

**MARIUSZ KIEĆ**¹⁾

ORCID: 0000-0001-9193-7269

RADOSŁAW BĄK²⁾

ORCID: 0000-0002-3115-3486

TOMASZ KAMIŃSKI³⁾

ORCID: 0000-0002-6695-4136

THE EFFECT OF THE SHARE OF AUTONOMOUS VEHICLES IN ROAD TRAFFIC ON TRAFFIC CONDITIONS AND FUEL CONSUMPTION IN THE VICINITY OF MID-BLOCK PEDESTRIAN CROSSINGS

WPŁYW ZMIANY UDZIAŁU POJAZDÓW AUTONOMICZNYCH W RUCHU NA WARUNKI RUCHU I ZUŻYCIE PALIWA W SĄSIEDZTWIE WYDZIELONYCH PRZEJŚĆ DLA PIESZYCH

STRESZCZENIE. Pojawienie się pojazdów autonomicznych (AV) w ruchu drogowym jest powszechnie przedstawiane jako szansa na poprawę bezpieczeństwa i warunków ruchu poprzez wykluczenie człowieka z procesu decyzyjnego, w tym zastąpienie go komunikacją pojazdów z pojazdami i z infrastrukturą. AV muszą uwzględniać między innymi interakcje z niechronionymi uczestnikami ruchu (m.in. pieszymi i rowerzystami), co jest problematyczne ze względu na konieczność przewidywania ich zachowań i odpowiedniego reagowania na nie. W artykule przedstawiono wyniki analiz mikrosymulacyjnych ruchu AV w rejonie wydzielonego przejścia dla pieszych. Założenie stopniowego wzrostu udziału AV wskazuje, że przejścia dla pieszych są miejscem, w którym płynność ruchu może się wówczas znacząco pogorszyć. Wyniki przeprowadzonych analiz oraz studiów literatury wskazują, że AV będą musiały gwałtowniej lub wcześniej hamować oraz częściej zatrzymywać się niż pojazdy konwencjonalne. W artykule przedstawiono również wpływ różnych poziomów udziału AV w ruchu na zużycie paliwa, mające pośredni wpływ na środowisko.

SŁOWA KLUCZOWE: natężenie ruchu, pojazd autonomiczny, ruch pieszych, wydzielone przejście dla pieszych, zużycie paliwa.

ABSTRACT. Introduction of autonomous vehicles (AVs) in road traffic is commonly presented as an opportunity to improve safety and traffic performance through elimination of human factor from the decisive process, including its replacement with vehicle-to-vehicle and vehicle-to-infrastructure communication. However, AVs must take into account interactions with vulnerable road users (including pedestrians and cyclists), which is problematic due to the need for prediction of their behavior and adequate reaction thereto. The article presents the results of microsimulation analyses of AV traffic in the vicinity of a mid-block pedestrian crossing. With the assumed gradual increase in the share of AVs in traffic, the results suggest that pedestrian crossings are among locations where smoothness of traffic flow may considerably deteriorate. The results of the performed analyses and literature studies indicate that AVs will have to brake more rapidly (or brake earlier) and come to a complete stop more frequently than conventional vehicles. The article also presents the effect of the share of AVs in road traffic on fuel consumption, which indirectly affects the environment.

KEYWORDS: autonomous vehicle, fuel consumption, mid-block pedestrian crossing, pedestrian traffic, traffic volume.

DOI: 10.7409/rabdim.024.006

¹⁾ Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków; mkiec@pk.edu.pl

²⁾ Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków; rbak@pk.edu.pl

³⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Zakład Systemów Zarządzania i Telematyki Transportu, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; tkaminski@ibdim.edu.pl (✉)

1. WPROWADZENIE

Obecny postęp technologiczny znacząco wpływa na wymagania stawiane pojazdom, które w szybkim tempie stają się coraz bardziej zautomatyzowane. Systemy wspomagania jazdy, które są szeroko stosowane w nowych samochodach, zastępują kierowcę w wybranych elementach procesu decyzyjnego i mają na celu wyeliminowanie błędów spowodowanych czynnikiem ludzkim tak, aby liczba wypadków śmiertelnych na drogach spadała do zera [1]. Istotna jest także kwestia poprawy sprawności ruchu oraz zmniejszenia zużycia paliwa, jak również wynikająca z tego redukcja emisji szkodliwych składników spalin. Przewiduje się, że wraz ze wzrostem udziału pojazdów zautomatyzowanych w ruchu drogowym będzie można efektywniej wykorzystywać przepustowość dróg, a infrastruktura drogowa będzie projektowana w sposób bardziej ekonomiczny [2, 3]. Jazda autonomiczna stwarza znaczące wyzwania, nie tylko ze względu na konieczność uwzględnienia konstrukcji czy dostosowania istniejącej infrastruktury dla tego typu pojazdów, ale także ze względu na rozwiązania w zakresie komunikacji pojazdów z niechronionymi użytkownikami dróg. Należy jednak zaznaczyć, że pojazdy półautomatyczne są już obecne na rynku, a wielu czołowych producentów testuje obecnie modele pojazdów inteligentnych [4, 5].

W artykule przedstawiono wpływ pojazdów autonomicznych (AV) na efektywność ruchu opisywaną przez zmiany w warunkach ruchu (straty czasu, liczbę zatrzymań pojazdów), zużycie paliwa oraz problemy wynikające z interakcji pomiędzy pojazdami a niechronionymi użytkownikami dróg na przykładzie wydzielonych przejść dla pieszych. Brak pełnej interakcji pomiędzy pojazdami i pieszymi jest jednym z podstawowych problemów poruszania się AV. W efekcie, aby AV mogły bezpiecznie uczestniczyć w ruchu drogowym, należy uwzględnić sposób ich poruszania, który zapewni bezpieczne zatrzymanie przed pieszym, co jest szczególnie istotne w rejonie przejść dla pieszych. W tym celu przeprowadzono przegląd badań wpływu AV na funkcjonowanie ruchu oraz zachowanie użytkowników dróg w pobliżu wydzielonych przejść dla pieszych (Rys. 1). Przegląd literatury wskazuje na potrzebę uwzględnienia złożonych interakcji zachodzących pomiędzy tradycyjnymi pojazdami i pieszymi oraz AV w ruchu. Konieczność spełnienia wymogów bezpieczeństwa w rejonie przejść dla pieszych może skutkować pogorszeniem warunków ruchu i wzrostem zużycia paliwa (energii elektrycznej w przypadku pojazdów elektrycznych).

1. INTRODUCTION

Current technological progress significantly impacts the requirements pertaining to vehicles, which become increasingly automated. Assistance systems that are widely used in new cars relieve the driver of the decision process and are intended to eliminate errors caused by the human factor in order to reduce the number of traffic fatalities to zero [1]. Improvement of traffic performance, reduction of fuel consumption and the consequent decrease in pollutant emissions are also significant questions. It is predicted that the increase in the share of autonomous vehicles (AVs) in road traffic will contribute to more effective usage of road capacity and more economic design of road infrastructure [2, 3]. Autonomous driving poses considerable challenges as well, not only due to the need for construction or adjustment of infrastructure for AVs, but also due to the required solutions in the field of communication of such vehicles with vulnerable road users. However, semi-autonomous vehicles are already available on the market and many leading producers are currently testing intelligent vehicle models [4, 5].

The article presents the impact of autonomous vehicles on traffic performance described by the changes in traffic conditions (delays, number of vehicle stops), fuel consumption and problems resulting from interactions with vulnerable road users, based on the example of a mid-block pedestrian crossing. Lack of full interaction between vehicles and pedestrians constitutes one of the basic problems of AV traffic. Consequently, if AVs are to safely participate in road traffic, they should move in a manner that would enable their safe stopping in front of a pedestrian, which is particularly important around pedestrian crossings. Therefore, a review of available studies was performed, focused on the influence of AVs on functioning of traffic and behavior of road users in the vicinity of mid-block pedestrian crossings (Fig. 1). Literature review indicates it is necessary to consider the complex interactions between traditional vehicles, pedestrians and AVs in traffic. The need to meet safety requirements in the vicinity of pedestrian crossings may lead to deterioration of traffic conditions and greater fuel consumption (electricity consumption in the case of electric cars).

The aim of the article is to present an evaluation of relative influence of changes in the share of AVs in traffic in the vicinity of a mid-block pedestrian crossing on traffic conditions and fuel consumption. To this end, a micro-simulation model in the popular PTV VISSIM software was calibrated based on the studies of behavior of

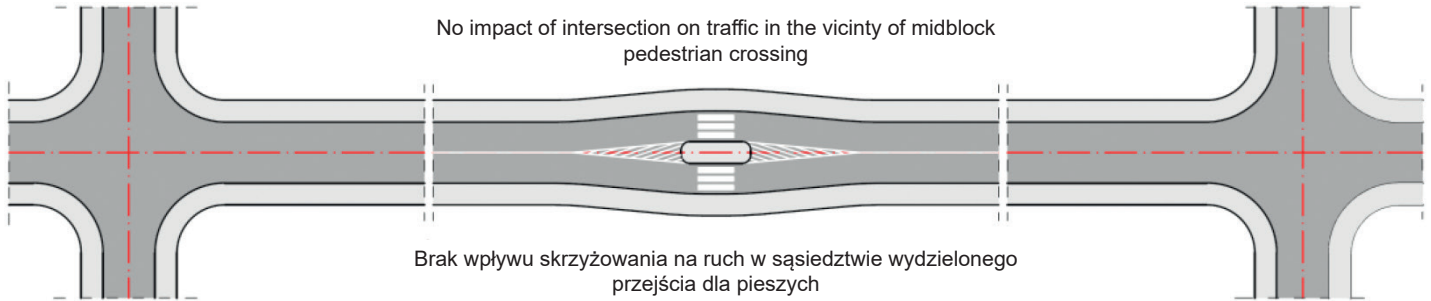


Fig. 1. Mid-block pedestrian crossing with a refuge island
 Rys. 1. Wydzielone przejście dla pieszych z wyspą azylu
 zlokalizowane między skrzyżowaniami

Celem artykułu jest przedstawienie oceny względnego wpływu zmian udziału AV w ruchu w sąsiedztwie wydzielonego przejścia dla pieszych na warunki ruchu oraz zużycie paliwa. W tym celu wykorzystano model mikrosymulacyjny skalibrowany na podstawie wyników badań zachowań kierowcy i pieszego w powszechnie stosowanym programie PTV VISSIM, w którym można odwzorować obecność AV w ruchu drogowym. W artykule opisano założenia modelu mikrosymulacyjnego, który pozwala w uproszczeniu uwzględnić interakcję pomiędzy różnymi grupami użytkowników dróg (pojazdów konwencjonalnych, pojazdów autonomicznych i pieszych). Wobec braku badań i szczegółowych analiz interakcji AV z pieszymi, których zachowanie jest bardziej losowe i trudniejsze do przewidzenia, mikrosymulacja ruchu pozwala na uproszczone oszacowanie skali problemów, jakie mogą pojawić się wraz ze wzrostem liczby AV w ruchu w przyszłości. Należy zauważyć, że parametry poruszania się AV w modelu są wartościami teoretycznymi, co wynika z braku ich obecności na drogach i możliwości kalibracji modeli na podstawie rzeczywistych obserwacji.

