Модифициран Krauss	Почивни дни	Dijkstra	18750	125	accel=2.5 decc=4.3 sigma=0	5.070

3 Моделиране на шофьорските навици в симулация на пътния трафик

Таблица 9: Резултати - основен набор данни

Car-following модел	Набор данни	Рутирац алгоритъм	Общ брой симулации	Брой изпълнени симулации	Конфигурация	Минимално разминаване, %
		A-star	18750	125	accel=2.5 decc=4.3 sigma=0	5.070
		Contraction hierarchies	18750	125	accel=2.5 decc=4.3 sigma=0	5.070

Както се вижда от таблицата при основния набор минималното разминаване за всеки от car-following моделите не зависи от рутиращия алгоритъм и се наблюдава при една и съща конфигурация както за работни, така и за почивни дни.

В работни дни най-добри резултати показва Wiedemann car-following модела, а в почивни дни - Krauss. Wiedemann car-following модела показва много добри резултати и в набора данни за почивни дни, близки до тези на Krauss.

3.2.2 Резултати от разширен набор данни

Таблица 10 показва минималните разминавания между симулирани и зададени стойности при разширен набор данни.

Таблица 10: Резултати - разширен набор данни

Car-following модел	Набор данни	Рутирац алгоритъм	Общ брой симулации	Брой симулации	Конфигурация	Минимално разминаване, %
Krauss	Работни дни	Dijkstra	150	150	interval=10 minGap=1.5 tau=0.25	5.824

3 Моделиране на шофьорските навици в симулация на пътния трафик

Таблица 10: Резултати - разширен набор данни

Car-following модел	Набор данни	Рутирац алгоритъм	Общ брой симулации	Брой симулации	Конфигурация	Минимално разминаване, %
		A-star	150	150	interval=10 minGap=1.5 tau=0.25	5.848
		Contraction hierarchies	150	150	interval=10 minGap=1.5 tau=0.25	5.796
Wagner	Работни дни	Dijkstra	150	150	interval=10 minGap=1.5 tau=0.25	6.305
		A-star	150	150	interval=10 minGap=1.5 tau=0.25	6.360
		Contraction hierarchies	150	150	interval=10 minGap=1.5 tau=0.25	6.312
Wiedemann	Работни дни	Dijkstra	5400	36	security=1 estim=1	4.413
		A-star	5400	36	security=1 estim=1	4.833
		Contraction hierarchies	5400	36	security=1 estim=1	4.316
Модифициран Краусс	Работни дни	Dijkstra	18750	125	accel=2.5 decc=4 sigma=0	6.084
		A-star	18750	125	accel=2.5 decc=4 sigma=0	6.072

3 Моделиране на шофьорските навици в симулация на пътния трафик

Таблица 10: Резултати - разширен набор данни

Car-following модел	Набор данни	Рутирац алгоритъм	Общ брой симулации	Брой симулации	Конфигурация	Минимално разминаване, %
		Contraction hierarchies	18750	125	accel=2.5 decc=4.3 sigma=0	5.781
Krauss	Почивни дни	Dijkstra	150	150	interval=10 minGap=1.5 tau=0.25	8.063
		A-star	150	150	interval=10 minGap=1.5 tau=0.25	7.939
		Contraction hierarchies	150	150	interval=10 minGap=1.5 tau=0.25	8.052
Wagner	Почивни дни	Dijkstra	150	150	interval=10 minGap=1.5 tau=0.25	9.648
		A-star	150	150	interval=10 minGap=1.5 tau=0.25	9.807
		Contraction hierarchies	150	150	interval=10 minGap=1.5 tau=0.25	9.880
Wiedemann	Почивни дни	Dijkstra	5400	36	security=1 estim=1	4.671
		A-star	5400	36	security=1 estim=1	4.643
		Contraction hierarchies	5400	36	security=1 estim=1	4.470
Модифициран Krauss	Почивни дни	Dijkstra	18750	125	accel=2.5 decc=4.3 sigma=0	6.154

3 Моделиране на шофьорските навици в симулация на пътния трафик

Таблица 10: Резултати - разширен набор данни

Car-following модел	Набор данни	Рутирац алгоритъм	Общ брой симулации	Брой симулации	Конфигурация	Минимално разминаване, %
		A-star	18750	125	accel=2.5 decc=4.3 sigma=0	6.150
		Contraction hierarchies	18750	125	accel=2.5 decc=4.3 sigma=0	6.155

Както се вижда от таблицата при добавянето на данните от февруари се наблюдава повишаване на разминаването между симулираните и зададените стойности. Въпреки това конфигурациите, при които се наблюдават най-малките разминавания са същите, както при основния набор данни. Изключение прави само модифицирания Krauss car-following модел, където в работни дни при Dijkstra и A-star рутирац алгоритъм, минималното разминаване се наблюдава при decc=4, вместо при 4.3.

За разлика от основния набор данни, при разширения, между минималните разминавания при различните рутиращи алгоритми се наблюдават малки отклонения. В работни дни при Krauss, Wiedemann и модифициран Krauss най-добри резултати дава Contraction hierarchies, а при Wagner - Dijkstra. В почивни дни при Krauss и модифициран Krauss - A-star, при Wagner - Dijkstra, а при Wiedemann - Contraction hierarchies.

Най-добри резултати при разширения набор данни показва Wiedemann car-following модела, както за работни, така и за почивни дни.

3.3 Изводи

Предложена е методология за моделиране на шофьорските навици чрез настройване на симулатор за пътен трафик на базата на реални данни за броя преминали автомобили през дадена пътна лента. Реализацията на методологията изследва различни стойности на car-following модела, алгоритъма за маршрутизиране и техните параметри и изчислява разликата между броя зададени и броя симулирани

3 Моделиране на шофьорските навици в симулация на пътния трафик

автомобили и прави оценка за приложимостта на конфигурацията.

При разширяване на набора от данни се наблюдава увеличаване на несъответствието между симулираните и зададени стойности. Вероятно причината за тези резултати е, че поведението на шофьорите се променя с времето и смесване на данни от различни периоди увеличава сумарната грешка от измерването.

Изпълнените симулации показват, че рутирацият алгоритъм слабо влияе или не влияе на несъответствието между симулирани и задени стойности, ето защо за конфигурацията, отразяваща маниера на шофиране в град Пловдив е избран рутирация алгоритъм по подразбиране Dijkstra.

При промяна на стъпката на рутиране, car-following модела и допълнителните конфигурационни параметри се наблюдават разлики в разминаването между симулирани и зададени стойности при различните конфигурации. В основния набор данни най-добри резултати за работни дни показва Wiedemann car-following модела, а за почивни дни - Krauss. В разширения набор данни най-добри резултати както за работни, така и за почивни дни показва Wiedemann car-following модела. Минималните разминавания при всички car-following модели се наблюдават при едни и същи конфигурации на допълнителните параметри на car-following модела и една и съща стъпка на рутиране.

На база на резултатите от изпълнените в тази глава симулации може да се заключи, че конфигурацията Wiedemann car-following модел с параметри $\text{min-Gap}=1.5$ $\text{tau}=0.25$ $\text{security}=1$ $\text{estimation}=1$ и маршрутизиращ алгоритъм = Dijkstra, $\text{interval}=10$ отразява маниера на шофиране в град Пловдив.

Част от представените в тази глава резултати са публикувани в P3, P4 и P5 6.

4 Математическо моделиране на пътни мрежи

За изследване на пропускателната способност на пътни мрежа се предлага мрежово смятане (Network Calculus - NC). NC е математически инструмент, прилаган често в анализа на компютърните мрежи за изследване на най-лошия възможен сценарий. Възможно е NC да се приложи в промишлеността, в управлението на проекти, както и в транспортните мрежи. Мрежовото смятане се основава на теория на системите, като се прилага Min-Plus алгебра - събирането се заменя в изчисляване на минимум, а умножението - в събиране (82; 163).

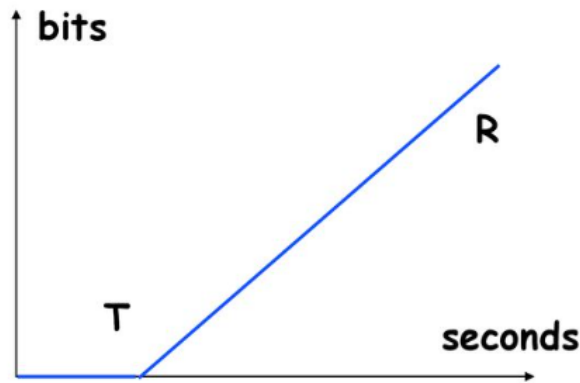
4.1 Основни понятия в Network Calculus

Една от най-често използваните операции в двете теории е конволюция. В класическата теория на системите, конволюцията на входния сигнал с импулсната характеристика дава изхода на системата. Също импулсната характеристика на съставни системи може да се намери като конволюция на импулсните характеристики на съставящите я подсистеми. В мрежовото смятане, аналогично се дефинира min-plus конволюция (уравнение 1) (82; 163).

$$z(t) = (x \otimes y)(t) = \inf\{x(s) + y(t - s)\} \quad (1)$$

Други основни понятия в Network Calculus са виртуално закъснение, запас, крива на пристигане - R (описва входящия поток), крива на напускане - R^* (описва изходящия поток) и крива на обслужване β (описва механизъм за управление на трафика). Кривите на пристигане, обслужване и напускане са кумулативни, т.е. ненамаляващи във времето функции.

Едни от най-често използваните криви на обслужване са RSPEC (rate-latency) (фигура 13). Основните параметри са R – скорост на преминаване и S – забавяне (уравнение 2).

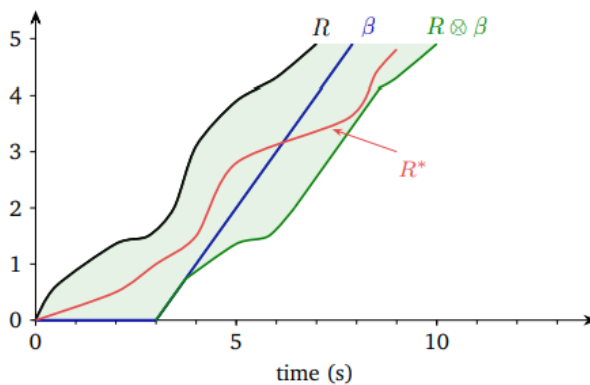


Фигура 13: Rate-latency крива на обслужване (81)

$$\beta(t) = R[t - S] \quad (2)$$

Минималната крива на обслужване, дефинираща долна граница на услугата, отговаря на следното условие: при прилагане на min-plus конволюция на кривата на пристигане с минималната крива на обслужване се получава полуаналитична крива на напускане, която винаги е по-малка или равна на реалната крива на напускане (уравнение 3, фигура 14) (82; 163).

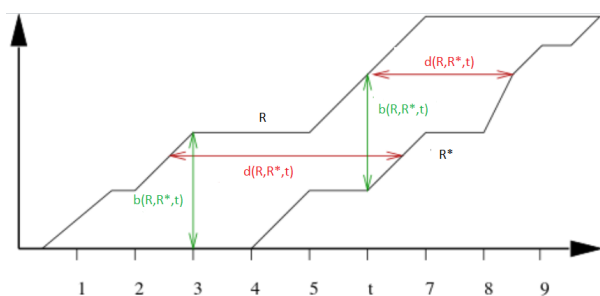
$$R^* \leq (R \otimes \beta)(t) = \inf\{R(s) + \beta(t - s)\} \quad (3)$$



Фигура 14: Минимална крива на обслужване(163)

Други често използвани метрики в мрежовото смятане са виртуалното закъснение и запасът в системата (фигура 15).

Запасът представлява количеството единици (битове, автомобили), които системата съдържа в определен момент от време (Уравнение 4)



Фигура 15: Виртуално закъснение и запас(163)

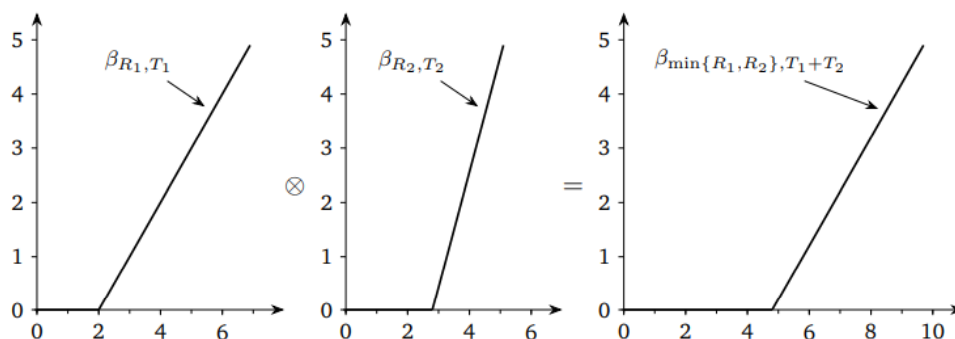
$$b(t) = R(t) - R^*(t) \quad (163) \quad (4)$$

Виртуалното закъснение $d(t)$ съответства на забавянето, което би било изпитано от една единица (бит, автомобил) в момент t , ако системата обслужва единиците в реда на тяхното пристигане (уравнение 5).

$$d(t) = \inf\{d \in \mathbb{R}_+, R^*(t + d) \geq R(t)\} \quad (163) \quad (5)$$

При конкатенация на възли се приема, че кривата на обслужване на интегралния възел е равна на min-plus конволюцията на кривите на обслужване на съставлящите го възли (уравнение 6 фигура 16).

$$\beta_{R_1, T_1} \otimes \beta_{R_2, T_2} = \beta_{\min\{R_1, R_2\}, T_1 + T_2} \quad (163) \quad (6)$$



Фигура 16: Конкатенация на възли
(163)

4.2 Експеримент

За да се докаже приложимостта на Network Calculus за анализа на пътния трафик са изследвани симулационно пътни мрежи с различна гранулярност. Използвани са два участъка от пътната мрежа в централната част на град Пловдив и са разделени на съставни части.

Съпоставени са Network Calculus метрики при синтетични и реални натоварвания. Изследвани са минимални криви на обслужване на база на зададени входни и изходни криви, максималното виртуално закъснение и максималния запас и криви на обслужване на съставни участъци на база на конкатенация на пътни мрежи.

4.2.1 Пътни мрежи

Изследвани са два участъка от пътната мрежа в град Пловдив - първият участък е изследваната в глава 2 пътна мрежа (съдържа 8 големи кръстовища и е разделен на 2 и на 4 части - фигура 17); вторият участък съдържа 4 кръстовища (разделен е на 2, на 3, и на 6 части, като най-малките съставни части са единично кръстовище и прав участък от булевард - фигура 18).

Руски - Освобождение; Гладстон, Княгиня Мария Луиза - Христо Ботев, Санкт Петербург

Първият участък включва частта от пътната мрежа между булевард „Руски“ (на изток), булевард „Освобождение“ (на запад), улица „Гладстон“ и булевард „Княгиня Мария Луиза“ (на север) и булевард „Христо Ботев“ и булевард „Санкт Петербург“ (на юг). Използвано е съкращението - **Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. (фигура 17а)**.

Описаната пътна мрежа е разделена на 2 части:

- между булевард „Руски“ (на изток), булевард „Източен“ (на запад), улица „Гладстон“ (на север) и „Булевард „Христо Ботев“ (на юг), като бул. „Източен“ служи за граница, но не е включен в този участък (**фигура 17b - Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. ляво**);
- между булевард „Източен“ (на изток), булевард „Освобождение“ (на запад), булевард „Княгиня Мария Луиза“ (на север) и булевард „Санкт Петербург“ (на юг) (**фигура 17c - Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. дясно**).

Всеки от описаните участъци е разделен на 2 части:

- участъкът от Фигура 17b е разделен хоризонтално на 2, като едната част включва кръстовището на булевард „Руски“ и улица „Гладстон“ и подлеза на централна поща (**фигура 17d - Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. горе ляво**), а втората част включва кръстовището на „Централна гара“ и кръстовището



(a) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б.



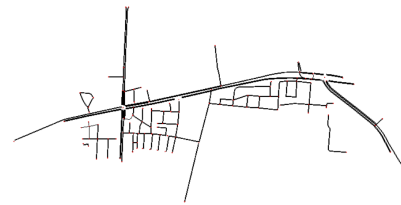
(b) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. ляво



(c) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. дясно



(d) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. горе ляво



(e) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. горе дясно



(f) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. долу ляво



(g) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. долу дясно

Фигура 17: Пътна мрежа между бул.„Руски” - бул.„Освобождение” - ул.„Гладстон” и бул. „Кн. Мария Луиза” бул. „Христо Ботев“ и бул. „Санкт Петербург“.

на булевард „Христо Ботев“ и булевард „Найчо Цанов“ (фигура 17f - Р.-Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. долу ляво);

- участъкът от Фигура 17с е разделен хоризонтално на 2, като едната част включва кръстовището на булевард „Княгиня Мария Луиза” и булевард „Източен” и кръстовището на булевард „Княгиня Мария Луиза” и булевард „Освобождение” (фигура 17е Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. горе дясно) , а втората част включва кръстовището на булевард „Санкт Петербург” и булевард „Освобождение” и кръстовището на булевард „Христо Ботев“ и булевард „Източен“ (фигура 17g - Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. долу дясно).

Източен - Христо Ботев; Менделеев - Санкт Петербург; Санкт Петербург - Лев Толстой; кръговото на Метро

Вторият участък включва кръстовищата на булевард “Източен” - булевард “Христо Ботев”; булевард ”Менделеев” - булевард ”Санкт Петербург”; булевард ” Санкт Петербург” - улица ”Лев Толстой”; отсечката на бул.”Санкт Петербург” от бул. “Менделеев” до ул. “Лев Толстой”; кръговото кръстовище на ” Метро”; отсечката на бул.”Санкт Петербург” от ул. “Лев Толстой” до кръговото кръстовище на “Метро” (фигура 18а). Използвано е съкращението **4 кръстовища**.

Участъкът от Фигура 18а - 4 кръстовища е разделен на 2 части:

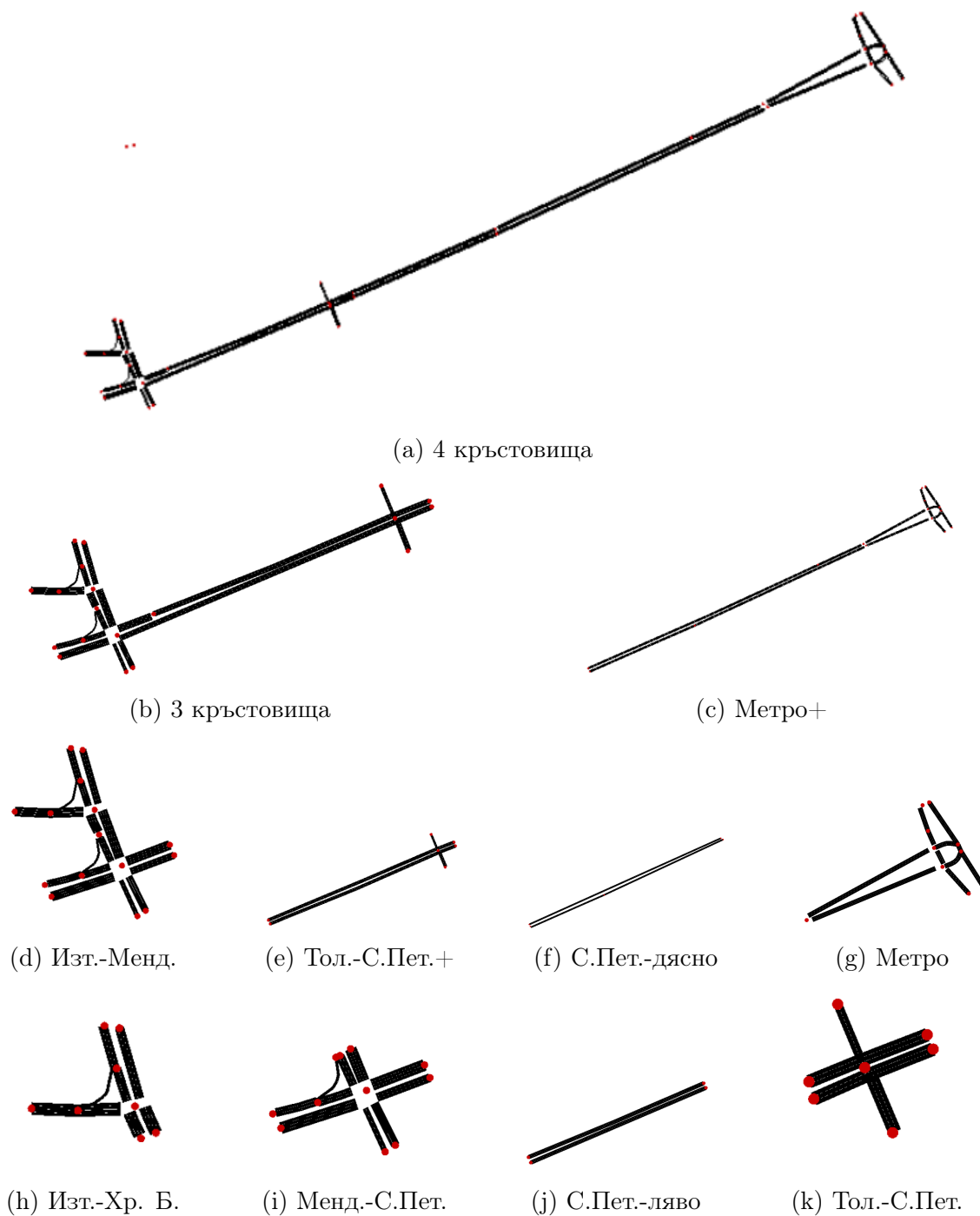
- Кръстовищата на булевард “Източен” - булевард “Христо Ботев”; булевард ”Менделеев” - булевард ”Санкт Петербург”; булевард ” Санкт Петербург” - улица ”Лев Толстой”; отсечката на бул.”Санкт Петербург” от бул. “Менделеев” до ул. “Лев Толстой” (фигура 18b - 3 кръстовища);
- отсечката на бул.”Санкт Петербург” от ул. “Лев Толстой” до кръговото кръстовище на “Метро” и кръговото кръстовище на ” Метро” (фигура 18с - Метро+).

