

Stanisław GONDEK

PRĘDKOŚĆ AUTOBUSÓW NA SKRZYŻOWANIACH Z SYGNALIZACJĄ

Na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną podstawowym parametrem decydującym o bezpieczeństwie są prawidłowo obliczone czasy międzyzielone. Dla pojazdów komunikacji zbiorowej korzystających z wydzielonych pasów/torowisk przepisy podają odpowiednie wartości prędkości ewakuacji i dojazdu oraz przyspieszenia. W celu sprawdzenia czy te parametry podane dla autobusów odpowiadają wartościom rzeczywistym przeprowadzono pilotażowe badania empiryczne prędkości przejazdu autobusów na kilku wybranych skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną w Krakowie. W referacie zostały zaprezentowane wyniki uzyskane z pomiarów empirycznych z uwzględnieniem autobusów przejeżdżających skrzyżowanie z biegu i z zatrzymania. Pokazany został również wpływ wybranych czynników na te prędkości: długość przejazdu, typ pasa ruchu, lokalizacja przystanku, występowanie torowiska tramwajowego i typ autobusu. Rzeczywista prędkość ewakuacji (~9.2 m/s) jest niższa od prędkości zalecanej w przepisach (10 m/s). Również rzeczywiste przyspieszenie autobusu (1.4 m/s²) jest prawie 30 % niższe niż wartość zalecana przepisami (2.0 m/s²).

WSTĘP

Sieć ulic w dużych miastach jest coraz bardziej przeciążona, szczególnie w okresach szczytowych dnia roboczego oraz w okresach wyjazdów i powrotów weekendowych. Wynika to z jednej strony z braku możliwości rozbudowy sieci ulicznej, głównie w obszarach centrum, a z drugiej ze stale wzrastającego wskaźnika motoryzacji oraz zwiększającą się ruchliwością mieszkańców realizujących coraz więcej podróży związanych z zakupami, kulturą i rekreacją. W związku z tym warunki podróżowania samochodem osobowym po mieście stają się coraz mniej akceptowalne przez kierowców. Wydaje się, że jedynym sposobem odciążenia sieci ulicznej jest szybki rozwój komunikacji zbiorowej (metro, komunikacja autobusowa i tramwajowa) oraz sieci dróg i ścieżek rowerowych przy jednoczesnej zmianie zachowań komunikacyjnych mieszkańców rezygnujących z podróży samochodami osobowymi i wybierających podróże pojazdami komunikacji zbiorowej, rowerami lub pieszo. Miasto Kraków realizuje budowę sieci tramwaju szybkiego, która ma stanowić szkielet układu szynowego uzupełnioną o komunikację autobusową obsługującą głównie obszary miasta, do których nie dociera tramwaj. Dodatkowo stopniowo rozwija Szybka Kolej Aglomeracyjną (SKA), która wykorzystuje istniejący układ torowy w mieście i województwie do realizacji dłuższych podróży z gmin podkrakowskich.

W czasie ostatniej zimy doszedł jeszcze jeden problem dotychczas nieuwzględniany w analizach komunikacyjnych – wpływ transportu na smog, który ma niekorzystny wpływ na samopoczucie i zdrowie mieszkańców miast. W Krakowie jednym z środków redukcji smogu jest wprowadzanie darmowej komunikacji zbiorowej dla posiadaczy samochodów przez całą dobę, jeżeli poprzedniego dnia dopuszczalne normy zanieczyszczeń zostały przekroczone ponad trzykrotnie. Tylko w styczniu i lutym bieżącego roku takich dni było kilkanaście. Warunkiem darmowego przejazdu jest posiadanie przy sobie dowodu rejestracyjnego samochodu. Darmowa komunikacja dotyczy tyłu osób na ile zarejestrowany jest samochód. Dotychczas nie podano informacji ile mieszkańców zostawiło samochód na parkingu i odbyło podróż komunikacją zbiorową.

Krytycznymi elementami sieci ulicznej są skrzyżowania, na których następuje przecinanie, wyłączanie i włączanie się potoków ruchu z różnych kierunków. Na najbardziej obciążonych ruchowo skrzy-

żowaniach zainstalowana jest sygnalizacja świetlna, która ma za zadanie wyeliminować część kolizji poprzez segregację w czasie obsługi kolizyjnych potoków ruchu oraz podnieść przepustowość relacji podporządkowanych. Sygnalizacja świetlna ma również zapewnić bezpieczne opuszczenie tarczy skrzyżowania pojazdom wjeżdżającym na skrzyżowanie na sygnale żółtym oraz pieszym/rowerzystom wchodzącym/wjeżdżającym w czasie zielonego sygnału migającego. Tak więc przy projektowaniu sygnalizacji świetlnej należy zwrócić szczególną uwagę na prawidłowe obliczenie czasów międzyzielonych, które zapewniają bezpieczeństwo wszystkim użytkownikom ruchu przy zmianie faz sygnalizacyjnych [1, 2]. Dotyczy to również autobusów korzystających z wydzielonych pasów ruchu przeznaczonych dla pojazdów komunikacji zbiorowej. Do obliczenia czasów międzyzielonych niezbędna jest znajomość prędkości ewakuacji i dojazdu oraz przyspieszenia [3, 4], co oznacza, że są one najważniejszymi parametrami przy projektowaniu programów sygnalizacyjnych. Przy projektowaniu skrzyżowań warto dążyć do minimalizacji punktów kolizji, poprzez odpowiednie projektowanie geometryczne, chociażby dodatkowych pasów przeznaczonych dla komunikacji zbiorowej. Nie należy też projektować linii zatrzymań zbyt oddalonych od tarczy skrzyżowania albowiem wydłużenie dróg ewakuacji i dojazdu powoduje wzrost wartości czasów międzyzielonych co skutkuje obniżeniem przepustowości skrzyżowania oraz prowadzi do utrwalaenia złych nawyków kierowców, którzy przejeżdżają linię zatrzymań nie tylko na sygnale żółtym ale również na sygnale czerwonym.

Ostatnie prace autora obejmowały badania czasów przejazdu tramwajów [5] oraz rowerzystów [6, 7]. Kontynuacją tych analiz są przedstawione w referacie wyniki badań empirycznych prędkości jazdy autobusów na wybranych skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną zlokalizowanych w Krakowie. Z uwagi na niewielkie natężenia autobusów wykonanie pomiarów prędkości ewakuacji (wjazd autobusu na skrzyżowanie przy migającej kresce pionowej) i dojazdu (wjazd autobusu na początku sygnału zezwalającego na wjazd w postaci kreski pionowej) wymagałoby wielogodzinnych pomiarów dla każdego poligonu bez pewności, że uzyska się wymagane liczebności prób. Dlatego też zdecydowano się na pomiar czasów przejazdu autobusów w czasie sygnału zezwalającego (pionowa kreska na sygnalizatorze) zarówno tych, które przejeżdżały „z biegu” jak i tych „z zatrzymania”. W przypadku przejazdu autobusu „z biegu” założono, że kwantyl v_{15} reprezentuje prędkość ewakuacji a kwantyl v_{85}

reprezentuje prędkość dojazdu. Dla przejazdu autobusów „z zatrzymaniami” obliczono przyspieszenie a oraz prędkość przejazdu v_t od linii zatrzymań do punktu kolizji przy zerowej prędkości początkowej. Wykonano również analizy wpływu wybranych czynników na wartości prędkości i przyspieszenia. Do takich czynników zaliczono: długość drogi przejazdu autobusu, istnienie/brak pasa dla autobusów (tzw. „bus-pasa”), torowisko tramwajowe zlokalizowane poprzecznie do kierunku jazdy autobusu, sygnał świetlny przy wjeździe na skrzyżowanie, lokalizację przystanków autobusowych za lub przed skrzyżowaniem, odległość przystanku autobusowego od skrzyżowania i tabor autobusowy.

