KRZYSZTOF GASZ[1)]

TRAFFIC SIMULATION AT UNSIGNALIZED INTERSECTION IN CASE OF CONGESTION ON MAJOR STREET CAUSED BY AN ADJACENT TRAFFIC SIGNAL

SYMULACJA RUCHU NA SKRZYŻOWANIU BEZ SYGNALIZACJI W PRZYPADKU ZATŁOCZENIA NA JEZDNI GŁÓWNEJ SPOWODOWANEGO PRZEZ POBLISKIE SKRZYŻOWANIE Z SYGNALIZACJĄ

STRESZCZENIE. Skrzyżowania bez sygnalizacji są jednym z najczęściej występujących sposobów organizacji ruchu na skrzyżowaniach. Przepustowość wlotów podporządkowanych uzależniona jest od wielu czynników. Jednym z nich jest sposób poruszania się pojazdów na jezdni głównej. W przypadku obecności poruszającej się powoli kolejki pojazdów spowodowanej przez oddziaływanie skrzyżowania z sygnalizacją, przepustowość relacji włączających się do kolejki z wlotów podporządkowanych jest znacznie ograniczona. Pomiary parametrów ruchu przeprowadzono w trzech miastach: Wrocławiu, Opolu i Krakowie. Na podstawie badań opracowano model symulacyjny odzwierciedlający warunki ruchu na skrzyżowaniu takiego typu. Przeanalizowano wpływ ruchu pieszego oraz pojemności powierzchni akumulacji w pasie rozdziału ulicy głównej na przepustowość pojazdów z wlotów podporządkowanych dołączających się do kolejki na jezdni głównej.

SŁOWA KLUCZOWE: model symulacyjny, ruch drogowy, skrzyżowanie bez sygnalizacji.

ABSTRACT. Unsignalized intersections belong to the most common ways of traffic management at intersections. The capacity of the minor entries depends on many factors. One of them is the traffic flow pattern on the major street. In the case of slow-moving queue of vehicles on the main street caused by a downstream traffic signal, the capacity of movements on the minor street joining the queue of vehicles on the main street is significantly reduced. The surveys of traffic parameters were performed in three Polish cities: Wroclaw, Opole, and Krakow. On the basis of these studies, a simulation model representing the traffic conditions at such an intersection was developed. The influence of pedestrian traffic and the number of storage spaces in the median on the possibility of vehicles from the minor entries joining the queue of vehicles on the main street was examined.

KEYWORDS: simulation model, road traffic, unsignalized intersection.

DOI: 10.7409/rabdim.020.014

[1)] Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Katedra Dróg i Lotnisk, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław; krzysztof.gasz@pwr.edu.pl

1. WPROWADZENIE

Skrzyżowania bez sygnalizacji są jednym z najczęściej występujących sposobów organizacji ruchu na skrzyżowaniach. W przypadku dwóch przecinających się dróg jedna z nich posiada pierwszeństwo przejazdu, natomiast druga jest podporządkowana.

Na przepustowość wlotów podporządkowanych ma wpływ wiele czynników. Do najważniejszych z nich można zaliczyć: liczbę wlotów, liczbę pasów ruchu na wlotach podporządkowanych oraz jezdni głównej, sposób podporządkowania, obecność ruchu pieszego. Bardzo ważną sprawą jest sposób poruszania się pojazdów na jezdni głównej. Ogólnie można wyróżnić trzy sposoby: swobodny ruch pojazdów, ruch pojazdów w kolumnie, przesuwanie się pojazdów w kolejce.

Pierwszy sposób występuje najczęściej. Mamy z nim do czynienia wówczas, gdy ruch pojazdów na drodze głównej nie jest zakłócony występowaniem w pobliżu skrzyżowania z sygnalizacją świetlną. Drugi sposób poruszania się pojazdów na drodze głównej zakłócony jest obecnością skrzyżowania z sygnalizacją świetlną w pobliżu skrzyżowania z pierwszeństwem przejazdu. W takim przypadku pojazdy na drodze głównej na skrzyżowaniu z pierwszeństwem przejazdu pojawiają się w kolumnie. Trzeci sposób podobny jest do drugiego, z tą różnicą, że jedno z pobliskich skrzyżowań z sygnalizacją świetlną posiada ograniczoną przepustowość. Powoduje to, że kolejka pojazdów ustawiająca się przed wlotem skrzyżowania z sygnalizacją świetlną przebiega przez skrzyżowanie z pierwszeństwem przejazdu. W takiej sytuacji relacje ruchu na wlocie podporządkowanym związane z dołączeniem się do kolejki pojazdów są znacznie utrudnione. Dołączenie się do kolejki możliwe jest poprzez: pozostawienie powierzchni wolnej na skrzyżowaniu przez pojazdy poruszające się w kolejce na drodze głównej, obecność odstępów pomiędzy pojazdami jadącymi w kolejce większych od granicznego odstępu czasu, bądź też przez udzielenie pierwszeństwa pojazdowi z wlotu podporządkowanego przez pojazd na drodze głównej. Duży wpływ na umożliwienie manewru polegającego na dołączeniu się do potoku w kolejce ma ruch pieszy przechodzący przez jezdnię główną. Obecność pieszych powoduje zatrzymania pojazdów na drodze głównej (w tym również potoku poruszającego się w kolejce pojazdów), co stwarza większe odstępy czasu pomiędzy pojazdami i umożliwia włączenie się pojazdów z wlotów podporządkowanych do tego potoku. Pozostałe relacje, które nie włączają się do kolejki pojazdów, odbywają się, gdy odstępy pomiędzy pojazdami są większe od granicznego odstępu

1. INTRODUCTION

Unsignalized intersections belong to the most common ways of traffic management at intersections. In the case of two intersecting roads one of them is the major street and the other is the minor one.

Capacity of the minor entries depends on many factors. The most important are the number of entries, number of lanes on the minor entry and on the major entry, the type of priority control, the occurrence of pedestrian traffic. A very important matter is the traffic flow pattern on the major street. In general, three patterns can be distinguished: free-flow traffic, platoon traffic and congestion.

The first case occurs very often – when the vehicle traffic on the major street is not disturbed by the signalized intersection nearby. The second pattern of vehicle traffic on the major street is caused by presence of an upstream signalized intersection. In this case, the vehicles at the next unsignalized intersection appear in platoon. The third pattern is similar to the second one. The difference is that one of the intersections has limited capacity. In this case, the queue of vehicles forming at the signalized intersection spills into the unsignalized intersection. As the result, movements on the minor streets that join the queue are significantly limited. Joining the queue is possible when free area is left at the intersection by vehicles moving in the queue on major street, when gaps occur between moving vehicles in the queue that are larger than the critical gap or when a driver of a vehicle on the major street yields to a vehicle from the minor street. A significant influence of pedestrian traffic on the main street is observed. The presence of a pedestrian stops the traffic flow on the major street (also traffic flow moving in the queue), which causes greater gap between vehicles and allows vehicles from the minor street to join this traffic flow. Other movements that do not join the queue of vehicles take place when the gaps between vehicles are greater than the critical gap and the traffic flow in the queue does not move through the unsignalized intersection.

Capacity of unsignalized intersections is a widely researched topic. The capacity at these intersections is estimated by either gap acceptance or traffic conflict method. The gap acceptance theory was developed in Germany. At unsignalized intersections, drivers have to either accept or reject the available gaps. This method is also widely used in various countries around the world [1-3], including Poland [4, 5]. The conflict theory was first introduced by Gleue [6] for signalized intersections. This method is also

czasu i/lub potok pojazdów w kolejce nie porusza się przez skrzyżowanie z pierwszeństwem przejazdu.

Przepustowość skrzyżowań bez sygnalizacji stanowi szeroko zbadany temat. Przepustowość na takich skrzyżowaniach szacuje się, stosując metodę akceptacji odstępów czasu albo metodę konfliktów ruchowych. Teoria akceptacji odstępów czasu została opracowana w Niemczech. Na skrzyżowaniach bez sygnalizacji kierowcy z wlotów podporządkowanych muszą albo zaakceptować, albo odrzucić dostępny odstęp między pojazdami. Metodę tę stosuje się szeroko w różnych krajach na świecie [1-3], w tym w Polsce [4, 5]. Technika konfliktów ruchowych została wprowadzona przez Gleuego [6] dla skrzyżowań z sygnalizacją świetlną. Tego rodzaju podejście było jednak również stosowane do modelowania skrzyżowań bez sygnalizacji [7-10].