2. WPŁYW PROCESU AUTOMATYZACJI JAZDY NA EFEKTYWNOŚĆ RUCHU

Jednym z problemów, jakie pojawią się w przyszłości, będzie przez długi czas występowanie pojazdów o różnym stopniu automatyzacji, które będą dzielić drogę z pojazdami konwencjonalnymi, co istotnie wpłynie na przepustowość, warunki ruchu [6] i zużycie paliwa [7, 8]. Obecnie większość badań wpływu pojazdów zautomatyzowanych opiera się na stosowaniu modeli symulacyjnych ze względu na ograniczoną ilość danych i ograniczony dostęp do wyników badań terenowych z uwzględnieniem zmienności udziału tych pojazdów w ruchu. Jed-

nym z problemów, enabling inclusion of AVs in the analyzed traffic. The article describes the assumptions adopted in the microsimulation model to enable a simplified analysis of interactions between various road user groups (conventional vehicles, autonomous vehicles and pedestrians). Since there are no available studies or detailed analyses of AV interactions with pedestrians, whose behavior is more random and difficult to predict, traffic microsimulation provides a simplified evaluation of the scale of the problems that may arise when the number of AVs on roads increases in the future. One should bear in mind that the values of parameters of AV movements in the model are theoretical, as currently there are no AVs on roads and calibration of models through real-life observations is impossible.

2. THE EFFECT OF AUTOMATION DRIVING ON TRAFFIC PERFORMANCE

One of the major future problems lies in the fact that for a long period of time vehicles with various levels of automation will be sharing the roads with conventional vehicles, which will significantly affect capacity, traffic conditions [6] and fuel consumption [7, 8]. Due to the limited availability of data and field research results incorporating variability in the share of AVs in traffic, the majority of studies pertaining to the impact of AVs on traffic are based on simulation models. The most important questions in the automation driving process include enabling vehicle-to-vehicle (V2V), vehicle-to-infrastructure (V2I) and vehicle-to-pedestrian (V2P) communication.

In the case of fully autonomous vehicles communicating with each other and the surroundings, it will be possible to considerably reduce the gaps between vehicles, without the need to consider the time needed by the driver to react and take over control. The impact of AVs on

ną z najważniejszych kwestii w procesie automatyzacji jazdy jest zapewnienie możliwości komunikacji pojazdów między sobą (V2V), pojazdów z infrastrukturą (V2I) lub pojazdów z pieszymi (V2P).

W przypadku pojazdów w pełni autonomicznych, komunikujących się ze sobą i otoczeniem, możliwe będzie między innymi znaczne zmniejszenie odległości między pojazdami bez konieczności uwzględnienia czasu potrzebnego na reakcję i przejęcie kontroli przez kierowcę. W [9] analizowano wpływ AV na ruch drogowy zakładając, że odstęp pomiędzy AV wynosi średnio 0,5 s, a pomiędzy pojazdami konwencjonalnymi – 1,15 s. Wyniki testu wskazują, że przy udziałach AV mniejszych niż 50% wzrost przepustowości jest niewielki i wynosi około 20%, natomiast przy wyższych udziałach wzrost jest wyraźniejszy i może wynieść około 75% dla ruchu w pełni autonomicznego. Praca [10] przedstawia analizę wpływu AV na czas podróży i płynność ruchu. Zaobserwowano, że wraz ze wzrostem udziału AV w ruchu zmniejsza się rozproszenie prędkości, co znacząco wpływa na płynność ruchu, ale jest również bardzo korzystne z punktu widzenia bezpieczeństwa. Wraz ze wzrostem udziału AV ulega skróceniu także średni czas podróży (o około 10% przy 25% udziale AV w ruchu).

Wyniki zużycia paliwa wskazują, że maksymalne korzyści z wprowadzenia CAV uzyskuje się przy ich 100% udziale w ruchu [8]. Redukcja zużycia paliwa zależy także od infrastruktury drogowej (badania na odcinkach dróg z obszarami włączeń) i może wahać się od 5% [7] do 60% [8].

Większość dotychczas opisanych badań literaturowych wskazuje, że pojazdy zarówno o niższym stopniu automatyzacji, jak i pojazdy w pełni autonomiczne będą w większości pozytywnie wpływać na sprawność ruchu i zużycie paliwa, zwłaszcza przy większym udziale tych pojazdów w ruchu. Można przypuszczać, że dzięki mniejszemu rozproszeniu prędkości i skróceniu czasu podróży wzrośnie także bezpieczeństwo i komfort jazdy.

Bardzo optymistyczne wyniki badań udziału AV w ruchu na odcinkach dróg z ograniczoną dostępnością (autostrady, drogi ekspresowe i drogi zamiejskie) mogą nie powtórzyć się na innych elementach infrastruktury drogowej (jak np. odcinki ulic, skrzyżowania). Jednym z głównych problemów, z jakimi muszą się zmierzyć producenci AV, jest sposób poruszania się pojazdów w środowisku miejskim i interakcja z nie-

road traffic was analyzed in [9] based on the assumption that the average gap between AVs equals 0.5 s, whereas the average gap between conventional vehicles is 1.15 s. The results indicated that at the share of AVs less than 50% the increase in capacity was relatively small (by around 20%), while at greater AV shares the increase in capacity was more pronounced and reached approx. 75% for fully autonomous traffic. The study [10] presented an analysis of influence of AVs on travel times and smoothness of traffic flow. It was noted that as the share of AVs in traffic increased, speed dispersion decreased, which considerably improved traffic flow smoothness and contributed to safety. An increase in the share of AVs resulted in a decrease in average travel time (by about 10% at 25% share of AVs in traffic).

Fuel consumption results indicate that maximum benefits from introduction of connected and autonomous vehicles are achieved at 100% share of such vehicles in traffic [8]. Reduction of fuel consumption also depends on road infrastructure (studies on road sections with merge areas) and may range from 5% [7] to 60% [8].

Most of the studies in the available literature indicate that semi-automated vehicles and fully autonomous vehicles will generally positively influence traffic performance and fuel consumption in the future, especially when their share in the traffic increases. It may be assumed that reduced speed dispersion and shorter travel times will also contribute to safety and driving comfort.

Very optimistic results obtained for AVs in studies on limited-access road sections (highways, expressways, rural roads) may not necessarily be repeated on other elements of infrastructure (e.g. streets or intersections). One of the principal challenges for AV manufacturers lies in determining the manner of movement of vehicles in urban environment and interactions with vulnerable road users (pedestrians and cyclists). Therefore, it is necessary to enable communication between different road users or implement early detection of their behavior and interactions [11, 12]. One of the directions in development of AVs comprises determination and prediction of behavioral intentions (e.g. behavior around pedestrian crossings) of vulnerable road users (primarily pedestrians) by algorithms used in AVs. As indicated by the published results, understanding of pedestrian behavior is far from intuitive and depends on multiple factors, including pedestrian demography, traffic dynamics, environmental factors, and ultimately – road infrastructure type.

chronionymi użytkownikami dróg (piesi i rowerzyści). Istotne jest zatem umożliwienie komunikacji między różnymi użytkownikami drogi lub rozpoznanie ich zachowań i interakcji już na wczesnym etapie [11, 12]. Jednym z kierunków rozwoju AV jest poznanie i przewidywanie intencji behawioralnych (np. zachowań w rejonach przejść dla pieszych) niechronionych uczestników ruchu (głównie pieszych) przez algorytmy stosowane w AV. Jak wskazują niżej opisane wyniki badań dostępne w literaturze, zrozumienie zachowań pieszych nie jest intuicyjne i zależy od wielu czynników, takich jak demografia pieszych, dynamika ruchu, czynniki środowiskowe, a ostatecznie – od rodzaju infrastruktury drogowej.

Do najważniejszych miejsc w sieci drogowej, w których występuje intensywne oddziaływanie pojazdów i pieszych, należą przejścia dla pieszych. Brak jest obecnie publikacji, które umożliwiłyby ocenę sposobu poruszania się AV w sąsiedztwie przejść dla pieszych, stąd badania obejmują głównie analizę interakcji użytkowników dróg na podstawie badań empirycznych lub symulacyjnych w symulatorach jazdy. Większość badań interakcji pomiędzy pieszymi a pojazdami dotyczy sytuacji w pobliżu przejść dla pieszych, co jest związane z ustępowaniem pierwszeństwa pieszym przez kierujących pojazdami. Występują wtedy małe odległości pomiędzy trajektoriami ruchu pojazdów i pieszych, które wpływają na warunki ruchu. Duże zróżnicowanie poziomu skłonności do ustępowania pierwszeństwa pieszemu w Szwecji, Niemczech, Szwajcarii i Polsce (4-30% w [13], 12-20% w [14], 65-95% w [15] i 3-36% w [16]) wskazuje na wpływ na zachowanie kierowcy nieuwzględnionych w badaniach czynników dodatkowych, związanych między innymi z interpretacją przepisów ruchu drogowego i uwarunkowaniami kulturowymi.

Himanen i Kulmala [17] określili wpływ na interakcję pomiędzy pojazdami i pieszymi takich czynników jak: odległość pieszego od krawędzi drogi, wielkość miasta, liczba pieszych przechodzących przez przejście, liczby pieszych w grupie oraz prędkość pojazdu przed przejściem dla pieszych. Zmienne te w istotny sposób wpływają na ocenę prawdopodobieństwa hamowania przed przejściem dla pieszych. Zmianę profilu prędkości na dojeździe do przejścia dla pieszych opisano w pracach [18-22]. Schroeder [23] wskazał, że krytyczna wartość opóźnienia powodująca nieprzyjemne dla kierowcy hamowanie przed przejściem dla pieszych wynosi 3 m/s^2 .

