



YEVHEN FORMALCHYK<sup>1)</sup>  
 EUGENIUSZ KODA<sup>2)</sup>  
 IVAN KERNYTSKYI<sup>3)</sup>  
 OLEH HRYTSUN<sup>4)</sup>  
 YURIY ROYKO<sup>5)</sup>  
 ROMANA BURAK<sup>6)</sup>  
 PIOTR OSINSKI<sup>7)</sup>  
 RUSLAN BARABASH<sup>8)</sup>  
 RUSLAN HUMENIUK<sup>9)</sup>  
 PAVLO POLYANSKY<sup>10)</sup>

## THE IMPACT OF VEHICLE TRAFFIC VOLUME ON PEDESTRIAN BEHAVIOR AT UNSIGNALIZED CROSSWALKS

### WPŁYW NATĘŻENIA RUCHU POJAZDÓW NA ZACHOWANIE PRZECHODNIÓW NA PRZEJŚCIACH BEZ SYGNALIZACJI

**STRESZCZENIE.** W pracy przedstawiono analizę strat czasu przejazdu pojazdów spowodowane przez przejścia dla pieszych na ulicach jednokierunkowych. Badania obejmowały trzy różne lokalizacje przejść względem skrzyżowania: przejście na odcinku ulicy między skrzyżowaniami, przejście w obrębie strefy oddziaływania skrzyżowania oraz przejście w samej strefie skrzyżowania. Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że znaczący wpływ przejścia bez sygnalizacji na korki obserwuje się w odległości 50-100 m od niego. Przeanalizowano zachowanie oraz czas oczekiwania pieszych na takich przejściach. Potwierdzono, że przechodząc przez jezdnię piesi nie korzystają natychmiast z pierwszeństwa przed samochodami. W pracy przedstawiono zależność czasu oczekiwania pieszych na przejściu od natężenia ruchu pojazdów. Na podstawie uzyskanych danych przygotowano model i przeprowadzono symulacje zachowania pieszych na przejściach bez sygnalizacji.

**SŁOWA KLUCZOWE:** natężenie ruchu drogowego, straty czasu w ruchu drogowym, piesi, prędkość ruchu pojazdów, przejście dla pieszych, symulacje ruchu drogowego.

**ABSTRACT.** The research is focused on analyses of vehicle delays caused by pedestrian crosswalks on one-way streets. The study encompassed three particular locations of unsignalized crosswalks: on the street section between intersections, in the zone of intersection impact, and in the zone of intersection itself. The study revealed that the major impact on traffic jams is observed at a distance of 50-100 m from the unsignalized crosswalk. The study analyses pedestrian behavior and waiting time at such crosswalks. It was confirmed that the pedestrians did not immediately use their priority before passing. The paper presents the change in pedestrian waiting time when crossing the roadway depending on traffic flow. Based on that data, a model was prepared and simulations of pedestrian behavior at unsignalized crosswalks were performed.

**KEYWORDS:** crosswalk, pedestrian, traffic delay, traffic flow, traffic simulation, traffic volume.

DOI: 10.7409/rabdim.023.010

<sup>1)</sup> Lviv Polytechnic National University, Transport Technology Department, Lviv, Ukraine; yevgen.fornalchyk@gmail.com

<sup>2)</sup> Warsaw University of Life Sciences (SGGW), Faculty of Civil and Environmental Engineering; eugeniusz\_koda@edu.sggw.pl

<sup>3)</sup> Warsaw University of Life Sciences (SGGW), Faculty of Civil and Environmental Engineering; ivan\_kernytskyi@edu.sggw.pl

<sup>4)</sup> Lviv Polytechnic National University, Transport Technology Department, Lviv, Ukraine; oleh.ruslan@lpnu.edu.ua

<sup>5)</sup> Lviv Polytechnic National University, Transport Technology Department, Lviv, Ukraine; yuriy.royko@lpnu.edu.ua

<sup>6)</sup> Lviv Polytechnic National University, Transport Technology Department, Lviv, Ukraine; romana.r.burak@lpnu.edu.ua

<sup>7)</sup> Warsaw University of Life Sciences (SGGW), Faculty of Civil and Environmental Engineering, 159 Nowoursynowska St., 02-776 Warsaw, Poland; piotr\_osinski@sggw.edu.pl (✉)

<sup>8)</sup> Lviv National University of Nature Management (Lviv National Agrarian University), Dublany, Ukraine; rusla.barabash@lnup.edu.ua

<sup>9)</sup> Lviv National University of Nature Management (Lviv National Agrarian University), Dublany, Ukraine; humeniykrv@lnup.edu.ua

<sup>10)</sup> Mykolayiv National Agrarian University, Mykolayiv, Ukraine; polyanskymp@mnau.edu.ua

## 1. WSTĘP

Ograniczenie liczby wypadków i poprawa bezpieczeństwa drogowego należą do priorytetów administracji drogowej i rządzących na całym świecie. Do najczęstszych rodzajów wypadków – zwracających uwagę ze względu na poważne konsekwencje – należą wypadki z udziałem pieszych. Piesi stanowią najbardziej narażoną na ciężkie urazy grupę użytkowników dróg. Około jedną trzecią wypadków (39%) na Ukrainie odnotowuje się w aglomeracjach miejskich [1, 2]. W związku z tym zachowanie pieszych podczas przekraczania jezdni stanowi ważny temat badawczy. Ze względu na rosnące natężenie ruchu pieszych i pojazdów w miastach, rośnie liczba przejść dla pieszych (z sygnalizacją i bez). To z kolei przekłada się na wzrost kosztów całkowitych transportu.

Regulowanie ruchu pieszego ma na celu zapewnienie bezpieczeństwa i komfortu pieszych poprzez integrację środków planowania rozwoju infrastruktury wynikających z badań warunków i charakterystyki ruchu pieszego. Niemniej jednak, nadal potrzebny jest model zachowania pieszych zbliżających się do przejść bez sygnalizacji. Dalszych badań wymagają psychofizjologiczne anomalie zachowań pieszych na przejściu.

Wystąpienie zdarzenia drogowego w dużej mierze zależy od zachowania użytkowników drogi w miejscach potencjalnych kolizji – takich jak przejścia dla pieszych. Do analiz niezbędna jest więc wiedza o regulacjach formalnych oraz o wzroście ruchu pieszego na przejściach bez sygnalizacji.

Natężenie ruchu pieszego jest zróżnicowane w poszczególnych miastach, lecz zazwyczaj na terenach miejskich jest ono stosunkowo wysokie i ma istotny wpływ na opóźnienia w ruchu pojazdów oraz korki. Pomijanie tego czynnika powoduje znaczące błędy w obliczeniach służących optymalnemu doborowi rozkładu ruchu na sieci drogowej. W literaturze znaleźć można kilka prac poświęconych wpływowi natężenia pieszych na kongestię sieci [3-12] i inne parametry. Modele matematyczne rozkładu ruchu nieuwzględniające natężenia ruchu pieszych nie są wiarygodne ze względu na istotne błędy w wyliczeniach odzwierciedlających obciążenie sieci. W związku z tym badanie różnych scenariuszy związanych z ruchem pieszym w kontekście ich wpływu na straty czasu w ruchu pojazdów pozostaje ważnym zagadnieniem. Symulacje takich scenariuszy umożliwiają dobór najkorzystniejszych rozwiązań w zróżnicowanych okolicznościach.

Zachowanie pieszych na drodze to zagadnienie wymagające szczególnej uwagi, ponieważ ta grupa użytkowników jest najbardziej narażona na niebezpieczeństwo. Zachowanie pieszych zależy od ich zdolności i podjętych środków ostrożności, które są kwestią indywidualną. Piesi różnią się pod względem

## 1. INTRODUCTION

Reducing traffic accidents and increasing road safety belong to the top priorities of road administration and policymakers across the world. The most common types of accidents – notable due to their high severity of consequences – are crashes involving pedestrians. Pedestrians are the most vulnerable road users as they are exposed to severe injuries during traffic accidents. About one-third of crashes (39%) in Ukraine are recorded in agglomerations [1, 2]. Therefore, behavior of pedestrians while crossing the roadway is a relevant topic for research. Due to the increase in the volume of both vehicle and pedestrian traffic in cities, the number of crosswalks (both signalized and unsignalized) increases. This, in turn, causes an increase in the total costs of transport.

Regulation of pedestrian traffic aims to ensure safety and comfort of pedestrians, through integrated use of infrastructure development planning measures arising from the study of conditions and characteristics of pedestrian traffic on road networks. However, research is still needed to develop a model of pedestrian behavior when approaching unsignalized crosswalks. These studies encompass the psychophysiological anomalies of pedestrian behavior when crossing the roadway, which require further investigation.

Occurrence of an emergency traffic situation largely depends on the behavior of road users in locations of potential collisions – like crosswalks. Thus, knowledge is needed about the formal regulations and growth of pedestrian traffic at crosswalks with no traffic control systems.

The volume of pedestrian flow varies depending on the city, but it is usually relatively high and significantly influences the magnitude of vehicle delays and traffic jams. Ignoring this factor causes significant errors in calculations when choosing the optimal distribution of traffic flows on the road network. In the literature there are several studies concerning the impact of pedestrian flows on network congestion [3-12] and other parameters. Mathematical models of traffic flow that do not take into account pedestrian traffic lack credibility due to significant errors in computations of indicators of traffic arrangement efficiency on the road network. Therefore, research on different scenarios of pedestrian traffic and determining the magnitude of vehicle delays at crosswalks remains an important task. Simulation of these scenarios will provide an opportunity to choose the most advantageous solutions in a variety of circumstances.

prędkości, inercji i mobilności przy wyborze kierunku przemieszczania się [13, 14].

Podstawowe metody matematyczne stosowane w modelowaniu ruchu pieszych przedstawiono w [4]. Praca [15] poświęcona jest ocenie probabilistycznej wypadków z udziałem pieszych; autorzy zaproponowali metodę obliczeń szacunkowych z uwzględnieniem względnego ryzyka. Stwierdzono, że prędkość pojazdów, przestrzeganie przepisów przez kierowców, stan nawierzchni oraz natężenie ruchu pojazdów i pieszych ma wpływ na prawdopodobieństwo wypadków przed przejściem dla pieszych. Biorąc pod uwagę te czynniki, proces decyzyjny pieszego przechodzącego przez przejście można podzielić na trzy poziomy, przedstawione na Rys. 1.

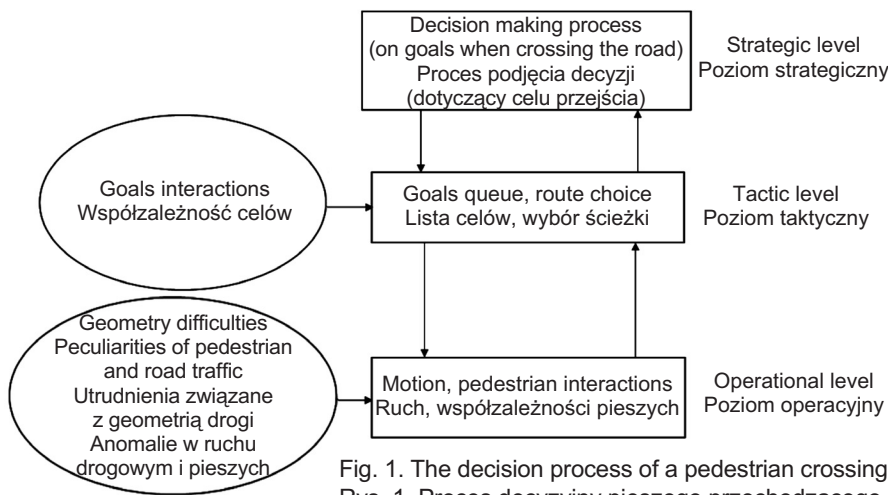


Fig. 1. The decision process of a pedestrian crossing the roadway  
Rys. 1. Proces decyzyjny pieszego przechodzącego przez jezdnię

Na poziomie strategicznym pieszy decyduje o celach, które chce osiągnąć, jak również o kolejności ich realizacji. Na poziomie taktycznym pieszy formułuje zestaw rozwiązań krótkoterminowych, takich jak dobór optymalnej ścieżki na podstawie charakterystyki terenu, natężenia ruchu itp. Poziom operacyjny związany jest bezpośrednio z ruchem pieszego na przejściu i natychmiastowymi decyzjami niezbędnymi do uniknięcia kolizji. Prawo o ruchu drogowym na Ukrainie zapewnia pieszym pierwszeństwo na przejściach, jednakże ze względów bezpieczeństwa piesi często rezygnują z wykorzystania tego prawa i ustępują pojazdom. Na tym poziomie ważne są informacje o funkcjonowaniu sieci drogowej i jej użytkownikach. Niezbędne dane obejmują natężenie ruchu pojazdów i pieszych, organizację ruchu w badanej lokalizacji, prędkość oraz straty czasu pojazdów i pieszych na przejściach.

