

## СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИ ОТ МОДЕЛИРАНЕ НА ТРАНСПОРТЕН ТРАФИК В СИМУЛАЦИОННИ СРЕДИ

Йоана Иванова, Йорданка Бонева

## COMPARATIVE ANALYSIS OF RESULTS OF TRAFFIC MODELLING IN SIMULATION ENVIRONMENTS

Yoana Ivanova, Yordanka Boneva

**Резюме:** В разработката са представени възможностите на различни симулационни продукти за агентно-базираното моделиране на сложни процеси, свързани с управление на транспортен трафик в градска среда. Теоретичната рамка съдържа описание на базов алгоритъм за управление на трафика в единично кръстовище с оглед на по-доброто разбиране на експерименталната част, в която е обяснено кои входни параметри са ключови за провеждане на ефективно симулационно изследване за нуждите на градската транспортна инфраструктура. Подборът на симулационни среди е направен въз основа техните специфични характеристики след оценка по редица основни критерии. Научно-приложният принос на изследването се изразява в сравнителен анализ на генерираните симулационни резултати в съответните софтуерни продукти, чрез който авторът цели да докаже тяхната надеждност и приложимост.

**Ключови думи:** симулационно моделиране, транспортен трафик, агентно-базирана визуализация

**Abstract:** In the paper are presented the possibilities of various simulation products for agent-based modelling of complex processes related to traffic management in urban environments. The theoretical framework contains a description of a basic algorithm for traffic management at an intersection in order to better understand the experimental part in which is explained which input parameters are key for conducting an effective simulation study for the needs of the urban transport infrastructure. The selection of simulation environments is based on specific characteristics after evaluation by a number of basic criteria. The scientific and applied contribution of the research is expressed in a comparative analysis of the generated simulation results in the relevant software products, through which the author aims to prove their reliability and applicability.

**Keywords:** simulation modelling, transport traffic, agent-based visualization

### 1. ВЪВЕДЕНИЕ

Възможностите на метода на симулационното моделиране и агентно-базираната визуализация при изследване на транспортен трафик могат да бъдат онагледени чрез сравнителен анализ на резултатите, генерирани при симулация на движението на автомобили в единично кръстовище с използване на различни симулационни продукти. В конкретното емпирично изследване са избрани следните симулационни продукти: NetLogo 5.2.1, Aimsun 8.0 и съвместното използване на Microsoft Visual C++6.0 и MatLab 7.0. Всеки от тях се характеризира с определени специфики и предимства при провеждане на симулационни изследвания, които предстои да бъдат представени в разработката.

NetLogo е Java базиран многоагентен език за моделиране, който поддържа агенти и едновременност, давайки възможност за 2D и 3D симулация и визуализация на голямо разнообразие от природни, научни и обществени процеси и явления [1].

Aimsun 8.0 е разработен за изпълнение на динамични симулации на различни трафични мрежи, като управлението на трафика се изразява в синхронизиране на сигнала с цел на база на измерените в реално време параметри от детекторите да се постигне висока

ефективност при търсене на трафик. Симулационното време, времето за стартиране на симулацията, времето за реакция, зоните на смяна на платното са ключови параметри при провеждане на експерименталното изследване. Генерират се резултати за редица параметри, сред които основните са поток от превозни средства за единица време, средна скорост на превозните средства в даден участък, средно закъснение на превозно средство (фиксирано или променливо), среден брой спирания и средна дължина на опашката от превозни средства на лента от кръстовище [2].

Microsoft Visual C++ (MSVC или VC++) е среда за разработка на Microsoft за програмните езици C, C++ и C++/CLI. Инструментариумът ѝ включва средства за разработване и дебъгване на C++ код, написан за Microsoft Windows API (приложно-програмен интерфейс) и др. [3].

Софтуерът за числен анализ MATLAB („съкращение от „MATrix LABoratory“) може да се преведе като „матрична лаборатория“ и по своята същност представлява „самостоятелен програмен език от четвърто поколение“. Създаден е корпорация The MathWorks с цел извършване на сложни математически изчисления от линейната алгебра и аналитичната геометрия, графична визуализация на функции, формализация на алгоритми, разработка на различни видове интерфейси (от тип „човек-машина“) и др. [4, 5].

