

KONFIGURACJE PIERWSZEŃSTWA PRZEJAZDU NA SKRZYŻOWANIU TYPU X WZGLĘDEM GENEROWANEJ EMISYJNOŚCI ORAZ OPÓŹNIENIA RUCHU

Artykuł porusza kwestie zastosowania pionowego oznakowania dróg, takiego jak np. znak „stop” oraz „ustąp pierwszeństwa” na skrzyżowaniach typu X. Zamodelowanie wariantów skrzyżowań zostało przeprowadzone w programie do mikrosymulacji ruchu drogowego VISSIM. Właściwa część pracy dotyczy założenia określonych scenariuszy potoków ruchu, dla których wykonane zostały pomiary opóźnienia oraz emisyjności szkodliwych składników spalin takich jak NOx oraz PM10. Uzyskane rezultaty mogą mieć praktyczne zastosowanie w propozycjach tworzenia skrzyżowań nierównorzędnych.

WSTĘP

Z powodu ciągle rosnącej liczby pojazdów samochodowych wzrasta również emisja toksycznych składników spalin. W konsekwencji prowadzi to do pogorszenia jakości powietrza, jak i zdrowia człowieka. Emisja spalin transportu drogowego zależy od wielu czynników m.in. wielkości ruchu drogowego, charakterystyki drogi i samochodów, warunków atmosferycznych, zachowań kierowców, jak również rodzaju zastosowanych skrzyżowań. Na skrzyżowaniach pojazdy zazwyczaj zwalniają albo się zatrzymują, co prowadzi do zakłócenia przepływu potoku ruchu [1, 3, 4, 5].

Większość miejskich skrzyżowań typu X kontrolowana jest poprzez sygnalizację świetlną, jednak zastosowanie jej nie zawsze uzasadnione jest wielkością natężenia ruchu drogowego [2]. W takich przypadkach sterowanie ruchem poprzez ten rodzaj sygnalizacji z pewnością przyczynia się do zwiększenia bezpieczeństwa ruchu, natomiast powoduje również spadek wydajności przepływu potoku pojazdów. Istnieje jednak pewna grupa skrzyżowań, która nie posiada żadnej narzuconej kontroli względem pierwszeństwa. Wówczas kwestia przepustowości, jak również bezpieczeństwa, pozostawiona jest samym kierowcom. Dlatego też w celu zmniejszenia opóźnienia podróży oraz poprawy bezpieczeństwa ruchu drogowego, ważne jest zastosowanie pewnej kontroli dla tego typu skrzyżowań, np. poprzez zastosowanie znaków drogowych. Znaki „ustąp pierwszeństwa” oraz „stop” są najbardziej powszechne dla skrzyżowań nie posiadających sygnalizacji świetlnej [9].

Względem zmieniających wartości natężenia ruchu drogowego nie ma określonych warunków oraz kryteriów instalacji znaków „stop” oraz „ustąp pierwszeństwa”, dlatego też opracowanie to jest wstępnym etapem rozważań z tego zakresu [12].

1. PROJEKTOWANIE SKRZYŻOWAŃ W PROGRAMIE VISSIM

VISSIM jest narzędziem do mikrosymulacji przepływu ruchu drogowego, które do projektowania sieci drogowej wykorzystuje psychofizjologiczny model zachowania kierowcy (jazda za liderem) autorstwa Wiedemanna [7, 11, 13].

Narzędzie VISSIM charakteryzuje się nie tylko dużą dokładnością modelowania geometrii i parametrów sieci drogowej, ale także

umożliwia precyzyjne odwzorowanie ruchu pojazdów. W obrębie programu oprócz symulacji pojazdów samochodowych, możliwa jest również symulacja pojazdów jednośladowych, szynowych oraz pieszych, co nie jest powszechnie spotykane w narzędziach służących mikrosymulacji przepływu ruchu. Ponadto, możliwe jest zastosowanie dynamicznego rozkładu ruchu (dynamic traffic assignment), w ramach którego proces „uczenia się” kierowców przebiega w sposób iteracyjny [8].