Przepustowości wlotów podporządkowanych podczas różnych sposobów poruszania się pojazdów na jezdni głównej poświęcone są liczne prace. Najwięcej prac związanych jest ze swobodnym ruchem pojazdów na jezdni głównej [5, 11-20]. Poruszane są również zagadnienia przepustowości wlotów podporządkowanych, gdy ruch na jezdni głównej odbywa się pod wpływem sąsiednich skrzyżowań z sygnalizacją świetlną [5, 11, 21, 22]. Brak jest natomiast badań dotyczących przepustowości wlotów podporządkowanych, gdy na co najmniej jednym kierunku drogi głównej występuje kolejka pojazdów.

W polskich miastach, gdzie rozwój infrastruktury drogowej nie jest adekwatny do rosnącego ruchu samochodowego, skrzyżowania tego typu stają się coraz powszechniejsze. Brak jakichkolwiek sposobów uwzględniania pojazdów dołączających się do kolejki pojazdów przemawiał za poświęceniem temu zagadnieniu uwagi. W tym celu opracowano metodę symulacyjną opisującą parametry ruchu w sposób stochastyczny. Model symulacyjny został zaprogramowany w języku Visual Basic for Applications.

2. PARAMETRY RUCHU

W celu przeprowadzenia symulacji ruchu na skrzyżowaniu wykonano badania następujących parametrów:

- odstępów czasu pomiędzy pojazdami jadącymi w kolumnie w odpowiedniej odległości od skrzyżowania z sygnalizacją świetlną,
- odstępów czasu pomiędzy ruszającymi pojazdami w odpowiednim miejscu kolejki,
- odstępów czasu pomiędzy pojazdami poruszającymi się w kolejce w odpowiednim miejscu kolejki,
- granicznych odstępów czasu na ulicy podporządkowanej,
- odstępów czasu między pojazdami wyjeżdżającymi z kolejki na ulicy podporządkowanej,

known as the additive conflict flow method. This approach was also used to model unsignalized intersections [7-10].

Testing the capacity of the minor entry during the occurrence of various traffic patterns on the major street was widely analyzed. Most studies are devoted to free-flow traffic on the major street [5, 11-20]. The capacity of the minor entry when the traffic flow on the major street is conditioned by the presence of other signalized intersections was examined as well [5, 11, 21, 22]. However, there is no research on the capacity of the minor entry when there is a queue of vehicles on at least one major street direction.

In Polish cities, where development of road infrastructure is not adequate to growing car traffic, such intersections become increasingly popular. Lack of methods of calculating the capacity for vehicles joining the queue was the reason for researching this problem. For this purpose, a simulation model describing traffic parameters in a stochastic manner was developed. The simulation model was implemented by means of Visual Basic for Applications programming language.

2. TRAFFIC PARAMETERS

To perform traffic simulation at the intersection, the following traffic parameters were tested:

- gaps between vehicles driving in a platoon at appropriate distances from the signalized intersection,
- gaps between vehicles starting at appropriate places in the queue,
- gaps between vehicles moving at appropriate places in the queue,
- critical gaps for movements on the minor street,
- follow-up time for movements on the minor street,
- gaps between pedestrians approaching the road pedestrian crossing,
- speed of pedestrians crossing the street,
- yielding to pedestrians,
- yielding to vehicles on the minor entry.

Traffic surveys were performed in three Polish cities: Wroclaw, Opole and Krakow. Each parameter was measured at 2-9 intersections. These intersections were located in city centers. Each measurement contained about 200 results. The obtained results of traffic parameters were subjected to various tests before they were treated as basis for statistical analysis. A detailed description of traffic surveys was presented in [23].

– odstępów czasu pomiędzy zgłoszeniami pieszych do przejścia przez jezdnię,
– prędkości pieszych na przejściu przez jezdnię,
– udzielania pierwszeństwa pieszym,
– udzielania pierwszeństwa pojazdom z wlotów podporządkowanych.

Badania zostały wykonane w trzech miastach: Wrocławiu, Opolu i Krakowie. Pomiarów każdego z parametrów dokonano na 2-9 skrzyżowaniach zlokalizowanych w centrach miast. Podczas każdego z pomiarów zgromadzono około 200 wyników. Uzyskane wyniki poddano różnym testom, zanim przyjęto je za podstawę do analizy statystycznej. Szczegółowy opis przeprowadzonych badań ruchu przedstawiono w [23].

3. MODEL SYMULACYJNY RUCHU NA SKRZYŻOWANIU BEZ SYGNALIZACJI

3.1. OPIS MODELU

Na obszarze każdego większego miasta istnieje wiele elementów sieci drogowej, gdzie przepustowość została przekroczona. Takim „wąskim gardłem" mogą być zarówno miejscowe zwężenia przekrojów jezdni, ograniczenia liczby pasów ruchu, jak również skrzyżowania z sygnalizacją świetlną, gdzie przepustowość jest znacznie mniejsza od przepustowości ciągów komunikacyjnych doprowadzających do tego skrzyżowania. Często zdarza się, że kolejka pojazdów występująca przed takim skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną przebiega przez kolejne skrzyżowania, ale już bez sygnalizacji świetlnej. Gdy na wlotach podporządkowanych jest niewielki ruch, w takiej sytuacji skrzyżowania te nie stanowią większego problemu. Gdy natomiast na wlotach podporządkowanych występuje dość duży ruch pojazdów, z czego znaczna część będzie chciała dołączyć do kolejki, problem staje się bardzo istotny.

Główne arterie komunikacyjne w aglomeracjach miejskich stanowią ulice dwujezdniowe dwupasowe rozdzielone od siebie pasem rozdziału lub ulice jednojezdniowe czteropasowe bez rozdzielonych fizycznie kierunków ruchu. Zasadniczo są to przekroje o dwóch pasach ruchu w każdym kierunku. Dlatego taki przekrój został uwzględniony w modelu symulacyjnym. Oznaczenia potoków ruchu poruszających się w obrębie skrzyżowania przedstawiono na Rys. 1.

3. TRAFFIC SIMULATION MODEL AT UNSIGNALIZED INTERSECTION

3.1. DESCRIPTION OF THE MODEL

In the area of each major city there are many elements of road network where capacity is exceeded. Such a bottleneck can be posed by a local narrowing of road cross-section, reduction in the number of lanes as well as a signalized intersection at which capacity of entries is much smaller than capacity of streets leading to this intersection. It is a frequent occurrence in Poland that the queue of vehicles before such signalized intersection spills into an adjacent unsignalized intersection. When there is low volume of traffic at minor entries in such a situation, these intersections are not a significant issue. However, when there is a high volume at the minor entries, with a large part of the traffic joining the queue of vehicles, the problem is very important.

The main transportation arteries in Polish urban agglomerations are dual carriageways with two lanes in each direction or single carriageways with four lanes. Basically, these are streets with two lanes in each direction. For this reason, such a cross-section has been included in the simulation model. The designations of traffic flows moving in the area of intersections are shown in Fig. 1.

In general, the minor streets are designed with one lane for each direction. However, at the minor entries, which are mainly used by drivers of passenger cars, spontaneous generation of two lanes (two queues of vehicles) was observed. One lane is for movements joining the queue at the major street and the other for remaining movements. Movements at the minor entries are shown in Fig. 2.

