

Grzegorz SIERPIŃSKI

STRATY CZASU A DŁUGOŚĆ KOLEJKI NA WLOCIE SKRZYŻOWANIA Z SYGNALIZACJĄ ŚWIETLNA

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki analiz wartości strat czasu na wlocie skrzyżowania z sygnalizacją świetlną w sytuacji istnienia kolejki początkowej. Przedstawiono dwa modele strat czasu. Pierwszy stosowany standardowo (zgodnie z wytycznymi) podczas dokonywania oceny warunków ruchu na skrzyżowaniu. Drugi opisywany model uwzględnia występowanie kolejki pozostającej na wlocie z poprzedniego podokresu analizy.

THE DEPENDENCE OF TIME DELAY FROM QUEUE LENGTH ON INLET OF SIGNALIZED INTERSECTION

Summary. The article includes a result of time delay analysis on inlet of signalised intersection. A comparison of two time delay model was described too. First is a standard delay model from guidelines. Second model represent a situation with queue on inlet.

1. WPROWADZENIE

Jednym z mierników efektywności sygnalizacji świetlnej oraz miernikiem oceny warunków ruchu panujących na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną są straty czasu. Obecnie straty czasu stanowią podstawę do określenia poziomu swobody ruchu (PSR) w większości metod obliczania przepustowości (m. in. HCM 2000 [3], metoda zalecana w Polsce [4]).

Metodologię służącą do szacowania średnich strat czasu dla skrzyżowań z sygnalizacją świetlną w Polsce określa publikacja wydana przez GDDKiA w 2004 roku [4]. Metoda ta jest zalecana do stosowania przez zarządców dróg oraz jednostki projektowe.

Standardowa procedura szacowania strat czasu zakłada dla uproszczenia brak kolejki początkowej na wlocie. W tym przypadku brane pod uwagę są tylko wielkości określające ściśle okres analizy (najczęściej 1 [h]).

Sytuacja zmienia się, gdy na początku analizowanego okresu występuje kolejka pojazdów pozostała z okresu poprzedzającego analizę. Wówczas najpierw zostają obsłużone pojazdy „zalegające” na wlocie, a dopiero potem zgłaszające się w okresie analizy. Powoduje to powstawanie dodatkowych strat czasu. Procedura uwzględniająca istnienie kolejki na początku okresu analizy została przedstawiona w załączniku 1 metody zalecanej do stosowania w Polsce [4].

Straty czasu wyznaczone z obu metod dają oczywiście różne wyniki, co jest spowodowane uwzględnianiem dodatkowych strat i różnicami w wyznaczaniu cząstkowej deterministycznej straty czasu. Dla przedstawionego w [4] przykładu strata czasu wyznaczana z analizy wieloprzedziałowej uwzględniającej przenoszenie kolejki na następny podokres przekraczała prawie dwukrotnie wartość szacowaną ze standardowego modelu.

W celu określenia różnic między modelami dokonano porównania wartości strat czasu wyznaczanych za pomocą standardowego modelu z procedurą obliczeniową średnich strat czasu w kolejnych podokresach godziny z uwzględnieniem przenoszenia się kolejki na następny podokres. Za okres analizy standardowo przyjmowana w obliczeniach jest 1 [h]. W procedurze uwzględniającej kolejkę początkową stosuje się analizę wieloprzedziałową dzieląc okres analizy na podokresy (najczęściej interwały 15-minutowe, jak w pomiarach ruchu).

Z uwagi na obszerność materiału wynikowego w artykule przedstawiono jedynie wyniki z porównań dla pojedynczego podokresu z uwzględnieniem istnienia kolejki początkowej na wlocie.

2. MOŻLIWE SCENARIUSZE SYTUACJI RUCHOWYCH I PROCEDURA OBLICZENIOWA

Na rysunkach 1 – 5 przedstawiono pięć możliwych scenariuszy sytuacji ruchowych na wlocie skrzyżowania z sygnalizacją świetlną dla pojedynczego podokresu analizy. Opracowanie wykonano na podstawie [4].

