



Radosław BĄK

# SPOSOBY OBLICZANIA CZASÓW MIĘDZYZIELONYCH NA SKRZYŻOWANIACH ZAMIEJSKICH

### *Streszczenie*

*W artykule poruszono problematykę wyznaczania czasów międzyzielonych na zamiejskich skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną z wysokimi prędkościami potoku pojazdów. Przedstawiono sposoby obliczania czasów międzyzielonych w wybranych krajach i porównano je z przepisami krajowymi. Zwrócono uwagę na problem strefy dylematu w wymiarowaniu czasu międzyzielonego.*

### WSTĘP

Jednym z podstawowych wymagań warunkujących bezpieczeństwo ruchu na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną jest właściwe wyznaczenie dostatecznych wartości czasów międzyzielonych dla par strumieni ruchu o niedopuszczalnym jednoczesnym zezwoleniu na ruch. Czas międzyzielony definiuje się jako interwał między zakończeniem sygnału zielonego dla strumienia ewakuującego się a rozpoczęciem nadawania sygnału zielonego dla kolizyjnego strumienia dojeżdżającego (dochodzącego) [12] w kolejnej fazie ruchu. Okres ten składa się z sygnału żółtego, czerwonego we wszystkich fazach, w literaturze anglojęzycznej określanego jako *all red* oraz sygnału żółto-czerwonego (w kolejnej fazie).

Problem obliczania czasów międzyzielonych był szeroko dyskutowany od lat 60. XX w. i do dziś pozostaje aktualny. Wypracowanie jednolitych zasad przyjmowania czasu międzyzielonego okazało się niemożliwe. Przede wszystkim, przyjęcie określonej długości czasu międzyzielonego stanowi wypadkową próby realizacji wzajemnie sprzecznych celów – zapewnienia bezpieczeństwa i sprawności ruchu. Wydłużenie czasu między zezwoleniem na ruch dla konfliktowych strumieni ruchu prowadzi do wzrostu czasu traconego w cyklu (czasu nie wykorzystywanego na ruch pojazdów) i w konsekwencji spadku przepustowości skrzyżowania. O ile efekty te są stosunkowo łatwe do przewidzenia, to wpływ wydłużenia czasu międzyzielonego na poprawę bezpieczeństwa ruchu już nie. Za optymalne uznawane jest przyjęcie czasu międzyzielonego *możliwie najkrótszego jak to możliwe z uwzględnieniem wymogów brd*. Za tą generalną zasadą kryją się jednak różnicowane sposoby obliczania czasów międzyzielonych (u podstaw których leżą różne założenia), zwykle ujęte formalnie w wytycznych i instrukcjach krajowych.

Oprócz ustalenia długości czasu międzyzielonego, powiązaniem z nim zagadnieniem jest wyznaczenie długości sygnału żółtego. Szczególnego znaczenia problem ten nabiera na wlotach skrzyżowań z wyższym limitem prędkości dopuszczalnej, w tym na

skrzyżowaniach zlokalizowanych poza terenem zabudowy, ze względu na występowanie strefy dylematu.

## 1. OBLICZENIA CZASÓW MIĘDZYZIELONYCH WG [DZ.U]

Wymagania dotyczące obliczeń czasów międzyzielonych w kraju zawiera Załącznik nr 3 do Rozporządzenia nr 220, poz. 2181 z 2003 r. w sprawie szczegółowych warunków technicznych dla znaków i sygnałów drogowych oraz urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego i warunków ich umieszczania na drogach [12]. Podaje on wzory pozwalające wyznaczyć minimalną długość czasu międzyzielonego:

$$t_m(i, j) = t_z + t_e(i, j) - t_d(i, j) \quad [\text{s}] \quad (1)$$

$$t_{e(i,j)} = \frac{l_{e(i,j)} + l_{p(i)}}{v_{e(i)}} \quad [\text{s}] \quad (2)$$

$$t_{d(i,j)} = \frac{l_{d(i,j)}}{v_{d(j)}} + 1 \quad [\text{s}] \quad (3)$$

$$t_{d(i,j)} = \sqrt{\frac{2 \cdot (l_{d(i,j)} + 1.5)}{a}} \quad [\text{s}] \quad (4)$$

w których:

- $i$  – strumień ewakuujący się,
- $j$  – strumień dojeżdżający,
- $t_m(i, j)$  – czas międzyzielony dla pary strumieni  $(i, j)$  [s],
- $t_z$  – długość sygnału żółtego (3 s),
- $t_e(i, j)$  – czas ewakuacji strumienia  $i$  poza punkt kolizji ze strumieniem  $j$  [s],
- $t_d(i, j)$  – czas dojazdu strumienia  $j$  do punktu kolizji ze strumieniem  $i$  [s],
- $l_e(i, j)$  – długość drogi ewakuacji strumienia  $i$  od linii warunkowego zatrzymania do punktu kolizji ze strumieniem  $j$  [m],
- $l_d(i, j)$  – długość drogi dojazdu strumienia  $j$  od linii warunkowego zatrzymania do punktu kolizji ze strumieniem  $i$  [m],
- $v_e(i)$  – prędkość ewakuacji strumienia  $i$  [m/s],
- $v_d(j)$  – prędkość dojazdu strumienia  $j$  [m/s],
- $a$  – przyspieszenie pojazdu dojeżdżającego strumienia  $j$  [m/s<sup>2</sup>],
- $l_p$  – wydłużenie drogi ewakuacji strumienia  $i$  o długość pojazdu ewakuującego się (10 m dla strumienia ogółu pojazdów, 0 m dla pieszych, 14 m dla autobusów i wielokrotność 13.5 m dla pociągów tramwajowych).

