



NABIL HAZIM<sup>1)</sup>  
 SUBHI M. BAZLAMIT<sup>2)</sup>  
 ZAYDOUN ABU SALEM<sup>3)</sup>  
 OMAR ALGHAZAWI<sup>4)</sup>  
 ISSAM ODEH<sup>5)</sup>

## DETERMINATIONS OF CRITICAL GAP AND FOLLOW-UP TIME AT ROUNDABOUTS IN JORDAN

## WYZNACZANIE BEZPIECZNYCH ODLEGŁOŚCI POMIĘDZY POJAZDAMI I CZASÓW DOJAZDU NA RONDACH W JORDANII

**STRESZCZENIE.** Bezpieczna odległość pomiędzy pojazdami oraz czas dojazdu do ronda to dwa podstawowe parametry ruchu stosowane w projektowaniu oraz analizie eksploatacyjnej rond i skrzyżowań bez sygnalizacji świetlnej. Parametry te wykorzystuje się ponadto do oceny przepustowości i obsługi serwisowej ruchu na drogach podporządkowanych. W Jordanii, ronda stanowią powszechnie wykorzystywany element infrastruktury drogowej i dlatego istnieje potrzeba prowadzenia badań nad bezpieczną odległością pomiędzy pojazdami oraz czasem dojazdu pojazdu na rondo. Styl jazdy kierowców jordańskich można określić jako agresywny, co ma wpływ zwłaszcza na czas dojazdu do ronda. Ronda objęte badaniem były zlokalizowane w terenie górzystym, co umożliwiło zgromadzenie obserwacji na temat bezpiecznych odstępów pomiędzy pojazdami w przypadku nachyleń drogi dojazdowej rzędu od 6% do 8%. W pracy zarejestrowano i przeanalizowano wartości czasów pomiędzy kolejnymi pojazdami oraz czasy dojazdu do ronda. Zidentyfikowano również inne czynniki wpływające na wartości bezpiecznej odległości, czasu opóźnienia oraz czasu dojazdu, takie jak: geometria ronda, nachylenie dojazdu, kultura oraz zachowanie kierujących pojazdami. Artykuł wskazuje również na istnienie istotnej zależności pomiędzy nachyleniem drogi dojazdowej do ronda a obserwowanym odstępem między pojazdami. Zależność tę można uwzględnić podczas szacowania przepustowości oraz oznaczania poziomu swobody ruchu na rondach. Wyniki uzyskane w ramach badania powinny stanowić wsparcie dla projektantów dróg i inżynierów ruchu w zakresie projektowania oraz oceny sprawności funkcjonowania rond.

**SŁOWA KLUCZOWE:** czas dojazdu do ronda, czas opóźnienia, bezpieczna odległość pomiędzy pojazdami, nachylenie drogi dojazdowej, ronda.

**ABSTRACT.** Critical gap and follow-up times are two important fundamental traffic parameters used in the design and operational analysis of roundabouts and un-signalized intersections. Moreover, they are used to assess capacity and level of service at minor roads. In Jordan, roundabouts are used extensively, and therefore, there is a need to conduct studies on follow-up and critical gap time. The driver behaviour in Jordan can be described as aggressive in terms of their choice of follow-up headway at roundabouts. In this study, the roundabouts were located in mountainous terrain which allowed the collection of critical gap observations for approach slopes ranging from 6% up to 8%. The critical gap and follow-up times were recorded and analyzed. This research also identified other factors affecting critical gap, lag and follow-up times such as geometry of roundabout, slope of the approach, culture and behaviour of drivers. This research also proposes a significant relationship between approach slope at roundabouts and the observed gap. This relationship may be incorporated in the estimation of capacity and level of service determination at roundabouts. The results of this study should assist highway and traffic designers in the design and the performance evaluation of roundabouts.

