

Lucyna BRZOZOWSKA¹
Łukasz DRĄG²

PORÓWNANIE WYNIKÓW MODELOWANIA RUCHU POTOKU POJAZDÓW WEDŁUG MODELI MIKRO I MAKROSKOPOWYCH

W pracy przedstawiono podstawowe zagadnienia związane z modelowaniem ruchu potoku pojazdów z wykorzystaniem modeli mikro i makroskopowych. Oba rodzaje modeli odróżnia od siebie sposób uwzględnienia pojazdów w potoku oraz opis ich ruchu. Modele mikroskopowe wymagają modelowania dynamiki ruchu pojedynczych pojazdów oraz interakcji zachodzących pomiędzy sąsiadującymi pojazdami. Natomiast w modelach makroskopowych, pojazdy traktowane są jako strumień, którego zmiany opisywane są poprzez natężenie, gęstość oraz prędkość. Prezentowane wyniki modelowania dotyczą układu komunikacyjnego, w którym ruch pojazdów jest sterowany sygnalizacją świetlną. Dla rozważanego scenariusza drogowego analizowano przestrzenne rozkłady prędkości i gęstości potoku pojazdów. Po uwzględnieniu danych o natężeniu emisji dla wybranych kategorii pojazdów wykonano bilansowanie emisji.

A COMPARISON OF MICRO AND MACROSCOPIC TRAFFIC FLOW SIMULATIONS

In the paper a fundamental issues of traffic flow modeling are presented. The micro and macroscopic models were chosen for traffic modelling. The method of regarding vehicles in stream distinguishes these models. The microscopic models require modelling of motion of individual vehicles as well as interaction between neighboring vehicles. However in macroscopic models vehicles are treated as the stream which motion are described by intensity, density and mean speed. The spatial changes of density and vehicles speed obtained using both models were analyzed. Results of computer simulations concern road network in which traffic flow is controlled by traffic light. The model of instantaneous emission has been used to estimate exhaust emission for a different car categories.

¹ Akademia Techniczno-Humanistyczna, Wydział Zarządzania i Informatyki; 43-309 Bielsko-Biała; ul. Willowa 2; tel: +48 338-279-289, fax: +48 338-279-285, e-mail: lbrzozowska@athe.eu

² Akademia Techniczno-Humanistyczna, Wydział Zarządzania i Informatyki; 43-309 Bielsko-Biała; ul. Willowa 2; tel: +48 338-279-269, fax: +48 338-279-289, e-mail: ldrag@athe.eu

1. WSTĘP

Modelowanie ruchu potoku pojazdów jest powszechnie stosowaną metodą wykorzystywaną w procesie identyfikacji i analizy zjawisk zachodzących w układach komunikacyjnych. Modelowanie ruchu może dotyczyć zarówno istniejących jak i projektowanych układów komunikacyjnych. Na wybór konkretnego modelu do symulacji ruchu pojazdów zazwyczaj ma wpływ szczegółowość odwzorowywanych zjawisk.

W pracy porównano dwa rodzaje modeli ruchu, modele mikroskopowe i makroskopowe. Ze względu na poziom uwzględnianych detali stanowią one krańcowe bieguny podziału modeli potoku pojazdów. Ruch pojazdów w sposób bardziej szczegółowy opisywany jest w modelach mikroskopowych. Opisują one zachowanie kierującego oraz pojazdu w różnych sytuacjach drogowych. W modelach tej grupy tworzone są zbiory reguł określających zachowanie pojazdu, między innymi w takich sytuacjach jak: dostosowanie prędkości jazdy do panujących ograniczeń, włączanie się do ruchu, wyprzedzanie czy zmiana pasa ruchu. Ponadto, uwzględnia się w nich sposób reakcji na zachowanie innych pojazdów w potoku. Mniejszą szczegółowością opisu charakteryzują się modele makroskopowe, w których manewry pojedynczych pojazdów nie są jawnie uwzględniane. Ruch pojazdów opisywany jest poprzez natężenie przepływu oraz gęstość i prędkość ruchu potoku pojazdów. Wśród modeli ruchu wyróżnia się także mezoskopowe modele ruchu potoku pojazdów, które podobnie jak modele mikroskopowe, pozwalają uwzględnić znaczną liczbę parametrów opisujących ruch pojazdu, jednak opis dynamiki ruchu pojazdów odnosi się do wyodrębnionych kategorii czy grupy (klastra) pojazdów [1, 2].

Uwzględnienie dynamiki ruchu potoku pojazdów w modelach mikro i makroskopowych umożliwia ocenę obciążenia środowiska emisją zanieczyszczeń pochodzenia motoryzacyjnego w układach komunikacyjnych z ruchem sterowanym, w obszarach skrzyżowań bez sygnalizacji, czy parkingów. Jednak sposób jej realizacji w obu rozważanych modelach jest diametralnie inny. Celem prowadzonych symulacji było wykazanie różnic w obliczanym przepływie pojazdów wynikających z zastosowania konkretnego modelu ruchu. W związku z tym, że oba modele umożliwiają uwzględnienie dynamiki ruchu pojazdów porównania modeli ruchu dokonano także pod kątem obliczeniowej emisji. Do obliczenia emisji wykorzystano własny model, który definiuje natężenie emisji w zależności od chwilowych parametrów ruchu pojazdu (prędkości, przyspieszenia).