Obliczenia wykonuje się dla wszystkich punktów kolizji (przecięć osi korytarzy ruchu pojazdów). Metoda zakłada, że najpóźniejszym momentem wjazdu na skrzyżowanie jest ostatnia sekunda sygnału żółtego, toteż wjazdy na skrzyżowanie podczas sygnału czerwonego stają się ryzykowne. Przy wyznaczeniu czasu ewakuacji zakłada się stałą prędkość przejazdu poza punkt kolizji. Czas dojazdu wyznaczać można przy założeniu wjazdu na tarczę skrzyżowania z określoną prędkością początkową (wzór 3) lub ze startu zatrzymanego ruchu jednostajnie przyspieszonym. Obliczenia zakładające postój pojazdu prowadzą do wyznaczenia krótszego czasu międzyzielonego, toteż ze wzoru (4) należy korzystać tylko

w przypadku pewności, że w momencie zmiany sygnału na zielony pojazdy na wlocie stały. W praktyce oznacza to ograniczenie wzoru (4) do przypadku przystanku autobusowego lub tramwajowego na wlocie skrzyżowania lub zastosowania zmiennoczasowego systemu sterowania przyznającego sygnał zielony jedynie po zgłoszeniu pojazdu oczekującego przy linii zatrzymania. Prędkość dojazdu przyjmuje się jako dopuszczalną na wlocie  $v_{dop}$ , przy czym dopuszcza się przyjmowanie niższych prędkości, ze względu na specyfikę geometryczną skrzyżowania (pochylenia podłużne, promienie skrętu).

Metoda obliczeniowa wymagana zapisami [12] posiada prostą interpretację, która nie budzi większych wątpliwości. Jako dyskusyjne, czy kontrowersyjne elementy modelu obliczeniowego czasów międzyzielonych można wymienić:

- stałą długość sygnału żółtego, niezależną od prędkości dopuszczalnej,
- niedookreśloność wartości prędkości ewakuacji i dojazdu, jakie należy przyjmować do obliczeń,
- dodawanie do wzoru na czas dojazdu (3) 1 s.

Szczególnie kłopotliwe dla projektantów sygnalizacji świetlnej wydają się być wymagania dotyczące prędkości dojazdu i ewakuacji. W obliczeniach minimalnej długości czasu międzyzielonego [12], podano że prędkość ewakuacji *należy przyjmować* równą prędkości dopuszczalnej lecz nie większą niż 14 m/s, co w większości przypadków sprowadza się do przyjęcia  $v_e = 14$  m/s. Pojazdy wjeżdżające na skrzyżowanie z niższą prędkością, nie są zatem chronione poprzez minimalny czas międzyzielony (wzór 1). W praktyce projektanci przyjmują różne wartości prędkości ewakuacji i dojazdu. Na podstawie przeglądu kilkudziesięciu projektów sygnalizacji skrzyżowań zlokalizowanych poza terenem zabudowy na drogach krajowych z całego kraju (pozyskano projekty z Oddziałów GDDKiA: małopolskiego, śląskiego, świętokrzyskiego, opolskiego, dolnośląskiego, mazowieckiego, kujawsko-pomorskiego, pomorskiego, warmińsko-mazurskiego, wielkopolskiego i lubuskiego) ustalono sposoby doboru prędkości ewakuacji i dojazdu przez projektantów. Wyniki analizy przedstawiono w tab. 1.

**Tab. 1.** Prędkości dojazdu i ewakuacji przyjmowane w projektach sygnalizacji (opracowanie własne)

	Ewakuacja / dojazd Strumienie ruchu	Przyjmowana prędkość	Województwo <sup>1)</sup>	Wymogi rozporządzenia
1	<b>Ewakuacja</b> relacja na wprost droga krajowa ( $v_{dop} = 70$ km/h)	50 km/h (13,9 m/s)	lubuskie, małopolskie, dolnośląskie, śląskie, mazowieckie	$v_e = \min(v_{dop}, 14$ m/s)
2		40 km/h (11,1 m/s)	małopolskie, opolskie, wielkopolskie	
3	<b>Ewakuacja</b> relacje skrętne	50 km/h (13,9 m/s)	dolnośląskie <sup>3)</sup>	
4		40 km/h (11,1 m/s)	opolskie, dolnośląskie <sup>4)</sup> , mazowieckie	
5		35 km/h (9,7 m/s)	opolskie, małopolskie, śląskie	
6		30 km/h (8,3 m/s)	małopolskie, wielkopolskie	
7	<b>Dojazd</b> na wprost ( $v_{dop} = 90$ km/h)	100 km/h (36 m/s) 90 km/h (25,7 m/s)	mazowieckie <sup>5)</sup> opolskie	$v_e = v_{dop}^{max}$ z możliwością korekty z uwagi na specyfikę geometrii
8	<b>Dojazd</b> relacja na wprost ( $v_{dop} = 70$ km/h)	90 km/h (25,0 m/s)	dolnośląskie	
9		70 km/h (19,4 m/s)	małopolskie, dolnośląskie	
10		60 km/h (16,7 m/s)	lubuskie <sup>2)</sup> , opolskie <sup>2)</sup> , wielkopolskie	
11	<b>Dojazd</b>	60 km/h (16,7 m/s)	lubuskie, opolskie,	

	relacje skrajne		dolnośląskie, wielkopolskie, śląskie
12		< 60 km/h	małopolskie, śląskie

- <sup>1)</sup> – w zestawieniu pominięto projekty z województw: kujawsko-pomorskiego i pomorskiego, nie zawierają bowiem obliczeń czasów międzyzielonych, a także świętokrzyskiego (brak skrzyżowań z  $v_{dop} > 50$  km/h)
- <sup>2)</sup> – wartość stała niezależnie od trajektorii ruchu i rodzaju relacji
- <sup>3)</sup> – relacje bezkolizyjne, niezależnie od geometrii wlotu
- <sup>4)</sup> – relacje skrajne kolizyjne
- <sup>5)</sup> – wyniki obliczeń nie miały wpływu na przyjęcie czasów międzyzielonych

Przegląd stosowanych rozwiązań wskazuje na różne metody przyjmowania prędkości dojazdu i ewakuacji:

- prędkość ewakuacji relacji na wprost przyjmowana jest jako stała, na ogół równa 50 km/h, choć zdarzają się wartości niższe – 40 km/h,
- dla relacji skrajnych prędkość ewakuacji przyjmowana jest jako niższa od wymaganych 14 m/s, rzadziej zgodnie z zapisem Rozporządzenia jako 50 km/h,
- zazwyczaj prędkość dojazdu nie jest korygowana z uwagi na geometrię wlotu, lecz przyjmowana jako stała wartość wynosząca 60 km/h, również gdy dopuszczalne prędkości są wyższe niż 60 km/h; w nielicznych przypadkach prędkość dopuszczalną przyjmowano wyższą od dopuszczalnej (nawet 100 km/h).
- prędkości dojazdu i ewakuacji uzależnia się od rodzaju relacji (kolizyjna, bezkolizyjna) lub rodzaju wlotu (droga krajowa, wloty boczne)
- nie stosuje się w obliczeniach dojazdu ze startu zatrzymanego lub stosuje się go jako wartość porównawczą w stosunku do czasu dojazdu ze „startu lotnego” (decyduje gorszy przypadek – krótszy czas dojazdu).