Pedestrian crossings are among the most important locations in road infrastructure in terms of the intensity of vehicle–pedestrian interactions. There are currently no publications that would enable assessment of AV movement in the vicinity of pedestrian crossings; therefore, studies are mostly focused on analyses of road user interactions based on empirical studies or simulation research. The majority of studies on vehicle–pedestrian interactions pertain to situations at and around pedestrian crossings, which is related to the issue of yielding to pedestrians by vehicle drivers. In such situations, small distances between the paths of vehicles and pedestrians affect the traffic conditions. Considerable variability in the tendency of drivers to yield to pedestrians in Sweden, Germany, Switzerland and Poland (4-30% in [13], 12-20% in [14], 65-95% in [15] and 3-36% in [16]) suggests that driver behavior is affected by additional factors that were not included in the research, such as cultural background or interpretation of traffic regulations.

Himanen and Kulmala [17] analyzed the following factors in terms of their impact on vehicle–pedestrian interactions: distance of pedestrian to the road edge, city size, number of pedestrians crossing the road, number of pedestrians in a group and the speed of vehicle approaching the crossing. These factors significantly affect the evaluated probability of vehicle braking in front of a pedestrian crossing. The changes in speed profile at the approach to pedestrian crossing were described in the works [18-22]. Schroeder [23] noted that the critical deceleration value that causes the driver to feel discomfort during braking in front of a pedestrian crossing is 3 m/s^2 . The speed and behavior of road users around a pedestrian crossing may also be modified by means of engineering solutions [19] or different markings and signing of the crossing [21]. The above-mentioned factors are also affected by the location of the crossing [24].

Available studies indicate that driver–pedestrian interaction starts long before the car reaches the crossing. Research presented in [15] shows that if the distance between the vehicle and the crossing is less than 50 m, the driver is not able to comfortably react to sudden appearance of a pedestrian at the crossing. Authors of [22] noted that the pedestrian makes the decision about entering the crossing when the vehicle is about 40-50 m away. The research was performed on sections with 50 km/h speed limit. Study described in [24] indicates that speed

Na zmianę prędkości i zachowania użytkowników dróg w sąsiedztwie przejścia dla pieszych można również wpływać za pomocą środków inżynierskich [19] lub odmiennego oznakowania przejść dla pieszych [21]. Na wyżej wymienione czynniki wpływa też lokalizacja przejść dla pieszych [24].

Z przeprowadzonych badań wynika, że interakcja kierowca–pieszy rozpoczyna się na długo przed przejściem dla pieszych, gdy kierowca zbliża się do przejścia. Badania [15] wykazały, że odległość przejścia dla pieszych od pojazdu mniejsza niż 50 metrów nie pozwala na komfortową reakcję na nagle pojawiającego się pieszego. W pracy [22] wskazano, że decyzję o przejściu na drugą stronę podejmuje się, gdy pojazd znajduje się około 40-50 m przed przejściem dla pieszych. Badania te wykonano dla odcinków, na których obowiązuje ograniczenie prędkości do 50 km/h. Badania opisane w [24] wskazują na wpływ lokalizacji przejścia dla pieszych, dopuszczalnej prędkości i szerokości przekroju poprzecznego na zmianę prędkości na dojeździe do przejścia. Ze względu na obserwowane prędkości znacznie większe niż ograniczenie prędkości (50 km/h), badania te przeprowadzono na odcinku 100 m przed przejściem.

Jednym z istotnych czynników wpływających na interakcję pieszy–pojazd jest kontakt wzrokowy pieszego z kierowcą, niemożliwy do osiągnięcia w AV. Producenci pojazdów rozwiązują ten problem, wyposażając pojazdy w czujniki oraz kamery i wyświetlacze z informacją zwrotną dla pieszych [25]. Badania [26] wskazują także na potrzebę zapewnienia interakcji pojazdu z pieszymi poprzez alternatywne techniki komunikacji, które muszą być w stanie zastąpić wzrok kierowcy, np. poprzez wyświetlanie informacji zwrotnej z przodu pojazdu.

Wyniki badań [26] wskazują, że prędkość pojazdu w istotny sposób wpływa na proces podejmowania decyzji przez pieszego podczas przechodzenia przez jezdnię. Mała prędkość pojazdu na dojeździe do przejścia i wczesne hamowanie pozytywnie wpływają na prawidłowe i jednoznaczne podejmowanie decyzji przez pieszego. Dlatego prawidłowe zachowanie pieszego podczas zbliżania się do przejścia może pomóc AV rozwiązać problem interakcji z pieszym związany z właściwą oceną jego zachowania. Ocena ta obejmuje kierunek poruszania się pieszego (równoległe do drogi bez przechodzenia bądź przechodzenie przez przejście dla pieszych) i zamiar przejścia przez drogę. Efektem poprawy interakcji między AV

of vehicles approaching a pedestrian crossing is affected by crossing location, speed limit and width of the roadway. Since the observed speeds considerably exceeded the speed limit (50 km/h), the study was performed on a segment of road starting 100 m away from the crossing.

One of the crucial factors affecting the driver–pedestrian interaction is their eye contact, which is impossible to recreate in the case of AVs. Manufacturers try to solve this problem by equipping vehicles with sensors, cameras and screens that display feedback to pedestrians [25]. The study [26] also suggests that there is a need for supporting vehicle–pedestrian interaction through alternative communication technologies that act as a substitute for eye contact with the driver, e.g. displaying feedback at the front of the vehicle.

Results of [26] indicate that vehicle speed significantly affects the decision-making process of a pedestrian crossing the street. Low speed of the vehicle approaching the crossing and early braking positively affect appropriate and decisive actions of the pedestrian. Consequently, adequate behavior of the pedestrian approaching the crossing may support AVs in correct interpretation of the situation. Such evaluation is based on the pedestrian's direction of movement (parallel or perpendicular to the road edge) and intention to cross the roadway. Improvement of interactions between pedestrians and AVs should result in increased smoothness of traffic flow; reduced total number of vehicle stops should minimize delays, reduce fuel consumption and pollutant emissions. It is worth noting that the impact of interactions between AVs and pedestrians on fuel consumption has not been described yet [27].

The above factors suggest that there is a need for research on the effect of the share of AVs on the performance of urban street networks with pedestrian crossings, especially with high density of crossings. It should be highlighted that microsimulation modeling requires one to incorporate not only changes in traffic flow smoothness resulting from the share of AVs (i.e. changes of gaps and reaction times), but also factors related to vehicle–pedestrian interaction.

Relative evaluation of the effect of the share of AVs on traffic performance described by the change in traffic conditions (delays and vehicle stops) and fuel consumption in the vicinity of mid-block pedestrian crossings poses a research gap. In practice, it is necessary

i pieszymi powinna być większa płynność ruchu, poprzez ograniczenie liczby całkowitych zatrzymań skutkująca minimalizacją straty czasu oraz ograniczeniem zużycia paliwa i emisji szkodliwych składników spalin. Należy zauważyć, że brak jest opisu wpływu interakcji pomiędzy AV a pieszymi na zużycie paliwa [27].

Powyższe czynniki wskazują na potrzebę podjęcia badań opisujących wpływ udziału AV w ruchu na efektywność miejskich sieci ulicznych z przejściami dla pieszych, zwłaszcza w przypadku sieci o wysokiej gęstości przejść. Należy podkreślić, że w modelowaniu mikrosymulacyjnym konieczne jest uwzględnienie nie tylko zmian w przepływie ruchu wynikających z obecności AV (tj. zmian odległości pojazdów i czasów reakcji), ale również czynników związanych z interakcją z pieszymi.

Luką badawczą jest relatywna ocena wpływu zmiennego udziału AV na efektywność ruchu, która szacowana jest przez zmianę warunków ruchu (straty czasu i zatrzymania pojazdów) i zużycia paliwa przez pojazdy w sąsiedztwie wydzielonych przejść dla pieszych. W praktyce ważne jest podnoszenie powszechnej świadomości, że wprowadzenie AV może spowodować konieczność wprowadzenia zmian w organizacji ruchu i sposobie zarządzania nim, a w konsekwencji może nawet w wymaganiach projektowych dotyczących dróg (np. separacji skutkującej ograniczeniem miejsc kolizji, niższych limitów prędkości ogólnej i konieczności stosowania lokalnych limitów prędkości). W kolejnych rozdziałach artykułu przedstawiono założenia i wyniki badań wybranych miar warunków ruchu (strat czasu, wskaźnika zatrzymań) i zużycia paliwa na wydzielonym przejściu dla pieszych z wykorzystaniem modelu mikrosymulacyjnego. W opracowanym modelu mikrosymulacyjnym uwzględniono nie tylko udział AV w ruchu, ale także ich interakcję z pieszymi.

3. METODA OCENY WPŁYWU AV NA WARUNKI RUCHU I ZUŻYCIE PALIWA

W analizach wykorzystano model mikrosymulacyjny opracowany i skalibrowany w celu oceny wpływu różnych typów wydzielonych przejść dla pieszych na przepustowość odcinka ulicy dwupasowej [28]. Model ten został opracowany na podstawie obserwacji rzeczywistego zachowania pieszych i kierujących wyłącznie pojazdami konwencjonalnymi. W modelu uwzględniono różny poziom skłonności kierowców do ustępowania pierwszeństwa pieszemu, co zostało opisane poniżej. Należy

to raise public awareness that introduction of AVs may necessitate implementation of changes in traffic organization, management and, consequently, maybe even in road design requirements (e.g. separation to reduce the number of conflicting traffic streams, lower general speed limits and new local speed limits). The following sections of the paper present the assumptions and results of the adopted microsimulation model in terms of chosen traffic condition indicators (delays, vehicle stopping rate) and fuel consumption on a mid-block pedestrian crossing. The developed microsimulation model encompassed not only the share of AVs in traffic, but also vehicle–pedestrian interactions.

3. THE METHOD FOR EVALUATION OF THE EFFECT OF AVS ON TRAFFIC CONDITIONS AND FUEL CONSUMPTION

The analyses were based on a microsimulation model that had been developed and calibrated for evaluation of the effect of various pedestrian crossing types on the capacity of a two-lane street section [28]. The model was adapted for the study; it had been originally developed based on observations of actual behavior of pedestrians and drivers of conventional vehicles. The model incorporates various levels of driver tendency to yield to pedestrians, which will be described in greater detail below. It should be noted that the developed microsimulation model for a stream of conventional vehicles and AVs is a simplification that reflects real-life conditions to a limited extent. A major problem lies in the fact that AV manufacturers do not make public the data on the functioning of automated systems for detection of pedestrians and reaction to their presence. Access to such data would enable development of a more precise microsimulation model and performance of empirical research to adequately calibrate the model in terms of the influence of AVs. Therefore, this article is based on comparison of changes noted in the simulation; zero share of AVs in traffic was adopted as the reference situation. Lack of detailed knowledge on the behavior of pedestrians confronted with AVs, as well as concern of vulnerable road users for their own safety are also major factors.