1. KOMUNIKACJA AUTOBUSOWA

1.1. Autobusy w Krakowie [8]

System autobusowej komunikacji miejskiej w Krakowie jest obsługiwany przez Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne (MPK) oraz grupę Mobilis. Obsługiwanych jest łącznie 160 linii autobusowych: 73 linii miejskich, 65 aglomeracyjnych, 15 nocnych i 7 przyspieszonych (stan na koniec roku 2016).

Pierwsza linia autobusowa w Krakowie uruchomiona została w 1927 roku. Była to linia o numerze „1” i kursowała na odcinku Barbakan – Prądnik Czerwony. Od początku zarówno autobusy, jak również tramwaje malowane były na kolor biało-niebieski, z wyjątkiem lat okresu II Wojny Światowej aż do 13 lat po jej zakończeniu – w okresie tym (lata 1939 ÷ 1958) autobusy były malowane na kolory beżowy i czerwony. W roku 1958 ponownie rozpoczęto i regularnie malowano tabor na kolor biało-niebieski, aż do czasów współczesnych.

W Krakowie funkcjonują obecnie cztery zajezdnie autobusowe – zlokalizowane w Bieńczycach, Płaszowie i Woli Duchackiej (MPK) oraz Na Załączu (grupa Mobilis).

Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne S.A. w Krakowie jest w trakcie realizacji trzech dużych kontraktów – jednym z nich jest zakupienie nowoczesnych autobusów elektrycznych IV generacji – 17 autobusów elektrycznych dwunastometrowych oraz trzech autobusów osiemnastometrowych. Całość kontraktu ma wartość przekraczającą 42 mln zł. Drugim z kontraktów jest zakup 15 autobusów krótkich firmy Autosan. Natomiast trzeci – największy kontrakt to zakup 77 autobusów przegubowych – Solaris Urbino 18 IV generacji – kontrakt w formie leasingu na wartość ponad 120 mln zł.

MPK przykłada dużą wagę do rozwoju floty zasilanej energią elektryczną. W ostatnich latach przetestowano zostało wiele autobusów różnych firm – zarówno polskich, jak i zagranicznych. W najbliższym czasie planowana jest budowa pięciu punktów zasilających autobusy elektryczne, wraz ze stanowiskami do ładowania pantografowego.

Pomiarami zostały objęte takie autobusy, jak Solaris Urbino 18 (na 174 pasażerów, w tym 41 miejsc siedzących – fot. 1a) wraz z nowoczesną wersją hybrydową – Solaris Urbino 18 Hybrid (na 125 pasażerów, w tym 45 miejsc siedzących – fot. 1b), Mercedes Citaro (na 135 pasażerów, w tym 34 miejsc siedzących – fot. 1c), Mercedes Conecto (na 178 pasażerów, w tym 37 miejsc siedzących – fot. 1d), Jelcz M181 MB (na 180 pasażerów, w tym 44 miejsc siedzących – fot. 1e) – autobusy przegubowe osiemnastometrowe oraz Solaris Urbino 12 (na 102 pasażerów, w tym 29 miejsc siedzących – fot. 2a) i Mercedes Citaro Solo (na 95 pasażerów, w tym 25 miejsc siedzących – fot. 2b) – autobusy tradycyjne, dwunastometrowe. Podane wyżej autobusy stanowiły tabor występujący w przeważającej większości na poligonach badawczych (z wyjątkiem modeli Solaris Urbino 18 Hybrid oraz Mercedes Citaro Solo).

a. autobus Solaris Urbino 18



b. autobus Solaris Urbino 18 Hybrid



c. autobus Mercedes Citaro



d. autobus Mercedes Conecto



e. autobus Jelcz M181 MB



Fot. 1. Zdjęcia osiemnastometrowych autobusów przegubowych przejeżdżających przez wybrane poligony badawcze

a. autobus Solaris Urbino 12



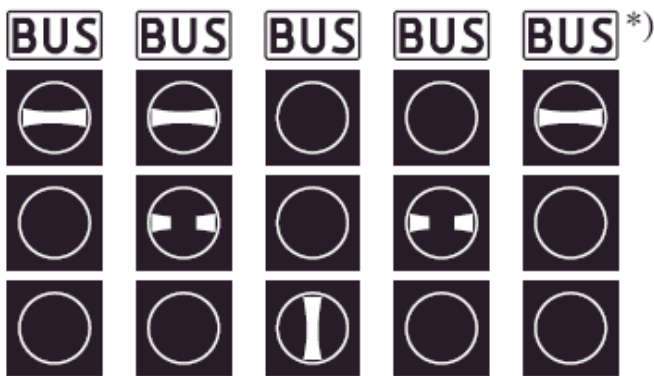
b. autobus Mercedes Citaro Solo



Fot. 2. Zdjęcia dwunastometrowych autobusów tradycyjnych przejeżdżających przez wybrane poligony badawcze

1.2. Autobusy na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną [1]

Sygnalizacja dla kierujących autobusami jest to sygnalizacja przeznaczona dla pojazdów samochodowych komunikacji publicznej poruszających się po wydzielonych dla nich pasach ruchu i zlokalizowana w miejscach przecinania się strumieni ruchu na tych pasach z innymi, dowolnymi strumieniami kolizyjnymi. Jeżeli miejsce kolizji znajduje się w obrębie skrzyżowania, sygnalizacja dla kierujących autobusami stanowi część sygnalizacji ogólnej na skrzyżowaniu. Sygnały dla kierujących autobusami nadawane są przez sygnalizator SB (rys. 1). Średnica soczewek sygnalizatorów SB wynosi 200 mm w przypadku lokalizacji sygnalizatora obok jezdni lub 300 mm w przypadku lokalizacji sygnalizatora nad jezdnią.



Rys. 1. Sygnalizator SB z sekwencją sygnałów dla kierujących autobusami (*) Tabliczka z napisem „BUS” lub komora sygnalizacyjna z białym napisem „BUS”

Dla autobusów stosuje się sygnały barwy białej w następującej postaci [1]:

- sygnał w kształcie kreski poziomej oznaczający zakaz wjazdu za sygnalizator (odpowiednik sygnału czerwonego),
- sygnał w postaci kreski poziomej i dwóch kropek rozmieszczonych poziomo oznaczający zakaz wjazdu za sygnalizator oraz informujący, że za chwilę nadawany będzie sygnał w kształcie kreski pionowej,

- sygnał w kształcie kreski pionowej oznaczający zezwolenie na wjazd za sygnalizator, z zastrzeżeniem, że jeśli brak możliwości opuszczenia skrzyżowania w trakcie nadawania sygnału zezwalającego na wjazd lub wjechanie na skrzyżowanie spowodowałoby zagrożenie bezpieczeństwa innych uczestników ruchu, nie wolno wjechać za sygnalizator (odpowiednik sygnału zielonego),
- sygnał w kształcie dwóch kropek rozmieszczonych poziomo, oznaczający zakaz wjazdu za sygnalizator; sygnał ten nie dotyczy kierujących pojazdami, które w chwili rozpoczęcia nadawania tego sygnału były tak blisko sygnalizatora, że nie mogłyby być zatrzymane bez gwałtownego hamowania; sygnał ten informuje jednocześnie, że za chwilę nadawany będzie sygnał w kształcie kreski poziomej (odpowiednik sygnału żółtego).

Sygnały powyższe dotyczą wszystkich kierunków jazdy pojazdów, dla których są przeznaczone i mogą być nadawane tylko w następującej sekwencji:

- sygnał w kształcie kreski poziomej → sygnał w kształcie kreski poziomej i dwóch kropek poziomo → sygnał w kształcie kreski pionowej → sygnał w kształcie dwóch kropek poziomo → sygnał w kształcie kreski poziomej

Długość sygnału białego w postaci dwóch kropek umieszczonych poziomo przeznaczony dla kierujących autobusami wynosi 3 s. Natomiast długość sygnału zielonego (biała pionowa kreska) powinna wynosić co najmniej 7 s dla autobusów linii stałych i 6 s dla linii awaryjnych (wykorzystywanych nieregularnie).