Всеки от описаните участъци е разделен на по 2 части. Участъкът от Фигура 18b е разделен на:

- Кръстовищата на булевард “Източен” и булевард “Христо Ботев”; булевард ”Менделеев” - булевард ”Санкт Петербург” (фигура 18d - Изт.-Менд.);
- Кръстовището на булевард ”Санкт Петербург” и улица ”Лев Толстой”; отсечката на бул.”Санкт Петербург” от бул. “Менделеев” до ул. “Лев Толстой” (фигура 18е - Тол.-С.Пет.+).

Участъкът от Фигура 18с е разделен на:

- Отсечката на бул.”Санкт Петербург” от ул. “Лев Толстой” до кръговото кръстовище на “Метро” (фигура 18f - С.Пет.-дясно);



Фигура 18: кръстовищата на бул. "Източен" - бул. "Христо Ботев"; бул. "Менделеев" - бул. "Санкт Петербург"; бул. "Санкт Петербург" - ул. "Лев Толстой"; кръговото кръстовище на "Метро".

- Кръговото кръстовище на ” Метро” (фигура 18g - Метро)

Участъкът от Фигура 18d е разделен на:

- Кръстовището на булевард ”Източен” и булевард ”Христо Ботев” (фигура 18h - Изт.-Хр. Б.);
- Кръстовището на булевард ”Менделеев” - булевард ”Санкт Петербург” (фигура 18i - Менд.-С.Пет.)

Участъкът от Фигура 18e е разделен на:

- отсечката на бул.”Санкт Петербург” от бул. ”Менделеев” до ул. ”Лев Толстой” (фигура 18j - С. Пет.-ляво);
- Кръстовището на булевард ” Санкт Петербург” и улица ”Лев Толстой” (фигура 18k - Тол.-С.Пет.)

4.2.2 Програмна реализация

Експериментът е реализиран чрез симулатора за градска мобилност SUMO и Python скриптове (<https://github.com/tmecheva/MinPlus>).

За да бъдат получени резултатите от тази глава е необходимо да се изпълни скрипта `ExamineNC.py`. Всички изходни данни ще бъдат генерирани в `Min-Plus/NCOut`.

За генериране на синтетичните натоварвания на всички пътни мрежи и стартиране на симулациите се използва класът `TrafficDemand` (`TrafficDemand.py`). Генерирани са натоварвания чрез опцията `period` на допълнителния инструмент към SUMO `RandomTrips.py`. Изпълнени са симулации с натоварвания, съответстващи на период (1, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2 и 0.1). Използван е методът `ExamineDefaultTLS()`, който работи със реалните светофарни цикли, съответстващи на документацията на община Пловдив. Резултатите от симулациите се генерират в `Min-Plus/NCOut/Result`.

За генериране на реалните натоварвания на база на отчетите на община Пловдив е използван класът `RealSim` (`RealSim.py`). Използван е методът `ExecuteSimulations`, който генерира данни от общинските отчети и стартира симулациите. Натоварването на пътните потоци е генерирано чрез допълнителния инструмент към SUMO `flowRouter.py`. Резултатите от симулациите ще бъдат генерирани в `Min-Plus/NCOut/CR/Result`.

За генериране на всички Network Calculus метрики се използват класовете `RealSimCurves` и `MPCurves`, и двата класа наследяват базовия - `Curves`. Виртуалното закъснение, запасът, входните, изходните и обслужващите криви се генерират чрез метода `Curves()` в `Min-Plus/NCOut/CR/Curves` за реалните данни и в `Min-`

Plus/NCOut/Curves - за синтетичните. Обобщени данни - максимално виртуално закъснение и запас, както и обобщени отчети за входни, изходни и обслужващи криви се генерират чрез методите RealSimStatistic() и NCStatistic() в Min-Plus/NCOut/CR/Curves/statistic и Min-Plus/NCOut/Curves/statistic.

За намиране на интегралните криви на обслужване е използван метода IntegralSC. За намиране на Network Calculus метриците на интегралните криви отново е използван метода NCStatistic(). Резултатът се генерира в Min-Plus/NCOut/Curves/SCconcat.

Реализирана е функцията MinPlusConvolve (MinPlus.py), която дава резултата от min-plus конволюцията на зададени числови редици. Съществуващите софтуерни инструменти за намиране на min-plus конволюция работят с линейни функции (35; 118). Реализираната функция използва оригиналните криви на пристигане и напускане от симулацията и така се получава по-точен резултат.

Валидацията на програмния код е извършена ръчно, чрез съпоставяне на графичните резултати с резултатите от онлайн NC калкулатора NCPlayground (118).

4.3 Резултати

Анализирани са графични и таблични резултати от симулации за Network Calculus метрики при синтетични натоварвания на мрежите от фигури 18 и 17.

За съпоставка между синтетичните и реални данни са сравнени симулационни резултати при синтетични и реални натоварвания за пътната мрежа Изт.-Менд (Фигура 18d).

4.3.1 Съпоставка между синтетични и реални натоварвания

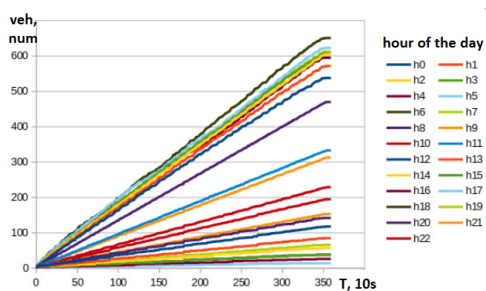
За да се съпоставят синтетичните и реални натоварвания са сравнени входните и изходни криви с реални и синтетични данни за пътната мрежа Изт.-Менд.

Фигура 19 изобразява кривите на пристигане и напускане при реални натоварвания на Изт.-Менд за почивни дни, а фигура 20 - за работни дни.

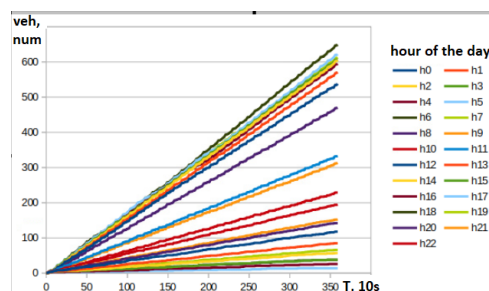
Тъй като мрежовото смятане изследва възможно най-лошия сценарий, за съпоставка на реалните и синтетични натоварвания, са сравнени входните и изходните криви при различни синтетични натоварвания и максималните входни и изходни криви в работни и почивни дни, получени при реални натоварвания (фигура 21)

Както се вижда от фигурите, максималните реални натоварвания за работни и почивни дни са по-малки от синтетичните.

4 Математическо моделиране на пътни мрежи

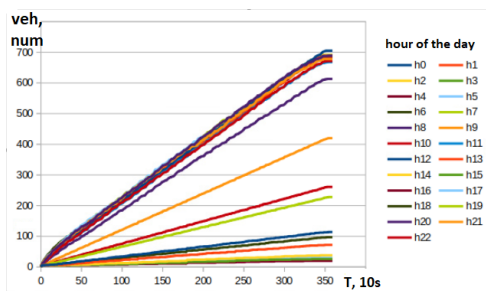


(a) Криви на пристигане

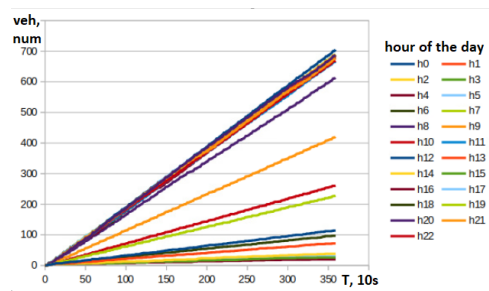


(b) Криви на напускане

Фигура 19: Изт.-Менд - реални натоварвания - почивни дни

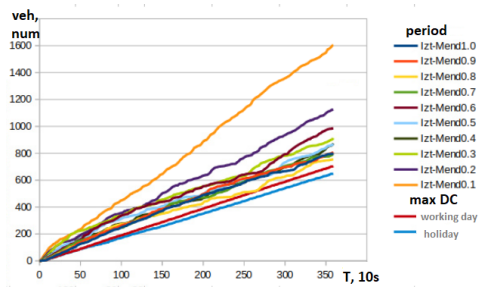


(a) Криви на пристигане

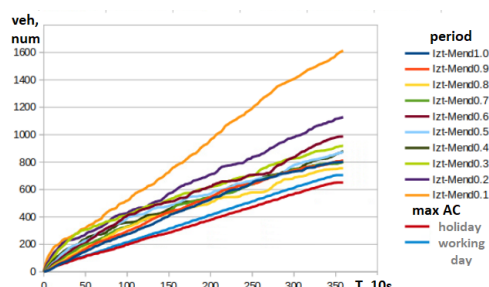


(b) Криви на напускане

Фигура 20: Изт.-Менд - реални натоварвания - работни дни



(a) Криви на пристигане



(b) Криви на напускане

Фигура 21: Съпоставка на реални и синтетични данни - Изт.-Менд

4.3.2 Криви на обслужване на база входни и изходни криви

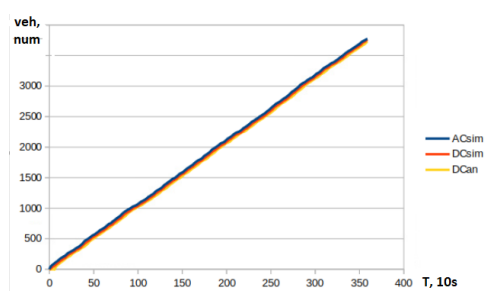
Намерени са криви на обслужване при различни натоварвания на база на входните и изходните криви от симулацията - формула 3. За целта се намират полуаналитични изходни криви чрез min-plus конволюция на входните криви с криви на обслужване от типа RSPEC при максимално допустима скорост 13.8 m/s (50 km/h) и закъснения между 50 и 2500s (Фигура 2). Избира се кривата на обслужване при дадено натоварване на пътната мрежа, която отговаря на най-близката до реалната полуаналитична крива на напускане и е по-малка от нея.

За оценка на приложимостта на метода е изчислено хоризонталното разстояние (виртуалното закъснение) между полуаналитичните и симулационни криви на напускане.

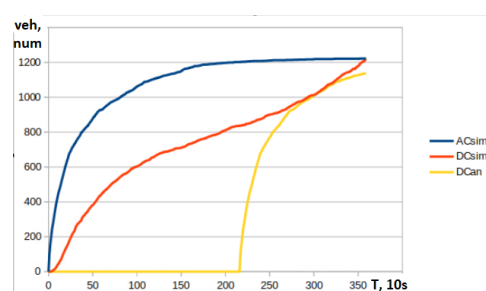
За крива на обслужване на дадена участък се избира минимумът от всички криви на обслужване.

Криви на пристигане, полуаналитични и симулационни криви на напускане

Фигура 22а и фигура 40 от приложение G. представят графично кривите на пристигане и полуаналитичните и симулационни криви на напускане при натоварване с период 0.1 на пътните мрежи на фигура 18, а фигура 22б и фигура 47 от приложение G. - на пътните мрежи на фигура 17.



(а) Изт.-Хр.Б. - период 0.1 18h

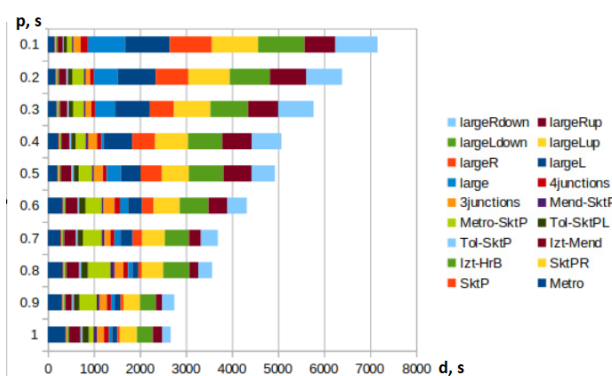


(б) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - период 0.1 17a

Фигура 22: Полуаналитични и симулационни криви на напускане и криви на пристигане

Фигури 44 и 43 от приложение G. представят графично кривите на пристигане и полуаналитичните и симулационни криви на напускане при натоварване с период 1, а фигури 42 и 41 от приложение G. - при натоварване с период 0.3.

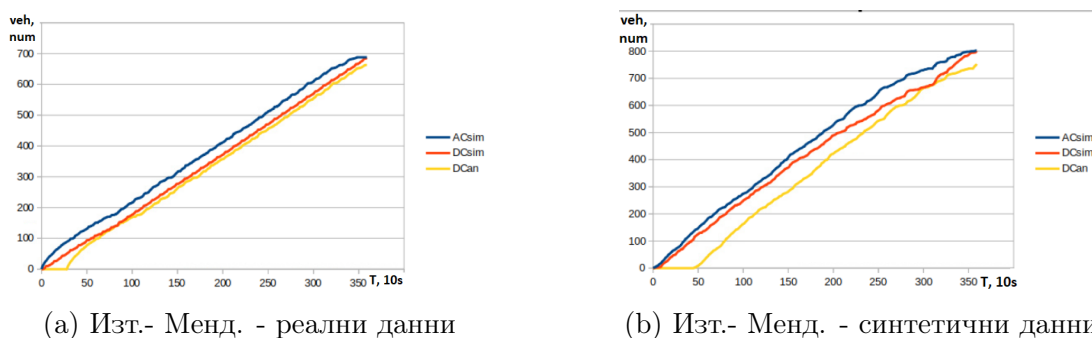
Приложение B. и фигура 23 представят таблично и графично осреднените виртуални закъснения между полуаналитичните и симулационни криви на напускане.



Фигура 23: Средни виртуални закъснения между полуаналитичните и симулационни криви на напускане

Както се вижда от графичните и таблични резултати при малки участъци от пътната мрежа виртуалното закъснение, тоест неточността, между аналитичните и симулационни криви е малко. При по-сложни мрежи неточността нараства. Това проличава най-вече при големи натоварвания.

Фигура 24 съпоставя полуаналитични и симулационни криви на напускане и криви на пристигане за кръстовището на Изт.- Менд. при най-голямото реално натоварване (за 18 ч. в работен ден) и най-малкото синтетично натоварване (период 1).



(а) Изт.- Менд. - реални данни

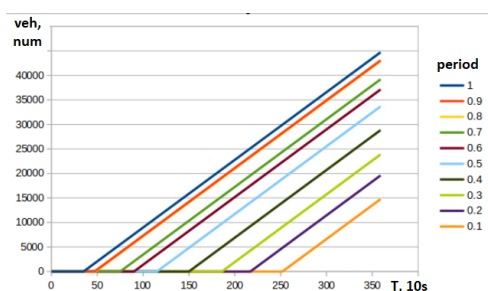
(б) Изт.- Менд. - синтетични данни

Фигура 24: Полуаналитични и симулационни криви на напускане при реални и синтетични натоварвания

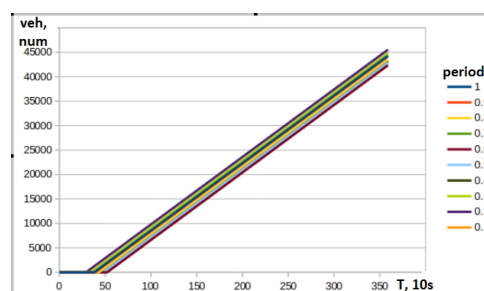
Както се вижда от графиките неточността между полуаналитичната и симулационна крива при реално натоварване е по-малка, отколкото при синтетично. Това се дължи на факта, че синтетичните натоварвания са по-високи - фигура 21

Криви на обслужване при различни натоварвания

Фигура 25 и приложение С. изобразяват криви на обслужване на пътните мрежи от фигури 17 и 18 при различни натоварвания.



(a) P.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б.-ляво 17b

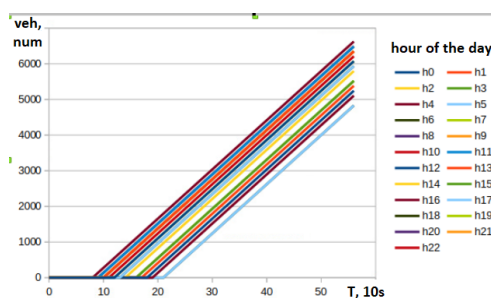


(b) 3 кръстовища 18b

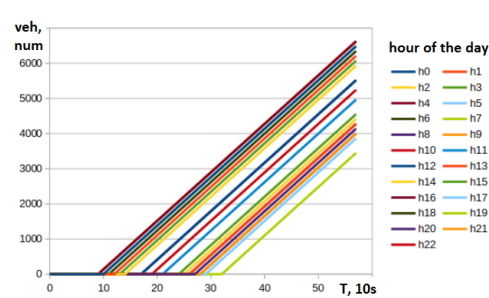
Фигура 25: Криви на обслужване при различни натоварвания

При увеличаване на сложността на мрежата началните отмествания и разликите в началните отмествания при различни натоварвания нарастват.

Фигура 26 изобразява получените криви на обслужване на пътната мрежа Изт.-Менд. Фигура 18d при реални натоварвания.



(a) Почивни дни



(b) Работни дни

Фигура 26: Криви на обслужване Изт.-Менд. - реални данни

В работни дни началните отмествания са по-големи в сравнение с почивни дни, тъй като натоварването е по-голямо.

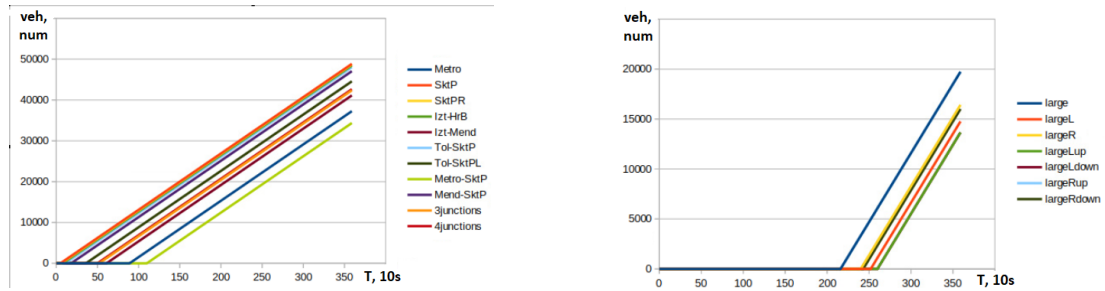
Минимални криви на обслужване

Фигура 27a изобразява намерените минимални криви на обслужване на пътните мрежи от Фигура 17, а фигура 27a - минималните криви на обслужване на пътните мрежи от фигура 18 при синтетични натоварвания.