DOI: 10.7409/rabdim.019.015

**KEYWORDS:** approach gradient, critical time gap, follow-up time, lag time, roundabouts.

<sup>1)</sup> Al-Ahliyya Amman University, Department of Civil Engineering, 19328 Amman, Jordan; n.hazim@amman.edu.jo

<sup>2)</sup> Al-Zaytoonah University of Jordan, Department of Civil and Infrastructure Engineering, Amman, Jordan; s.bazlamit@zuj.edu.jo (✉)

<sup>3)</sup> Applied Science Private University, Department of Civil Engineering, 21 Al Arab St., 11931 Amman, P.O. Box: 166, Jordan; z\_abusalem@asu.edu.jo

<sup>4)</sup> Al-Ahliyya Amman University, Department of Civil Engineering, 19328 Amman, Jordan; o.ghazawi@amman.edu.jo

<sup>5)</sup> Al-Zaytoonah University of Jordan, Department of Basic Sciences, Amman, Jordan; odehi.m@zuj.edu.jo

## 1. AKTUALNY STAN BADAŃ ZWIĄZANYCH Z TEMATYKĄ PRACY

Rondo jest definiowane jako skrzyżowanie drogowe o ruchu okrężnym jednokierunkowym wokół wyspy centralnej, zmierzającym do jednego ze zjazdów. W podręczniku „The Highway Capacity Manual (HCM)” [1] zdefiniowano rondo jako skrzyżowanie bez sygnalizacji świetlnej. W Jordani ronda wybudowano w szeregu kluczowych lokalizacji, na metropolitalnych obszarach największych miast. Lokalizacje te zazwyczaj charakteryzuje zatłoczenie dróg oraz nadmierne spowolnienie ruchu, zwłaszcza w godzinach szczytu. Niniejszy projekt badawczy w swoim zamierzeniu ma dostarczyć wyniki niezbędnych analiz oraz ocenę danych dotyczących odstępów czasowych między pojazdami i czasów opóźnień występujących w tych lokalizacjach podczas szczytowego natężenia ruchu.

Sprawność funkcjonowania skrzyżowań określa ich przepustowość oraz odpowiadający jej poziom obsługi ruchu pojazdów. Głównymi parametrami wykorzystanymi w niniejszej analizie są bezpieczna odległość pomiędzy pojazdami oraz czas dojazdu do ronda. Czas opóźnienia odnosi się do przedziału czasowego od przyjazdu pojazdu ustępującego pierwszeństwa do przejazdu kolejnego pojazdu w potoku nadrzędnym. Czas dojazdu do ronda oznacza czas pomiędzy wyjazdem pojazdu z drogi podporządkowanej a wyjazdem następnego pojazdu, w tym samym odstępie czasowym pomiędzy pojazdami, w warunkach występowania ciągłej kolejki pojazdów. Badania uwzględniające ww. parametry były prowadzone przez wielu autorów [2-12].

W pracy [13] bezpieczny odstęp pomiędzy pojazdami jest używany jako parametr w analizie przepustowości, którą wykonano przy wykorzystaniu metody logiki rozmytej. Celem badania jest przedstawienie wpływu danych terenowych na sprawność funkcjonowania skrzyżowań bez zastosowania sygnalizacji świetlnej. W pracy [14] przedstawiono natomiast wyniki badania akceptacji bezpiecznej odległości pomiędzy pojazdami przez kierowców na skrzyżowaniach ze znakiem „stop”, gdzie pojazdy nadjeżdżające drogą nadrzędną mają pierwszeństwo przed pojazdami nadjeżdżającymi drogą podporządkowaną.

Analiza porównawcza dotycząca oszacowania straty czasu wynikającej z obecności sygnalizacji lub znaków drogowych przy zastosowaniu metody podanej w publikacji „Malaysian Highway Capacity Manual (MHCM)” wykazała, że opracowany model teoretyczny nie był zgodny z faktycznymi opóźnieniami obserwowanymi w ruchu drogowym. Ustalenie to oznacza, że model wg MHCM nie nadawał się bezpośrednio

## 1. SYNOPSIS OF RELEVANT RESEARCH

A roundabout is defined as a road junction where traffic moves in one direction around a central island to reach one of its approaches. The Highway Capacity Manual (HCM) [1] defines the roundabout as an un-signalized intersection. In Jordan, roundabouts are utilized at a number of key locations through the metropolitan areas of major cities. These locations are normally characterized by congestion and excessive delays especially during peak periods. Therefore, this research project is intended to provide the necessary analysis and evaluations of gap and lag data at these locations during peak traffic periods.

The performance of intersections is determined by capacity and a corresponding level of service. Critical gap and follow-up times were used as major parameters in this analysis. Lag time refers to the time interval between the arrival of a yielding vehicle and the passage of the next priority stream vehicle while follow-up time indicates the time between the departure of one vehicle from the minor street and the departure of the next vehicle using the same gap under a condition of continuous queuing. Several researchers had carried out studies including these parameters [2-12].