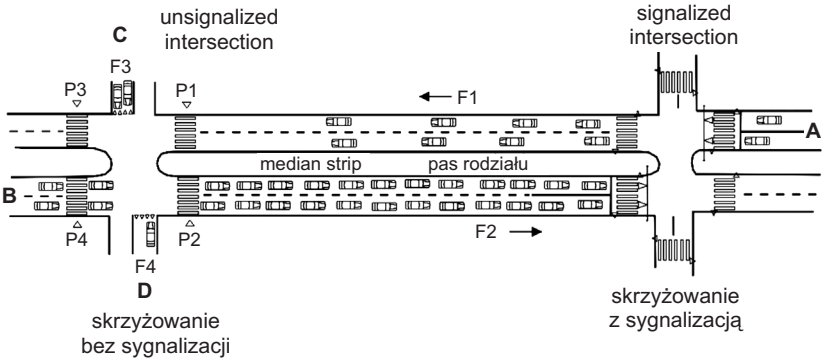

Fig. 1. Designations of traffic flows in the area of intersections
Rys. 1. Oznaczenia potoków ruchu w obrębie skrzyżowań

Choć drogi podporządkowane posiadają jeden pas dla każdego kierunku ruchu, na wlotach podporządkowanych, z których korzystają głównie pojazdy osobowe, zaobserwowano wytwarzanie się dwóch pasów ruchu (dwóch kolejek pojazdów). Jeden pas związany jest z relacją dołączającą się do kolejki na jezdni głównej, drugi zaś obsługuje pozostałe relacje podporządkowane. Ten przypadek zobrazowano na Rys. 2.

Ograniczona możliwość wjazdu do kolejki powoduje powstawanie dodatkowych kolejek na wlotach podporządkowanych. Choć pojazdy włączające się do kolejki samochodów na jezdni głównej nie zwiększają w sposób bezpośredni jej długości, to jednak znacznie zwiększają czas postoju pojazdów oczekujących w kolejce na jezdni głównej. Sytuację zakłócają przechodzący piesi. Konieczne, szczególnie w tym przypadku, jest uwzględnienie wszystkich elementów, które wpływają na przepustowość skrzyżowań z pierwszeństwem przejazdu.

Wszystkie relacje na wlotach podporządkowanych poza relacjami dołączającymi się do kolejki na jezdni głównej mogą odbywać się, gdy kolejka na jezdni głównej nie przemieszcza się przez skrzyżowanie z pierwszeństwem przejazdu, a na drugim kierunku ruchu na jezdni głównej występują odpowiednie odstępy czasu między pojazdami. W najgorszej sytuacji są pojazdy dołączające się do kolejki na jezdni głównej. Kierowcy pojazdów z pierwszeństwem przejazdu zostawiają wolną przestrzeń na skrzyżowaniu, aby umożliwić manewry pojazdom z wlotów podporządkowanych. Część tej wolnej przestrzeni jest zajmowana przez pojazdy z wlotów podporządkowanych dołączających się do kolejki pojazdów na jezdni głównej. Jeżeli dołączenie następuje jako prawoskręt z drogi podporządkowanej, to kierowca takiego pojazdu ma większe szanse na włączenie się do kolejki. Natomiast jeżeli dołączenie następuje jako lewoskręt, kierowca wykonuje ten manewr zasadniczo w dwóch etapach. Pierwszy etap polega na przejeździe przez jedną jezdnię i zatrzymaniu się w pasie rozdziału. Możliwe jest to wówczas, gdy występuje odpowiednio duży odstęp czasu w potoku pojazdów jadących od skrzyżowania z sygnalizacją świetlną. Drugi manewr polega na włączeniu się do kolejki pojazdów. Niekiedy oba te manewry mogą przebiegać płynnie bez zatrzymywania się w pasie rozdziału.

Inną okazją do włączenia się do kolejki pojazdów jest wykorzystywanie większych odstępów czasu pomiędzy pojazdami przesuwającymi się w kolejce samochodów. Manewr ten możliwy jest również, gdy pojazd poruszający się w kolejce udzieli pierwszeństwa pojazdowi z wlotu podporządkowanego.

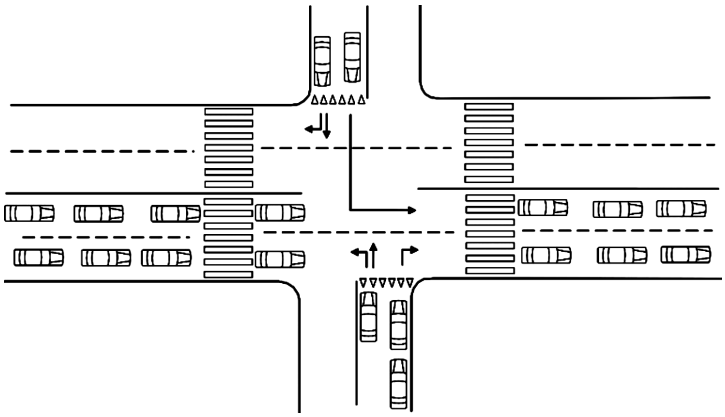

Fig. 2. Arrangement of vehicles at the minor entries
Rys. 2. Ustawienie pojazdów na wlotach podporządkowanych

A limited possibility of joining the queue of vehicles at the major street results in additional queues of vehicles at the minor entries. Vehicles from the minor entries joining the queue at the major street do not directly increase the queue length at the major street. However, they significantly increase delay time of vehicles waiting in the queue at the major street. Situation is further complicated by pedestrians who cross the main street at different times. It is necessary, especially in this case, to take into account all the elements that affect the capacity of the unsignalized intersection.

All movements at the minor entries, apart from movements joining the queue at the major street, can take place when the queue at the major street does not move through the unsignalized intersection and only when there are appropriate gaps between vehicles moving in the other direction at major street. The situation is the most difficult from the perspective of the drivers of vehicles joining the queue at the major street. Drivers of vehicles waiting in the queue at the major street leave a free space at the unsignalized intersection so as not to block the intersection and enable movements from the minor entries. Part of this free space is occupied by vehicles from the minor entries joining the queue at major street. If joining the queue takes place as a right turn, the driver of vehicle has a better chance of joining the queue. If joining the queue takes place as a left turn, the driver performs this movement essentially in two stages. The first stage consists in crossing the major street and stopping in the median. This is possible when there is an appropriate gap between vehicles in traffic flow travelling from the signalized intersection. The second stage involves joining the queue at the major street. Sometimes both of these stages can run smoothly without stopping in the median.

Potok pojazdów wyruszający ze skrzyżowania z sygnalizacją świetlną F1 przybywa na skrzyżowanie z pierwszeństwem przejazdu jako kolumna pojazdów po pewnym czasie, potrzebnym do pokonania drogi pomiędzy tymi skrzyżowaniami. W obrębie skrzyżowania z pierwszeństwem przejazdu natrafia na dwa przejścia dla pieszych (jedno przed skrzyżowaniem, drugie za skrzyżowaniem). W przypadku obecności pieszego przed przejściem dla pieszych jeden z pojazdów może udzielić mu pierwszeństwa. Wówczas wszystkie pojazdy jadące za nim, jak również pojazdy z drugiego pasa ruchu muszą zatrzymać się lub przynajmniej znacznie zwolnić. Założono, że na każdym przejściu kolumna pojazdów może zatrzymać się tylko jeden raz. Powoduje to przerwę w ruchu kolumnowym i umożliwia wyjazd pojazdów z wlotu podporządkowanego F3.

Założono również obecność minimalnej kolejki na wlocie z sygnalizacją świetlną, co powoduje ciągły wyjazd pojazdów z potoku F1 podczas nadawania sygnału zielonego. Wszystkie te pojazdy zmierzają w kierunku skrzyżowania z pierwszeństwem przejazdu. Relacje skrętne na tym wlocie odbywają się z innych pasów ruchu. Również dla tego potoku założono, że cały potok przejeżdża przez skrzyżowanie z pierwszeństwem przejazdu bez wykonywania relacji skrętnych. Założono dodatkowo, że poza potokiem F1 z innych wlotów na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną nie odbywa się ruch w kierunku skrzyżowania bez sygnalizacji świetlnej. Długość kolejki pojazdów w potoku F2 wykracza poza skrzyżowanie z pierwszeństwem przejazdu. Rusza ona w chwili zapalenia się sygnału zielonego. Po pewnym czasie ruszają pojazdy na jezdni głównej w obrębie skrzyżowania. W czasie przejazdu przez skrzyżowanie z pierwszeństwem przejazdu napotykają na dwa przejścia dla pieszych, na których mogą udzielić pierwszeństwa pieszym. Również na skrzyżowaniu mogą udzielić pierwszeństwa pojazdom z wlotów podporządkowanych.