Началните отмествания при по-сложните пътни мрежи са по-големи.

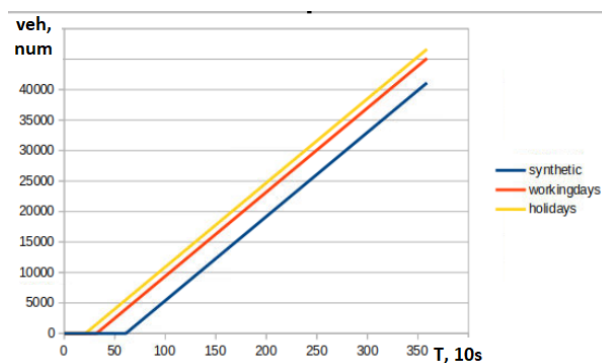
Фигура 28 съпоставя минималните криви на обслужване за кръстовища Изт.-Менд. 18d при синтетични и реални натоварвания.

Поради по-високите синтетични натоварвания, началното отместване при кривата на обслужване при синтетични данни е по-голямо, отколкото при реални.



(a) Минимални криви на обслужване на пътните мрежи от Фигура 18 (b) Минимални криви на обслужване на пътните мрежи от Фигура 17

Фигура 27: Минимални криви на обслужване - синтетични данни

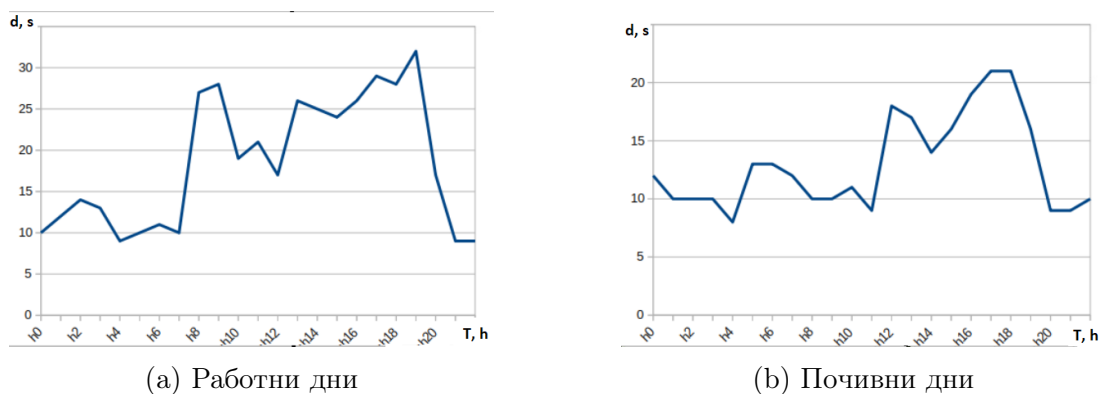


Фигура 28: Синтетични и реални криви на пристигане за Изт.-Менд. 18d

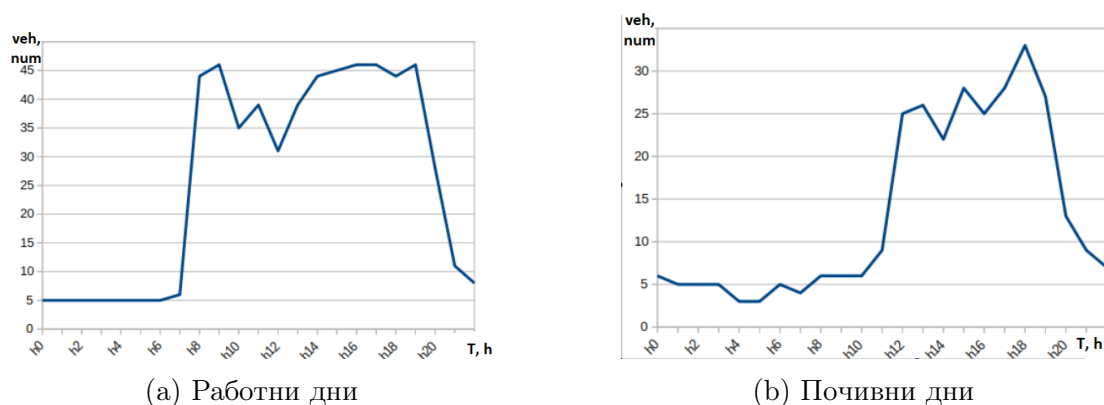
4.3.3 Виртуално закъснение и запас

Виртуалното закъснение и запаса на всеки от възлите са изчислени на база на кривите на пристигане и напускане (Фигура 15, уравнения 4 и 5)

Фигури 29 и 30 изобразяват максималното виртуално закъснение и максималния запас при реални данни за Изт.-Менд. фигура 18d.



Фигура 29: Максимално виртуално закъснение Изт.-Менд. - реално натоварване

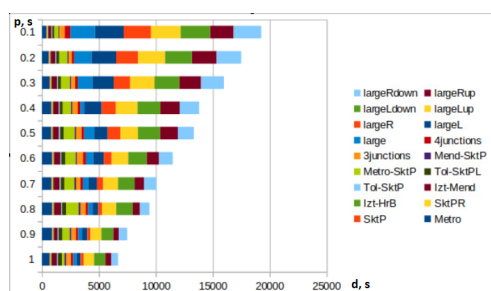


Фигура 30: Максимален запас Изт.-Менд. - реално натоварване

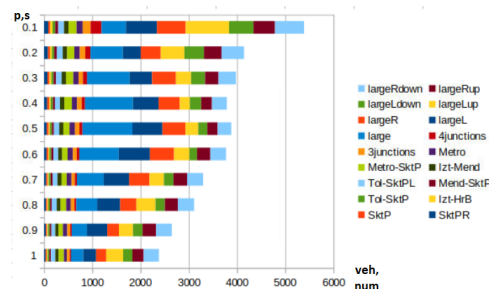
Максималното виртуално закъснение и максималният запас нарастват с нарастване на натоварването - най-високите стойности се наблюдават за пиковите часове - в работни дни - 8 и 18 часа, а в почивни дни след 12 часа стойностите започват да нарастват и най-високи са около 18 часа.

Фигура 31 и приложения Е. и D. представят максималното виртуално закъснение и максималния запас при синтетични натоварвания.

Максималното виртуално закъснение нараства с нарастване на натоварването, при сложни мрежи то е по-голямо. Най-високите стойности на максималния запас при различните мрежи се наблюдават при различни натоварвания.



(a) Максимално виртуално закъснение



(b) Максимален запас

Фигура 31: Максимално виртуално закъснение и максимален запас - синтетични натоварвания

4.3.4 Криви на обслужване при конкатенация на пътни мрежи

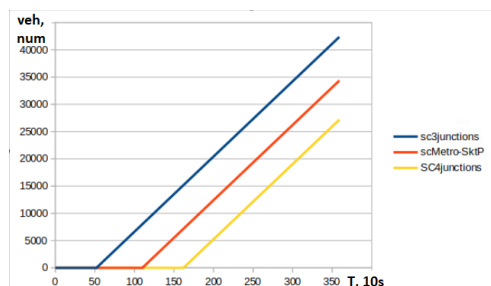
При конкатенация на възли се намират криви на обслужване на съставни части от мрежата чрез min-plus конволюция на кривите на обслужване на съставлящите ги части. Използват се вече установените криви на обслужване от точка 4.3.2.

За да се оцени валидността на получените резултати се сравняват полуаналитичната и симулационна крива на напускане на съставния участък. Полуаналитичната крива на напускане се получава чрез min-plus конволюция на криви на пристигане и интегрални криви на обслужване.

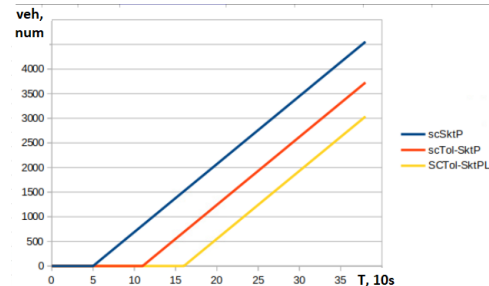
За оценка на приложимостта на метода са анализирани графични резултати и са изчислени виртуалното закъснение и грешката между двете криви.

За грешка се считат случаите, в които полуаналитичната крива за даден момент от време е по-голяма от симулационната. Изчислена е процентната грешка - като разликата между двете величини, отнесена към стойността от симулацията.

Фигура 32 представя криви на обслужване на съставна пътна мрежа, и криви на обслужване на съставлящите я кръстовища.



(a) Зкръстовища \otimes Метро+ = 4кръстовища

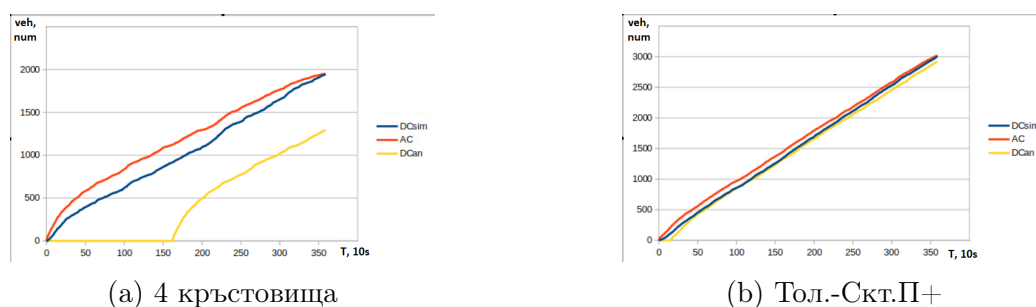


(b) С.Пет.-ляво \otimes Тол.-С.Пет.=Тол.-С.Пет.+

Фигура 32: Интегрални криви на обслужване

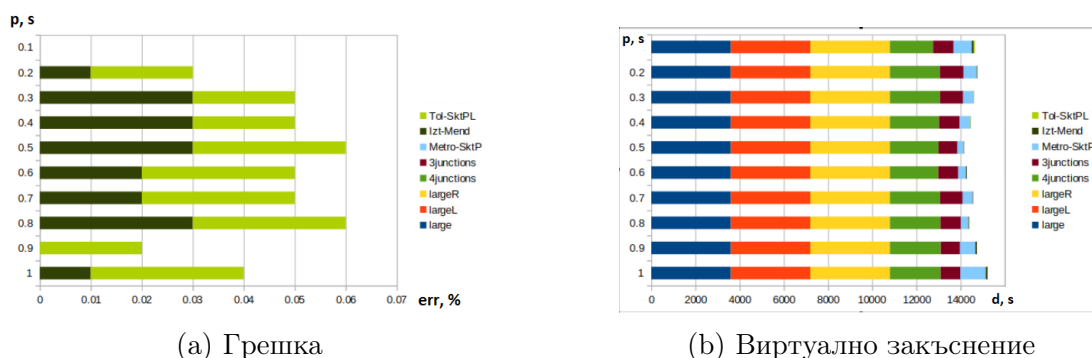
Фигура 33 и приложение G. представят полуаналитични и симулационни криви

на напускане при конкатенация на възли.



Фигура 33: Полуаналитични и симулационни криви на напускане при конкатенация на възли

Фигура 34 и приложение F. представят грешката и виртуалното закъснение между полуаналитичните и симулационни криви на напускане при конкатенация на възли.



Фигура 34: Грешка и виртуално закъснение между полуаналитична и симулационна крива на напускане при конкатенация на пътни мрежи

Както се вижда от графичните и таблични резултати методът е приложим за малки участъци от пътната мрежа - наблюдава се средно виртуално закъснение между 12 и 99 секунди и грешка не по-голяма от 0.03%.

При нарастване на сложността на мрежата се увеличава виртуалното закъснение между полуаналитичните и симулационните криви на напускане, като за мрежите от фигура 17 методът се оказва неприменим. Това вероятно се дължи на голямата неточност при намиране на криви на обслужване на база на входните и изходните криви - точка 4.3.2.

4.4 Изводи

Изследвана е приложимостта на мрежовото смятане за анализа на пътни мрежи, като са разгледани основни метрики на мрежовото смятане, получени от симулационни

резултати на база на реални и синтетични входни данни.

Сравнението между реалните и синтетични данни показва, че изследваните реалните натоварвания са по-малки от синтетичните т.е. NS метриците биха дали достоверен резултат, тъй като Network Calculus анализира най-лошия възможен сценарий.

Анализирани са криви на обслужване от типа RSPEC при максимално допустима скорост 13.8 m/s и закъснения между 50 и 2500s при различни натоварвания на база на входни и изходни криви от симулацията. За оценка на приложимостта на метода са анализирани графичните резултати за полуаналитичните и симулационни изходни криви на напускане, както и хоризонталното разстояние (виртуалното закъснение) между тях. За крива на обслужване на дадена участък се избира минимумът от всички криви на обслужване.

Анализът на графичните и таблични резултати показва, че с нарастване на сложността на мрежата отклонението в началното отместване в кривите на обслужване нараства, както и неточността между симулационните и аналитични резултати. Методът е приложим за малки участъци от пътната мрежа, за големи участъци се наблюдава голяма неточност - методът не е приложим.

Максималното виртуално закъснение и максималния запас се извличат директно от кривите на пристигане и напускане, без да се налагат апроксимации, това ги прави приложими, както за прости, така и за сложни участъци от пътната мрежа.

Намерени са криви на обслужване на съставни участъци от пътната мрежа чрез min-plus конволюция на кривите на обслужване на съставлящите ги части. За оценка на приложимостта на метода са анализирани графични резултати и са изчислени виртуалното закъснение и грешката между двете криви. Анализът показва, че методът е приложим за малки участъци от пътната мрежа. При сложни мрежи неточността е голяма, като причината вероятно е голямата неточност на кривите на обслужване, намерени на база входни и изходни криви.

5 Методи за оптимизиране на пътния трафик

Както беше посочено в точка 1.5 една от важните цели на ИПТС, която има отражение върху безопасността и доброто потребителско изживяване е ефективното управление на пътните потоци.

Глава 5 изследва ефективността на два метода за управление на пътните потоци - оптимизиране на светофарни цикли и автоматизирано шофиране.

5.1 Експеримент

Проведени са симулационни експерименти с пътните мрежи от фигура 17.

За изследване влиянието на оптимизираните светофарни цикли според натоварването е съпоставена пропускателната способност на пътните мрежи със светофарни цикли по подразбиране, с адаптирани и координирани светофарни цикли при различни натоварвания.

За изследване влиянието на безпилотното шофиране е съпоставена пропускателната способност на пътната мрежа при различни съотношения между автоматизирани и конвенционални превозни средства за различни натоварвания на пътната мрежа.

5.1.1 Програмна реализация

Експериментът е реализиран чрез симулатора за градска мобилност SUMO и Python скриптове (<https://github.com/tmecheva/MinPlus>).

Всички симулации са изпълнени с конфигурация `car-following=Wiedemann, min-Gap=1.5, tau=0.25, security=1, estimation=1 routingAlgorithm=Dijkstra, interval=10`, тъй като тя максимално добре отразяват маниера на шофиране в град Пловдив, както беше установен в глава 3.

За да бъдат получени резултатите от тази глава е необходимо да се изпълни скрипта `TrafficOptimization.py`. Изходните данни ще бъдат генерирани в `Min-Plus/AVOut` за автономни автомобили и в `Min-Plus/TLSOut` за оптимизирани светофари.

За генериране на синтетичните натоварвания на всички пътни мрежи и стартиране на симулациите се използва класът `TrafficDemand` (`TrafficDemand.py`). Генерирани са натоварвания чрез с период (1, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2 и 0.1).

За светофарните циклограми по подразбиране е използван методът `ExamineDefaultTLS()`, който работи със реалните светофарни цикли, съответстващи на документацията на община Пловдив.

За координираните светофарни циклограми е използван методът `ExamineCoordinatedTLS()`, който използва допълнителния инструмент към SUMO `tlsCoordinator.py` – за откриване на най-доброто на отместването на светофарните цикли спрямо началото на симулацията (135).

За адаптираните светофарни циклограми е използван методът `ExamineAdaptedTLS()`, който използва допълнителния инструмент към SUMO `tlsCycleAdaptation.py` – за адаптиране на продължителността на светофарните цикли. Този скрипт променя продължителността на зелените фази според формулата на Webster, за да отговори най-добре на дадено трафик натоварване (135).

И трите метода генерират светофарни циклограми и изпълняват SUMO симулациите, резултатите се записват в `Min-Plus/TLSOut/Result`.

За изследване влиянието на безпилотни автомобили се използва метода `ExamineAV()`. Той използва различни съотношения между интегрирания в SUMO CACC `car-following` модел и конфигурацията от глава 3 - (`car-following=Wiedemann`, `minGap=1.5`, `tau=0.25`, `security=1`, `estimation=1` `routingAlgorithm=Dijkstra`, `interval=10`) (138).

За генериране на всички Network Calculus метрики е използван класът `TOCurves`, който наследява базовия - `Curves`. Виртуалното закъснение, запасът, входните и изходните криви се генерират чрез метода `Curves()` в `Min-Plus/AVOut/Curves` и в `Min-Plus/TLSOut/Curves`.

Обобщените данни - максимално виртуално закъснение и максимален запас, както и обобщени отчети за входни и изходни криви се генерират чрез методите `TOStatistic()` в `Min-Plus/AVOut/Curves/statistic` и `Min-Plus/TLSOut/Curves/statistic`.

`TestSim.py` извършва автоматизирано тестване на коректното изпълнение на симулациите с конкретните конфигурации.

Останалата част от валидирането на кода е извършена ръчно.

5.2 Резултати

За оценка са използвани максималното виртуално закъснение и максималният запас, тъй като, както беше установено в глава 4, са приложими за пътни мрежи с различна гранулярност.

5.2.1 Оптимизирани светофарни цикли

Фигури 35 и 36 показват максимално виртуално закъснение и максималният запас с оптимизирани светофарни цикли при различни натоварвания на трафика. Сравнени са стандартните и адаптираните цикли на светофара за пътните мрежи

Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. 17а, Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б.- дясно 17с и Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - дясно долу 17g. За тези мрежи не са генерирани координирани светофарни цикли, тъй като алгоритъмът за координиране има лимит за броя светофари. За пътните мрежи Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - ляво 17b, Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - ляво горе 17d, Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. дясно горе 17е и Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - ляво долу 17f са сравнени стандартните, адаптираните и координираните светофарни цикли.

Най-ниските стойности на максималното виртуално закъснение се наблюдават при адаптираните светофарни цикли, изключение прави само мрежата Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - дясно горе 17е.

Най-ниските стойности на максималния запас се наблюдават отново при адаптираните светофарни цикли, изключение правят само мрежите Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - дясно горе 17е и Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - ляво долу 17f.

5.2.2 Безпилотни превозни средства

Фигури 37 и 38 показват максимално виртуално закъснение и максималният запас с различни съотношения на автономни и конвенционални автомобили при различни натоварвания.

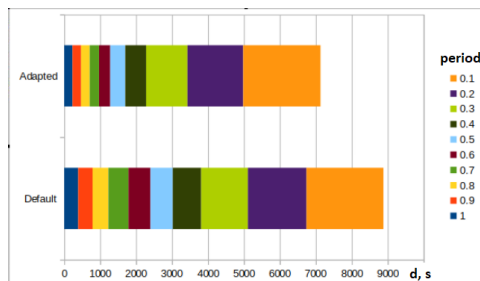
При някои съотношения между автономни и конвенционални автомобили максималното виртуалното закъснение и максималния запас нарастват, като най-високите стойности се наблюдават при различни съотношения в различните мрежи. Въпреки това се наблюдава тенденция за намаляване на максималното виртуалното закъснение и максималния запас при нарастване на дела на автономните автомобили.