2. MIKROSKOPOWY MODEL RUCHU POJAZDÓW

Obecnie modele mikroskopowe potoku pojazdów stanowią najliczniejszą grupę spośród istniejących jak i rozwijanych modeli ruchu. Modele tego typu umożliwiają opis zachowania pojazdu między innymi w sytuacjach jazdy bez ograniczeń, podążania lub hamowania. Podstawowym kryterium klasyfikacyjnym jest sposób opisu odwzorowania ruchu pojedynczego pojazdu w potoku. Wśród modeli mikroskopowych wyróżnia się modele bodziec-reakcja, bezpiecznej odległości i psychofizyczne [3, 4].

Modele typu bodziec-reakcja wykorzystują koncepcję opisu zachowania się pojazdu w potoku, a więc jego reakcję, w zależności od bodźca, czyli od różnicy w prędkości w stosunku do pojazdu poprzedzającego. Wystąpienie reakcji jest uzależnione od aktualnego poziomu wrażliwości. Inne podejście do opisu zachowania się pojazdu

w potoku w czasie podążania wykorzystują modele bezpiecznej odległości. Pojazdy biorące udział w ruchu są zobowiązane do utrzymywania bezpiecznej odległości od poprzednika. Bezpieczna odległość rozumiana jest tutaj jako ta, która umożliwi pojazdowi podążającemu zatrzymanie się przed pojazdem poprzedzającym wtedy, gdy wystąpi taka konieczność. Zazwyczaj w modelach tej grupy definiuje się minimalną odległość pomiędzy dwoma sąsiadującymi pojazdami, która nie może zostać przekroczona. Ostatnią z wymienionych grup modeli mikroskopowych stanowią modele psychofizyczne. W tej grupie modeli sposób opisu ruchu pojazdu w potoku zależy od zachowania kierowcy pojazdu podążającego. Reakcja kierowcy, a tym samym zachowanie pojazdu zależy od zdefiniowanych wartości brzegowych progów reakcji. Progi określają wystąpienie określonej sytuacji, jak np. zbliżanie się pojazdów, podążanie, zbyt mała odległość pomiędzy pojazdami. Wyniki symulacji numerycznych, w których porównywano mikroskopowe modele ruchu można znaleźć między innymi w pracach [5, 6, 7].

W pracy [7] przedstawiono szczegółowe porównanie wybranej grupy mikroskopowych modeli ruchu. Porównanie dotyczyło sposobu realizacji procesu podążania, uzyskiwanych przyspieszeń i opóźnień przez pojazd podążający oraz wpływu przyjętego sposobu modelowania ruchu na obliczeniową emisję zanieczyszczeń związków szkodliwych spalin. Przeprowadzona w pracy analiza wyników symulacji numerycznych pozwoliła na stwierdzenie, że grupa modeli bezpiecznej odległości w sposób najbardziej zbliżony do obserwowanego w rzeczywistości oddaje ruch pojazdu poprzedzającego. Szczegółowa analiza przeprowadzonych testów wykazała, że model Kraussa jest najlepszy spośród porównywanych modeli bezpiecznej odległości. W związku z tym, w niniejszej pracy model Kraussa został wykorzystany do porównania z modelem makroskopowym. W modelu tym bezpieczną prędkość pojazdu podążającego B w chwili $(i-1)\Delta t$ symulacji wyznaczana jest z zależności [8]:

$$v_B^{bez.(i-1)} = v_A^{(i-1)} + \frac{dx_{AB}^{(i-1)} - d_A^{(i-1)}}{t_{AB}^{o.(i-1)} + T_B}, \quad (1)$$

gdzie: $v_B^{bez.(i-1)}$ – bezpieczna prędkość pojazdu podążającego B w kroku $i-1$ [m/s],

$v_A^{(i-1)}$ – prędkość pojazdu poprzedzającego A w kroku $i-1$ [m/s],

T_B – czas reakcji kierowcy pojazdu B [s],

$dx_{AB}^{(i-1)} = x_A^{(i-1)} - S_A - x_B^{(i-1)}$ – odległość pomiędzy pojazdami A i B w kroku $i-1$ [m],

$S_A = L_A + dx_{AB}^{\min}$ – efektywna długość pojazdu A [m],

L_A – długość pojazdu poprzedzającego A [m],

dx_{AB}^{\min} – minimalna odległość pomiędzy pojazdami A i B [m],

$d_A^{(i-1)} = v_A^{(i-1)}T_B$ – szacowany dystans pokonywany przez pojazd A w ciągu T_B dla kroku $i-1$ [m],

$t_{AB}^{o.(i-1)} = \bar{v}_{AB}^{(i-1)} / a_B^{o,\max}(\bar{v}_{AB}^{(i-1)})$ – czas opóźnienia od prędkości $\bar{v}_{AB}^{(i-1)}$ do 0

z uwzględnieniem funkcji opóźnienia $a_B^{o,\max}(\bar{v}_{AB}^{(i-1)})$ w kroku $i-1$ [s],

$$\bar{v}_{AB}^{(i-1)} = (v_A^{(i-1)} + v_B^{(i-1)})/2 - \text{średnia wartość prędkości pojazdów } A \text{ i } B \text{ w kroku } i-1 \text{ [m/s]}.$$