W większości przypadków dobór prędkości ewakuacji i dojazdu wskazuje na pewną dozę arbitralności (wszystkie strumienie danej kategorii lub danego wlotu mają założone identyczne wartości prędkości). W nielicznych projektach pominięto analizę niektórych strumieni ruchu, jeśli miały wspólny punkt startowy z innymi, co stanowi zbytek uproszczenie obliczeń. W kilku projektach zauważono przyjmowanie końcowej, wyższej wartości czasu międzyzielonego niezależnej od wyników obliczeń minimalnych czasów międzyzielonych. Przyjmowanie prędkości literalnie wg [12] skutkuje wyznaczeniem stosunkowo krótkich czasów międzyzielonych. Problem prędkości ewakuacji dla strumieni ruchu różnych relacji przedstawiono w [4], natomiast w [1] analizy prędkości relacji na wprost na zamiejskich skrzyżowaniach z sygnalizacją.

## 2. PORÓWNANIE WYBRANYCH METOD OBLICZANIA CZASÓW MIĘDZYZIELONYCH

Podejście do wyznaczania czasów międzyzielonych cechuje się pewną specyfiką w zależności od danego kraju. Przegląd zapisów wymagań formalnych oraz literatury dotyczącej tego zagadnienia pozwala na dokonanie podziału metod obliczania czasu międzyzielonego ze względu na liczne kryteria, jak np.:

- odwzorowanie trajektorii ruchu pojazdów,
- sposób wymiarowania sygnału żółtego,
- dokładność obliczeń,
- elementy składowe czasu międzyzielonego,
- założenia co do zachowań kierujących (np. wykorzystania sygnału żółtego) itd.

W uproszczeniu można wyróżnić dwa przeciwstawne podejścia, których kombinacje obejmują większość ze stosowanych metod obliczeniowych:

- metody proste, z powodzeniem stosowane w USA,
- metody złożone, charakterystyczne głównie dla Europy kontynentalnej.

Poprzez złożoność metody rozumie się tu zastosowanie koncepcji punktów kolizji, których lokalizację wyznacza krzyżowanie się trajektorii ruchu określonych dla wszystkich strumieni pojazdów na skrzyżowaniu. W wyznaczeniu czasu międzyzielonego dla grup sygnałowych rozpatruje się wszystkie możliwe kombinacje strumieni wzajemnie kolizyjnych (decyduje wartość krytyczna – najdłuższa obliczona). Sygnał żółty jest zwykle ustalony, a sygnał czerwony wymiarowany niezależnie od niego, zazwyczaj w oparciu o moment wjazdu ostatniego pojazdu w kończącej się fazie, czas ewakuacji i dojazdu. Przykładem tej metody są zapisy krajowe [12] oraz wymagania innych krajów europejskich – Niemiec, Francji, Holandii czy krajów skandynawskich.

Wymagania dotyczące projektowania sygnalizacji świetlnej, w tym obliczeń czasów międzyzielonych w Niemczech zawiera RilSA [6]. Sposób obliczania czasu międzyzielonego jest podobny do metody krajowej, jednakże bardziej precyzyjny i pozbawiony wymienionych dla metody polskiej dyskusyjnych zapisów. Długość sygnału żółtego uzależniona jest od prędkości dopuszczalnej na wlocie, co pozwala ograniczyć występowanie strefy dylematu –  $t_z$  przyjmuje się równy 3, 4 lub 5 s odpowiednio dla  $v_{dop} = 50, 60$  i  $70$  km/h.

Zakłada się sześć szczególnych przypadków ewakuacji: pojazdów relacji na wprost, relacji skrętnych, pieszych, rowerzystów, tramwajów i pojazdów komunikacji zbiorowej zatrzymujących się na przystanku na wlocie skrzyżowania. Najpóźniejszy moment wjazdu w przeciwieństwie do zapisów [12] jest niezależny od momentu zmiany sygnału żółtego na czerwony - przyjmuje się równy 3 s dla relacji na wprost, niezależnie od prędkości dopuszczalnej i 2 s dla relacji skrętnych. Oznacza to, że, zwłaszcza dla wlotów o  $v_{dop} > 50$  km/h, część sygnału żółtego nie będzie wykorzystana na wjazdy na tarczę skrzyżowania, co jawi się jako ryzykowne założenie ze względu na występowanie strefy dylematu, zwłaszcza jeśli stopień respektowania sygnałów nie będzie wysoki. Niebezpieczeństwo wynikające z późniejszych wjazdów ogranicza przyjmowanie niskiej prędkości ewakuacji. Dla relacji na wprost jest to 10 m/s, dla relacji skrętnych 5 lub 7 m/s zależnie od wartości promienia. Wartość 10 m/s jest bardziej konsensusem pomiędzy inżynierami ruchu niż wynikiem badań empirycznych prędkości ewakuacji. Oprócz wzorów 1÷4, w metodzie niemieckiej należy dodatkowo sprawdzić, czy zakładany moment wjazdu  $t_w$  powiększony o czas ewakuacji  $t_e$  jest dłuższy o co najmniej 1 s od sygnału żółtego  $t_z$ :

$$t_w + t_e(i, j) \geq t_z + 1 \quad (5)$$

Warunek ten powinien gwarantować, że pojazdy, które przy zmianie sygnałów nie zatrzymają się przed linią zatrzymań w czasie sygnału żółtego, nie spowodują bezpośredniego zagrożenia dla strumieni rozpoczynających ruch, w szczególności dla pieszych lub rowerzystów, których powierzchnia kolizji znajduje się w pobliżu (sąsiaduje) linii zatrzymań. Długość pojazdu  $l_e$  przyjmuje się równą 6 m (pojazdy), 15 m (tramwaje) lub 0 m (rowerzyści).

