



JOANNA A. KAMIŃSKA<sup>1)</sup>  
MIECZYŚLAW CHALFEN<sup>2)</sup>

## THE EFFECT OF DISTANCES BETWEEN VEHICLES ON TIME AND SPEED IN SIMULATED TRAFFIC FLOW

## WPŁYW ODLEGŁOŚCI MIĘDZY POJAZDAMI NA CZAS I PRĘDKOŚĆ PRZEJAZDU W SYMULOWANYM RUCHU

**STRESZCZENIE.** W pracy przedstawiono analityczne wyrowadzenie zależności prędkości pojazdów od gęstości ruchu w warunkach ruchu miejskiego. Wykazano, że funkcja prędkości ma postać hiperboliczną zależną od gęstości ruchu, średniej długości pojazdów oraz od wartości oczekiwanej  $E(T)$  odległości między pojazdami wyrażonej w jednostkach czasu. W oparciu o wyznaczoną zależność przeprowadzono szereg symulacji komputerowych w celu zbadania wpływu wartości  $E(T)$  na parametry symulowanego ruchu samochodowego. W przeprowadzonych symulacjach badano średnią prędkość oraz średni czas przejazdu trasy od punktu startowego do punktu docelowego. Wykazano, że zmiana parametru  $E(T)$  w zakresie od 1 s do 4 s skutkuje zmianą średniego czasu przejazdu o od 6,6 do 35,6% oraz średniej prędkości przejazdu o od 3,0% do 18,0% w zależności od liczby pojazdów w symulacji.

**SŁOWA KLUCZOWE:** czas przejazdu, modelowanie ruchu drogowego, odległość pomiędzy pojazdami, symulacja komputerowa.

**ABSTRACT.** The paper presents an analytical derivation of the dependence between vehicle speed and traffic density in urban traffic conditions. It was shown that the speed function is hyperbolic and depends on the density of traffic flow, the average vehicle length and the value of expected distances between vehicles  $E(T)$  expressed in time units. A number of computer simulations were performed on the basis of a defined relationship in order to study the effect of the  $E(T)$  value on the parameters of simulated traffic flow. The average speed and time of traveling the route from the starting point to the destination were tested in the conducted simulations. It was proved that the change in the  $E(T)$  parameter in a range between 1 s to 4 s results in a change in the average travel time from 6.6% to 35.6% and a change in average speed from 3.0% to 18.0%, depending on the number of vehicles in the simulation.

**KEYWORDS:** computer simulation, distance between vehicles, traffic flow modeling, travel time.

DOI: 10.7409/rabdim.017.011

<sup>1)</sup> Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Katedra Matematyki, ul. Grunwaldzka 53, 50-357 Wrocław; joanna.kaminska@upwr.edu.pl (✉)

<sup>2)</sup> Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Katedra Matematyki, ul. Grunwaldzka 53, 50-357 Wrocław; mieczyslaw.chalfen@upwr.edu.pl

## 1. WSTĘP

Zależność funkcyjna pomiędzy prędkością pojazdu a gęstością ruchu  $v(k)$  znajduje się w kręgu zainteresowań zarówno naukowców jak i praktyków zajmujących się modelowaniem [1, 2] oraz optymalizacją zagadnień transportowych. Istotne znaczenie ma poprawne wyznaczenie zależności prędkości od gęstości ruchu, dlatego też w literaturze można znaleźć szereg opracowań prezentujących analizę pomiarów empirycznych parametrów ruchu wraz z różnymi propozycjami analitycznej postaci funkcji  $v(k)$ . Najprostsze modele liniowe pochodzą z pierwszej połowy XX wieku [3], następnie pojawiały się modele eksponencjalne [4-6], logarytmiczne [7], logistyczne [8, 9], w których stopień skomplikowania i liczba parametrów rosła wraz z rozwojem technik komputerowych [10-12].

Obszerną analizę dopasowania analitycznej postaci funkcji  $v(k)$  do danych empirycznych zawarto w [13-15]. Z racji dynamiki zjawiska jakim jest zmieniający się w czasie i przestrzeni potok pojazdów na drogach, empiryczne badanie parametrów ruchu na jezdni jest trudne i kosztowne. Autorzy pracy wyznaczyli teoretyczną zależność prędkości od gęstości ruchu  $v(k)$  na podstawie fundamentalnych praw ruchu [16, 17]. Jednym z parametrów w wyznaczonym równaniu jest odległość między pojazdami pozostającymi w ruchu. Polskie przepisy ruchu drogowego określają jedynie odległość bezpieczną podczas przejazdu przez tunele o długości ponad 500 m, zobowiązując kierujących do zachowania odległości 50 lub 80 m od pojazdu poprzedzającego, w zależności od rodzaju pojazdu [18]. Podana odległość nie jest uzależniona od prędkości poruszania się pojazdu. We Francji bezpieczną odległość między pojazdami uzależniono od ich prędkości poruszania się, określając ją jako czas bezpieczny jaki powinien dzielić jadące po sobie pojazdy. Czas ten określono we francuskim Kodeksie Drogowym jako 2 s [19].

W pracy przedstawiono analizę wpływu przyjętej odległości między pojazdami na średni czas przejazdu w warunkach hipotetycznego ruchu miejskiego. Odległość ta, mierzona w jednostkach czasu, jest, jak wykazano w punkcie 2 niniejszej pracy, parametrem funkcji  $v(k)$  będącej podstawą do uzależnienia prędkości ruchu pojazdu od aktualnej gęstości ruchu na pokonywanym odcinku drogi. Analizę wykonano na podstawie 21 symulacji komputerowych ruchu w mieście przy różnych scenariuszach obciążenia sieci ulic.

## 2. ZALEŻNOŚĆ FUNKCYJNA $v(k)$

Poniżej naszkicowano metodykę określania funkcji prędkości w zależności od gęstości ruchu dokładnie opisaną w pracach [16, 17]. Przyjęto następujące oznaczenia:

## 1. INTRODUCTION

The functional correlation between vehicle speed and traffic density  $v(k)$  is of interest to both researchers and practitioners involved in the modeling [1, 2] and optimization of transport issues. It is important to correctly determine the dependence between speed and traffic density. Therefore, a number of studies presenting the analysis of empirical measurements of traffic flow parameters, together with various analytical propositions of the function  $v(k)$ , can be found in literature. The simplest linear models date back to the first half of the twentieth century [3], followed by exponential models [4-6], logarithms [7] and logistic models [8, 9], where the degree of complexity and the number of parameters has increased with the development of computer techniques [10-12].

A comprehensive analysis of the adjustment of the analytical form of the  $v(k)$  function to the empirical data is presented in [13-15]. Due to the dynamics of the phenomenon of vehicle flow on roads, which changes in time and space, the empirical testing of road traffic parameters is difficult and expensive. The authors of the study determined the theoretical dependence between speed and the density of traffic flow  $v(k)$  on the basis of the fundamental laws of traffic flow [16, 17]. One of the parameters in the derived equation is the distance between vehicles in motion. Polish road traffic regulations only specify the safe distance between vehicles when passing through tunnels over 500 m long and require that drivers maintain a distance of 50 m or 80 m, depending on the type of vehicle, from the preceding vehicle [18]. The given distance does not depend on the speed of vehicle motion. In France, the safe distance between vehicles depends on their speed of movement, which is defined as the safe time between vehicles driving after each other. This time is defined in the French Road Code as 2 s [19].

The paper presents analysis of the effect of the assumed distance between vehicles on the average travel time under hypothetical urban traffic conditions. It was proven in point 2 of this study that this distance, measured in time units, is the parameter of the function  $v(k)$ , which is the basis for determining the dependence between the speed of a vehicle in motion and the current traffic density on the travelled section of a road. The analysis was based on 21 computer simulations of traffic flow in a city with different scenarios of loading street networks.

## 2. FUNCTIONAL DEPENDENCY $v(k)$

The methodology of defining the function of speed in relation to the density of traffic, which is described in detail in

$t_i$  – odległość między  $i$ -tym pojazdem a pojazdem go poprzedzającym mierzona w jednostkach czasu [s],

$d_i$  – długość  $i$ -tego pojazdu [m],

$k$  – gęstość pojazdów na rozważanym odcinku drogi [poj · km<sup>-1</sup>],

$S$  – długość rozważanego odcinka drogi [km],

$v_i$  – prędkość  $i$ -tego pojazdu poruszającego się na rozważanym odcinku drogi [km · h<sup>-1</sup>],

$s_i$  – droga jaką przebędzie pojazd w czasie  $t_i$  [km],

$i = 1..n$ ,

$n$  – liczba pojazdów na jednym odcinku ulicy pomiędzy dwoma węzłami grafu.