The inclusion of the critical gap as a parameter in capacity analysis was performed using fuzzy logic method to represent the effect of field data on the operational performance of un-signalized intersections [13]. While the result of a study carried out to determine the drivers' gap acceptance at stop-controlled intersections where the major approach vehicles have priority over the minor road drivers [14].

A comparative analysis for estimation of the control delay using Malaysian Highway Capacity Manual (MHCM) showed that the theoretical model was not consistent with actual delays observed from sites. Such a finding implies that MHCM's model was not directly capable to the analysis of control delay at un-signalized intersections in Malaysia [15].

It should be noted here that critical gap and follow-up times are influenced by the geometry of the roundabout, approach gradient, and behaviour of drivers. In Jordan, the drivers normally will not come to a complete stop at the roundabouts and yield to circulating traffic. On the contrary, they would force their way in the roundabout and merge with circulating traffic. This behavior is interesting and it should impact the results of the observations at the various locations within the study area.

do przeprowadzenia analizy strat czasowych na skrzyżowaniach bez sygnalizacji świetlnej w Malezji [15].

Należy zauważyć, że na bezpieczną odległość pomiędzy pojazdami oraz czasu dojazdu do ronda mają wpływ takie czynniki jak: geometria ronda, nachylenie dojazdu oraz zachowania kierowców. W Jordani, kierowcy zazwyczaj nie zatrzymują pojazdu całkowicie i nie ustępują pierwszeństwa przejazdu pojazdom poruszającym się w ruchu okrężnym. Wręcz przeciwnie, wymuszają pierwszeństwo, włączając się w potok poruszających się po rondzie pojazdów. Jest to zachowanie, które z pewnością ma znaczący wpływ na wyniki obserwacji dokonanych w różnych miejscach obszaru objętego badaniami.

Niniejszy projekt badawczy należy uwzględnić wyżej opisane zachowania kierowców na rondach. Badania obejmowały także wpływ nachylenia dróg dojazdowych do rond na opóźnienie pojazdów znajdujących się w ruchu. Zidentyfikowano również inne czynniki, które mogą wpływać na wartość odstępu między pojazdami oraz na czas dojazdu. Wyniki porównano z ustaleniami wynikającymi z innych podobnych badań przeprowadzonych w celu zweryfikowania ich poprawności.

Obecna praktyka w zakresie projektowania rond nie uwzględnia parametrów takich jak bezpieczny odstęp pomiędzy pojazdami, opóźnienie czasowe i czas dojazdu do ronda. W opisanych badaniach wysiłki skoncentrowano na ustaleniu wartości tych parametrów, w celu dostarczenia projektantom dróg narzędzi do oceny sprawności funkcjonowania rond. Kilka metod szacowania bezpiecznych odległości i czasów opóźnień na skrzyżowaniach bez sygnalizacji świetlnej podano w bibliografii. W celu zbadania przepustowości oraz strat czasu na rondach podczas manewru włączania się do ruchu na zatłoczonych skrzyżowaniach bez sygnalizacji świetlnej opracowano model akceptowanego odstępu czasowego pomiędzy pojazdami. W badaniu wykorzystano model, który, inaczej niż przewidują to modele tradycyjne, zakłada ograniczone pierwszeństwo przejazdów pojazdów w potoku nadrzędnym. W modelach tradycyjnych z reguły zakłada się bezwzględne pierwszeństwo pojazdów w potoku nadrzędnym nad pojazdami potoku podporządkowanego [11].

Stwierdzono, że wartości bezpiecznych odstępów pomiędzy pojazdami na rondach jednopasmowych w Kalifornii mieszczą się w przedziale od 4,5 s do 5,3 s, przy średniej wynoszącej 4,9 s, podczas gdy na rondach wielopasmowych krytyczne odstępy czasowe wynosiły od 4,4 s do 5,1 s na pasie lewym i od 4,5 s do 5,3 s na pasie prawym. Średnie wartości bezpiecznego odstępu czasowego dla obu pasów, wynosiły odpowiednio 4,8 i 4,4 s. Wartości te mieszczą się w zakresie

This research project has carefully considered this behaviour of drivers at roundabouts. The research project also included an investigation of the effects of approach gradients at roundabouts on the critical lag. Moreover, the study will also identify other factors that may influence the critical gap and follow up time. Finally, comparisons to findings of similar studies will be conducted to validate the results of this research.