W przypadku czasu dojazdu zakłada się, że pojazdy wjeżdżają na tarczę skrzyżowania w pierwszej sekundzie sygnału zielonego z prędkością początkową równą 40 km/h (we wzorze 3 nie dodaje się 1 s). Nie dotyczy to pieszych oraz tramwajów. Obliczoną długość czasu międzyzielonego zaokrąglą się w górę do wartości całkowitej.

Wymagania francuskie [9] nie zawierają tak szczegółowych wytycznych obliczania czasów międzyzielonych jak metoda krajowa i niemiecka. Prędkość ewakuacji pojazdu wjeżdżającego na skrzyżowanie w ostatniej sekundzie sygnału żółtego przyjmuje się równą 10 m/s, natomiast pieszych wchodzących na przejście w ostatniej sekundzie sygnału zielonego równą 1.0 m/s. Specjalną analizą należy objąć tramwaje, dla których sugeruje się

zastosowanie detekcji pozwalającej na ocenę, czy tramwaj opuścił punkt kolizji. Długość sygnału żółtego uzależniona jest od lokalizacji skrzyżowania i wynosi 3 s dla miast i 5 s dla terenów zamiejskich. W obliczeniach pomija się czas dojazdu (pojazdy muszą ewakuować się poza punkt kolizji do momentu przyznania sygnału zielonego dla kolizyjnych strumieni ruchu).

W Stanach Zjednoczonych jedyne wytyczne o zasięgu ogólnokrajowym – *Manual on Uniform Traffic Control Devices* [11] – nie zawierają wymagań co do sposobu wyznaczania czasu międzyzielonego poza obowiązkiem stosowania sygnału żółtego i opcjonalnie sygnału czerwonego (*all red*). Braki te wypełniono na szczeblu federalnym, co doprowadziło do zróżnicowania sposobów obliczania czasu międzyzielonego. Istotnym elementem rzutującym na metodę obliczeniową jest stan prawny sygnału żółtego, który może dopuszczać wjazdy na skrzyżowanie w trakcie jego trwania (*permissive rule*) lub być traktowany jako sygnał zabraniający wjazdu z wyłączeniem sytuacji braku możliwości zatrzymania się (*restrictive rule*). Rzutuje to na moment od którego liczony ma być czas ewakuacji pojazdu z tarczy skrzyżowania. Podjęte działania w celu harmonizacji obliczeń czasów międzyzielonych [10] zakładały dopuszczalność wjazdów podczas sygnału żółtego i wykorzystanie najczęściej stosowanej metody przedstawionej w serii kolejnych wydań podręcznika do inżynierii ruchu [8]. Długość czasu międzyzielonego wyznacza się ze wzoru:

$$Y + R = t_r + \underbrace{\frac{v^2}{2b \pm 2gi}}_Y + \underbrace{\frac{W + l_p}{v}}_R \quad (6)$$

w którym:

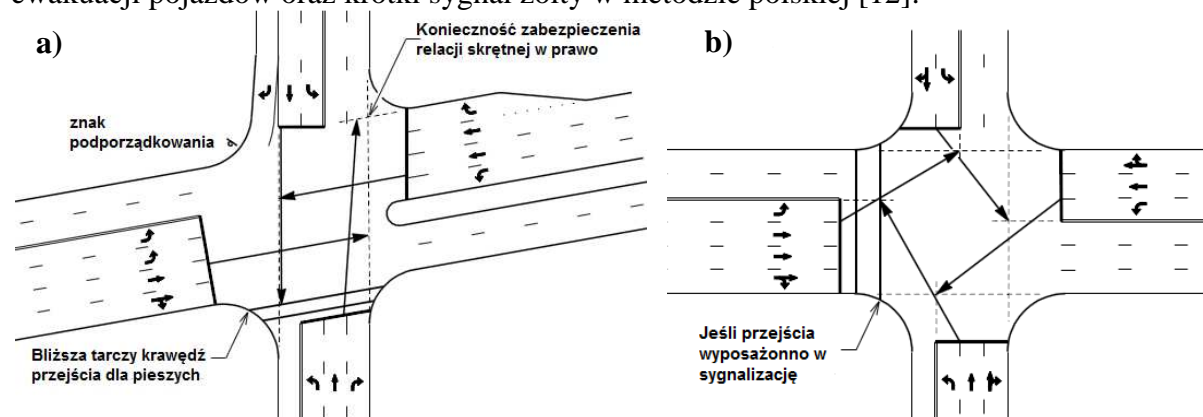
- Y + R – długość sygnału żółtego (*yellow*) i czerwonego (*red*) [s],
- $t_r$  – czas reakcji kierowcy [s],
- $v$  – prędkość pojazdu zbliżającego się do linii zatrzymania [m/s],
- $b$  – opóźnienie pojazdu [m/s<sup>2</sup>],
- $g$  – przyspieszenie ziemskie (9.81 m/s<sup>2</sup>),
- $i$  – pochylenie podłużne jezdni [-]
- $W$  – droga ewakuacji,
- $l_p$  – długość pojazdu.

Wzór ten stanowi implementację modelu kinematycznej strefy dylematu modelu GHM [2] w wymiarowaniu długości sygnału żółtego. Długość sygnału żółtego pozwala na wjazd pojazdu, który poruszając się z prędkością  $v$  w momencie zmiany sygnału zielonego na żółty nie zdecyduje się na zatrzymanie wymagające opóźnień  $b$  na wlocie o pochyleniu podłużnym  $i$ . Pojazdy poruszające się wolniej, zatrzymują się. Wartości parametrów nie są określone, natomiast amerykańska agencja AASHTO zaleca stosowanie opóźnienia równego 3 m/s<sup>2</sup> (wartość przeciętna) i czasu reakcji równego 1.0 s (kwantyl 95% czasu reakcji uzyskany w badaniach laboratoryjnych). Zakładana prędkość przyjmowana do obliczeń powinna być równa prędkości miarodajnej  $v_{85}$  (kwantylowi 85% prędkości jazdy) lub prędkości dopuszczalnej na wlocie skrzyżowania [8].