Przez odległość  $t_i$  rozumie się czas, jaki  $i$ -ty pojazd (a dokładnie jego najbardziej wysunięty w kierunku ruchu punkt) potrzebuje na pokonanie odległości do pojazdu (a dokładnie jego najbardziej wysuniętego w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu punktu) poprzedzającego go w kierunku jazdy. Odległość między pojazdami wyrażona w jednostkach czasu zwykle określana jest na 1-2 sekundy, czasami nawet na 3 sekundy, w zależności od warunków drogowych [20]. Teoretycznie czas ten, czyli odległość wynikająca z czasu i rzeczywistej prędkości pojazdu powinna zagwarantować bezkolizyjne zatrzymanie się pojazdów w nagłych zdarzeniach drogowych.

Zakładając, że pojazd na odcinku pomiędzy dwoma węzłami grafu porusza się ruchem jednostajnym mamy:

$$s_i = v_i t_i \frac{1}{3600}. \quad (1)$$

Współczynnik  $\frac{1}{3600}$  w powyższym wzorze wynika z przeliczenia różnych jednostek czasu, w których wyrażono prędkość  $v_i$  i odległość  $t_i$ .

Biorąc pod uwagę długość pojazdu wyrażoną w metrach i zapisaną powyżej odległość między pojazdami można zapisać nierówność:

$$\sum_{i=1}^n \left( \frac{d_i}{1000} + \frac{v_i}{3600} \right) \leq S. \quad (2)$$

Zakładając, że wszystkie pojazdy na rozważanym odcinku drogi poruszają się z tą samą prędkością  $v_i = v(k)$  i wprowadzając średnią długość pojazdu w ruchu wyrażoną w metrach  $\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i$  otrzymano:

$$n \frac{\bar{d}}{1000} + \frac{v \cdot n}{3600} \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{n} \leq S. \quad (3)$$

Pojawiający się w zależności (3) człon  $\sum_{i=1}^n \frac{t_i}{n}$  wyraża średnią arytmetyczną wartość odległości mierzonej w jednostkach

studies [16, 17], is presented below. The following designations were adopted:

$t_i$  – the distance between the  $i$ -th vehicle and the preceding vehicle, which is measured in units of time [s],

$d_i$  – the length of the  $i$ -th vehicle [m],

$k$  – the density of vehicles on the considered road section [veh · km<sup>-1</sup>],

$S$  – the length of the considered road section [km],

$v_i$  – the speed of the  $i$ -th vehicle moving along the considered road section [km · h<sup>-1</sup>],

$s_i$  – the distance that the vehicle will travel at the time  $t_i$  [km],

$i = 1..n$ ,

$n$  – the number of vehicles on one road section between two nodes of the graph.

Distance  $t_i$  is the time that an  $i$ -th vehicle (its most forward-moving point) needs to travel a certain distance to a preceding vehicle (its outermost point to the direction of travel) in the direction of travel. The distance between vehicles, expressed in units of time, is usually determined for 1-2 seconds, and sometimes even for 3 seconds, depending on road conditions [20]. Theoretically, this time, which is the distance resulting from time and actual vehicle speed, should ensure the collision-free stopping of vehicles in emergency road events.

Assuming that the vehicle on the road section between two graph nodes is moving with uniform motion, the following is obtained:

$$s_i = v_i t_i \frac{1}{3600}. \quad (1)$$

The coefficient  $\frac{1}{3600}$  in the above formula is derived from

the computation of different time units in which the speed  $v_i$  and the distance  $t_i$  are expressed. Taking into account the length of a vehicle in meters and the above-described distance between vehicles, the following can be described:

$$\sum_{i=1}^n \left( \frac{d_i}{1000} + \frac{v_i}{3600} \right) \leq S. \quad (2)$$

Assuming that all vehicles on the examined road section are moving with the same speed  $v_i = v(k)$  and by introducing the average length of a vehicle in meters  $\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i$ ,

the following was obtained:

$$n \frac{\bar{d}}{1000} + \frac{v \cdot n}{3600} \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{n} \leq S. \quad (3)$$

czasu między pojazdami, która jest estymatorem wartości oczekiwanej rozkładu prawdopodobieństwa odległości między pojazdami poruszającymi się po rozważanym odcinku drogi. W warunkach rzeczywistego ruchu warunek bezpiecznej odległości równej dla wszystkich pojazdów może być utrzymany tylko w nielicznych przypadkach, np. przy spokojnym, jednostajnym ruchu na drogach szybkiego ruchu. W innych przypadkach, a w szczególności w ruchu miejskim, odległość pomiędzy pojazdami zależy od wielu czynników, które są szczegółowo analizowane w [21, 22]. Odległość ta zależy od temperamentu kierowcy, parametrów pojazdu, warunków drogowych [23, 24], warunków atmosferycznych, a także od przyjętej w danym kraju kultury jazdy. Na odległość mają też wpływ przyspieszenie pojazdu oraz skuteczność hamowania. Nie bez wpływu są także stan nawierzchni i fakt, czy ruch odbywa się w warunkach miejskich [23] czy też na drogach szybkiego ruchu. W wielu krajach zalecana odległość wynosi 2 s, w niniejszej pracy założono, że wartość oczekiwana odległości pomiędzy pojazdami zmienia się w zakresie od 1 s do 4 s.

Zakładając zatem, że znany jest rozkład prawdopodobieństwa odległości między pojazdami zachowywanych przez kierowców  $T$  oraz jego wartość oczekiwana  $E(T)$  zależność (3) przyjmuje postać:

$$n \frac{\bar{d}}{1000} + \frac{v \cdot n}{3600} E(T) \leq S. \quad (4)$$

Analogiczne przekształcenia jak przedstawiono w pracy [16] prowadzą do uzyskania zależności prędkości od gęstości ruchu wyrażonej wzorem:

$$v(k) \leq \frac{1}{k} \cdot \frac{3600}{E(T)} \cdot \frac{3,6\bar{d}}{E(T)}. \quad (5)$$

Wśród najważniejszych cech nierówności (5) będącej górnym ograniczeniem prędkości należy wymienić:

- miejsce zerowe dla  $k = \frac{1000}{\bar{d}}$  [poj · km<sup>-1</sup>]. Jest to zatem gęstość, przy której ruch ustaje. Wartość ta nie zależy od odległości między pojazdami, a jedynie od średniej ich długości;
- asymptota pionowa o równaniu  $k = 0$  oznaczająca bardzo szybki wzrost prędkości przy zmniejszającej się do zera gęstości. Oczywiście przy gęstości  $k = 0$  nie ma żadnego pojazdu w ruchu i nie ma sensu mówić o górnym ograniczeniu prędkości. W praktyce dla małych gęstości ruchu ograniczeniem górnym prędkości są parametry techniczne pojazdów oraz przepisy ruchu drogowego redukujące wartości prędkości znacznie poniżej wynikających z rozważań teoretycznych.

$\sum_{i=1}^n \frac{t_i}{n}$ , which is present in dependency (3), expresses the arithmetic mean value of the distance between vehicles measured in time units, which is an estimate of the expected value of the probability distribution of distances between vehicles that move along the considered route. Under real-life conditions, a safe distance for all vehicles can only be maintained in a few cases, e.g. in steady and uniform traffic on fast roads. In other cases, and especially in urban traffic, the distance between vehicles depends on many factors that have been analyzed in detail in [21, 22]. This distance depends on the temperament of a driver, vehicle parameters, road conditions [23, 24], weather conditions and also on the culture of driving in the individual country. The acceleration of the vehicle and the braking performance also affect the distance. The condition of the pavement and the fact that traffic takes place in either urban conditions [23] or fast roads also influence the distance. In many countries, the recommended distance is 2 s. In this paper it is assumed that the expected distance between vehicles varies from 1 s to 4 s.

Therefore, assuming that the probability distribution of the distance between vehicles that is maintained by drivers  $T$  and its expected value  $E(T)$  are known, relation (3) takes the following form:

$$n \frac{\bar{d}}{1000} + \frac{v \cdot n}{3600} E(T) \leq S. \quad (4)$$

Analogous transformations, as in work [16], lead to a dependence between speed and the density of traffic, which is expressed by formula:

$$v(k) \leq \frac{1}{k} \cdot \frac{3600}{E(T)} \cdot \frac{3,6\bar{d}}{E(T)}. \quad (5)$$

The following should be highlighted from the most important features of inequality (5) being the top speed limit:

- null for  $k = \frac{1000}{\bar{d}}$  [veh · km<sup>-1</sup>]. Therefore, it is the density at which movement ceases. This value does not depend on the distance between vehicles, but only on their average length;
- a vertical asymptote with the equation  $k = 0$  denotes a very fast increase in speed with density diminishing to zero. Of course, at a density of  $k = 0$  there is no vehicle in motion and no point in determining the upper speed limit. In practice, for low traffic density, the upper speed limit is the vehicle's technical parameters and the traffic regulations that significantly reduce speed values below those resulting from theoretical considerations.