Critical gap, lag, and follow-up times at roundabouts are not included in the current practice of roundabout designers. Efforts were concentrated on this study to determine these values in order to assess the highway designers in the evaluation and the performance of roundabouts. Several methods for estimating critical gaps and lags at un-signalized intersections are cited in the literature. A gap acceptance model has been developed in attempt to study the capacities and delay at roundabouts for the merging maneuvers at congested un-signalized intersections. The study utilized a model based on limited priority of major stream vehicles unlike traditional models, which typically assume absolute priority of major stream vehicles over those of the minor stream [11].

The critical headway at the single-lane roundabouts in California was found to vary from 4.5 s to 5.3 s, with a mean of 4.9 s while at multilane roundabouts the critical headway ranged from 4.4 s to 5.1 s in the left lane and 4 s to 4.8 s in the right lane. The average critical headways for the two lanes were 4.8 s and 4.4 s respectively. These critical headway values were within the range of those reported in the NCHRP Project 3-65. Statistical analyses did not indicate significant difference between the critical headway values in California and other states [6].

The driving behaviour of drivers at priority intersection may impact the selection criteria of acceptable gap sizes. A driver may accept a gap that is shorter than a gap rejected by the same driver earlier. Most of the observed inconsistent behaviors can be explained by situation-specific factors, such as waiting time, variation in speed and type of major stream vehicles. Typically, the acceptable headway decreases as the number of rejected gaps increases [5].

Based on an empirical study; the lognormal distributions reasonably describe the gap-acceptance processes and are normally recommended for simulation purposes [16-18]. The value of critical gap  $t_c$  could be calculated as the sum of the minimum accepted gap  $t_o$  and half the follow-up time  $t_f$ . The value of critical gap varied between 4.54 s to 6.18 s and the value of follow-up time is 2 s [10]. In other

podanym w raporcie z badań NCHRP Project 3-65. Analizy statystyczne nie wykazały istotnych różnic pomiędzy wartościami bezpiecznych odstępów czasowych otrzymanymi dla rond w Kalifornii a wartościami otrzymanymi dla rond w innych stanach [6].

Zachowania kierujących na skrzyżowaniu z pierwszeństwem przejazdu mogą wpływać na wybór kryteriów w zakresie akceptowalnych wielkości odległości pomiędzy pojazdami. Dany kierowca może zaakceptować odstęp krótszy niż odstęp niewykorzystany przez niego wcześniej do włączenia się do ruchu. Większość z zaobserwowanych niekonsekwencji w zachowaniu można wyjaśnić czynnikami właściwymi dla konkretnej sytuacji, takimi jak czas oczekiwania w kolejce, różnice dotyczące prędkości oraz rodzaju pojazdów w potoku nadrzędnym. Z reguły, akceptowalny przedział czasu zmniejsza się w miarę wzrostu liczby niewykorzystanych wcześniej odstępów [5].

Na podstawie studium empirycznego można stwierdzić, że rozkłady logarytmicznie normalne odpowiednio opisują procesy akceptacji długości odstępu czasowego pomiędzy pojazdami i są zazwyczaj zalecane do wykonywania symulacji [16-18]. Wartość bezpiecznej odległości pomiędzy pojazdami w czasie  $t_c$  można obliczyć jako sumę minimalnego akceptowanego odstępu czasowego  $t_o$  oraz połowy czasu dojazdu  $t_f$ . Wartość bezpiecznej odległości w czasie mieści się w zakresie pomiędzy 4,54 s a 6,18 s, zaś wartość czasu dojazdu to 2 s [10]. W innych pracach [4] bezpieczny odstęp czasowy wynosił od 5,5 do 6,6 s, a czasy dojazdu od 2,6 do 4,0 sekund na miejskich obszarach metropolitalnych.

## 2. WYNIKI BADAŃ W TERENIE CZASU DOJAZDU DO RONDA

Badaniem objęto siedem rond zlokalizowanych w stolicy kraju - Ammanie. Parametry geometryczne oraz wymiary poszczególnych rond zostały udokumentowane przez Departament Gruntów i Geodezji. Informacje dotyczące rond objętych badaniem zawiera Tabl. 1. Podane wartości pochyłości dojazdu są zbyt wysokie dla właściwie zaprojektowanych rond. Wynikają one jednak z faktu, iż miasto położone jest w przeważającej części na terenie górzystym. Obserwacje terenowe były prowadzone jedynie na wyznaczonych dojazdach wymienionych w Tabl. 1.