Drugi człon wzoru (6) dotyczy czasu ewakuacji pojazdu, który z prędkością  $v$  wjeżdża na skrzyżowanie w ostatniej sekundzie sygnału żółtego. Zakładana długość drogi ewakuacji  $W$  jest utożsamiana z długością między linią zatrzymania i krawędzią przejścia dla pieszych bliższą tarczy skrzyżowania na wlocie skrzyżowania lub, w przypadku jego braku, za końcem najbardziej oddalonego pasa ruchu wlotu poprzecznego. Dotyczy to także relacji

skrętnych, przy czym odcinek  $W$  jest wymiarowany jako prosta. Przykład ustalenia drogi ewakuacji pokazano na rys. 1.

W tabelicy 2 zestawiono porównanie metod obliczania czasów międzyzielonych dla czterech krajów – Polski, USA, Niemiec i Francji. Porównanie zwraca uwagę na specyfikę metody obliczeniowej stosowanej w Stanach Zjednoczonych. Metoda krajowa oraz niemiecka i francuska są stosunkowo podobne, jednakże różnice prowadzą do uzyskania różnych czasów międzyzielonych dla takiej samej geometrii skrzyżowania. Zwraca uwagę wysoka prędkość ewakuacji pojazdów oraz krótki sygnał żółty w metodzie polskiej [12].



**Rys. 1.** Droga ewakuacji a) relacje na wprost, b) relacje skrajne w lewo [7]

**Tab. 2.** Porównanie elementów metody wyznaczania czasu międzyzielonego w różnych krajach.

Założenia metod	Polska [12]	USA [8]	Niemcy [6]	Francja [9]
Wymiarowanie sygnału żółtego i czerwonego	niezależne	zależne	niezależne	niezależne
Długość sygnału żółtego	3 s	3 ÷ 5 s obliczane z równań kinematyki ruchu	3, 4, 5 s zależne od $v_{dop}$	3 s dla miast 5 s dla terenów pozamiejskich
Zakładany moment wjazdu na skrzyżowanie	ostatnia sekunda sygnału żółtego	ostatnia sekunda sygnału żółtego	w trakcie sygnału żółtego	ostatnia sekunda sygnału żółtego
Prędkość ewakuacji	$\min \{14 \text{ m/s}, v_{dop}\}$	$v_{dop}$ lub $v_{85\%}$	10 m/s	10 m/s
Punkt kolizji	przecięcie trajektorii ruchu kolizyjnych strumieni	koniec tarczy skrzyżowania	przecięcie trajektorii ruchu kolizyjnych strumieni	przecięcie trajektorii ruchu kolizyjnych strumieni
Długość pojazdu ewakuującego się	10 m	6,1 m	6,0 m	6,0 m
Trajektoria ruchu	odzworowanie osi korytarza przejazdu	odcinek prosty	odzworowanie osi korytarza przejazdu	odzworowanie osi korytarza przejazdu
Czas dojazdu	ze startu lotnego bądź zatrzymanego	brak czasu dojazdu	ze startu lotnego	brak czasu dojazdu
Długość czasu międzyzielonego	min. 0 s.	min 3 s. zalecane max 6 s.	min. 4 s	b.d.
Dokładność obliczeń	1 s	0.2 s	1 s	1 s

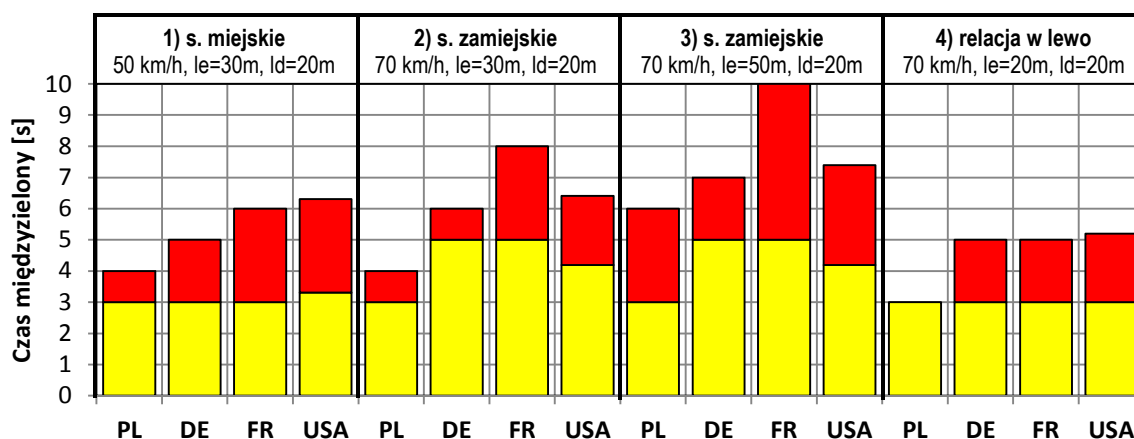
W celu porównania sposobów wyznaczenia czasów międzyzielonych dla różnych krajów wykonano obliczenia czasów międzyzielonych dla przyjętych czterech przypadków krzyżowania się strumieni ruchu. Jeśli wymagania formalne dawały swobodę wyboru parametrów (prędkość ewakuacji, dojazdu), przyjmowano zalecane wartości, a w przypadku ich braku skrajnie dopuszczalne przepisami. Warianty obliczeniowe oraz wyniki obliczeń zestawiono w tab. 3. oraz w formie graficznej przedstawiono na rys. 2.

Dla skrzyżowania zamiejskiego, najdłuższe czasy międzyzielone daje metoda francuska ze względu na długi sygnał żółty oraz brak czasu dojazdu we wzorze (1). Należy zaznaczyć, że zalecenia francuskie [9] nakazują stosować sygnalizację świetlną poza terenem zabudowy tylko w ostateczności. Okazuje się, że czasy międzyzielone wyznaczone wg literalnie potraktowanej metody krajowej (bez korekty prędkości ewakuacji i dojazdu) są znacznie krótsze niż dla zagranicznych zaleceń. Dla skrzyżowań zamiejskich o podwyższonej prędkości dopuszczalnej unacznia się wpływ krótkiego sygnału żółtego. Uwzględnienie czasu dojazdu bez warunków ograniczających może powodować, że dla pewnych kombinacji drogi ewakuacji i dojazdu czas międzyzielony może być krótszy od sygnału żółtego. Należałoby rozważyć wprowadzenie dodatkowych warunków w procedurze wyznaczania czasu międzyzielonego uniemożliwiających przyjęcie czasu międzyzielonego krótszego niż 3 lub nawet 4 s.