Przy obliczaniu czasów międzyzielonych prędkość ewakuacji autobusów należy zawsze przyjmować równą 36 km/h (10 m/s) a długość autobusu równą 14 m. W przypadku prędkości dojazdu przepisy są bardziej elastyczne i pozwalają uwzględnić uwarunkowania miejscowe. Natomiast w przypadku obliczania czasu dojazdu ze startu zatrzymanego należy przyjmować maksymalne przyspieszenie równe 2.0 m/s².

2. BADANIA EMPIRYCZNE CZASÓW PRZEJAZDU AUTOBUSÓW [9]

2.1. Kryteria dla poligonów badawczych

Prowadzone pomiary miały charakter pilotażowy, ale starano się uwzględnić możliwie dużo parametrów o zróżnicowanych wartościach i mających wpływ na przejazd autobusu przez skrzyżowanie. Stąd przy poszukiwaniu poligonów do badań, tzn. skrzyżowań z sygnalizacją świetlną z obsługą linii autobusowych, kierowano się następującymi kryteriami:

- wielkością skrzyżowania – dla zróżnicowania długości drogi ewakuacji/dojazdu autobusu,
- odpowiednio dużym natężeniem ruchu autobusowego,
- istnieniem lub brakiem odrębnego pasa przeznaczonego do poruszania się po nim komunikacji miejskiej, busów, autobusów dalekobieżnych, motocykli, taksówek oraz pojazdów uprzywilejowanych – tzw. „bus-pasa”,
- lokalizacją przystanku autobusowego – za lub przed skrzyżowaniami – lub jego braku,
- odległością przystanku od tarczy skrzyżowania,
- rodzajem taboru autobusowego – podział na autobusy krótkie, tradycyjne oraz przegubowe,
- widocznością odpowiednią do prowadzenia badań i umożliwiającą filmowanie przejazdu autobusu.

Podczas wizji lokalnej w Krakowie spośród ponad 20 skrzyżowań, wytypowano 7 poligonów badawczych, na których przeprowadzono empiryczne badania prędkości przejazdu autobusów.

2.2. Charakterystyka poligonów badawczych

Do badań empirycznych wybrano następujące skrzyżowania, jako poligony badawcze:

- poligon badawczy **P1** – skrzyżowanie ulic al. Juliusza Słowackiego – Kamienna (badania przeprowadzono dla autobusów poruszających się po południowej jezdni al. J. Słowackiego, wjeżdżających na skrzyżowanie od zachodu),
- poligon badawczy **P2** – skrzyżowanie ulic al. Juliusza Słowackiego – Długa (kierunek przejazdu autobusów z zachodu na wschód, jezdnia południowa),
- poligon badawczy **P3** – skrzyżowanie ulic al. Juliusza Słowackiego – Śląska (kierunek przejazdu autobusów ze wschodu na zachód, jezdnia północna),
- poligon badawczy **P4** – skrzyżowanie ulic al. 29 Listopada – Biskupa Prandoty (kierunek przejazdu autobusów z południa na północ, wschodnia część jezdni),
- poligon badawczy **P5** – skrzyżowanie ulic Olszyny – Grochowska (wjazd na skrzyżowanie z kierunku północno-wschodniego, w kierunku południowo-zachodnim),
- poligon badawczy **P6** – skrzyżowanie ulic Olszyny – Nadbrzeźna (wjazd na skrzyżowanie od południowego-zachodu, przejazd w kierunku północno-wschodnim),
- poligon badawczy **P7** – skrzyżowanie ulic al. Solidarności – Władysława Orkana (przejazd z zachodu na wschód, jezdnia południowa).

Lokalizację poligonów badawczych pokazano na rys. 2 a ich charakterystykę przedstawiono w tab. 1.



Rys. 2. Lokalizacja poligonów badawczych w Krakowie, na których wykonano pomiary prędkości przejazdu autobusów

Tab. 1. Charakterystyka poligonów badawczych w Krakowie, na których zrealizowano badania empiryczne prędkości przejazdu autobusów

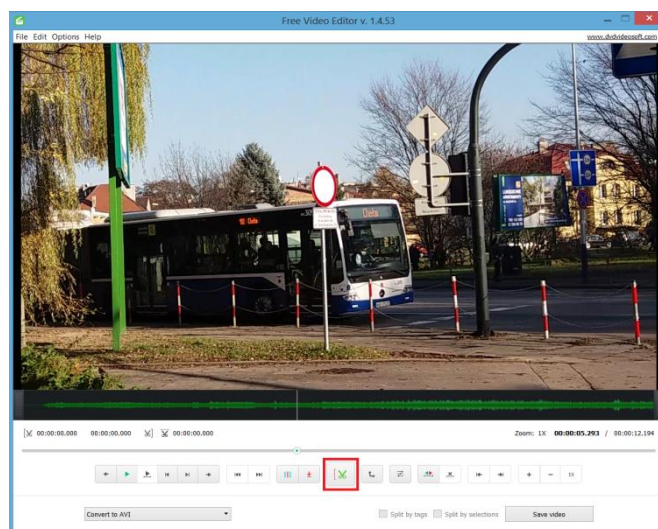
Lp.	Skrzyżowanie	długość przejazdu / [m]	przystanek	inne
P1	al. Juliusza Słowackiego – Kamienna	53.50	na wlocie	bus-pas z torowiskiem tramwajowym
P2	al. Juliusza Słowackiego – Długa	38.00	na wlocie	bus-pas na wlocie
P3	al. Juliusza Słowackiego – Śląska	39.80	na wlocie	bus-pas
P4	al. 29 Listopada – Biskupa Prandoty	53.45	na wlocie	bus-pas
P5	Olszyny – Grochowska	32.10	brak	pas wspólny
P6	Olszyny – Nadbrzeźna	30.20	na wlocie	pas wspólny
P7	al. Solidarności – Władysława Orkana	46.35	na wlocie	pas wspólny

2.3. Technika pomiarów prędkości i przyspieszenia autobusów

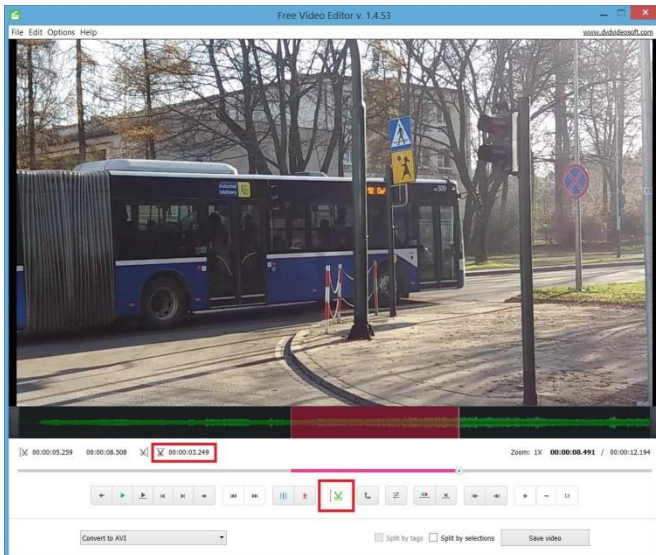
Badanie polegało na pomiarze czasu przejazdu autobusu od linii zatrzymania (znak poziomy P-14 „linia warunkowego zatrzymania złożona z prostokątów”) do końca przejścia dla pieszych na wylocie znak poziomy P-10 „przejście dla pieszych”). Do pomiarów wybrano technikę wideo – przejazd każdego autobusu przez skrzyżowanie był rejestrowany a następnie filmy były analizowane na komputerze w celu obliczenia czasu/prędkości przejazdu.