Przeprowadzono obserwacje i pomiary terenowe przyczyniające się do ustalenia bezpiecznych odległości pomiędzy pojazdami. Metody zastosowane celem zgromadzenia danych dotyczących czasu dojazdu do ronda oraz bezpiecznych odległości obejmowały wideorejestrację ruchu na rondach, przy użyciu kamer zamontowanych na szczytach sąsiadujących

studia [4], the critical gap ranged between 5.5 to 6.6 seconds and follow-up times between 2.6 to 4.0 seconds in urban metropolitan areas.

## 2. COLLECTION OF FIELD FOLLOW-UP OBSERVATIONS

Seven roundabouts in Amman city were included in this study. The geometric properties and dimensions of these roundabouts were documented with the help of the Department of Lands and Survey. Table 1 lists relevant information for the roundabouts in this study. These approach slopes are excessive for properly designed roundabouts. However, they are the result of prevailing mountains terrain in the city. The field observations were carried out only on the designated approaches in Table 1.

Table 1. Summary of the roundabout parameters  
Tablica 1. Zestawienie parametrów dotyczących rond

Roundabout No. Nr ronda	Island diameter Średnica wysepki [m]	Number of circulating lanes Liczba pasów ruchu ronda	Entrywidth Szerokość wjazdu [m]	Approach (direction) slope Pochylenie (kierunek) dojazdu
1	17	2	7	(NB) -8%
2	48	2	10.5	(EB) -2%
3	68	3	10.5	(WB) 2%
4	28	2	10.5	(EB) -3% (SB) -1%
5	39	2	10.5	(NB) 1%
6	68	3	10.5	(EB) 0%
7	120	3	10.5	(SB) 6%

Field observations and measurements were conducted to determine the critical gap, lag and follow-up times. The technique used in gathering follow-up time and critical gap involved videotaping at the roundabouts within this study using mounted cameras on tops of adjacent buildings. Gap observations were extracted later in the lab from the recorded videos. In most cases, videos were recorded during weekday midday peak periods between 10 am to 6 pm. The recorded observations of gaps and follow-up times are consistent with the terminology adopted in NCHRP 3-65 project. Selected approaches at each roundabout were included in this research depending on the ability to collect the required observations with reasonable accuracy.

z nimi budynków. Następnie, z zapisów wideo w laboratorium wyodrębniono dane dotyczące odległości pomiędzy pojazdami. W większości przypadków wideorejestracje były prowadzone w ciągu dnia pomiędzy godzinami 10.00 a 18.00, w okresach szczytowego natężenia ruchu. Zarejestrowane obserwacje odstępów czasowych oraz czasów dojazdu są zgodne z terminologią przyjętą w projekcie badawczym NCHRP 3-65. Badaniem objęto wybrane dojazdy do każdego z rond w zależności od tego, czy wymagane obserwacje mogły być dla nich wykonane z odpowiednią dokładnością.

Czas dojazdu do ronda liczony od chwili wystąpienia odstepu aż do czasu przejazdu przez znak „stop” przez pierwszy pojazd oznaczono są jako  $t_{x0}$ . Różnicę pomiędzy czasem przejazdu przez znak „stop” pierwszego pojazdu a przekroczeniem linii „stop” przez drugi pojazd oznaczono jako  $t_{x1}$ . Różnicę pomiędzy czasem przekroczenia linii „stop” przez drugi pojazd a czasem przekroczenia tej linii przez trzeci pojazd oznaczono jako  $t_{x2}$ . Różnicę między trzecim a czwartym oraz czwartym i piątym pojazdem oznaczono według tego samego schematu. Czasy dojazdu dla wszystkich lokalizacji zarejestrowano oraz przeanalizowano korzystając z odpowiednich procedur.

### 3. ANALIZA I WYNIKI

Wyniki obserwacji dotyczące czasów dojazdu dla  $t_{x0}$ ,  $t_{x1}$ ,  $t_{x2}$ ,  $t_{x3}$  i  $t_{x4}$  zebrano dla wszystkich lokalizacji w obszarze objętym badaniami. Tabl. 2 przedstawia zestawienie wyników badania, natomiast Tabl. 3 zawiera podsumowanie porównania uzyskanych wyników z wynikami innych istotnych badań. Różnice pomiędzy czasami dojazdu uzyskanymi w ramach niniejszego badania a wynikami otrzymanymi w ramach innych badań mogą wynikać z różnic w zachowaniu kierujących pojazdami. W Jordanii kierowcy mają skłonność do bardziej agresywnej jazdy na dojazdach do rond. Fakt, że wartość  $t_{x0}$  jest niska można wytłumaczyć agresywną jazdą kierujących na dojeździe do ronda w godzinach szczytu. Nie doprowadzają oni do całkowitego zatrzymania pojazdu lecz raczej ustępują pierwszeństwa stosując manewr podczas, którego jedynie mocno zwalniają. Kierowcy chętnie ryzykują wykorzystanie krótszych odstępów czasowych między pojazdami do wjazdu na rondo, z uwagi na powolny ruch okrężny, który zachęca kierujących nadjeżdżającymi pojazdami do włączenia się do niego.