**Tab. 3.** Wyznaczenie czasów międzyzielonych wg wymagań krajowych i zagranicznych

War.	Strumienie konfliktowe na skrzyżowaniu		PL	D	FR	USA*
1)	skrzyż. miejskie, relacja na wprost, $v_{dop} = 50 \text{ km/h}$ , $l_e = 30 \text{ m}$ , $l_d = 20 \text{ m}$	Ż	3,0	3,0	3,0	3,3
		R	4,0	5,0	6,0	6,3
2)	skrzyż. zamiejskie, relacja na wprost, $v_{dop} = 70 \text{ km/h}$ , $l_e = 30 \text{ m}$ , $l_d = 20 \text{ m}$	Ż	3,0	5,0	5,0	4,2
		R	4,0	6,0	8,0	6,4
3)	skrzyż. zamiejskie, relacja na wprost, $v_{dop} = 70 \text{ km/h}$ , $l_e = 50 \text{ m}$ , $l_d = 20 \text{ m}$	Ż	3,0	5,0	5,0	4,2
		R	6,0	7,0	10,0	7,4
4)	skrzyż. zamiejskie, relacja w lewo, $v_{dop} = 70 \text{ km/h}$ , $l_e = 20 \text{ m}$ , $l_d = 20 \text{ m}$	Ż	3,0	3,0	3,0	3,0
		R	3,0	5,0	5,0	5,2

\* - z uwagi na brak punktu kolizji, drogę ewakuacji powiększono o 6m.



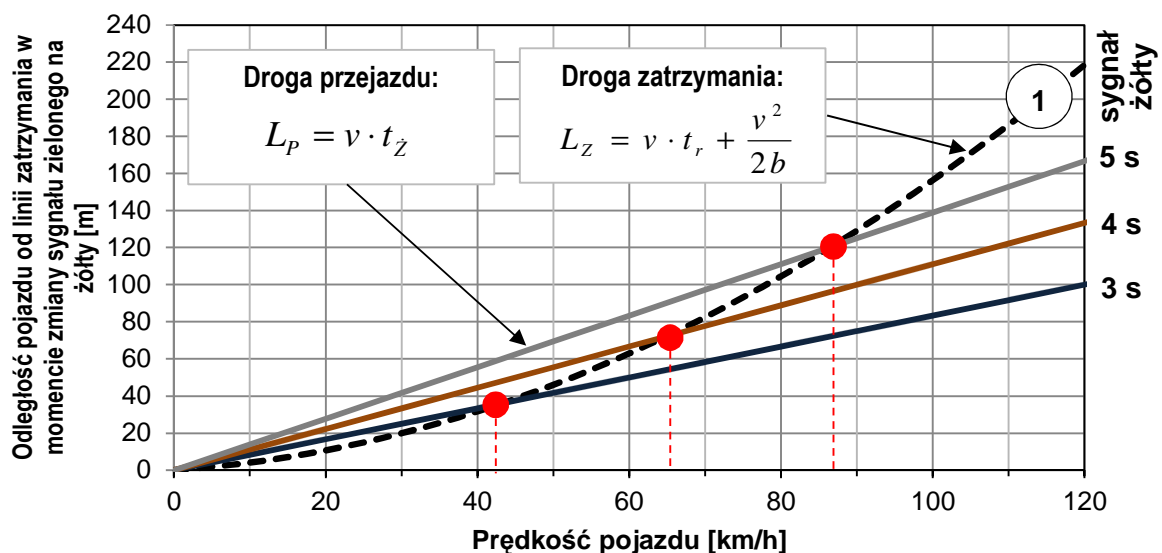
**Rys. 2.** Porównanie czasów międzyzielonych obliczonych wg wytycznych w różnych krajach.

### 3. WPŁYW STREFY DYLEMATU NA WYMIAROWANIE CZASU MIĘDZYZIELONEGO

Przedstawione metody wyznaczania czasów międzyzielonych, uwzględniają czynnik prędkości poprzez dobór prędkości ewakuacji i dojazdu oraz przyjęcie długości sygnału żółtego. Na zamiejskich skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną prędkości potoku pojazdów



są zwykle znacznie wyższe niż na skrzyżowaniach miejskich. Z jednej strony przyczynia się to do skrócenia rzeczywistej długości czasu ewakuacji w porównaniu do obliczonych wartości, z drugiej może prowadzić do wjazdów na tarczę skrzyżowania po zmianie sygnału żółtego na czerwony ze względu na występowanie tzw. strefy dylematu. Jest to obszar na dojeździe do skrzyżowania, w którym znajdujący się pojazd w momencie zakończenia sygnału zielonego nie jest w stanie bezpiecznie zatrzymać się ani zdążyć wjechać na skrzyżowanie w trakcie sygnału żółtego. Kinematyczny model strefy dylematu oraz problem wjazdów na sygnale czerwonym z niego wynikający przedstawiono dokładniej w [5], natomiast problem wysokich prędkości w [1]. Metoda niemiecka, a w jeszcze większym stopniu amerykańska metoda obliczania czasów międzyzielonych ogranicza negatywne konsekwencje występowania strefy dylematu poprzez zmienną długość sygnału żółtego. Wydłużenie sygnału żółtego powoduje skrócenie strefy dylematu, co przedstawia rys. 3. W warunkach krajowych długość sygnału żółtego  $t_z = 3$  s jest niewystarczająca na skrzyżowaniach z limitem prędkości przekraczającym 50 km/h. Prowadzi to do wjazdów podczas sygnału czerwonego na tarczę skrzyżowania.