5.3 Изводи

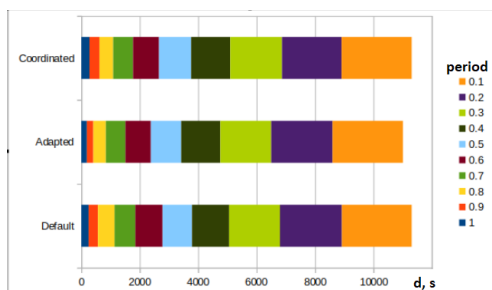
Изследвани са методи за подобряване на пропускателната способност на пътната мрежа чрез симулационен и математически анализ.

Съпоставено е влиянието на безпилотни превозни средства и оптимизирани светофари над пропускателната способност на пътни мрежи с различна гранулярност от централната част на град Пловдив чрез симулатора за градска мобилност SUMO. За оценка на пропускателната способност е използван математическият апарат Network Calculus - съпоставени са максималното виртуално закъснение и максималният запас.

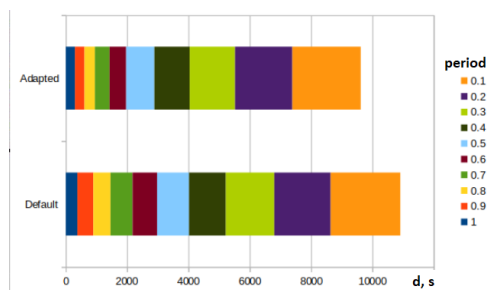
От проведените експерименти може да се заключи, че адаптираните светофари и автономните превозни средства биха повишили пропускателната способност на пътната мрежа.



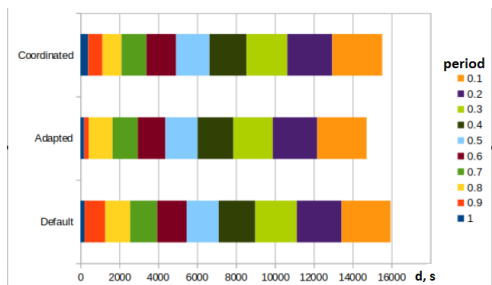
(a) P.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б.



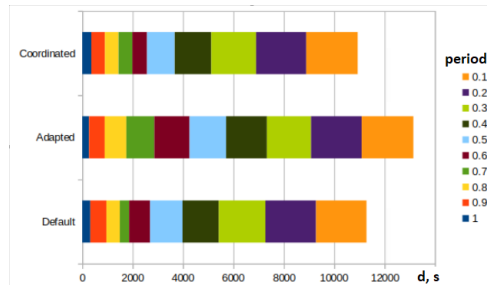
(b) P.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - ляво



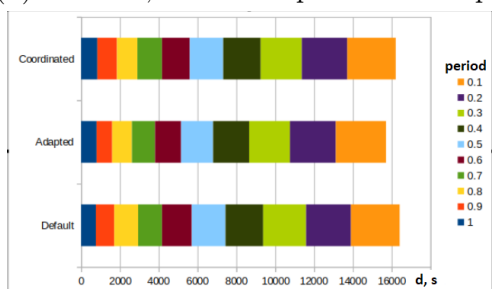
(c) P.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - дясно



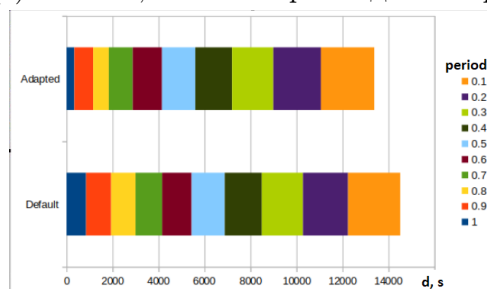
(d) P.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - ляво горе



(e) P.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - дясно горе

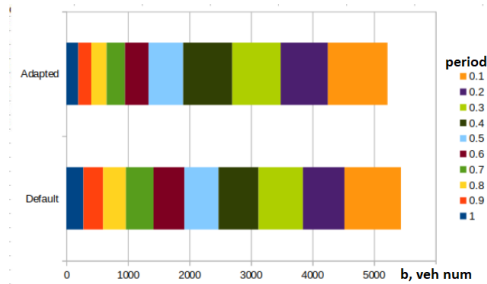


(f) P.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - ляво долу

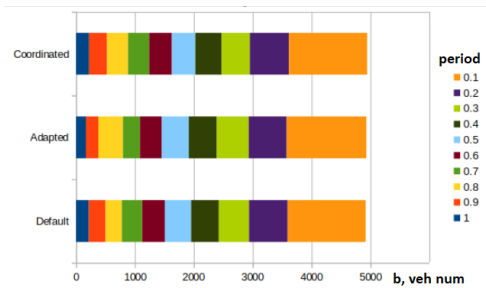


(g) P.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - дясно долу

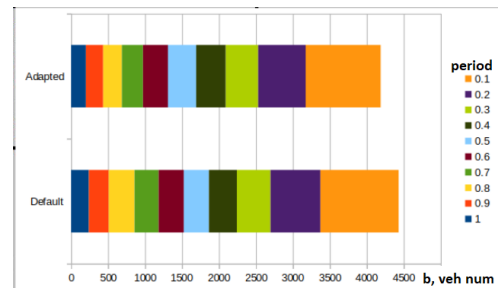
Фигура 35: Максимално виртуално закъснение - оптимизирани светофарни цикли



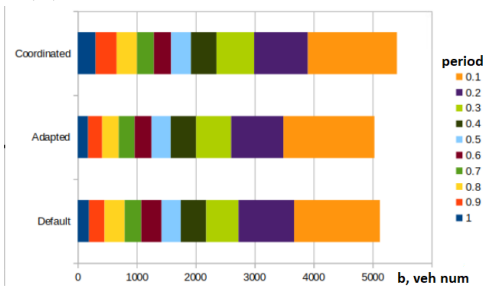
(a) P.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б.



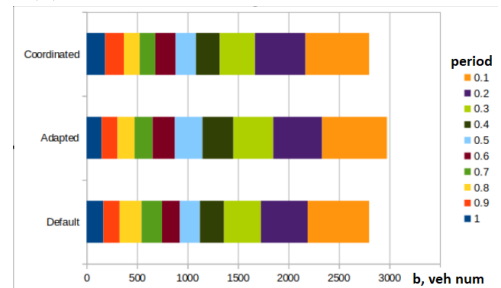
(b) P.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - ляво



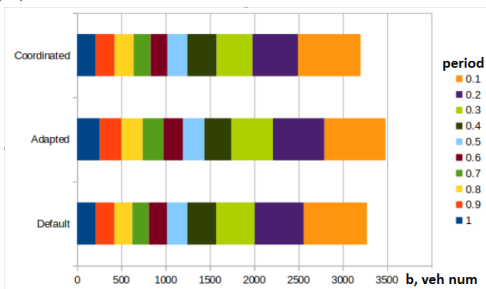
(c) P.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - дясно



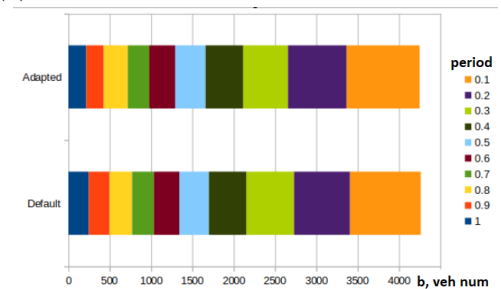
(d) P.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - горе ляво



(e) P.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - горе дясно

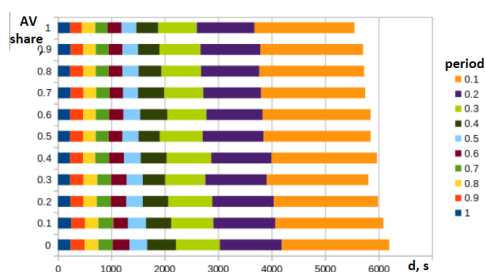


(f) P.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - долу ляво

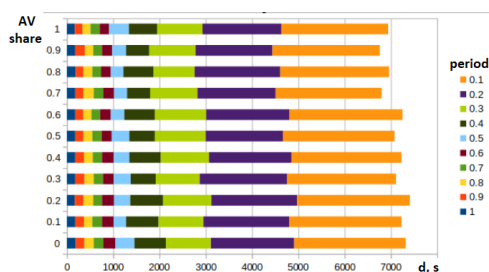


(g) P.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - долу дясно

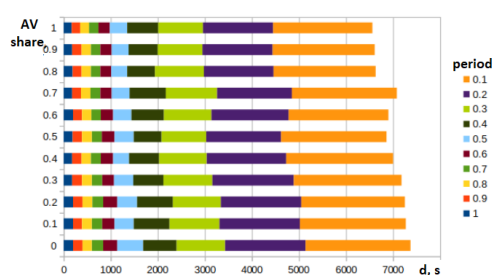
Фигура 36: Максимален запас - оптимизирани светофарни цикли



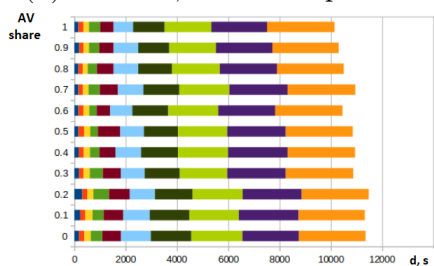
(a) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б.



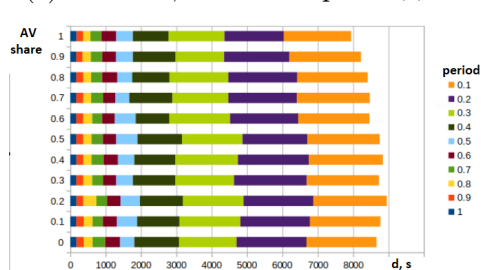
(b) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - ляво



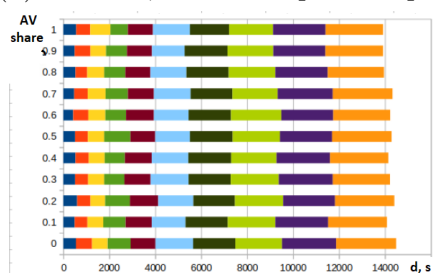
(c) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - дясно



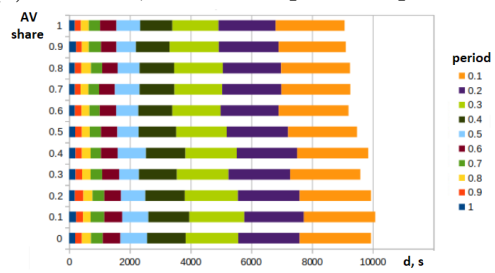
(d) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - горе ляво



(e) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - горе дясно

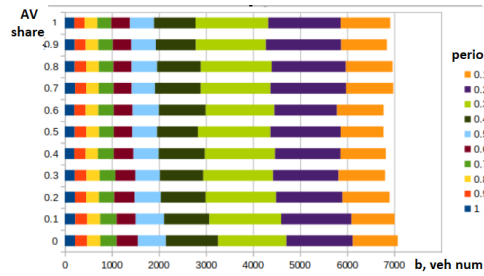


(f) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - долу ляво

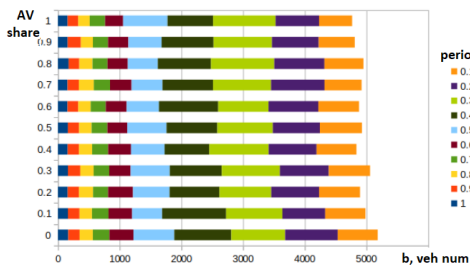


(g) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - долу дясно

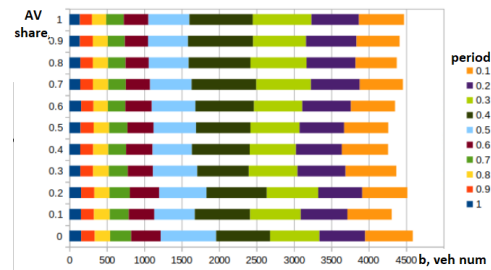
Фигура 37: Максимално виртуално закъснение - автономни автомобили



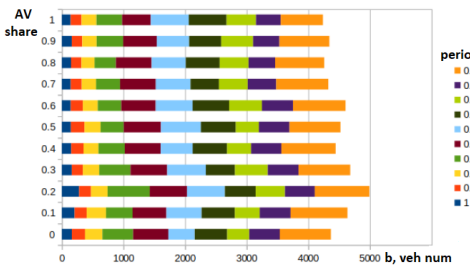
(a) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б.



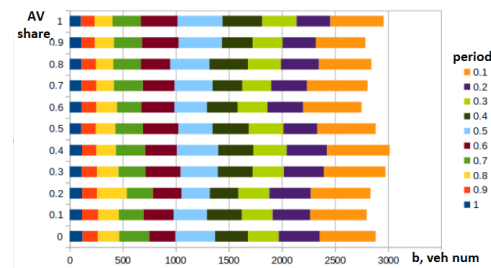
(b) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - ляво



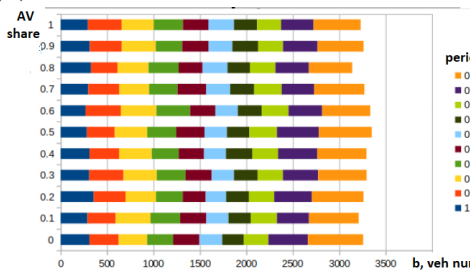
(c) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - дясно



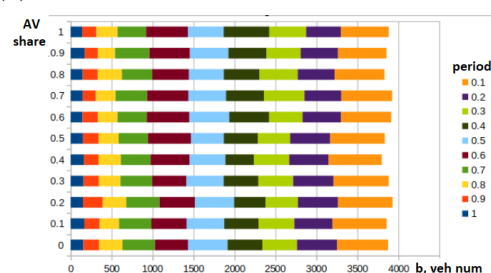
(d) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - горе ляво



(e) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - горе дясно



(f) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - долу ляво



(g) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - долу дясно

Фигура 38: Максимален запас - автономни автомобили

6 Изводи

Нарастващата нужда от мобилност, урбанизацията, развитието на системите за работа в реално време, наложилата се широко четирислойна архитектура на Интернет на нещата и автомобилните ad-hoc мрежи (VANET) очертават характера на интелигентните пътни транспортни системи.

Предложена е четирислойна ИПТС архитектура, базирана на стандартната архитектура на Интернет на нещата, в която е добавен VANET слой.

Свързаността и динамиката в ИПТС се дължат в голяма степен на VANET - вид peer-to-peer мрежи, в които възлите обменят кратки съобщения, които съдържат информация за превозните средства и околната среда. Сливането на тази информация в реално време създава нова перспектива за ситуацията на пътя и е основна предпоставка за възникване на технологични решения и нови стратегии за безопасност и ефективност на пътния трафик.

Възприемания слой в ИПТС, събира данни за хора, превозни средства, пътища и околната среда. Събраните данни достигат до поддържащия слой, чрез жична или безжична комуникация. Данните се обработват във Fog, Cloud или Edge според изискванията за сигурност, бързодействие и работа в реално време. Приложния слой изпраща индикация на потребителите чрез бордовото устройство в автомобила, пътната инфраструктура, мобилно устройство или задвижване на система в автомобила. Основната характеристика на услугите на ИПТС поддържащия слой са свързани и целите на приложенията (безопасност, ефективност, информираност и забавление).

Киберсигурността в ИПТС има пряко отношение към безопасността на участниците в движението и е ключов фактор за надеждното и безпроблемно функциониране на системата. Основните заплахи пред ИПТС киберсигурността са осигуряване на системи, които не са били предназначени да функционират по свързан и споделен начин като вътрешната за автомобила мрежа и сензорни устройства, както и нови технологии, като Fog и VANET, които не са достатъчно зрели. За целите на ИПТС киберсигурността се експериментира с комбиниране на класически и иновативни подходи и често се заимстват техники, приложими в други IoT домейни.

Управлението на ИПТС е свързано с изработване на законодателство и стандарти и проследяване на тяхното изпълнение, както и осигуряване на безпроблемна работа на системата в извънредни ситуации по прозрачен за потребителя начин.

По отношение на цялостната архитектура е необходимо в бъдеще да се наложат устойчиви политики и стандарти за киберсигурност. Масовото прилагане на някои

решения като автоматизираното шофиране зависи от изработването на законова рамка. Друг фактор, който би отложил прилагането на някои иновации, е нуждата от период, в който да се изгради доверие у потребителите.

Математическо и симулационно моделиране са най-често използваните методи при анализ и проектиране на ИПТС.

Важна стъпка при изграждане на симулационен модел е изборът на симулатор и параметри на математическите модели. На база на сравнителен анализ на популярни средства за симулиране на пътен трафик е избран симулатора за градска мобилност SUMO (Simulation of Urban MObility) за целите на експериментите в дисертацията.

Моделирането на шофьорските навици е компонент от симулационния модел, който изисква особено внимание, поради спецификите на маниера на шофиране в различните култури и необходимостта от въвеждането на реални данни за трафика.

Предложена е методология за моделиране на шофьорските навици чрез настройване на симулатор за пътен трафик на базата на реални данни за броя преминали автомобили през пътните ленти. Реализацията на методологията на SUMO и Python изследва различни стойности на car-following модела, алгоритъма за маршрутизиране и техните параметри и избира конфигурация, която моделира маниера на шофиране в град Пловдив.

Възможна насока за бъдеща работа е по-задълбочено изследване на маниера на шофиране в град Пловдив : реализацията на методологията може да се детайлизира с добавяне на модел за смяна на пътната лента (line-change model); да се изследват други car-following модели; или да се приложат техники за машинно обучение за постигане на по-прецизен резултат.

Настоящата реализация на методологията би могла да се използва за практическа съпоставка на работата на SUMO и друг симулатор за пътен трафик, например MovSim.

Изследвана е приложимостта на *математическия апарат Network Calculus* в анализа на пътни мрежи с различна гранулярност. Анализирани са основни метрики на мрежовото смятане, получени от симулационни резултати на база на реални и синтетични входни данни.

Резултатите от анализа показват, че максималното виртуално закъснение и максималния запас са приложими, както за малки, така и за големи участъци от пътната мрежа, докато кривите на обслужване от типа RSPEC, намерени на база входни и изходни криви или конкатенация на възли, са приложими само за малки участъци от пътната мрежа.

В бъдеще експериментът може да бъде разширен с изследване на друг тип обслужващи криви, приложими за сложни участъци от пътната мрежа. Друга

възможност за разширяване на това изследване е да се приложи концепцията за диференцирани услуги (differentiated services).

Навлизането на технологични решения променя конвенционални средства за управление на трафика като светофари и пътни знаци и налага нови технологии като свързани автоматизирани превозни средства и интелигентни светофари.

Изследвано е *влиянieto на безпилотни превозни средства и оптимизирани светофари* над пропускателната способност на пътни мрежи чрез симулация на SUMO и Network Calculus анализ. Съпоставени са максималното виртуално закъснение и максималният запас. Проведените експерименти показват, че адаптираните светофарни цикли и автономните автомобили повишават пропускателната способност на пътната мрежа.

Един от важните показатели за влиянието на пътния трафик над качеството на въздуха са вредните емисии. Интересна насока за бъдещо развитие е съпоставянето на реални данни за качеството на въздуха в града с данни от симулацията. Реализацията на експеримента може да се използва също и за изследване влиянието на електрически автомобили над качеството на въздуха.

Приноси

Изследванията в настоящия дисертационен труд могат да се обобщят в следните научни и научно-приложни резултати:

Научни:

- Предложена е архитектура за интелигентна пътна транспортна система.
- Предложен е аналитичен модел за анализ на транспортни мрежи с различна гранулярност.
- Предложена е методология за намиране на параметри, описващи шофьорските навици на база на реални данни за трафика.

Приложни:

- Реализиран е метод за намиране на параметри, описващи шофьорските навици на базата на реални данни за част от пътната мрежа в централна част на град Пловдив.
- Намерени са параметри, описващи маниера на шофиране в град Пловдив.
- Направена е оценка на ефективността на два метода за оптимизация на пътния трафик чрез математически и симулационен анализ.