Należy podkreślić, że wyznaczona zależność stanowi jedynie ograniczenie górne rzeczywistych, występujących w realnym ruchu relacji, ponieważ nie zawiera ograniczeń prawno-technicznych obowiązujących w ruchu drogowym. Wzór (5) został empirycznie zweryfikowany między innymi z wykorzystaniem danych pomiarowych z obwodnicy Atlanty [15, 16]. W artykule na potrzeby modelowania przyjęto hiperboliczną zależność  $v(k)$  według wzoru (5) ograniczając maksymalną prędkość do dopuszczalnej na danym odcinku drogi. Najczęściej w mieście prędkość ta wynosi  $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  i dla takiej prędkości na Rys. 1 przedstawiono wykresy  $v(k)$ .

It should be emphasized that the defined dependency is only the upper limit of real traffic relations because it does not contain the legal and technical constraints that are in force regarding road traffic. Formula (5) was empirically verified, inter alia, using measurement data from the Atlanta bypass [15, 16]. In the paper, the hyperbolic dependency  $v(k)$  according to formula (5), while limiting the maximum speed to the allowable speed along a specific road section, was assumed for modeling purposes. This speed is most often equal to  $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  in the city and Fig. 1 shows the diagrams  $v(k)$  for such a speed.

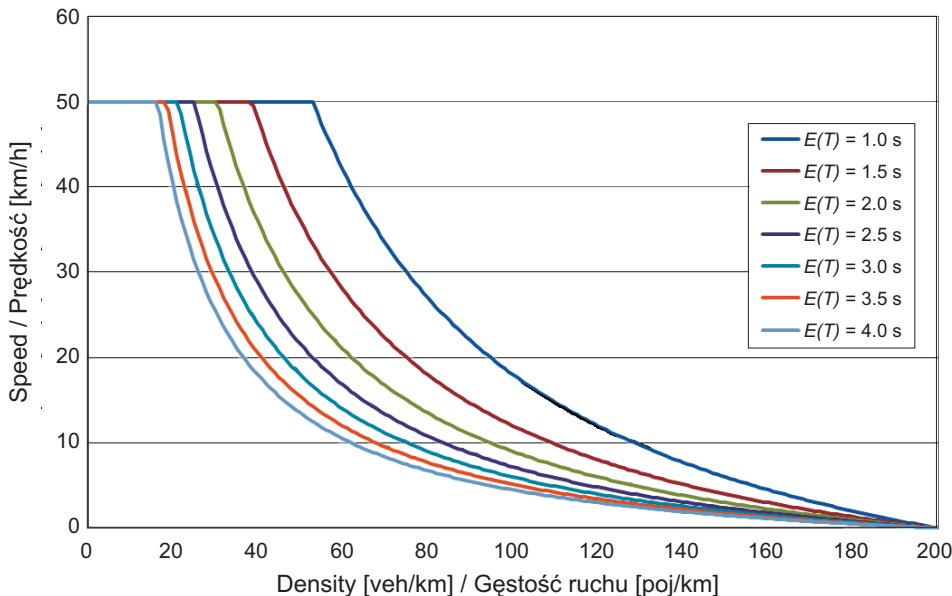


Fig. 1. Graphs of the function  $v(k)$  for different values of expected value of distances between vehicles  
Rys. 1. Wykresy funkcji  $v(k)$  dla różnych wartości oczekiwanych odległości między pojazdami

### 3. OPIS MODELU RUCHU W MIEŚCIE

Ruch samochodowy modelowano z zastosowaniem autorskiego, makroskopowego, ciągłego, deterministyczno-losowego modelu ruchu w mieście. Czas jest dowolnie kwantowany, położenie pojazdów opisane jest ruchem ciągłym. Punkty startowe i docelowe mogą być wyznaczone w sposób deterministyczny lub losowane zgodnie z założonym dwuwymiarowym rozkładem prawdopodobieństwa. Sieć ulic oraz trajektorie ruchu wyznaczone są w sposób deterministyczny. Model składa się z trzech zasadniczych modułów: sieć ulic, charakterystyka zachowania się pojazdu w ruchu, algorytm wyznaczania tras pojazdów. Sieć ulic reprezentowana jest w postaci grafu skierowanego. Węzły grafu odpowiadają skrzyżowaniom ulic lub ich punktom charakterystycznym takim jak łuki, zmiana liczby pasów itp. Każdy węzeł ma określoną nazwę, lokalizację we współrzędnych geograficznych oraz listę węzłów, z którymi jest bezpośrednio połączony. Ramiona grafu odpowiadają odcinkom ulic.

### 3. DESCRIPTION OF THE MODEL OF TRAFFIC FLOW IN A CITY

Car traffic was modeled using an original macroscopic continuous determinist-random model of traffic in a city. Time is freely quantized and the location of vehicles is described by continuous motion. The start and destination points can be determined in a deterministic or randomized manner according to the assumed two-dimensional probability distribution. The street network and traffic trajectories are determined in a deterministic way. The model consists of three basic modules: a street network, the behavior of a vehicle in motion and a vehicle routing algorithm. The street network is represented by a directed graph. The graph nodes correspond to street junctions or their characteristic points such as arcs, changes in number of lanes, etc. Each node has a specific name, geographic location and a list of nodes with which it is directly linked. The graph arms correspond to street sections. Each segment has a defined road capacity i.e. the number of lanes

Każdy odcinek ma zdefiniowaną przepustowość tj. liczbę pasów ruchu w każdym kierunku oraz maksymalną dopuszczalną prędkość poruszania się po nim. Każdy pojazd w modelu ma określoną maksymalną prędkość poruszania się, której nie może przekroczyć nawet gdy parametry drogi na to pozwalają. Założono, że każdy pojazd porusza się po odcinku drogi z maksymalną dopuszczalną przez model na danym odcinku prędkością.

Algorytm modelowania ruchu zawiera następujące komponenty:

- wybór/określenie węzłów startowych i docelowych – mogą być podane jako identyfikator węzła lub losowane z zadaną i zmienną w czasie symulacji, dwuwymiarową funkcją gęstości,
- wyznaczenie trajektorii ruchu każdego pojazdu od startu do celu według ustalonego kryterium (w przykładach – o najkrótszym czasie przejazdu) stosując algorytm Dijkstry [25] wyszukiwania najkrótszej ścieżki w grafie,
- modelowanie zmiennej prędkości ruchu pojazdów podczas symulacji.

Prędkość przejazdu przez każdy odcinek ulicy uzależniona jest od aktualnej w chwili przejazdu gęstości ruchu na tym odcinku według zależności (5) oraz dopuszczalnej prędkości przypisanej do odcinka drogi oraz samochodu. Pojazd przemieszcza się po wyznaczonej w chwili startu trajektorii minimalizującej czas podróży. Dokładniej, wyznacza się optymalną trajektorię obliczając czas przejazdu każdego odcinka pomiędzy węzłami, uwzględniając gęstość ruchu na każdym odcinku w momencie startu pojazdu. Dodatkowo uwzględnia się czas oczekiwania  $t_{ocz}$  na przejazd przez skrzyżowanie według wzoru:

$$t_{ocz} = \min \left\{ 30 \left( \left[ \frac{n}{p} \right] + 1 \right), 180 \right\}, \quad (6)$$

gdzie:

- $t_{ocz}$  – czas oczekiwania na przejazd [s],
- $n$  – liczba pojazdów oczekujących [poj],
- $p$  – przepustowość skrzyżowania w każdym kierunku [poj · min<sup>-1</sup>],
- $[x]$  – funkcja *entier*, część całkowita liczby  $x$ .

Zgodnie z (6) czas oczekiwania nie może przekroczyć 180 s. W symulacjach przyjęto  $p = 15$  poj · min<sup>-1</sup> dla każdego skrzyżowania, przy czym przez skrzyżowanie rozumie się taki węzeł, który ma co najmniej 3 krawędzie. Wyznaczonej w chwili startu trajektorii nie zmienia się w trakcie przejazdu mimo zmieniającej się w czasie i przestrzeni gęstości ruchu.

in each direction and the maximum permissible speed of travel. Each vehicle in the model has a specific maximum speed that cannot be exceeded, even when the road parameters permit it. It was assumed that each vehicle is traveling along a road section at the maximum speed that is allowed by the model at this road section.

The algorithm of modeling traffic includes the following components:

- selection/determination of the start and destination nodes – they can be given as a node identifier or randomized with a two-dimensional function of density,
- determination of the trajectory of each vehicle's movement from the start to destination according to a predetermined criterion (in examples – with the shortest time of travel) using the Dijkstra algorithm [25] in order to find the shortest path in the graph,
- modeling of the variable speed of vehicles during simulation.