Wszystkie przejazdy autobusów nagrane zostały aparatem wbudowanym w smartfon Samsung Galaxy J5 (aparat o rozdzielczości 13 Mpix oraz przysłonie F1.9 pozwala na wykonanie wysokiej jakości nagrań w rozdzielczości Full HD 1920 x 1080; przysłona F1.9 ułatwia nagrywanie po zmroku; aparat nagrywa filmy, których prędkość wyświetlania klatek wynosi 30 fps – 30 klatek na sekundę; zoom cyfrowy, maksymalnie czterokrotny, używany był podczas pomiarów na dużych skrzyżowaniach; każde nagranie w nazwie ma automatycznie przypisaną datę oraz godzinę, co znacznie ułatwia koordynację nagrań z formularzem wypełnianym na poligonach), a następnie odtwarzane w programie Free Video Editor. Podczas nagrywania zapisywano ważne informacje dla danego pomiaru, jak na przykład wymuszenie pierwszeństwa, rodzaj sygnału, na którym przejeżdżał autobus, czy też wystąpienie zatoru. Pierwszym etapem dla każdego pomiaru było zawsze obejrzenie całego nagrania, od początku do końca i wychwycenie cech szczególnych, takich jak zator, czy wymuszenie pierwszeństwa pomimo zapisania tych informacji na formularzu podczas nagrywania. Pomiary, które były niepewne, nagrania o złej jakości, pomiary prowadzone podczas zatoru, wymuszenia pierwszeństwa i inne cechy, wpływające na prędkość przejazdu zostały odrzucone. Po odrzuceniu pomiarów nagrania oglądano ponownie w celu zidentyfikowania rodzaju taboru, marki, jak i modelu danego autobusu, numeru obsługiwanej linii oraz określenia, czy przejeżdża on „z biegu”, czy też „z zatrzymania” (a właściwie potwierdzenie tego, co zapisane było na formularzu). Ostatnim etapem było pomierzenie czasu przejazdu autobusu za pomocą programu (Free Video Editor). Sposób mierzenia czasu przedstawiono na rys. 3 i 4.

Program Free Video Editor jest bezpłatnym programem do nieliniowej obróbki materiałów wideo z możliwością pracy poklatkowej, co pozwoliło dokładnie zidentyfikować momenty przekraczania przekrojów pomiarowych. Zaletami tego programu są m. in. łatwość obsługi, jak i możliwość zapisywania gotowych nagrań do różnych formatów, takich jak np. AVI, DVD, MPEG, MP4.



Rys. 3. Sposób wyznaczenia początku fragmentu nagrania – program Free Video Editor



Rys. 4. Sposób wyznaczenia końca fragmentu nagrania oraz odczytania czasu przejazdu autobusu – program Free Video Editor

Po wczytaniu filmu do programu Free Video Editor, należało wybrać odpowiednią klatkę nagrania, tj. klatkę najbardziej zbliżoną do momentu, gdy punkt charakterystyczny pojazdu (jego przód, środek koła lub też światło obrysowe – dla nagrań prowadzonych wieczorem) znajdował się nad linią warunkowego zatrzymania (początek drogi przejazdu). Kolejnym krokiem było wciśnięcie przycisku [Begin selection] – rys. 3. Następnie należało przejść do klatki, w której wybrany punkt charakterystyczny autobusu znajduje się nad końcem przejścia dla pieszych (koniec drogi przejazdu) i wcisnąć przycisk [End selection] – rys. 4. Ostatnim krokiem był odczyt czasu przejazdu autobusu przez kliknięcie w zaznaczony obszar wycinka (zakolorowany na czerwono) i odczytanie czasu z miejsca tuż pod nagraniem, co również pokazano na rys. 4. Dokładność, z jaką dokonywano pomiarów za pomocą programu wynosi maksymalnie dwa przedziały czasu pomiędzy klatkami (po klatce dla każdego przekroju), a więc dla nagrań o prędkości wyświetlania klatek 30 fps jest to $2 \times 0.033 \text{ s} = 0.067 \text{ s}$. Oznacza to, że dla nagrań, na których czas przejazdu wynosi 3 s błąd pomiaru wynosi 2.22 % i maleje dla dłuższych czasów przejazdu.

Do obliczenia prędkości przejazdu skrzyżowania potrzebna była długość drogi przejazdu. Pomiarów tych długości wykonane zostały za pomocą normowego kółka pomiarowego. Wszystkie długości zmierzono dwu- lub trzykrotnie, z dokładnością do 0.05 m, a następnie obliczano wartość średnią. Czasy przejazdu wpisywano do arkusza kalkulacyjnego rejestrując jednocześnie datę i godzinę wykonania pomiaru (odnośniki do nagrań), numer obsługiwanej linii, rodzaj sygnału (zielony/żółty), typ przejazdu („z biegu”/ „z zatrzymania”), czas przejazdu w s, model pojazdu, uwagi (np. zator, wymuszenie pierwszeństwa) oraz marka i model autobusu.

Wymagane liczebności prób na potrzeby wyznaczenia prędkości przejazdu „z biegu” zostały uzyskane dla wszystkich poligonów, natomiast dla prędkości „z zatrzymania” jedynie dla trzech poligonów – **P1 ÷ P3**.

Prędkość autobusu obliczano z wzoru: $v = l/\Delta t$, gdzie: Δt był pomierzonym czasem przejazdu odcinka pomiarowego a l długością tego odcinka. Dla przejazdów z zatrzymania obliczano przyspieszenie autobusu ze wzoru: $a = 2 \cdot (l + 1.5) / \Delta t^2$.

2.4. Analizy statystyczne wyników badań

W trakcie pomiarów zarejestrowano czasy przejazdu 303 autobusów (w tym 260 dla przejazdu „z biegu” i 43 dla przejazdu „z zatrzymania”), które zostały stabelaryzowane. Dla wszystkich pomiarów

przeprowadzono analizy statystyczne obejmujące: miary położenia (średnia arytmetyczna, przedział ufności dla średniej, mediana, kwantyle 15 % i 85 %), miary zmienności (wariancja, odchylenie standardowe, współczynnik zmienności), miarę asymetrii i miarę koncentracji. Rozkład badanych parametrów przedstawiano w postaci dystrybuant.

Analizy statystyczne prowadzono również dla zagregowanych wyników z wszystkich poligonów oraz dla grup poligonów o podobnych cechach.

3. WYNIKI BADAŃ EMPIRYCZNYCH

Badania empiryczne zostały wykonane w okresie wrzesień – październik 2017 r. Ze względu na zmienne warunki ruchu pomiary przeprowadzono obejmując zarówno godziny szczytów (porannego i popołudniowego) jak i godziny pozaszczytowe we wszystkie dni tygodnia, aby pomiar obejmował możliwie niezakłócony przejazd autobusów przez skrzyżowane. Badania przeprowadzono dla autobusów relacji na wprost.

Analizy wyników badań objęły dane pomiarowe dla każdego poligonu z uwzględnieniem sposobu przejazdu (z biegu/z zatrzymania) i rodzaju taboru. Poniżej zaprezentowano wyniki dla poszczególnych poligonów oraz dla zagregowanych danych pomiarowych.

3.1. Prędkość przejazdu dla autobusu wjeżdżającego „z biegu” na skrzyżowanie

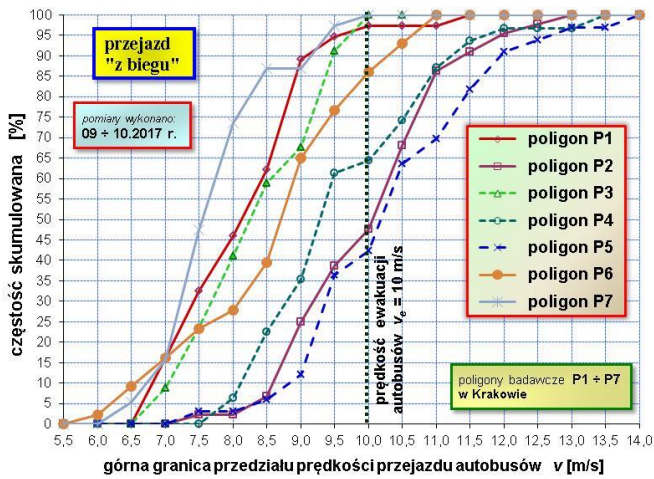
W tabl. 2 przedstawiono wybrane statystyki dotyczące prędkości przejazdu autobusów na poszczególnych poligonach oraz statystyki zbiorcze dla wszystkich poligonów. Dystrybuanty prędkości przejazdu autobusów dla poszczególnych poligonów przedstawiono na rys. 5. Na rysunkach dystrybuant zaznaczono zalecaną przez przepisy prędkość ewakuacji autobusu $v_a = 10 \text{ m/s}$ przyjmowaną przy projektowaniu sygnalizacji [1].