Pierwsze dwa przypadki (rys. 1, 2) dotyczą sytuacji, gdy kolejka początkowa nie występuje. Z uwagi na przekroczenie możliwości przepustowych wlotu w przypadku 2 pozostanie kolejka pojazdów na koniec okresu analizy. W takich warunkach w obliczeniach strat czasu korzysta się ze standardowego wyrażenia (1):

$$d = f_k \cdot d_1 + d_2 \quad (1)$$

$$d_1 = \frac{T}{2} \cdot \frac{(1-\lambda)^2}{1 - [\min\{1, X\} \cdot \lambda]} \quad d_2 = 900 \cdot t_a \cdot \left[(X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \frac{7 \cdot r_s \cdot w_s \cdot X^2}{C \cdot t_a}} \right], \quad (2)$$

gdzie:

d – średnia strata czasu na pojazd [s/P],

f_k – współczynnik koordynacji sygnalizacji [-],

$\lambda = G_e/T$ – udział sygnału efektywnego zielonego w cyklu [-],

T – długość cyklu sygnalizacji [s],

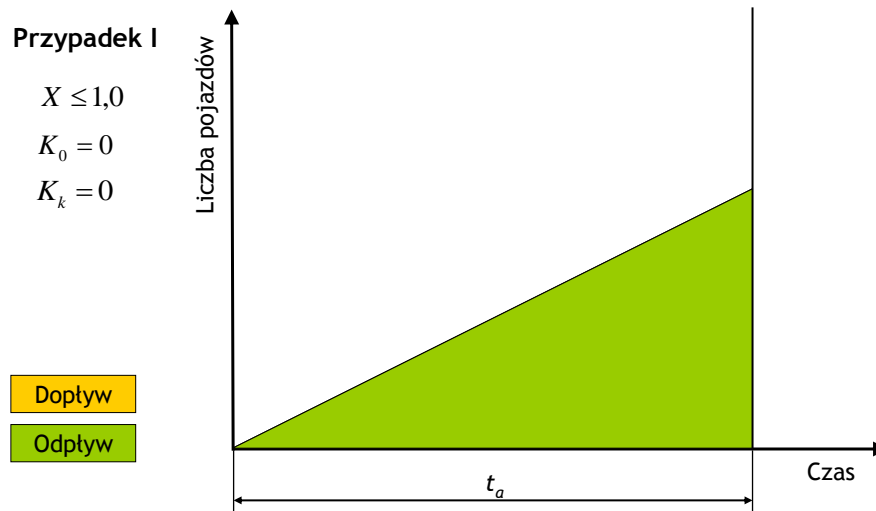
C – przepustowość [P/h],

t_a – okres analizy [h],

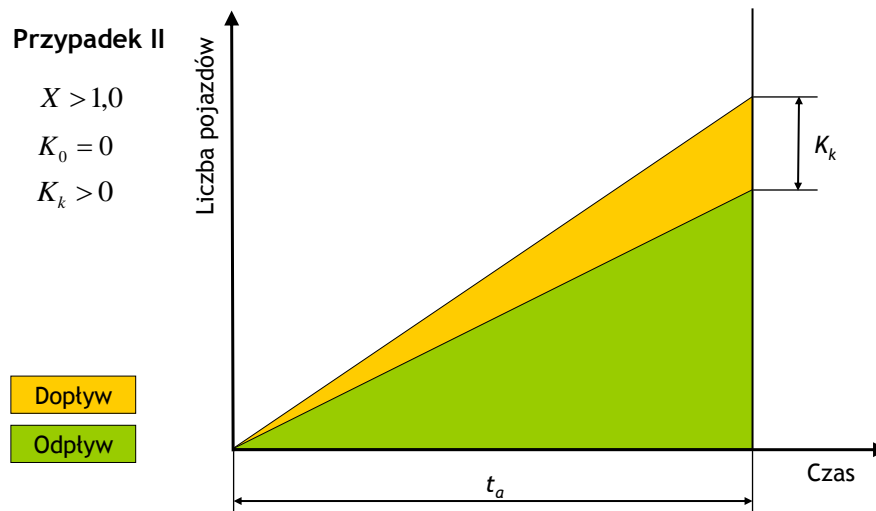
$X = Q/C$ – stopień obciążenia analizowanej grupy pasów [-],

r_s – współczynnik uwzględniający rodzaj sterowania [-],

w_s – współczynnik uwzględniający obecność sąsiednich skrzyżowań z sygnalizacją [-].



Rys. 1. Scenariusz sytuacji ruchowej na wlocie – przypadek I
 Fig. 1. Traffic situation on inlet – case I



Rys. 2. Scenariusz sytuacji ruchowej na wlocie – przypadek II
 Fig. 2. Traffic situation on inlet – case II

Na kolejnych rysunkach (rys. 3, 4 i 5) widać istnienie kolejki na początku podokresu analizy. W zależności od wartości stopnia obciążenia X , kolejki początkowej K_0 oraz czasu całkowitego rozładowania kolejki t rozróżnia się trzy kolejne przypadki scenariuszy sytuacji ruchowej. Przypadek III charakteryzuje szybkie rozładowanie kolejki (jeszcze w czasie trwania podokresu analizy), natomiast w pozostałych przypadkach pozostaje nierozładowana kolejka pojazdów – mniejsza niż początkowa (przypadek IV) lub większa niż początkowa (przypadek V).