При изпълнение на симулации на транспортния трафик в системен модел на единично кръстовище Системата за контрол на сигнализацията (TSCS – Traffic Signal Control System) изпълнява ключова роля. Основни нейни компоненти са интелигентните светофари, в които се използват програмируеми микропроцесорни контролери. Свързването на интелигентните светофари се осъществява чрез комуникационна мрежа. Управлението на цялата система е централизирано и се реализира чрез централен компютър или компютърна мрежа.

Управлението на трафика в единично кръстовище се осъществява чрез алгоритъм за трафик на комуникационни системи (TSCA – Traffic System Communication Algorithm), който се характеризира с:

- *разположение на групите сензори за трафик (TSN - Time-Sensitive Networking) в обхвата на една базова станция;*
- *функционалности за откриване и контрол на комуникационни пътеки между TSN клетките и базовата станция;*
- *възможности за създаване на интерфейс с управлението на контролната система.*

Чрез прилагане на този алгоритъм се цели да се гарантира успешна комуникация между отделните системни компоненти в TSCS, за да се определи времевата продължителност за всички цикли на светофара.

Същинската част на изложението е структурирана в три раздела. В секция 2 се акцентира върху същността и предназначението на алгоритъма TSCA, на който се основава експерименталното изследване, проведено в изградения с помощта на Microsoft Visual C++6.0 и Matlab 7.0 симулатор. В секция 3 е обяснено по какъв начин функционира избраният като референтен симулационен модел на трафик в градска среда от вградената библиотека на симулационния продукт NetLogo 5.2.1. Оценка на използваните софтуерни продукти по избрани критерии и сравнителен анализ на симулационните резултати, получени при използването им, са представени в секция 4.

## 2. СЪЩНОСТ И ПРЕДНАЗНАЧЕНИЕ НА АЛГОРИТЪМА TSCA

Ефективността на математическите алгоритми се определя от тяхната гъвкавост и устойчивост предвид непрекъснато изменящите се условия на средата и от това доколко тяхното използване е рентабилно. Предстои да бъде разгледан базов алгоритъм за

управление на светофари, който е в основата на вградените алгоритми в професионалните симулационни продукти.

В безжичните сензорни системи, които се използват за наблюдение и контрол на трафика, разпределянето на контролните алгоритми се извършва от базовата станция. Необходимо е да бъдат създадени комуникационни и контролни алгоритми, чрез които да се извършва координация на подсистемите с цел да се постигне ефективно управление на трафика върху голям брой кръстовища.

При създаване на такива алгоритми е необходимо да се вземат предвид редица характеристики, свързани с кръстовищата и разстоянията между тях, средните скорости за всички кръстовища в изследвания участък, тип и дължина на опашките от превозни средства. За коректното провеждане на изследването се налага да се направи предварителен логически анализ на входните параметри на база на потенциалното поведение на участващите в симулацията агенти.

Броят и времето на изчакване на превозните средства, които преминават през дадено кръстовище, са променливи величини, поради което не могат да бъдат абсолютно точно определени. Наличието на множество кръстовища също предполага високо ниво на неопределеност, поради което всяка страна на светофара се моделира като класическа система за масово обслужване.

При постоянен (стационарен) режим на работа и едно обслужващо устройство входящият поток се приема за безкрайна опашка, а времето за обслужване и дължините на интервалите между постъпващите заявки е с експоненциално (Поасоново) разпределение. То се използва в случаите, когато дадено събитие се описва чрез случайни дискретни величини, като например брой превозни средства, които преминават през кръстовище за определен времеви интервал.

Същественото при стационарния поток е, че при него вероятността  $P$  за поява на  $m$  заявки в интервал от време  $[T_0, T_0+t]$  с дължина  $t$  е еднаква във всеки момент. Когато интервалът от време е безкрайно малък (например под 10 [s]), едновременната поява на повече от една заявка в рамките на този интервал е невъзможна при реални условия.