W większości przypadków – jeśli możliwe jest określenie innych czynników – straty czasu w ruchu pojazdów spowodowane przekraczaniem jezdni przez pieszych związane są przede wszystkim z funkcjonowaniem sygnalizacji świetlnej, zmuszającej pozostałych użytkowników drogi do oczekiwania [16].

Pedestrian behavior on the road is of major concern, since this particular group of road users is the most exposed to danger. Behavior of pedestrians depends on their abilities and precaution measures, which differ from person to person. Pedestrians differ in speed, inertia and mobility when choosing the direction of motion [13, 14].

Basic mathematical approaches to pedestrian flow modelling are stated in [4]. Study [15] is based on probabilistic evaluation of accidents involving a pedestrian. The authors propose a method of calculating these estimates and the relative risk indicator. It is determined that the probability of traffic accidents in the area around the crosswalk is influenced by the speed of traffic, the discipline of drivers, the condition of the road pavement as well as pedestrian and vehicle traffic volume. Taking into account these factors, the pedestrian's decision-making process when crossing the roadway can be divided into three levels presented in Fig. 1.

At the strategic level, the pedestrians decide what goals they want to achieve and in which order they will fulfil them. At the tactical level, a pedestrian formulates a set of short-term solutions, such as choosing the optimal route according to the characteristics of the terrain, traffic intensity, etc. The operational level directly describes the pedestrian's movement through the crosswalk and the immediate decisions necessary to avoid collisions. The traffic law in Ukraine gives priority of passage to pedestrians, but due to their safety, pedestrians do not always use their right to cross the roadway first. At this level of analysis, information on the performance of the road network and road users is important. The necessary data include vehicle and pedestrian traffic volume, the organization of traffic at the location of the study, speed, as well as traffic and pedestrian delays at crosswalks.

In most cases, if the other factors can be determined, the transport delay during the passage of pedestrians at a crosswalk is caused by traffic light systems that keep all the other road users waiting [16]. For crosswalks at which

W przypadku przejść bez sygnalizacji określenie przyczyn opóźnień jest dużo bardziej skomplikowane.

Na straty czasu pojazdów przed przejściami dla pieszych bez sygnalizacji składa się głównie czas spędzony przez każdy pojazd na przejściu [2, 17, 18]. W Lwowie, gdzie prowadzono badania, pojazdy muszą spędzać więcej czasu, gdy przejeżdżają przez przejścia o wysokim natężeniu ruchu pieszego.

Badania teoretyczne wykazały, że przejście dla pieszych bez sygnalizacji wpływa na ruch pojazdów w odległości około 50 m przed i za przejściem [18]. Dokładna odległość wpływu oraz redukcja prędkości ruchu pojazdów uzależnione są od następujących czynników: natężenia ruchu pieszych, struktury ruchu oraz widoczności na skrzyżowaniu (przejściu). Ponadto straty czasu pojazdów można określić na podstawie porównania zredukowanej prędkości pojazdów z prędkością pojazdów w ruchu swobodnym lub bez pieszych w pobliżu przejścia [5, 16].

Wiadomo, że w miarę wzrostu natężenia ruchu pieszego rosną również straty czasu w ruchu pojazdów, a strefa przejścia dla pieszych bez sygnalizacji w znaczący sposób wpływa na ruch. Z drugiej strony, wzrost natężenia ruchu pojazdów utrudnia pieszym przekroczenie jezdni, a prawdopodobieństwo wypadków wzrasta [19-23]. Najnowsze badania wykazały, że takim sytuacjom zapobiec może zastosowanie znaków aktywnych z pulsującymi sygnałami świetlnymi [24].

Zachowanie pieszych na przejściach bez sygnalizacji jest ważnym tematem badawczym. Głównym wyznacznikiem zachowania pieszych na takich przejściach jest ich czas oczekiwania, rozpatrywany w zależności od natężenia ruchu drogowego. Przenalizowanie i zrozumienie tego mechanizmu może znacząco poprawić efektywność przejść dla pieszych bez sygnalizacji, tym samym zwiększając bezpieczeństwo ruchu drogowego. W pracy przedstawiono analizy natężenia ruchu pieszych i pojazdów, jak również opracowane metody ograniczania strat czasu.

Celem pracy jest rozpoznanie i określenie wpływu natężenia ruchu pojazdów na ruch pieszych na skrzyżowaniach z przejściami bez sygnalizacji. W związku z powyższym sformułowano następujące szczegółowe cele:

- analiza parametrów ruchu, takich jak prędkość i natężenie ruchu pojazdów oraz pieszych,
- analiza charakterystycznych wskaźników ruchu w strefach przejść bez sygnalizacji,
- zaproponowanie metody analizy strat czasu pojazdów przed przejściami dla pieszych,
- opracowanie modeli matematycznych opisujących zmiany czasu oczekiwania na przejściach bez sygnalizacji w zależności od natężenia ruchu pojazdów i pieszych.

no traffic light system is provided, determination of the cause of delays is much more complex.

Delays of vehicles in front of pedestrian crosswalks with no traffic lights mostly consist of the time spent by each vehicle at the crosswalk [2, 17, 18]. In Lviv, where the investigation was performed, vehicles need to spend more time passing crosswalks with high pedestrian volume.

Theoretical studies have shown that a pedestrian crosswalk with no traffic light systems affects traffic at a distance of about 50 m upstream and downstream [18]. The limits of this distance and the impact on traffic speed reduction depend on the following factors: pedestrian traffic volume, traffic composition and visibility at the intersection (crosswalk). In addition, vehicle delays can be determined by traffic speed reduction and comparison with free traffic conditions or in the absence of pedestrians at the crosswalk [5, 16].

It is known that as pedestrian volume increases, traffic delays increase, and the area of crosswalks with no traffic lights affects the traffic flow to a major extent. However, an increase in the traffic volume makes it difficult for pedestrians to cross the roadway, and the probability of traffic accidents grows [19-23]. To avoid such cases, most recent studies proved that effective solutions could be achieved by implementing automatically activated flashing light systems, as presented in [24].

Scientific study of pedestrian behavior at unsignalized crossings is relevant. The main indicator of pedestrian behavior at such crosswalks is pedestrian waiting time depending on the traffic volume. Investigating and understanding the mechanism could definitely improve the effectiveness of pedestrian crosswalks without traffic light control, and thus increase traffic safety. The paper presents analyses of pedestrian and traffic flow, as well as the development of methods to decrease potential delays.

The study aims to recognize and define the impact of the vehicle traffic volume on pedestrian traffic at intersections with no traffic light systems. To achieve this aim, the following objectives were formulated:

- analysis of traffic indicators, such as vehicle traffic volume and speed, pedestrian volume and speed of motion,
- analyses of traffic characteristic indicators in the zones of crosswalks without traffic light control,
- proposing a method for vehicle delay analyses at road sections in the vicinity of pedestrian crosswalks,
- development of mathematical models describing changes in the waiting time at crosswalks with no traffic light systems, depending on vehicle and pedestrian traffic volume.

## 2. MATERIAŁY I METODY BADAWCZE

Aby określić czynniki wpływające na model zachowania pieszych na przejściach bez sygnalizacji, niezbędne jest monitorowanie ruchu pojazdów. Uzyskane wyniki mają umożliwić opracowanie modelu zachowań pieszych z uwzględnieniem takich czynników jak natężenie ruchu, prędkość chwilowa pojazdów, straty czasu pojazdów, lokalizacja sąsiednich przejść dla pieszych, stopień wykorzystania przepustowości itp.

W przedstawionym badaniu opóźnienia w ruchu pojazdów są równoznaczne ze stratami czasu pojazdów związanymi z obecnością pieszych na przejściach. Do opóźnień tych dochodzi, gdy pojazdy zmuszone są do zatrzymania lub zmniejszenia prędkości celem umożliwienia przekroczenia jezdni przez przechodniów. W rezultacie czas niezbędny na przejechanie przez strefę przejścia/skrzyżowania wzrasta. Badania strat czasu pojazdów z powodu obecności pieszych na przejściach mogą być przydatne w analizach ruchu, planowaniu rozwoju infrastruktury oraz opracowywaniu strategii poprawy wydajności i bezpieczeństwa systemu drogowego. Badania strat czasu pojazdów przed przejściami prowadzono w trzech etapach:

- 1) określenie wzajemnego położenia przejść bez sygnalizacji (odległości między nimi na odcinku ulicy pomiędzy skrzyżowaniami albo układu przejść w obrębie skrzyżowania),
- 2) badanie charakteru ruchu w strefie przejścia bez sygnalizacji,
- 3) pomiary strat czasu pojazdów przed przejściami.

Pierwszym etapem było określenie parametrów geometrycznych sieci drogowej (szerokości ulicy; odległości przejścia od skrzyżowania; obecności wydodrębnionego pasa ruchu dla transportu publicznego itd.) oraz organizacji ruchu (oznakowania pionowego i poziomego, sygnalizacji).

Etapy drugi i trzeci wymagały przeprowadzenia badania ruchu z zastosowaniem rejestracji wideo. Jak wspomniano powyżej, niemalże 40% wypadków na Ukrainie odnotowuje się w dużych aglomeracjach miejskich takich jak Lwów, gdzie w ostatnich latach rozwój i bezpieczeństwo transportu stały się priorytetami [1, 2]. W 2020 roku w Lwowie zarejestrowano 5958 wypadków, 47 ofiar śmiertelnych i około tysiąca rannych [1]. Potwierdza to wagę i aktualność podjętych badań. Monitoring ruchu prowadzono we Lwowie. Jest to rozwinięte miasto o rosnącej z roku na rok liczbie użytkowników dróg. Monitoring wideo prowadzono na 30 skrzyżowaniach na ulicach jednokierunkowych. Na każdym ze skrzyżowań rejestrowano pieszych na wszystkich przejściach w okresach najintensywniejszego ruchu. Poranne godziny szczytu przypadały na okres 8.00-10.00, zaś popołudniowe na okres 17.00-19.00. Liczebność próby pieszych zarejestrowanej na każdym przejściu wyniosła 300 osób.

## 2. MATERIALS AND RESEARCH METHODS

To determine the factors affecting the model of pedestrian behavior at crosswalks without signal lights, it is necessary to monitor vehicle passages. It is expected that the results would enable the development of a model of pedestrian behavior, taking into account such factors as pedestrian and vehicle traffic volume, instantaneous speed of vehicles, delay of vehicles, location of adjacent pedestrian crosswalks, volume-capacity ratio, etc.

In the presented study, transport delay is defined as vehicle time losses due to the passage of pedestrians at crosswalks. These delays occur when cars are forced to stop or slow down to allow pedestrians to cross the road. As a result, the time required to pass the intersection increases. Investigating vehicle delays due to the presence of pedestrians at crosswalks can be useful for traffic analysis, infrastructure planning, and developing strategies to improve traffic efficiency and safety for pedestrians and drivers. Experimental research on vehicle delays in the vicinity of crosswalks was performed in three stages:

- 1) determination of relative location of crosswalks without traffic lights (distance between crosswalks on street sections or their arrangement at the intersection),
- 2) study of the nature of traffic flow in the area of crosswalks without traffic lights,
- 3) measurement of vehicle delays in front of the crosswalks.