Публикации, свързани с дисертационния труд:

- P1 Mecheva, T., & Kakanakov, N. (2020). Cybersecurity in intelligent transportation systems. *Computers*, 9(4), 83.
- P2 Mecheva, T., & Kakanakov, N. (2021, September). Cloud based Intelligent Transportation System architecture. In *2021 International Conference Automatics and Informatics (ICAI)* (pp. 385-388). IEEE.
- P3 Mecheva, T. A., & Kakanakov, N. R. (2021, September). Traffic flow model based on real data. In *2021 XXX International Scientific Conference Electronics (ET)* (pp. 1-5). IEEE.
- P4 Mecheva, T. (2022, September). Outlier detection in traffic data set. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2449, No. 1, p. 040014). AIP Publishing LLC.
- P5 Mecheva, T., Furnadzhiev, R., & Kakanakov, N. (2022). Modelling driver behaviour in road traffic simulation. *Sensors*, 22(24), 9801.

7 Библиография

- [1] ABBASI, M., RAFIEE, M., KHOSRAVI, M. R., JOLFAEI, A., MENON, V. G., AND KOUSHYAR, J. M. An efficient parallel genetic algorithm solution for vehicle routing problem in cloud implementation of the intelligent transportation systems. *Journal of cloud Computing* 9 (2020), 1–14.
- [2] ABOTALEB, M., MINDYKOWSKI, J., DUDOJC, B., AND MASNICKI, R. Digital communication links cooperating with the analog 4-20 ma standard for marine applications. *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iasi. Electrical Engineering, Power Engineering, Electronics Section* 67, 1 (2021), 21–44.
- [3] ACHILLEOS, A. P., KRITIKOS, K., ROSSINI, A., KAPITSAKI, G. M., DOMASCHKA, J., ORZECOWSKI, M., SEYBOLD, D., GRIESINGER, F., NIKOLOV, N., ROMERO, D., ET AL. The cloud application modelling and execution language. *Journal of Cloud computing* 8, 1 (2019), 1–25.
- [4] ADNAN, K., AND AKBAR, R. An analytical study of information extraction from unstructured and multidimensional big data. *Journal of Big Data* 6, 1 (2019), 1–38.
- [5] AFRIN, T., AND YODO, N. A survey of road traffic congestion measures towards a sustainable and resilient transportation system. *Sustainability* 12, 11 (2020).
- [6] AIMSUN. Aimsun Next Tutorials Guide. <https://www.aimsun.com/aimsun-next-video-tutorials/>. [online; accessed 2023-03-08].
- [7] AL-GARAWI, N., DALHAT, M. A., AND AGA, O. Assessing the road traffic crashes among novice female drivers in saudi arabia. *Sustainability* 13, 15 (2021), 8613.
- [8] ALDHAHERI, S., ALGHAZZAWI, D., CHENG, L., ALZHRANI, B., AND ALBARAKATI, A. Deepdca: novel network-based detection of iot attacks using artificial immune system. *Applied Sciences* 10, 6 (2020), 1909.
- [9] AZLAN, N. N. N., AND ROHANI, M. M. Overview of application of traffic simulation model. In *MATEC Web of Conferences* (2018), vol. 150, EDP Sciences, p. 03006.
- [10] BAGUI, S., AND STANLEY, P. Mining frequent itemsets from streaming transaction data using genetic algorithms. *Journal of Big Data* 7, 1 (2020), 1–20.

-
- [11] BAHASHWAN, A. A. O., AND MANICKAM, S. A brief review of messaging protocol standards for internet of things (iot). *Journal of Cyber Security and Mobility* (2019), 1–14.
- [12] BAL, M. An overview of path planning technologies for unmanned aerial vehicles. *Thermal Science* 26, 4 Part A (2022), 2865–2876.
- [13] BANERJEE, A., AND KUMAR, P. K. Review of shortest path algorithm. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing* 11 (2022), 2046–2052.
- [14] BARYKIN, S. Y., KAPUSTINA, I. V., SERGEEV, S. M., AND YADYKIN, V. K. Algorithmic foundations of economic and mathematical modeling of network logistics processes. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity* 6, 4 (2020).
- [15] BELLO-SALAU, H., ONUMANYI, A. J., ABU-MAHFOUZ, A. M., ADEJO, A. O., AND MU’AZU, M. B. New discrete cuckoo search optimization algorithms for effective route discovery in iot-based vehicular ad-hoc networks. *IEEE Access* 8 (2020), 145469–145488.
- [16] BIBRI, S. E., AND KROGSTIE, J. The core enabling technologies of big data analytics and context-aware computing for smart sustainable cities: a review and synthesis. *Journal of Big Data* 4, 1 (2017), 1–50.
- [17] BIKKU, T. Multi-layered deep learning perceptron approach for health risk prediction. *Journal of Big Data* 7, 1 (2020), 1–14.
- [18] BORDER WORKING GROUP TRANSPORTATION PROGRAM. Border Information Flow Architecture. <https://slideplayer.com/slide/7261860/>, 2010. [online; accessed 2023-03-08].
- [19] BOULET, X., ZARGAYOUNA, M., SCEMAMA, G., AND LEURENT, F. Service-oriented architecture for multiscale traffic simulations. In *2019 IEEE/ACS 16th International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA)* (2019), IEEE, pp. 1–8.
- [20] BRONDUM, L., SAKASHITA, C., MAN, L., AND MOTTA, V. New deal in road safety: why we need ngos. *Journal of road safety* 33, 1 (2022), 64–70.
- [21] BUSYGIN, A., KALININ, M., AND KONOPLEV, A. Supporting connectivity of vanet/manet network nodes and elastic software-configurable security services using

- blockchain with floating genesis block. In *SHS Web of Conferences* (2018), vol. 44, EDP Sciences, p. 00020.
- [22] CALVERT, S., KLUNDER, G., STEENDIJK, J., AND SNELDER, M. The impact and potential of cooperative and automated driving for intelligent traffic signal corridors: A field-operational-test and simulation experiment. *Case studies on transport policy* 8, 3 (2020), 901–919.
- [23] CAREEM, M. A. A., AND DUTTA, A. Reputation based routing in manet using blockchain. In *2020 International Conference on COMMunication Systems & NETWORKS (COMSNETS)* (2020), IEEE, pp. 1–6.
- [24] CHEN, Q., NI, A., ZHANG, C., WANG, J., XIAO, G., AND YU, C. A bayesian neural network-based method to calibrate microscopic traffic simulators. *Journal of Advanced Transportation 2021* (2021), 1–16.
- [25] CHEN, R.-C., DEWI, C., HUANG, S.-W., AND CARAKA, R. E. Selecting critical features for data classification based on machine learning methods. *Journal of Big Data* 7, 1 (2020), 1–26.
- [26] CHETLUR, V. V., AND DHILLON, H. S. Coverage and rate analysis of downlink cellular vehicle-to-everything (c-v2x) communication. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 19, 3 (2019), 1738–1753.
- [27] CHILAKALA, S., RENUKA, N., AND MUBEEN, S. Automation of traffic lights through iot. In *2020 7th International Conference on Smart Structures and Systems (ICSSS)* (2020), IEEE, pp. 1–5.
- [28] CHOWDHURY, M., APON, A., AND DEY, K. *Data analytics for intelligent transportation systems*. Elsevier, Amsterdam, 2017.
- [29] COPPOLA, P., AND ESZTERGAR-KISS, D. *Autonomous Vehicles and future mobility*. Elsevier, Amsterdam, 2019.
- [30] COPPOLA, P., AND SILVESTRI, F. *Autonomous Vehicles and Future Mobility solutions*. Elsevier, Amsterdam, 2019, pp. 85–918.
- [31] COSTA, R., LAU, J., PORTUGAL, P., VASQUES, F., AND MORAES, R. Handling real-time communication in infrastructured ieee 802.11 wireless networks: The r-wifi approach. *Journal of Communications and Networks* 21, 3 (2019), 319–334.

-
- [32] CUI, L., XIE, G., QU, Y., GAO, L., AND YANG, Y. Security and privacy in smart cities: Challenges and opportunities. *IEEE access* 6 (2018), 46134–46145.
- [33] DAUTOV, R., DISTEFANO, S., AND BUYYA, R. Hierarchical data fusion for smart healthcare. *Journal of Big Data* 6, 1 (2019), 1–23.
- [34] DESHPANDE, V., DAS, T., BADIS, H., AND GEORGE, L. Sebs: A secure element and blockchain stratagem for securing iot. In *2019 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS)* (2019), IEEE, pp. 1–7.
- [35] DISCO DISTRIBUTED COMPUTER SYSTEMS. The DISCO Deterministic Network Calculator. <https://disco.cs.uni-kl.de/index.php/projects/disco-dnc>. [online; accessed 2023-03-08].
- [36] DIZDAREVIĆ, J., CARPIO, F., JUKAN, A., AND MASIP-BRUIN, X. A survey of communication protocols for internet of things and related challenges of fog and cloud computing integration. *ACM Computing Surveys (CSUR)* 51, 6 (2019), 1–29.
- [37] DOROKHIN, S., ARTEMOV, A., LIKHACHEV, D., NOVIKOV, A., AND STARKOV, E. Traffic simulation: an analytical review. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (2020), vol. 918, IOP Publishing, p. 012058.
- [38] ELAGIN, V., SPIRKINA, A., LEVAKOV, A., AND BELOZERTSEV, I. Blockchain behavioral traffic model as a tool to influence service it security. *Future Internet* 12, 4 (2020), 68.
- [39] ELLEUCH, I., MAKNI, A., AND BOUAZIZ, R. Design of an intelligent cooperative road hazard detection persistent system. In *Intelligent Systems Design and Applications* (Cham, 2020), A. Abraham, A. K. Cherukuri, P. Melin, and N. Gandhi, Eds., Springer International Publishing, pp. 696–707.
- [40] ERTICO – ITS EUROPE. A multi-faceted approach to smart mobility. <https://ertico.com/focus-areas/cross-sector/>. [online; accessed 2023-03-08].
- [41] ESKANDARIAN, A. *Handbook of intelligent vehicles*, vol. 2. Springer, 2012.
- [42] FAROOQ, D., MOSLEM, S., FAISAL TUFAIL, R., GHORBANZADEH, O., DULEBA, S., MAQSOOM, A., AND BLASCHKE, T. Analyzing the importance of driver behavior criteria related to road safety for different driving cultures. *International journal of environmental research and public health* 17, 6 (2020), 1893.

-
- [43] FERNANDEZ, E., YOSHIOKA, N., AND WASHIZAKI, H. Abstract and iot security patterns for network segmentation. In *Proceedings of the 8th Asian conference on pattern languages of programs (Asian PLoP)* (2019).
- [44] FILINA-DAWIDOWICZ, L., STANKIEWICZ, S., ČIŽIŪNIENĖ, K., AND MATIJOŠIUS, J. Factors influencing intermodal transport efficiency and sustainability. *Cognitive Sustainability* 1, 1 (2022).
- [45] GAŚIOREK, K., TARNOWSKI, A., AND HARASIMCZUK, J. The influence of attention distraction on the drivers' behaviour. In *MATEC Web of Conferences* (2018), vol. 231, EDP Sciences, p. 04003.
- [46] GHANDOUR, R., POTAMS, A. J., BOULKAIBET, I., NEJI, B., AL BARAKEH, Z., AND KARAR, A. S. Machine learning methods for driver behaviour classification. In *2021 4th International Conference on Bio-Engineering for Smart Technologies (BioSMART)* (2021), IEEE, pp. 1–4.
- [47] GIARETTA, A., DRAGONI, N., AND MASSACCI, F. Iot security configurability with security-by-contract. *Sensors* 19, 19 (2019), 4121.
- [48] GOETHALS, T., DE TURCK, F., AND VOLCKAERT, B. Near real-time optimization of fog service placement for responsive edge computing. *Journal of Cloud Computing* 9, 1 (2020), 1–17.
- [49] GOKHALE, P. P., AND JADHAV, M. Recent development in operating system based on autosar standard used in ecus for automotive vehicles. In *Journal of Physics: Conference Series* (2021), vol. 2007, IOP Publishing, p. 012031.
- [50] GONZALEZ-GIL, P., MARTINEZ, J. A., AND SKARMETA, A. F. Lightweight data-security ontology for iot. *Sensors* 20, 3 (2020), 801.
- [51] HAHN, D., MUNIR, A., AND BEHZADAN, V. Security and privacy issues in intelligent transportation systems: Classification and challenges. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 13, 1 (2019), 181–196.
- [52] HAMEED MIR, Z., AND FILALI, F. Lte and ieee 802.11 p for vehicular networking: a performance evaluation. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2014, 1 (2014), 1–15.
- [53] HAN, M., LIU, S., MA, S., AND WAN, A. Anonymous-authentication scheme based on fog computing for vanet. *PLoS one* 15, 2 (2020), e0228319.

-
- [54] HANCOCK, P. A., NOURBAKHSI, I., AND STEWART, J. On the future of transportation in an era of automated and autonomous vehicles. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116, 16 (2019), 7684–7691.
- [55] HASAN, A. N., AND AL-KHAFAJI, S. J. Integration of intermodal transport stations as a tool for urban renewal in the city of baghdad. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (2021), vol. 1067, IOP Publishing, p. 012030.
- [56] HEESSEN, M., BAUMANN, M., KELSCH, J., NAUSE, D., AND FRIEDRICH, M. Investigation of cooperative driving behaviour during lane change in a multi-driver simulation environment. In *Human Factors and Ergonomics Society (HFES) Europe Chapter Conference Toulouse* (2012), pp. 305–318.
- [57] HIGASHIYAMA, K., KIMURA, K., BABAKARKHAIL, H., AND SATO, K. Safety and efficiency of intersections with mix of connected and non-connected vehicles. *IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems* 1 (2020), 29–34.
- [58] HU, J., BHOWMICK, P., ARVIN, F., LANZON, A., AND LENNOX, B. Cooperative control of heterogeneous connected vehicle platoons: An adaptive leader-following approach. *IEEE Robotics and Automation Letters* 5, 2 (2020), 977–984.
- [59] HU, Y., LUO, X., AND BAI, D. Passenger congestion alleviation in large hub airport ground-access system based on queueing theory. *Transportmetrica B: Transport Dynamics* 0, 0 (2022), 1–22.
- [60] HUBER, W., AND KOMPASS, K. *Safety and Comfort Systems*, vol. 2. Springer, London, 2012, pp. 603–881.
- [61] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 21217: 2010: Intelligent transport systems- Communications access for land mobiles (CALM)-Architecture. <https://www.iso.org/standard/61570.html>, 2010. [online; accessed 2023-03-08].
- [62] ISLAM, A., KUMAR, A., MOHIUDDIN, K., YASMIN, S., KHALEEL, M. A., AND HUSSAIN, M. R. Efficient resourceful mobile cloud architecture (mrarsa) for resource demanding applications. *Journal of Cloud Computing* 9, 1 (2020), 1–21.
- [63] JADOON, A. K., WANG, L., LI, T., AND ZIA, M. A. Lightweight cryptographic techniques for automotive cybersecurity. *Wireless Communications and Mobile Computing* 2018 (2018).

-
- [64] JAWHAR, I., MOHAMED, N., AND AL-JAROODI, J. Networking architectures and protocols for smart city systems. *Journal of Internet Services and Applications* 9, 1 (2018), 1–16.
- [65] JEONG, Y., KIM, S., AND YI, K. Surround vehicle motion prediction using lstm-rnn for motion planning of autonomous vehicles at multi-lane turn intersections. *IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems* 1 (2020), 2–14.
- [66] JIA, W., AND ZHOU, W. *Distributed network systems: from concepts to implementations*, vol. 15. Springer Science & Business Media, 2004.
- [67] JIAO, S., ZHANG, S., ZHOU, B., ZHANG, Z., AND XUE, L. An extended car-following model considering the drivers' characteristics under a v2v communication environment. *Sustainability* 12, 4 (2020), 1552.
- [68] JIN, H., AND PAPADIMITRATOS, P. Proactive certificate validation for vanets. In *2016 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)* (2016), IEEE, pp. 1–4.
- [69] KABASHI, M. H. Y., AND HIMMAT, M. Comparison smart cities models (lorawan vs narrowband-iot). *TECHNOLOGY HORIZONS JOURNAL* 3, 1 (2019), 22–25.
- [70] KALUBOWILA, D., AND PERERA, H. Wireless sensor networks for intelligent transportation systems.
- [71] KANCHWALA, H., AND OGAI, H. Development of an intelligent transport system for ev. *SAE International Journal of Passenger Cars - Electronic and Electrical Systems* 9, 1 (may 2016), 9–21.
- [72] KARELS, V. C., VEELANTURF, L. P., AND VAN WOENSEL, T. An auction for collaborative vehicle routing: Models and algorithms. *EURO Journal on transportation and logistics* 9, 2 (2020), 100009.
- [73] KHAN, A. I., AND AL-MULLA, Y. Unmanned aerial vehicle in the machine learning environment. *Procedia computer science* 160 (2019), 46–53.
- [74] KHAN, S., PARKINSON, S., AND QIN, Y. Fog computing security: a review of current applications and security solutions. *Journal of Cloud Computing* 6, 1 (2017), 1–22.
- [75] KOVALEV, R., ENALEEVA-BANDURA, I., AND VASILJEV, V. Mathematical model of transport network planning on the territory of the forest fund. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (2020), vol. 918, IOP Publishing, p. 012048.

-
- [76] KRAJZEWICZ, D., BROCKFELD, E., MIKAT, J., RINGEL, J., RÖSSEL, C., TUCHSCHEERER, W., WAGNER, P., AND WÖSLER, R. Simulation of modern traffic lights control systems using the open source traffic simulation sumo. *SUMO User Conference*.
- [77] KRAJZEWICZ, D., HELDT, B., NIELAND, S., CYGANSKI, S., AND GADE, K. *Transport Modelling: Tasks and Methods*. 2019.
- [78] KRISHNAKUMARI, P., VAN LINT, H., DJUKIC, T., AND CATS, O. A data driven method for od matrix estimation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies 113* (2020), 38–56.
- [79] KUKULSKI, B. Car infotainment capabilities vs. customers’ needs and expectations. *AES 142nd Convention 21* (2017).
- [80] KUMAR, S., TIWARI, P., AND ZYMBLER, M. Internet of things is a revolutionary approach for future technology enhancement: a review. *Journal of Big Data 6*, 111 (2019).
- [81] LE BOUDEC, J.-Y., AND THIRAN, P. A short Course of Network Calculus. <https://slideplayer.com/slide/15883819/> [2023-02-24]. [online; accessed 2023-03-08].
- [82] LE BOUDEC, J.-Y., AND THIRAN, P. *Network Calculus: A Theory of Deterministic Queuing Systems for the Internet*, vol. 2050. 06 2004.
- [83] LI, D., WU, J., XU, M., WANG, Z., AND HU, K. Adaptive traffic signal control model on intersections based on deep reinforcement learning. *Journal of Advanced Transportation 2020* (2020), 1–14.
- [84] LI, Q., AND YAO, C. *Real-time concepts for embedded systems*. CRC press, 2003.
- [85] LINGGA, W., BUDIMAN, B. A., AND SAMBEGORO, P. Automotive real-time operating system in vehicular technology progress review. In *2019 6th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT)* (2019), pp. 253–257.
- [86] LIU, C.-J., LIU, Z., CHAI, Y.-J., AND LIU, T.-T. Review of virtual traffic simulation and its applications. *Journal of Advanced Transportation 2020* (2020).
- [87] LOPEZ, P. A., BEHRISCH, M., BIEKER-WALZ, L., ERDMANN, J., FLÖTTERÖD, Y.-P., HILBRICH, R., LÜCKEN, L., RUMMEL, J., WAGNER, P., AND WIESSNER, E. Microscopic traffic simulation using SUMO. In *The 21st IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems* (2018), IEEE.