The model included the following assumptions:

- approaches of vehicles to the mid-block pedestrian crossing are random; they are described by the Poisson process, without the influence of any other factors that may affect traffic inflow (e.g. neighboring intersections);

zaznaczyć, że opracowany model mikrosymulacyjny w odniesieniu do potoku pojazdów konwencjonalnych z udziałem pojazdów AV stanowi uproszczenie i w ograniczonym stopniu odzwierciedla warunki rzeczywiste. Poważnym problemem jest brak danych udostępnianych przez producentów AV dotyczących sposobu działania systemów automatyzujących w zakresie wykrywania pieszych i sposobu reagowania w sytuacji, kiedy będzie wykryta ich obecność. Dostęp do takich danych umożliwiłby opracowanie dokładniejszego modelu mikrosymulacyjnego, a także przeprowadzenie badań empirycznych pozwalających na odpowiednią kalibrację modelu z uwzględnieniem AV w ruchu. Dlatego artykuł opiera się na porównaniu zmian, które wynikają z symulacji, przy założeniu, że punktem odniesienia są warunki ruchu z zerowym udziałem AV. Brak wiedzy na temat zachowań pieszych skonfrontowanych z AV oraz obawa niechronionych użytkowników dróg o ich bezpieczeństwo są również ważnymi czynnikami.

W modelu założono, że:

- dojazdy pojazdów do wydzielonego przejścia są losowe i opisane procesem Poissona, bez udziału innych czynników mogących mieć wpływ na dopływ ruchu (np. sąsiadujących skrzyżowań);
- odstęp czasu pomiędzy dotarciem kolejnych pieszych do przejścia opisuje się rozkładem wykładniczym;
- przejście dla pieszych zlokalizowane jest na odcinku ulicy, na którym obowiązuje ograniczenie prędkości do 50 km/h;
- pojazdy poruszają się z prędkością zgodną z rozkładem normalnym prędkości, uzyskanym z badań własnych [28];
- piesi mogą przechodzić przez ulicę tylko wtedy, gdy spełnione są następujące warunki:
 - pojazd zbliżający się do wydzielonego przejścia dla pieszych ustępuje pierwszeństwa pieszemu,
 - odległość pomiędzy pojazdami jest większa niż dopuszczalna odległość (limit odstępu czasowego). Odstęp czasowy dla pieszych do pojazdu ustawiony jest w sposób zróżnicowany w zależności od klas pojazdów i pieszych, z luką czasową od 0 s do 4,5 s i odległością od 5 m (obszar przejścia) do 11 m;
- decyzja kierowcy pojazdu konwencjonalnego o ustąpieniu pierwszeństwa pojedynczemu pieszemu jest
 - time gaps between approaches of pedestrians to the crossing are described by exponential distribution;
 - the crossing is located on a street segment with 50 km/h speed limit;
 - vehicles move at speeds described by the normal distribution obtained in authors' own research [28];
 - pedestrians may cross the street only when the following conditions are met:
 - the approaching vehicle is yielding to the pedestrian,
 - gap between the vehicles is greater than the minimum acceptable gap (time gap limit). Acceptable time gap is preset differently for various classes of vehicles and pedestrians, with time gap ranging from 0 to 4.5 s and distance ranging from 5 m (area of the crossing) to 11 m;
 - decision of the driver of a conventional vehicle whether to yield to a single pedestrian or not is an independent variable (vehicles were divided into two classes – those that yield and those that continue moving despite the fact that a pedestrian is approaching; probability of their occurrence is based on the results of empirical research [16]);
 - pedestrians approaching the crossing may immediately cross the street if the vehicle has already stopped to yield to other pedestrians (in the case of continued inflow of pedestrians, the vehicle will wait until an appropriate gap in the pedestrian stream occurs).

The model was originally calibrated using empirical data on the characteristics of pedestrian traffic (volume) and conventional vehicle traffic (speed, volume) in the scope that enabled determination of changes in lane capacity around mid-block pedestrian crossings. The mean absolute percentage error of the model in relation to empirically evaluated capacity equaled 8% [28]. The mentioned microsimulation model [28] was further developed herein, to account for the occurrence of AVs in road traffic and their interactions with pedestrians in a simplified manner due to the lack of studies on AVs in real traffic. In order to better demonstrate the analyzed influence, it was necessary to limit the analyzed types of crossings and simplify the model by adopting the following assumptions in the simulation:

- the analyzed pedestrian crossing is a mid-block crossing with a refuge island, on a two-lane segment of the street (Fig. 1);

zmienną niezależną (wprowadzono klasy pojazdów ustępujących oraz kontynuujących przejazd mimo zbliżania się pieszego, których prawdopodobieństwo wystąpienia odpowiada wartościom uzyskanym z badań empirycznych [16]);

- piesi zbliżający się do przejścia dla pieszych mają możliwość natychmiastowego przejścia przez jezdnię, jeżeli pojazd zatrzymał się wcześniej, aby ustąpić pieszym pierwszeństwa (w przypadku ciągłego dopływu pieszych, pojazd oczekuje na przejazd do czasu powstania odpowiedniej przerwy w strumieniu pieszych).

Model został skalibrowany z uwzględnieniem danych empirycznych o charakterystykach ruchu pieszego (natężenie) i pojazdów konwencjonalnych (prędkość, natężenie) w zakresie, który umożliwił określenie warunków przepustowości pasa ruchu ulicy wskutek występowania wydzielonych przejść dla pieszych. Średni bezwzględny błąd procentowy modelu w stosunku do empirycznie szacowanej przepustowości wyniósł 8% [28]. W artykule rozwinięto wspomniany model mikrosymulacyjny [28], uwzględniając obecność AV w ruchu drogowym oraz ich interakcję z pieszymi w sposób uproszczony, ze względu na brak badań AV w ruchu. Aby lepiej pokazać analizowane wpływy, konieczne było zmniejszenie liczby analizowanych rodzajów przejść dla pieszych oraz uproszczenie modelu poprzez przyjęcie następujących założeń do symulacji:

- analizowane jest wydzielone przejście dla pieszych z wyspą azylu na odcinku ulicy o jezdni dwupasowej (Rys. 1);
- zdefiniowano dwie grupy pojazdów: konwencjonalne i autonomiczne;
- pojazdy konwencjonalne poruszają się zgodnie z modelem jazdy za liderem z domyślnymi wartościami parametrów modelu jazdy za poprzedzającym kierowcą (odległość zatrzymania $CC0 = 1,5$ m, odstęp czasu $CC1 = 0,9$ s);
- AV poruszają się z obniżonymi wartościami parametrów jazdy za liderem (odległość zatrzymania $CC0 = 1,2$ m dla AV, zmniejszony odstęp czasu $CC1 = 0,6$ s);
- prędkość pojazdów AV została ograniczona do 35 km/h na odcinku 35 m przed wydzielonym przejściem dla pieszych zgodnie z [26]. Ograniczenie prędkości zapewnia zatrzymanie pojazdu przed wydzielonym

- two groups of vehicles were defined: conventional and autonomous;
- conventional vehicles move according to the follow-the-leader model with the default parameters (stop distance $CC0 = 1.5$ m, time gap $CC1 = 0.9$ s);
- AVs move with reduced following behavior parameters (stop distance $CC0 = 1.2$ m for AVs, reduced time gap $CC1 = 0.6$ s);
- speed of AVs was reduced to 35 km/h in a 35-m-long zone in front of the pedestrian crossing, in accordance with [26]. This speed limit enables the vehicle to brake in front of the pedestrian crossing with a comfortable deceleration of 1.5 m/s² (Fig. 2);
- the tendency of drivers to yield to pedestrians was adjusted to the Polish conditions and based on the available research results [16] (constant percentage of drivers that would yield to a pedestrian, depending on the pedestrian's direction of approach);
- pedestrians were divided into two groups (two pedestrian classes with different interactions were introduced in the program):
 - group 1 - pedestrians that show their intention to cross the roadway (the intention is clear to the drivers),
 - group 2 - cautious pedestrians (do not show determination to enter the crossing when a vehicle is approaching);
- a driver would yield to a Group 1 pedestrian approaching the roadway and a Group 2 pedestrian crossing the roadway;
- AVs yield to every pedestrian, as long as the acceptable deceleration would allow it (no readings of signals on pedestrian behavior);
- in order to ensure traffic safety, the pedestrian detection zone of AVs is increased to 5 m beyond the roadway edge;
- time gap between pedestrians that enables a vehicle to pass the crossing is shortened; the critical gap for AVs equals 3.0 s.

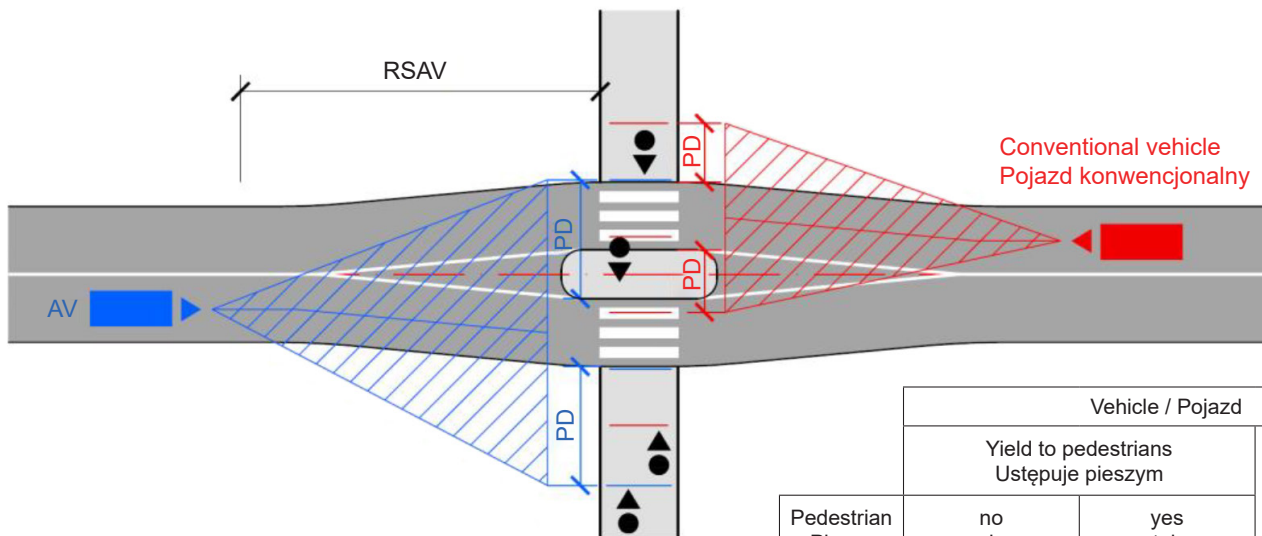
przejściem dla pieszych z komfortowym opóźnieniem wynoszącym $1,5 \text{ m/s}^2$ (Rys. 2);

- skłonność kierowców do ustąpienia pierwszeństwa, dostosowana do warunków panujących w Polsce, została przyjęta na podstawie przeprowadzonych badań [16] (stały odsetek kierowców, którzy decydują się na ustąpienie pierwszeństwa pieszemu na przejściu, w zależności od kierunku zbliżania się pieszego);
- pieszych podzielono na dwie grupy (w programie wprowadzono klasy pieszych o odmiennych interakcjach):
 - grupa 1 - piesi wykazujący zamiar przejścia przez jezdnię (zamiar pieszego jest czytelny dla kierowców),
 - grupa 2 - piesi ostrożni (nie wykazują determinacji przy wchodzeniu na przejście, jeśli nadjeżdża pojazd);
- kierowca ustępuje pierwszeństwa pieszemu z grupy 1 zbliżającemu się do przejścia oraz pieszemu z grupy 2 przechodzącemu przez jezdnię;

Fig. 2 presents the above assumptions pertaining to pedestrian–vehicle interactions in the microsimulation model.