Założono ciągłą kolejkę pojazdów na wlotach podporządkowanych, chcących dołączyć się do kolejki na jezdni głównej. Pojazdy z potoku F3 wykonują manewr włączenia dwuetapowo, ponieważ muszą przedostać się przez kierunek ruchu pojazdów biegnący od skrzyżowania z sygnalizacją świetlną. Założono również, że pojazdy z potoku F4 włączają się tylko na prawy pas ruchu, zaś pojazdy z potoku F3 na lewy pas ruchu. Założono ciągłą kolejkę na wlotach podporządkowanych i wykorzystywanie każdej okazji przez kierowców z wlotów podporządkowanych na dołączenie się do kolejki pojazdów na jezdni głównej. Pojazdy z wlotów podporządkowanych wykonujące inne manewry na skrzyżowaniu dokonują ich tylko, gdy kolejka pojazdów na jezdni głównej nie porusza się.

Another opportunity to join the queue is to use larger gaps between vehicles moving in the queue at the major street. This maneuver is also possible when a driver of a vehicle moving in the queue yields to a vehicle from the minor entry.

The vehicle flow leaving the signalized intersection F1 arrives at the unsignalized intersection as a platoon after some time needed to cover the distance between these intersections. In the area of unsignalized intersection, it passes two crosswalks – one before the intersection and the other after the intersection. In the case of presence of a pedestrian ready to enter the crosswalk, one of the vehicles may yield to him. Then all vehicles following him as well as vehicles from the other lane must stop or at least significantly slow down. It was assumed that at every crosswalk a platoon may stop only once. It causes a greater gap between vehicles in a platoon and allows vehicles from the minor entry F3 to join the traffic at the major street.

Presence of a minimum queue at the signalized intersection was also assumed, which causes continuous traffic flow F1 during green phase. All of these vehicles go towards the unsignalized intersection. Right turn and left turn at the signalized intersection take place from other lanes not included in the model. It was also assumed for this traffic flow that the whole flow passes through the unsignalized intersection (without left turn and right turn). Additionally, it was assumed that apart from traffic flow F1, no other traffic flow moves towards the unsignalized intersection. Length of the queue of F2 traffic flow goes beyond the unsignalized intersection. This traffic flow starts when green signal lights up. After some time, vehicles start moving in the area of the unsignalized intersection as well. While crossing the unsignalized intersection, drivers of vehicles pass two crosswalks, on which they may yield to pedestrians. Moreover, at the intersection they can yield to vehicles from the minor streets.

It was assumed that there is a continuous queue of vehicles at the minor entries joining the queue at the major street. Vehicles of F3 traffic flow perform the maneuver of joining the queue in two stages, as they have to cross the carriageway with the incoming flow from the signalized intersection first. It was also assumed that vehicles of F4 traffic flow join only the right lane at the major street, while the vehicles of F3 traffic flow join the left lane. It was also assumed that the drivers from the minor entries would use every opportunity to join the vehicle queue on the main street. Vehicles from the minor entries perform other movements only when the queue at the major street does not move.

Dodatkowo założono istnienie czterech potoków pieszych (P1, P2, P3, P4). Piesi w tych potokach przechodzą przez jezdnię dwuetapowo, przekraczając każdorazowo tylko jeden kierunek ruchu na jezdni głównej. Niekiedy mogą przejść całą jezdnię bez zatrzymywania się w pasie rozdziału lub na środku jezdni. Przechodząc przez jezdnię wykorzystują duże odstępy pomiędzy pojazdami na jezdni głównej, postój pojazdów w kolejce czy też uprzejmość kierowców udzielających im pierwszeństwa.

3.2. PRZEDMIOT SYMULACJI

Jako obiekt analiz wybrano skrzyżowanie z pierwszeństwem przejazdu znajdujące się w odległości 200 metrów od skrzyżowania z sygnalizacją świetlną. Oba kierunki ruchu na jezdni głównej rozdzielone są pasem rozdziału o szerokości 5 m (co umożliwia akumulację dwóch pojazdów relacji lewoskrętnej). W obrębie skrzyżowania na jezdni głównej występują cztery przejścia dla pieszych. Występują również dwa przejścia przez jezdnię na wlotach podporządkowanych, ale ich wpływ został pominięty. Czas pomiędzy zapaleniem się sygnału zielonego dla potoku udającego się w kierunku skrzyżowania z pierwszeństwem przejazdu a zapaleniem się sygnału zielonego dla potoku jadącego od strony skrzyżowania z pierwszeństwem przejazdu przyjęto równy zero. Oba te potoki poruszają się podczas jednej fazy ruchu. Trwa ona 35 s. Długość cyklu natomiast wynosi 100 s. Analizy dokonano dla okresu jednej godziny, co odpowiada 36 cyklom. Do opisu zjawisk występujących na skrzyżowaniu zastosowano zmienne o różnych rozkładach i różnych parametrach. Zostały one przedstawione w Tabl. 1.

Additionally, four pedestrian flows were assumed at the unsignalized intersection (P1, P2, P3 and P4). Pedestrians in these flows cross the street in two stages, each time crossing only one direction of traffic on the main street. Sometimes they can cross the entire street without stopping in the median or in the middle of street. While crossing the street, the pedestrians use large gaps between vehicles, go past queuing vehicles or depend on the kindness of drivers giving them priority.

3.2. SIMULATION OBJECT

An unsignalized intersection located 200 m from a signalized intersection was selected as the simulation object. Both carriageways on the main street are separated by a 5 m median, which enables the storage of two left-turn vehicles next to each other. In the area of the unsignalized intersection there are four crosswalks. There are also two crosswalks at the minor entries, but their impact has been omitted in the model. Both passenger cars and trucks move on the main street, while at the minor entries there are only passenger cars incoming. The time offset between green signal lighting for flow going towards the unsignalized intersection and green signal lighting for flow coming from the unsignalized intersection has been set to zero. Both of these flows move during one phase. The phase lasts 35 sec. The cycle length equals 100 sec. The analysis was carried out for a period of one hour, which corresponds to 36 cycles. To describe the events occurring at the unsignalized intersection, different parameters obtained from traffic surveys were used. Based on the statistical analysis, their distributions and distribution parameters were determined. They are presented in Table 1.

Table 1. The distributions and their parameters used to describe traffic at intersection
Tablica 1. Rozkłady i ich parametry zastosowane do opisu ruchu na skrzyżowaniu

Parameter to describe traffic at intersection Parametr opisujący ruch na skrzyżowaniu	Applied distribution Zastosowany rozkład	Applied parameters of distribution Zastosowane parametry rozkładu
Gap between starting vehicles Ostęp czasu między poruszającymi się pojazdami	log-normal / log-normalny	$\mu = 0.32$ $\sigma^2 = 0.12$
Gap between vehicles moving in the queue Odstęp czasu między pojazdami poruszającymi się w kolejce	log-normal / log-normalny	$\mu = 1.07$ $\sigma^2 = 0.09$
Gap between vehicles passing over the stop line Odstęp czasu pomiędzy pojazdami przekraczającymi linię zatrzymania	log-normal / log-normalny	$\mu = 0.63$ $\sigma^2 = 0.09$
Gap between vehicles moving in platoon Odstęp czasu między pojazdami poruszającymi się w kolumnie	log-normal / log-normalny	$\mu = 0.79$ $\sigma^2 = 0.17$
Walking speed Prędkość pieszego	normal / normalny	$\mu = 1.31$ $\sigma^2 = 0.04$
μ - expected value / wartością oczekiwana, σ^2 - variance / wariancja		

4. WYNIKI BADAŃ

4.1. WPŁYW PIESZYCH PRZECHODZĄCYCH PRZEZ JEZDNIĘ GŁÓWNĄ NA PRZEPUSTOWOŚĆ RELACJI PODPORZĄDKOWANYCH

Skrzyżowanie z pierwszeństwem przejazdu, na którym na jezdni głównej utrzymuje się kolejka pojazdów wywołana obecnością w pobliżu skrzyżowania z sygnalizacją świetlną o ograniczonej przepustowości, jest specyficznym typem skrzyżowania. Aby poprawnie je opisać, konieczne jest uwzględnienie współzależności pomiędzy kierowcami pojazdów oraz pieszymi. Wpływ jednych uczestników ruchu ma bardzo duże znaczenie na ruch drugich i odwrotnie. Właściwe modelowanie ruchu na tego typu skrzyżowaniach nie może obejść się bez interakcji kierowca/pieszy jak również kierowca na jezdni głównej/kierowca na wlocie podporządkowanym.