The speed of travel through each road section depends on the current traffic density at the moment of travel along this section according to dependence (5) and also the permissible speed assigned to both this road section and the car. The vehicle moves along a trajectory that is designated at the start of the movement and which minimizes travel time. More precisely, the optimum trajectory is determined by calculating the travel time on each section between nodes, taking into account the traffic density at each section at the moment the vehicle starts. In addition, the waiting time  $t_{wait}$  that is required to cross a junction is considered according to the following formula:

$$t_{wait} = \min \left\{ 30 \left( \left[ \frac{n}{p} \right] + 1 \right), 180 \right\}, \quad (6)$$

where:

- $t_{wait}$  – the waiting time [s],
- $n$  – the number of waiting vehicles [veh],
- $p$  – the crossing capacity of the junction in each direction [veh · min<sup>-1</sup>],
- $[x]$  – the *entier* function, the integer part of number  $x$ .

According to (6), the waiting time cannot exceed 180 seconds. In the simulations,  $p = 15$  veh · min<sup>-1</sup> is used for each junction, whereas the junction is a node that has at least 3 edges. The trajectory that is determined at the start of the travel does not change during the travel, despite the fact

Natomiast rzeczywisty czas przejazdu przez każdy odcinek i przez każdy węzeł grafu oblicza się według wzorów (5) i (6) z uwzględnieniem aktualnej na moment przejazdu gęstości ruchu. W modelu pojazd przemieszcza się ruchem ciągłym, tzn. obliczane jest miejsce, do którego pojazd dotrze w ustalonym odcinku czasu  $\Delta t$ . Krok czasowy symulacji  $\Delta t$  jest dowolny, w przedstawianych symulacjach zastosowano  $\Delta t = 1$  s.

#### 4. SYMULOWANIE RUCHU W MIEŚCIE

Na potrzeby oceny wpływu przyjętej odległości między pojazdami na parametry ruchu w mieście wykonano 21 symulacji komputerowych. Symulacje prowadzono na modelowym grafie ulic przedstawionym na Rys. 2. Hipotetyczne miasto ma kształt kwadratu o boku 10 km. Graf ulic składa się z 169 węzłów oraz 600 km ulic z uwzględnieniem liczby pasów ruchu na jezdni. W centralnej części KLMN hipotetycznego miasta przyjęto maksymalną prędkość poruszania się pojazdów  $v = 30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ . W pozostałej części założono  $v = 50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , z wyjątkiem tras szybkiego ruchu AA', BB', CC' oraz DD', gdzie przyjęto  $v = 70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ . Wszystkie ulice mają jeden pas ruchu w każdym kierunku, tylko trasy szybkiego ruchu AA', BB', CC' oraz DD' mają po dwa pasy. Punkty startowe i docelowe, zlokalizowane w węzłach grafu, losowano przy założeniu dwuwymiarowego rozkładu jednostajnego. Dzięki zagęszczeniu węzłów w kwadracie KLMN otrzymano większą liczbę punktów startowych i docelowych w centralnej części miasta niż na jego obrzeżach.

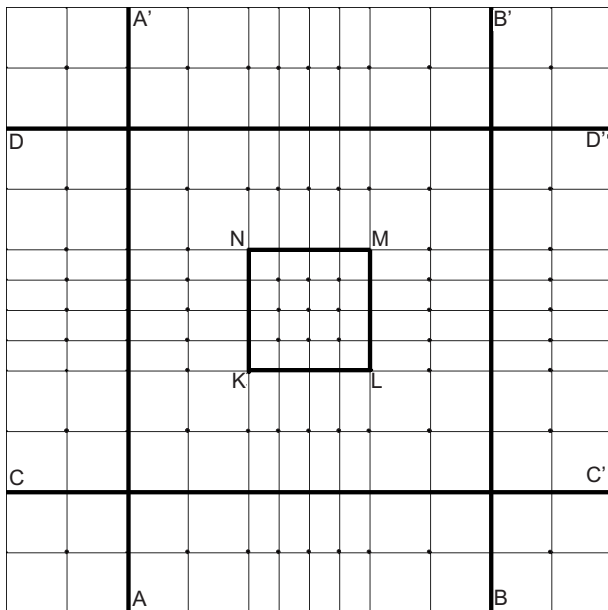


Fig. 2. Model graph of streets  
Rys. 2. Modelowy graf ulic

that traffic density is changing in time and space. However, the real travel time through each section and through each node of the graph is calculated according to formulas (5) and (6), taking into account the traffic density that is actual at the time of travel. In the model, a vehicle moves in a continuous motion, i.e. the place to which the vehicle will get in a specified time period  $\Delta t$  is calculated. The time step of the simulation  $\Delta t$  is random and  $\Delta t = 1$  s is assumed in the presented simulations.

#### 4. THE SIMULATION OF TRAFFIC FLOW IN A CITY

21 computer simulations were performed in order to evaluate the impact of the assumed distance between vehicles on the parameters of traffic in a city. The simulations were carried out on the model street graph presented in Fig. 2. The hypothetical city has a square shape with a side of 10 km. The street graph consists of 169 nodes and 600 km of streets, taking into account the number of lanes on a roadway. In the KLMN central part of the hypothetical city, the maximum speed of vehicles  $v = 30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  was assumed. In the rest of the city it was assumed to be  $v = 50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , except for the high speed routes AA', BB', CC' and DD' where  $v = 70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  was assumed. All the streets have one lane in each direction and only the high speed routes AA', BB', CC' and DD' have two lanes. The starting and destination points, which are located in the graph's nodes, were randomized while assuming a two-dimensional uniform distribution. Due to the densification of nodes in the KLMN square, more starting and destination points in the central part of the city were obtained than in its outskirts.

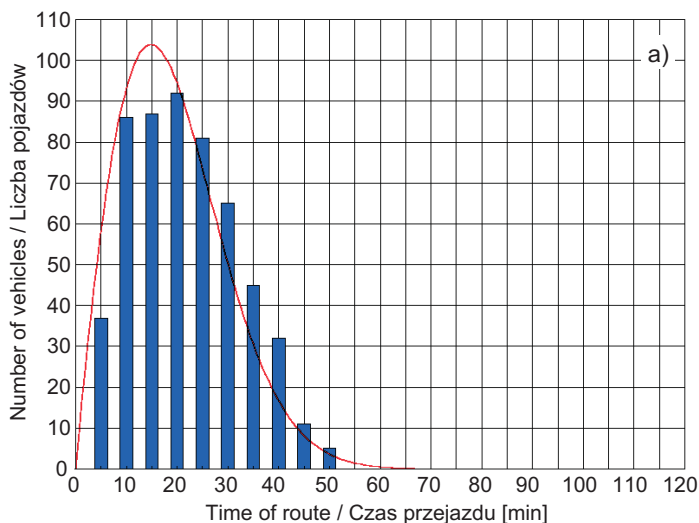
Total traffic in the city was assessed quantitatively by the average time value and the average vehicle speed from the start to the destination. The statistical analysis of results only included the trajectories that were started and completed during the simulation. All the simulations were conducted for two hours, i.e. information about the trajectories of vehicles moving in these two hours was observed and recorded. The simulations were carried out for 7 variants of the average distances between vehicles: 1 s, 1.5 s, 2 s, 2.5 s, 3 s, 3.5 s and 4 s. Each variant was analyzed considering three different loadings of the road network with vehicles:

- S1 – 10 000 vehicles in motion. The average density of traffic was equal to  $16.7 \text{ veh} \cdot \text{km}^{-1}$ ;
- S2 – 20 000 vehicles in motion. The average density of traffic was equal to  $33.3 \text{ veh} \cdot \text{km}^{-1}$ ;

Całość ruchu w mieście oceniano ilościowo poprzez wartość średniego czasu oraz średniej prędkości przejazdu pojazdu od startu do celu. W analizie statystycznej wyników uwzględniano jedynie trajektorie, które zostały rozpoczęte i zakończone podczas trwania symulacji. Wszystkie symulacje prowadzono przez dwie godziny, to znaczy obserwowano i zapisywano informacje o trajektoriach pojazdów poruszających się w ciągu dwóch godzin. Symulacje przeprowadzano w 7 wariantach średniej odległości między pojazdami: 1 s, 1,5 s, 2 s, 2,5 s, 3 s, 3,5 s, 4 s. Każdy z wariantów analizowano przy trzech założeniach obciążenia sieci ulic pojazdami:

- S1 – 10 000 pojazdów w ruchu. Średnia gęstość ruchu wynosiła  $16,7 \text{ poj} \cdot \text{km}^{-1}$ ;
- S2 – 20 000 pojazdów w ruchu. Średnia gęstość ruchu wynosiła  $33,3 \text{ poj} \cdot \text{km}^{-1}$ ;
- S3 – 30 000 pojazdów w ruchu. Średnia gęstość ruchu wynosiła  $50,0 \text{ poj} \cdot \text{km}^{-1}$ .