The following assumptions and scenarios were adopted in microsimulation analyses:

- speed limit on the analyzed street segment is 50 km/h;
- the share of each of the two defined pedestrian groups equals 50%;
- vehicle traffic volume ranges from 200 veh/h/lane to 600 veh/h/lane, with a step of 100 veh/h/lane;
- pedestrian traffic volume equals 300 ped/h or 600 ped/h. Beyond 600 ped/h the traffic flow becomes unstable and it may necessitate design of a signalized crossing or acceptance of considerable vehicle delays;
- share of AVs in traffic ranges from 0% to 100%, with a step of 20%;
- length of the analyzed segment equals 170 m.



RSAV – reduced speed area for AV = 35 km/h / obszar redukcji prędkości dla AV = 35 km/h

PD – pedestrian detection = 5 m for AV, 3.5 m for conventional vehicle / detekcja pieszego = 5 m dla AV, 3,5 m dla pojazdów konwencjonalnych

Pedestrian Pieszy	Vehicle / Pojazd		AV
	Yield to pedestrians Ustępuje pieszym		
	no nie	yes tak	
Group 1 Grupa 1	critical gap odstęp krytyczny	all stop wszystkie stają	all stop wszystkie stają
Group 2 Grupa 2	all go wszystkie jadą	all stop wszystkie stają	all stop wszystkie stają

Fig. 2. A scheme of vehicle-pedestrian interactions in the microsimulation model

Rys. 2. Schemat interakcji pojazd-pieszy w modelu mikrosymulacyjnym

- AV ustąpią pierwszeństwa każdemu pieszemu, jeżeli pozwala na to pożądane opóźnienie (brak odczytu sygnałów dotyczących zachowania pieszego);
- w celu zapewnienia bezpieczeństwa ruchu drogowego obszar wykrywania pieszych przez AV zostaje zwiększony do 5 m od krawędzi jezdni;
- odstęp czasu między pieszymi umożliwiającymi przejazd jest skrócony; odstęp krytyczny jest równy 3,0 s dla AV.

Na Rys. 2 przedstawiono powyższe założenia dotyczące interakcji pieszy–pojazd w modelu mikrosymulacyjnym.

W analizach mikrosymulacyjnych przyjęto następujące założenia i scenariusze obliczeniowe:

- dozwolona prędkość na odcinku ulicy wynosi 50 km/h;
- założono 50% udział każdej ze zidentyfikowanych grup pieszych;
- natężenie ruchu pojazdów waha się od 200 P/h/pas do 600 P/h/pas, z krokiem 100 P/h/pas;
- natężenie ruchu pieszych przyjmuje wartości 300 Ps/h lub 600 Ps/h. Powyżej 600 Ps/h funkcjonowanie ruchu staje się niestabilne i może być konieczne zaprojektowanie przejścia dla pieszych wyposażonego w sygnalizację lub zaakceptowanie dużych strat czasu pojazdów;
- udział AV jest zmienny od 0% do 100% z krokiem 20%;
- długość analizowanego odcinka jest równa 170 m.

Do oceny wpływu udziału AV na warunki ruchu przyjęto zmianę wartości następujących mierników warunków ruchu:

- straty czasu pojazdów z uwzględnieniem zmiany prędkości na podstawie badań empirycznych na odcinku 50 m przed (w przypadku kolejek wartość tę zwiększono do 75 m) i za przejściem dla pieszych, jak wynika z przedstawionych badań [15, 18, 22];
- wskaźnik zatrzymań pojazdów, który wyraża wpływ na płynność ruchu.

Ponadto oceniano wpływ udziału AV w ruchu na relatywną zmianę zużycia paliwa przez pojazdy znajdujące się na symulowanym odcinku.

The following indicators were adopted for evaluation of the effect of the share of AVs on traffic conditions:

- vehicle delays including speed changes, based on empirical research on 50-m segments in front of the crossing (when queues were noted, the distance was increased to 75 m) and beyond the crossing, as suggested by the mentioned studies [15, 18, 22];
- vehicle stopping rate, which is an indicator of the smoothness of traffic flow.

Additionally, the effect of the share of AVs in traffic on the relative change in fuel consumption was analyzed for the vehicles on the examined street segment.

4. MICROSIMULATION RESULTS AND DISCUSSION

Results of microsimulations on street sections with mid-block pedestrian crossings indicate that AVs negatively affect the traffic conditions and fuel consumption. The changes in the values of delays and stopping rate (number of stops per vehicle) are presented in Tables 1 and 2, as well as Figs 3 and 4. Changes in fuel consumption (for all vehicles in the simulated period) are shown in Table 3 and Fig. 5. The presented results reflect the influence of changes in the share of AVs from 0% to 100%. Since microsimulations were used in order to enable evaluation of the effect of AVs on traffic performance, the results are also presented in terms of percentage, with the starting conditions adopted as reference.

The performed microsimulations indicate that introduction of AVs in traffic will result in an increase in delays (Fig. 3). Magnitude of the delay depends on the share of AVs in the traffic stream and on the volume of vehicle and pedestrian traffic. For pedestrian traffic of 300 ped/h, the delays do not change considerably (delay is less than 10 s/veh), irrelevant of the value of vehicle traffic volume, up to 600 veh/h/lane. For pedestrian traffic volume greater than 300 ped/h and vehicle traffic volume greater than 400 veh/h/lane, changes in delays are much more pronounced and they increase with an increase in the share of AVs. When the volume of pedestrian traffic is 600 ped/h, occurrence of AVs in traffic may even lead to delays greater by a factor of 4 than in the reference situation with no AVs (Table 1). The delays result from reduction of speed in front of the pedestrian crossing and the need to yield to

4. WYNIKI ANALIZ MIKROSYMULACYJNYCH I Dyskusja

Wyniki badań mikrosymulacyjnych na odcinkach ulic, na których znajdują się wydzielone przejścia dla pieszych wskazują, że AV mają negatywny wpływ na warunki ruchu i zużycie paliwa. W Tabl. 1 i 2 oraz na Rys. 3 i 4 przedstawiono odpowiednio zmienność wartości strat czasu i wskaźnika zatrzymań (liczby zatrzymań na pojazd), natomiast w Tabl. 3 i na Rys. 5 przedstawiono zmienność zużycia paliwa (dla wszystkich pojazdów w okresie symulacji) z uwzględnieniem wpływu zmiany udziału AV od 0% do 100%. Ze względu na zastosowanie mikrosymulacji ruchu do oceny wpływu AV na efektywność ruchu, wyniki analizy zaprezentowano w sposób względny, w odniesieniu do założonych warunków początkowych.

Wyniki przeprowadzonych analiz mikrosymulacyjnych wskazują, że pojawienie się AV w ruchu spowoduje wzrost strat czasu (Rys. 3). Wielkość ta zależy od udziału AV w potoku ruchu oraz natężenia ruchu i pieszych. Dla ruchu pieszego wynoszącego 300 Ps/h wzrost strat czasu nie zmienia się znacząco (strata czasu jest mniejsza niż 10 s/P), niezależnie od wartości natężenia ruchu pojazdów, do 600 P/h/pas. Dla wyższych wartości natężenia ruchu pieszego (powyżej 300 Ps/h), dla natężenia ruchu pojazdów większego niż 400 P/h/pas, zmiany strat czasu są znacznie większe i rosną wraz ze wzrostem udziału AV. Przy większym natężeniu ruchu pieszego (600 Ps/h) obecność AV w ruchu może skutkować nawet czterokrotnie większymi stratami czasu w porównaniu do sytuacji, gdyby w ruchu nie było takich pojazdów (Tabl. 1). Straty czasu wynikają ze zmniejszenia prędkości przed przejściem dla pieszych i konieczności ustąpienia pierwszeństwa pieszemu, co jest szczególnie zauważalne przy dużym natężeniu ruchu pieszych. Zmiana strat czasu przy natężeniu ruchu do 400 P/h/pas jest proporcjonalna do obu analizowanych wartości natężenia ruchu pieszych (300 Ps/h i 600 Ps/h). Powyżej tej wartości obserwuje się gwałtowny wzrost wartości strat czasu dla QPs = 600 Ps/h, co jest związane z zakłóceniami w ruchu wynikającymi z przepustowości odcinka ulicy.

Wzrost wartości wskaźnika zatrzymań wykazuje podobny trend jak w przypadku strat czasu (Rys. 4). W każdym z analizowanych przypadków liczba zatrzymań jest większa, gdy w ruchu obecne są AV. Procentowa zmiana wskaźnika zatrzymań jest większa niż zmiana wartości strat czasu w obu grupach natężenia ruchu pieszego (Tabl. 2).

pedestrians, which is particularly evident at high pedestrian traffic volume. At vehicle traffic volume up to 400 veh/h/lane, the change in delay is proportional to the two analyzed pedestrian traffic volumes (300 ped/h and 600 ped/h). Beyond 400 veh/h/lane, a rapid increase in vehicle delay is observed at pedestrian traffic volume of QPs = 600 Ps/h, which is related to disruptions in traffic resulting from the capacity of the street section.