Przy pomocy narzędzia VISSIM utworzono trzy rodzaje nierównorzędnego skrzyżowania typu X: ze znakiem B-20 dla dróg podporządkowanych, B-20 dla wszystkich kierunków ruchu („all-way stop sign”) oraz A-7. Każda z dróg badanych skrzyżowań posiada dwie jezdnie. Dodatkowo założono, że droga w kierunku wschód-zachód jest główna (z pierwszeństwem przejazdu), natomiast droga w kierunku północ-południe jest jej podporządkowana. Szerokość poszczególnych pasów ruchu wynosi 3,5 m. Warianty badanych skrzyżowań przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Widok modelu skrzyżowań w programie VISSIM: a) znaki „stop” dla kierunków podporządkowanych b) znaki „stop” dla wszystkich kierunków ruchu c) znaki „ustąp pierwszeństwa” dla kierunków podporządkowanych

1.1. Badane przypadki

Poprzez zmianę natężenia ruchu na skrzyżowaniu mierzony będzie parametr opóźnienia wynikający z powstających na drogach kongestii. Aby sprawdzić różne warunki przepływu ruchu praca zawiera dwa scenariusze symulacji. Scenariusze te są modyfikacją pracy autorstwa Meiping Yun oraz Jing Ji [9]. Dla potrzeb badania przyjęto:

- średnią prędkość pojazdów – 40 km/h,
- czas trwania symulacji – 3600 s,
- taką samą liczbę pojazdów dla kierunku północ-południe oraz dla kierunku wschód-zachód.

Scenariusze zawierają następujące dane wejściowe:

- scenariusz nr 1; natężenie ruchu dla drogi podporządkowanej – 25% wartości dla drogi głównej (suma natężenia ruchu dla skrzyżowania: 250 pojazdów/h, 500 pojazdów/h, 1000 pojazdów/h, 1500 pojazdów/h, 2000 pojazdów/h oraz 2500 pojazdów/h; poszczególne wartości natężenia ruchu przedstawiono w tab. 1.),
- scenariusz nr 2; natężenie ruchu dla drogi podporządkowanej – 50% wartości dla drogi głównej (suma natężenia ruchu dla skrzyżowania: 300 pojazdów/h, 600 pojazdów/h, 1200 pojazdów/h, 1800 pojazdów/h, 2400 pojazdów/h oraz 3000 pojazdów/h; poszczególne wartości natężeń przedstawiono w tab. 2.).

Dla każdej wartości natężenia ruchu uruchomione zostaną dwa przypadki: w jednym z nich wyłączona zostanie możliwość skrętu dla pojazdów, w drugim natomiast ustawiono parametr relacji skrętnych dla wartości 15%-70%-15% (wybór drogi na skrzyżowaniu: lewo-prosto-prawo) [6, 10].

W celu uniknięcia losowości symulacji, każdy scenariusz powtórzony zostanie 12 razy, z czego wyliczona zostanie średnia czasu opóźnienia.

Dla wartości natężeń powyżej 1800 pojazdów/h (względem scenariusza nr 2), wyniki opóźnień zestawione zostaną z przykładowym skrzyżowaniem z cykliczną stałoczasową sygnalizacją świetlną.

Dodatkowo względem badanych wariantów skrzyżowań dla scenariusza nr 2 z możliwością skrętów wykonany zostanie pomiar emisyjności toksycznych składników spalin takich jak NOx oraz PM10 w modelu emisyjności programu Enviver.