Dla przypadków III, IV oraz V stosuje się formułę określającą średnie straty czasu na pojazd (3) rozszerzoną o element d_3 (4) z modyfikacją elementu d_1 (8) [4]:

$$d^* = f_k \cdot d_1^* + d_2 + d_3 \quad (3)$$

$$d_3 = \frac{1800 \cdot K_0 \cdot (1+u) \cdot t}{C \cdot t_a} \quad (4)$$

$$K_{0,i+1} = \max \{0; K_{0,i} + C \cdot t_a \cdot (X_i - 1)\}, \text{ dla } i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

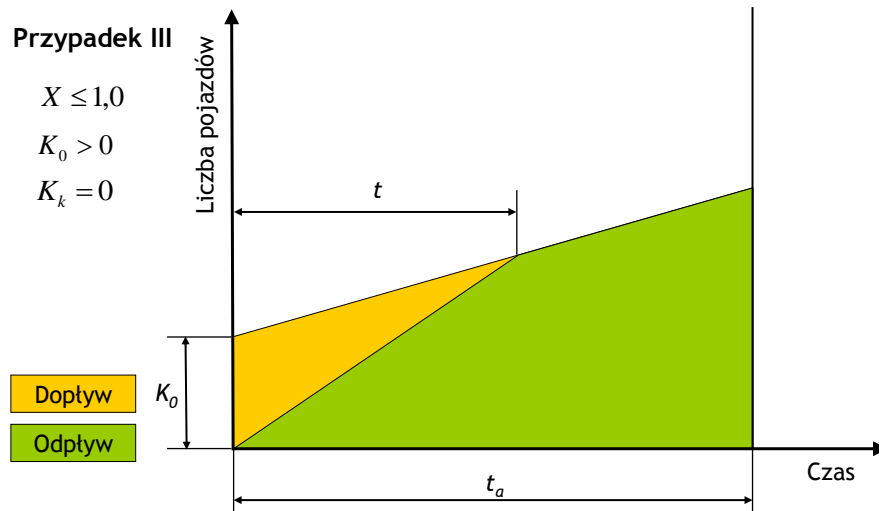
$$t = \min \left\{ t_a, \frac{K_0}{C \cdot [1 - \min \{1, X\}]} \right\} \quad \text{dla } [1 - \min \{1, X\}] = 0 \rightarrow t = t_a \quad (6)$$

$$u = \begin{cases} 0, & \text{gdy } t < t_a \\ 1 - \frac{C \cdot t_a}{K_0} \cdot [1 - \min \{1, X\}], & \text{gdy } t \geq t_a \end{cases} \quad (7)$$

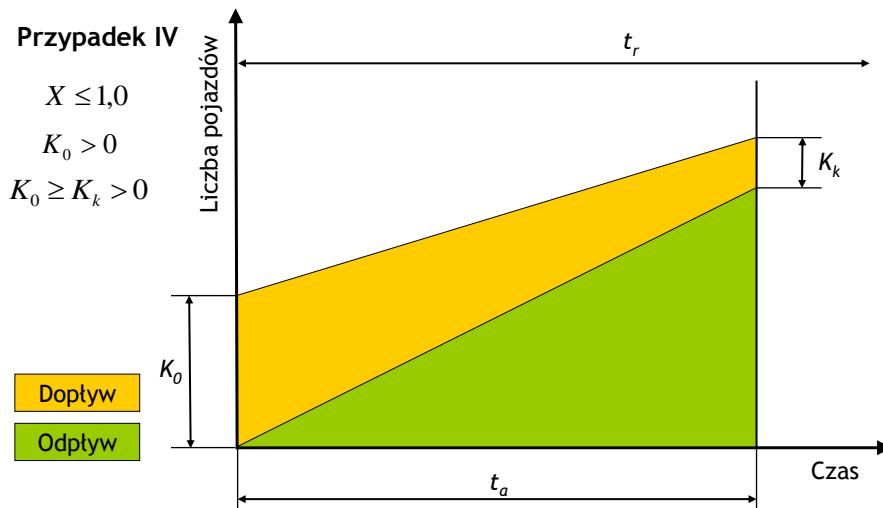
$$d_1^* = d_p \cdot \frac{t}{t_a} + d_n \cdot f_k \cdot \frac{t_a - t}{t_a}, \quad (8)$$

gdzie:

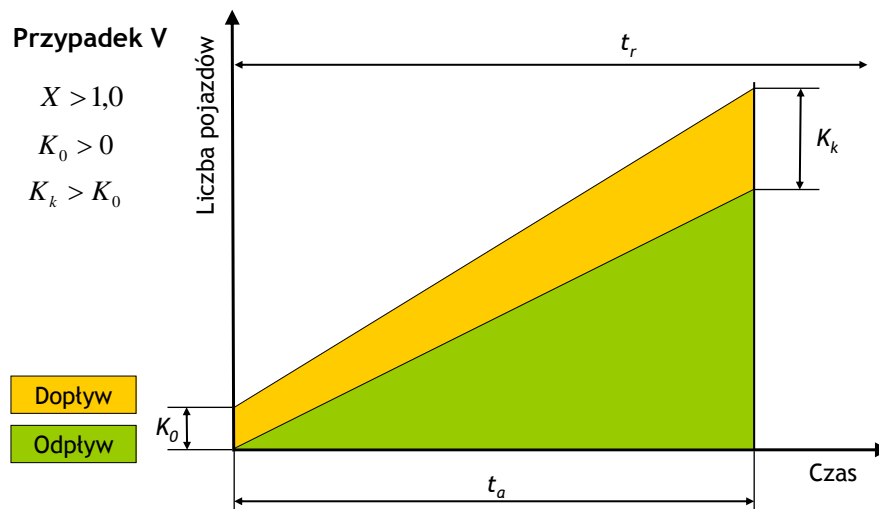
- d^* – średnia strata czasu na pojazd uwzględniająca istnienie kolejki początkowej [s/P],
- d_2 – element losowy straty czasu na pojazd [s/P],
- d_1^* – ważona średnia strata czasu na pojazd dla przypadków III, IV i V [s/P],
- d_p – straty d_1 w stanie przesylenia (przy $X=1,0$) [s/P],
- d_n – straty d_1 w stanie nienasycenia (przy aktualnym X w podokresie analizy t_a) [s/P],
- d_3 – dodatkowa średnia strata czasu na pojazd wynikająca z istnienia kolejki początkowej [s/P],
- f_k – współczynnik koordynacji sygnalizacji [-],
- r_s – współczynnik uwzględniający rodzaj sterowania [-],
- w_s – współczynnik uwzględniający obecność sąsiednich skrzyżowań z sygnalizacją [-],
- $\lambda = G/T$ – udział sygnału efektywnego zielonego w cyklu [-],
- T – długość cyklu sygnalizacji [s],
- C – przepustowość [P/h],
- t_a – okres analizy [h],
- $X = Q/C$ – stopień obciążenia analizowanej grupy pasów [-],
- $K_{0,i+1}$ – kolejka początkowa powstała w okresie analizy i dla kolejnego okresu analizy $i+1$ [P],
- $K_{0,i}$ – kolejka początkowa dla i -tego okresu analizy [P],
- K_0 – kolejka początkowa na początku podokresu analizy [P],
- X_i – stopień obciążenia dla i -tego okresu analizy [-],
- t – czas, po którym nastąpi całkowite rozładowanie kolejki początkowej w podokresie analizy, odpowiadający czasowi trwania stanu przeciążenia w tym podokresie [h],
- u – parametr strat czasu [-].



Rys. 3. Scenariusz sytuacji ruchowej na wlocie – przypadek III
 Fig. 3. Traffic situation on inlet – case III



Rys. 4. Scenariusz sytuacji ruchowej na wlocie – przypadek IV
 Fig. 4. Traffic situation on inlet – case IV



Rys. 5. Scenariusz sytuacji ruchowej na wlocie – przypadek V
 Fig. 5. Traffic situation on inlet – case V

3. PORÓWNANIE WARTOŚCI STRAT CZASU

Porównanie wartości strat czasu szacowanych za pomocą standardowych formuł (1) i (2) oraz wyznaczanych z procedury uwzględniającej istnienie kolejki początkowej na początku okresu analizy (3), (4), (8) wykonano przy zmianie kilku parametrów. Uwzględniono zmiany:

- długości kolejki początkowej K_0 ,
 - wartości stopnia obciążenia X ,
 - wartości przepustowości C ,
 - długości sygnału zielonego efektywnego G_e w stosunku do niezmiennej długości cyklu T .
- Analiza obejmowała zarówno sytuacje wlotów jednopasowych, jak i wielopasowych, stąd przyjęto wartości przepustowości do 1800 [P/h]. Kolejkę początkową definiowano, zgodnie z konwencją przyjętą w [4], jako kolejkę na pasie lub w przypadku kilku pasów jako całkowitą liczbę pojazdów na wszystkich pasach danej grupy obliczeniowej.