Stała liczba pojazdów w ruchu była utrzymywana w następujący sposób: w chwili ukończenia trasy przez pojazd do symulacji wprowadzana była kolejna para start-cel (S-F) z przygotowanego wcześniej zbioru i dla pary S-F generowano trasę najkrótszą w czasie na daną chwilę. W celu zachowania możliwości porównywania wyników różnych symulacji wcześniej utworzono zbiór 100 000 losowych par S-F. Z tego zbioru pobierano pary S-F podczas symulacji. W dalszej analizie rozpatrywano jedynie trajektorie ukończone czyli takie, dla których pojazd dotarł do celu przed zakończeniem symulacji. Podstawowe informacje o każdej symulacji zestawiono w Tabl. 1, natomiast obliczone czasy przejazdów zilustrowano na Rys. 3 i 4.



- S3 – 30 000 vehicles in motion. The average density of traffic was equal to  $50.0 \text{ veh} \cdot \text{km}^{-1}$ .

The constant number of vehicles in motion was maintained as follows: at the completion of the route by a vehicle, the next start-up pair (S-F) was added to the simulation from the previously prepared set, and for the S-F pair the shortest route in time for the specified moment was generated. In order to maintain the ability to compare the results of various simulations, a set of 100 000 random S-F pairs was previously created. The S-F pairs were chosen from this set for the simulation. Only completed trajectories were considered for further analysis, i.e. those for which the vehicle reached its destination before the simulation was finished. Basic information about each simulation is summarized in Table 1, while the calculated travel times are presented in Figs. 3 and 4.

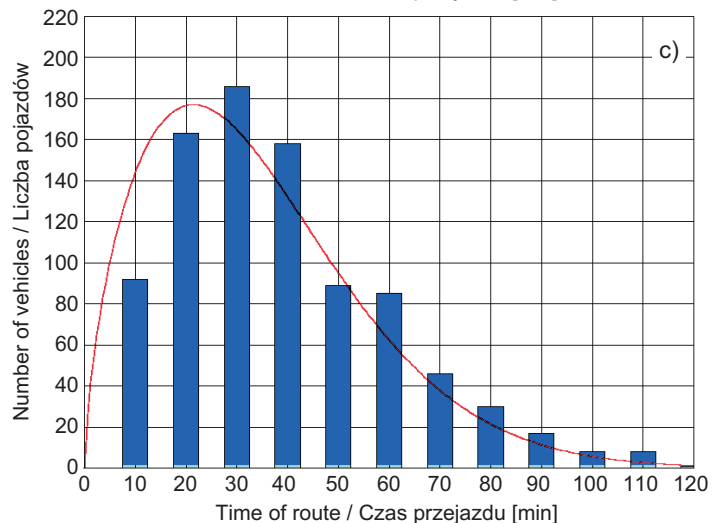
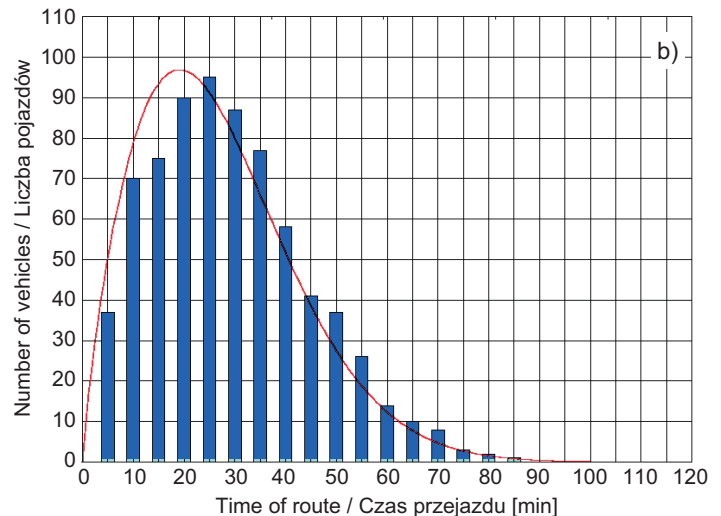


Fig. 3. Travel time histogram with Weibull distribution for  $E(T) = 2 \text{ s}$  and variants: a) S1, b) S2, c) S3

Rys. 3. Histogram czasu przejazdu z dopasowaniem rozkładu Weibulla dla  $E(T) = 2 \text{ s}$  i wariantów: a) S1, b) S2, c) S3



Table 1. Basic simulation statistics for all variants.  $E(T)$  – the expected value of the distance between vehicles  
 Tablica 1. Podstawowe statystyki dotyczące symulacji dla wszystkich wariantów.  $E(T)$  – wartość oczekiwana odległości między pojazdami

$E(T)$ [s]	Number of completed routes Liczba ukończonych tras			Coefficient of variation of travel time [-] Współczynnik zmienności czasu przejazdu			Skewness of travel time [-] Skośność czasu przejazdu		
	Variant / Wariant								
	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3
1.0	54219	75198	97267	54.7	55.3	54.4	0.49	0.51	0.61
1.5	54113	74270	93873	54.8	55.7	58.1	0.50	0.54	0.80
2.0	54061	73064	88296	54.8	56.6	61.3	0.50	0.61	0.89
2.5	54016	71286	80226	55.0	58.2	63.8	0.51	0.69	0.87
3.0	53566	66966	73072	55.1	60.8	64.8	0.52	0.74	0.79
3.5	52170	62228	66848	56.0	62.7	64.7	0.53	0.74	0.73
4.0	50013	57588	62122	57.5	64.3	64.9	0.56	0.75	0.69

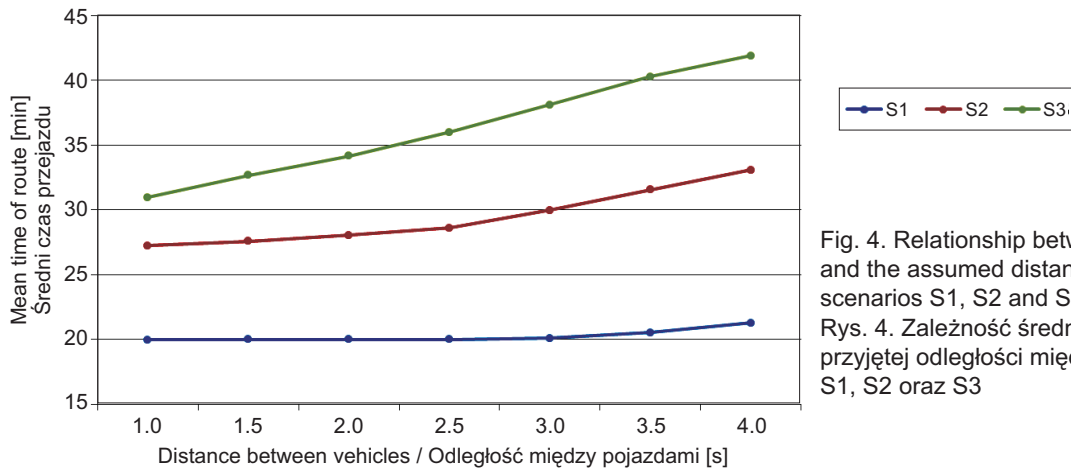
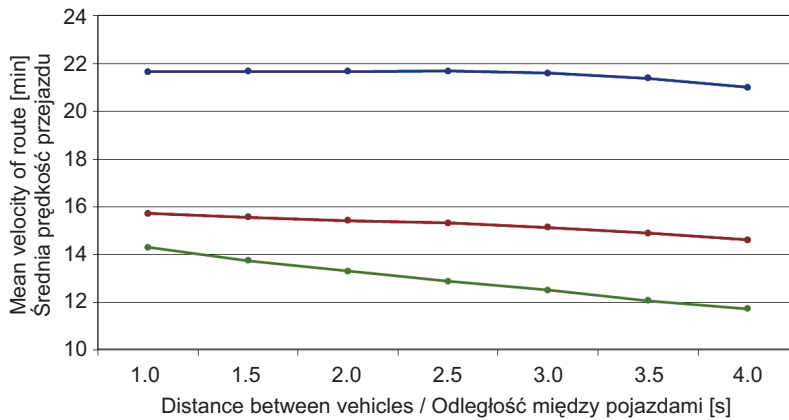