Zdarzało się, że ruch pojazdów na wjeździe na rondo był zatrzymywany przez policjantów kierujących ruchem w celu rozładowania zatoru. W tych warunkach badacze zmuszeni byli odrzucić niektóre wyniki obserwacji dotyczące odległości pomiędzy pojazdami i czasów dojazdu, ze względu na fakt, że w dużym stopniu zostały one zmodyfikowane

The follow-up time between the occurrence of gap and time of crossing the stop sign from first vehicle is denoted as  $t_{x0}$ . The difference between the time of first vehicle crossing the stop sign and the second vehicle crossing the stop line is denoted by  $t_{x1}$ . The difference between the time of second vehicle crossing the stop sign and the third vehicle crossing the stop sign is denoted by  $t_{x2}$ . The same concept is followed for the third and fourth, fourth and fifth vehicles. The follow-up times for all locations were recorded and analyzed using proper procedures.

### 3. ANALYSIS AND RESULTS

The follow-up observations for  $t_{x0}$ ,  $t_{x1}$ ,  $t_{x2}$ ,  $t_{x3}$  and  $t_{x4}$  were collected for all applicable locations in the study area. Table 2 represents a summary of the results in this study while Table 3 summarizes the comparison of results to other relevant studies. The variation in follow-up times between the findings of this research and those of other studies may be the results of variations in the behaviour of drivers. In Jordan, drivers tend to be more aggressive at the approaches to roundabouts. The fact that  $t_{x0}$  is low may be justified by the aggressive behaviour of drivers to get into the roundabout during the peak periods. Vehicles do not assume a full stop but they rather yield using a rolling stop maneuver. Drivers are willing to risk shorter gaps to move into the roundabouts since the circulating traffic is slow encouraging entering vehicles to merge into circulating traffic.

In some instances, entering traffic was stopped by police officers who were directing traffic to alleviate congestion which lead the researchers to dismiss some observations on gap and follow up times since they were largely impacted by an external factor and not dictated by the nature of moving traffic stream. That explains the differences in the number of observations of follow-up times.

Table 2. Follow-up times [s]  
Tablica 2. Czasy dojazdu [s]

	Follow-up times / Czasy dojazdu [s]				
	$t_{x0}$	$t_{x1}$	$t_{x2}$	$t_{x3}$	$t_{x4}$
No. of observations [-] Liczba obserwacji	139	137	160	174	157
Mean value [s] Wartość średnia	1.06	2.04	1.84	1.86	1.85

przez czynnik zewnętrzny i nie wynikały z charakteru przemieszczającego się potoku ruchu. Wyjaśnia to różnice w liczbie wyników obserwacji czasów dojazdu.

#### 4. WYNIKI ANALIZY BEZPIECZNYCH ODLEGŁOŚCI POMIĘDZY POJAZDAMI

Wartości bezpiecznej odległości pomiędzy pojazdami nie można określić bezpośrednio na podstawie obserwacji przeprowadzonych w terenie. Wartość tę wyznacza się graficznie na podstawie krzywej rozkładu wartości wykorzystanych i odrzuconych odległości pomiędzy pojazdami w czasie dojazdu na rondo. Wykresy zaakceptowanych i odrzuconych wartości odległości pomiędzy pojazdami opracowano dla wszystkich lokalizacji objętych badaniem, a wynikające z nich bezpieczne odległości w czasie zestawiono w Tabl. 4 jako funkcję pochylenia drogi dojazdowej.