Tab. 1. Natężenie ruchu drogowego – scenariusz nr 1

Kierunek	Natężenie ruchu (liczba pojazdów/godzina)					
Północ	25	50	100	150	200	250
Południe	25	50	100	150	200	250
Wschód	100	200	400	600	800	1000
Zachód	100	200	400	600	800	1000
Suma	250	500	1000	1500	2000	2500

Tab. 2. Natężenie ruchu drogowego – scenariusz nr 2

Kierunek	Natężenie ruchu (liczba pojazdów/godzina)					
Północ	50	100	200	300	400	500
Południe	50	100	200	300	400	500
Wschód	100	200	400	600	800	1000
Zachód	100	200	400	600	800	1000
Suma	300	600	1200	1800	2400	3000

2. WYNIKI OPÓZNIENIA RUCHU DROGOWEGO

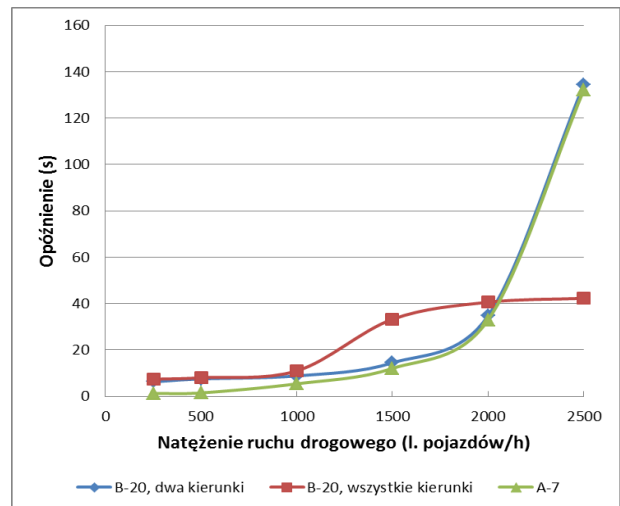
Badanym parametrem było opóźnienie wynikające z postoju na skrzyżowaniu. Na skrzyżowaniach ze znakiem A-7 oraz B-20, dla dwóch kierunków ruchu, czas opóźnienia wyznaczono względem postoju na drogach podporządkowanych. Na skrzyżowaniu ze znakiem B-20, dla wszystkich kierunków ruchu, opóźnienie wyliczane jest na podstawie postoju na wszystkich krzyżujących się drogach.

Tab. 3. Zestawienie opóźnień dla skrzyżowania bez możliwości skrętów (względem scenariusza nr 1)

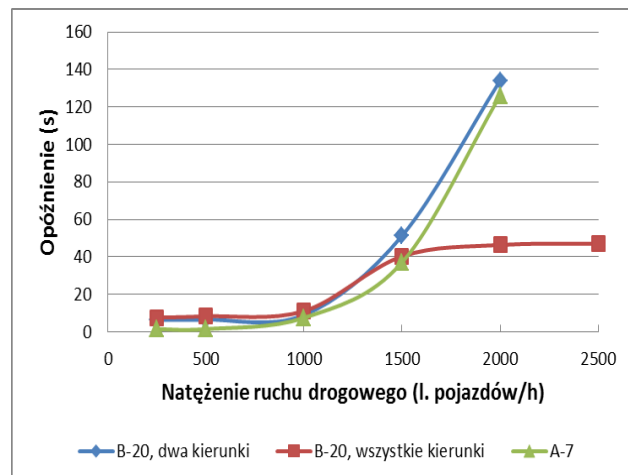
Natężenie ruchu (l. pojazdów/h)	B-20, dwa kierunki, opóźnienie drogi podporządkowanej (s)	B-20, wszystkie kierunki, opóźnienie średnie (s)	A-7, opóźnienie drogi podporządkowanej (s)
250	6,27	7,41	1,27
500	7,53	8,05	1,51
1000	8,84	10,99	5,43
1500	14,47	33,26	12,07
2000	34,76	40,61	33,02
2500	134,39	42,29	132,25

Tab. 4. Zestawienie opóźnień dla skrzyżowania z możliwością skrętów (względem scenariusza nr 1)

Natężenie ruchu (l. pojazdów/h)	B-20, dwa kierunki, opóźnienie drogi podporządkowanej (s)	B-20, wszystkie kierunki, opóźnienie średnie (s)	A-7, opóźnienie drogi podporządkowanej (s)
250	6,43	7,54	1,35
500	6,51	8,25	1,41
1000	8,89	11,02	7,46
1500	51,26	40,26	37,06
2000	134,06	46,31	126,07
2500	-	47,02	-