-
- [88] MACK, L. E. 8 Apps to Help You Stay Safe and Healthy in Your Car. <https://www.makeuseof.com/apps-stay-safe-healthy-in-car/>, 2022. [online; accessed 2023-03-08].
- [89] MAITI, S., WINTER, S., AND KULIK, L. A conceptualization of vehicle platoons and platoon operations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 80 (2017), 1–19.
- [90] MATHIEU, P., AND NONGAILLARD, A. A risk-driven model for traffic simulation. In *Distributed Computing and Artificial Intelligence, 17th International Conference* (2021), Springer, pp. 1–10.
- [91] MAZUMDAR, S., SEYBOLD, D., KRITIKOS, K., AND VERGINADIS, Y. A survey on data storage and placement methodologies for cloud-big data ecosystem. *Journal of Big Data* 6, 1 (2019), 1–37.
- [92] MENG, X. Study on integrated management of railway and water transport. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (2018), vol. 189, IOP Publishing, p. 062074.
- [93] MIRBOLAND, M., AND SMARSLY, K. A semantic model of intelligent transportation systems. In *EG-ICE* (2018).
- [94] MIRSARRAF, S. M., MANSOURI, A., AND YARI, A. Smart city assessment-initiatives of mashhad smart city. *AUT Journal of Modeling and Simulation* 54, 1 (2022), 117–128.
- [95] MOHAMMAD, S. A., RASHEED, A., AND QAYYUM, A. Vanet architectures and protocol stacks: a survey. In *Communication Technologies for Vehicles: Third International Workshop, Nets4Cars/Nets4Trains 2011, Oberpfaffenhofen, Germany, March 23-24, 2011. Proceedings 3* (2011), Springer, pp. 95–105.
- [96] MOLINA-MASEGOSA, R., GOZALVEZ, J., AND SEPULCRE, M. Comparison of ieee 802.11 p and lte-v2x: An evaluation with periodic and aperiodic messages of constant and variable size. *IEEE Access* 8 (2020), 121526–121548.
- [97] MONTEIL, J., O’HARA, N., CAHILL, V., AND BOUROCHE, M. Real-time estimation of drivers’ behaviour. In *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems* (2015), IEEE, pp. 2046–2052.

-
- [98] MOSLEM, S., FAROOQ, D., GHORBANZADEH, O., AND BLASCHKE, T. Application of the ahp-bwm model for evaluating driver behavior factors related to road safety: A case study for budapest. *Symmetry* 12, 2 (2020), 243.
- [99] MOUCHFIQ, N., HABBANI, A., AND BENJBARA, C. Blockchain security in manets. *International Journal of Computer and Information Engineering* 13, 10 (2019), 542–546.
- [100] MOVSIM. Multi-model open-source vehicular-traffic Simulator. <https://github.com/movsim/movsim>. [online; accessed 2023-03-08].
- [101] MUTHURAMALINGAM, S., BHARATHI, A., RAKESH KUMAR, S., GAYATHRI, N., SATHIYARAJ, R., AND BALAMURUGAN, B. Iot based intelligent transportation system (iot-its) for global perspective: A case study. *Internet of Things and Big Data Analytics for Smart Generation* (2019), 279–300.
- [102] MÖRNER, M. V. *Demand analysis and willingness to use new mobility concepts*. Elsevier, Amsterdam, 2019, pp. 85–918.
- [103] NGUYEN, T. M. Systems-of-systems ms&a for complex systems, gaming and decision for space systems. *Simulation Modeling* (2021), 123.
- [104] NOBAHARY, S., GARAKANI, H. G., KHADEMZADEH, A., AND RAHMANI, A. M. Selfish node detection based on hierarchical game theory in iot. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2019, 1 (2019), 1–19.
- [105] NOMA-OSAGHAEA, E., OKOKPUJIEA, K., DANIELA, F., AND SAMUEL, J. The validity of a decentralised simulation-based system for the resolution of road traffic congestion. *Journal of Applied Engineering Science* 20, 3 (2022), 821–830.
- [106] OLSAM, J. J., AND TAPANI, A. *Comparison of Car-following models*, vol. 960. Swedish National Road and Transport Research Institute Linköping, Sweden, 2004.
- [107] PAIVA, J. O., CARVALHO, R. M., AND ANDRADE, R. M. Towards a process for nfrs evaluation in iot applications. In *Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Computação Ubíqua e Pervasiva* (2022), SBC, pp. 131–140.
- [108] PAPAGEORGIU, A., FERNÁNDEZ-FERNÁNDEZ, A., OCHOA-ADAY, L., PELÁEZ, M. S., AND SIDDIQUI, M. S. Sla management procedures in 5g slicing-based systems. In *2020 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)* (2020), IEEE, pp. 7–11.

-
- [109] PARK, S., SEONWOO, Y., KIM, J., KIM, J., AND OH, A. Denoising recurrent neural networks for classifying crash-related events. *IEEE transactions on intelligent transportation systems* 21, 7 (2019), 2906–2917.
- [110] PENG, Z.-R., ZHAI, W., AND LU, K. *Smart, Sustainable, and Resilient Transportation System*. Springer Nature Singapore, Singapore, 2022, pp. 319–328.
- [111] PERWEJ, Y., HAQ, K., PARWEJ, F., MUMDOUH, M., AND HASSAN, M. The internet of things (iot) and its application domains. *International Journal of Computer Applications* 975, 8887 (2019), 182.
- [112] PRASETYO, Y. A., AND HABIBIE, I. Smart city architecture development framework (scadef). *JOIV: International Journal on Informatics Visualization* 6, 4 (2022), 869–875.
- [113] PTV GROUP. VISSIM - Multimodal Traffic Simulation Software. <https://www.ptvgroup.com/en/solutionsproducts/ptv-vissim/>. [online; accessed 2023-03-08].
- [114] PTV GROUP. VISUM - The world’s leading transport planning software. <https://www.myptv.com/en/mobility-software/ptv-visum>. [online; accessed 2023-03-08].
- [115] PUAN, O., MOHAMED, A., IDHAM, M., ISMAIL, C., HAININ, M., AHMAD, M., AND MOKHTAR, A. Drivers behaviour on expressways: headway and speed relationships. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (2019), vol. 527, IOP Publishing, p. 012071.
- [116] PUTRA, A. S., WARNARS, H. L. H. S., GAOL, F. L., SOEWITO, B., AND ABDURACHMAN, E. A proposed surveillance model in an intelligent transportation system (its). In *2018 Indonesian Association for Pattern Recognition International Conference (INAPR)* (2018), pp. 156–160.
- [117] RAZELAN, A. S. M., RAHMAN, A. R. A., AND ISMAIL, A. Strategic indicators for targeted road safety index. *Journal of the Society of Automotive Engineers Malaysia* 5, 1 (2021), 37–149.
- [118] REAL TIME AT WORK. Network Calculus Playground - a Network calculus interpreter. <https://www.realttimeatwork.com/minplus-playground>. [online; accessed 2023-03-08].

-
- [119] RETALLACK, A. E., AND OSTENDORF, B. Current understanding of the effects of congestion on traffic accidents. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16, 18 (2019).
- [120] ROMANOWSKA, A., AND JAMROZ, K. Comparison of traffic flow models with real traffic data based on a quantitative assessment. *Applied Sciences* 11, 21 (2021), 9914.
- [121] ROYO, S., AND BALLESTA-GARCIA, M. An overview of lidar imaging systems for autonomous vehicles. *Applied sciences* 9, 19 (2019), 4093.
- [122] ROZMAN, A., AZMI, N., AND SUKEREMAN, A. A review of smart city elements and smart city performances. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (2022), vol. 1067, IOP Publishing, p. 012027.
- [123] RU, Z. Vanet architecture analysis and protocols. *International Journal of Computer Applications* 184, 13 (2022).
- [124] SACHARNY, D., AND HENDERSON, T. Agent based modeling and simulation. In *Lane-Based Unmanned Aircraft Systems Traffic Management*. Springer, 2022, pp. 121–134.
- [125] SARKAR, R. R., AND RAHMAN, M. Z. Transmission power and quality of service in manet routing protocols. *International Journal of Wireless Mobile Networks* 14, 4 (2022), 19–26.
- [126] SAXENA, A. Everything You Need to Know About In-Vehicle Infotainment Systems. <https://www.einfochips.com/blog/everything-you-need-to-know-about-in-vehicle-infotainment-system/>, 2020. [online; accessed 2023-03-08].
- [127] SCHNEIDER, S., AND BENGLER, K. Evaluating behavioral validity in traffic simulators. *Proceedings of TRA2020 the 8th Transport Research Arena 2020* (2020).
- [128] SEYEDAN, M., AND MAFAKHERI, F. Predictive big data analytics for supply chain demand forecasting: methods, applications, and research opportunities. *Journal of Big Data* 7, 1 (2020), 1–22.
- [129] SHARMA, V., YOU, I., PAU, G., COLLOTTA, M., LIM, J. D., AND KIM, J. N. Lorawan-based energy-efficient surveillance by drones for intelligent transportation systems. *Energies* 11, 3 (2018), 573.

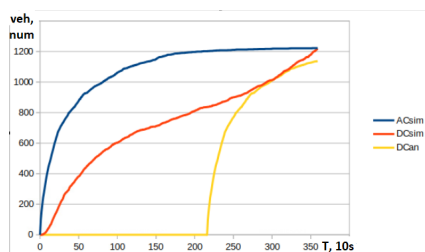
-
- [130] SHI, R., AND NI, S. Theory and application technology of railway intelligent transportation systems. In *ICTE 2015*. 2015, pp. 626–632.
- [131] SHRAMENKO, N. Mathematical model of the logistics chain for the delivery of bulk cargo by rail transport. *Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu* (2018).
- [132] SHUKLA, A. K., SHARMA, R., AND MUHURI, P. K. A review of the scopes and challenges of the modern real-time operating systems. *International Journal of Embedded and Real-Time Communication Systems (IJERTCS)* 9, 1 (2018), 66–82.
- [133] SHVETSOVA, S., AND SHVETSOV, A. Safety when flying unmanned aerial vehicles at transport infrastructure facilities. *Transportation research procedia* 54 (2021), 397–403.
- [134] SIEGEL, J. E., ERB, D. C., AND SARMA, S. E. A survey of the connected vehicle landscape—architectures, enabling technologies, applications, and development areas. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 19, 8 (2018), 2391–2406.
- [135] SIMULATION OF URBAN MOBILITY. Adapted and coordinated traffic signals. <https://sumo.dlr.de/docs/Tools/tls.html>. [online; accessed 2023-03-08].
- [136] SIMULATION OF URBAN MOBILITY. Defining the Time Step Length. https://sumo.dlr.de/docs/Simulation/Basic_Definition.html#defining_the_time_step_length. [online; accessed 2023-03-08].
- [137] SIMULATION OF URBAN MOBILITY. SUMO. <https://www.eclipse.org/sumo/>. [online; accessed 2023-03-08].
- [138] SIMULATION OF URBAN MOBILITY. Cooperative Adaptive Cruise Control. <https://sumo.dlr.de/docs/Car-Following-Models/CACC.html>, 2008. [online; accessed 2023-03-08].
- [139] SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. SAE J3161 LTE-V2X Deployment Profiles. <https://www.arc-it.net/html/standards/standard1378.html>. [online; accessed 2023-03-08].
- [140] SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. SAE Levels of Driving Automation Refined for Clarity and International Audience. <https://www.sae.org/blog/sae-j3016-update>. [online; accessed 2023-03-08].

-
- [141] SREENU, G., AND DURAI, S. Intelligent video surveillance: a review through deep learning techniques for crowd analysis. *Journal of Big Data* 6, 1 (2019), 1–27.
- [142] STEVANOVIC, A., AND MARTIN, P. T. Split-cycle offset optimization technique and coordinated actuated traffic control evaluated through microsimulation. *Transportation Research Record* 2080, 1 (2008), 48–56.
- [143] SUN, B., ZHANG, Q., ZOU, C., TONG, H., WEI, N., JIA, Z., AND MAO, H. Review and prospect of research on road traffic flow energy model. vol. 29.
- [144] SVEEN, A. F. Efficient storage of heterogeneous geospatial data in spatial databases. *Journal of Big Data* 6, 1 (2019), 1–14.
- [145] TAHA, W. M., TAHA, A.-E. M., AND THUNBERG, J. *Cyber-Physical Systems: A Model-Based Approach*. Springer Nature, 2021.
- [146] TEH, H. Y., KEMPA-LIEHR, A. W., AND WANG, K. I.-K. Sensor data quality: A systematic review. *Journal of Big Data* 7, 1 (2020), 1–49.
- [147] TEIXEIRA, D., FERREIRA, J., AND MACEDO, J. Systematic literature review of ai/ml techniques applied to vanet routing. In *Future of Information and Communication Conference (2022)*, Springer, pp. 339–361.
- [148] TERRANEO, F., IZZO, F. A., LEVA, A., AND FORNACIARI, W. Tdmh: a communication stack for real-time wireless mesh networks. *arXiv preprint arXiv:2006.03554* (2020).
- [149] THOMAS, D., AND KOVOOR, B. C. A genetic algorithm approach to autonomous smart vehicle parking system. *Procedia Computer Science* 125 (2018), 68–76.
- [150] TIAN, W., YI, L., LIU, W., HUANG, W., MA, G., AND ZHANG, Y. Ground radar precipitation estimation with deep learning approaches in meteorological private cloud. *Journal of cloud computing* 9, 1 (2020), 1–12.
- [151] TIGHTIZ, L., AND YANG, H. A comprehensive review on iot protocols’ features in smart grid communication. *Energies* 13, 11 (2020), 2762.
- [152] TRANSIMS. Transportation Analysis and Simulation System. <https://code.google.com/archive/p/transims/>. [online; accessed 2023-03-08].
- [153] TRINDADE, N. S., KRONBAUER, A. H., ARAGÃO, H. G., AND CAMPOS, J. Driver rating: a mobile application to evaluate driver behavior. *South Florida Journal of Development* 2, 2 (2021), 1147–1160.

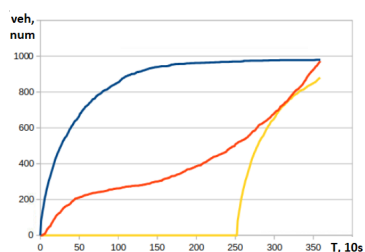
-
- [154] TUNCER, U. A. Urban air mobility industry outlook.
- [155] TUOHY, S., GLAVIN, M., HUGHES, C., JONES, E., TRIVEDI, M., AND KILMARTIN, L. Intra-vehicle networks: A review. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 16, 2 (2014), 534–545.
- [156] ULMER, M. W., GOODSON, J. C., MATTFELD, D. C., AND THOMAS, B. W. On modeling stochastic dynamic vehicle routing problems. *EURO Journal on Transportation and Logistics* 9, 2 (2020), 100008.
- [157] UNGUREAN, I. Timing comparison of the real-time operating systems for small microcontrollers. *Symmetry* 12, 4 (2020), 592.
- [158] UNITED STATES DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Road Transport Informatics. <http://www.wirelesscommunication.nl/reference/chaptr01/roadtrinfo/ivhs.htm>. [online; accessed 2023-03-08].
- [159] UNITED STATES DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. WAVE - IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments. <https://www.standards.its.dot.gov/Factsheets/Factsheet/80>. [online; accessed 2023-03-08].
- [160] VÄHÄKAINU, P., AND LEHTO, M. Artificial intelligence in the cyber security environment. In *Proceedings of the ICCWS 2019 14th International Conference on Cyber WarfarSe and Security: ICCWS, Stellenbosch, South Africa* (2019), p. 431.
- [161] VAIDYA, R. B., KULKARNI, S., AND DIDORE, V. Intelligent transportation system using iot: A review. *International Journal for Research Trends and Innovation* (2021).
- [162] VAIGANDLA, K. K., THATIPAMULA, S., AND KARNE, R. K. Investigation on unmanned aerial vehicle (uav): An overview. *IRO Journal on Sustainable Wireless Systems* 4, 3 (2022), 130–148.
- [163] VAN BEMTEN, A., AND KELLERER, W. *Network Calculus: A Comprehensive Guide*. 10 2016.
- [164] VAN DE VYVERE, B., COLPAERT, P., MANNENS, E., AND VERBORGH, R. Open traffic lights: a strategy for publishing and preserving traffic lights data. In *Companion Proceedings of the 2019 World Wide Web Conference* (2019), pp. 966–971.
- [165] W AXHAUSEN, K., HORNI, A., AND NAGEL, K. *The multi-agent transport simulation MATSim*. Ubiquity Press, 2016.

-
- [166] WANG, B., HE, Z., SHENG, J., AND CHEN, Y. Deep reinforcement learning for traffic light timing optimization. *Processes* 10, 11 (2022), 2458.
- [167] WANG, J., AND RAKHA, H. Empirical study of effect of dynamic travel time information on driver route choice behavior. *Sensors* 20, 11 (2020), 3257.
- [168] WEBSTER, F. V., AND COBEE, B. M. Road research technical paper №56: Traffic Signals. <https://nou.sinaldetransito.com.br/wp-content/uploads/2021/03/webster2.pdf>, 1966. [online; accessed 2023-03-08].
- [169] WORLD ROAD ASSOCIATION. Vehicles safety applications. <https://rno-its.piarc.org/en/its-basics-what-its-its-applications-and-services/vehicle-safety-applications>, 2022. [online; accessed 2023-03-08].
- [170] WU, H., LI, X., AND DENG, Y. Deep learning-driven wireless communication for edge-cloud computing: opportunities and challenges. *Journal of Cloud Computing* 9 (2020), 1–14.
- [171] XU, Y., AND LI, G. Optimal and robust interference efficiency maximization for multicell heterogeneous networks. *IEEE Access* 7 (2019), 102406–102416.
- [172] XU, Z., ZHANG, Y., LI, H., YANG, W., AND QI, Q. Dynamic resource provisioning for cyber-physical systems in cloud-fog-edge computing. *Journal of Cloud Computing* 9, 1 (2020), 1–16.
- [173] YANG, R., ZOMAYA, A. Y., WANG, L., AND RANJAN, R. Orchestrating development lifecycle of machine learning based iot applications: A survey.
- [174] ZATMEH-KANJ, S., AND TOLEDO, T. Car following and microscopic traffic simulation under distracted driving. *Transportation research record* 2675, 8 (2021), 643–656.
- [175] ZHANG, H., HUANG, T., LIU, S., YIN, H., LI, J., YANG, H., AND XIA, Y. A learning style classification approach based on deep belief network for large-scale online education. *Journal of cloud computing* 9, 1 (2020), 1–17.
- [176] ZHANG, R., SCHMUTZ, F., GERARD, K., POMINI, A., BASSETO, L., HASSEN, S. B., ISHIKAWA, A., OZGUNES, I., AND TONGUZ, O. Virtual traffic lights: System design and implementation. In *2018 ieee 88th vehicular technology conference (vtc-fall)* (2018), IEEE, pp. 1–5.

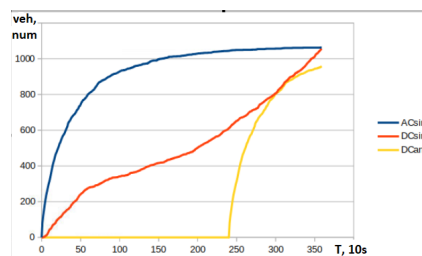
А. Криви на пристигане, симулационни и полуаналитични криви на напускане



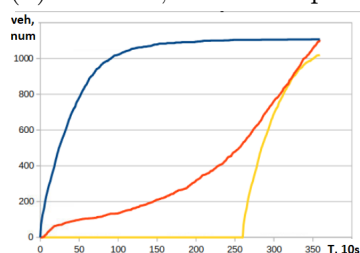
(a) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б.