The stopping rate displays similar trend to the delay (Fig. 4). In each analyzed case the number of stops was greater when traffic included a share of AVs. For both levels of pedestrian traffic volume, the increase in stopping rate is greater than the increase in delay (Table 2). This is due to blocking of the crossing by the flow of pedestrians (at high pedestrian traffic volumes) and the consequent decrease in the number of vehicle stops to yield to pedestrians. The results indicate that it may not be undeniably claimed that introduction of AVs will improve traffic conditions on street segments with mid-block pedestrian crossings.

Greater number of vehicle stops will also lead to increased emissions of harmful exhaust gases. Therefore, similar trends are noticeable in fuel consumption values (Fig. 5). Greater share of AVs in traffic causes greater fuel consumption. At lower pedestrian traffic volume (300 ped/h) the relative increase is less than 40%, but at 600 ped/h and high vehicle traffic volume (600 veh/h/lane) fuel consumption may even increase by a factor of 3 (Table 3). Fuel consumption analyses were based on the value of total fuel consumption in liters on the analyzed segment within a 3-hour simulation period.

5. CONCLUSIONS

Literature review and research results presented in this article indicate that introduction of AVs will not necessarily lead to improvement of traffic conditions and reduction in fuel consumption (or energy consumption, in the case of electric vehicles) on all segments of the road network. In the case of street networks, AVs may deteriorate traffic performance (detailed analyses will be required in the future, when such vehicles actually appear in traffic), especially in the vicinity of mid-block pedestrian crossings. This is due to the limited capability of AVs to identify and classify road user behavior. In order to maintain traffic flow smoothness and safety, such vehicles have to travel with greater delays, number of stops and fuel consumption than conventional vehicles.

Table 1. The effect of the share of AVs in traffic on the change in vehicle delays on street segments with mid-block pedestrian crossing
 Tablica 1. Wpływ udziału pojazdów AV na zmianę strat czasu na odcinkach ulic z wydzielonym przejściem dla pieszych

Share of AVs / Udział AV [%]		0	20	40	60	80	100	20	40	60	80	100
QP [ped/h] / [Ps/h]	Q [veh/h/lane] / [P/h/pas]	Delay d [s/veh] Strata czasu d [s/P]						Change ^{*)} [%] Zmiana procentowa ^{*)}				
300	200	1.1	1.8	2.2	2.7	3.3	3.6	163.6	200.0	245.5	300.0	327.3
	300	1.7	2.5	2.9	3.4	3.9	4.1	147.1	170.6	200.0	229.4	241.2
	400	2.0	2.9	3.4	4.0	4.5	4.7	145.0	170.0	200.0	225.0	235.0
	500	3.2	4.2	4.7	5.3	5.7	6.1	131.3	146.9	165.6	178.1	190.6
	600	4.3	5.2	6.5	7.2	7.3	7.4	120.9	151.2	167.4	169.8	172.1
600	200	3.0	4.8	6.5	8.0	9.3	10.7	160.0	216.7	266.7	310.0	356.7
	300	3.5	6.6	9.5	11.6	13.6	15.7	188.6	271.4	331.4	388.6	448.6
	400	4.7	8.4	11.6	14.3	16.6	17.5	178.7	246.8	304.3	353.2	372.3
	500	8.6	14.2	19.6	24.4	28.9	31.1	165.1	227.9	283.7	336.0	361.6
	600	13.8	26.7	36.5	41.2	49.7	48.9	193.5	264.5	298.6	360.1	354.3

^{*)} Calculated as the ratio of delays obtained for the given AV share vs. delays obtained for traffic comprising 100% of conventional vehicles.
 Obliczona jako iloraz strat czasu dla danego udziału AV w potoku ruchu w stosunku do potoku w 100% pojazdów konwencjonalnych

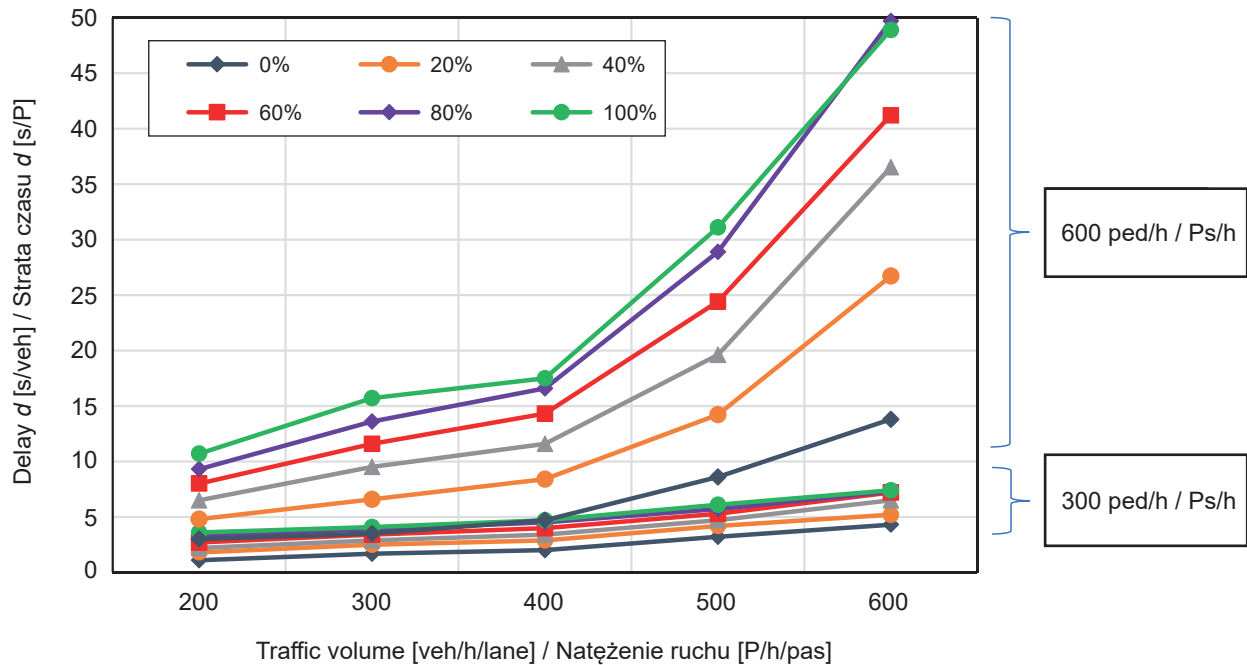


Fig. 3. The effect of the share of AVs in traffic on the values of vehicle delays on street segments with mid-block pedestrian crossing
 Rys. 3. Wpływ udziału AV na wartość strat czasu na odcinkach ulic z wydzielonym przejściem dla pieszych

Table 2. The effect of the share of AVs in traffic on the change in vehicle stopping rate on street segments with mid-block pedestrian crossing
 Tablica 2. Wpływ udziału AV na zmianę wartości wskaźnika zatrzymań na odcinkach ulic z wydzielonym przejściem dla pieszych

Share of AVs / Udział AV [%]		0	20	40	60	80	100	20	40	60	80	100
QP [ped/h] / [Ps/h]	Q [veh/h/lane] / [P/h/pas]	Stopping rate [-] Wskaźnik zatrzymań						Change*) [%] Zmiana procentowa*)				
300	200	0.04	0.11	0.15	0.21	0.28	0.32	275.0	375.0	525.0	700.0	800.0
	300	0.09	0.18	0.21	0.27	0.33	0.35	200.0	233.3	300.0	366.7	388.9
	400	0.10	0.19	0.23	0.29	0.34	0.39	190.0	230.0	290.0	340.0	390.0
	500	0.20	0.26	0.33	0.40	0.45	0.52	130.0	165.0	200.0	225.0	260.0
	600	0.26	0.33	0.46	0.54	0.61	0.63	126.9	176.9	207.7	234.6	242.3
600	200	0.20	0.33	0.46	0.55	0.65	0.76	165.0	230.0	275.0	325.0	380.0
	300	0.26	0.44	0.63	0.80	0.97	1.16	169.2	242.3	307.7	373.1	446.2
	400	0.35	0.58	0.81	1.03	1.24	1.41	165.7	231.4	294.3	354.3	402.9
	500	0.66	1.00	1.39	1.86	2.43	3.09	151.5	210.6	281.8	368.2	468.2
	600	1.09	1.97	2.78	3.51	4.97	5.77	180.7	255.0	322.0	456.0	529.4

*) Calculated as the ratio of stopping rate obtained for the given AV share vs. stopping rate obtained for traffic comprising 100% of conventional vehicles
 Obliczona jako iloraz wskaźnika zatrzymań danego udziału AV w potoku ruchu w stosunku do potoku w 100% pojazdów konwencjonalnych

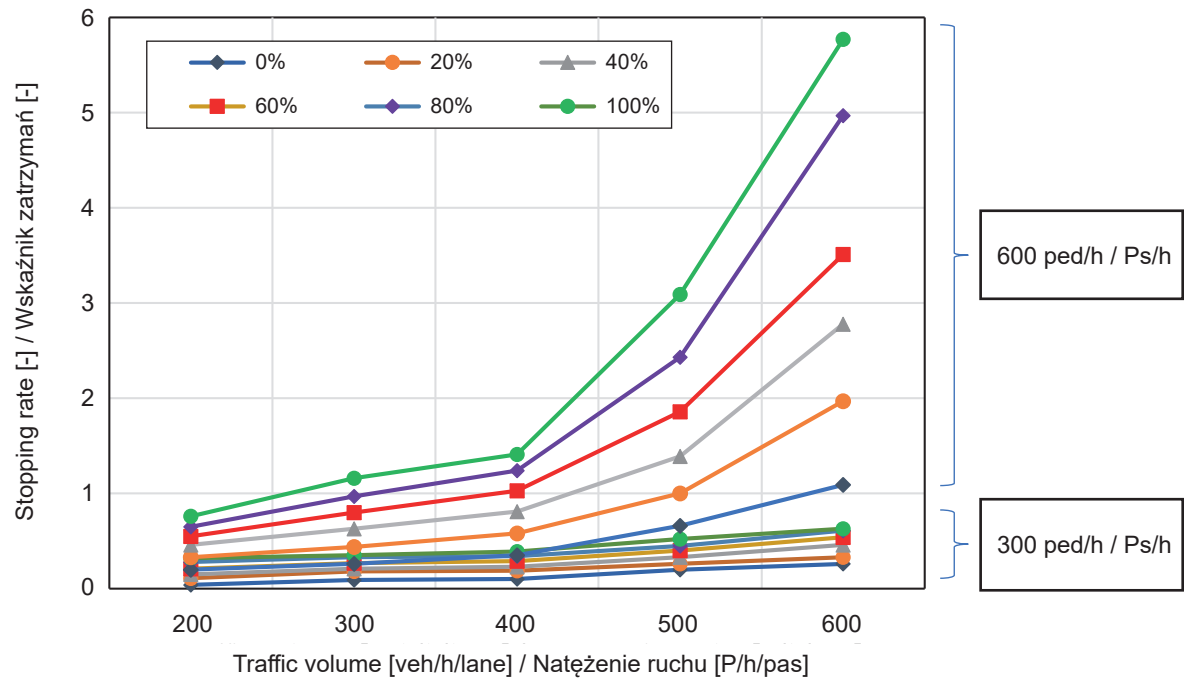


Fig. 4. The effect of the share of AVs in traffic on the values of vehicle stopping rate on street segments with mid-block pedestrian crossing
 Rys. 4. Wpływ udziału AV na wartość wskaźnika zatrzymań na odcinkach ulic z wydzielonym przejściem dla pieszych