Podczas badań symulacyjnych zmieniano liczbę pieszych dochodzących do poszczególnych przejść przez jezdnię. Założono jednakową liczbę dochodzących pieszych do poszczególnych przejść. Uwzględniono różną liczbę pieszych podczas poszczególnych zgłoszeń. Przyjęto, zgodnie z badaniami empirycznymi, że w jednym zgłoszeniu do przejścia występuje 1,25 osoby. Przeanalizowano siedem wariantów natężeń pieszych. Natężenie pieszych dochodzących do każdego przejścia przez jezdnię zmieniało się od 0 do 300 (natężenia pieszych w jednym kierunku). Uwzględniając ruch dwukierunkowy pieszych na przejściu przez jezdnię (Q^{Ped}), natężenia te są dwukrotnie większe na każdym z przejść.

Na Rys. 3 i 4 pokazano wyniki wpływu ruchu pieszego na możliwość wykonania manewru polegającego na dołączeniu się do kolejki przez pojazdy z wlotów podporządkowanych. Przy ciągłym występowaniu kolejki pojazdów na wlotach podporządkowanych wykorzystywane są wszystkie dostępne odstępy czasu w potoku nadrzędnym. Dlatego wartości uzyskanych natężeń ruchu relacji podporządkowanych można traktować jako przepustowości tych relacji.

Na podstawie wyników badań można zauważyć rosnącą liniowo zależność pomiędzy natężeniem ruchu pieszego na skrzyżowaniu a przepustowością relacji z wlotów podporządkowanych dołączających się do kolejki. Dokonano aproksymacji zależności funkcją liniową. Otrzymano zależności opisane wzorami (1) i (2):

$$C^{DR} = 0{,}13 \cdot Q^{Ped} + 208, \quad (1)$$

$$C^{CL} = 0{,}13 \cdot Q^{Ped} + 155{,}1, \quad (2)$$

gdzie:

4. TEST RESULTS

4.1. INFLUENCE OF NUMBER OF PEDESTRIANS CROSSING THE MAIN STREET ON THE CAPACITY OF MOVEMENTS FROM THE MINOR ENTRY

The unsignalized intersection with the vehicle queue on the main street is a specific type of intersection. To properly describe the traffic at such an intersection, it is necessary to take into account the interdependencies between vehicle drivers and pedestrians. Influence of some road users is very important for the traffic of other road users and vice versa. Appropriate traffic modeling at this type of intersections must take into account the driver/pedestrian interactions as well as the interactions between the driver at the major street and the driver at the minor entry.

Pedestrian volume entering the crosswalks was varied during the simulation. The same total number of pedestrians entering each crosswalk was assumed. A different number of pedestrians was taken into account during particular entries. It was assumed, according to empirical studies, that on average there were 1.25 people in one pedestrian entry. Seven scenarios of pedestrian volumes were analyzed. Pedestrian volume entering each crosswalk changed from 0 to 300 pedestrians per hour (pedestrian volume in one direction). Considering the two-way pedestrian traffic at the crosswalks (Q^{Ped}), pedestrian volume at each crosswalk is twice as large.

Figs. 3 and 4 show the results of influence of pedestrian traffic on the possibility of joining the vehicle queue at the major street by vehicles from the minor entries. When there is a continuous queue of vehicles at the minor entries, all available gaps in main flow are used. Therefore, the obtained values of traffic volumes of movements at the minor entries can be treated as the capacity of these movements.

Based on the results of the research, a linear relationship between pedestrian volume at the crosswalk and the capacity of movements from the minor entries joining the vehicle queue at the major street may be noticed. The relationships described by formulas (1) and (2) were obtained:

$$C^{DR} = 0.13 \cdot Q^{Ped} + 208, \quad (1)$$

$$C^{CL} = 0.13 \cdot Q^{Ped} + 155.1, \quad (2)$$

where:

C^{DR} – capacity of right turn movement joining the vehicle queue at the major street [veh/h],

C^{DR} – przepustowość relacji podporządkowanej prawoskrętnej dołączającej się do kolejki pojazdów na jezdni głównej [P/h],

C^{CL} – przepustowość relacji podporządkowanej lewoskrętnej dołączającej się do kolejki pojazdów na jezdni głównej [P/h],

Q^{Ped} – natężenie godzinowe ruchu pieszego poruszającego się na przejściu dla pieszych w poprzek drogi głównej [Ps/h].

Pomiędzy wartościami uzyskanymi z badań a aproksymowaną zależnością występuje wysoka korelacja. Współczynnik determinacji R^2 wynosi 0,97.

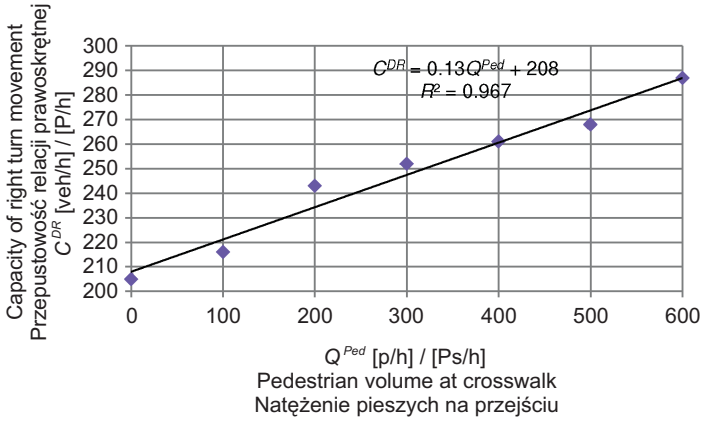

Fig. 3. Influence of pedestrian traffic on the possibility of joining the vehicle queue at the major street by vehicles turning right from the minor entry

Rys. 3. Wpływ pieszych na możliwość włączenia się do kolejki na drodze głównej pojazdów skręcających w prawo z wlotu podporządkowanego

Przedstawione wyniki badań symulacyjnych dowodzą, że na skrzyżowaniach z pierwszeństwem przejazdu, na których na jezdni głównej utrzymuje się kolejka pojazdów, konieczne jest uwzględnienie ruchu pieszego. Obecność ruchu pieszego w tym przypadku, w przeciwieństwie do innych typów skrzyżowań, powoduje wzrost przepustowości relacji podporządkowanych. Wzrost ten jest liniowy. W przypadku natężenia ruchu pieszego rzędu 600 Ps/h (na każdym z przejść) przepustowość relacji prawoskrętnej wzrasta o 37%, zaś relacji lewoskrętnej o 50% (w porównaniu do sytuacji bez pieszych).

4.2. WPŁYW RÓŻNEJ LICZBY PIESZYCH NA POSZCZEGÓLNYCH PRZEJŚCIACH

Przeprowadzono analizę wpływu zróżnicowanej liczby pieszych na poszczególnych przejściach na możliwość włączenia się pojazdów z relacji podporządkowanych do kolejki

C^{CL} – capacity of left turn movement joining the vehicle queue at the major street [veh/h],

Q^{Ped} – pedestrian volume crossing each crosswalk at the major street [p/h].

There is a high correlation between the values obtained from the simulation and the approximated dependence. The coefficient of determination R^2 is equal to 0.97.