The initial stage for the implementation was to identify the geometric parameters of the road network (the width of the street; distance from the crosswalk to the intersection; the presence of allocated lane for public transport, etc.) and traffic layout (road signs, road markings and traffic light systems).

To carry out the second and third stages, it was necessary to conduct a survey of traffic flow using video recording. As mentioned before, nearly 40% of accidents in Ukraine are recorded for major agglomerations like Lviv, where transportation development and safety became a priority in recent years [1, 2]. In 2020 there were 5958 accidents recorded in Lviv, 47 fatalities and about a thousand injuries [1]. This indicates the importance and relevance of the presented research. Monitoring was carried out in Lviv, Ukraine. It is a well-developed city with the numbers of road users increasing every year. Video monitoring was performed for 30 intersections on one-way streets. On each intersection, pedestrians were recorded at all crosswalks

Dodatkowe wskaźniki związane z ruchem pieszych i pojazdów rejestrowano z uwzględnieniem specyfiki metody pomiarowej. Do wskaźników tych należą:

1. Natężenie ruchu – rejestrowano liczbę pieszych przekraczających jezdnię w wybranym okresie. Umożliwiło to oszacowanie natężenia ruchu pieszych oraz liczby pieszych korzystających z przejścia.
2. Struktura rodzajowa ruchu – zidentyfikowano rodzaje przejeżdżających pojazdów.
3. Prędkość pojazdów i pieszych – nagrania umożliwiają oszacowanie prędkości pojazdów w pobliżu przejścia oraz średniej prędkości pieszych w pobliżu jezdni.
4. Opóźnienia w ruchu – nagrania wideo pozwalają na określenie strat czasu pojazdów przed przejściem dla pieszych. Możliwe jest określenie czasu oczekiwania pojazdów, aż piesi przejdą na drugą stronę jezdni.

Analizy wideo należą do popularnych metod badania potencjalnych kolizji pieszych i pojazdów, jak zaznaczono w [25]. To samo podejście zastosowano w niniejszym badaniu. Umożliwi ono określenie charakterystyki przestrzennej i czasowej; przede wszystkim odległości od przejścia, w której następuje istotna redukcja prędkości pojazdów, jak również anomalii w korkach w pobliżu przejść dla pieszych w różnych okresach.

Na podstawie wyników przedstawionych w [16] można stwierdzić, że korki powstają z następujących powodów: 43% – wysokie natężenie ruchu; 29% – program świateł; 22% – duże zagęszczenie przejść dla pieszych; 6% – lokalizacja przystanków transportu publicznego w pobliżu przejść.

Rozważmy położenie przejścia dla pieszych względem skrzyżowania i jego wpływ na opóźnienia w ruchu. Do 45% spośród wszystkich przejść dla pieszych znajduje się w strefie skrzyżowania, 25% – w odległości większej niż 200 m od skrzyżowania, zaś pozostałe 30% – w odległości mniejszej niż 200 m od najbliższego skrzyżowania [16].

Biorąc pod uwagę powyższe dane, rozpatrywano trzy możliwe lokalizacje przejścia bez sygnalizacji: na odcinku ulicy pomiędzy skrzyżowaniami; w strefie wpływu skrzyżowania oraz w samej strefie skrzyżowania. Za takim podziałem przemawia fakt, że wartości strat czasu pojazdów istotnie różnią się dla przejść tych trzech typów. Na przejściach zlokalizowanych na odcinku ulicy pomiędzy skrzyżowaniami (Rys. 2, typ D) straty czasu pojazdów zależą tylko od natężenia ruchu pieszych. Jeśli żaden pieszy nie chce w danym momencie przekroczyć jezdni, pojazdy mogą minąć takie przejście bez redukcji prędkości (wówczas uznaje się, że strata czasu była zerowa). Ponadto nie ma wzajemnego wpływu między warunkami ruchu na najbliższym skrzyżowaniu i na rozpatrywanym przejściu.

during the periods of the most intensive traffic. The rush hours were noticed in the morning (08:00 to 10:00) and in the afternoon (17:00 to 19:00). For each crossing, the sample size is 300 pedestrians.

Additional indicators related to pedestrian and traffic flows are recorded taking into account the method of video recording. These indicators are:

1. Traffic volume – number of pedestrians that cross the roadway in a certain period is recorded. It enables estimation of the pedestrian flow and the number of pedestrians crossing the roadway.
2. Traffic flow composition – types of vehicles in the traffic flow are determined by means of video recording.
3. Speed of vehicles and pedestrians – the speed of vehicles and pedestrians is determined using video recording. It enables estimation of vehicle speed near the pedestrian crosswalk and the average pedestrian speed near the roadway.
4. Traffic delays – video recording provides an opportunity to determine the duration of vehicle delays in front of pedestrian crosswalk. It gives an idea of how long vehicles have to wait before the pedestrians finish crossing the roadway.

Video analyses belong to common methods of investigating pedestrian-vehicle potential conflicts, as proposed in [25]. The same approach was used in the presented study. This will enable identification of spatial and temporal characteristics, in particular the distance at which there is a significant change in vehicle speed and the anomalies in vehicle traffic jams in the zones of pedestrian crosswalks for different periods.

Based on the research results given in [16], it is known that traffic jams arise from the following reasons: 43% – high traffic volume; 29% – traffic light system regime; 22% – high density of crosswalks; 6% – arrangement of public transport stops near crosswalks.

Let us consider the influence of the location of the pedestrian crosswalk relative to the intersection on the characteristics of traffic delay. Up to 45% of the general number of pedestrian crosswalks are located in the intersection zone, 25% – at a distance of more than 200 m from the intersection, and the other 30% – at a distance of less than 200 m from the nearest intersection [16].

Considering the above, three options for the location of crosswalks without traffic lights were selected: at sections between intersections; in the zone of intersection impact and in the zone of the intersection itself. Such a division is

W przypadku przejść zlokalizowanych w strefie wpływu skrzyżowania (Rys. 2, typ C) straty czasu pojazdów będą spowodowane zarówno przez korki powstające przed skrzyżowaniem, jak i przez pieszych. Kiedy przejście bez sygnalizacji zlokalizowane jest w samej strefie skrzyżowania (Rys. 2, typ A i B), straty czasu pojazdów pojawiają się ze względu na ruch pojazdów na drodze nadrzędnej oraz obecność pieszych na przejściach. Przy dużych natężeniach ruchu pieszych na przejściach oraz pojazdów na relacjach skrotnych konieczność ustępowania pierwszeństwa pieszym wpływa na znaczny wzrost strat czasu przejazdu pojazdów.

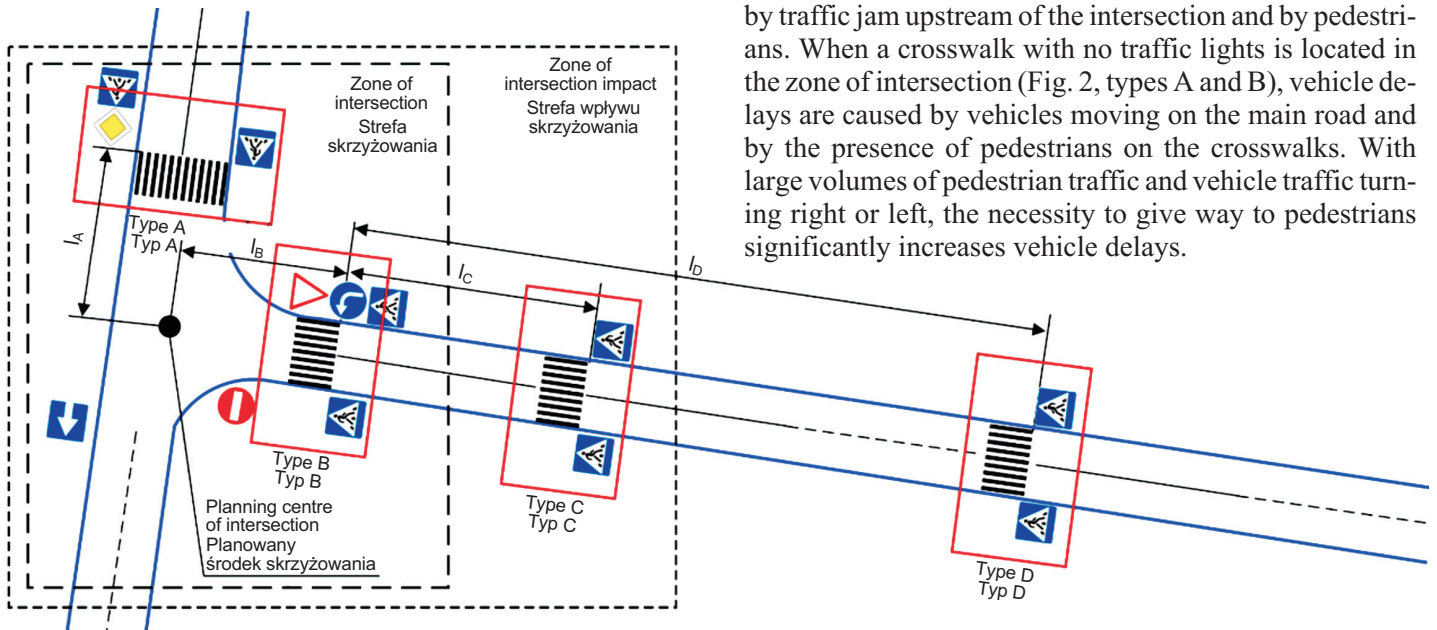


Fig. 2. Location of unsignaled pedestrian crosswalk relative to the intersection  
Rys. 2. Rozpatrywane lokalizacje przejść bez sygnalizacji względem skrzyżowania

Biorąc pod uwagę zbadane warunki ruchu przed przejściami bez sygnalizacji przedstawionymi na Rys. 2 (typy A, C i D), całkowite straty czasu przejazdu pojazdów można określić z pomocą wzoru [18]:

$$\Delta t_{UC} = 0,00147 \frac{N_P \cdot N_T}{v}, \quad (1)$$

gdzie:

- $\Delta t_{UC}$  – straty czasu przejazdu pojazdów (całkowite) [h],
- $N_P$  – natężenie ruchu pieszych [Ps/h],
- $N_T$  – natężenie ruchu pojazdów na rozpatrywanym kierunku, wyrażone w pojazdach umownych [PCU/h],
- $v$  – średnia prędkość pojazdów [km/h].

justified by the fact that the value of vehicle delay at crosswalks of the three types differs significantly. At pedestrian crosswalks which are located on a section of the street (Fig. 2, type D), vehicle delay depends only on the pedestrian volume. At such crosswalks, with no pedestrians crossing the street, vehicles can pass the section without a reduction in speed, which is why their delay is considered to equal zero. In addition, there is no mutual influence of traffic conditions between the nearest intersection and the pedestrian crosswalk.

At pedestrian crosswalks located in the zone of intersection impact (Fig. 2, type C), vehicle delays will be caused by traffic jam upstream of the intersection and by pedestrians. When a crosswalk with no traffic lights is located in the zone of intersection (Fig. 2, types A and B), vehicle delays are caused by vehicles moving on the main road and by the presence of pedestrians on the crosswalks. With large volumes of pedestrian traffic and vehicle traffic turning right or left, the necessity to give way to pedestrians significantly increases vehicle delays.

Taking into account the investigated movement conditions in front of unsignaled pedestrian crosswalks in the cases given in Fig. 2 (type A, type C, and type D), total vehicle delays can be determined by the following formula [18]:

$$\Delta t_{UC} = 0.00147 \frac{N_P \cdot N_T}{v}, \quad (1)$$

where:

- $\Delta t_{UC}$  – vehicle delays (total) [h],
- $N_P$  – pedestrian flow volume [ped/h],
- $N_T$  – vehicle traffic volume in the considered direction [PCU/h],
- $v$  – average vehicle velocity [km/h].