Zależność wartości strat czasu d^* od długości kolejki początkowej dla różnych wartości stopnia obciążenia ($X=0,0\dots1,4$) przedstawia rysunek 6. Na tej podstawie można stwierdzić, że wraz ze wzrostem przepustowości C maleje wpływ kolejki początkowej na średnią stratę czasu w analizowanym podokresie. Dodatkowo widać, że zmiana wartości przepustowości ma znacznie mniejszy wpływ na wartość straty czasu niż zmiana długości kolejki początkowej. Warto pamiętać, że w przypadku braku kolejki początkowej ($K_0=0$ [P]) wartość straty czasu odpowiada wartości wyznaczonej z formuły (1).

Na rysunku 7 zestawiono porównanie wartości strat czasu obu analizowanych modeli $|d-d^*|$ w zależności od długości kolejki początkowej na wlocie (kolejki, która pozostała z poprzedniego okresu). Straty czasu analizowano dla zmieniających się stopni obciążenia $X=0,1\dots1,0$ dla trzech założonych wartości przepustowości $C=600; 1200$ i 1800 [P/h]. Dla przyjętych założeń różnica między wyznaczonymi z obu formuł wartościami strat czasu przekroczyła 50 [s] już przy stopniu obciążenia $X=0,6$ dla najniższej z analizowanych przepustowości ($C=600$ [P/h]). Dla długości kolejki do 10 pojazdów na wlocie różnica w szacunkach strat czasu dla przepustowości 600 [P/h] nie przekracza 16 [s], co jednak stanowi ponad 40% z wartości straty czasu szacowanej z podstawowej formuły. Dla większych wartości przepustowości różnica maleje.

Wartości strat czasu d i d^* dla różnego udziału sygnału zielonego efektywnego w cyklu λ porównano stosując za punkt odniesienia straty czasu uzyskane dla modelu z metody zalecanej do stosowania w Polsce (9).

$$\delta\% = \frac{d - d^*}{d} \cdot 100, \quad (9)$$

gdzie:

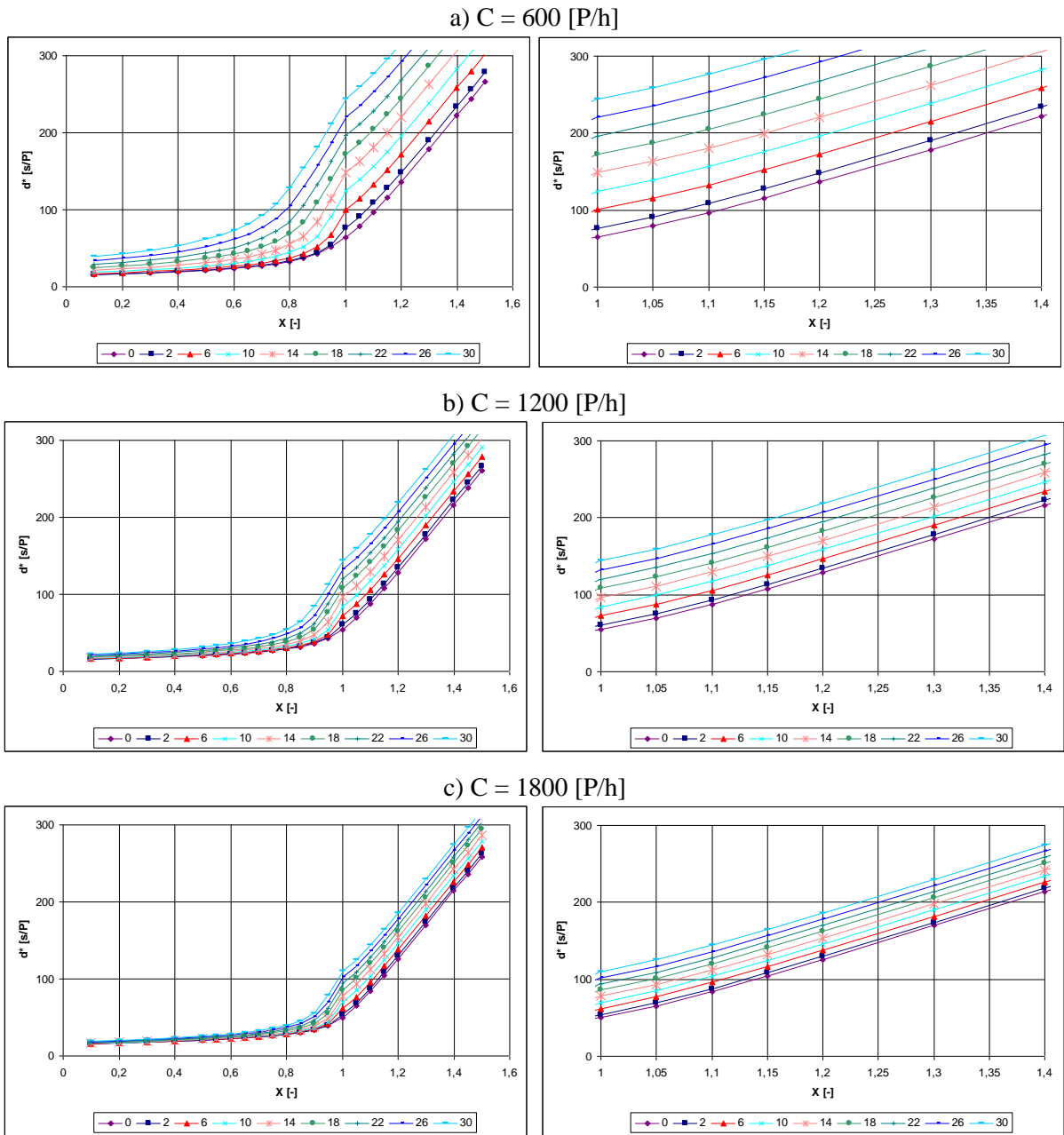
$\delta\%$ – procentowe odchylenie straty czasu wyznaczonej z poszczególnych modeli [%],