Table 3. The effect of the share of AVs in traffic on the change in fuel consumption on street segments with mid-block pedestrian crossing
 Tablica 3. Wpływ udziału pojazdów AV na zmianę wartości zużycia paliwa na odcinkach ulic z wydzielonym przejściem dla pieszych

Share of AVs / Udział AV [%]		0	20	40	60	80	100	20	40	60	80	100
QP [ped/h] / [Ps/h]	Q [veh/h/lane] / [P/h/pas]	Fuel consumption [l/3h simul.] Zużycie paliwa [l/3h sym.]						Change* [%] Zmiana procentowa*)				
300	200	7.3	8.0	8.5	9.0	9.7	10.0	109.6	116.4	123.3	132.9	137.0
	300	11.6	12.9	13.4	14.3	15.1	15.5	111.2	115.5	123.3	130.2	133.6
	400	16.0	17.7	18.6	19.8	20.9	21.7	110.6	116.3	123.8	130.6	135.6
	500	22.5	24.4	26.0	27.6	29.0	30.4	108.4	115.6	122.7	128.9	135.1
	600	29.4	31.7	35.6	38.1	39.6	40.1	107.8	121.1	129.6	134.7	136.4
600	200	9.0	10.5	12.0	13.1	14.2	15.4	116.7	133.3	145.6	157.8	171.1
	300	14.3	17.7	21.1	23.8	26.5	29.5	123.8	147.6	166.4	185.3	206.3
	400	21.8	27.6	32.9	37.9	42.2	45.2	126.6	150.9	173.9	193.6	207.3
	500	34.7	45.1	56.0	67.7	81.5	95.0	130.0	161.4	195.1	234.9	273.8
	600	55.4	84.8	110.3	130.4	167.2	184.0	153.1	199.1	235.4	301.8	332.1

*) Calculated as the ratio of fuel consumption obtained for the given AV share vs. fuel consumption obtained for traffic comprising 100% of conventional vehicles
 Obliczony jako iloraz zużycia paliwa dla danego udziału AV w potoku ruchu w stosunku do potoku w 100% pojazdów konwencjonalnych

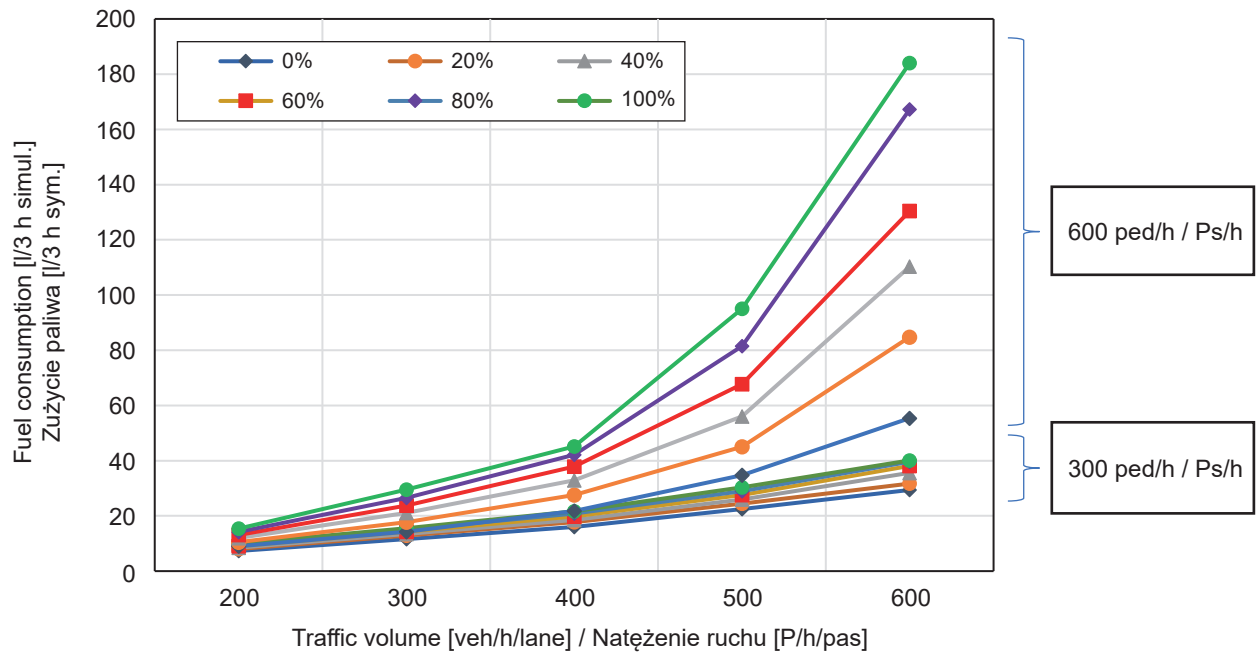


Fig. 5. The effect of the share of AVs in traffic on the values of fuel consumption on street segments with mid-block pedestrian crossing
 Rys. 5. Wpływ udziału AV na wartość zużycia paliwa na odcinkach ulic z wydzielonym przejściem dla pieszych

Jest to efekt blokowania przejścia przez pieszych (przy dużym natężeniu ruchu pieszych) i wynikającego z tego zmniejszenia liczby zatrzymań celem umożliwienia przejścia pieszym. Jak wskazują wyniki, nie można przesądzać, że w efekcie wdrożenia AV nastąpi poprawa warunków ruchu na odcinkach ulic z wydzielonymi przejściami dla pieszych.

Zwiększona liczba zatrzymań będzie również prowadzić do zwiększonej emisji szkodliwych składników spalin. Dlatego podobne wyniki można zaobserwować w wartościach zużycia paliwa (Rys. 5). Wzrost udziału AV skutkuje większym zużyciem paliwa. Dla mniejszego natężenia pieszych (300 Ps/h) wzrost jest mniejszy niż 40%, ale dla 600 Ps/h zużycie paliwa może być nawet 3-krotnie wyższe przy dużym natężeniu ruchu (600 P/h/pas) (Tabl. 3). W analizie zużycia paliwa wyniki zostały przedstawione jako łączne zużycie paliwa w litrach na analizowanym odcinku pomiarowym w okresie symulacji trwającym 3 godziny.

5. WNIOSKI

Studia literaturowe oraz badania zaprezentowane w artykule wskazują, że pojawienie się AV w ruchu drogowym niekoniecznie musi prowadzić do poprawy warunków ruchu i zmniejszenia zużycia paliwa (lub energii w przypadku pojazdów elektrycznych) na wszystkich odcinkach sieci drogowej. AV w sieci ulicznej mogą spowodować pogorszenie efektywności ruchu (będzie to wymagało szczegółowych analiz w kolejnych okresach, kiedy pojazdy te będą wdrażane w warunkach drogowych), zwłaszcza na odcinkach w sąsiedztwie wydzielonych przejść dla pieszych. Wynika to z ograniczonych możliwości rozpoznawania i klasyfikacji zachowań użytkowników dróg w interakcji AV z pieszymi. Aby zachować płynność ruchu i bezpieczeństwo, pojazdy te będą poruszać się z większymi stratami czasu, liczbą zatrzymań i zużyciem paliwa niż pojazdy konwencjonalne. Ponadto systemy automatyzujące jazdę mogą błędnie klasyfikować osoby poruszające się chodnikiem wzdłuż drogi jako osoby zamierzające skorzystać z przejścia dla pieszych, co może prowadzić do nieuzasadnionego manewru hamowania lub do zatrzymania pojazdu. Wynika to zarówno z ograniczenia prędkości AV w strefach przejść dla pieszych, jak i możliwego nagłego wejścia pieszego na przejście, które będzie wymuszało hamowanie, a nawet zatrzymanie pojazdów. Co więcej zakłada się, że człowiek będzie w stanie lepiej niż AV ocenić sytuację na drodze i zareagować w sposób optymalny, minimalizując wspomniany efekt. Należy zauważyć, że przy mniejszym natężeniu

Moreover, driving automation systems may incorrectly classify pedestrians walking along the sidewalk as ones willing to cross the roadway, which may lead to unnecessary braking or stopping. This problem is related to AV speed limits around pedestrian crossings and the possibility of a pedestrian suddenly entering the crossing, forcing the vehicles to break or come to a complete stopping. It is assumed that a human driver will better evaluate the situation and choose the optimum reaction, thus minimizing the aforementioned effect. It is noteworthy that at lower pedestrian traffic volumes (300 ped/h) the absolute values of delays may be acceptable for drivers (around 10 s/veh, even at 100% share of AVs). Introduction of AVs may cause problems in city-center traffic and in areas with high pedestrian traffic volume, if the traffic is not controlled with traffic lights. Traffic flow smoothness may be improved if road user interactions are considerably improved; this problem was the subject of [11, 12, 26]. A vehicle that moves smoothly will consume less energy, since during deceleration (and subsequent acceleration) a portion of kinetic energy is irreversibly lost, irrelevant of the propulsion type (internal combustion, hybrid or electric). This is due to the fact that brakes transform kinetic energy into heat, which then dissipates. When AVs actually appear on roads, traffic performance will probably improve on limited-access roads, which are designed for greater speeds.

Apart from the above factors affecting the results of microsimulations, legal changes pertaining to right of way at pedestrian crossings would be of considerable importance [29]; however, such changes should not be expected in near future, as there are no plans or ongoing efforts for their introduction. A change in the behavior of drivers and pedestrians towards unconditional yielding to pedestrians (including those approaching the crossing) by vehicles may make the results of assessment of conventional and autonomous vehicle traffic more similar.