Rys. 2. Opóźnienia dla skrzyżowania bez możliwości skrętów – scenariusz nr 1



Rys. 3. Opóźnienia dla skrzyżowania z możliwością skrętów – scenariusz nr 1

W wyniku symulacji, analizy tab. 3 i 4 oraz rys. 2 i 3, stwierdzić można, że:

- w przypadku, kiedy skrzyżowanie nie posiada możliwości skrętu oraz natężenie ruchu nie przekracza 2000 pojazdów/h, to opóźnienia względem znaku A-7 oraz B-20 dla dwóch kierunków są do siebie zbliżone, a ich wartości są nieznacznie niższe od skrzyżowania ze znakiem B-20 dla wszystkich kierunków ruchu; powyżej wartości natężenia ruchu 2000 pojazdów/h zauważyć można gwałtowny spadek przepustowości skrzyżowania dla znaków A-7 oraz B-20 dla dwóch kierunków ruchu,
- w przypadku, kiedy skrzyżowanie posiada możliwość skrętu oraz natężenie ruchu nie przekracza 1500 pojazdów/h, to opóźnienia względem znaku A-7 oraz B-20 dla dwóch kierunków są

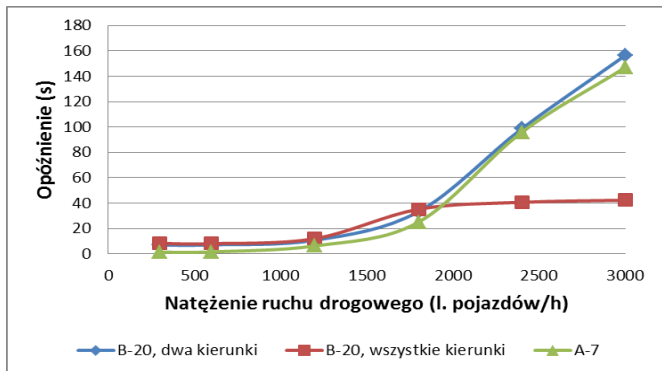
tak jak w poprzednim przypadku zbliżone; powyżej wartości natężenia ruchu 1500 pojazdów/h następuje gwałtowny wzrost opóźnienia dla znaków A-7 oraz B-20 dla dwóch kierunków ruchu, natomiast w przypadku znaku B-20 dla wszystkich kierunków ruchu, zauważyć można ustabilizowanie wartości opóźnienia; powyżej wartości natężenia ruchu 2000 pojazdów/h skrzyżowanie dla dróg podporządkowanych jest praktycznie nieprzejezdne.

Tab. 5. Zestawienie opóźnień dla skrzyżowania bez możliwości skrętów (względem scenariusza nr 2)

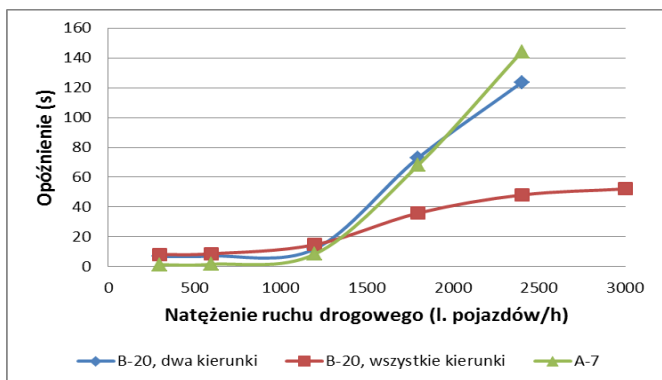
Natężenie ruchu (l. pojazdów/h)	B-20, dwa kierunki, opóźnienie drogi podporządkowanej (s)	B-20, wszystkie kierunki, opóźnienie średnie (s)	A-7, opóźnienie drogi podporządkowanej (s)
300	6,89	8,18	1,32
600	7,11	8,07	1,58
1200	10,75	12,01	6,31
1800	33,25	35,19	24,96
2400	98,59	40,64	95,85
3000	156,31	42,32	146,87