Математически разпределението на Поасон се представя с формулата [6]:

$$P(n) = P(X = n) = e^{-\lambda} \lambda^n / n!, \quad (1)$$

където:

- $X$  – случайна величина, която може да заема само натурални стойности  $\{0, 1, 2, 3 \dots n \dots\}$ ;
- $e$  – основа на натуралния логаритъм (2.718281828);
- $n!$  – факториел е функция на цялото число  $n$  ( $n \in Z$ ), равна на произведението на всички естествени числа, по-малки или равни на  $n$ :

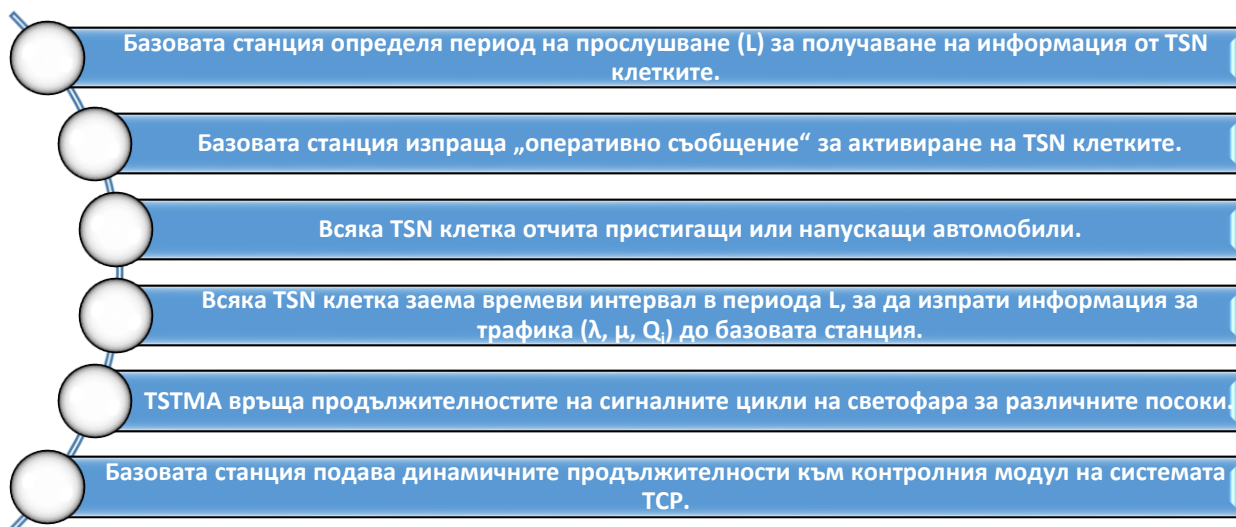
$$n! = (n-1)! n \quad (2)$$

- $\lambda$  – интензивност на заявките.

Друга формулировка на същото разпределение включва параметъра време ( $T$ ) и дава възможност за определяне на вероятността за наблюдаване на  $n$  дискретни събития за интервал от време  $T$ , когато средният брой независими събития за единица време е  $\lambda$ :

$$P_\lambda(n, T) = e^{-\lambda T} (\lambda T)^n / n! \quad (3)$$

Алгоритъмът TSCA се изразява в последователност от операции, които са представени схематично на Фиг. 1 [7, 8].



Фиг. 1. Агентно-базирана визуализация на симулационен модел на трафик в градска среда и графично представяне на генерираните симулационни резултати.

Първата стъпка от всеки алгоритъм е свързана с въвеждане на следните входни параметри:

- *брой заявки в системата ( $N$ );*
- *средна скорост на постъпване за всяка лента ( $\lambda$ );*
- *скорост на обслужване на автомобила ( $\mu$ );*
- *средна дължина на опашката ( $Q_i$ );*
- *средно време за изчакване ( $W_i$ );*
- *средно време, прекарано в системата ( $W$ ) [9, 10]*

Базовият модел за еднично кръстовище се базира на класическа система за масово обслужване със следните параметри:

- *дължина на опашката ( $Q_L$ )* – в период „зелено“ опашката съдържа постъпващи и заминаващи превозни средства, а в период „червено“ –само постъпващи превозни средства.
- *случайни пристигания* - средната скорост на постъпване за всяка лента  $\lambda = \text{const}$ ;
- *експоненциални времена на обслужване* - пропорция от време, в което даден светофар е свободен ( $P_0$ ); пропорция, в която системата е натоварена ( $\rho$ ); средно време, прекарано в системата ( $W$ ).