Despite the fact that automation was successfully implemented in aviation and rail transport, the performed research indicates that introduction of road AVs may be hindered by technological, normative, ethical and social barriers. While the manufacturers and decision-makers are interested in popularizing AVs on private car market, it is the public transportation sector that will probably implement the technology first [30].

ruchu pieszego (300 Ps/h) wartości bezwzględne strat czasu mogą być akceptowalne dla kierowców (około 10 s/P nawet przy 100% AV). Problematyczna może być obecność AV w ruchu śródmiejskim oraz w obszarach o dużym natężeniu ruchu pieszego, w przypadku braku sterowania przy użyciu sygnalizacji świetlnej. Płynność ruchu można poprawić poprzez znaczną poprawę interakcji między użytkownikami, czemu służą badania [11, 12, 26]. Pojazd poruszający się płynnie będzie zużywał mniej energii, ponieważ w czasie hamowania (a następnie przyspieszania) część energii kinetycznej pojazdu jest bezpowrotnie tracona w przypadku każdego rodzaju napędu (spalinowego, hybrydowego i elektrycznego). Jest to spowodowane działaniem hamulców pojazdu, które zamieniają energię kinetyczną na ciepło rozpraszane przez otoczenie. W przypadku występowania AV w ruchu poprawa efektywności ruchu nastąpi prawdopodobnie na drogach o ograniczonej dostępności, przystosowanych do wyższych prędkości.

Oprócz wyżej wymienionych czynników wpływających na wyniki badań mikrosymulacyjnych duże znaczenie miałyby zmiany prawne w zakresie pierwszeństwa w obszarze przejść dla pieszych [29], których jednak nie należy się spodziewać w najbliższej przyszłości, ponieważ nie rozpoczęto żadnych prac związanych z ich wdrożeniem i zmiany takie nie są planowane. Zmiana zachowań kierujących i pieszych w kierunku bezwzględnego pierwszeństwa dla pieszych (w tym także pieszych zbliżających się do przejścia) sprawia, że wyniki oceny funkcjonowania ruchu pojazdów konwencjonalnych i autonomicznych mogą być do siebie zbliżone.

Mimo że w przypadku lotnictwa i pojazdów szynowych automatyzacja zakończyła się sukcesem, to przeprowadzone badania wskazują również na bariery technologiczne, normatywne, etyczne i społeczne, które mogą mieć negatywny wpływ na tempo wdrażania drogowych AV. Chociaż producenci/decydenci są zainteresowani upowszechnieniem AV na rynku samochodów prywatnych, prawdopodobnie to właśnie w sektorze drogowego transportu publicznego technologia ta będzie wykorzystywana w pierwszej kolejności [30].

INFORMACJE DODATKOWE

Artykuł powstał w ramach pracy własnej statutowej Instytutu Badawczego Dróg i Mostów, PWS/P nr 923 pt. „Ocena bezpieczeństwa ruchu drogowego w obszarze przejść dla pieszych na podstawie danych z lidar samochodowego stosowanego w pojazdach autonomicznych”.

ACKNOWLEDGEMENTS

The article was created as part of own statutory activity of the Road and Bridge Research Institute, PWS/P no. 923 “Evaluation of road traffic safety at pedestrian crossings based on data from car lidar used in autonomous vehicles”.

REFERENCES / BIBLIOGRAFIA

- [1] *Franklin K., Potcovaru A.M.*: Autonomous Vehicle Perception Sensor Data in Sustainable and Smart Urban Transport Systems. *Contemporary Readings in Law and Social Justice*, **13**, 1, 2021, 101-110, DOI: 10.22381/CRLSJ131202110
- [2] *Calvert S.C., Schakel W.J., Van Lint J.W.C.*: Will Automated Vehicles Negatively Impact Traffic Flow?, *Journal of Advanced Transportation*, **2017**, ID article: 3082781, DOI: 10.1155/2017/3082781
- [3] *Fagnant D.J., Kockelman K.*: Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **77**, 2015, 167-181, DOI: 10.1016/j.tra.2015.04.003
- [4] *Kamińska E.*: The possibility of using automated vehicles to provide support to people with disabilities in individual transport. *Gospodarka Materiałowa & Logistyka*, **2**, 2021, 14-20, DOI: 10.33226/1231-2037.2021.2.3
- [5] *Kamińska E.*: Perspektywy rozwoju modeli mobilności w aspekcie współdzielenia usług, MaaS oraz autonomizacji transportu drogowego. *Wydawnictwa Komunikacji i Łączności*, Warszawa, 2021
- [6] *Kozaczka N., Gaca S.*: Wpływ pojazdów zautomatyzowanych na ruch oraz projektowanie infrastruktury drogowej – próba oceny. *Przegląd Komunikacyjny*, **9**, 2019, 21-27
- [7] *Khondaker B., Kattan L.*: Variable Speed Limit: A Microscopic Analysis in a Connected Vehicle Environment. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **58**, 2015, 146-159, DOI: 10.1016/j.trc.2015.07.014
- [8] *Rios-Torres J., Malikopoulos A.A.*: Impact of Partial Penetrations of Connected and Automated Vehicles on Fuel Consumption and Traffic Flow. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, **3**, 4, 453-462, DOI: 10.1109/TIV.2018.2873899

- [9] *Friedrich B.*: The Effect of Autonomous Vehicles on Traffic, in: Maurer M., Gerdes J., Lenz B., Winner H. (Eds): *Autonomous Driving*. Springer, Berlin/Heidelberg, 2016, 317-334, DOI: 10.1007/978-3-662-48847-8_16
- [10] *Zhou M., Qu X., Jin S.*: On the impact of cooperative autonomous vehicles in improving freeway merging: a modified intelligent driver model-based approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **18**, 6, 2017, 1422–1428, DOI: 10.1109/TITS.2016.2606492
- [11] *Rasouli A., Tsotsos J.K.*: Autonomous Vehicles That Interact With Pedestrians: A Survey of Theory and Practice. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **21**, 3, 2020, 900-918, DOI: 10.1109/TITS.2019.2901817
- [12] *Zhu H., Iryo-Asano M., Alhajyaseen W.K.M., Nakamura H., Dias C.*: Interactions between autonomous vehicles and pedestrians at unsignalized mid-block crosswalks considering occlusions by opposing vehicles. *Accident Analysis & Prevention*, **163**, 2021, ID article: 106468, DOI: 10.1016/j.aap.2021.106468
- [13] *Sucha M.*: Road users strategies and communication: driver-pedestrian interaction. *Transport Research Arena 5th Conference: Transport Solutions from Research to Deployment*, Paris, 2014
- [14] *Camenzind J., Hurlimann F.W., Konfliktstelle K.B.*: Fußgängerstreifen. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, **24**, 1, 1978, 14-20
- [15] *Schweizer T., Thomas C., Regli P.*: Verhalten am Fussgängerstreifen. *Fussverkehr Schweiz*, Zurich, 2009
- [16] *Gaca D., Hogendorf A.*: Podstawowe zasady funkcjonowania oraz porównania przejść dla pieszych typu zebra w Polsce i w Niemczech. Część II. *Transport Miejski i Regionalny*, 3, 2007, 31-36
- [17] *Himanen V., Kulmala R.*: An Application of Logit Models in Analysing the Behaviour of Pedestrians and Car Drivers on Pedestrian Crossings. *Accident Analysis and Prevention*, **20**, 3, 1988, 187-197, DOI: 10.1016/0001-4575(88)90003-6
- [18] *Budzyński M., Gumińska L., Jeliński L., Kieć M.*: Pedestrian safety in road traffic - studies, recommendations and proposed improvements. *MATEC Web of Conferences*, **122**, 2017, ID article: 01002, DOI: 10.1051/mateconf/201712201002
- [19] *Fitzpatrick K., Turner S., Brewer M., Carlson P., Ullman B., Trout N., Park E.S., Whitacre J., Lalani N., Lord D.*: Improving Pedestrian Safety at Unsignalized Crossings. Contractor’s Final Report – Appendices B to O, Transportation Research Board, Washington, 2006
- [20] *Gaca S., Kieć M.*: Assessment of pedestrian risk at crossings with kinematic-probabilistic model. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1, 2015, 129-137, DOI: 10.3141/2514-14
- [21] *Lin P.S., Kourtellis A., Wang Z., Guo R.*: Understanding Interactions between Drivers and Pedestrian Features at Signalized Intersections. *Center for Urban Transportation Research*, Tampa, 2015
- [22] *Varhelyi A.*: Drivers’ Speed Behaviour at a Zebra Crossing: a Case Study. *Accident Analysis & Prevention*, **30**, 6, 1998, 731-743, DOI: 10.1016/S0001-4575(98)00026-8
- [23] *Szagala P., Brzezinski A., Kieć M., Budzynski M., Wachnicka J., Pazdan S.*: Pedestrian Safety at Mid-block Crossings on Dual Carriageway Roads in Polish Cities. *Sustainability*, **14**, 9, 2022, ID article: 5703, DOI: 10.3390/su14095703
- [24] *Budzynski M., Gobis A., Guminska L., Jelinski L., Kieć M., Tomczuk P.*: Assessment of the Influence of Road Infrastructure Parameters on the Behaviour of Drivers and Pedestrians in Pedestrian Crossing Areas. *Energies*, **14**, 12, 2021, ID article: 3559, DOI: 10.3390/en14123559
- [25] *Pratticò F.G., Lamberti F., Cannavò A., Morra L., Montuschi P.*: Comparing State-of-the-Art and Emerging Augmented Reality Interfaces for Autonomous Vehicle-to-Pedestrian Communication. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **70**, 2, 2021, 1157-1168, DOI: 10.1109/TVT.2021.3054312
- [26] *Schneemann F., Gohl I.*: Analyzing Driver-Pedestrian Interaction at Crosswalks: A Contribution to Autonomous Driving in Urban Environments. *2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Gothenburg, 2016, 38-43, DOI: 10.1109/IVS.2016.7535361
- [27] *Azam M., Hassan S.A., Che Puan O.*: Autonomous Vehicles in Mixed Traffic Conditions – A Bibliometric Analysis. *Sustainability*, **14**, 17, 2022, ID article: 10743, DOI: 10.3390/su141710743

- [28] *Bak R., Kieć M.*: Influence of midblock pedestrian crossings on urban street capacity. *Transportation Research Record*, **2316**, 1, 2012, 76-83, DOI: 10.3141/2316-09
- [29] *Cascetta E., Carteni A., Francesco L.*: Do autonomous vehicles drive like humans? A Turing approach and an application to SAE automation Level 2 cars. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **134**, 2022, 103499, DOI: 10.1016/j.trc.2021.103499
- [30] *Carteni A.*: The acceptability value of autonomous vehicles: A quantitative analysis of the willingness to pay for shared autonomous vehicles (SAVs) mobility services. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, **8**, 2020, ID article: 100224, DOI: 10.1016/j.trip.2020.100224