Table 4. Summary of critical time gap and approach slope  
Tablica 4. Zestawienie wartości bezpiecznych odstępów pomiędzy pojazdami i pochylenia dróg dojazdowych

Slope / Pochylenie [%]	Critical time gap [s] Bezpieczny odstęp czasu między pojazdami	Cumulative number of gaps (accepted=rejected) [-] Zbiorcza liczba odstępów czasowych (przyjętych=odrzuconych)
-6	3.4	254
-3	3.8	392
-2	3.8	388
-1	4.1	410
0	4.3	420
1	4.4	470
2	4.5	255
3	4.5	252
8	6.5	234

Na Rys. 1 przedstawiono krzywą regresji wykładniczej obrazującą rozkład bezpiecznych odstępów czasowych między pojazdami (w sekundach) jako funkcję pochylenia drogi dojazdowej do ronda. Krzywą tą opisuje następująca zależność wzoru:

$$\text{Time gap / Odstęp czasowy [s]} = 4.2568 \cdot e^{0.0441 \cdot \text{Approach Slope / Nachylenie dojazdu [\%]}}, R^2 = 0.9439. \quad (1)$$

Wzór ten można uwzględnić podczas szacowania przepustowości oraz oznaczania poziomu obsługi ruchu pojazdów na rondach. Zależność ta obejmuje szeroki zakres wartości pochylenia drogi dojazdowej mieszczących się w zakresie od -6% do 8%, które są typowe dla terenu w lokalizacjach objętych badaniem. Ponadto, bezpieczne odległości pomiędzy pojazdami uzyskane z tej zależności są porównywalne z wartościami cytowanymi w literaturze, co przedstawiono w Tabl. 5.

Table 3. Comparison results of follow-up times  
Tablica 3. Wyniki porównania czasów dojazdu

Resource / Źródło	Follow-up time / Czas dojazdu [s]
HCM [1]	2.6 - 3.1
Germany / Niemcy [3]	3.2
Portugal / Portugalia [3]	2.1 - 2.3
Current Research / Bieżące badanie	< 2

#### 4. RESULTS OF CRITICAL TIME GAP ANALYSIS

The critical gap cannot be determined directly from field observations. It is determined graphically from rejected and accepted gap distribution curves. The plots of accepted and rejected gap sizes were prepared for all study locations and the resulting critical time gaps are summarized in Table 4 as a function of approach gradient.

In Fig. 1 shown an exponential regression equation relating critical time gap in seconds and the approach slope in percent which was obtained as follows:

This relationship may be incorporated in the estimation of capacity and level of service determination at roundabouts. This relationship covers a wide range of approach slopes ranging -6% to 8% which are typical of the hilly terrain prevalent in the study locations. Furthermore, the values of the critical time gap obtained from this relationship compare very well with values cited in literature as shown in Table 5.

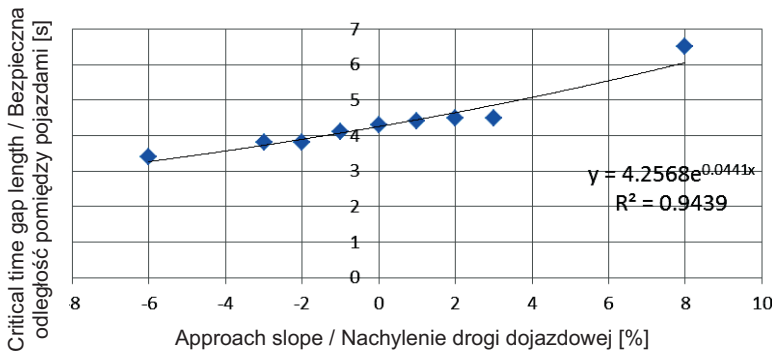


Fig. 1. The relationship between approach slope and critical time gap

Rys. 1. Zależność między nachyleniem drogi dojazdowej i bezpiecznej odległości czasowej pomiędzy pojazdami

## 5. WNIOSKI

Na podstawie badań stwierdzono istnienie zależności pomiędzy bezpiecznym odstępem (odległością czasową) pomiędzy pojazdami a nachyleniem dojazdu do ronda. Zależność tę można uwzględnić podczas szacowania przepustowości oraz przy projektowaniu obsługi ruchu pojazdów na rondach. Ponadto, może być ona wykorzystywana w symulacjach ruchu na rondach. Wyniki niniejszego badania dotyczą głównie agresywnego stylu jazdy kierujących, obserwowanego na rondach zlokalizowanych na terenie stolicy Jordanii – Ammanie.

## BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Highway Capacity Manual. TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2000
- [2] Akçelik R.: A review of gap-acceptance capacity models. The 29<sup>th</sup> Conference of Australian Institutes of Transport Research (CAITR 2007), University of South Australia, Adelaide, Australia. 5-7 December 2007
- [3] Vasconcelos A.L.P., Seco Á.J.M., Silva A.M.C.B.: Comparison of procedures to estimate critical headways at roundabouts. *Promet-Traffic & Transportation*, **25**, 1, 2013, 43-53, DOI: 0.7307/ptt.v25i1.1246
- [4] Weinert A.: Estimation of critical gaps and follow-up times at rural unsignalized intersections in Germany. Fourth International Symposium on Highway Capacity, June 2000, Maui, Hawaii, Transportation Research Board, E-C018, 2000, 409-421
- [5] Macioszek E.: The movement model for small roundabouts with minor roads capacity estimating. *Transport Problems*, **2**, 1, 2007, 87-94

Table 5. Comparison results to other researches  
Tablica 5. Porównanie wyników z innymi badaniami

Resource Źródło	Critical time gap [s] Bezpieczna odległość pomiędzy pojazdami
HCM [1]	4.1 - 4.6
Germany [3] Niemcy	4.4
Spain [3] Hiszpania	3.3 - 3.5
Portugal [3] Portugalia	3.2 - 3.7
Current research Badania bieżące	$4.2568 \cdot e^{0.00441 \cdot \text{Approach Slope / Nachylenie dojazdu [\%]}}$

## 5. CONCLUSIONS

The investigation produced a relationship between critical time gap and approach slope. The relationship can be incorporated in the capacity and level of service determination in the design of urban roundabouts. In addition, it can also be used in simulation of traffic at roundabouts. The results of this investigation are relevant to the predominant aggressive driver behaviour observed at roundabouts located in the Jordanian capital city – Amman.

- [6] Xu Feng, Tian Zong Z.: Driver behavior and gap-acceptance characteristics at roundabouts in California. *Transportation Research Record*, **2071**, 1, 2008, 117-124
- [7] Flannery A., Datta T.: Operational performance measures of American roundabouts. *Transportation Research Record*, **1572**, 1, 1997, 68-75
- [8] Hazim N.: Simulation of Traffic Flow at Roundabouts. Ph. D Thesis, Polytechnic Institute of Wrocław, Department of Civil Engineering, 1992, Wrocław, Poland.
- [9] Wu N.: A universal procedure for capacity determination at unsignalized (priority-controlled) intersections. *Transportation Research Part B: Methodological*, **35**, 6, 2001, 593-623
- [10] Tanyel S.A.: Capacity calculation method for roundabouts in Turkey (Doctoral dissertation. Ph.D. Thesis, Technical University of Istanbul, Institute of Science and Technology, Istanbul, Turkey, 2001
- [11] Troutbeck R.J.: Capacity and design of traffic circles in Australia. *Transportation Research Record*, **1398**, 1993, 68-74

- [12] WSDOT Design Manual M 22.01.10, Chapter 1320 Roundabouts, 2013, 1320-1 - 1320-28
- [13] *Saplioglu M., Karaşahin M.*: Predicting Critical Gap Using FuzzyLogic Method at Unsignalized Urban Intersection. The 3<sup>rd</sup> World Conference on Information Technology, (WCIT-2012), AWERprocedia Information Technology and Computer Science, 3, 2013, 1556-1564
- [14] *Sahraei M.A., Puan O.C.*: Determination of gap acceptance at priority intersections. The Proceedings of 8<sup>th</sup> SEATUC Symposium, Chapter OS08: Transportation Engineering, 4, March 2014, 9-12
- [15] *Sahraei M.A., Puan O.*: Traffic Delay Estimation Using Artificial Neural Network (ANN) at Unsignalized Intersections. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Civil, Structural and Transportation Engineering (ICCSTE'18), 10-12.06.2018, Niagara Falls, Canada, Paper 106, 2018, 1-11, DOI: 10.11159/iccste18.106
- [16] *Hazim N., Wolek C.*: Vehicle Speed Distribution on the Street Horizontal Curves. *Drogownictwo*, **XLVIII**, 7, 1993, 167-168
- [17] *Hazim N.*: Simulation of left-turning movement at signalized intersections. *Damascus University Journal for Studies and Scientific Research - Engineering Sciences Series*, **17**, 1, 2001, 54-70
- [18] *Hazim N., Jannoud A.*: Simulation of traffic flow at unsignalized intersections. *Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research - Engineering Sciences Series*, **28**, 2, 2006, 28-49