Tab. 2. Statystyki prędkości przejazdu autobusów „z biegu” skrzyżowania z sygnalizacją świetlną dla poszczególnych poligonów w Krakowie oraz zbiorcze dla wszystkich poligonów

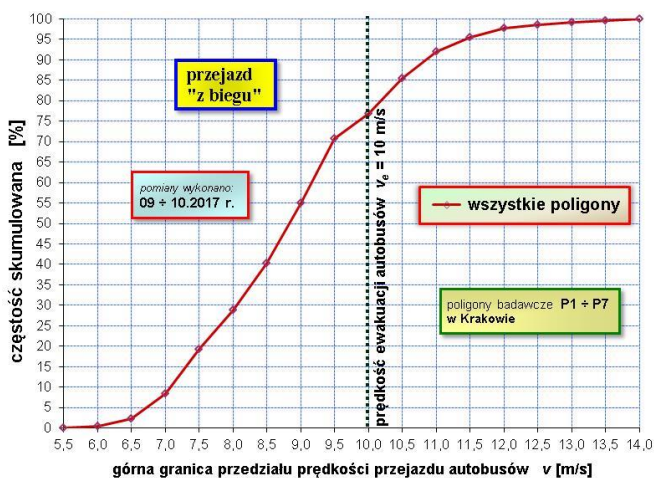
Statystyka		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	całość
liczebność	n [-]	37	44	34	31	33	43	38	260
wartość min.	v_{min} [m/s]	6.59	7.41	6.55	7.71	7.19	5.75	6.14	5.75
wartość max.	v_{max} [m/s]	11.35	12.82	9.79	13.04	13.67	10.98	9.53	13.67
wartość średnia	v_{sr} [m/s]	8.11	9.96	8.31	9.59	10.24	8.53	7.67	8.90
odchylenie stand.	S [m/s]	0.986	1.107	0.925	1.276	1.375	1.303	0.821	1.449
kwantyl 15 %	v_{15} [m/s]	7.03	8.84	7.35	8.31	9.04	9.93	7.01	7.36
kwantyl 85 %	v_{85} [m/s]	8.84	10.94	9.44	10.88	11.57	9.85	8.40	10.42
udział jadących < 10 m/s [%]		97.3	48.5	100.0	64.8	43.3	87.3	100.0	77.2

Największe prędkości osiągnęte były przez autobusy na poligonie **P5** ($v_{sr} = 10.24 \text{ m/s}$; $v_{15} = 9.04 \text{ m/s}$; $v_{85} = 11.57 \text{ m/s}$), na którym brak jest przystanku w pobliżu skrzyżowania. Z najmniejszymi prędkościami autobusy jechały na poligonie **P7** ($v_{sr} = 7.67 \text{ m/s}$; $v_{15} = 7.01 \text{ m/s}$; $v_{85} = 8.40 \text{ m/s}$) z uwagi na wpływ przystanku zlokalizowanego na wylocie. Zwraca uwagę znaczny rozrzut wartości prędkości przejazdu autobusów na poszczególnych poligonach – różnica wyników dla skrajnych wartości pomiędzy poligonami **P5** i **P7** wynosi: $\Delta v_{sr} = 2.57 \text{ m/s}$ (9.25 km/h); $\Delta v_{15} = 2.03 \text{ m/s}$ (7.31 km/h); $\Delta v_{85} = 3.17 \text{ m/s}$ (11.41 km/h).

Dystrybuantę prędkości przejazdu autobusów „z biegu” dla zagregowanych wyników z wszystkich poligonów przedstawiono na rys. 6.



Rys. 5. Dystrybuanty prędkości przejazdu autobusów „z biegu” na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną dla poszczególnych poligonów w Krakowie



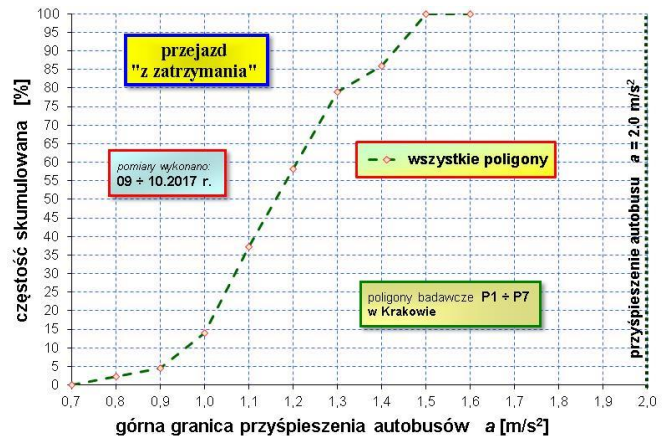
Rys. 6. Dystrybuanta prędkości przejazdu autobusów „z biegu” na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną dla wszystkich poligonów w Krakowie

Prędkość autobusu wjeżdżającego na skrzyżowanie „z biegu” może być pomocna do oszacowania prędkości v_e i v_d potrzebnych przy obliczaniu czasów ewakuacji i dojazdu. Prędkości ewakuacji/dojazdu powinny być mierzone przy wjeździe autobusu na skrzyżowanie w trakcie nadawania sygnału w postaci kreski pionowej – na początku sygnału dla prędkości dojazdu i na końcu sygnału (lub w trakcie nadawania sygnału migającej kreski pionowej) dla prędkości ewakuacji. Jak wykazały pomiary empiryczne przejazdy „z biegu” na początku lub końcu sygnału zielonego występują rzadko i dlatego do oszacowania poszukiwanych prędkości wykorzystano wszystkie przejazdy „z biegu”. Przyjęto, że prędkość ewakuacji odpowiada kwantylowi 15 % i równa się 7.36 m/s (26.5 km/h) a prędkość dojazdu kwantylowi 85 % prędkości przejazdu skrzyżowania „z biegu” i równa się 10.42 m/s (37.5 km/h). Pozostałe statystyki prędkości autobusów przejeżdżających skrzyżowanie „z biegu” przedstawiono w tab. 2.

3.2. Analiza przejazdu dla autobusu wjeżdżającego „z zatrzymaniem” na skrzyżowanie

W przypadku ruszania autobusu „z zatrzymaniem” (przystanek na wlocie lub zatrzymanie na sygnale czerwonym) czas dojazdu, przy szacowaniu czasów międzycielonych, oblicza się przyjmując maksymalne przyspieszenie równe 2.0 m/s^2 [1]. W pomiarach empirycznych zarejestrowano 43 autobusy wjeżdżające na skrzyżowanie

z zatrzymaniem. Pozwoliło to na obliczenie przyspieszenia a . Na rys. 7 przedstawiono dystrybuantę przyspieszenia dla zagregowanych wyników ze wszystkich poligonów.



Rys. 7. Dystrybuanta przyspieszenia autobusów „z zatrzymaniem” na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną dla wszystkich poligonów w Krakowie

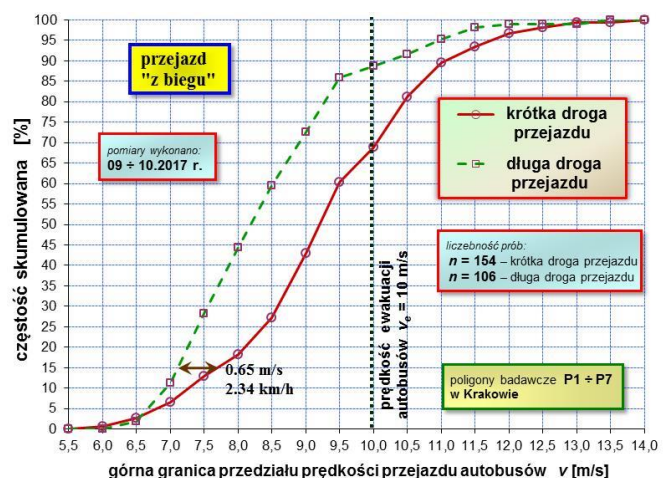
Uzyskane wartości przyspieszenia autobusu wskazują na znacznie mniejsze wartości przyspieszenia autobusu w stosunku do wartości 2.0 m/s^2 zalecanej przez przepisy [1]. Przyjmując uzyskany z pomiarów kwantyl 85 % przyspieszenia autobusu za reprezentacyjny do zastosowania przy obliczaniu czasów międzycielonych rzeczywiste przyspieszenie równe 1.36 m/s^2 jest ponad 30 % mniejsze od zalecanej wartości.