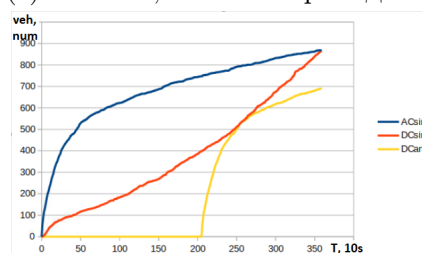
(b) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б.-ляво



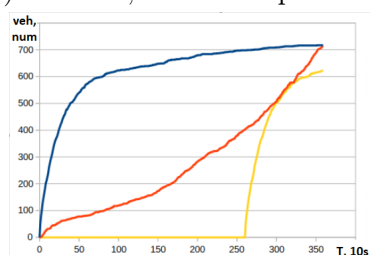
(c) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б.-дясно



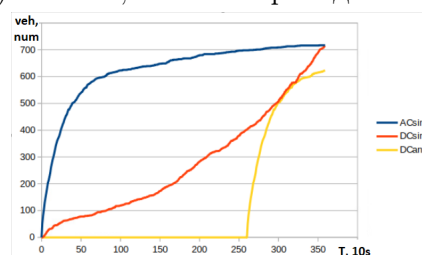
(d) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б.-ляво горе



(e) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б.-дясно горе

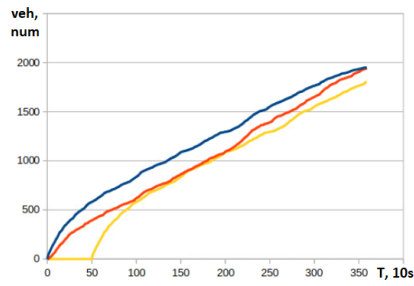


(f) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б.-ляво долу

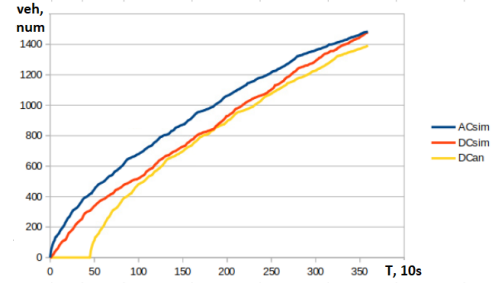


(g) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б.-дясно долу

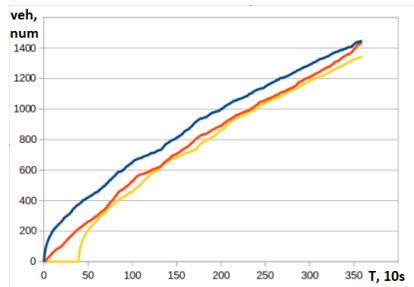
Фигура 39: Криви на пристигане, симулационни и полуаналитични криви на напускане с период 0.1 на пътните мрежи от фигура 17



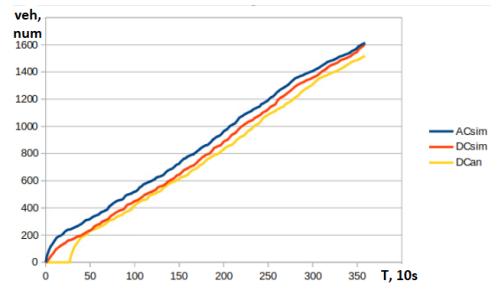
(a) 4 кръстовища



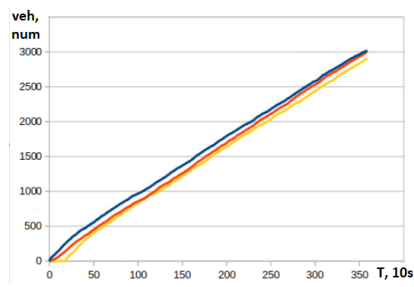
(b) 3 кръстовища



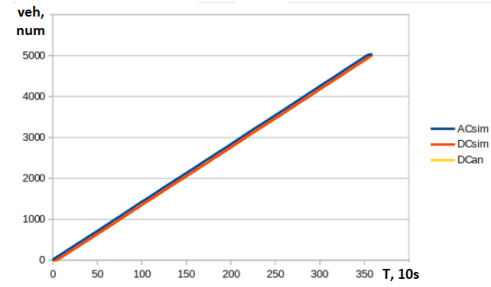
(c) Метро-С.Пет.



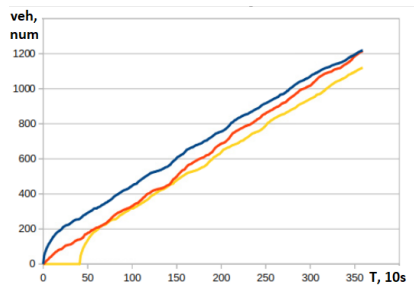
(d) Изт.-Менд.



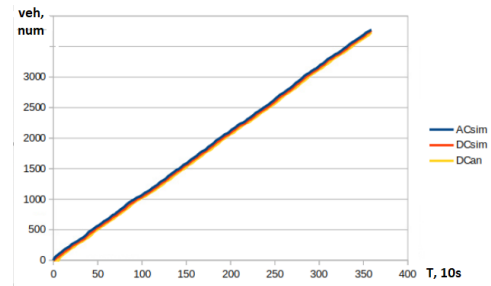
(e) Тол.-С.Пет.+



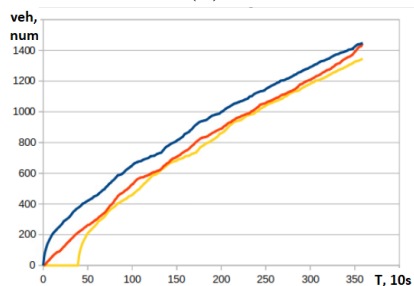
(f) С.Пет.-дясно



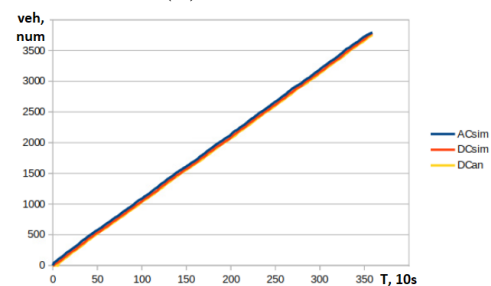
(g) Метро



(h) Изт.-Хр.Б.

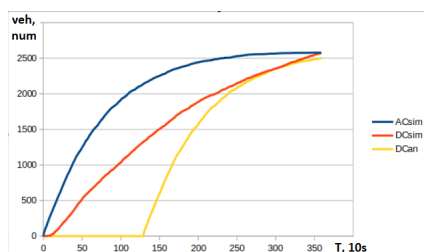


(i) Менд.-С.Пет.

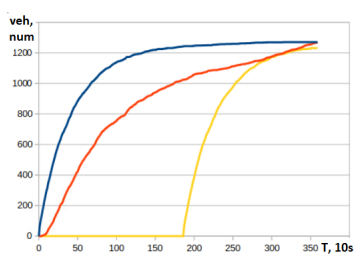


(j) Тол.-С.Пет

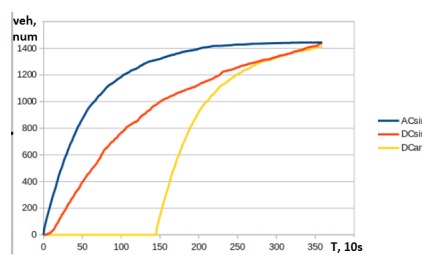
Фигура 40: Криви на пристигане, симуляционни и полуаналитични криви на напускане с период 0.1 на пътните мрежи от фигура 18



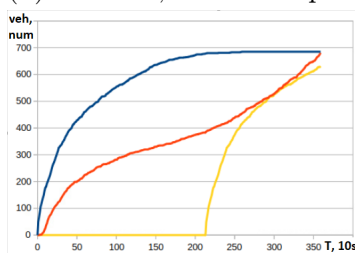
(a) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б.



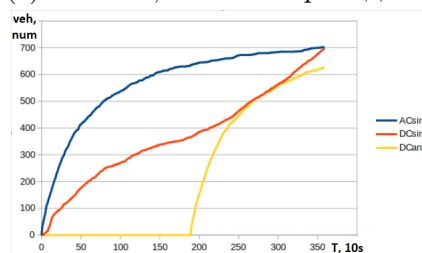
(b) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б.-ляво



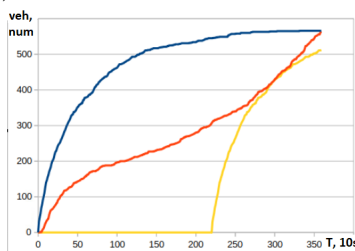
(c) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б.-дясно



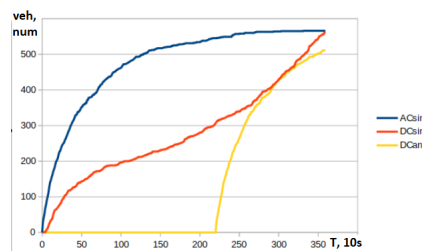
(d) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б.-ляво горе



(e) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б.-дясно горе

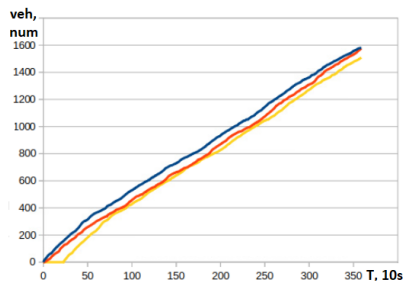


(f) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б.-ляво долу

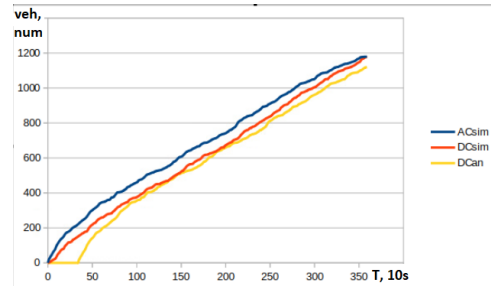


(g) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б.-дясно долу

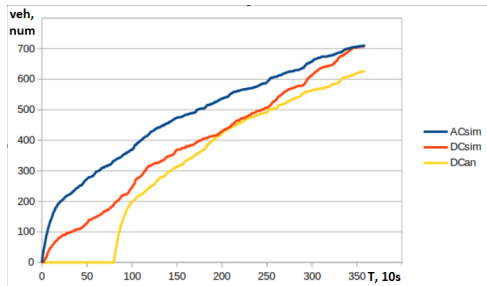
Фигура 41: Криви на пристигане, симулационни и полуаналитични криви на напускане с период 0.3 на пътните мрежи от фигура 17



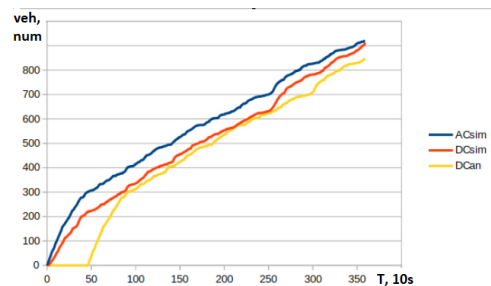
(a) 4 кръстовища



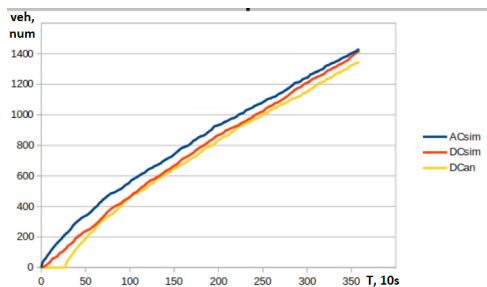
(b) 3 кръстовища



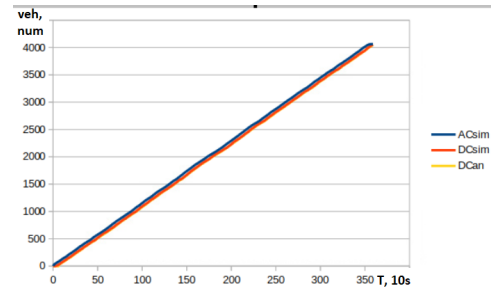
(c) Метро-С.Пет.



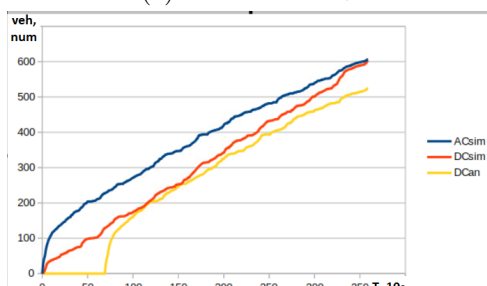
(d) Изт.-Менд.



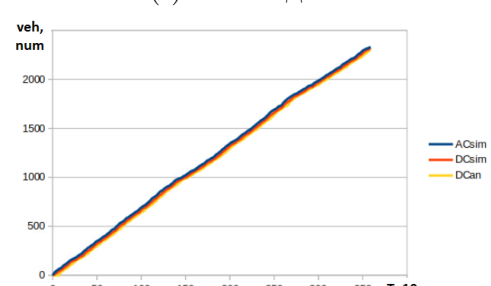
(e) Тол.-С.Пет.+



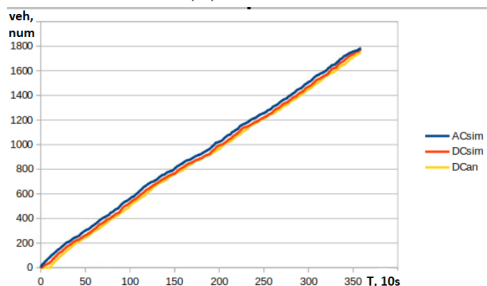
(f) С.Пет.-дясно



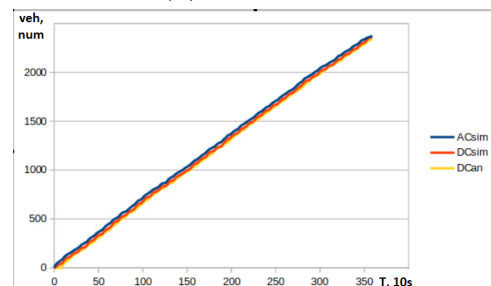
(g) Метро



(h) Изт.-Хр.Б.

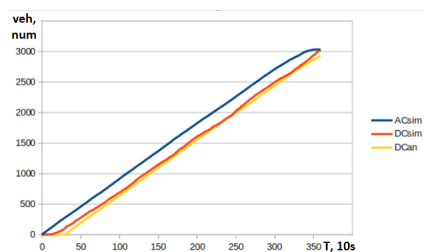


(i) Менд.-С.Пет.

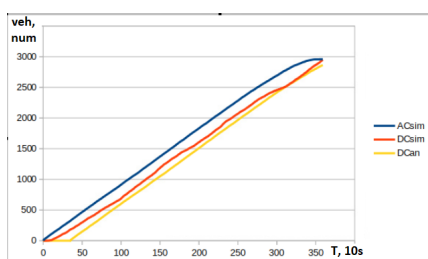


(j) Тол.-С.Пет.

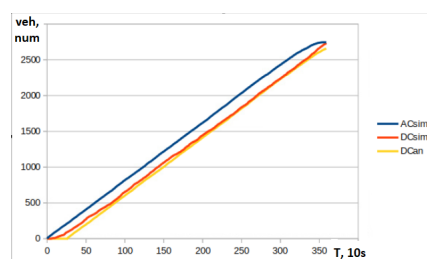
Фигура 42: Криви на пристигане, симуляционни и полуаналитични криви на напускане с период 0.3 на пътните мрежи от фигура 18



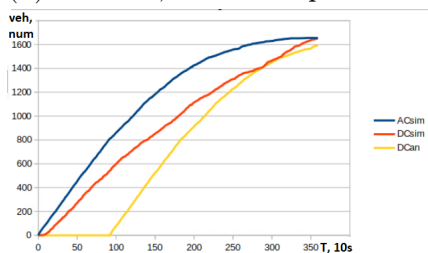
(a) P.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б.



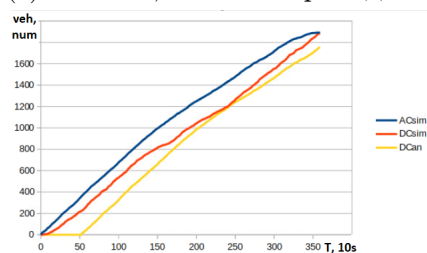
(b) P.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б.-ляво



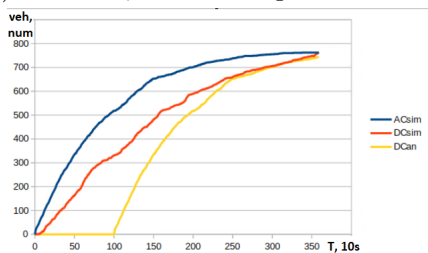
(c) P.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б.-дясно



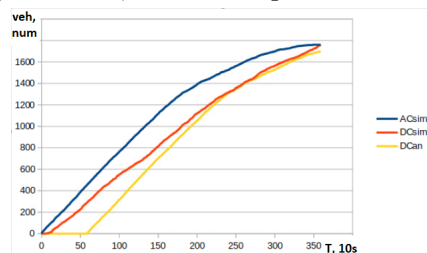
(d) P.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б.-ляво горе



(e) P.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б.-дясно горе

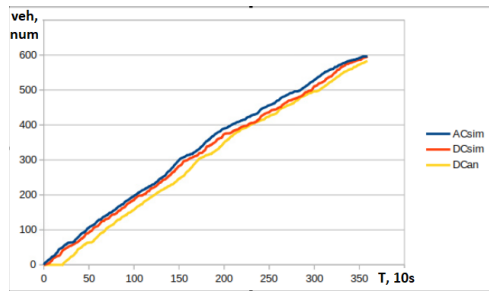


(f) P.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б.-ляво долу

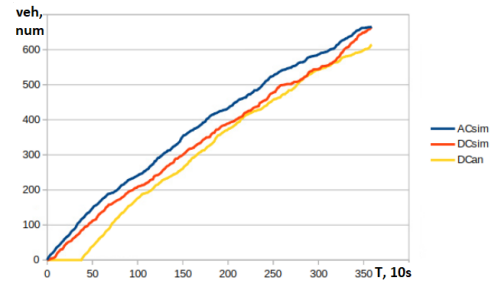


(g) P.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б.-дясно долу

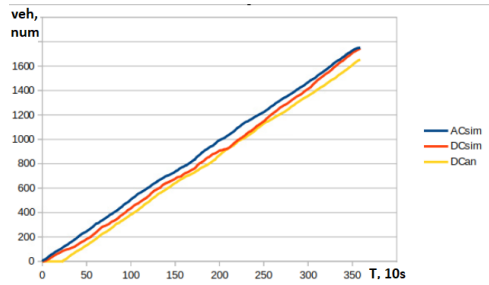
Фигура 43: Криви на пристигане, симулационни и полуаналитични криви на напускане с период 1 на пътните мрежи от фигура 17



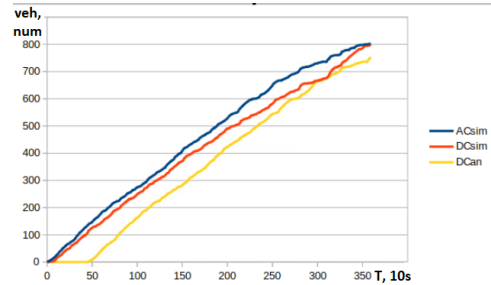
(a) 4 кръстовища



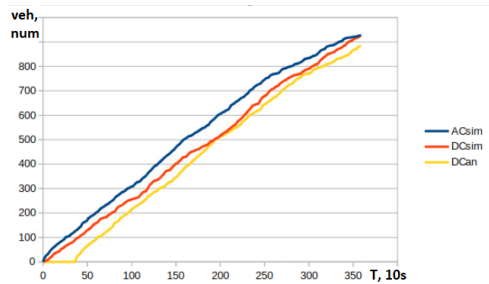
(b) 3 кръстовища



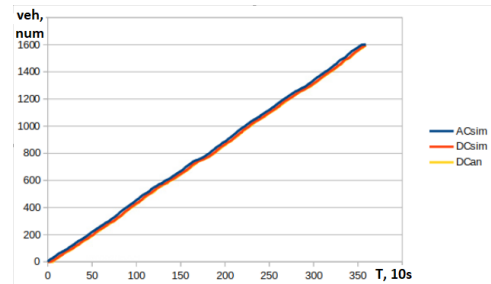
(c) Метро-С.Пет.