Na przejściu typu B (Rys. 2) strata czasu pojazdów jest bezpośrednio uzależniona od natężenia ruchu na drodze z pierwszeństwem przejazdu oraz od natężenia ruchu pieszych. W tym przypadku stratę czasu można określić, stosując wzór [18]:

$$\Delta t = \Delta t + \Delta t_s, \quad (2)$$

gdzie:  $\Delta t_s$  – straty czasu pojazdów na drodze podporządkowanej [s]; opisuje wzór

$$\Delta t_s = \frac{e^{N_m \cdot t_{cr}} - N_m \cdot t_{cr} - 1}{N_m - N_s (e^{N_m \cdot t_{cr}} - N_m \cdot t_{cr} - 1)} + \frac{v_a}{7,2} \left( \frac{1}{a_d} + \frac{1}{a_a} \right), \quad (3)$$

gdzie:

$N_m$  – natężenie ruchu relacji nadrzędnych (na drodze z pierwszeństwem przejazdu) [P/s],

$t_{cr}$  – graniczny odstęp czasu między pojazdami w potoku nadrzędnym [s], (na podstawie badań terenowych stwierdzono, że  $t_{cr} = 4$  s),

$N_s$  – natężenie ruchu na drodze podporządkowanej [P/s],

$a_d$  oraz  $a_a$  – odpowiednio opóźnienie i przyspieszenie ruchu pojazdu wzdłuż osi drogi (na podstawie badań terenowych stwierdzono, że  $a_d = 4$  m/s<sup>2</sup>,  $a_a = 1,5$  m/s<sup>2</sup>),

$v_a$  – prędkość pojazdów na drodze podporządkowanej [km/h].

Strata czasu przejazdu pojazdów na przejściach zależy zatem od natężenia ruchu pieszego oraz ruchu pojazdów, liczby pasów (szerokości ulicy), indywidualnych zachowań pieszych oraz widoczności [18]. Przedstawione badania umożliwiają zastosowanie symulacji do analizy czynników mających wpływ na przepustowość sieci drogowej oraz zachowania pieszych.

Symulacja warunków ruchu – zależnie od różnych czynników – pozwoli na uzyskanie zależności funkcjonalnych między natężeniem ruchu pieszego a kombinacją innych czynników: pogody, czasu i natężenia ruchu pojazdów. Takie modele pozwolą na sformułowanie opartego na podstawach naukowych podejścia do redukcji liczby wypadków na przejściach, co jest jednym z głównych priorytetów BRD w dużych miastach [26-29].

Aby określić model zachowania pieszych na przejściach bez sygnalizacji, należy przyjąć za podstawę dane z badań terenowych, w tym główne parametry ruchu pojazdów i pieszych, stopień wykorzystania przepustowości, parametry sieci drogowej itp. Celem zbadania wpływu strat czasu przejazdu

At a type B crosswalk (Fig. 2) vehicle delay directly depends on the traffic volume in the main direction and pedestrian volume. Traffic delay, in this case, can be determined by the formula [18]:

$$\Delta t = \Delta t + \Delta t_s, \quad (2)$$

where:  $\Delta t_s$  – vehicle delays in the secondary direction (side road) [s], describes the equation

$$\Delta t_s = \frac{e^{N_m \cdot t_{cr}} - N_m \cdot t_{cr} - 1}{N_m - N_s (e^{N_m \cdot t_{cr}} - N_m \cdot t_{cr} - 1)} + \frac{v_a}{7.2} \left( \frac{1}{a_d} + \frac{1}{a_a} \right), \quad (3)$$

where:

$N_m$  – traffic volume in the main direction (priority road), [veh/s],

$t_{cr}$  – critical interval between vehicles in the main direction [s] (based on site recorded data, it was determined that  $t_{cr} = 4$  s),

$N_s$  – traffic volume in the secondary direction [veh/s],

$a_d$  and  $a_a$  – respectively deceleration and acceleration of the vehicle along the direction of the road (based on site recorded data, it was determined that  $a_d = 4$  m/s<sup>2</sup>,  $a_a = 1.5$  m/s<sup>2</sup>),

$v_a$  – vehicle velocity in the secondary direction [km/h].

The conclusion is that at crosswalks, traffic delay depends on the volume of pedestrians and traffic flows, the number of lanes on the roadway (width of the street), individual behavior of pedestrians and visibility conditions [18]. Such experimental research enables analysis of the factors that affect the capacity of the road network and the behavior of pedestrians in simulation modelling.

Simulation of the traffic conditions, depending on various factors, will allow obtaining functional dependences on pedestrian volume and a combination of other factors: weather, time, and vehicle traffic. Such models will allow forming a scientifically justified approach to reduce accidents at crosswalks, which is one of the main tasks of road safety in large cities [26-29].

To determine the model of pedestrian behavior at crosswalks with no traffic lights, it is necessary to base it on the results of field research, which identify the main indicators of traffic and pedestrian flows, volume-capacity ratio, parameters of the road network, etc. Waiting time of pedestrians wanting to cross the roadway was determined to identify the potential impact of vehicle delays on adjacent



pojazdów na sąsiednie skrzyżowania (przejścia) określono czas oczekiwania pieszych na przejście przez jezdnię. Wyniki badań zweryfikowano z zastosowaniem specjalistycznego środowiska do cyfrowej symulacji ruchu użytkowników dróg PTV VISSIM [30-34] oraz oprogramowania MATLAB [35]. W ramach weryfikacji utworzono model skrzyżowania o trzech wlotach, obejmujący cztery przejścia dla pieszych.

Symulacje ruchu pojazdów i pieszych służące określeniu modelu zachowania pieszych na przejściach prowadzono według następującego schematu:

- utworzenie modelu przejść dla pieszych z uwzględnieniem różnych natężeń ruchu pojazdów (300; 600; 900; 1200; 1500 P/h),
- przyjęto strukturę rodzajową ruchu: 80% samochodów osobowych, 15% ciężarówek oraz 5% autobusów,
- prędkość pojazdów odpowiadała wynikom z badań terenowych (Tabl. 1),
- symulacje ruchu pieszych na przejściach prowadzono dla różnych natężeń ruchu pieszego (20; 40; 60; 80; 100; 120; 140; 160; 180; 200 Ps/h),
- celem określenia ruchu pieszych na skrzyżowaniu, założono punkty pomiarowe przed każdym z przejść,
- symulacje prowadzono z uwzględnieniem czterech typów przejść, aby określić model zachowań pieszych na przejściach bez sygnalizacji w zależności od zmian natężenia ruchu pojazdów i pieszych.

### 3. WYNIKI BADANIA

Pomiarów na przejściach czterech różnych rodzajów dokonano w celu uzyskania danych doświadczalnych o stratach czasu w ruchu pojazdów. Uwzględniono zależności między potokami pojazdów na drodze nadrzędnej i podporządkowanej. Typowy schemat lokalizacji przejść względem skrzyżowania przedstawiono na Rys. 2. Parametry ruchu użytkowników drogi rejestrowano w wybranych przedziałach czasowych (8.00-9.00, 13.00-14.00, 17.00-18.00).

Podczas badań strat czasu przejazdu spowodowanych przejściami dla pieszych rejestrowano natężenie ruchu oraz prędkość chwilową pojazdów w punktach rozmieszczonych co 50 m. Wyniki pomiarów przedstawiono w Tabl. 1.

Badania przeprowadzono na 30 dojazdach do dróg podporządkowanych oraz na takiej samej liczbie dojazdów na drogach z pierwszeństwem przejazdu, uwzględniając przejścia dla pieszych wszystkich analizowanych rodzajów. Wszystkie przejścia były zlokalizowane na drogach jednokierunkowych. Jako że przejścia typów A i B zlokalizowane są w obrębie samego skrzyżowania, ich odległości od skrzyżowania ustalono

intersections (crosswalks). The results of the experimental studies were verified in a specialized software environment PTV VISSIM [30-34] and MATLAB [35]. For this purpose, a simulation model of a T-shaped intersection with four crosswalks was created.

Simulation modelling of traffic and pedestrian flows to determine the model of pedestrian behavior at the crosswalks was performed according to the following algorithm:

- creation of the model of pedestrian crosswalks was performed for different traffic volumes (300; 600; 900; 1200; 1500 veh/h),
- traffic flow comprised of 80% of cars, 15% of trucks and 5% of buses,
- speed of traffic corresponded with the results of field research (Table 1),
- pedestrian flow simulation at crosswalks was performed for different volumes (20; 40; 60; 80; 100; 120; 140; 160; 180; 200 ped/h),
- to determine the movement of pedestrians at intersections, measuring points were installed in the vicinity of each crosswalk,
- simulation was performed on four types of crosswalks to determine the model of pedestrian behavior at unsignalized pedestrian crosswalks depending on the change of traffic and pedestrian volume.

### 3. RESULTS OF THE STUDY

The measurements were carried out on four types of pedestrian crosswalks to obtain experimental data about vehicle delays. Intersections with one-way traffic in the main and secondary directions were considered. A typical scheme of the location of pedestrian crosswalks relative to the intersection is given in Fig. 2. Road user movements were recorded in selected hours (08:00-09:00, 13:00-14:00, 17:00-18:00).

When vehicle delays in the vicinity of the crosswalks were investigated, traffic volumes and spot speeds were recorded every 50 m. The results are presented in Table 1.

The measurements were performed for 30 approaches in the secondary directions and the same number of approaches in the main direction, which covered pedestrian crosswalks of all the analyzed types. All pedestrian crosswalks are located on one-way roads. As crosswalks of type A and B are located directly in the zone of intersection, their appropriate distances were chosen to be 15 m (Fig. 2). The determined value (15 m) depends on the planning features of the intersection and takes into account the length

jako 15 m (Rys. 2). Przyjęta wartość (15 m) uzależniona jest od ukształtowania skrzyżowania; uwzględnia odległość przejścia od środka skrzyżowania oraz szerokość samego przejścia. Przyjęto również, że odległość między przejściem typu B a przejściem typu C powinna mieścić się w przedziale od 50 m do 150 m. Przejście typu D zlokalizowane jest w odległości ponad 200 m od przejścia typu B.

of the roadway from the center of the intersection to the crosswalk and the width of the crosswalk. At the same time, the distance between crosswalks of type B and type C was no less than 50 m and no greater than 150 m. A crosswalk of type D is located at a distance of more than 200 m from a crosswalk of type B.

Table 1. Average values of vehicle speeds and volumes of vehicle and pedestrian traffic  
Tablica 1. Wartości średnie prędkości oraz natężeń ruchu pojazdów i pieszych

Distance from the planning centre of the intersection [m] Odległość od środka skrzyżowania	The average spot speed of vehicle traffic [km/h] Średnia wartość prędkości chwilowych pojazdów w punkcie pomiaru	Vehicle traffic volume [PCU/h] Natężenie ruchu pojazdów [PCU/h]	Pedestrian traffic volume [ped/h] Natężenie ruchu pieszego [Ps/h]
Main direction / Droga z pierwszeństwem przejazdu			
100	45.1	955	–
50	39.2	949	–
Pedestrian crosswalk of Type A Przejście dla pieszych typu A	27.0	953	165
0	24.0	953	–
50	30.2	947	–
100	47.3	960	–
Secondary direction / Droga podporządkowana			
450	38.1	653	–
400	34.4	672	–
Pedestrian crosswalk of Type D Przejście dla pieszych typu D	30.2	675	48
300	36.1	675	–
250	40.2	651	–
200	33.4	633	–
Pedestrian crosswalk of Type C Przejście dla pieszych typu C	27.0	634	87
100	33.2	636	–
50	25.0	622	–
Pedestrian crosswalk of Type B Przejście dla pieszych typu B	17.0	262	156
0	14.2	622	–

Aby w symulacjach prędkości ruchu pojazdów uzyskać wiarygodne dane, zastosowano metodę statystyczną uwzględniającą poziom ufności oraz względną dokładność pomiaru, jak również średnie odchylenie standardowe prędkości:

$$n \geq \frac{t_{\beta} \cdot \sigma^2}{\Delta^2}, \quad (4)$$

gdzie:

$t_{\beta}$  – wynik standardowego odchylenia danych rzeczywistych dla zmiennych losowych,

In order to obtain reliable data in the simulation of traffic speed, statistical method was used which took into account the confidence level and relative accuracy of the measurement, as well as the mean square deviation of speed:

$$n \geq \frac{t_{\beta} \cdot \sigma^2}{\Delta^2}, \quad (4)$$

where:

$t_{\beta}$  – standard score of current values of random variables in the sample,

$\sigma$  – średnie odchylenie (kwadratowe) zmiennej losowej,  
 $\Delta$  – dokładność bezwzględna.