Дължината на опашката може да бъде определена по два начина [11, 12]:

- *чрез формула:*

$$Q_L = \rho^2 / (1 - \rho) \quad (4)$$

- *чрез закон на Литъл:*

$$Q_L = \lambda W \quad (5)$$

С това възможностите на алгоритъма не се изчерпват, тъй като е необходимо да се предвидят вариации в дължините на опашката, които могат да бъдат изразени математически. Очакваната дължина на опашката за следващ цикъл  $j$   $Q_{Lj}$  се изчислява по формулата:

$$Q_{Lj} = Q_{Lj-1} + \lambda_G G - \mu_G G + \lambda_R R, \quad (6)$$

където:

- $Q_{Lj-1}$  - брой оставащи превозни средства (дължина на опашката) от предишен цикъл ( $j-1$ );
- $\lambda_G G$  – брой превозни средства, постъпващи през „зелена фаза“ ( $\lambda_G$  – скорост на пристигане през „зелена“ фаза;  $G$  - „зелен“ период от дадена фаза в секунди);
- $\mu_G G$  – брой превозни средства, заминаващи през „зелена фаза“ ( $\mu_G$  – скорост на обслужване на превозното средство през „зелена“ фаза;  $G$  – „зелен“ период от дадена фаза в секунди);
- $\lambda_R R$  – брой превозни средства, постъпващи през „червена фаза“ ( $\lambda_R$  – скорост на пристигане през „червена“ фаза, като  $\lambda_R = \lambda_G$  в рамките на същия цикъл;  $R$  - „червен“ период от дадена фаза в секунди, като  $R = T - G$ ).

Към петата операция в схемата на Фиг. 1, свързана с TSTMA (Traffic Signals Time Manipulation Algorithm), е необходимо да се направи пояснението, че този алгоритъм има за цел на база на TSCA да се извърши оптимизация на трафика чрез по-добра синхронизация на сигнализацията на светофарите във всяко от кръстовищата и респективно в цялата мрежа.

### 3. СИМУЛАЦИОНЕН МОДЕЛ НА ТРАФИК В ГРАДСКА СРЕДА В NETLOGO 5.2.1

Предстои да бъде представен симулационен модел на трафик в градска среда от вградената библиотека на софтуер NetLogo 5.2.1, който е описан в Глава пета на книгата „Въведение в агентно-базираното моделиране: моделиране на природни, социални и инженерни сложни системи с NetLogo“ (Кеймбридж, 2015) и поради своята надеждност е избран като референтен [13].

Симулационният модел дава възможност за контрол на системата за сигнализация на светофарите и глобалните променливи (скорост и брой на автомобилите), поради което е подходящ за изследване на динамиката на трафика. Моделът функционира по следния начин:

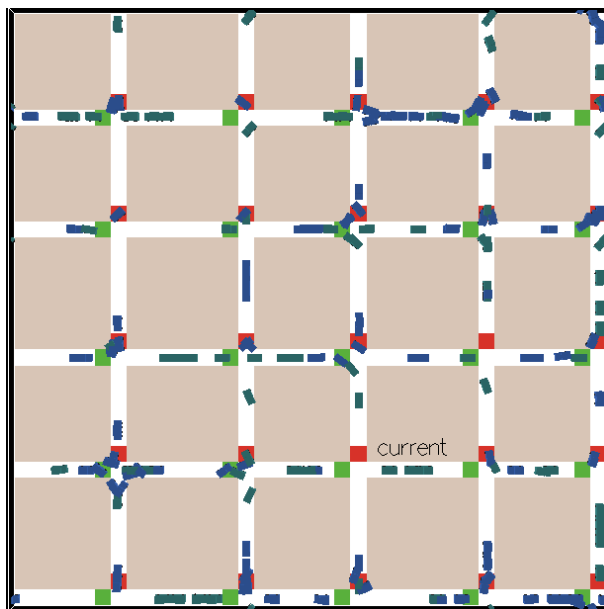
- **„на всяка стъпка автомобилите се изправят пред следващата дестинация, до която се опитват да стигнат („работа“ или „у дома“) и се опитват да се придвижат напред с текущата си скорост“** – това означава, че ако текущата им скорост е по-малка от приетото ограничение на скоростта и пред тях няма друг автомобил, те ускоряват. Респективно, ако автомобилът пред тях се движи с по-ниска скорост от него, те синхронизират скоростта си с тази на по-бавно движещия се. Логичното решение на агентите, ако пред тях има червена светлина или спрял автомобил, е и те на свой ред да спрат.
- **всеки селектиран автомобил може да има жълта („у дома“) или оранжева („работа“) маркировка** – двата режима (състояния) се редуват последователно в права и обратна посока.