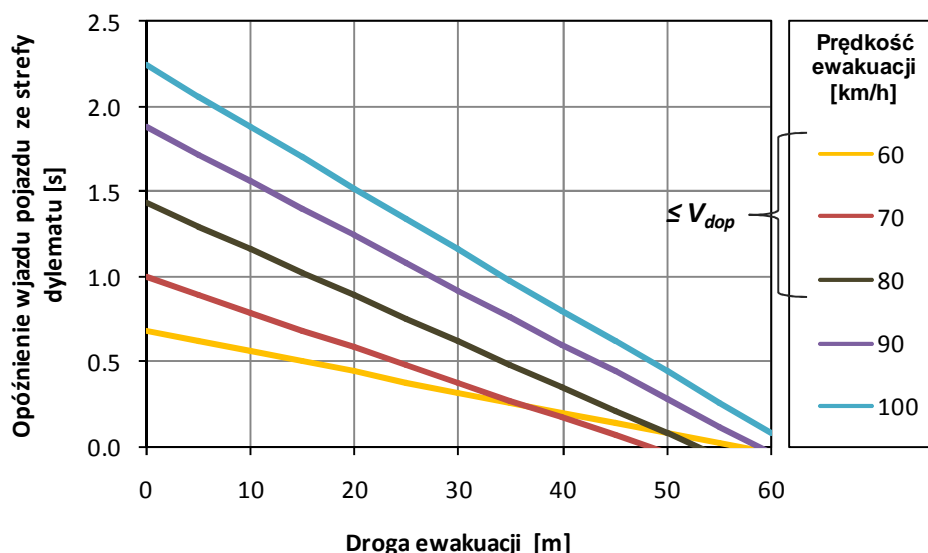
Rys. 3. Lokalizacja i zasięg strefy dylematu dla różnych długości sygnału żółtego.

Zakładając, że decyzja kierującego pojazdem o przejeździe przez skrzyżowanie, który znalazł się w strefie dylematu w momencie zmiany sygnału zielonego na żółty jest usprawiedliwiona [3, 5], obliczono, ile powinien wynosić czas ewakuacji  $t_e$ , jeśli nie dopuszcza się możliwości wydłużenia sygnału żółtego. Założono, że każdy pojazd znajdujący się na samym początku strefy dylematu – w odległości  $L_z$  od linii stop (krzywa 1 na rys. 3), z której nie może już bezpiecznie zatrzymać się z opóźnieniem uznawanym za bezpieczne (przyjęto  $b = 3.0 \text{ m/s}^2$ ) – kontynuuje jazdę ze stałą prędkością i przejeżdża przez skrzyżowanie. Wówczas oprócz wyznaczenia czasu ewakuacji  $t_e$  ze wzoru (2), dla  $v_{dop} > v_e$  należałoby wyznaczyć czas ewakuacji z uwzględnionym wjazdem na sygnale czerwonym z prędkością dopuszczalną:

$$t_{e(i,j)} = \frac{l_{e(i,j)} + l_{p(i)}}{v_{dop(i)}} + \frac{v_{dop(i)} - 12}{6} \quad [\text{s}] \quad (7)$$

gdzie:  $v_{dop(i)}$  – prędkość dopuszczalna dla strumienia ewakuującego się  $i$ , natomiast pozostałe oznaczenia są zgodne ze wzorem (2).

Dla najwyższych prędkości ( $90 \div 100$  km/h), moment przejazdu pojazdu przez linię zatrzymania może mieć miejsce w 1.8 s do 2.2 s nadawania sygnału czerwonego. Jeśli przejazd przez tarczę odbywa się ze stałą prędkością, dopiero ok. 60 m od linii zatrzymania następuje kompensacja zagrożenia wypadkiem ze względu na wyższą rzeczywistą prędkość ewakuacji (rys. 4). Dla stosowanych limitów prędkości na skrzyżowaniach zamiejskich  $60 \div 80$  km/h, czas ewakuacji powinien być zwiększony o  $1 \div 2$  s w zależności od długości drogi ewakuacji do punktu kolizji (rys. 4).

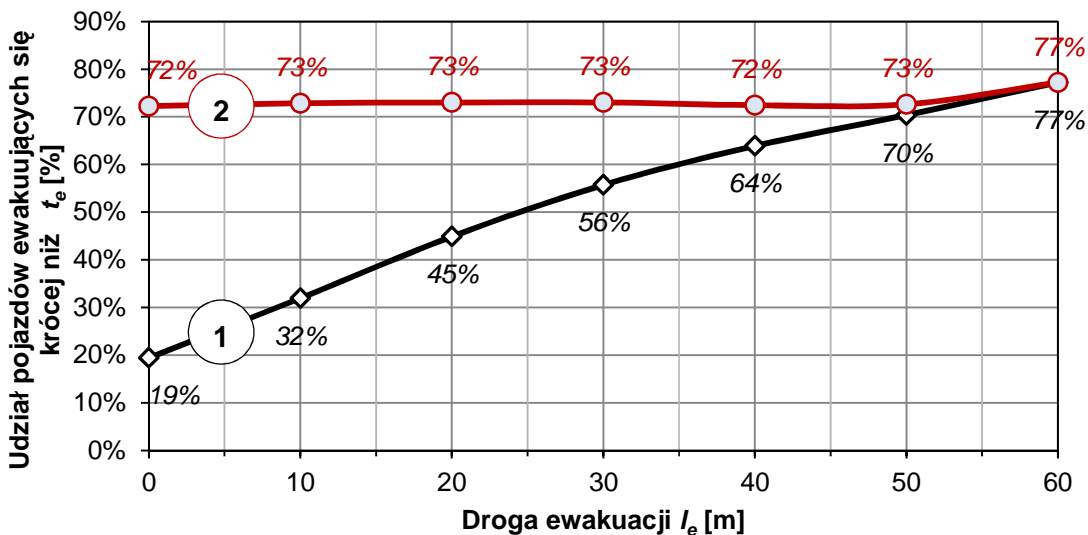


**Rys. 4.** Wydłużenie czasu ewakuacji w stosunku do obliczonego w celu uwzględnienia wjazdu pojazdów na tarczę ze strefy dylematu.

Efekty zastosowania wzoru (7) w obliczeniach czasu międzyzielonego wyznaczono na podstawie badań empirycznych wjazdów pojazdów na skrzyżowanie podczas sygnału czerwonego dla zamiejskich skrzyżowań z sygnalizacją świetlną przedstawionych w [5]. Dla każdego spośród 527 pojazdów wjeżdżających na skrzyżowanie po zmianie sygnału żółtego na czerwony wyznaczono rzeczywisty czas ewakuacji poza punkt kolizji uwzględniający moment wjazdu na tarczę skrzyżowania oraz prędkość ewakuacji, a następnie porównano z czasem ewakuacji wyznaczonym ze wzorów (2) oraz (7). Udział pojazdów, których czas ewakuacji jest krótszy od wyznaczanych teoretycznie przedstawiono w tab. 4. oraz na rys. 5. Dla drogi ewakuacji rzędu  $10 \div 40$  m czas ewakuacji pojazdów jest dłuższy od obliczonego od 32% do 64%. Wydłużenie drogi ewakuacji powoduje spadek liczby pojazdów, których czas ewakuacji jest ryzykowny, by dla  $l_e = 60$  m wynieść 23%. Wartość ta jest zbliżona do udziału pojazdów, których wjazdy na tarczę podczas sygnału czerwonego wynikają ze znajdowania się w strefie dylematu (26% wg [5]). Wprowadzenie do obliczeń wzoru (7) w wymiarowaniu czasu międzyzielonego zwiększa chronionych czasem międzyzielonym udział ewakuujących się pojazdów do ok. 73% niezależnie od długości odcinka ewakuacji.