W celu uwzględnienia fizycznych ograniczeń ruchu pojazdu podążającego w modelu wprowadzono warunek określający prędkość zadaną. Warunek ten zdefiniowano jako minimum z wartości:

$$v_B^{zad,(i-1)} = \min\{v_B^{bez,(i-1)}, v_B^{(i-1)} + a_B^{p,max}(v_B^{(i-1)})\Delta t, v_B^{max}\}, \quad (2)$$

gdzie: $v_B^{bez,(i-1)}$ – bezpieczna prędkość pojazdu B obliczona z (1),

$v_B^{(i-1)}$ – prędkość pojazdu poprzedzającego B w kroku $i-1$ [m/s],

$a_B^{p,max}(v_B^{(i-1)})$ – funkcja maksymalnego przyspieszenia pojazdu B zależna od $v_B^{(i-1)}$ w kroku $i-1$ [m/s²],

v_B^{max} – prędkość maksymalna pojazdu B , zależna od typu drogi [m/s].

Prędkość pojazdu podążającego B w chwili $i\Delta t$ jest określana jako maksimum z dwóch wartości:

$$v_B^{(i)} = \max\{0, v_B^{(i-1)} - \eta\}, \quad (3)$$

gdzie: η – jest zaburzeniem prędkości zadanej, określonym jako wartość z przedziału

$$\langle v_B^{zad,(i-1)} - \varepsilon \Delta t a_B^{p,max}, v_B^{zad,(i-1)} \rangle,$$

ε – funkcja losowa o wartościach z przedziału $\langle 0;1 \rangle$.

Przyspieszenie $a_B^{(i)}$ i pozycję $x_B^{(i)}$ pojazdu podążającego B w przedziale czasu $\langle (i-1)\Delta t; i\Delta t \rangle$ oblicza się z wykorzystaniem następujących zależności:

$$a_B^{(i)} = (v_B^{(i)} - v_B^{(i-1)})/\Delta t \quad (4)$$

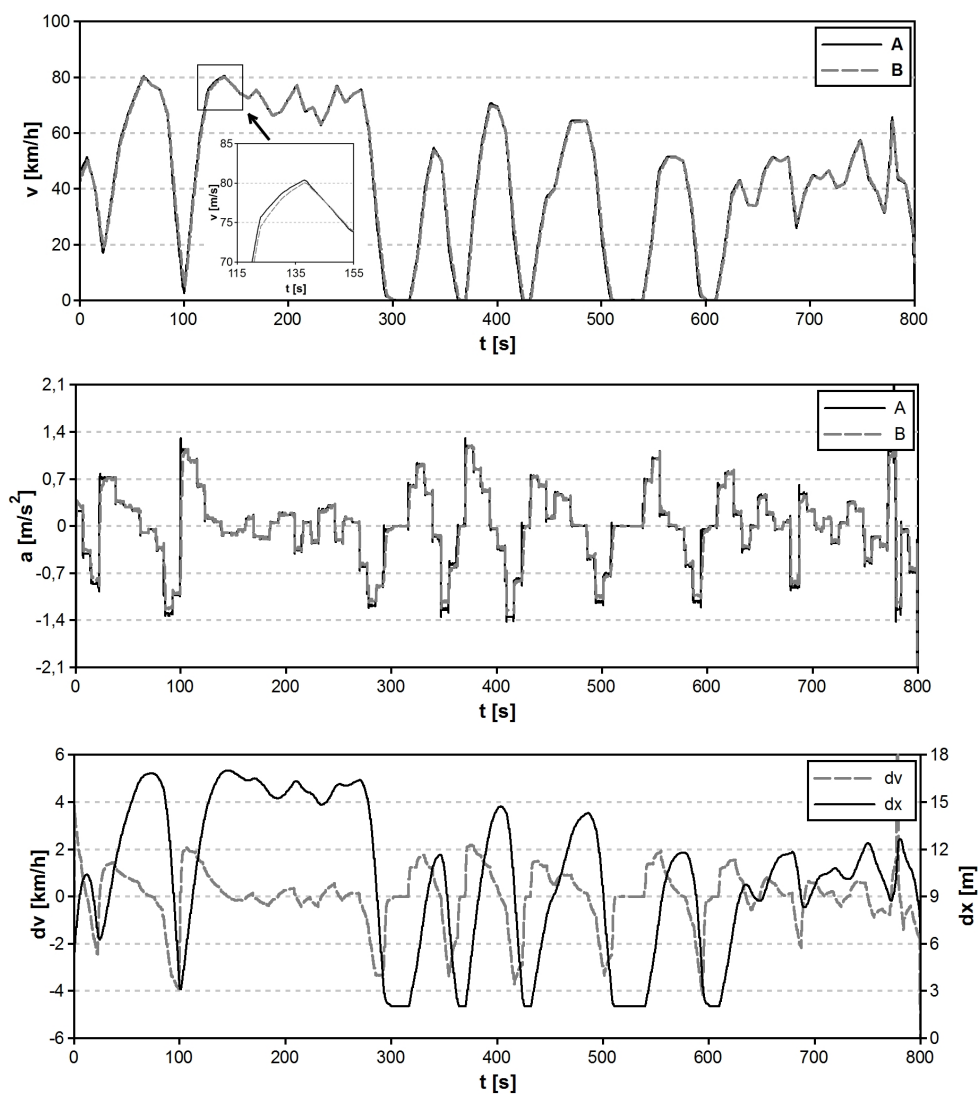
$$x_B^{(i)} = x_B^{(i-1)} + v_B^{(i-1)}\Delta t + a_B^{(i)}\Delta t^2 / 2 \quad (5)$$