d – średnia strata czasu na pojazd wyznaczona na podstawie metody zalecanej do stosowania w Polsce [s/P],

d^* – średnia strata czasu na pojazd uwzględniająca istnienie kolejki początkowej [s/P].

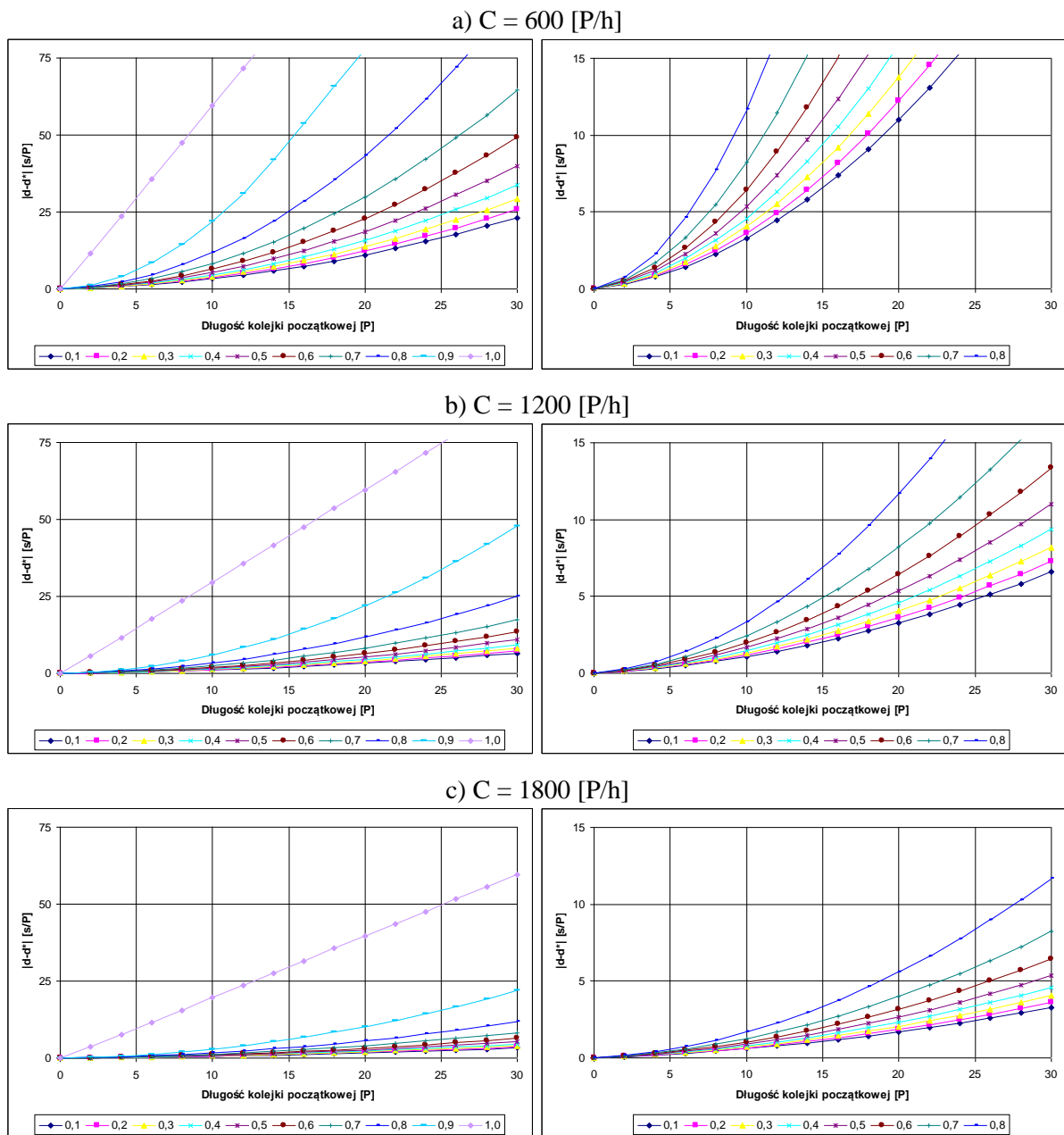
Dla tego porównania założono stałą wartość przepustowości $C=1200$ [P/h] przy zmieniającym się natężeniu ruchu. Stała wartość przepustowości przy zmiennej wartości splitu zielonego λ oznacza oczywiście różne wartości natężeń nasycenia dla poszczególnych wartości λ . Zestawienie dla trzech wartości λ przedstawia rysunek 8. Długość sygnału zielonego w stosunku do długości cyklu wpływa znacząco na wartość strat czasu. Przy niewielkim udziale sygnału zielonego w cyklu wartości strat czasu są zbliżone. Różnica między wyznaczonymi stratami czasu zwiększa się dynamicznie, gdy $\lambda \geq 0,5$. Przy wzroście stopnia obciążenia X

ponad wartość jedności względne odchylenie maleje. Jest to spowodowane spadkiem istotności składnika strat czasu d_3 w całkowitej stracie czasu.