**Tab. 4.** Udział pojazdów wjeżdżających na skrzyżowanie w trakcie sygnału czerwonego, których czas ewakuacji jest krótszy niż wyznaczony ze wzorów (2) i (7)

droga ewakuacji $l_e$ [m]	0	10	20	30	40	50	60
wzór (2)	19%	32%	45%	56%	64%	70%	77%
wzór (2) i (7)	72%	73%	73%	73%	72%	73%	77%
różnica (7) – (2)	+53%	+41%	+28%	+17%	+9%	+2%	0%



Rys. 5. Udział pojazdów wjeżdżających na skrzyżowanie w trakcie sygnału czerwonego, których ewakuację zabezpieczają wzory (1) wg [12] i (2) proponowany.

## PODSUMOWANIE

Poprawne wyznaczenie czasu międzyzielonego jest kluczowym zagadnieniem dla zapewnienia bezpieczeństwa ruchu na skrzyżowaniu. Regulacje krajowe dotyczące obliczania czasów międzyzielonych [12]

Każdy pojazd wjeżdżający na skrzyżowanie w ostatniej sekundzie sygnału żółtego i poruszający się wolniej od przyjętej  $v_e$ , nie jest należycie chroniony przed kolizją. Aby tego uniknąć projektanci samodzielnie przyjmują wartości prędkości ewakuacji i dojazdu, cechuje się to jednak pewną dozą arbitralności.

Analiza porównawcza metod obliczania czasów międzyzielonych dla Polski, Niemiec, Francji i USA pokazuje, że czasy międzyzielone obliczane wg polskich przepisów [12] są stosunkowo krótkie. Niemieckie wytyczne są bardziej szczegółowe od krajowych, głównie dzięki określeniu prędkości ewakuacji i dojazdu, jakie należy stosować w obliczeniach dla różnych strumieni ruchu pojazdów i pieszych. Najpopularniejsza metoda wyznaczania czasów międzyzielonych w USA przedstawiona w podręczniku [8] różni się znacząco od stosowanej w Polsce [12] i Niemczech [6]. Zwraca uwagę zastosowanie modelu kinematycznej strefy dylematu w wymiarowaniu czasu międzyzielonego. Istotnym elementem jest obliczenie wymaganej długości sygnału żółtego.

Zastanawiające i nie znajdujące uzasadnienia jest stosowanie w Polsce stałej długości sygnału żółtego, niezależnej od prędkości potoku pojazdów na wlocie skrzyżowania. Prowadzi to do występowania strefy dylematu na wlotach o wyższych prędkościach dopuszczalnych i wjazdów na tarczę skrzyżowania w trakcie sygnału czerwonego. Zakładając, że pojazdy wjeżdżające na skrzyżowanie, które znajdowały się w strefie dylematu i poruszały się z prędkością niższą od dopuszczalnej powinny mieć możliwość bezpiecznej ewakuacji z tarczy skrzyżowania, zaproponowano dodatkowe sprawdzenie czasu ewakuacji. Porównanie obliczeń z wjazdami na sygnale czerwonym na skrzyżowaniach zamiejskich wskazuje na potrzebę uwzględnienia strefy dylematu w obliczeniach czasu międzyzielonego. Należałoby rozważyć modyfikację niektórych wymagań krajowych zawartych w [12] dotyczących obliczania czasów międzyzielonych.

# CALCULATING INTERGREEN TIMES ON HIGH-SPEED SIGNALIZED INTERSECTIONS

## *Abstract*

*The paper presents the issues of determining intergreen times on rural high-speed signalized intersections. Calculating methods of the duration of intergreen times in selected countries and its comparison with national rules has been shown. The influence of the dilemma zone on the intergreen times has been emphasized.*

## **BIBLIOGRAFIA**

1. Chodur J., Bąk R.: *Charakterystyki prędkości na zamiejskich skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną*, Drogownictwo 2012, nr 2.
2. Gazis, D., Herman, R., and Maradudin, A.: *The problem of the amber signal light in traffic flow*. Traffic Engineering, Vol. 30, No. 7, 1960
3. Gondek S.: *Analiza zachowania kierowców na zamiejskich skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną*, Logistyka 3/2011 (na dysku CD)
4. Gondek S.: *Prędkość ewakuacji na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną*, Logistyka, nr 2/2010 (na dysku CD)
5. Gondek S., Bąk R.: *Badania wjazdów na sygnale czerwonym na zamiejskich skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną*, Transport Miejski i Regionalny 2012, nr 5.
6. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen *Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA)*, 2010
7. North Carolina Department of Transportation (NCDOT): *Traffic Management and Signal Systems Unit Design Manual*, 2004
8. Pline J.L.: *Traffic Engineering Handbook*, 5edycja, Institute of Transportation Engineers, Washington 1999
9. Service d'Etudes sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements (Sétra), *Instruction interministérielle sur la signalisation routière - Livre I - 6ème partie : feux de circulation permanents*, 2002
10. Technical Council Committee 4A-16: *Determining vehicle signal change intervals*, ITE Journal, 59, Washington 1989, s. 27–32
11. U.S. Federal Highway Administration, *Manual on Uniform Traffic Control Devices*, 2003 wraz z rev. 1 (11/04) and rev. 2 (12/07)
12. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 3 lipca 2003 roku w sprawie szczegółowych warunków technicznych dla znaków i sygnałów drogowych oraz urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego i warunków ich umieszczania na drogach. Dz. U. nr 220, poz. 2181 z dnia 23 grudnia 2003 r.

## **Autorzy:**

**mgr inż. Radosław BAŁ** – Politechnika Krakowska