Przykładowe wyniki modelowania z wykorzystaniem modelu bezpiecznej odległości (modelu Kraussa) zamieszczono na rys. 1. Wyniki dotyczą podążania pojazdu w warunkach jazdy za liderem, realizującym przebieg prędkości samochodu osobowego zarejestrowany w warunkach jazdy miejskiej. Parametry modelu Kraussa przyjęte w obliczeniach przedstawiono w tab. 1.

Tab. 1. Parametry modelu Kraussa przyjęte w symulacji

Parametr	S_A	L_A	dx_{AB}^{min}	$a_B^{p,max}$	$a_B^{o,max}$	T_B	Δt
Wartość	7,5 m	4 m	2 m	3 m/s ²	-5 m/s ²	0,7 s	0,1 s

Największą niedogodnością w stosowaniu modelu Kraussa, jak również innych modeli mikroskopowych jest konieczność uwzględniania parametrów decydujących o dynamice ruchu każdego pojazdu. W pracy [9] przedstawiono model dynamiki ruchu pojazdu wieloczołowego, który umożliwia identyfikację parametrów dynamiki pojazdów (maksymalnych przyspieszeń, przebiegu maksymalnego przyspieszania w trakcie rozpędzania) dla modeli mikroskopowych.



Rys. 1. Podążenie pojazdu B według modelu Kraussa

Symulacje numeryczne ruchu potoku pojazdów według modelu ruchu uwzględniającego i nieuwzględniającego parametryzację właściwości dynamicznych pojazdu (przyspieszenia) wykazały, że wzdłuż dróg łączących sąsiednie skrzyżowania uzyskuje się odmienne rozkłady prędkości ruchu, natężenia i gęstości potoku pojazdów. Ponadto sumaryczna emisja drogowa obliczona według modelu ruchu uwzględniającego parametryzację może być większa w skrajnych przypadkach o 40%, niż w przypadku modelu ruchu, który takiej parametryzacji nie uwzględnia [10].

3. MAKROSKOPOWY MODEL RUCHU POJAZDÓW

W ujęciu makroskopowym ruch potoku pojazdów traktowany jest na zasadzie analogii hydrodynamicznej do ruchu płynu. W modelach tego typu nie wyróżnia się pojedynczych pojazdów; ruch pojazdów opisywany jest przez gęstość i prędkości strumienia pojazdów oraz, w konsekwencji, przez natężenie przepływu. Wśród modeli makroskopowych w zależności od liczby równań różniczkowych opisujących ruch strumienia pojazdów wyróżnić można modele pierwszego i drugiego rzędu [2, 11].

Modele makroskopowe niskiego rzędu (modele LWR) bazują na pojedynczym równaniu różniczkowym ciągłości potoku oraz dodatkowej zależności empirycznej umożliwiającej wyznaczenie prędkości ruchu potoku pojazdów.

W niniejszej pracy do porównania modelu mikroskopowego z makroskopowym wykorzystano model drugiego rzędu. W modelu tym gęstość i prędkość ruchu strumienia pojazdów zdefiniowane zostały poprzez dwa równania różniczkowe cząstkowe z dwoma zmiennymi niezależnymi: położeniem w układzie drogowym x i czasem t , postaci [12]:

$$\begin{cases} \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial(kv)}{\partial x} = g(x, t), \\ \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{v_e - v}{T} + c_0 \frac{\partial v}{\partial x}, \end{cases} \quad (6)$$

gdzie: k – gęstość strumienia pojazdów [poj./km],

g – człon źródłowy,

v_e – prędkość strumienia pojazdów w stanie równowagi [m/s],

T – czas relaksacji (czas reakcji strumienia na zmianę prędkości) [s],

c_0 – stała opisująca prędkości propagacji zaburzenia w strumieniu [m/s].

Przedstawiony układ równań należy uzupełnić o empiryczną zależność definiującą prędkość strumienia pojazdów w stanie równowagi v_e . Najczęściej przyjmuje się, że v_e zależy od prędkości swobodnej na danej drodze, aktualnej gęstości pojazdów i gęstości maksymalnej odpowiadającej zatorowi drogowemu. W literaturze przedmiotu spotyka się różne postacie tej zależności [13, 14, 15], a w pracy [16] przeprowadzono analizę wrażliwości wyników modelowania emisji na przyjmowane funkcje opisujące v_e . Prędkość strumienia pojazdów w stanie równowagi v_e może być obliczona jako:

$$v_e = v_f \left(1 - \left(\frac{k}{k_m} \right)^l \right)^m, \quad (7)$$

gdzie: v_f – prędkość swobodnego ruchu strumienia pojazdów [m/s],
 k_m – maksymalna gęstość strumienia pojazdów (korek uliczny) [poj./km],
 m, l – parametry empiryczne modelu.