- *светлината може да бъде променяна по време на симулацията по желание на потребителя* - светлините могат да се сменят автоматично и еднократно по време на един трафик цикъл, като всички светлини автоматично се променят в началото на всеки нов цикъл. Промените в състоянието на светлината става с натискане на следните бутони: *current-auto*, *current-phase* и *Change light*.

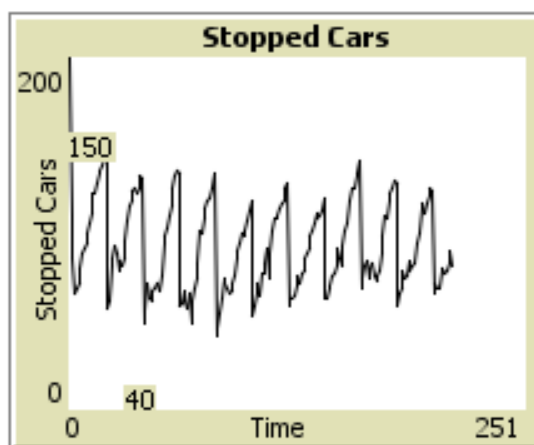
С помощта на симулационния модел могат да бъдат измерени следните параметри, които се визуализират графично:

- *брой на спрелите автомобили с течение на времето;*
- *средна скорост на автомобилите;*
- *средно време на изчакване на автомобилите* - средното време на спиране на автомобилите [14].

Агентно-базираната визуализация на избрания модел е показана на Фиг. 2. Ако броят на всички кръстовища в мрежата е  $n = 25$ , а  $Q_{grid} = 150$  [veh] е приблизителната пикова стойност на дължината на опашката за цялата мрежа при  $D = 20$  [s] (Фиг. 3), може да се направи условно допускане, че за едно кръстовище дължината на опашката е приблизително  $Q = Q_{grid} / n = 6$  [veh].



Фиг. 2. Агентно-базирана визуализация на трафик в градска мрежа от 25 кръстовища.



Фиг. 3. Брой на спрелите автомобили в градска мрежа от 25 кръстовища.

#### 4. ОЦЕНКА НА ИЗБРАНИТЕ СИМУЛАЦИОННИ ПРОДУКТИ И СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА ГЕНЕРИРАНИТЕ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

Таблица 1 представлява сравнителна характеристика на избраните симулационни продукти, като предимствата им са оценени на база на следните критерии:

- **достъпност** – определя се предимно от това дали продуктът е с отворен код, но е от значение и дали се инсталира лесно, съвместим ли е с различни операционни системи и т.н. За разлика от Aimsun 8.0 и MatLab NetLogo е с отворен код, което представлява предимство в сравнение с другите два симулационни софтуера. Освен това NetLogo не изисква голяма компютърна изчислителна мощност, докато за работа с Aimsun и MatLab това е необходимо. И трите симулационни продукта работят под Windows, Linux и Mac.
- **сложност** – определя се от методиката за работа с продукта и по-конкретно от това дали се изискват умения за програмиране или се използват вградени алгоритми, дали софтуерът разполага с „приятелски“ интерфейс и вградена библиотека с модели. В известен смисъл този критерий е относителен, защото се определя от възможностите на потребителя. Често изискванията за владение на сложни програмни езици затрудняват средностатистическия потребител, но наличието на вградени модели с достъпен програмен код спомага за по-доброто разбиране на начина, по който те функционират. Освен това самите програмни езици са с различна сложност. От тази гледна точка MatLab се отличава с по-висока сложност в сравнение с NetLogo. Това предполага богати възможности за провеждане на изследвания, но завишава изискванията към потребителите на продукта.
- **инструментариум** – богатият инструментариум осигурява големи възможности за въвеждане на специфични настройки с цел да се прецизира изследването и да се генерират достоверни и надеждни резултати. Въпреки че се различават по редица показателни (интерфейс, настройки, методи на работа), всички изследвани софтуерни продукти разполагат с богат инструментариум. Например за разлика от другите два продукта, Aimsun 8.0 разполага с възможности за импортиране, модифициране и експортиране на селектирани участъци от карта поради своята съвместимост с Google Earth.
- **визуализация** – съвременните симулационни продукти разполагат с възможности за агентно-базирана визуализация и за графично представяне на изходните резултати. Предимство е възможността за интерактивна визуализация.