Fig. 4. Relationship between the average travel time and the assumed distance between vehicles for scenarios S1, S2 and S3  
 Rys. 4. Zależność średniego czasu przejazdu od przyjętej odległości między pojazdami dla scenariuszy S1, S2 oraz S3

Wraz z wydłużaniem średniej odległości między pojazdami, liczba tras ukończonych w ciągu dwugodzinnej symulacji maleje, mimo jednakowych założeń dotyczących liczby pojazdów w poszczególnych wariantach symulacji. Wynika to z faktu, że wraz z wydłużaniem odległości pomiędzy pojazdami maleje zarówno prędkość teoretyczna wyliczana ze wzoru (5) jak i prędkość przejazdu otrzymana w symulacjach (Rys. 5). Następuje zwiększenie czasu przejazdu i w konsekwencji więcej pojazdów nie osiąga celu podróży w trakcie trwania symulacji. Odchylenie standardowe czasu przejazdu zmienia się od 10,9 s dla najmniej obciążonych ruchem wariantów z odległością między pojazdami nie przekraczającą 2 s do 27,2 s dla najbardziej obciążonego ruchem grafu i najdłuższego czasu między pojazdami. Współczynnik zmienności średniego czasu przejazdu wynosi od 54,4 do 64,9% (Tabl. 1). Zmienność wartości średniego czasu przejazdu maleje wraz ze wzrostem obciążenia sieci oraz wydłużeniem odległości między pojazdami. Na Rys. 3.

With an increase in the average distance between vehicles, the number of routes completed during the two-hour simulation decreases, despite the same assumptions concerning the number of vehicles in each simulation variant. This is due to the fact that when the distance between vehicles increases, both the theoretical speed calculated from formula (5) and the speed of travel obtained in the simulations decreases (Fig. 5). The time of travel increases and as a result more vehicles fail to reach their destination during the simulation. The standard deviation of travel time varies from 10.9 seconds for the variants that are least loaded with traffic and have a distance between vehicles that does not exceed 2 seconds, to 27.2 seconds for the variants most loaded with traffic and which have the longest time between vehicles. The coefficient of variation of average travel time varies from 54.4% to 64.9% (Table 1). The variability of average travel time decreases with an increase of loading the network with traffic and an increase

przedstawiono trzy histogramy czasów przejazdu dla każdego wariantu obciążenia sieci i wartości oczekiwanej odległości między pojazdami równej 2 s.



in the distance between vehicles. Fig. 3 shows three histograms of travel time for each variant of loading the network with traffic when the expected distance between vehicles is equal to 2 s.

Fig. 5. Relationship between the average speed and the assumed distance between vehicles for scenarios S1, S2 and S3

Rys. 5. Zależność średniej prędkości przejazdu trasy od przyjętej odległości między pojazdami dla scenariuszy S1, S2 oraz S3

W przypadku małego obciążenia sieci ulic ruchem (Rys. 3a), zdecydowana większość pojazdów porusza się z prędkością zależną jedynie od ograniczeń przepisami ruchu drogowego. Mała gęstość pojazdów na poszczególnych odcinkach sprawia, że funkcja  $v(k)$  przedstawiona na Rys. 1 ma zastosowanie w zakresie maksymalnych wartości. Na prędkość pojazdów nie wpływa wtedy gęstość ruchu. Wraz ze wzrostem gęstości (Rys. 3b) zwiększa się liczba pojazdów, dla których prędkość jest faktycznie ograniczana przez hiperboliczną część funkcji  $v(k)$  zgodnie z równaniem (5). Obserwuje się wtedy zwiększenie średniego czasu przejazdu oraz liczby przejazdów trwających dłużej niż w wariantcie S1. Dla najbardziej niekorzystnych z symulowanych scenariuszy (Rys. 3c), przy największej gęstości ruchu, liczba przejazdów trwających ponad 100 min wzrosła, co przejawia się wydłużaniem prawego ogona wykresu. Dla wartości czasów przejazdu w każdej symulacji dopasowano rozkład teoretyczny prawdopodobieństwa. Ze względu na bardzo liczną populację (od 50 do 97 tys. przypadków) dokonano losowego wyboru próby liczącej 1% populacji. Dla otrzymanych prób dopasowano teoretyczny rozkład prawdopodobieństwa. Ze względu na nieujemne argumenty (czas przejazdu), kształt oraz prawostronną asymetrię, gęstość empiryczną opisano teoretycznym rozkładem Weibulla. Wyniki dopasowania oraz ocenę statystycznej jego istotności zestawiono w Tabl. 2.

W wariantcie S1, z najmniejszą gęstością ruchu pojazdów, w dwóch przypadkach należy odrzucić hipotezę o zgodności rozkładu empirycznego czasów trwania podróży z rozkładem Weibulla. W pozostałych 5 przypadkach hipotezę taką należy przyjąć na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . Niemal

In the case of light traffic on the street network (Fig. 3a), the vast majority of vehicles are moving at a speed that is only dependent on road traffic restrictions. The low density of vehicles on individual sections makes the function  $v(k)$ , which is shown in Fig. 1, applicable within a range of maximum values. The speed of the vehicles is then not affected by the density of the traffic. With an increase of density (Fig. 3b), the number of vehicles for which the speed is limited by the hyperbolic part of the function  $v(k)$  in accordance with equation (5) also increases. An increase in average travel time and the number of travels that last longer than in the S1 variant is then observed. For the most unfavorable of the simulated scenarios (Fig. 3c) – with the highest traffic density – the number of travels that last more than 100 minutes increased. This is manifested by the extension of the right tail of the graph. The theoretical distribution of probability was correlated with the values of travel times in each simulation. Due to the very large population (from 50 to 97 thousand cases), a sample of 1% of the population was randomly selected. The theoretical probability distribution was correlated with the obtained samples. Because of non-negative arguments (travel time), shape and also right-hand asymmetry, the empirical density was described by Weibull's theoretical distribution. The results of the correlation and statistical evaluation of its significance are summarized in Table 2.

In the S1 variant with the smallest vehicle traffic density, the hypothesis of compliance between the empirical distribution of travel time and the Weibull's distribution should be rejected in two cases. In the remaining 5 cases, such a hypothesis should be assumed at a significance level of

swobodny ruch pojazdów przy małej ich gęstości skutkuje brakiem zależności parametrów rozkładu od przyjętej odległości między pojazdami. Dla scenariuszy o większej gęstości ruchu zależność ta jest wyraźnie widoczna. Wraz z wydłużaniem odległości między pojazdami parametr skali  $\lambda$  rośnie, co oznacza spłaszczenie wykresu gęstości. Zjawisko to związane ze wzrostem wariancji zostało odnotowane w Tabl. 2. Wraz ze zwiększaniem się odległości między pojazdami przy wariantach S2 oraz S3 maleje natomiast parametr kształtu, co związane jest z wydłużaniem się prawego ogona i wzrostem skośności (Tabl. 2).

$\alpha = 0.05$ . An almost free movement of vehicles at low density results in a lack of dependence between the distribution parameters and the assumed distance between vehicles. For traffic scenarios that are more dense, this relation is clearly visible. As the distance between vehicles increases, the scale parameter  $\lambda$  also increases, which can be seen in the flattening of the density graph. This phenomenon, which is associated with an increase in variance, was noted in Table 2. As the distance between vehicles increases in variants S2 and S3, the shape parameter decreases, which is related to the elongation of the right tail of the graph and the increase in skewness (Table 2).

Table 2. Weibull decomposition parameters ( $\lambda$  - scale parameter,  $k$  - shape parameter) for adjusting the travel time distribution in each simulation variant to the value of test statistics  $\chi^2$   
 Tablica 2. Parametry rozkładu Weibulla ( $\lambda$  - parametr skali,  $k$  - parametr kształtu) dla dopasowania rozkładu czasów trwania podróży w każdym wariantcie symulacji wraz z wartością statystyki testowej  $\chi^2$

$E(T)$ [s]	$\lambda$	$k$	$\chi^2$	$\lambda$	$k$	$\chi^2$	$\lambda$	$k$	$\chi^2$
	Variant / Wariant								
	S1			S2			S3		
1.0	22.17	1.84	7.5 <sup>*)</sup>	30.07	1.84	43.7	35.00	1.93	8.9 <sup>*)</sup>
1.5	22.22	1.81	10.6 <sup>*)</sup>	30.80	1.84	34.6	35.65	1.76	13.1 <sup>*)</sup>
2.0	21.75	1.92	6.1 <sup>*)</sup>	30.23	1.78	15.8 <sup>*)</sup>	38.28	1.63	15.0 <sup>*)</sup>
2.5	21.78	1.80	4.6 <sup>*)</sup>	31.67	1.74	7.2 <sup>*)</sup>	40.75	1.69	16.9 <sup>*)</sup>
3.0	22.46	1.93	20.2	35.08	1.70	6.0 <sup>*)</sup>	43.41	1.55	14.1 <sup>*)</sup>
3.5	23.14	1.92	17.4 <sup>*)</sup>	36.83	1.64	7.6 <sup>*)</sup>	44.54	1.55	12.4 <sup>*)</sup>
4.0	23.06	1.73	18.5 <sup>*)</sup>	36.15	1.60	10.7 <sup>*)</sup>	44.58	1.54	12.0 <sup>*)</sup>