W przypadku przyjęcia za $l=1$ i $m=1$ otrzymuje się klasyczną funkcję liniową [13]. Natomiast, przyjęcie wartości współczynników $l=1,86$ i $m=4,05$, jak proponują autorzy [14], powoduje nieliniowość funkcji opisującej v_e .

Inną nieliniową postać funkcji v_e przedstawiono w pracy [15]:

$$v_e = v_f \left[\left(1 + \exp \left(\frac{k k_m^{-1} - 0,25}{0,06} \right) \right)^{-1} - 3,72 \cdot 10^{-6} \right]. \quad (8)$$

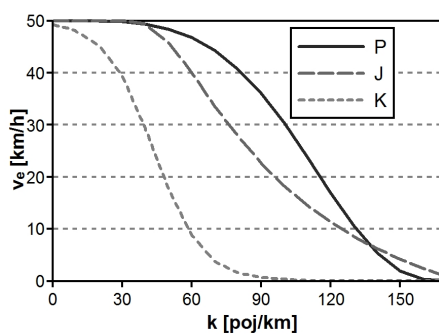
Z kolei, prędkość strumienia pojazdów w stanie równowagi v_e według [12] zdefiniowano następująco:

$$v_e = v_f \left[1 - \exp \left(1 - \exp \left(c_0 v_f^{-1} (k k_m^{-1} - 1) \right) \right) \right]. \quad (9)$$

Na rys. 2 przedstawiono wykres prędkości w stanie równowagi w zależności od gęstości k potoku pojazdów, dla trzech różnych postaci funkcji v_e , przy czym parametry l i m przyjęto tak jak w tab. 2.

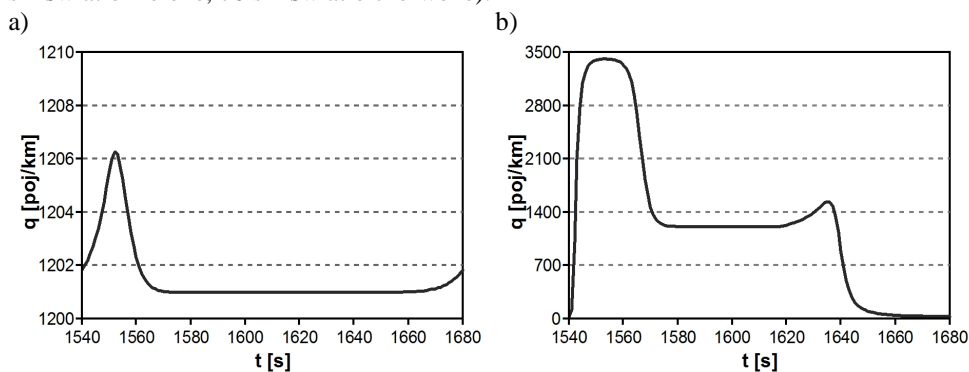
Tab. 2. Parametry modeli makroskopowych przyjęte w symulacji

Parametr	k_{pocz}	k_m	l	m	v_f	c_0	T	Δt
Wartość	24 poj./km	175 poj./km	3,85	4,05	50 km/h	25 m/s	1 s	0,1 s



Rys. 2. Prędkość pojazdów v_e według modeli P [14], J [12], K [15]

Przebieg zmian natężenia przepływu q według modelu [14] w wybranych przekrojach drogi, gdy ruch pojazdów sterowany jest przez sygnalizację świetlną przedstawiono na rys. 3. Zmiany zarejestrowano w czasie trwania pełnego cyklu zmiany świateł (140 s: 70 s – światło zielone, 70 s – światło czerwone).



Rys. 3. Zmiana natężenia przepływu q w wybranym przedziale czasu w odległości
a) 250 i b) 50 metrów od sygnalizacji świetlnej

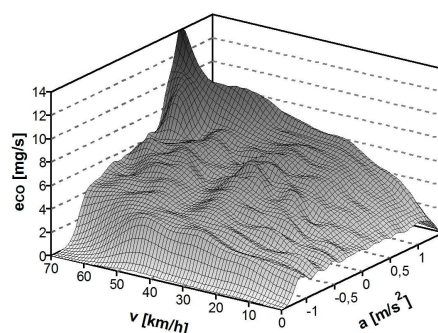
4. ZASTOSOWANIE SIECI NEURONOWYCH DO MODELOWANIA NATĘŻENIA EMISJI Z SILNIKÓW POJAZDÓW