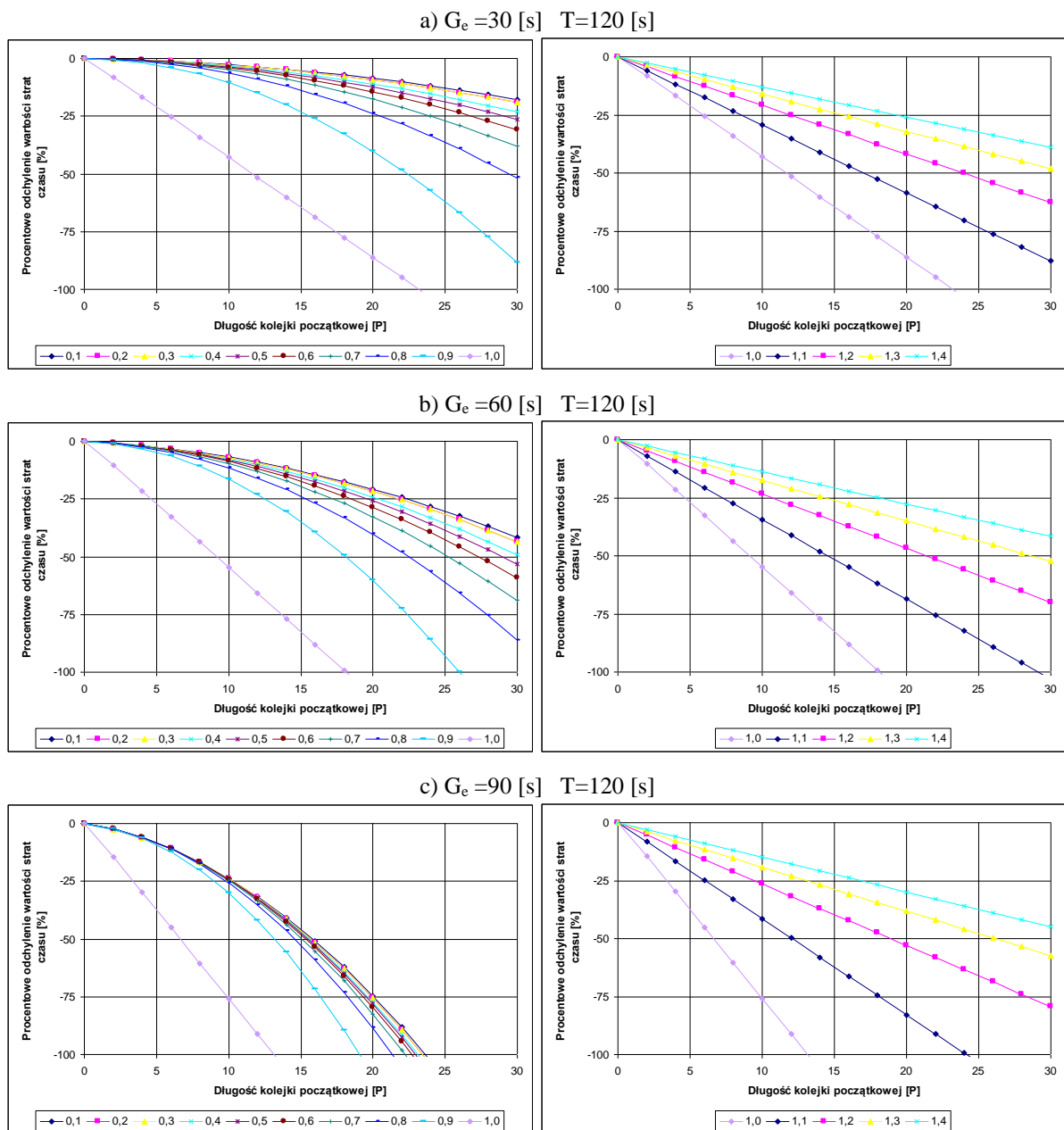


Rys. 6. Wartości strat czasu d^* dla różnych wartości przepustowości

Fig. 6. Time delay values d^* for different value of capacity



Rys. 7. Różnica między wartościami strat czasu dla różnych wartości przepustowości
 Fig. 7. Difference of time delay values for different value of capacity



Rys. 8. Procentowe porównanie wartości strat czasu przy zmianie udziału długości sygnału zielonego w cyklu

Fig. 8. Proportional comparison of time delay values for different value of green split

4. PODSUMOWANIE

Wykonane porównania numeryczne wskazują na potrzebę uwzględnienia w analizach strat czasu występowania kolejki na początku okresu analizy. Procedura zawarta w załączniku „Metody obliczania przepustowości skrzyżowań z sygnalizacją świetlną” [4] powinna być stosowana w sytuacjach wykonywania szczegółowych analiz konkretnych skrzyżowań. Co więcej, w świetle przedstawionych różnic wyznaczonych strat czasu należy wręcz rozważyć

wprowadzenie konieczności używania szczegółowej procedury, przynajmniej dla skrzyżowań o przepustowości wlotów mniejszej niż 1200 [P/h].