3.3. Badanie wpływu wybranych czynników na prędkość przejazdu

Wybór różnorodnych poligonów pozwolił na zbadanie wpływu wybranych czynników charakteryzujących poszczególne skrzyżowania na wartości prędkości przejazdu autobusów, które zaprezentowano poniżej.

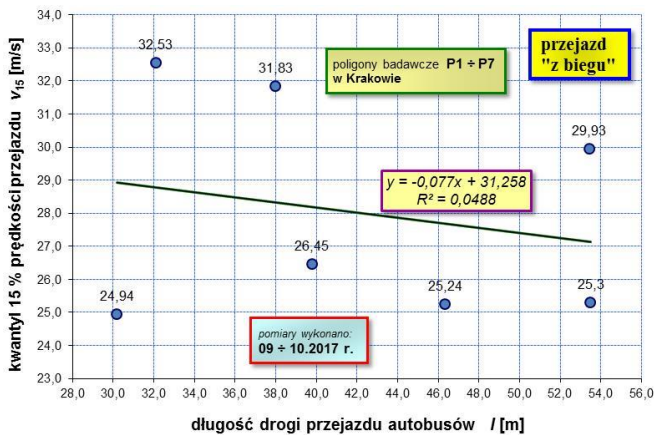
Wpływ długości drogi przejazdu autobusu

Z uwagi na długość drogi przejazdu poligony podzielono na dwie grupy: z krótką ($< 40 \text{ m}$) i długą ($\geq 40 \text{ m}$) drogą przejazdu. Dystrybuanty prędkości przejazdu dla tych grup przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Dystrybuanty prędkości przejazdu autobusów „z biegu” na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną z uwzględnieniem długości drogi przejazdu autobusów

Uzyskane wyniki wskazują, że prędkość przejazdu na bardziej rozbudowanych skrzyżowaniach jest mniejsza niż na skrzyżowaniach zwartych i dla v_{15} różnica ta wynosi 0.65 m/s (2.34 km/h). Wpływ długości drogi przejazdu na prędkość ewakuacji (v_{15}) dla poszczególnych poligonów przedstawiono na rys. 9.

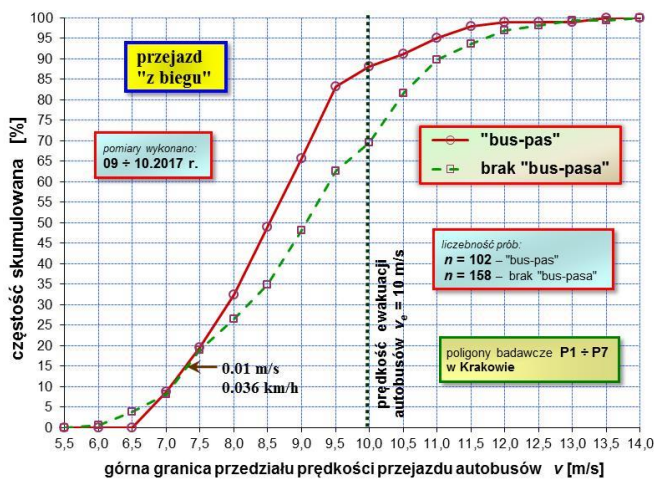


Rys. 9. Zależność prędkości ewakuacji autobusów (v_{15}) od długości drogi przejazdu

Uzyskana zależność ($v_{15} = -0.078 \cdot l + 31.26$) potwierdziła, że wraz ze wzrostem drogi przejazdu autobusów maleje prędkość ewakuacji. Współczynnik determinacji jest jednak niewielki ($R^2 = 0.049$) więc oznacza to, że wpływ innych czynników na prędkość ewakuacji autobusów wynosi ponad 95 %.

Wpływ wydzielonego pasa dla autobusów (tzw. „bus-pasa”)

Część poligonów posiadała wydzielone pasy dla autobusów („bus-pasy”) a na pozostałych autobusy korzystały z ogólnodostępnych pasów ruchu. Dystrybuanty prędkości przejazdu z uwzględnieniem istnienia lub braku „bus-pasów” przedstawiono na rys. 10.



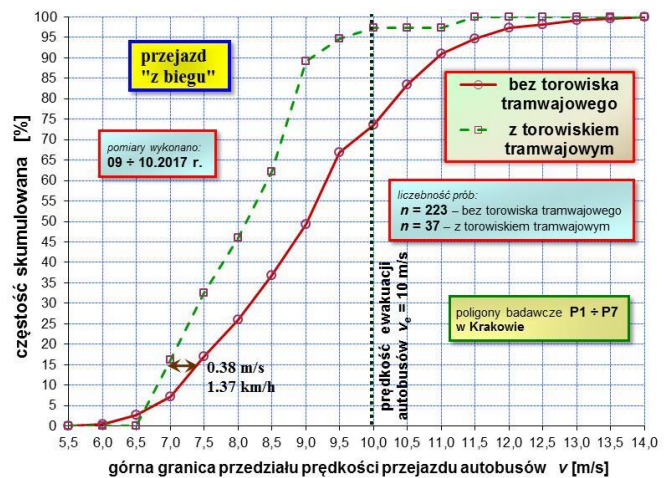
Rys. 10. Dystrybuanty prędkości przejazdu autobusów „z biegu” na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną z uwzględnieniem istnienia/braku „bus-pasów”

Uzyskane wyniki wskazują, że na prędkość ewakuacji (v_{15}) istnienie lub brak „bus-pasa” nie ma praktycznie wpływu ($\Delta v_{15} = 0.01 \text{ m/s} \Rightarrow 0.036 \text{ km/h}$). Różnica ujawnia się dopiero dla wyższych prędkości i co jest zaskakujące niższe prędkości przejazdu obserwuje się na wydzielonych pasach dla autobusów.

Wpływ przejazdu przez torowisko tramwajowe

Jakość wykonania torowiska tramwajowego, przez który prze-

jeżdża autobus może mieć wpływ na prędkość jego przejazdu bowiem w przypadku złego stanu torowiska może to wpływać na dyskomfort pasażerów autobusu. Na poligonie P1 jest torowisko tramwajowe, co pozwoliło zbadać jego wpływ na prędkość przejazdu autobusów. Dystrybuanty prędkości przejazdu z uwzględnieniem istnienia lub braku torowiska tramwajowego przedstawiono na rys. 11.

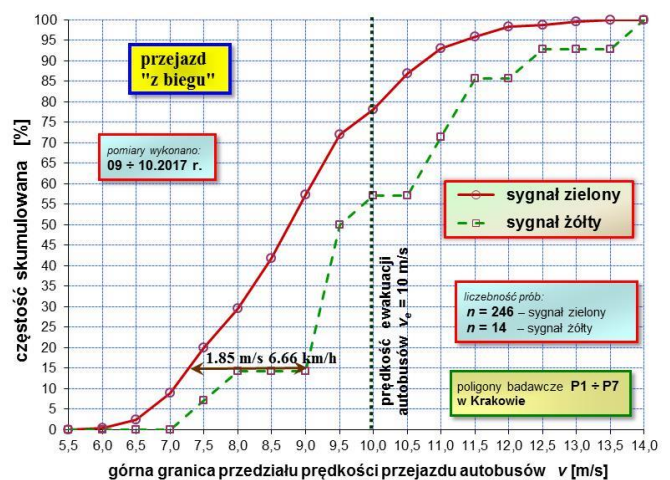


Rys. 11. Dystrybuanty prędkości przejazdu autobusów „z biegu” na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną z uwzględnieniem istnienia/braku torowiska tramwajowego

Jak było do przewidzenia prędkość przejazdu w przypadku przejazdu przez torowisko tramwajowe jest niższa niż dla poligonów bez torowiska tramwajowego. W przypadku prędkości ewakuacji (v_{15}) różnica ta jest jednak niewielka, bo wynosi 0.38 m/s (1.37 km/h), co może wynikać ze stosunkowo dobrej jakości torowiska tramwajowego na poligonie P1.