Modelowanie emisji związków szkodliwych spalin powstających w wyniku eksploatacji pojazdów silnikowych jest podstawowym elementem, umożliwiającym ocenę stopnia oddziaływania motoryzacji na jakość powietrza atmosferycznego w obszarach zurbanizowanych. Szczególnie ważne jest modelowanie natężenia emisji i stężeń zanieczyszczeń w pobliżu układów z sygnalizacją świetlną. W niniejszej pracy do modelowania emisji związków szkodliwych wykorzystano charakterystyki dynamiczne, opisujące natężenie emisji w zależności od chwilowej prędkości i przyspieszenia pojazdu. Postać funkcji opisującej charakterystykę dynamiczną natężenia emisji danego składnika spalin może być różna. Prace autorów [17, 18, 19, 20] wskazują, że dobre odwzorowanie rzeczywistego natężenia emisji uzyskuje się przy zastosowaniu kombinacji prostych funkcji z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych. Natężenie emisji $e(u, a)$ w warunkach nagrzanego do temperatury roboczej silnika można przedstawić w postaci:

$$e(v, a) = \sum_{l=1}^s w_l \eta_l(v, a), \quad (10)$$

gdzie: v – chwilowa prędkość pojazdu [m/s],
 a – chwilowe przyspieszenie pojazdu [m/s²],
 w_l – waga neuronu l z warstwy ukrytej,
 s – liczba neuronów na warstwie ukrytej,
 η_l – funkcje aktywacji.

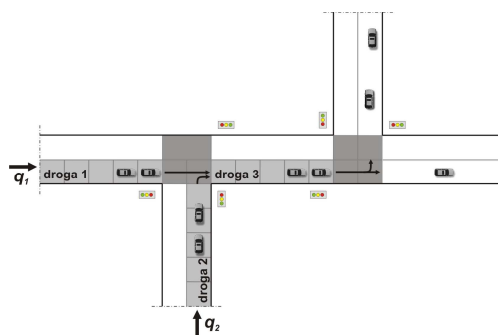
Do parametryzacji modelu wykorzystuje się tzw. macierz emisji. W macierzy tej, zgromadzone są dyskretne wartości natężenia emisji dla pewnych przedziałów (komórek) chwilowej prędkości i przyspieszenia pojazdu. Wartości w komórkach macierzy emisji oblicza się uśredniając dane zarejestrowane w trakcie pomiarów na hamowni podwozowej lub w warunkach eksploatacji trakcyjnej. Przykładową charakterystykę natężenia emisji tlenku węgla wygenerowaną przy użyciu sieci neuronowej przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Charakterystyka natężenia emisji tlenku węgla samochodu osobowego z silnikiem o zapłonie samoczynnym utworzona z wykorzystaniem sztucznej sieci neuronowej

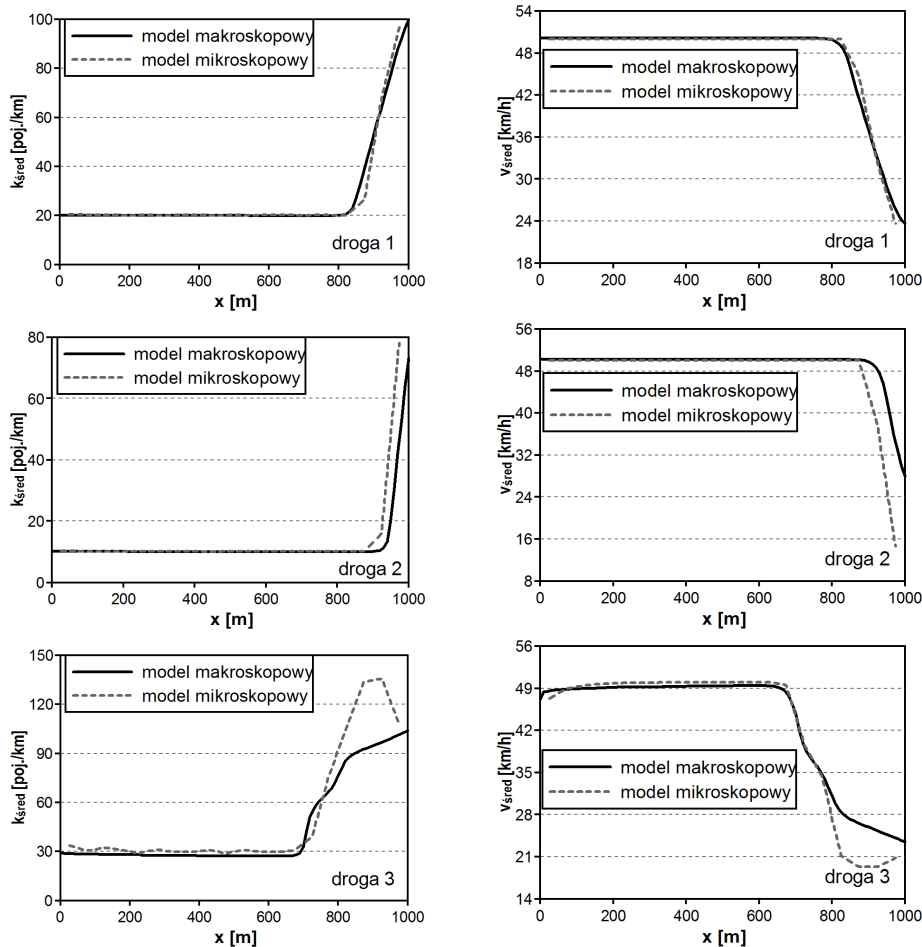
5. PRZYKŁAD MODELOWANIA RUCHU POJAZDÓW Z WYKORZYSTANIEM MODELU MIKRO I MAKROSKOPOWEGO

W pracy modelowano ruch potoku pojazdów w układzie komunikacyjnym składającym się z jednopasmowych dróg, które łączą dwa skrzyżowania - rys. 5. Długość każdego odcinka drogowego ustalono na 1000 m. Ruch pojazdów w układzie jest sterowany sygnalizacją świetlną. Zmiany świateł na obu skrzyżowaniach następują synchronicznie. Pełen cykl zmiany świateł trwa 140 sekund (faza świateł zielonych i czerwonych – 65 s, faza świateł żółtych – 5 s).