Tab. 6. Zestawienie opóźnień dla skrzyżowania z możliwością skrętów (względem scenariusza nr 2)

Natężenie ruchu (l. pojazdów/h)	B-20, dwa kierunki, opóźnienie drogi podporządkowanej (s)	B-20, wszystkie kierunki, opóźnienie średnie (s)	A-7, opóźnienie drogi podporządkowanej (s)
300	6,95	8,21	1,33
600	7,24	8,71	1,69
1200	12,01	14,77	8,54
1800	73,07	36,02	68,28
2400	123,52	48,12	144,05
3000	-	52,17	-



Rys. 4. Opóźnienia dla skrzyżowania bez możliwości skrętów – scenariusz nr 2

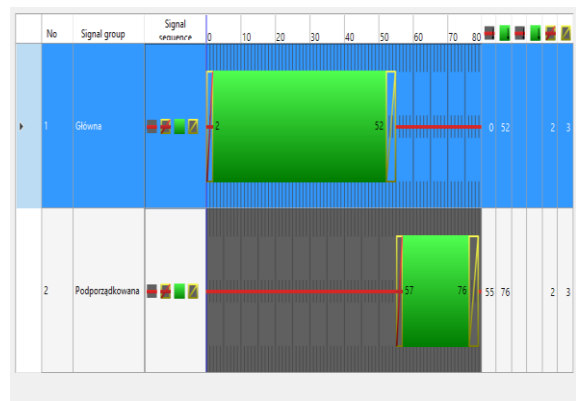


Rys. 5. Opóźnienia dla skrzyżowania z możliwością skrętów – scenariusz nr 2

W wyniku symulacji, analizy tab. 5 i 6 oraz rys. 4 i 5, stwierdzić można, że:

- w przypadku, kiedy skrzyżowanie nie posiada możliwości skrętu oraz natężenie ruchu nie przekracza 1800 pojazdów/h, to każdy wariant oznakowania posiada porównywalne wartości opóźnienia; powyżej wartości 1800 pojazdów/h natężenia ruchu skrzyżowania ze znakiem B-20 dla wszystkich kierunków ruchu, aż do końcowej badanej wartości 3000 pojazdów/h, jest praktycznie stałe, natomiast skrzyżowania ze znakami A-7 oraz B-20 dla dwóch kierunków notują gwałtowny wzrost opóźnienia,
- w przypadku, kiedy skrzyżowanie posiada możliwość skrętu oraz natężenie ruchu nie przekracza wartości 1200 pojazdów/h, wartości opóźnień dla każdego badanego skrzyżowania są zbliżone, natomiast powyżej wartości 1200 pojazdów/h następuje wzrost wartości natężenia dla wszystkich badanych skrzyżowań; po przekroczeniu wartości natężenia ruchu 2400 pojazdów/h skrzyżowanie dla dróg podporządkowanych (przypadek znaku A-7 oraz B-20 dla dwóch kierunków ruchu) jest praktycznie nieprzejezdne.

Z powodu dużych opóźnień ruchu dla natężenia większego niż 1500 pojazdów/h wprowadzono dodatkowe porównanie badanych wariantów scenariusza 2 (z możliwością skrętów) odnośnie skrzyżowania z zastosowaną cykliczną stałoczasową sygnalizacją świetlną. Obliczenie czasów sygnałów cyklu sygnalizacji świetlnej dokonane było dla średniego natężenia nasycenia pasa ruchu wynoszącego 2000 pojazdów/h. Czasy trwania poszczególnych cykli sygnałów pokazano na rys.6.