W badaniu założono współczynnik ufności  $\beta = 0,95$ , dla którego  $t_{\beta} = 1,96$ ;  $\Delta = 7\%$ . Jak wspomniano powyżej, na każdym przejściu jezdnię przekroczyło 300 pieszych. W tym przypadku więc  $\sigma = 0,619$ . Podsumowanie uzyskanych z pomiarów średnich prędkości chwilowych oraz natężeń ruchu pojazdów i pieszych przedstawiono w Tabl. 1. Wyniki obliczono z zastosowaniem metod statystycznych [30-32].

Na podstawie wyników badań utworzono wykresy obrazujące zmiany prędkości ruchu pojazdów w pobliżu przejść czterech typów (Rys. 3 i 4). Jak widać na Rys. 3 i 4, wpływ przejścia dla pieszych na ruch samochodowy można zaobserwować w odległości 50-100 m od przejścia. W obrębie tej strefy wpływu przejścia dochodzi najpierw do spadku prędkości, a potem do jej wzrostu. Średnie wartości prędkości chwilowej pojazdów na dojazdach do przejść wahały się w zakresie 14-47 km/h. Średnia prędkość pojazdu obniżona przed przejściem dla pieszych wyniosła 25 km/h.

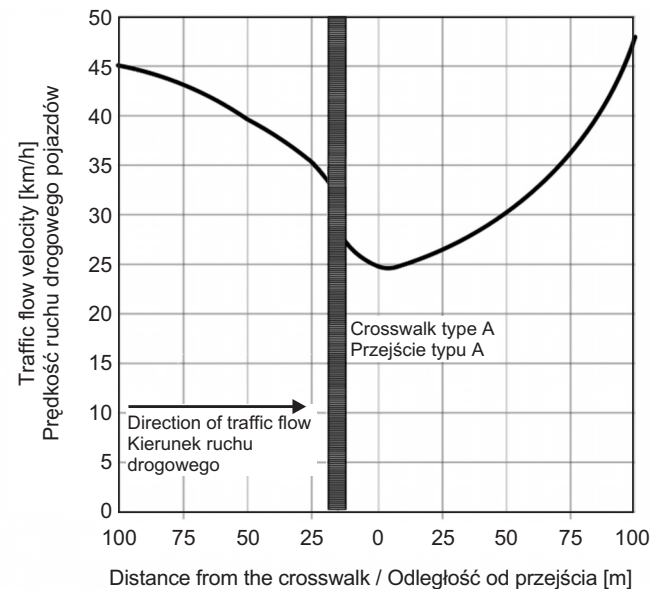


Fig. 3. The changes of traffic velocity in the main direction during the passage of unsignalized pedestrian crosswalk of type A  
 Rys. 3. Zmiany prędkości pojazdów na drodze głównej w pobliżu przejścia bez sygnalizacji typu A

Średnia strata czasu pojazdu przejeżdżającego przez przejścia dla pieszych badanych typów może być oszacowana z zastosowaniem wzoru (1):

- dla przejścia bez sygnalizacji typu A (na drodze głównej):
- $$\Delta t_{uc} = 0,00147 \cdot \frac{165 \cdot 953}{27} = 8,6 \text{ s}, \quad (5)$$

$\sigma$  – mean square deviation of a random variable,  
 $\Delta$  – absolute accuracy.

The study adopted a confidence level ( $\beta = 0.95$ ), for which:  $t_{\beta} = 1.96$ ;  $\Delta = 7\%$ . As was mentioned above, 300 pedestrians crossed the roadway at each crosswalk. In this case, the mean square deviation was  $\sigma = 0.619$ . A summary of the measured average spot speed and volume of vehicle traffic and pedestrian traffic volume are given in Table 1. The result were calculated using statistical methods [30-32].

Based on the research results, graphs of the change in traffic velocity for four types of pedestrian crosswalks were developed (Figs 3 and 4). As shown in Figs 3 and 4, the zone of impact of vehicle traffic jams on approaches to crosswalks ranges from 50 m to 100 m. Within this zone of impact, there is a decrease in traffic velocity with a subsequent increase. The average instantaneous velocity on the approaches to crosswalks varied in the range of 14-47 km/h. The value of traffic speed in front of a pedestrian crosswalk decreased, on average, to 25 km/h.

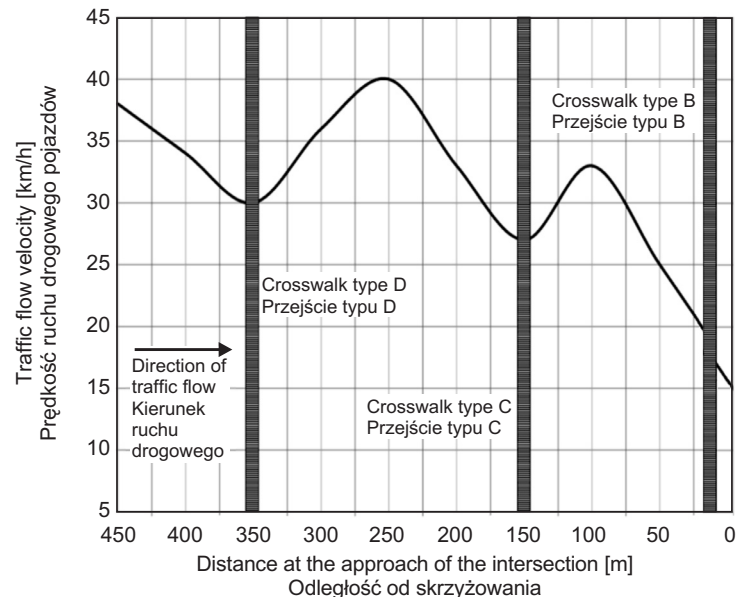


Fig. 4. The changes of traffic velocity in the secondary direction during the passage of unsignalized pedestrian crosswalks of type D, C, and B

Rys. 4. Zmiany prędkości pojazdów na drodze podporządkowanej w pobliżu przejść bez sygnalizacji typu D, C oraz B

The average time lost by a vehicle passing crosswalks of the analyzed types can be estimated using equation (1):

- for unsignalized pedestrian crosswalks of type A (in the main direction):

- dla przejścia bez sygnalizacji typu D (na drodze podporządkowanej):

$$\Delta t_{UC} = 0,00147 \cdot \frac{48 \cdot 675}{30} = 1,6 \text{ s}, \quad (6)$$

- dla przejścia bez sygnalizacji typu C (na drodze podporządkowanej):

$$\Delta t_{UC} = 0,00147 \cdot \frac{87 \cdot 634}{27} = 3,0 \text{ s}. \quad (7)$$

Dla przejścia typu B (w obrębie skrzyżowania, na wlocie podporządkowanym) średnia strata czasu pojazdów określana jest na podstawie straty czasu przed przejściem oraz straty czasu spowodowanej ustępowaniem pierwszeństwa pojazdom na drodze głównej:

$$\Delta t = \left( 0,00147 \cdot \frac{156 \cdot 622}{17} \right) + \frac{e^{0,264} - 0,26 \cdot 4 - 1}{0,26 - 0,17(e^{0,264} - 0,26 \cdot 4 - 1)} + \frac{17}{7,2} \left( \frac{1}{4} + \frac{1}{1,5} \right) = 16,8 \text{ s}. \quad (8)$$

Straty czasu przejazdu pojazdów na przejściach zawierają się w przedziale od 1,6 s do 16,8 s. Największe straty czasu zaobserwowano na przejściu dla pieszych typu B (w obrębie skrzyżowania). Można wyjaśnić to wpływem dodatkowych strat czasu związanych z ruchem pieszych i pojazdów na drodze głównej. Najmniejsze straty czasu (1,6 s) zaobserwowano na przejściu typu D. W tym przypadku kolejka pojazdów powstająca na dojeździe do przejścia może być zależna jedynie od natężenia ruchu pieszych.

Podczas badania rejestrowano natężenie ruchu pieszych na przejściach wszystkich typów oraz ich czas oczekiwania (piesi nie korzystali z pierwszeństwa przed pojazdami). Maksymalny czas oczekiwania pieszych wśród przejść wszystkich typów wyniósł 16 s. Zakładano, że czas oczekiwania wynosi zero, jeśli pieszy przekroczył jezdnię bez zatrzymania, tj. wobec braku nadjeżdżających pojazdów, podczas przechodzenia innego pieszego oraz w przypadkach, gdy kierowca zauważył pieszego i podjął odpowiednie środki, by zmniejszyć prędkość.

Wśród uzyskanych wartości wyodrębniono trzy przedziały czasu oczekiwania: poniżej 1 s – piesi, którzy natychmiast przeszli przez jezdnię; 1-4 s – piesi przekroczyli jezdnię po dość krótkim czasie oczekiwania; powyżej 4 s – piesi musieli czekać względnie długo, zanim podjęli decyzję o przekroczeniu jezdni na podstawie obserwacji warunków bezpieczeństwa drogowego. Rozkłady czasów oczekiwania w przyjętych przedziałach przedstawiono dla różnych typów przejść na Rys. 5.

Zgodnie z Rys. 5. na przejściach typu D udział zerowego oraz średniego (od 1 s do 4 s) czasu oczekiwania spada, zaś łączny czasów oczekiwania powyżej 4 s wzrasta do 30%. Ma to związek z wyższą prędkością chwilową pojazdów (30 km/h)

$$\Delta t_{UC} = 0,00147 \cdot \frac{165 \cdot 953}{27} = 8,6 \text{ s}, \quad (5)$$

- for unsignalized pedestrian crosswalk of type D (in the secondary direction):

$$\Delta t_{UC} = 0,00147 \cdot \frac{48 \cdot 675}{30} = 1,6 \text{ s}, \quad (6)$$

- for unsignalized pedestrian crosswalk of type C (in the secondary direction):

$$\Delta t_{UC} = 0,00147 \cdot \frac{87 \cdot 634}{27} = 3,0 \text{ s}. \quad (7)$$

For type B crosswalks (in the zone of intersection in the secondary direction), the average time lost by a vehicle is determined by the sum of vehicle delay on the approach to the crosswalk and delay due to yielding to vehicles moving in the main direction:

$$\Delta t = \left( 0,00147 \cdot \frac{156 \cdot 622}{17} \right) + \frac{e^{0,264} - 0,26 \cdot 4 - 1}{0,26 - 0,17(e^{0,264} - 0,26 \cdot 4 - 1)} + \frac{17}{7,2} \left( \frac{1}{4} + \frac{1}{1,5} \right) = 16,8 \text{ s}. \quad (8)$$

Vehicle delays at crosswalks range from 1.6 s to 16.8 s. The greatest delay of vehicles is observed at pedestrian crosswalks of type B (in the zone of intersection). It can be explained by the fact that vehicle delays here are affected by the time required by pedestrians and cars moving on the main road to pass the crosswalks. The smallest vehicle delay (of 1.6 s) is observed at crosswalks of type D. In this case the queue of vehicles forming at the approach to the crosswalk can depend only on the intensity of pedestrian flow.