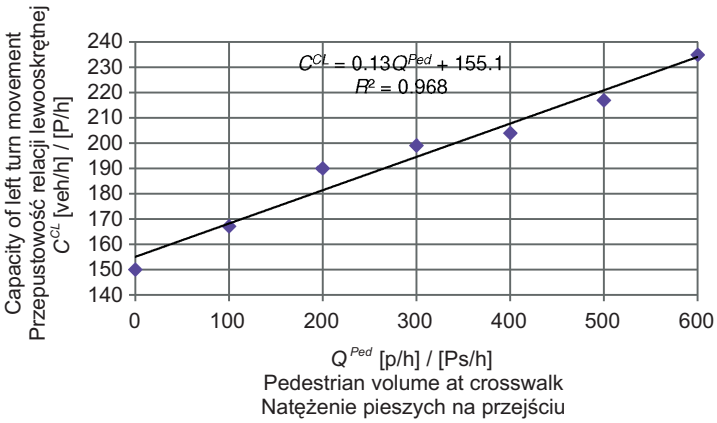

Fig. 4. Influence of pedestrian traffic on the possibility of joining the vehicle queue at the major street by vehicles turning left from the minor entry

Rys. 4. Wpływ pieszych na możliwość włączenia się do kolejki na drodze głównej pojazdów skręcających w lewo z wlotu podporządkowanego

The presented results of simulation show that at unsignalized intersections where there is a vehicle queue on the main street, pedestrian traffic should be taken into account. In contrast to other types of intersections, the presence of pedestrian traffic in this case increases the capacity of movements from the minor entries. This increase is linear. In case of pedestrian traffic equal to 600 pedestrians per hour (on each crosswalk), the capacity of the right turn movement increases by 37%, and the left turn movement increases by 50% (compared to the situation without any pedestrians).

4.2. IMPACT OF DIFFERENT NUMBER OF PEDESTRIANS AT PARTICULAR CROSSWALKS

The analysis of the impact of different number of pedestrians at particular crosswalks on the possibility of joining the vehicle queue at the major street by vehicles from the minor entries has been carried out. The number of pedestrians using each crosswalk may vary. The intersection analyzed in the previous simulation constituted the object of research. It was assumed that 500 pedestrians

samochodów na jezdni głównej. Nie zawsze z każdego przejścia dla pieszych korzysta ta sama liczba pieszych. Jako obiekt badań zastosowano to samo skrzyżowanie, co w poprzednich badaniach symulacyjnych. Założono, że w ciągu godziny w rejonie skrzyżowania z pierwszeństwem przejazdu przechodzi 500 pieszych. W pierwszym etapie założono, że cały potok pieszy porusza się po przejściach P3 oraz P4. W kolejnych etapach zmniejszano ten ruch o 50 pieszych na tym przejściu, a obciążano nim przejścia P1 oraz P2. Wyniki uzyskanych badań symulacyjnych przedstawiono na Rys. 5 i 6.

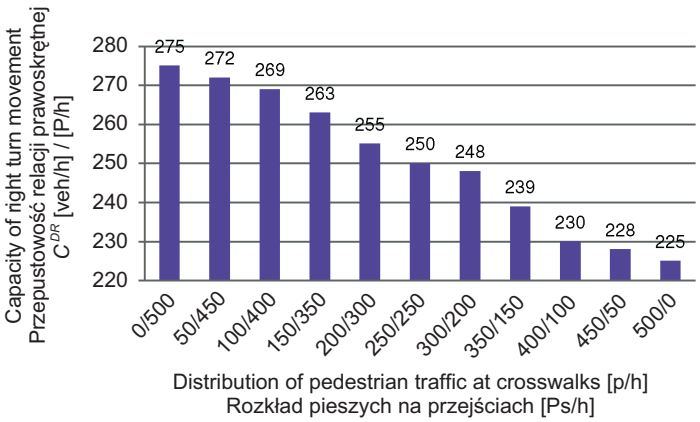

Fig. 5. Impact of different number of pedestrians at particular crosswalks on the possibility of joining the vehicle queue by vehicles turning right from the minor entry
Rys. 5. Wpływ różnej liczby pieszych na poszczególnych przejściach na możliwość włączenia się do kolejki pojazdów skręcających w prawo z wlotu podporządkowanego

W przypadku, gdy cały potok przechodzi przez przejścia P3 i P4, przepustowość relacji lewoskrętnej i prawoskrętnej z drogi podporządkowanej wzrasta w porównaniu do sytuacji równej liczby pieszych na wszystkich przejściach. Natomiast w przypadku, gdy cały potok pieszych korzysta tylko z przejścia P1 oraz P2, przepustowość relacji lewoskrętnej i prawoskrętnej z drogi podporządkowanej maleje. Określono współczynniki korygujące f_{PN} uwzględniające różny rozkład pieszych na poszczególnych przejściach dla pieszych. Jako pierwsza wartość podawany jest udział natężenia pieszego na przejściu położonym bliżej skrzyżowania z sygnalizacją świetlną (P1 oraz P2) do całości natężenia ruchu pieszego przechodzącego przez jezdnię główną w rejonie skrzyżowania z pierwszeństwem przejazdu. Druga wartość określa procentowy udział pieszych korzystających z przejścia P3 i P4. Dla równej liczebności pieszych na obu przejściach współczynniki f_{PN} wynoszą 1,0. Określone współczynniki f_{PN} przedstawiono w Tabl. 2.

per hour pass in the area of the unsignalized intersection. In the first stage, it was assumed that the whole pedestrian flow moves at crosswalks P3 and P4 (structure 0/500). In subsequent stages, this flow was reduced by 50 pedestrians at these crosswalks and shifted to crosswalks P1 and P2. The results obtained in the simulation research are shown in Figs. 5 and 6.

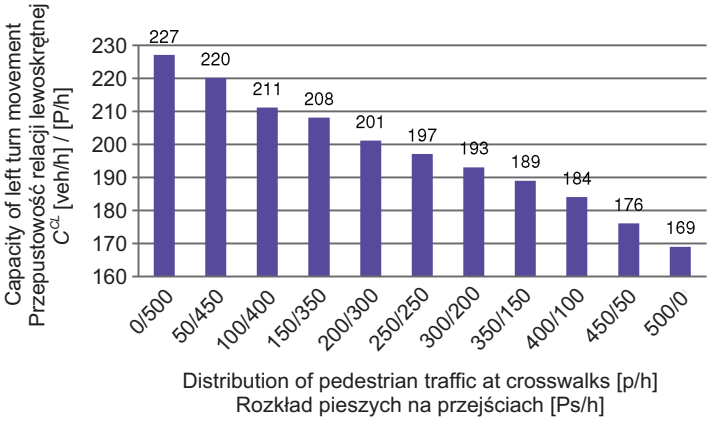

Fig. 6. Impact of different number of pedestrians at particular crosswalks on the possibility of joining the vehicle queue by vehicles turning left from the minor entry
Rys. 6. Wpływ różnej liczby pieszych na poszczególnych przejściach na możliwość włączenia się do kolejki pojazdów skręcających w lewo z wlotu podporządkowanego

In the situation when the whole pedestrian flow moves at the crosswalks P3 and P4, the capacity of left turn movement and right turn movement from the minor entries increases as compared to the situation of an equal number of pedestrians at each crosswalk. If the whole pedestrian flow uses only crosswalks P1 and P2, the capacity of left turn movement and right turn movement decreases. Correction coefficient f_{PN} was determined, taking into account the different distribution of pedestrians at particular crosswalks. The first value of distribution is the percent of pedestrian traffic at the crosswalks located closer to the signalized intersection (crosswalks P1 and P2) to the total pedestrian traffic crossing the main street at the unsignalized intersection. The second value of distribution determines the percent of pedestrian traffic at the crosswalks P3 and P4. For equal number of pedestrians at both crosswalks, the correction coefficients f_{PN} are equal to 1.0. Calculated coefficients f_{PN} are presented in Table 2.