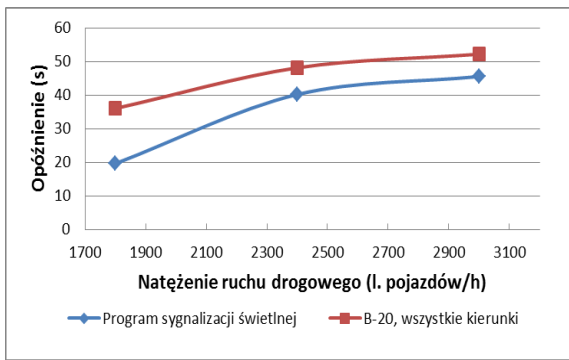


Rys. 6. Poszczególne czasy trwania cykli świetlnych dla zastosowanej sygnalizacji stałoczasowej w widoku programu VISSIM

Wyniki uzyskanych opóźnień zawarte zostały w tab. 7. Na rys. 7 przedstawiono porównanie opóźnień skrzyżowania z zastosowanym znakiem B-20 dla wszystkich kierunków ruchu oraz z cykliczną sygnalizacją świetlną. Na wykresie nie zawarto wariantów ze znakiem A-7 oraz B-20 dla dwóch kierunków z powodu zbyt niskiej przepustowości skrzyżowania.

Tab. 7. Zestawienie opóźnień dla skrzyżowania z możliwością skrętów (według scenariusza nr 2 oraz zastosowanej cyklicznej stałoczasowej sygnalizacji świetlnej)

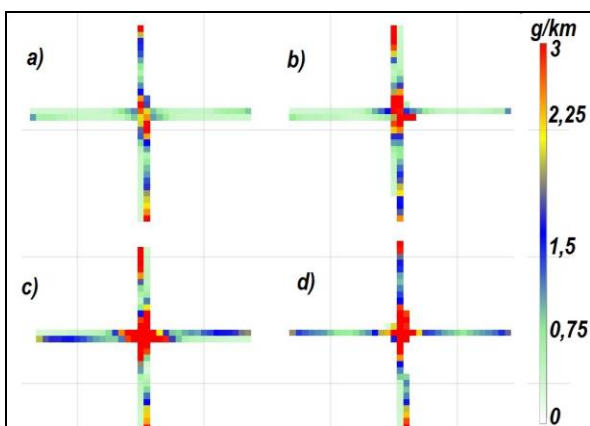
Natężenie ruchu (l. pojazdów/h)	B-20, dwa kierunki, opóźnienie drogi podporządkowanej (s)	B-20, wszystkie kierunki, opóźnienie średnie (s)	A-7, opóźnienie drogi podporządkowanej (s)	Program sygnalizacji świetlnej
1800	73,07	36,02	68,28	19,63
2400	123,52	48,12	144,05	40,17
3000	-	52,17	-	45,52



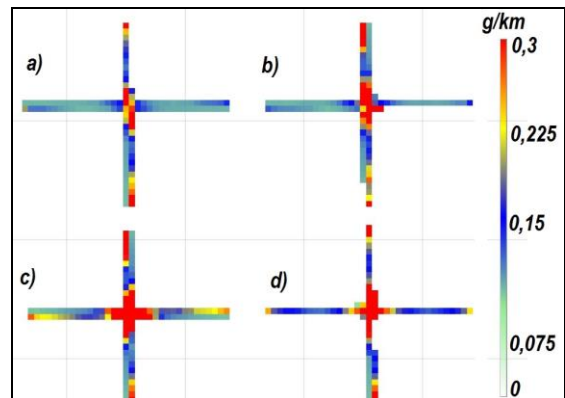
Rys. 7. Opóźnienia dla skrzyżowania z możliwością skrętów – scenariusz nr 2 z dodanym wariantem cyklicznej stałoczasowej sygnalizacji świetlnej