Wpływ sygnału świetlnego podczas wjazdu na skrzyżowanie

Jak już wcześniej podano do analiz dla przejazdów „z biegu” wzięto wszystkie autobusy przejeżdżające przez skrzyżowanie niezależnie od sygnału nadawanego na sygnalizatorze podczas przejazdu autobusu przez linię zatrzymań. Dystrybuanty prędkości przejazdu z uwzględnieniem sygnału na sygnalizatorze podczas wjazdu na skrzyżowanie przedstawiono na rys. 12.



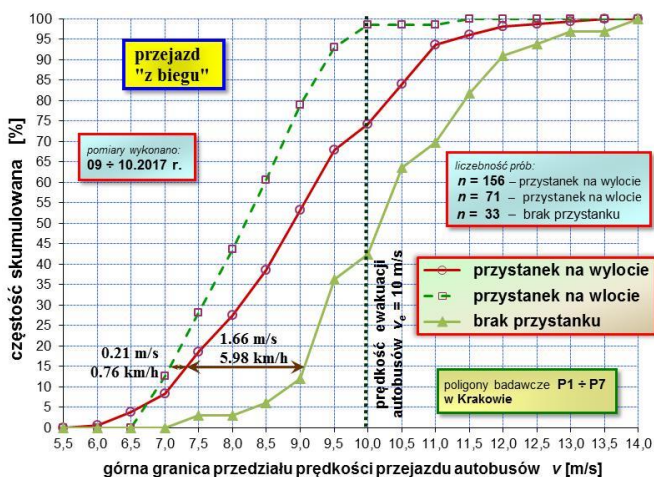
Rys. 12. Dystrybuanty prędkości przejazdu autobusów „z biegu” na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną z uwzględnieniem sygnału na sygnalizatorze podczas przejazdu przez linię zatrzymań

Uzyskane wyniki wskazują, że kierowca autobusu wjeżdżającego na sygnale żółtym stara się jak najszybciej zjechać z tarczy

skrzyżowania co przekłada się na wyższą prędkość przejazdu. W przypadku prędkości ewakuacji (v_{15}) różnica ta jest znaczna, bo wynosi 1.85 m/s (6.66 km/h). Należy jednak podkreślić, że liczebność próby dla wjazdu na sygnale żółtym jest mała ($n = 14$) i jest niższa od wymaganej minimalnej liczebności próby ($n_{min} = 44$).

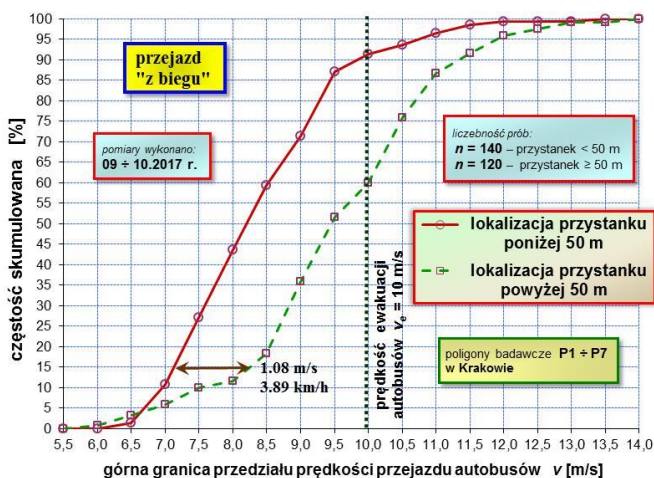
Wpływ lokalizacji przystanku autobusowego

W pobliżu skrzyżowań z sygnalizacją świetlną najczęściej lokalizowane są przystanki autobusowe, częściej na wylotach niż na wlotach skrzyżowania. Jeżeli znajdują się blisko tarczy skrzyżowania to mają wpływ na prędkość przejazdu autobusu przez skrzyżowanie – w przypadku przystanku na wylocie kierowca może już zwalniać na tarczy skrzyżowania a w przypadku przystanku na wlocie autobus może jeszcze przyspieszać na tarczy skrzyżowania. Dystrybuanty prędkości przejazdu z uwzględnieniem lokalizacji przystanku autobusowego przedstawiono na rys. 13.



Rys. 13. Dystrybuanty prędkości przejazdu autobusów „z biegu” na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną z uwzględnieniem lokalizacji przystanku autobusowego

Uzyskane wyniki potwierdzają wpływ lokalizacji przystanku na prędkość przejazdu. Dla prędkości ewakuacji (v_{15}) różnica ta jest znaczna, bo wynosi 1.66 m/s (5.98 km/h) pomiędzy brakiem przystanku a jego obecnością na wylocie. Z kolei na rys. 14 przedstawiono dystrybuanty prędkości przejazdu z uwzględnieniem odległości przystanku od skrzyżowania dla dwóch grup: przystanków autobusowych zlokalizowanych poniżej i powyżej 50 m.

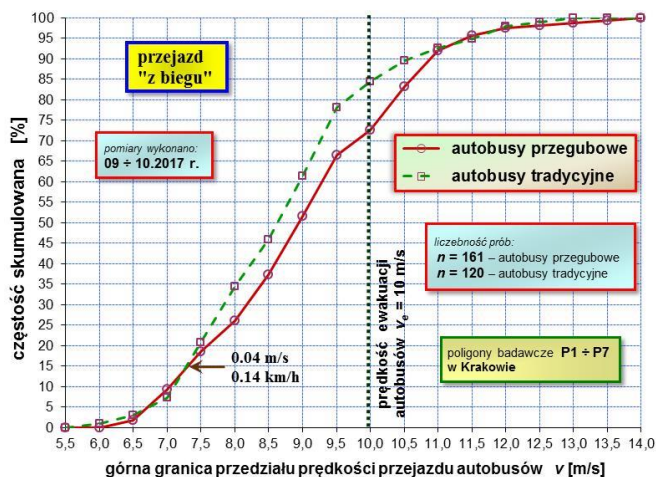


Rys. 14. Dystrybuanty prędkości przejazdu autobusów „z biegu” na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną z uwzględnieniem odległości przystanku autobusowego od skrzyżowania

Wyniki potwierdzają wpływ odległości przystanku od skrzyżowania na prędkość przejazdu autobusu, która jest większa dla przystanków zlokalizowanych w dalszej odległości (lub brak jest przystanku). Dla prędkości ewakuacji (v_{15}) jest ona większa o 1.08 m/s (3.89 km/h) dla przystanków zlokalizowanych powyżej 50 m w stosunku do tych zlokalizowanych bliżej tarczy skrzyżowania.

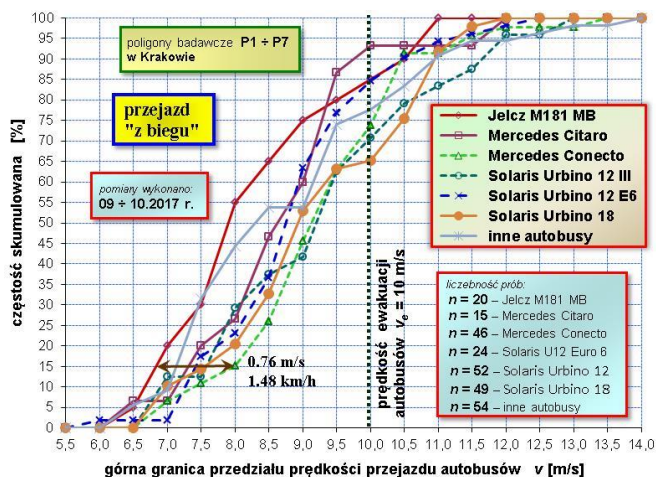
Wpływ taboru autobusowego

Dystrybuanty prędkości przejazdu z uwzględnieniem taboru autobusowego przedstawiono na rys. 15. Tabor podzielono na dwie grupy: osiemnastometrowe autobusy przegubowe i dwunastometrowe autobusy tradycyjne.