During the study of pedestrian behavior, the intensity of pedestrian traffic at crosswalks of all types and the waiting times (pedestrians did not use their priority of passage) were recorded. The maximum value of pedestrian waiting time recorded for all crosswalk types was 16 s. Waiting time was assumed to be zero if a pedestrian crossed the roadway without stopping, i.e. in the absence of approaching vehicles, following other pedestrians that had already started crossing the street, and in the cases where the driver noticed the pedestrian and took measures to reduce speed.

According to the results, three groups of waiting time values were determined: less than 1 s – pedestrians who immediately crossed the crosswalk; 1-4 s – pedestrians passed the crosswalk after a relatively short waiting period; more than 4 s – pedestrians had to wait relatively long to make a decision based on traffic safety conditions. Distributions of waiting times of pedestrians are presented in Fig. 5 according to crosswalk types.

obserwowaną na takich przejściach; piesi postanawiają nie wykorzystywać przysługującego im pierwszeństwa przed pojazdami. Wzrost udziału długich czasów oczekiwania odzwierciedla spadek bezpieczeństwa warunków drogowych.

Na podstawie uzyskanych danych określono związek między udziałami poszczególnych przedziałów czasu oczekiwania pieszych a natężeniem ruchu pieszych na przejściach (Rys. 6).

According to Fig. 5, at pedestrian crossings of type D the share of zero and medium (1-4 s) waiting time decreases and the total share of waiting time longer than 4 s increases to 30%. This is due to the fact that at such crosswalks there is a higher instantaneous velocity of traffic (30 km/h) and pedestrians do not decide to cross the roadway using their right of priority. The growth of share of long waiting time indicates an increase in the danger of traffic conditions.

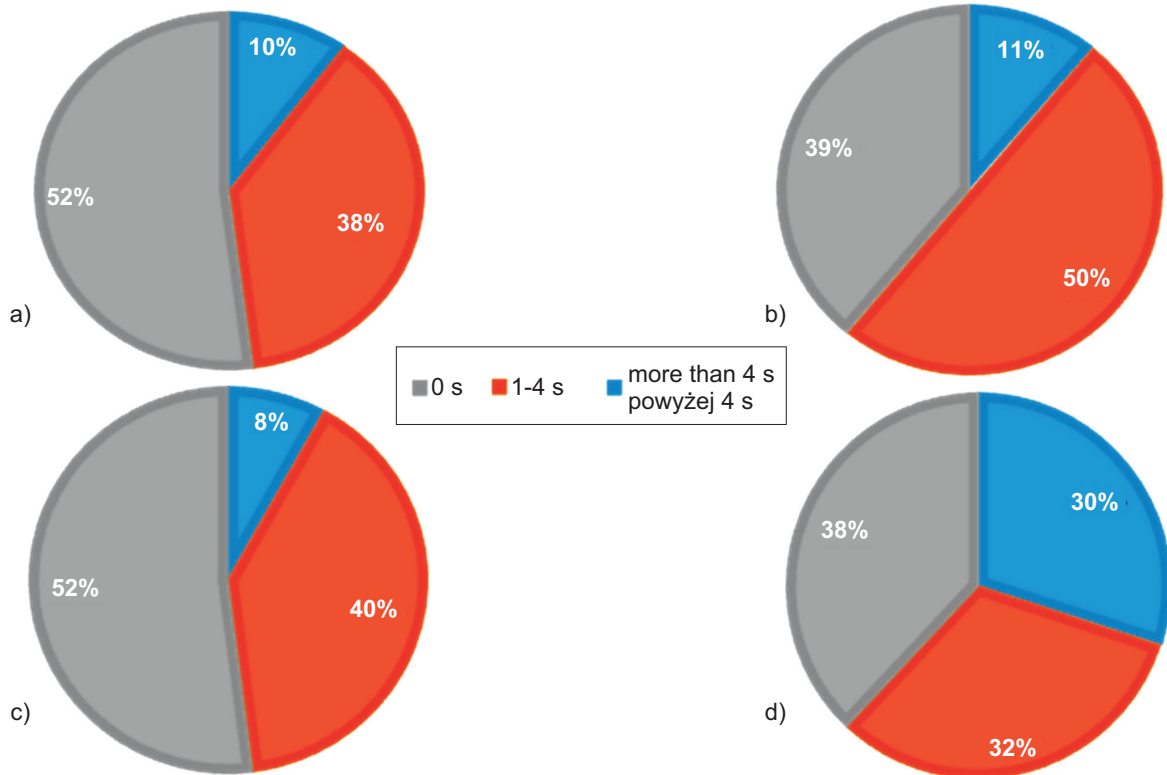
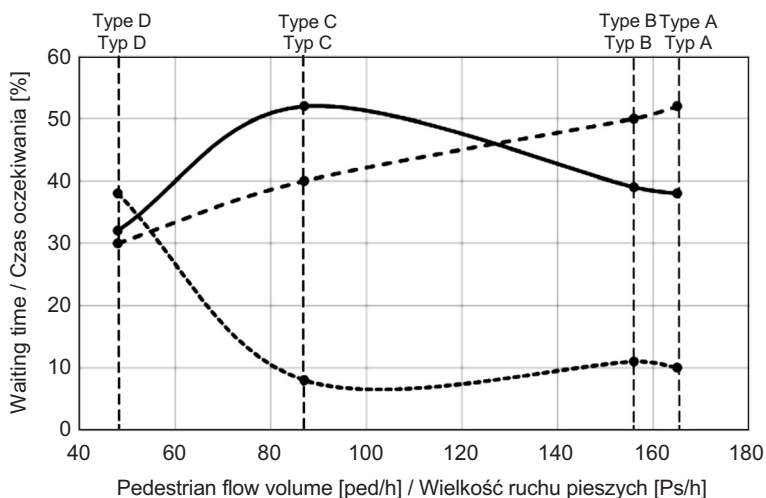


Fig. 5. Distribution of waiting times of pedestrians at crosswalks of different types: a) type A, b) type B, c) type C, d) type D  
Rys. 5. Rozkłady czasów oczekiwania przez pieszych na przejściach różnych typów: a) typ A, b) typ B, c) typ C, d) typ D



Based on the obtained data, the relationship between the change in the waiting time of pedestrians and the volume of their traffic at the crosswalk is presented in Fig. 6.

Fig. 6. Share of pedestrian waiting time ranges depending on the volume of pedestrian traffic  
Rys. 6. Udział poszczególnych przedziałów czasu oczekiwania pieszych w zależności od natężenia ruchu pieszego na przejściu

Wyniki badania wykazały, że istnieje związek między czasem oczekiwania pieszych a natężeniem ruchu pieszego na przejściu. Przy niskich wartościach natężenia (około 50 Ps/h) czas oczekiwania jest względnie wysoki, a wielu pieszych musi czekać na zatrzymanie pojazdów (ponad 4 sekundy). Może być to związane z charakterystyką psychologiczną kierowców: wielu z nich korzysta codziennie z tej samej trasy i wykazuje gotowość do ustąpienia pieszym w tych miejscach, gdzie są oni najczęściej widziani. W lokalizacjach, gdzie piesi widywani są rzadko, kierowcy liczą na możliwość przejazdu bez zatrzymania; gdy piesi pojawiają się w takich miejscach, kierowcy nie zawsze ustępują im pierwszeństwa.

Uwzględniając istniejące warunki drogowe, zaproponowano model symulacyjny. Uzyskane z niego wartości czasu oczekiwania pieszych na przejściu każdego rodzaju w zależności natężenia ruchu pojazdów i pieszych przedstawiono na Rys. 7.

Analiza wszystkich wyników symulacji pozwoliła na oszacowanie czasu oczekiwania pieszych przy różnych natężeniach ruchu pieszych i pojazdów. Aby uwzględnić jednocześnie wpływ obu natężeń, zaproponowano model zmian czasu oczekiwania  $t_w$ , w zależności od natężenia ruchu pieszego  $N_p$  i natężenia ruchu pojazdów  $N_T$  (Tabl. 2). Model ten otrzymano w oprogramowaniu MATLAB.

Table 2. Model of pedestrian waiting time  $t_w$  changes depending on pedestrian  $N_p$  and traffic  $N_T$  volume  
Tablica 2. Model zmian czasu oczekiwania  $t_w$  w zależności od natężenia ruchu pieszych  $N_p$  oraz ruchu pojazdów  $N_T$

Type of crosswalk Typ przejścia dla pieszych	Formula Wzór	Coefficient of determination $R^2$ Współczynnik determinacji
A	$t_w = -0.05 \cdot N_p + 0.007 \cdot N_T + 9.6$	0.88
B	$t_w = 0.018 \cdot N_p + 0.008 \cdot N_T + 8.5$	0.71
C	$t_w = -0.02 \cdot N_p + 0.003 \cdot N_T + 2.6$	0.80
D	$t_w = 0.0002 \cdot N_p + 0.001 \cdot N_T + 0.6$	0.68

Przy wysokim natężeniu ruchu pojazdów (1600 P/h) oraz niskim natężeniu ruchu pieszych (do 20 Ps/h), czas oczekiwania pieszych na przekroczenie jezdni wzrasta. Jego wartości są następujące: na przejściu typu A – 19,8 s; na przejściu typu B – 21,7 s; na przejściu typu C – 7,0 s; na przejściu typu D – 3,8 s. Tak długie czasy oczekiwania związane są z psychofizjologiczną charakterystyką pieszych. Piesi nie podejmują ryzyka przejścia przez jezdnię i oczekują na odpowiednio duży odstęp między pojazdami. Odzwierciedla to wzrost potencjalnego zagrożenia przy przyjętych warunkach ruchu. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że wskazane jest wdrożenie rozwiązań poprawiających bezpieczeństwo użytkowników drogi (oświetlenie przejścia, sygnalizacja świetlna itp.). Ponadto wzrost natężenia ruchu pieszego (do 200 Ps/h) przy wysokim natężeniu ruchu pojazdów (1600 P/h) przekłada się na

According to the results of the study, it was determined that there is a relationship between pedestrian waiting time and the volume of pedestrian traffic. With low values of volume (about 50 pedestrians/hour), the waiting time is relatively long, and many pedestrians have to wait for vehicles to stop (more than 4 seconds). This may be due to the psychological characteristics of drivers: many of them repeat their route every day and are ready to give way to pedestrians in advance where they are most often seen. In places where they rarely appear, drivers hope to pass without stopping, and if pedestrians appear in such places, drivers do not always give way.

Taking into account the existing road conditions, simulation modelling was proposed. The obtained values of pedestrian waiting times for each type of crosswalk depending on the change in vehicle and pedestrian traffic volume are presented in Fig. 7.

Analysis of all simulation results enabled estimation of pedestrian waiting times at different volumes of pedestrian and vehicle traffic. To take into account the simultaneous effect of both volumes, a model of changes in pedestrian waiting time  $t_w$ , depending on pedestrian traffic volume  $N_p$  and vehicle traffic volume  $N_T$ , is proposed (Table 2). This model was obtained using MATLAB software.

At high traffic volume (1600 veh/h) and low pedestrian traffic (up to 20 ped/h), the waiting time of pedestrians increases. Its values are as follows: at a crosswalk of type A – 19.8 s; at a crosswalk of type B – 21.7 s; at a crosswalk of type C – 7.0 s; at a crosswalk of type D – 3.8 s. These considerable waiting times are related to the psychophysiological characteristics of pedestrians. Pedestrians do not risk crossing the roadway and expect a gap in the traffic flow. This indicates an increase in the potential danger in the assumed traffic conditions. Based on such analyses it is highly recommended to implement solutions to improve the safety of road users (lighting of pedestrian crosswalks, signalized crosswalks, etc.). Besides, an increase in pedestrian traffic volume (to 200 ped/h) at high vehicle traffic volume (1600 veh/h) reduces the waiting

skrócenie czasu oczekiwania przechodniów na przejściu typu A – 10,8 s. Czas oczekiwania w takim przypadku nie zmienia się na przejściach typu B (wynosi 24,9 s) oraz typu D (3,84 s). Na przejściu typu C czas oczekiwania spada do 3,4 s.

time of pedestrians at a crosswalk of type A – 10.8 s. Pedestrian waiting time does not change at crosswalks of type B (it is 24.9 s) and type D (3.84 s). However, at a crosswalk of type C pedestrian waiting time decreases to 3.4 s.