<sup>\*)</sup> statistically significant for  $\alpha = 0.05$  / statystycznie istotne dla  $\alpha = 0,05$

Zależność średniego czasu podróży od przyjętej odległości między pojazdami w każdym ze scenariuszy obliczeniowych przedstawiono na Rys. 4. Średni czas przejazdu rośnie wraz z wydłużaniem odległości między pojazdami. Największe różnice, od 30,9 do 41,9 min, występują dla najbardziej obciążonej sieci w scenariuszu S3. W tym przypadku, zwiększenie odległości z 1 s do 4 s spowodowało 35,6% wzrost średniego czasu przejazdu. W przypadku mniej obciążonych sieci S2 oraz S1 różnice te wynoszą odpowiednio 21,7% oraz 6,5%. Zbadano korelację liniową (Pearsona) między odległością pomiędzy pojazdami, a średnim czasem przejazdu trasy. We wszystkich trzech przypadkach okazała się statystycznie istotna i wahała się od 0,806 dla S1 do 0,998 dla S3. Wyznaczono równania prostych regresji i każdorazowo otrzymano statystycznie istotne na poziomie  $\alpha = 0,05$  współczynniki równania, przy czym współczynnik kierunkowy wynosi od 0,368 do 3,710 odpowiednio dla najmniej i najbardziej obciążonej sieci. Zatem wpływ przyjętej do modelowania wartości oczekiwanej odległości między

The dependence between the average travel time and the assumed distance between vehicles in each of the computational scenarios is shown in Fig. 4. The average travel time increases with an increase in the distance between vehicles. The greatest differences, from 30.9 to 41.9 min, occur for the most heavily loaded network in scenario S3. In this case, an increase in the distance from 1 s to 4 s resulted in a 35.6% increase of average travel time. In the case of the less loaded networks S2 and S1, these differences are 21.7% and 6.5%, respectively. The linear correlation (Pearson) between the distance between vehicles and the average travel time was also assessed. In all three cases, it was statistically significant and ranged from 0.806 for S1 to 0.998 for S3. Simple regression equations were designated and in each case statistically significant equation coefficients at a level of  $\alpha = 0.05$  were obtained, while the slope ranged from 0.368 to 3.710 respectively for the least and most loaded networks. Therefore, the impact of the assumed expected distance between vehicles increases with

pojazdami rośnie wraz z gęstością ruchu. Dla modelowanej gęstości na poziomie  $50 \text{ poj} \cdot \text{km}^{-1}$  każda sekunda wzrostu odległości między pojazdami powoduje wzrost średniego czasu przejazdu o 3,71 min, co stanowi 21,2% średniego czasu przejazdu dla wszystkich symulacji przy obciążeniu sieci 30 000 pojazdów. Zatem prawidłowe przyjęcie w modelowaniu odległości zachowywanej przez kierowców do pojazdu poprzedzającego ma istotny wpływ na prawidłowość otrzymywanych w symulacjach rezultatów, szczególnie przy modelowaniu dużych gęstości ruchu i dużych odstępów pomiędzy pojazdami.

Wzrost odległości między pojazdami wpływa jednocześnie na prędkość poruszania się pojazdów po sieci (Rys. 5). Wraz ze wzrostem odległości maleje średnia prędkość przejazdu, jednak wpływ ten jest słabszy niż w przypadku średniego czasu przejazdu. Najmniejsza redukcja średniej prędkości przejazdu występuje dla najmniej obciążonej sieci S1 i wynosi 3,0%. Najsilniejszy wpływ odległości między pojazdami na średnią prędkość przejazdu występuje dla najbardziej obciążonej sieci S3 i wynosi 17,9%. Przeanalizowano histogramy prędkości i stwierdzono brak statystycznej istotności zgodności ze znanymi teoretycznymi rozkładami prawdopodobieństwa.

W celu oceny statystycznej istotności zależności średniej prędkości przejazdu od odległości między pojazdami wyznaczono współczynniki korelacji Pearsona. Wynoszą one dla scenariuszy S1, S2, S3 odpowiednio -0,80, -0,99 oraz -0,99. Wyznaczono równania regresji liniowej i otrzymano statystycznie istotne na poziomie  $\alpha = 0,05$  współczynniki równań, gdzie współczynnik kierunkowy zmienia się od -0,185 do -0,846 dla S1 i S3 odpowiednio. Oznacza to, że w przypadku modelowego ruchu o gęstości wynoszącej  $50 \text{ poj/km}$  wzrost odległości między pojazdami o 1 s spowoduje zmniejszenie się średniej prędkości przejazdu o  $0,85 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , co stanowi 6,5% średniej prędkości dla wszystkich symulacji przy obciążeniu sieci liczbą 30 000 pojazdów. Zatem odległość między pojazdami silniej (10,2%) wpływa na zmianę średniego czasu przejazdu niż na zmianę średniej prędkości przejazdu (6,5%) choć obie zależności są statystycznie istotne na poziomie  $\alpha = 0,05$ .

Z praktycznego punktu widzenia dla kierowcy istotny jest czas, jaki musi poświęcić na pokonanie trasy. Mniej ważnym dla podróżującego parametrem jest prędkość przejazdu, ponieważ jest ona w pełni zdeterminowana przez warunki na drodze i zakłada się, że możliwości techniczne pojazdu ani umiejętności kierowcy jej nie modyfikują. Jedynie odległość między pojazdami utożsamiana z poczuciem bezpieczeństwa i rzeczywistym zachowaniem podróżującego wpływa zarówno na czas jak i prędkość przejazdu. Oczywiście jest,

an increase in traffic density. For modeled density at a level of  $50 \text{ veh} \cdot \text{km}^{-1}$ , every increase of a second in distance between vehicles results in an increase of average travel time of 3.71 min, which represents 21.2% of the average travel time for all the simulations of the network loaded with 30 000 vehicles. Therefore, when modeling, the correct assumption of a distance to the preceding vehicle has a significant impact on the correctness of the obtained simulation results. This is especially the case when modeling high traffic density and large distances between vehicles.

An increase of the distance between vehicles affects the speed of vehicles moving around the network (Fig. 5). As the distance increases, the average speed of travel decreases. However, this effect is smaller than in the case of average travel time. The smallest reduction in the average speed of travel is found for the least loaded network S1 and is equal to 3.0%. The strongest influence of distance between vehicles on the average speed of travel is for the most heavily loaded network S3 and is equal to 17.9%. The speed histograms were analyzed and there were no statistically significant correlations with any known theoretical probability distributions found.

Pearson's correlation coefficients were determined in order to estimate the statistical significance of the dependency between the average speed and the distance between vehicles. They are equal to -0.80, -0.99 and -0.99 for scenarios S1, S2 and S3, respectively. Linear regression equations were determined and statistically significant equation coefficients at a level of  $\alpha = 0.05$  were obtained, where the slope varies from -0.185 for S1 to -0.846 for S3. This means that for model traffic with a density of  $50 \text{ veh/km}$ , an increase in distance between vehicles by 1 s results in a decrease in average speed by  $0.85 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , which is 6.5% of the average speed for all the simulations of the network loaded with 30 000 vehicles. Therefore, the distance between vehicles influences the change of average travel time more strongly (10.2%) than the change of the average speed of travel (6.5%), although both relations are statistically significant at a level of  $\alpha = 0.05$ .

From a practical point of view, the time that is required to complete a journey is important for a driver. A less important parameter for a traveller is the speed of travel because it is fully determined by the conditions on the road and it is assumed that the technical capabilities of a vehicle or the skills of a driver do not modify it. The distance between vehicles, which is identified with the sense of safety and the real behavior of a traveller, is the only parameter that affects both the time and speed of travel. It is obvious that



że kluczowe znaczenie zarówno na czas jak i prędkość pokonania trasy ma wybór trajektorii. W artykule założono, że wybór trasy dokonany jest w chwili startu pojazdu. Inne podejście do zagadnienia wyboru trasy badano w pracy [26].