Rys. 5. Analizowany układ komunikacyjny

Symulacje ruchu potoku przeprowadzono w czasie $T = 3600$ s. Prędkość pojazdów w ruchu swobodnym v_f ustalono na 50 km/h, a gęstość maksymalną $k_{jam} = 175$ poj./km. Natężenie przepływu na wlocie drogi 1 i 2 wynosiło odpowiednio $q_1 = 1000$ poj./h i $q_2 = 500$ poj./h. Zmiany przepływu pojazdów analizowano wyłącznie na drodze 1, 2 i 3. Początkowe parametry modelu mikro i makroskopowego przyjęto tak jak podano w tab. 1 i tab. 2. W modelu makroskopowym zastosowano funkcję opisującą prędkość w stanie równowagi v_e zgodną z [14]. Wyniki modelowania prędkości $v_{\text{śred}}$ i gęstości $k_{\text{śred}}$ potoku pojazdów wzdłuż każdej z rozpatrywanych dróg przedstawiono na rys. 6.



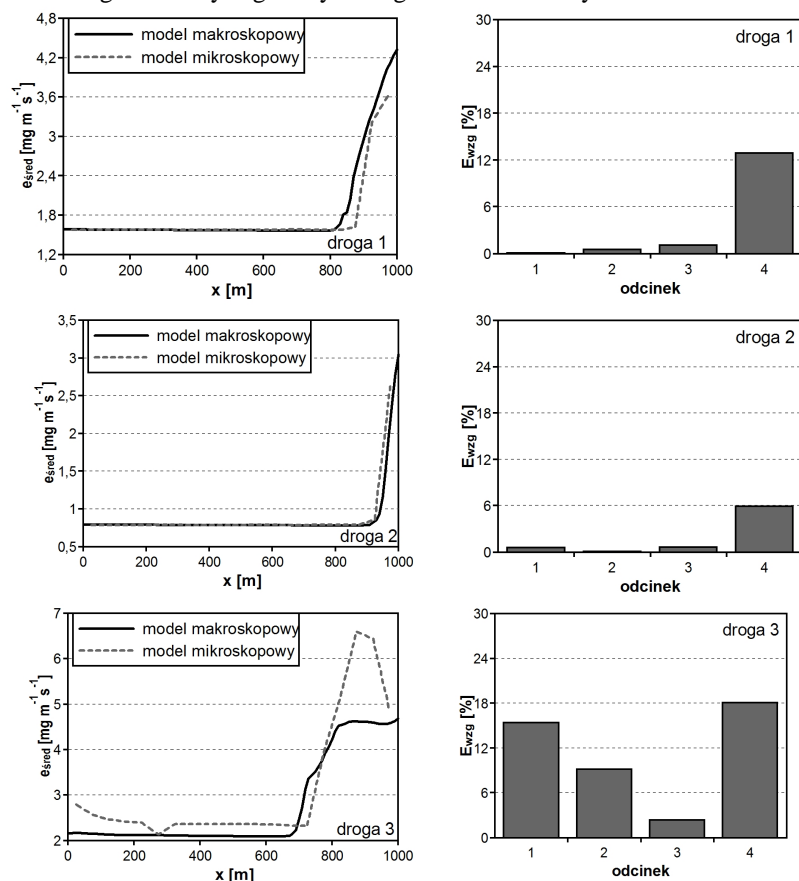
Rys. 6. Gęstość $k_{\text{śred}}$ i prędkość $v_{\text{śred}}$ pojazdów według mikro i makroskopowego modelu ruchu

Wartości $v_{\text{śred}}$ i $k_{\text{śred}}$ obliczono dla pełnego czasu symulacji przy podziale drogi na segmenty o długości 50 m. Jak można było się spodziewać model mikro i makroskopowy

w zbliżony sposób odzwierciedlają ruch pojazdów w warunkach ruchu swobodnego. Większe różnice w prędkości ruchu i gęstości potoku są obserwowane w warunkach ruchu wymuszonego, czyli w momencie tworzenia się zatorów drogowych przed skrzyżowaniami.

Analizując szczegółowo zmiany $v_{\text{śred}}$ i $k_{\text{śred}}$ można stwierdzić, że wzrost gęstości potoku pojazdów i tym samym spadek prędkości przepływu dla danej drogi rozpoczyna się w tych samych segmentach (droga 1 – segment 17, $x \in \langle 800; 850 \rangle$; droga 2 – segment 19, $x \in \langle 900; 950 \rangle$; droga 3 – segment 15, $x \in \langle 700; 750 \rangle$). Świadczy to o podobnym odwzorowaniu kolejki pojazdów oczekujących na przejazd przez skrzyżowanie.