3. WYNIKI GENEROWANEJ EMISYJNOŚCI RUCHU DROGOWEGO

Na podstawie danych ruchu pojazdów z programu Vissim obliczono emisję toksycznych składników spalin przy pomocy programu TNO Enviver. W badanym przypadku wyznaczono emisję NOx oraz PM10 w rozdzielczości przestrzennej 5x5m. Emisyjność badano dla warunków miejskich, czyli model uwzględniał pewien odsetek pojazdów, które cechują się zwiększoną emisją spalin z powodu zjawiska zimnego startu silnika [1, 4]. W modelu przyjęto jedną klasę pojazdów, mianowicie samochody osobowe. Na tą klasę składało się 40% pojazdów z silnikiem benzynowym, 40% pojazdów z silnikiem wysokoprężnym oraz 20% pojazdów napędzanych paliwem LPG. Średni wiek pojazdów ustawiony został na 10 lat. Do badania emisyjności wykorzystano wszystkie przedstawione wcześniej warianty skrzyżowań: ze znakiem „stop” dla kierunków podporządkowanych, ze znakiem „stop” dla wszystkich kierunków ruchu, ze znakiem „ustąp pierwszeństwa przejazdu” oraz z zastosowaną stałoczasową sygnalizacją świetlną. Warianty te przebadano względem scenariusza 2 z możliwością skrętów dla opcji natężenia 1200 pojazdów/h. Odpowiednio wartości natężenia dla kierunków podporządkowanych wyniosły 200 pojazdów/h, a dla głównych 400 pojazdów/h. Do badania obrano właśnie taką wartość natężenia pojazdów, ponieważ dla wszystkich wariantów skrzyżowań względem takiej ilości pojazdów występują zbliżone wartości opóźnienia ruchu drogowego. Dlatego też wyniki emisyjności dla wszystkich rozwiązań będą porównywalne. Wyniki przedstawiono na rys. 8 i 9.



Rys. 8. Emisja NOx dla badanych wariantów skrzyżowań w rozdzielczości przestrzennej 5x5m: a) znak A-7, b) znak B-20 dla dróg podporządkowanych, c) znak B-20 dla wszystkich kierunków ruchu, d) stałoczasowa sygnalizacja świetlna



Rys. 9. Emisja PM10 dla badanych wariantów skrzyżowań w rozdzielczości przestrzennej 5x5m: a) znak A-7, b) znak B-20 dla dróg podporządkowanych, c) znak B-20 dla wszystkich kierunków ruchu, d) stałoczasowa sygnalizacja świetlna

PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono zestawienie wybranych konfiguracji skrzyżowań typu X: z oznakowaniem A-7, B-20 dla dwóch podporządkowanych kierunków ruchu oraz B-20 dla wszystkich przecinających się kierunków ruchu.

Analizując uzyskane rezultaty można stwierdzić, że poniżej wartości natężenia ruchu 1200 pojazdów/h rozważać można zastosowanie skrzyżowania ze znakiem A-7 oraz B-20 dla dwóch kierunków ruchu. Natomiast dla wartości natężenia od 1200 pojazdów/h do 2000 pojazdów/h zastosować można skrzyżowanie z oznakowaniem B-20 dla wszystkich kierunków ruchu. Powyżej tych wartości natężenia przepływ pojazdów jest utrudniony, dlatego też powinno zastosować się sygnalizację świetlną (rys.7).

Uzyskane wyniki czasów opóźnienia dotyczą przyjętego modelu reakcji kierowców. Należy mieć na uwadze, że w warunkach rzeczywistych wyniki te różniłyby się zależnie od cech psychofizycznych kierujących. Można przypuszczać, że w przypadku skrzyżowania ze znakami B-20 we wszystkich kierunkach, rzeczywiste czasy byłyby dłuższe, co może wynikać z braku tego typu oznakowania na polskich drogach. Brak doświadczenia kierowców w pokonywaniu takich skrzyżowań wiązałyby się z dłuższym czasem podejmowania decyzji a także mogłyby powstawać kolizje, które istotnie zmniejszyłyby przepustowość.

Weryfikacja doświadczalna analizy czasów opóźnień, na skrzyżowaniach ze znakami B-20 dla wszystkich kierunków w warunkach krajowych, pozwoliłaby na pełniejszą ocenę analizowanych przypadków.