Таблица 1. Сравнителна характеристика на симулационни среди Aimsun 8.0, NetLogo 5.2. и MatLab 7.

КРИТЕРИИ ЗА ОЦЕНКА	NETLOGO 5.2.1	AIMSUN 8.0	MATLAB 7
ДОСТЪПНОСТ	Отворен код, онлайн	Лиценз, онлайн	Лиценз, онлайн
СЛОЖНОСТ	Средна	Средна	Висока
ИНСТРУМЕНТАРИУМ	Богат	Богат	Богат
ВИЗУАЛИЗАЦИЯ	2D/3D агентно-базирана, интерактивна, графична	2D/3D агентно-базирана, графична	Интерактивна, графична



Въпреки необходимостта от подобрения в транспортния сектор, в България са реализирани симулационни изследвания, свързани с оптимизация на трафика. Пример може да бъде даден с Проект BG BG051PO001-3.1.07-0062 „Подобряване на интердисциплинарните умения и взаимодействието с бизнеса на специалистите по телекомуникации“ в частта му, свързана с IP базирана Транспортно-комуникационната система и по-конкретно с разработката на алгоритми с високо ниво на ефективност и адаптивност, които да спомагат за оптимизация на транспортния трафик [15].

Изборът на фаза на светофара е много важен в алгоритъма за времево манипулиране на светофарите, който се изпълнява в базовата станция и използва информацията, събрана в нея от TSN клетките, които отговарят за:

- **засичането на превозните средства;**
- **преброяването на превозните средства;**
- **периодично предаване на информация до базовата станция.**

TSN клетките трябва да бъдат минимум две, като едната е разположена преди светофара и отчита постъпването на превозно средство в кръстовището, а другата (след него) – отчита напускането му и вариациите в дължината на опашката по всички ленти на движение. Клетките се инсталират директно в пътното платно в отвори, които са центрирани във всяка лента. Разстоянията между тях и светофарите се избират така, че да се образува опашка от средно 8 автомобила. Изборът на фаза е динамичен и зависи от лентите, в които опашките са най-големи. Селекцията се прави за всеки цикъл и няма фиксирана подредба на фазите. Средната продължителност на един трафик цикъл ( $T$ ) е 15 [s].

Направени са следните допускания:

- **разпределението на превозните средства, които влизат в кръстовището, е неравномерно;**
- **времето на изчакване е неравномерно;**
- **средните скорости за всички кръстовища в участъка са постоянни;**
- **разстоянията между всяка двойка кръстовища са фиксирани и равни на предварително заложена базова дистанция ( $d$ ).**

Таблица 2 съдържа генерираните симулационни резултати съответно в среда NetLogo 5.2.1 (референтен модел  $M_{Ref}$ ), в използвания от автора софтуер Aimsun 8.0 (симулационен модел  $M_1$ ) и в цитираното изследване, проведено с използване на Microsoft visual C++ 6.0 и MatLab 7.0 (симулационен модел  $M_2$ ). В третия случай обект на изследването е единично кръстовище с общо 12 ленти при средна продължителност на един трафик цикъл  $T = 90$  [s] и период от 150 трафик цикъла.

При симулационен модел  $M_1$  е разгледано единично кръстовище. Моделирането на единично кръстовище предполага използването на микросимулация, при която се изчисляват скорост, местоположение, поведение на изпреварване и други характеристики на всяко едно превозно средство в симулираната мрежа. За геометрията на пътя на симулираното кръстовище е събрана информация на място. Това е светлинно сигнално регулирано кръстовище в град София, което се характеризира с по-дълги опашки по основно направление (булевард) при червен сигнал според извършени наблюдения. Кръстовището е пресечна точка на булевард с по-малка улица.