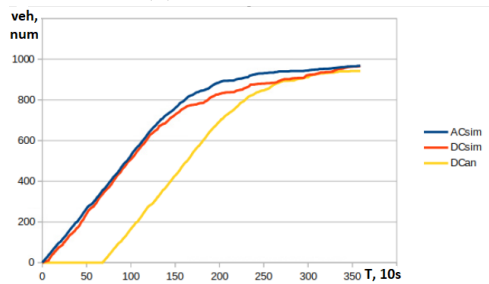
(d) Изт.-Менд.



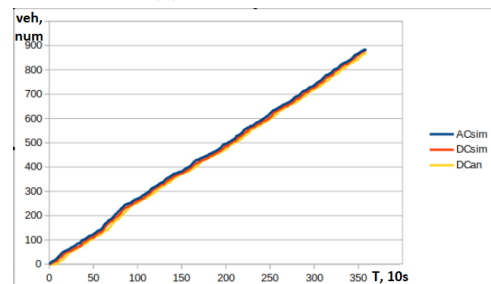
(e) Тол.-С.Пет.+



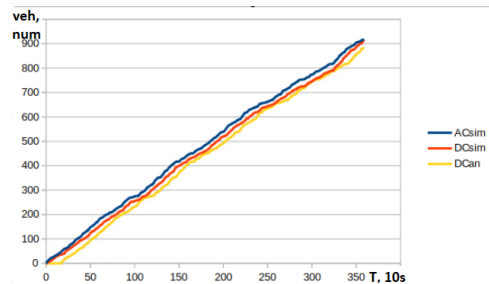
(f) С.Пет.-дясно



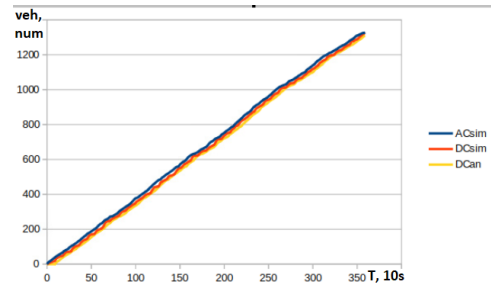
(g) Метро



(h) изт.-Хр.Б.



(i) Менд.-С.Пет.



(j) Тол.-С.Пет.

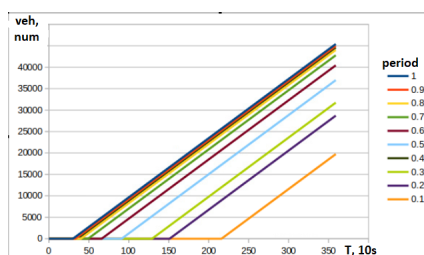
Фигура 44: Криви на пристигане, симуляционни и полуаналитични криви на напускане с период 1 на пътните мрежи от фигура 18

В. Средно виртуално закъснение между полуаналитични и симулационни криви

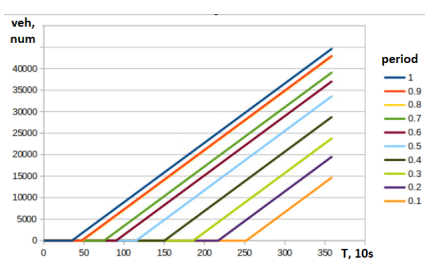
Таблица 11: Средно виртуално закъснение между полуаналитични и симулационни криви на напускане в секунди

	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
СПет-д	16	16	16	16	15	15	14	13	10	10
СПет-л	21	21	21	20	20	20	20	20	20	20
Изт-ХрБ	38	30	43	44	35	36	35	35	36	32
Тол-СПет	40	41	40	36	35	54	36	30	32	23
Менд-СПет	76	59	91	58	39	40	52	39	38	36
Изт-Менд	257	142	276	252	261	207	156	139	160	104
Метро-СПет	88	392	483	385	309	244	166	208	238	87
Метро	411	263	281	237	293	159	204	169	157	143
Зкръстовища	133	138	176	117	231	174	188	103	76	127
4кръстовища	110	96	98	78	109	67	80	74	72	129
Р-Осв,КнМл-ХрБ	57	68	76	104	141	276	34	384	458	756
Р-Осв,КнМл-ХрБ-л	120	102	104	253	274	413	614	747	796	922
Р-Осв,КнМл-ХрБ-д	47	57	58	206	245	454	473	483	653	855
Р-Осв,КнМл-ХрБ-лг	353	340	442	455	541	560	665	737	847	960
Р-Осв,КнМл-ХрБ-дг	162	256	277	339	388	467	611	735	726	846
Р-Осв,КнМл-ХрБ-лд	162	256	277	339	388	467	611	735	726	847
Р-Осв,КнМл-ХрБ-дд	162	256	277	339	388	467	611	735	726	848

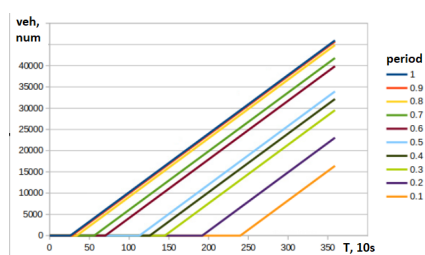
С. Криви на обслужване



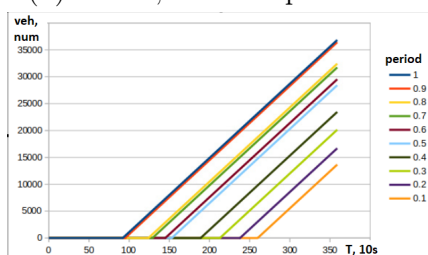
(a) P-Осв, КнМЛ-ХрБ



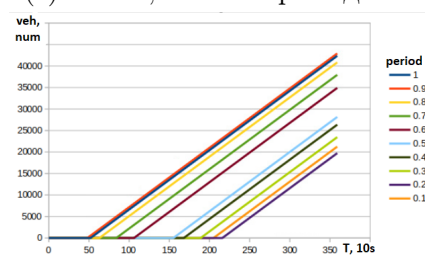
(b) P-Осв, КнМЛ-ХрБ - ляво



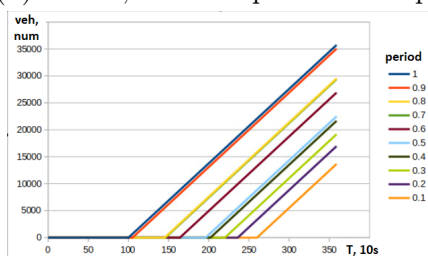
(c) P-Осв, КнМЛ-ХрБ - дясно



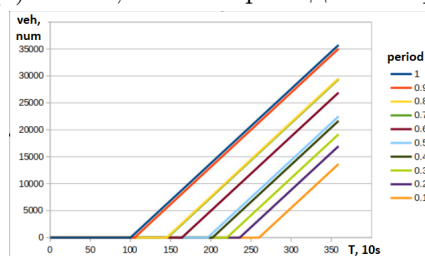
(d) P-Осв, КнМЛ-ХрБ - ляво горе



(e) P-Осв, КнМЛ-ХрБ - дясно горе

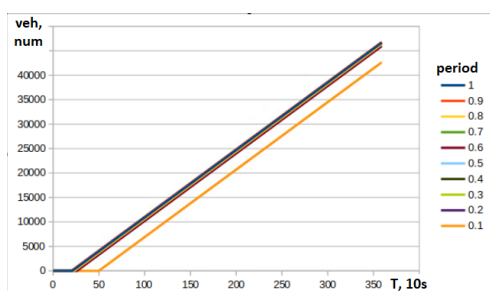


(f) P-Осв, КнМЛ-ХрБ - ляво горе

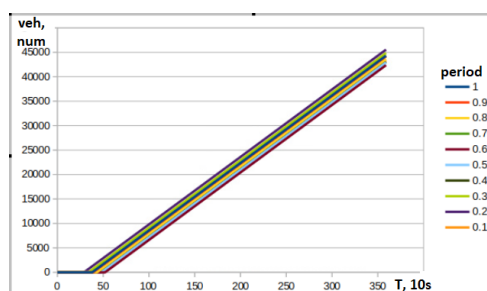


(g) P-Осв, КнМЛ-ХрБ - дясно горе

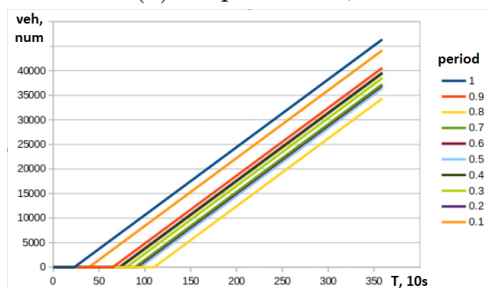
Фигура 45: Криви на обслужване на пътните мрежи от фигура 17, при различни натоварвания



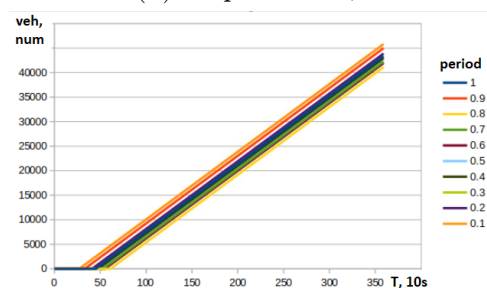
(a) 4 кръстовища



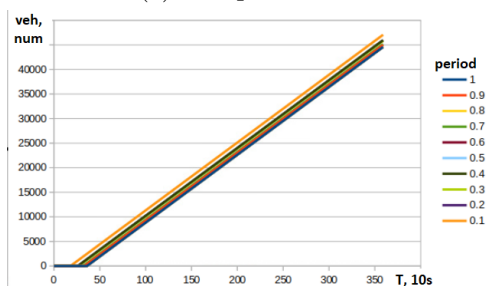
(b) 3 кръстовища



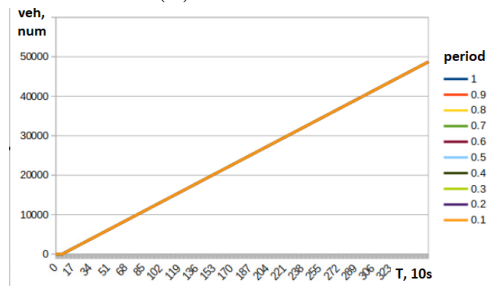
(c) Метро-С.Пет.



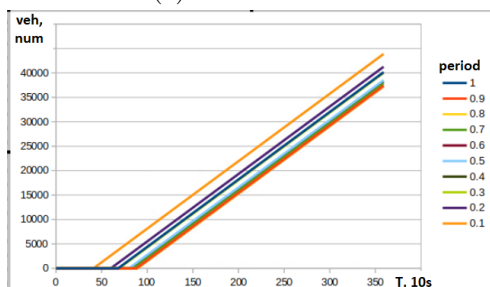
(d) Изт.-Менд.



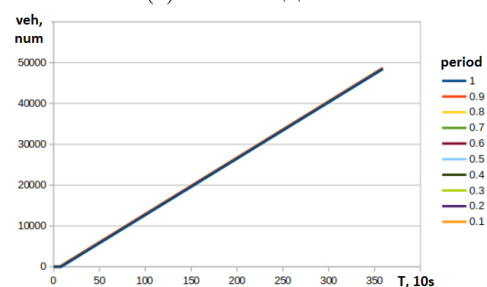
(e) Тол.-С.Пет.



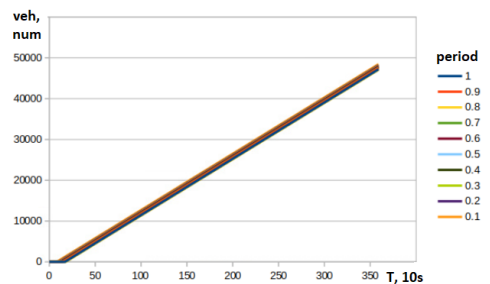
(f) С.Пет. дясно



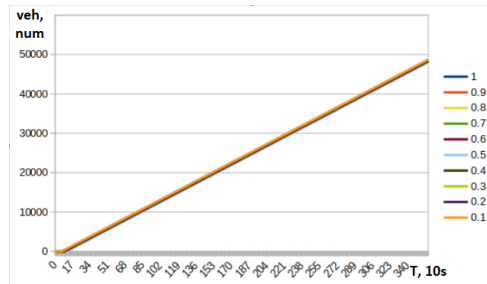
(g) Метро



(h) Изт.-Хр.Б.



(i) Менд.-С.Пет.



(j) Тол.-С.Пет.

Фигура 46: Криви на обслужване на пътните мрежи от фигура 18 при различни натоварвания

Д. Максимален запас

Таблица 12: Максимален запас при синтетични натоварвания в брой превозни средства

	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
СПет-д	32	37	41	45	51	58	67	72	82	87
СПет-л	24	24	27	30	35	39	42	42	42	42
Изт-ХрБ	19	19	19	21	25	25	29	38	39	47
Тол-СПет	35	39	38	41	41	42	46	47	49	57
Меңд-СПет	32	35	36	43	41	41	43	49	51	60
Тол-Спет+	92	80	103	98	101	111	103	117	125	121
Изт-Меңд	70	65	79	86	82	85	91	91	92	93
Метро-СПет	108	93	117	106	113	127	157	150	148	168
Метро	62	90	95	100	109	114	107	109	114	126
Зкръст	59	61	76	69	82	92	96	92	112	164
4кръст	26	31	38	42	52	63	69	85	108	227
Р-Осв,КнМл-ХрБ	254	315	433	556	817	1034	992	882	672	505
Р-Осв,КнМл-ХрБ-л	266	421	476	526	645	623	531	465	371	644
Р-Осв,КнМл-ХрБ-д	210	243	337	422	501	479	440	495	414	596
Р-Осв,КнМл-ХрБ-лг	351	290	395	300	318	263	209	314	491	898
Р-Осв,КнМл-ХрБ-лд	191	200	194	199	160	189	235	290	405	508
Р-Осв,КнМл-ХрБ-дг	234	280	271	281	275	213	223	278	363	444
Р-Осв,КнМл-ХрБ-дд	316	326	336	332	325	284	309	362	468	603

Е. Максимално виртуално закъснение

Таблица 13: Максимално виртуално закъснение при синтетични натоварвания, в секунди

	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
СПет-д	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
СПет-л	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
ИзТ-ХРБ	80	70	80	80	70	70	70	70	70	60
Тол-СПет	90	90	90	90	90	110	90	80	80	60
Меңд-СПет	170	150	180	140	120	120	130	110	100	80
Тол-СПет+	360	330	360	320	360	320	260	270	260	180
ИзТ-Меңд	450	330	610	530	550	530	480	460	410	270
Метро-СПет	230	650	1100	890	910	950	730	800	720	390
Метро	680	880	890	850	890	800	820	690	600	410
Зкръст	380	390	430	380	520	480	470	340	290	450
4кръст	210	200	230	210	260	230	230	230	210	500
Р-Осв,КнМл-ХрБ	300	330	400	490	660	910	360	1290	1510	2160
Р-Осв,КнМл-ХрБ-л	350	470	480	750	900	1150	1500	1860	2170	2520
Р-Осв,КнМл-ХрБ-д	260	280	340	560	700	1130	1260	1450	1920	2400
Р-Осв,КнМл-ХрБ-лг	920	950	1240	1290	1450	1530	1890	2130	2380	2600
Р-Осв,КнМл-ХрБ-лд	1000	1050	1450	1460	1640	1960	2020	2200	2360	2600
Р-Осв,КнМл-ХрБ-дг	520	480	630	840	1060	1550	1680	1890	2160	2050
Р-Осв,КнМл-ХрБ-дд	590	740	830	1070	1200	1400	1720	2010	2160	2430

Г. Средна грешка и средно виртуално закъснение при конкатенация

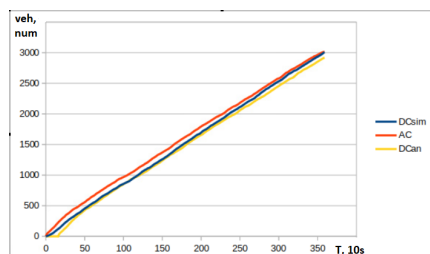
Таблица 14: Средно виртуално закъснение между полуаналитична и симулационна крива на напускане при конкатенация на възли, в секунди

	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
Р-Осв,КнМл-ХрБ	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600
Р-Осв,КнМл-ХрБ-л	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600
Р-Осв,КнМл-ХрБ-д	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600
4 кръст	2296	2301	2290	2276	2193	2205	2227	2271	2263.0	1953
3 кръст	894	876	923	1015	903	854	931	1047	1068	924
Метро-СПет	1148	692	340	445	349	272	479	468	594	827
Изт-Менд	86	73	33	30	41	21	10	11	35	94
Тол-СПет+	2	2	4	0	0	1	13	7	13	53

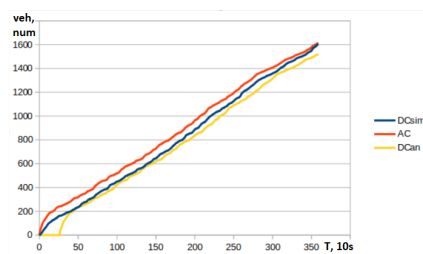
Таблица 15: Средна грешка между полуаналитична и симулационна крива на напускане при конкатенация на възли, в %

	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
Р-Осв,КнМл-ХрБ	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Р-Осв,КнМл-ХрБ-л	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Р-Осв,КнМл-ХрБ-д	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4 кръст	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3 кръст	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Метро-СПет	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Изт-Менд	0.01	0.0	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.01	0.0
Тол-СПет+	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.0

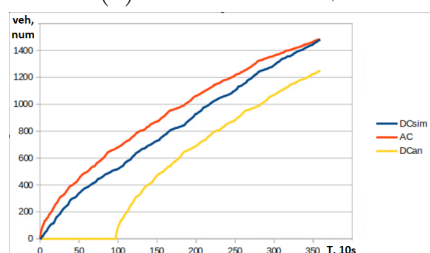
Г. Симуляционни и полуаналитични криви на напускане при конкатенация



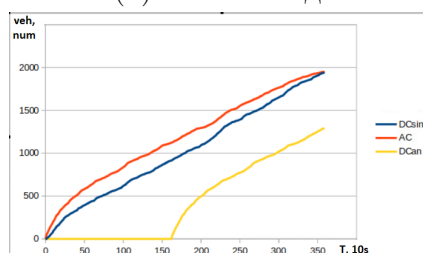
(a) Тол.- Скт. П.+



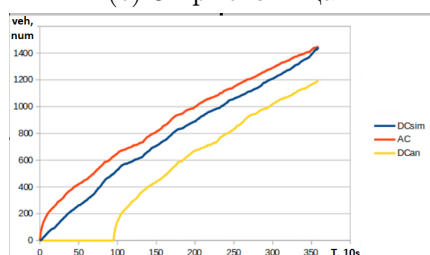
(b) Изт. - Менд.



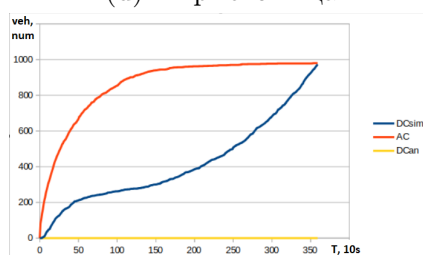
(c) 3 кръстовища



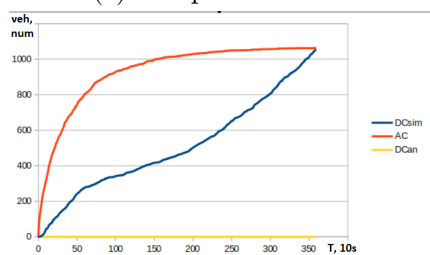
(d) 4 кръстовища



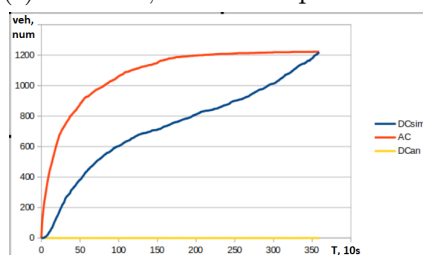
(e) Метро - Скт. П.



(f) P.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - ляво



(g) P.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - дясно



(h) P.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б.

Фигура 47: Криви на пристигане, симуляционни и полуаналитични криви на напускане с период 0.1