## 5. WNIOSKI

1. Zależność prędkości od gęstości ruchu  $v(k)$  powinna mieć postać hiperboliczną z ograniczeniem wynikającym z przepisów ruchu drogowego w zakresie maksymalnych dopuszczalnych prędkości.
2. Odległość między pojazdami, a dokładniej wartość oczekiwana jej rozkładu dla wszystkich uczestników ruchu mierzona w jednostkach czasu, jest istotnym parametrem funkcji  $v(k)$ .
3. Średnia odległość między pojazdami przyjęta jako parametr funkcji  $v(k)$  ma wpływ na modelowane czasy przejazdu. Wpływ ten jest największy przy dużym obciążeniu sieci tj. dużych średnich gęstościach ruchu, sześciokrotnie mniejszy dla mało obciążonych sieci tj. małych średnich gęstości ruchu. Największy wzrost średniego czasu przejazdu odnotowano w przypadku scenariusza z 30 000 pojazdów w ruchu, kiedy średni czas przejazdu dla odległości między pojazdami równej 4 s był o 35,6% dłuższy niż w przypadku tego samego scenariusza i odległości między pojazdami równej 1 s.
4. Wykazano zależność średniej prędkości przejazdu od odległości między pojazdami, ale wpływ ten jest znacznie słabszy niż w przypadku czasu przejazdu i wynosi od 3,0% w przypadku najmniej obciążonej sieci (10 000 pojazdów) do 17,9% w przypadku najbardziej obciążonej (30 000 pojazdów).
5. Odległość między pojazdami silniej wpływa na zmianę średniego czasu przejazdu niż na zmianę średniej prędkości przejazdu, choć obie zależności są statystycznie istotne na poziomie  $\alpha = 0,05$ .
6. Rozkład Weibulla poprawnie na poziomie istotności 0,05 opisuje histogramy czasów przejazdów. Zmieniające się wraz z wydłużaniem odległości między pojazdami parametry rozkładu adekwatnie charakteryzują wpływ  $E(T)$  na zmienność czasu przejazdu.
7. Prawidłowe przyjęcie w modelowaniu odległości zachowywanej przez kierowców do pojazdu poprzedzającego ma istotny wpływ na prawidłowość otrzymywanych w symulacjach rezultatów. Wraz ze spadkiem obciążenia sieci wpływ ten maleje.

the choice of trajectory is crucial for both the time and speed of travel. The article assumes that the selection of a route is made when a vehicle starts. Another approach to route selection was investigated in paper [26].

## 5. CONCLUSIONS

1. The relationship between speed and traffic density  $v(k)$  should be hyperbolic with the constraints that result from traffic regulations concerning the maximum allowable speed.
2. The distance between vehicles, and more precisely, the expected value of its distribution for all traffic participants measured in time units, is an important parameter of the function  $v(k)$ .
3. The average distance between vehicles, which was assumed as a parameter of the function  $v(k)$ , affects modeled travel times. This effect is greatest with heavily loaded networks, i.e. with large average traffic densities, and six times smaller for low traffic networks, i.e. with small average traffic densities. The highest increase in average travel time was recorded for a scenario with 30 000 moving vehicles, when the average travel time for a distance between vehicles of 4 s was 35.6% longer than for the same scenario and the distance between vehicles of 1 s.
4. The dependence between the average speed of travel and the distance between vehicles was proven. However, this influence is much smaller than in the case of travel time and is equal to 3.0% for the less loaded network (with 10 000 vehicles) and up to 17.9% for the most loaded network (with 30 000 vehicles).
5. The distance between vehicles influences the change in average travel time more strongly than the change in the average speed of travel, although both dependences are statistically significant at a level of  $\alpha = 0.05$ .
6. The Weibull distribution correctly describes the histograms of travel times at a significance level of 0.05. The distribution parameters, which change with an increase of the distance between vehicles, adequately characterize the influence of  $E(T)$  on the variability of travel time.
7. When modeling, the correct assumption of the distance retained by drivers to the preceding vehicle has a significant impact on the correctness of the obtained simulation results. As the network load decreases, this impact decreases.

**BIBLIOGRAFIA / REFERENCES**

- [1] *Tang T.Q., Chen L., Wu J.H., Caccetta L.*: A macro traffic flow model accounting for real-time traffic state. *Physica A*, **437**, 2015, 55-67
- [2] *Tang T.Q., Li J.G., Huang H.J., Yang X.B.*: A car-following model with real-time road conditions and numerical tests. *Measurement*, **48**, 2014, 63-76
- [3] *Greenshields B.D.*: A Study in Highway Capacity. Highway Research Board, **14**, 1935, 448-477
- [4] *Drake J.S., Schofer J.L., May A.D.*: A Statistical Analysis of Speed Density Hypotheses. Third International Symposium on the Theory of Traffic Flow Proceedings, Elsevier, North Holland, Inc. New York, 1967
- [5] *Kerner B.S., Konhäuser P.*: Structure and parameters of clusters in traffic flow. *Physical Review E*, **50**, 1, 1994, 54-83
- [6] *Underwood R.T.*: Speed, Volume, and Density Relationship. Quality and Theory of Traffic Flow. Yale Bur, Highway Traffic. New Haven, Connecticut, 1961, 141-188
- [7] *Greenberg H.*: An analysis of traffic flow. *Operations Research*, **7**, 1, 1959, 79-85
- [8] *MacNicholas M.J.*: A simple and pragmatic representation of traffic flow. In: Symposium on The Fundamental Diagram: 75 years Transportation, Research Board, Woods Hole, MA., 2008
- [9] *Wang H., Li J., Chen Q.-Y., Ni D.*: Logistic modeling of the equilibrium speed-density relationship. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **45**, 6, 2011, 554-566
- [10] *Brüggemann J., Schreckenberg M., Luther W.*: A verifiable simulation model for real-world microscopic traffic simulations. *Simulation Modelling Practice and Theory*, **48**, 2014, 58-92
- [11] *Wardrop J.G.*: Some theoretical aspects of road traffic research. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Part I*, **1**(3), 1952, 325-362
- [12] *Xiaowen H., Dongyuan Y.*: Estimation of traffic density on urban freeways. *Journal of Transportation System Engineering and Information Technology*, **8**, 3, 2008, 79-82
- [13] *Tang T.Q., Caccetta L., Wu Y.H., Kuang H.J., Yang X.B.*: A macro model for traffic flow on road networks with varying road conditions. *Journal of Advanced Transportation*, **48**, 4, 2014, 304-317
- [14] *Chiappone S., Giuffrè O., Grana A., Mauro R., Sferlazzo A.*: Traffic simulation models calibration using speed-density relationship: An automated procedure based on genetic algorithm. *Expert Systems With Applications*, **44**, 2016, 147-155
- [15] *Qu X., Wang S., Zhang J.*: On the fundamental diagram for freeway traffic: A novel calibration approach for single-regime models. *Transportation Research Part B*, **73**, 2015, 91-102
- [16] *Kamińska J., Chalfen M.*: Prędkość ruchu jako funkcja odległości między pojazdami. *Autobusy. Technika. Eksploatacja. Systemy Transportowe*, **12**, 2016, 635-639
- [17] *Kamińska J., Chalfen M.*: Wpływ bezpiecznej odległości między pojazdami na gęstość i prędkość ruchu. *Autobusy. Technika. Eksploatacja. Systemy Transportowe*, **6**, 2016, 578-582
- [18] Ustawa Prawo o Ruchu Drogowym (Dz.U. 1997 nr 98 poz. 602 z późniejszymi zmianami) art 19. punkt 4., tekst ujednolicony na dzień 06.07.2017
- [19] Code de la Route. décret du 23 novembre 2001, Art. 412-12, <http://www.codes-et-lois.fr/code-de-la-route/>, 20.01.2017
- [20] [http://www.cedr.fr/home/fileadmin/user\\_upload/Publications/2010/e\\_Distance\\_between\\_vehicles.pdf](http://www.cedr.fr/home/fileadmin/user_upload/Publications/2010/e_Distance_between_vehicles.pdf), 20.01.2017
- [21] *Bąk J., Bąk-Gajda D.*: Psychologiczne czynniki bezpieczeństwa ruchu drogowego. *Eksploatacja i Niezawodność*, **3**, 2008, 22-29
- [22] *Skłodowski H.*: Psychologia kierowcy samochodowego. Wydawnictwo A. Marszałek, 2003
- [23] *Szczuraszek T., Macioszek E.*: Analiza rozkładów odstępów czasu pomiędzy pojazdami na obwodni małych rond. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **9**, 3, 2010, 87-99
- [24] *Sołowczuk A.*: Modelowanie wpływu wybranych cech drogi na prędkość swobodną. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **8**, 2, 2009, 33-62
- [25] *Dijkstra E.W.*: A note on two problems in connection with graphs. In *Numerische Mathematik*, **1**, 1959, 269-271
- [26] *Chalfen M., Kamińska J.*: Wpływ informacji o gęstości ruchu na czas przejazdu. *Logistyka*, **4**, 2015, 2739-2746