Dla wybranych rozwiązań skrzyżowań względem emisji toksycznych składników spalin, takich jak NOx oraz PM10 zauważyć można, że ich najmniejsza wartość jest dla przypadku skrzyżowania ze znakiem A-7. Spowodowane jest to tym, że największa średnia wartość prędkości jest właśnie dla tego wariantu skrzyżowania. Najmniej korzystniej wypada wariant ze znakiem B-20 dla wszystkich kierunków ruchu, co wynika z tego, że podczas przejeżdżania przez tego typu skrzyżowania każdy pojazd ma obowiązek się zatrzymać, co przekłada się na największą sumaryczną emisję spalin.

Przedstawione rezultaty pokazują, że teoretyczna analiza zagadnienia modelowania ruchu z wykorzystaniem programów do mikrosymulacji VISSIM oraz emisyjności Enviver może znacząco przyczynić się do poprawy funkcjonowania przyszłych aplikacji oznakowania dla potrzeb skrzyżowań typu X.

BIBLIOGRAFIA

1. Franco V.; Kousoulidou M., Muntean M., Ntziachristos L., Hausberger S., Dilara P., *Road vehicle emission factors development: A review*, Atmos, vol.7. Environ. 2013.
2. Lejda K., Mądział M., *Współczesne kierunki kształtowania komunikacji miejskiej w myśl koncepcji zrównoważonego rozwoju transportu*, Technika Transportu Szynowego nr 12, Radom 2015.
3. Lejda K., Mądział M., *Zrównoważony rozwój transportu i jego wpływ na funkcjonowanie systemów komunikacji miejskiej, Autobusy*. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe, Nr6, Radom 2016.
4. Maykut N.N., Lewtas J., Kim E., Larson T.V., *Source apportionment of PM 2.5 at an urban IMPROVE site in Seattle, Washington*, Environ. Sci. Technol vol. 37, 2003
5. Querol X., Viana M., Alastuey, A., Amato F., Moreno T., Castillo S., Pey J., de la Rosa J., de La Campa A.S., Artíñano B., *Source origin of trace elements in PM from regional background, urban and industrial sites of Spain*, Atmos, vol. 41. Environ, 2007.
6. Wang H., Wang W., Chen J., *Capacity and delay performance of unsignalized intersection*, Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), vol 35, 2007.
7. Wiedemann R., *Simulation des Straßenverkehrsflusses. Schriftenreihe des IfV, 8*, Institut für Verkehrswesen, Karlsruhe 1974.
8. Wiedemann R., *Modelling of RTI-Elements on multi-lane roads. In: Advanced Telematics in Road Transport*, Commission of the European Community, DG XIII, Brussels 1991.
9. Yun M., Ji J., *Delay analysis of stop sign intersection and yield sign intersection basen on VISSIM*, Elsevier, Procesa – Social and Behavioral Sciences 96, 2013.
10. Zhiwei Y., *Study on the evaluation of signalized intersection s safety degree and the research of improvement measures*, Jilin University Journal, Jilin 2011.
11. VISSIM 7 User Manual (podręcznik użytkownika), 2014.
12. Załączniki 1,2,3,4 do rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 3 lipca 2003 r. w sprawie szczegółowych warunków technicznych dla znaków i sygnałów drogowych oraz urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego i warunków ich umieszczania na drogach poz. 2181 Dziennik Ustaw Nr 220 z dnia 23 grudnia 2003 r.
13. <http://www.ptvag.com>

Configurations of the right of way at the type X intersection in relation to generated emissivity and traffic delays

The article focuses on the issues of application of the vertical road signs, such as the “stop” and “yield” at the x type intersections. Modelling of variants was carried out in the program for traffic microsimulation VISSIM. The main part of the work is about establishing specific traffic stream scenarios for which the delay measurements and emissions of toxic compounds of fumes such as NOx and PM10 were made. The results may have practical application in the proposals for the creation of unsignalized intersection.

Autorzy:

mgr inż. **Maksymilian Mądział** – Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Silników Spalinowych i Transportu