Необходимо е да се отбележи, че в авторското изследване със софтуер Aimsun 8.0 са генерирани резултати за опашките в цялото единично кръстовище, докато в третия случай отделно са генерирани резултати съответно за трите опашки от източната лента. При 1 трафик цикъл с продължителност 90 [s] за  $Q_{EL} = 20$  [veh], за  $Q_{EF} = 25$  [veh] и за  $Q_{ER} = 10$  [veh]. Авторът е приел да работи с осреднената стойност на дължина на опашките от източната лента.



Следователно, ако бъде направено условно допускане, че средната дължина на опашките от източната лента за едно платно е 18.33 [veh] при  $T = 90$  [s], то следва, че при средна продължителност на сигнализация на зелената светлина  $D = 20$  [s],  $Q = 4.05$  [veh] за едно платно. Респективно в авторското изследване в Aimsun 8.0 при  $D = 20$  [s] и  $Q = 32$  [veh] в цялото кръстовище,  $Q = 4$  [veh] в едно платно.

От направения анализ следва изводът, че при двете аналогични изследвания с Aimsun 8.0 и MatLab 7.0 са генерирани близки резултати, които сравнени с получените резултати от симулацията, проведена с избрания референтен модел в NetLogo 5.2.1, отразяват реалистично нормална пътно-транспортна обстановка в градска среда, доколкото това е възможно предвид, че съществува известна неопределеност.

В случая тя произтича от неравномерното разпределение на превозните средства в платната от дадено кръстовище в зависимост от автомобилния поток при спокоен и натоварен трафик. На база на визуализацията, показана на Фиг. 1, може да се направи извод, че обикновено три от платната в кръстовищата са натоварени. В четвъртата колона на Таблица 2 са представени долната и горната граница на диапазоните (минимален и максимален брой на автомобилите в опашките) за едно платно при спокоен трафик, а в петата колона – средните стойности на дължините на опашките  $Q_{average}$ . При натоварен трафик тези стойности могат да се повишат до няколко пъти.

Таблица 2. Резултати за дължините на опашките ( $Q$ ), генерирани при симулации, изпълнени в три различни среди.

	СИМУЛАЦИОНЕН МОДЕЛ	D [s]	Q [VEH]	Q <sub>AVERAGE</sub> [VEH]
NETLOGO 5.2.1	$M_{Ref}$	20	2 ÷ 6	4
AIMSUN 8.0	$M_1$	20	4 ÷ 12	8
MATLAB 7.0	$M_2$	20	4 ÷ 12	8

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На база на направената оценка на избраните симулационни среди и сравнителния анализ на получените симулационни резултати от представените емпирични изследвания може да се направи извод, че агентно-базираното моделиране е ефективен метод за изследване на транспортния трафик в градска среда. Предвид своята достоверност експерименталните резултати могат да бъдат използвани за продължаване на изследването в посока на оптимизация на транспортния трафик в полза на „зелената вълна“, което е актуален проблем, пред който са изправени предимно големите градски структури.

Освен това неефективното управление на трафика оказва негативно въздействие върху околната среда, което се изразява в повишени концентрации на вредни емисии във въздуха. Симулационни продукти от висок клас, като например Aimsun 8.0, дават

възможност за разширяване на изследването и в друга посока, а именно в провеждане на серия от симулации, свързани с измерване на количеството вредни вещества, които се отделят по време на натрупванията от автомобили в градска среда.