Należy pamiętać, że wyznaczone z formuł (1), (2), (3), (4) i (8) zawartych w [4] wartości strat czasu stanowią jedynie szacunki rzeczywistych strat ponoszonych średnio przez pojazdy na wlocie skrzyżowania z sygnalizacją świetlną. Rzeczywiste potoki ruchu wywołują losowe sytuacje, których odzwierciedlenie często jest trudne. Dążenie do uzyskania wartości maksymalnie zbliżonych do rzeczywistych stanowi problem badaczy z całego świata. Tym bardziej uwzględnienie jednego z zakłóceń realizacji przejazdu pojazdów zgłaszających się w danym okresie analizy, którym jest kolejka początkowa, powinno być uzasadnione.

Bibliografia

1. Datka S., Suchorzewski W., Tracz M.: Inżynieria ruchu. WKiŁ, Warszawa 1999.
2. Gartner N., Messer C. J., Rathi A. K.: Traffic Flow Theory. A State-of-the-Art Report. Transportation Research Board, Washington 2001. (Revised version of Special Report: Traffic Flow Theory, Washington 1975).
3. Highway Capacity Manual. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. 2000.
4. Metoda obliczania przepustowości skrzyżowań z sygnalizacją świetlną. GDDKiA, Warszawa 2004.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Romuald Szopa

Praca wykonana w ramach BW-514/RT5/2008