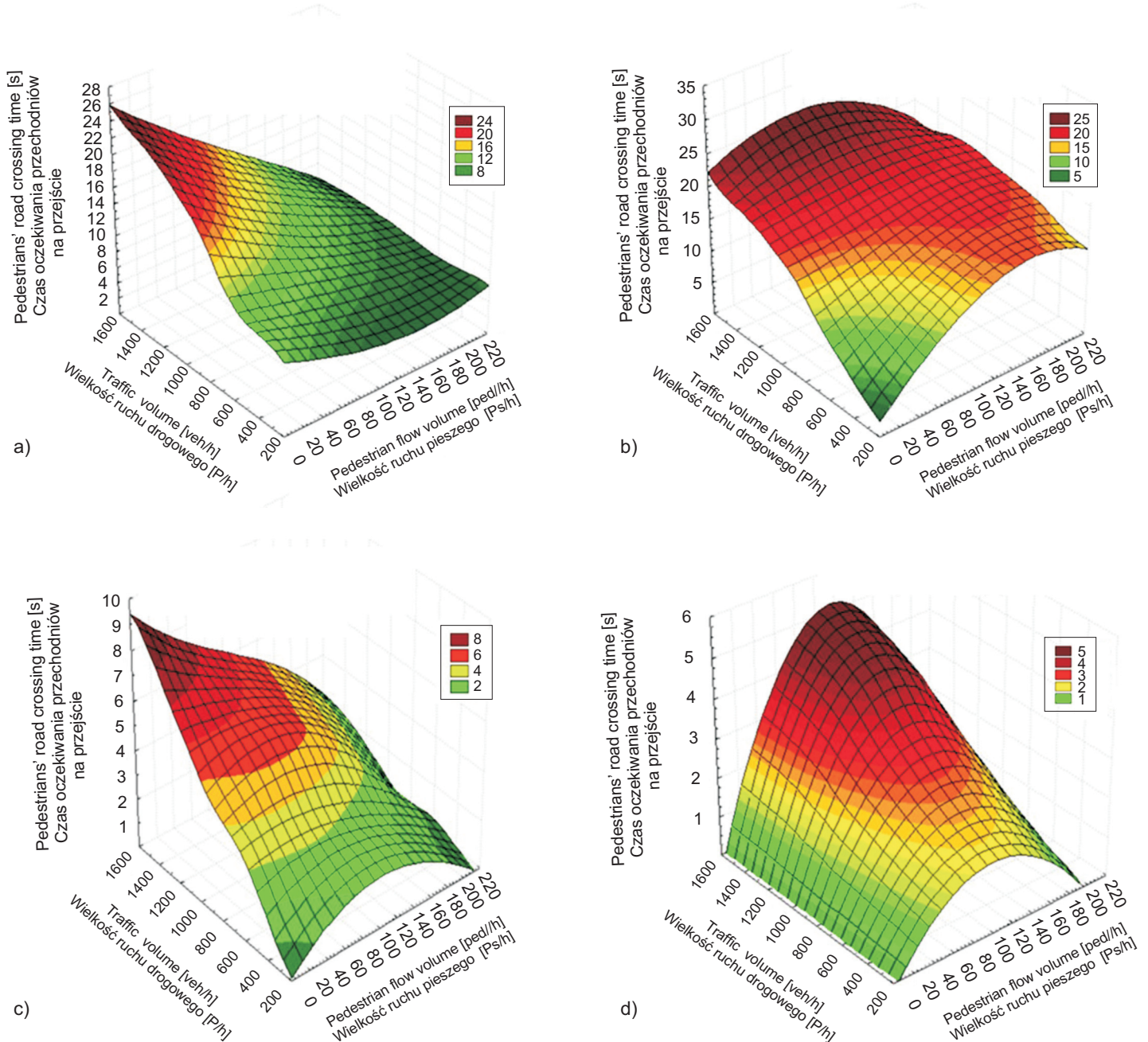


Fig. 7. Pedestrian waiting times at crosswalks of : a) type A, b) type B, c) type C, d) type D, depending on pedestrian and vehicle traffic flow

Rys. 7. Czas oczekiwania pieszych na przejściach: a) typu A, b) typu B, c) typu C, d) typu D, w zależności od natężenia ruchu pieszych i pojazdów

#### 4. POSUMOWANIE I WNIOSKI

Dla przejść dla pieszych bez sygnalizacji – przy różnych natężeniach ruchu pieszych i pojazdów – stwierdzono, warunki przekroczenia jezdni uzależnione są od lokalizacji przejścia względem skrzyżowania. W związku z tym podzielono przejścia na cztery typy: typ A – w obrębie skrzyżowania na wlocie z pierwszeństwem przejazdu; typ B – w obrębie skrzyżowania na wlocie podporządkowanym; typ C – na odcinku ulicy w strefie wpływu skrzyżowania; typ D – na odcinku ulicy pomiędzy skrzyżowaniami.

Dla różnych typów skrzyżowań i określonych warunków ruchu określono straty czasu w ruchu pojazdów. Największe straty czasu zaobserwowano na przejściu typu B (16,8 s). Najniższe straty (1,6 s) zaobserwowano na przejściu typu D. Korki na dojeździe do przejścia typu D mogą być uzależnione tylko od natężenia ruchu pieszych. Na przejściach typów A i C straty czasu pojazdów wynoszą odpowiednio 8,6 s i 3,0 s.

Określono czasy oczekiwania pieszych na przejściach, po czym podzielono je na trzy przedziały: 0 s (zerowy czas oczekiwania); od 1 s do 4 s; ponad 4 s. Na przejściach typu A i C rozkład czasów oczekiwania jest niemal identyczny: 52% to czas 0 s; 38-40% to czas od 1 s do 4 s; zaś 8-10% to czasy oczekiwania dłuższe niż 4 s. Na przejściu typu B: 39% to czas oczekiwania 0 s, 50% – od 1 do 4 s, zaś 11% – powyżej 4 s. Na przejściach dla pieszych typu D udział czasów zerowych i średnich (od 1 s do 4 s) spada, zaś rośnie udział długich czasów oczekiwania (powyżej 4 s).

Za pomocą oprogramowania PTV VISSIM oraz MATLAB opracowano model czasu oczekiwania pieszych na przejściach bez sygnalizacji. Model był oparty na różnych natężeniach ruchu pieszych i pojazdów na przejściach czterech typów. Przy wysokim natężeniu ruchu pojazdów (1600 P/h) i niskim natężeniu ruchu pieszych (do 20 Ps/h) czas oczekiwania pieszych wzrasta. Stwierdzono, że wzrost natężenia ruchu pieszych (do 200 Ps/h) przy wysokim natężeniu ruchu pojazdów (1600 P/h) przekłada się na skrócenie czasu oczekiwania pieszych na przejściach A i C. Na pozostałych przejściach czas oczekiwania nie uległ zmianie.

Metoda obliczania czasu oczekiwania pieszych na przekroczenie jezdni może być ograniczona w zależności od natężenia ruchu pojazdów i pieszych. Wraz ze wzrostem obu natężeń mogą pojawić się następujące ograniczenia:

1. Przepustowość przejścia dla pieszych – jeśli natężenie ruchu pieszego przekroczy przepustowość przejścia, mogą gromadzić się grupy pieszych oczekujących na przekroczenie jezdni. W takim wypadku metoda obliczeniowa może okazać się niedokładna, ponieważ nie uwzględnia ona efektywnej przepustowości przejścia.

#### 4. SUMMARY AND CONCLUSIONS

For pedestrian crosswalks without a traffic light control system, with different traffic and pedestrian volumes, it was established that the conditions of passage depend on the location and distance of the crosswalk relative to the intersection. Considering this, crosswalks were divided into four types: type A – in the zone of intersection in the main direction; type B – in the zone of intersection in the secondary direction; type C – at a street section within the zone of intersection impact; type D – at a street section between intersections.

Vehicle delays were determined for different types of crosswalks in particular traffic conditions. The greatest delay of vehicles was observed at pedestrian crosswalks of type B (16.8 s). The lowest delay (1.6 s) was observed at crosswalks of type D. The traffic jams that form on the approach to a type D crosswalk can depend only on pedestrian traffic volume. At pedestrian crosswalks of the types A and C, vehicle delay is 8.6 s and 3.0 s, respectively.

Pedestrian waiting times in particular conditions at the crosswalks were determined and divided into intervals: 0 s (zero waiting time); from 1 to 4 s; more than 4 s. At pedestrian crosswalks of the types A and C, the structure of the distribution of pedestrian waiting times is almost the same: 52% for intervals 0 s; 38-40% for intervals from 1 to 4 s; and 8-10% for intervals longer than 4 s. At pedestrian crosswalks of type B, 39% are intervals of 0 s, 50% – from 1 to 4 s, and 11% - more than 4 s. At pedestrian crosswalks of type D, the share of zero and medium (from 1 to 4 s) waiting times decreases, while the share of long waiting times (more than 4 s) increases.

A model of pedestrian waiting time at unsignalized crosswalks of different types was developed using PTV VISSIM and MATLAB software. The model was built based on different volumes of both pedestrian and vehicle traffic at crosswalks of 4 types. At high volume of vehicle traffic (1600 veh/h) and low volume of pedestrian traffic (up to 20 ped/h), the pedestrian waiting time increases. It was established that increasing the volume of pedestrians (to 200 ped/hour) at high vehicle traffic volume (1600 veh/hour) reduces the waiting time for pedestrians for intersections of types A and C. At other crosswalks the waiting time for pedestrians does not change.

The method of calculating the time pedestrians have to wait before they cross the roadway may be limited depending on the volume of traffic and pedestrian flow. As the volume of both flows increases, the following restrictions may appear:



2. Straty czasu w ruchu pojazdów – wraz ze wzrostem natężenia ruchu pojazdów mogą wzrastać straty czasu na dojeździe do przejścia, co może przełożyć się wzrost czasu oczekiwania pieszych. Istnieje możliwość, że metoda obliczeniowa nie uwzględnia dostatecznie takich strat czasu.

3. Współzależności między natężeniem ruchu pojazdów i pieszych – wraz ze wzrostem natężenia ruchu pojazdów i pieszych mogą zmieniać się zależności między nimi; piesi mogą mieć ograniczoną zdolność korzystania z przejścia ze względu na dużą liczbę pojazdów. W takim przypadku metoda obliczeniowa może nie uwzględniać szczegółowo tych współzależności i ich wpływu na czas oczekiwania pieszych.

Uwzględnienie powyższych ograniczeń może wymagać bardziej szczegółowych badań i opracowania bardziej złożonych modeli szacowania czasu oczekiwania pieszych na przejściach. Przy doborze modelu ruchu pieszych na przejściu ważne jest również bowiem uwzględnienie fizycznych i psychofizjologicznych cech użytkowników drogi, co pozwala na lepsze przewidywanie ich zachowania [36].

Zaproponowana metoda obliczania czasu oczekiwania pieszych w zależności od natężenia ruchu pieszych i pojazdów była oparta na wynikach z badań terenowych i symulacji. Ustalono, że do głównych czynników wpływających na poziom bezpieczeństwa na przejściach bez sygnalizacji należy zaliczyć prędkość dopuszczalną pojazdów w pobliżu przejścia. Kierowcy nie powinni przekraczać prędkości dopuszczalnej na dojeździe do przejścia, respektując pierwszeństwo pieszych. Dzięki przedstawionej metodzie oraz danym o czynnikach wpływających na proces przekraczania jezdni przez pieszego możliwe jest szacowanie poziomu bezpieczeństwa i podejmowanie odpowiednich decyzji w zakresie zarządzania bezpieczeństwem ruchu drogowego.

## BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Batyrgareieva V.S., Shramko S.S., Samoiloiva O.M.*: Mortality and injury in Ukraine as a result of traffic accidents in measuring of public health: to the analysis of social-legal and criminological problem. *Wiadomości Lekarskie*, **74**, 11, 2021, 2870-2876
- [2] *Makarova I., Khabibullin R., Pashkevich A., Shubenkova K.*: Modeling as a method to improve road safety during mass events. *Transportation Research Procedia*, **20**, 2017, 430-435, DOI: 10.1016/j.trpro.2017.01.070
- [3] *Hughes R.L.*: A Continuum Theory for the Flow of Pedestrians. *Transportation Research Part B: Methodological*, **36**, 6, 2002, 507-535, DOI: 10.1016/S0191-2615(01)00015-7
- [4] *Huang L., Wong S.C., Zhang M., Shu C.W., Lam W.H.K.*: Revisiting Hughes' dynamic continuum model for pedestrian flow and the development of an efficient solution algorithm. *Transportation Research Part B: Methodological*, **43**, 1, 2009, 127-141, DOI: 10.1016/J.TRB.2008.06.003
- [5] *Di Francesco M., Markowich P.A., Pietschmann J.F., Wolfram M.T.*: On the Hughes' model for pedestrian flow: the one-dimensional case. *Journal of Differential Equations*, **250**, 3, 2011, 1334-1362, DOI: 10.1016/j.jde.2010.10.015
- [6] *Hänseler F.S., Lam W.H., Bierlaire M., Lederrey G., Nikolić M.*: A dynamic network loading model for anisotropic and congested pedestrian flows. *Transportation Research Part B: Methodological*, **95**, 2017, 149-168, DOI: 10.1016/j.trb.2016.10.017

1. Pedestrian crosswalk capacity – if pedestrian flow volume exceeds the pedestrian crosswalk capacity, there may be accumulations of pedestrians waiting to cross. In this case, the calculation method may not be sufficiently accurate, because it does not take into account the effective capacity of the crosswalk.

2. Traffic delays – with an increase in the traffic flow volume, traffic delays may occur on the approach to the pedestrian crosswalk, which leads to an increase in the waiting time for pedestrians. The calculation method may not sufficiently account for these delays and the associated loss of time.

3. Interaction between traffic and pedestrian flows – as the volume of traffic and pedestrian flow changes, interactions between them may change, since pedestrians may have limited ability to cross the roadway due to the large number of vehicles. In such a case, the calculation method may not take into account the details of this interaction and its impact on pedestrian waiting times [36].

Taking these limitations into account may require more detailed research and development of more sophisticated models for estimating pedestrian wait times at crosswalks. When choosing a model of pedestrian traffic at the crosswalks, it is also important to take into account the physical and psychophysiological properties of users crossing the roadway and predict their behavior.

Based on field research and simulation results, a method of calculating the pedestrian waiting time depending on vehicle and pedestrian traffic volume was proposed. It was established that the main factors affecting the level of danger at crosswalks with no traffic light control systems should include the speed limit in the area around the crosswalk. The drivers should not exceed the speed limit at the approach to the crosswalk and allow pedestrian to pass. Using the above method and having information about the factors that shape the process of pedestrian passage across the roadway, it is possible to obtain predictive estimates of the danger, which enable appropriate management decisions.

- [7] *Carteni A., De Guglielmo M.L., Pascale N.*: Congested urban areas with high interactions between vehicular and pedestrian flows: A cost-benefit analysis for a sustainable transport policy in Naples, Italy. *The Open Transportation Journal*, **12**, 2018, 273-288, DOI: 10.2174/1874447801812010273
- [8] *Gu Z., Osaragi T., Lu W.*: Simulating pedestrians' spatio-temporal distribution in underground spaces. *Sustainable Cities and Society*, **48**, 2019, ID article: 101552, DOI: 10.1016/j.scs.2019.101552
- [9] *Fournier N.*: Hybrid pedestrian and transit priority zoning policies in an urban street network: Evaluating network traffic flow impacts with analytical approximation. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **152**, 2021, 254-274, DOI: 10.1016/j.tra.2021.08.009
- [10] *Shafiei S., Gu Z., Saberi M.*: Calibration and validation of a simulation-based dynamic traffic assignment model for a large-scale congested network. *Simulation Modelling Practice and Theory*, **86**, 2018, 169-186, DOI: 10.1016/j.simpat.2018.04.006
- [11] *Zhou J., Wu Y., Mao X., Guo S., Zhang M.*: Congestion evaluation of pedestrians in metro stations based on normal-cloud theory. *Applied Sciences*, **9**, 17, 2019, ID article: 3624, DOI: 10.3390/app9173624
- [12] *Wang J., Chen M., Yan W., Zhi Y., Wang Z.*: A data-driven approach to estimate the probability of pedestrian flow congestion at transportation bottlenecks. *KSCSE Journal of Civil Engineering*, **23**, 1, 2019, 251-259, DOI: 10.1007/s12205-018-0063-1
- [13] *Huang C., Zhang F., Xu Z., Wei J.*: The Diverse Gait Dataset: Gait segmentation using inertial sensors for pedestrian localization with different genders, heights and walking speeds. *Sensors*, **22**, 4, 2022, ID article: 1678, DOI: 10.3390/s22041678
- [14] *Shen L., Weng W.*: Experimental study on movement characteristics of pedestrians with different speeds. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, **2022**, 8, 2022, ID article: 083404, DOI: 10.1088/1742-5468/ac8420
- [15] *Korjagin S., Klachek P.*: Innovative development of intelligent transport systems based on biocybernetical vehicle control systems. *Transportation Research Procedia*, **20**, 2017, 326-333, DOI: 10.1016/j.trpro.2017.01.038
- [16] *Fornalchyk Y., Kernytskyy I., Hrytsun O., Royko Y.*: Choice of the rational regimes of traffic light control for traffic and pedestrian flows. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*, **30**, 1, 2021, 38-50, DOI: 10.22630/PNIKS.2021.30.1.4
- [17] *Horbachov P.F., Makarichev O.V., Atamanyuk H.V.*: Model of determining the pedestrians' delay in the transition of streets and roads outside the pedestrian crossing. *Automobile Transport*, **41**, 2017, 82-91
- [18] *Hilevych V.V., Mohyla I.A., Mikhotskyi O.S.*: Vyznachen-nia hranychnykh mezh vlashtuvannya nerehulovanykh pishokhidnykh perekhodiv za kryteriiem zatrymky transportnykh zasobiv. *Visnyk Natsionalnoho universytetu Lvivska Politekhnika, Dynamika, litsnist na proektuvannya mashyn i prykladiv*, **838**, 2016, 146-152 (in Ukrainian)
- [19] *Lin Z.Y., Zhang P., Hang H.L.*: A dynamic continuum route choice model for pedestrian flow with mixed crowds. *Transportmetrica A: Transport Science*, **19**, 1, 2022, ID article: 2075951, DOI: 10.1080/23249935.2022.2075951
- [20] *Jiang Y., Zhang Y., Lin C., Wu D., Lin C.T.*: EEG-based driver drowsiness estimation using an online multi-view and transfer TSK fuzzy system. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **22**, 3, 2020, 1752-1764, DOI: 10.1109/TITS.2020.2973673
- [21] *Weijermars W., Bos N., Schoeters A., Meunier J.C., Nuytens N., Dupont E., Machata K., Bauer R., Perez K., Martin J.L., Johansson H., Filtness A., Brown L., Thomas P.*: Serious road traffic injuries in Europe, lessons from the EU research project SafetyCube. *Transportation Research Record*, **2672**, 32, 2018, 1-9, DOI: 10.1177/0361198118758055
- [22] *Wang Y., Shen B., Wu H., Wang C., Su Q., Chen W.*: Modeling illegal pedestrian crossing behaviors at unmarked mid-block roadway based on extended decision field theory. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **562**, 2021, ID article: 125327, DOI: 10.1016/j.physa.2020.125327
- [23] *Hu L., Ou J., Huang J., Wang F., Wang Y., Ren B., Peng H., Zhou L.*: Safety evaluation of pedestrian-vehicle interaction at signalized intersections in Changsha, China. *Journal of Transportation Safety & Security*, **14**, 10, 2022, 1750-1775, DOI: 10.1080/19439962.2021.1960662
- [24] *Szagala P., Olszewski P., Czajewski W., Dąbkowski P.*: Active Signage of Pedestrian Crossings as a Tool in Road Safety Management. *Sustainability*, **13**, 16, 2021, ID article: 9405, DOI: 10.3390/su13169405
- [25] *Olszewski P., Dąbkowski P., Szagala P., Czajewski W., Buttler I.*: Surrogate safety indicator for unsignalised pedestrian crossings. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, **70**, 2020, 25-36, DOI: 10.1016/j.trf.2020.02.011
- [26] *Zhang C., Chen F., Wei Y.*: Evaluation of pedestrian crossing behavior and safety at uncontrolled mid-block crosswalks with different numbers of lanes in China. *Accident Analysis & Prevention*, **123**, 2019, 263-273, DOI: 10.1016/j.aap.2018.12.002
- [27] *Forde A., Daniel J.*: Pedestrian walking speed at un-signalized midblock crosswalk and its impact on urban street segment performance. *Journal of traffic and transportation engineering (English edition)*, **8**, 1, 2021, 57-69, DOI: 10.1016/j.jtte.2019.03.007

- [28] *Song J., Qiu Z., Ren G., Li X.*: Prediction of pedestrian exposure to traffic particulate matters (PMs) at urban signalized intersection. *Sustainable Cities and Society*, **60**, 2020, 102153, DOI: 10.1016/j.scs.2020.102153
- [29] *Stipancic J., Miranda-Moreno L., Strauss J., Labbe A.*: Pedestrian safety at signalized intersections: Modelling spatial effects of exposure, geometry and signalization on a large urban network. *Accident Analysis & Prevention*, **134**, 2020, ID article: 105265, DOI: 10.1016/j.aap.2019.105265
- [30] *Sun X., Lin K., Wang Y., Ma S., Lu H.*: A study on pedestrian-vehicle conflict at unsignalized crosswalks based on game theory. *Sustainability*, **14**, 13, 2022, ID article: 7652, DOI: 10.3390/su14137652
- [31] *Santhosh A., Sam E., Bindhu B.K.*: Pedestrian accident prediction modelling – A case study in Thiruvananthapuram City. In: Mathew T.V., Joshi G.J., Velaga N.R., Arkatkar S. (eds): *Transportation Research, Lecture Notes in Civil Engineering*, **45**, 2019, 637-645, Springer, Singapore, DOI: 10.1007/978-981-32-9042-6\_50
- [32] *Zhao P., Ma J., Xu C., Zhao C., Ni Z.*: Research on the safety of the left hard shoulder in a multi-lane highway based on safety performance function. *Sustainability*, **14**, 22, 2022, ID article: 15114, DOI: 10.3390/su142215114
- [33] *Chowdhury T.U., Park P.Y., Gingerich K.*: Estimation of appropriate acceleration lane length for safe and efficient truck platooning operation on freeway merge areas. *Sustainability*, **14**, 19, 2022, ID article: 12946, DOI: 10.3390/su141912946
- [34] *Beza A.D., Maghrour Zefreh M., Torok A.*: Impacts of different types of automated vehicles on traffic flow characteristics and emissions: a microscopic traffic simulation of different freeway segments. *Energies*, **15**, 18, 2022, ID articles: 6669, DOI: 10.3390/en15186669
- [35] *Li L.*: *MATLAB User Manual*. The MathWorks, Natick, 2001
- [36] *Gasz K., Kruszyna M.*: Analyses of pedestrian entry – process to pedestrians crossing. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **3**, 2, 2004, 41-64 (in Polish)