**ЛИТЕРАТУРНИ ИЗТОЧНИЦИ:**

- [1] *NetLogo* [online]. [viewed 15 November 2021]. Available from: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo>
- [2] Aimsun 8 Users' Manual. *Scribd* [online]. May 2014 [viewed 15 November 2017]. Available from: <https://www.scribd.com/document/266245543/Aimsun-Users-Manual-v8>
- [3] Visual C++. *Wikipedia* [online]. [viewed 5 November 2021]. Available from: [https://bg.wikipedia.org/wiki/Visual\\_C%2B%2B](https://bg.wikipedia.org/wiki/Visual_C%2B%2B)
- [4] Getting Started with MATLAB. *MathWorks* [online]. [viewed 15 November 2021]. Available from: <https://www.mathworks.com/products/matlab/getting-started.html>
- [5] Разпределение на Поасон. *Уикипедия* [онлайн]. [прегледан 6 декември 2021]. Достъпен на: [https://bg.wikipedia.org/wiki/Разпределение\\_на\\_Поасон](https://bg.wikipedia.org/wiki/Разпределение_на_Поасон)
- [6] MATLAB. *Wikipedia* [online]. [viewed 15 November 2021]. Available from: <https://bg.wikipedia.org/wiki/MATLAB>
- [7] Traffic report study 2007. *Municipality of Greater Amman* [online]. [viewed 15 May 2020]. Available from: <http://www.ammancity>
- [8] *A Summary of Vehicle Detection and Surveillance Technologies Used in Intelligent Transportation Systems* [online]. The Vehicle Detector Clearinghouse, Southwest Technology Development Institute, 2007 [viewed 15 November 2021]. Available from: <https://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/pubs/vdstits2007/vdstits2007.pdf>
- [9] *Portable non-intrusive traffic detection system* [online]. Minnesota Department of Transportation [viewed 5 November 2021]. Available from: <http://www3.dot.state.mn.us/guidestar/pdf/pnits/techmemo-axlebased.pdf>
- [10] COLERI, Sinem, CHEUNG, Sing-Yiu and Pravin VARAIYA. Sensor Networks for Monitoring Traffic. *Proceedings of the 42nd Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*. 2004, pp. 32-40. ISBN 978-160-423-660-6.
- [11] AKYILDIZ, Ian, F., SU, Weilian, SANKARASUBRAMANIAM, Yogesh. and Erdal CAYIRCI. A Survey on Sensor Networks. *IEEE Communications Magazine* [online]. 2002, vol. 40, 2002, pp. 102-114 [viewed 6 December 2021]. ISSN 0163-6804. IEEE Xplore. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1024422>
- [12] KNAIAN, Ara N. *A Wireless Sensor Network for Smart Roadbeds and Intelligent Transportation Systems*. Electrical Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [13] RAND, Willian and Uri WILENSKY. *An Introduction to Agent-Based Modeling: Modeling Natural, Social and Engineered Complex Systems with NetLogo*. Cambridge, MA: MIT Press, 2015. ISBN 978-026-273-189-8.
- [14] RAND, Willian and Uri WILENSKY. Traffic Grid Goal model, Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling. *NetLogo* [online]. Evanston: Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, 2008 [viewed 6 December 2021]. Available from: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/TrafficGridGoal>
- [15] Проект „Подобряване на интердисциплинарните умения и взаимодействието с бизнеса на специалистите по телекомуникации“, Договор № BG051PO001-3.1.07-0062, финансиран от МОН по ОПРЧР [онлайн]. Нов български университет, Департамент Телекомуникации на НБУ [прегледан 6 декември 2021]. Достъпен на: <https://telecommunications.nbu.bg/bg/proekt-podobrkvane-na-interdisciplinarnite-umeniq-i-vzaimodejstviето-s-biznesa-na-specialistite-po-telekomunikacii>

**Информация за авторите:**

Ас. д-р Йоана Иванова, Департамент „Телекомуникации“ НБУ, ул. Монтевидео 21, e-mail: [yivanova@nbu.bg](mailto:yivanova@nbu.bg)  
 д-р Йорданка Бонева, Програмист в Секция "Разпределени информационни и управляващи системи", Институт по информационни и комуникационни технологии БАН, София 1113, ул. Акад. Георги Бончев, блок 2, стая 2012, e-mail: [yordanka.boneva@iict.bas.bg](mailto:yordanka.boneva@iict.bas.bg)

**Contacts:**

Assist. Prof. Yoana Ivanova, PhD, New Bulgarian University, Department Telecommunications, Sofia, 21 Montevideo St., e-mail: [yivanova@nbu.bg](mailto:yivanova@nbu.bg)  
 Yordanka Boneva, PhD, Programmer in Department of Distributed Information and Control Systems, Institute of Information and Communication Technologies (Bulgarian Academy of Sciences), 1113 Sofia, Akad.G.Bonchev str., bl.2, office 212, e-mail: [yordanka.boneva@iict.bas.bg](mailto:yordanka.boneva@iict.bas.bg)

Дата на постъпване на ръкописа (Date of receipt of the manuscript): 09.07.2021

Дата на приемане за публикуване (Date of adoption for publication): 30.09.2021