Table 2. Correction coefficients f_{PN}
Tablica 2. Współczynniki korygujące f_{PN}

Distribution of pedestrian traffic at particular crosswalks [%] Rozkład pieszych na poszczególnych przejściach [%]	Right turn movement Relacja prawoskrętna	Left turn movement Relacja lewoskrętna
0/100	1.11	1.14
10/90	1.09	1.11
20/80	1.06	1.08
30/70	1.04	1.05
40/60	1.02	1.03
50/50	1.00	1.00
60/40	0.98	0.97
70/30	0.96	0.95
80/20	0.94	0.92
90/10	0.91	0.89
100/0	0.89	0.86

4.3. WPŁYW POJEMNOŚCI POWIERZCHNI AKUMULACJI NA PRZEPUSTOWOŚĆ RELACJI LEWOSKRĘTNEJ Z WLOTU PODPORZĄDKOWANEGO

Na wielu skrzyżowaniach bez sygnalizacji w pasie rozdziału znajduje się przestrzeń pozwalająca na zatrzymanie kilku pojazdów z wlotu podporządkowanego pomiędzy potokami ruchu na jezdni głównej. Pojemność powierzchni akumulacji to liczba pojazdów osobowych wykonujących manewr lewoskrętu, które mogą zatrzymać się w pasie rozdziału (pomiędzy jezdniami). Kierowcy tych pojazdów mogą wykonać manewr dwuetapowo, przecinając każdy z potoków ruchu osobno. Pierwszy etap polega na przekroczeniu jezdni dla ruchu prowadzącego od skrzyżowania z sygnalizacją świetlną i zatrzymanie się na obszarze akumulacji. Drugi etap polega na dołączeniu się do kolejki pojazdów. Czasem możliwe jest wykonanie obu etapów bez zatrzymywania się na obszarze akumulacji. Dane dotyczące warunków ruchu oraz geometrii są takie same jak podczas poprzednich badań symulacyjnych. Przeprowadzono badania dla powierzchni akumulacji umożliwiającej postój 0, 1, 2, 3 oraz 4 pojazdów oraz przy dwóch scenariuszach natężenia ruchu pieszego. W pierwszym założono brak ruchu pieszego, natomiast w drugim założono natężenie ruchu pieszego na każdym z przejść równe 500 pieszych na godzinę. Wyniki uzyskanych przepustowości relacji lewoskrętnych dołączających się do kolejki na jezdni głównej przedstawiono na Rys. 7 i 8.

Na podstawie wyników można zauważyć wzrost przepustowości relacji lewoskrętnej dołączającej się do kolejki pojazdów na jezdni głównej w zależności od liczby pojazdów mogących zatrzymać się na obszarze akumulacji. Wzrost ten

4.3. INFLUENCE OF MEDIAN CENTRAL STORAGE ON THE CAPACITY OF LEFT TURN MOVEMENT FROM THE MINOR ENTRY

At many unsignalized intersections there is a place in the center of the major street where several vehicles from the minor entry can be stored between the two directions of traffic flow on the major street. This storage space inside the intersection enables the drivers from the minor street to cross each of the major street streams separately. The capacity of the median central storage is a number of vehicles that can stop in the median storage when turning left from the minor entry. The analysis of the effect of the median central storage enabling left turn from the minor entry in two stages was carried out. The first stage consists in crossing the carriageway for flow from the signalized intersection and stopping in the median central storage. The second stage consists in joining the vehicle queue on the main street. Sometimes it is possible to perform both stages without stopping in the median central storage. In simulation, the same data was used as previously. Simulations were carried out for median central storage enabling stopping of 0, 1, 2, 3 and 4 vehicles and with two scenarios of pedestrian traffic. In the first scenario, no pedestrian traffic was assumed, while in the second scenario, pedestrian traffic at each crosswalk was assumed equal to 500 pedestrians per hour. The results of the obtained capacity of left turn movement joining the vehicle queue on the main street are shown in Figs. 7 and 8.

On the basis of the results of research, an increase in capacity of left turn movement joining the vehicle queue on

jest liniowy zarówno przy braku ruchu pieszego, jak również przy dość dużym ruchu pieszym. Zauważono również, że nawet gdy pojemność powierzchni akumulacji wynosi 4 pojazdy to nie wszystkie odstępy czasu w potoku na jezdni głównej są wykorzystane. W tym wypadku wykorzystanych jest około 95% dostępnych odstępów czasu. Dokonano aproksymacji zależności funkcją liniową, uzyskując następujące wzory:

$$C^{0} = 23{,}4 \cdot m + 114, \quad (3)$$

$$C^{500} = 24 \cdot m + 141{,}8 \quad (4)$$

gdzie:

C^{0} – przepustowość relacji lewoskrętnej dołączającej się do kolejki na jezdni głównej przy natężeniu ruchu pieszego równym 0 Ps/h,

C^{500} – przepustowość relacji lewoskrętnej dołączającej się do kolejki na jezdni głównej przy natężeniu ruchu pieszego równym 500 Ps/h,

m – pojemność powierzchni akumulacji.

Pomiędzy wartościami uzyskanymi z badań a aproksymowaną zależnością występuje wysoka korelacja. Współczynnik determinacji R^2 wynosi 0,99.

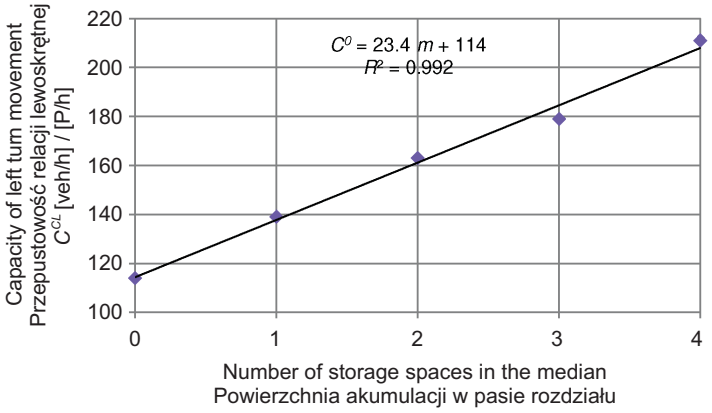

Fig. 7. Influence of the number of storage spaces in the median Q^{Ped} = 0 p/h

Rys. 7. Wpływ pojemności powierzchni akumulacji Q^{Ped} = 0 Ps/h

5. WNIOSKI

Opracowany model symulacyjny określa warunki ruchu na skrzyżowaniu z pierwszeństwem przejazdu, gdy na jezdni głównej na jednym kierunku utrzymuje się kolejka pojazdów związana z obecnością skrzyżowania z sygnalizacją świetlną. Ze względu na niewielkie prędkości pojazdów na jezdni głównej modelowanie warunków ruchu na skrzyżowaniu z pierwszeństwem przejazdu wymaga uwzględnienia wszystkich uczestników ruchu oraz interakcji pomiędzy nimi. W celu wykonania badań symulacyjnych przeprowadzone

the main street may be noticed, depending on the number of vehicles that can stop in the median central storage. This increase is linear both in the absence of pedestrian traffic and with significant pedestrian traffic. It was also noted that even if 4 vehicles can stop in the median storage, not all gaps in flows on the major street are used. In this case, about 95% of available gaps are used. Upon approximation to linear function, the following formulas were obtained:

$$C^{0} = 23.4 \cdot m + 114, \quad (3)$$

$$C^{500} = 24 \cdot m + 141.8 \quad (4)$$

where:

C^{0} – capacity of left turn movement joining the vehicle queue on the major street in case of pedestrian traffic equal to 0 p/h,

C^{500} – capacity of left turn movement joining the vehicle queue on the major street in case of pedestrian traffic equal to 500 p/h,

m – number of storage spaces in the median.

There is a high correlation between the values obtained from simulation and approximated dependence. The coefficient of determination R^2 is equal to 0.99.

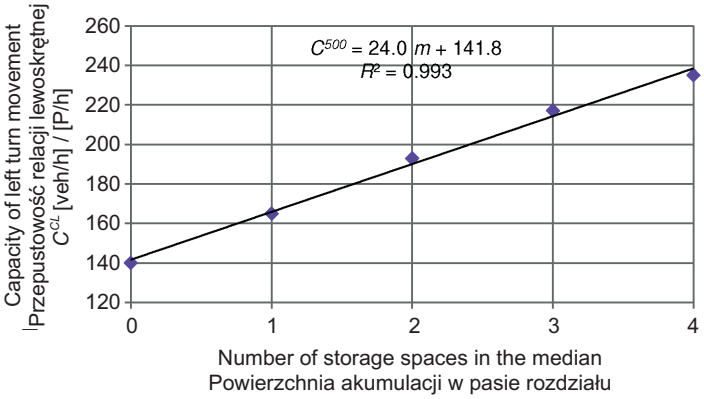

Fig. 8. Influence of the number of storage spaces in the median Q^{Ped} = 500 p/h

Rys. 8. Wpływ pojemności powierzchni akumulacji Q^{Ped} = 500 Ps/h

5. CONCLUSIONS

The implemented simulation model determines the traffic conditions at the unsignalized intersection when there is a vehicle queue on the main street before the signalized intersection. Due to the low speed of vehicles moving in the queue on the main street, modeling of traffic conditions at unsignalized intersection requires taking into account all the road users and interactions between them. In order to

zostały badania losowości parametrów ruchu mających wpływ na przepustowość relacji podporządkowanych. Badania te wykonano we Wrocławiu, Opolu oraz Krakowie.