Rys. 15. Dystrybuanty prędkości przejazdu autobusów „z biegu” na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną z uwzględnieniem taboru autobusowego

Jak widać tabor autobusowy nie ma większego wpływu na prędkość przejazdu autobusu przez skrzyżowanie ($\Delta v_{15} = 0.04$ m/s \Rightarrow 0.14 km/h). Różnica ujawnia się dopiero dla wyższych prędkości i co jest zaskakujące niższe prędkości przejazdu uzyskano dla autobusów tradycyjnych. Wpływ różnych marek i modeli autobusów na prędkość przejazdu przedstawiono na rys. 16.



Rys. 16. Dystrybuanty prędkości przejazdu autobusów „z biegu” na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną z uwzględnieniem marek i modeli autobusów

Uwzględniając marki i modele uzyskano większy rozrzut prędkości przejazdu. Maksymalna różnica prędkości ewakuacji autobusu pomiędzy maksymalną wartością dla autobusu Mercedes Conecto

($v_{15} = 7.96$ m/s) a minimalną dla autobusu Jelcz M181 MB ($v_{15} = 6.84$ m/s) wyniosła 0.76 m/s (1.48 km/h).

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone pomiary prędkości i przyspieszenia autobusów na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną mają charakter wyrwykowy i pilotażowy, ale wyniki zaprezentowane w referacie oraz wykonane dodatkowe szczegółowe analizy pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- pomimo wielogodzinnych pomiarów i wyboru poligonów z odpowiednim natężeniem autobusów udało się zarejestrować jedynie 14 przejazdów na sygnale żółtym, które mogą być podstawą oszacowania prędkości ewakuacji – kwantyl 15 % prędkości przejazdu dla tych pojazdów wyniósł 9.21 m/s (33.16 km/h), a więc nieznacznie mniej od prędkości ewakuacji zalecanej przez przepisy (10 m/s \Rightarrow 36 km/h [1]); niewielka liczebność tej próby (mniejsza od minimalnej liczebności próby) nie pozwala traktować tego wyniku, jako statystycznie ufne,
- prędkość ewakuacji bazująca na wszystkich autobusach przejeżdżających „z biegu” wyniosła $v_{15} = 7.36$ m/s (26.50 km/h) i jest niższa o prawie 2 m/s od uzyskanej dla przejazdów na sygnale żółtym – wjazd na sygnale żółtym mobilizuje kierowców do jak najszybszego opuszczenia tarczy skrzyżowania; dla poszczególnych poligonów prędkość ewakuacji wahała się w granicach od 7 do 9 m/s,
- prędkość dojazdu bazująca na autobusach przejeżdżających „z biegu” wyniosła $v_{85} = 10.42$ m/s (37.51 km/h) a dla poszczególnych poligonów prędkość dojazdu wahała się w granicach od 8.4 do 11.6 m/s,
- pomimo nowoczesnego taboru autobusowego przyspieszenie autobusu oszacowane na podstawie przejazdów „z zatrzymania” wyniosło 1.36 m/s², czyli ponad 30 % mniej niż wartość zalecana przez przepisy (2.0 m/s² [1]),
- przyjmowanie długości autobusu równej 14 m jest niepoprawna przy obecnym taborze autobusowym różniącym się m.in. długością – powinno się przyjmować najdłuższy autobus korzystający z analizowanej relacji, np. autobus przegubowy o długości 18 m,
- długość drogi przejazdu przez skrzyżowanie wpływa na prędkość autobusu, z tym, że uzyskano zmniejszenie prędkości przy zwiększaniu drogi przejazdu (czyli zależność odwrotnie proporcjonalną) przy niewielkiej wartości współczynnika determinacji ($R^2 = 0.049$),
- badania wykazały, że korzystanie autobusu ze specjalnego, wydzielonego pasa ruchu (tzw. „bus-pasa”) nie wpływa na prędkość przejazdu przez skrzyżowanie – kwantyle 15 % prędkości dla przypadków z/bez „bus-pasa” są takie same,
- torowisko tramwajowe zlokalizowane poprzecznie do kierunku jazdy autobusu powoduje obniżenie prędkości przejazdu,
- lokalizacja przystanku autobusowego w pobliżu skrzyżowania (na wlocie lub wylocie) ma znaczny wpływ na obniżenie prędkości przejazdu – im bliżej tarczy skrzyżowania zlokalizowany jest przystanek tym większa redukcja prędkości autobusu,
- autobusy tradycyjne i przegubowe poruszają się z podobnymi prędkościami na skrzyżowaniu – większy wpływ na prędkość przejazdu autobusu mają poszczególne marki i modele autobusów,
- uzyskane rozbieżności pomiędzy wartościami rzeczywistymi prędkości ewakuacji/dojazdu i przyspieszenia autobusów a zalecanymi przepisami [1] wskazują na potrzebę dalszych badań na

większej liczbie poligonów w różnych miastach Polski dla zweryfikowania tych parametrów i wprowadzenia ich do praktyki projektowej.

BIBLIOGRAFIA

1. *Szczegółowe warunki techniczne dla sygnałów drogowych i warunki ich umieszczania na drogach*. Załącznik nr 3 do Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 3.07.2003 r. Dz. U. nr 220, poz. 2181 z dnia 23.12.2003 r.
2. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 3 lipca 2015 r. *zmieniające rozporządzenie w sprawie szczegółowych warunków technicznych dla znaków i sygnałów drogowych oraz urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego i warunków ich umieszczania na drogach*. Dz. U., poz. 1314 z dnia 7 września 2015 r.
3. Suchorzewski M., Gaca S., Tracz M.: *Inżynieria ruchu. Teoria i praktyka*. WKŁ, 2009 r.
4. Gondek S.: *Problem czasów międzyzielonych na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną*. Logistyka Nr 4/2007, s. 85 ÷ 88.
5. Gondek S.: *Prędkość tramwaju na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną*. Technika Transportu Szynowego Nr 10/2013, w wersji elektronicznej na dysku CD, s. 2713 ÷ 2722.
6. Gondek S.: *Analiza zachowania rowerzystów na zamiejskich skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną*. Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe, Nr 3/2013, w wersji elektronicznej na dysku CD, s. 1727 ÷ 1738.
7. Gondek S.: *Prędkość rowerzystów na przejazdach z sygnalizacją*. Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe, Nr 6/2016, w wersji elektronicznej na dysku CD, s. 176 ÷ 184.
8. <https://mpk.krakow.pl/pl/tabor/autobusy/>
9. Erd M.: *Badanie prędkości ewakuacji autobusu*. Politechnika Krakowska, Kraków 2017 (praca dyplomowa)

Bus speed on signalized intersection

Correct intergreen time is a primary safety parameter at signalized intersection. There are special regulations for public transport vehicles using separate lines/tracks. Such as appropriate evacuation time, travel speed and acceleration. A pilot study based on vehicle speed was done to verify that the parameters given for the buses correspond to actual values. The experiment took place at selected intersections in Cracow. This report represents results obtained with empirical measurements, including buses crossing intersection with and without stopping. Report also represents correlation between bus speed and other factors such as: crossing time, traffic lane type, bus stop location, tramway tracks and bus type. Evacuation speed (~9.2 m/s) is actually slower than recommended. Actual bus acceleration (1.4 m/s²) is almost 30% slower than recommended.

Autor:

dr inż. **Stanisław Gondek** – Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Inżynierii Drogowej i Kolejowej, Katedra Budowy Dróg i Inżynierii Ruchu, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, e-mail: sgondek@pk.edu.pl, tel.: (12) 628-38-39