Przeprowadzone symulacje pokazują, że na skrzyżowaniach bez sygnalizacji w przypadku obecności kolejki pojazdów na drodze głównej konieczne jest uwzględnienie ruchu pieszego, którego wpływ jest bardzo istotny. W przeciwieństwie do skrzyżowań innych rodzajów, w takim przypadku obecność pieszych zwiększa przepustowość relacji podporządkowanych włączających się do kolejki pojazdów. Wzrost ten jest liniowy. W przypadku natężenia ruchu pieszego rzędu 600 Ps/h (na każdym z przejść) przepustowość relacji prawoskrętnej wzrasta o 37%, zaś relacji lewoskrętnej o 50% w porównaniu do sytuacji bez pieszych. Korzystne warunki zachodzą również, gdy piesi korzystają wyłącznie z przejść P3 i P4 (rozkład 0/100). W takiej sytuacji przepustowość relacji prawoskrętnej może wzrosnąć o 11%, zaś relacji lewoskrętnej o 14% w porównaniu do sytuacji z identyczną liczbą pieszych na każdym z przejść.

Przepustowość relacji lewoskrętnej włączającej się do kolejki pojazdów na drodze głównej jest uzależniona również od pojemności powierzchni akumulacji w pasie rozdziału wyrażonej w liczbie pojazdów. Im większa pojemność, tym więcej pojazdów skręcających w lewo może włączyć się w kolejkę na jezdni głównej. Kiedy powierzchnia akumulacji umożliwia zatrzymanie czterech pojazdów między potokami ruchu na jezdni głównej, przepustowość relacji lewoskrętnej wzrasta o 80%.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

[1] *Luttinen R.T.*: Movement capacity at two-way stop-controlled intersections. Transportation Reseach Record, **1883**, 2004, 198-202

[2] *Pollatschek M.A.*, *Polus A.*, *Livneh M.*: A decision model for gap acceptance and capacity at intersecions. Transportation Research Part B: Methodological, **36**, 7, 2002, 649-663

[3] *Wu N.*: A universal procedure for capacity determination at unsignalized (priority-controlled) intersections. Transportation Research Part B: Methodological, **35**, 6, 2001, 593-623

[4] *Chodur J.*: Capacity models and parameters for unsignalized urban intersections in Poland. Journal of Transportation Engineering, **131**, 12, 2005, 924-930

[5] Metoda obliczania przepustowości skrzyżowań bez sygnalizacji świetlnej. Instrukcja obliczania. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa, 2004

[6] *Gleue A.W.*: Vereinfachten Verfahrenzur Berechnung signalgeregelter Knotenpunkte. Bundesmin. für Verkehr, Abt. Straßenbau, Heft 136 "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", 1972

develop the simulation model, surveys of traffic parameters and their randomness were carried out. These traffic surveys were performed in three Polish cities: Wroclaw, Opole and Krakow.

The performed simulation tests show that at unsignalized intersections, if there is a vehicle queue on the main road, it is necessary to consider pedestrian traffic. The impact of pedestrian traffic is very important. The presence of pedestrian traffic in this case, in contrast to other types of intersections, increases the capacity of movements from the minor entries joining the queue on the main road. This increase is linear. In case of pedestrian traffic equal to 600 pedestrians per hour (on each crosswalk), the capacity of the right turn movement increases by 37%, and the left turn movement increases by 50%, compared to the situation without any pedestrians. Beneficial circumstances occur also when pedestrians use only the P3 and P4 crosswalks (distribution 0/100). In this situation, the capacity of right turn movement can increase by 11% and the left turn movement can increase by 14% compared to the equal number of pedestrians at all crosswalks.

The capacity of left turn movement from the minor entry joining the queue of vehicles on the main street also depends on the number of storage spaces in the median between carriageways. The greater the number of storage spaces, the more vehicles turning left can join the queue of vehicles on the main street. When four vehicles can stop on the median central storage, the capacity of this movement increases by 80%.

[7] *Guler S.I.*, *Menendez M.*: Methodology for estimating capacity and vehicle delays at unsignalized multimodal intersections. International Journal of Transportation Science and Technology, **5**, 4, 2016, 257-267

[8] *Li H.*, *Tian Z.*, *Deng W.*: Capacity of multilane all-way stop-controlled intersections based on the conflict technique. Transportation Research Record, **2257**, 2011, 111-120

[9] *Li H.*, *Tian Z.*, *Deng W.*: Capacity of TWSC intersection with multilane approaches. Procedia Social and Behavioral Sciences, **16**, 2011, 664-675

[10] *Prasetijo J.*, *Ahmad H.*: Capacity analysis of unsignalized intersection under mixed traffic conditions. Procedia Social and Behavioral Sciences, **43**, 2012, 135-147

[11] *Transportation Research Board*, *Elefteriadou L.A.*: Highway Capacity Manual, 6^{th} ed.: A Guide for Multimodal Mobility Analysis, The National Academies Press, Washington, DC, 2016

[12] *Bogdanović V.*, *Ruškić N.*, *Basarić V.*, *Tanackov I.*: Capacity analysis procedure for four-leg non-standard unsignalised intersections. Promet - Traffic&Transportation, **29**, 5, 2017, 543-550

[13] *Bogdanović V.*, *Ruškić N.*, *Kulovic M.*, *Han L.D.*: Toward a capacity analysis procedure for nonstandard two-way stop-controlled intersections. Transportation Reseach Record, **2395**, 2013, 132-138

[14] *Brilon W.*: Impedance effects of left-turning vehicles from the major street at a two-way stop-controlled intersection. Transportation Research Record, **2130**, 2009, 52-58

[15] *Kamińska J.A.*, *Chalfen M.*: The effect of distances between vehicles on time and speed in simulated traffic flow. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **16**, 3, 2017, 163-176, DOI: 10.7409/rabdim.017.011

[16] *Lanović Z.*: Complementarity of traffic flow intersecting method with intersection capacity analysis. Promet - Traffic&Transportation, **21**, 4, 2009, 229-238

[17] *Li H.*, *Deng W.*, *Tian Z.*, *Hu P.*: Capacities of unsignalized intersections under mixed vehicular and nonmotorized traffic conditions. Transportation Research Record, **2130**, 2009, 129-137

[18] *Mauro R.*, *Cattani M.*, *Corradini M.*: A simulation model for unsignallised urban intersections based on fuzzy logic. Archives of Transport, **18**, 4, 2006, 57-72

[19] *Pitlova E.*, *Kocianova A.*: Determination of priority stream volumes for capacity calculation of minor traffic streams for intersections with bending right-of-way. Transportation Research Procedia, **40**, 2019, 875-882

[20] *Tanackov I.*, *Deretić N.*, *Bogdanović V.*, *Ruškić N.*, *Jović S.*: Safety time in critical gap of left turn manoeuvre from priority approach at TWSC unsignalized intersecions. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, **505**, 2018, 1196-1211

[21] *Gaca S.*, *Wojtal R.*: Wpływ filtrowania potoków ruchu przez sygnalizację świetlną na przepustowość skrzyżowań z pierwszeństwem przejazdu. Transport Miejski i Regionalny, **9**, 2004, 7-12

[22] *Kyte M.*, *Amin E.*, *Troutbeck R.*: Effect of an upstream traffic signal on the capacity of a downstream two-way stop-controlled intersection. Transportation Research Record, 2**483**, 2015, 39-46

[23] *Gasz K.*: Modelowanie ruchu w sieci ulic w warunkach ograniczonej przepustowości skrzyżowań. Rozprawa doktorska, Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2007, https://dbc.wroc.pl/dlibra/publication/1562/edition/1760?language=pl, 02.01.2020