Na kolejnym rysunku (rys. 7) przedstawiono wykres zmian średniego natężenia emisji odniesiony do jednostki długości oraz błędu względnego obliczonej emisji według modelu mikro i makroskopowego wzdłuż każdej z dróg. Obliczenia błędu względnego wykonano dla podziału drogi na cztery segmenty o długości 250 m każdy.



Rys. 7. Średnie natężenie emisji $e_{\text{śred}}$ odniesione do jednostki długości tlenku węgla, błąd względny E_{wzg} obliczeniowej emisji według mikro i makroskopowego modelu ruchu

W obliczeniach emisji, założono, że w ruchu uczestniczą trzy kategorie pojazdów: samochody osobowe z silnikiem ZI, samochody osobowe z silnikiem ZI wyposażone w reaktor katalityczny oraz samochody osobowe z silnikiem ZS.

Największą rozbieżność w obliczonej emisji obserwuje się na drodze 3 pomiędzy dwoma skrzyżowaniami. Maksymalny błąd względny w tym przypadku wynosi 18%. Natomiast, dla dyskretyzacji drogi co 50 m, w segmencie 18 (125 m przed skrzyżowaniem) drogi pierwszej, maksymalny błąd względny wynosi blisko 60% (57,8%).

Różnice w obliczeniowej emisji obserwuje się także na pozostałych drogach, największe w segmentach usytuowanych bezpośrednio przed skrzyżowaniami. Występowanie takiej sytuacji, jest spowodowane innym ujęciem sposobu opisu dynamiki ruchu pojazdów w obu rozważanych modelach. Uwzględnienie w mikroskopowym modelu ruchu dynamiki każdego pojazdu skutkuje występowaniem licznych stanów nieustalonych, co bezpośrednio przekłada się na wzrost emisji zanieczyszczeń.

Analizując emisję drogową, obliczoną w ciągu pełnego czasu symulacji na całej długości drogi 1, 2 i 3, stwierdzono, że różnice w emisji nie przekraczają 15%. Dla drogi 1 różnica ta wynosi 5%, a dla pozostałych dwóch dróg, odpowiednio 1% i 13%.

5. WNIOSKI

Na podstawie zamieszczonych w pracy wyników modelowania ruchu pojazdów z wykorzystaniem modelu mikro i makroskopowego można potwierdzić przydatność obu podejść do analizy zjawisk zachodzących w układach komunikacyjnych, bowiem oba rodzaje rozważanych w pracy modeli umożliwiają analizę zmian zachodzących w przepływie potoku wywołanych sterowaniem.

Większe niedogodności w stosowaniu stwarzają modele mikroskopowe. Wymagają odpowiedniego doboru parametrów modelu oraz konieczność modelowania zachowania każdego pojazdu w każdym kroku symulacji. W przypadku modelowania ruchu potoku pojazdów o dużym natężeniu czas oczekiwania na wyniki symulacji znacznie się wydłuża. Wyżej wymienionych niedogodności są pozbawione modele makroskopowe. Zatem, do modelowania ruchu pojazdów w układach komunikacyjnych o skali miasta, na potrzeby modeli emisji wystarczające jest stosowanie modeli makroskopowych.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] TFTM: *Traffic Flow Theory Monographs: Revised Traffic Flow Theory. A state of the Art Report*. Transportation Research Board, National Academy of Science, USA, 2001
- [2] Hoogendoorn S. P., Bovy P. H. L.: *State-of-the-art of Vehicular Traffic Flow Modelling*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, Vol. 215, Nr 4, 283–303, 2001.
- [3] Brackstone M., McDonald M.: *Car-following: a historical review*. Transportation Research Part F 2, s. 181–196, 1999.

- [4] Olstam J., Tapani A.: *Comparison of Car-following models*. Swedish National Road and Transport Research Institute, Linköping, Sweden, 2004.
- [5] E., Kühne R., Skabardonis A., Wagner P.: *Towards a benchmarking of Microscopic Traffic Flow Models*. Transportation Research Board, 82nd Annual Meeting, 2003.
- [6] Brockfeld E., Wagner P.: *Calibration and Validation of Microscopic Traffic Flow Models*. Traffic and Granular Flow '03, Springer Berlin Heidelberg, 67-72, 2005.
- [7] Drąg Ł.: *Wpływ modeli ruchu na obliczeniową emisję zanieczyszczeń*. Rozprawa doktorska. Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, 2008.
- [8] Krauss S.: *Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics*. Ph.D. Thesis, University of Cologne, Germany, 1998.
- [9] Brzozowska L., Brzozowski K., Drąg Ł.: *Transport drogowy a jakość powietrza. Modelowanie komputerowe w mezoskali*. WKŁ, Warszawa, 2009.
- [10] Drąg Ł.: *Influence of parameterization of vehicle dynamic properties in the microscopic flow model on the computational car exhaust emission*. Journal of KONES: Powertrain and Transport, vol. 16 nr 3, 2009, pp. 67-74.
- [11] Datka S., Suchorzewski W., Tracz M.: *Inżynieria ruchu*. WKiŁ, Warszawa 1997
- [12] Jiang R., Wu Q-S., Zhu Z-J.: A new continuum model for traffic flow and numerical tests. Transportation Research B 36, pp. 405-419, 2002.
- [13] Greenshields B. D.: *A study of traffic capacity*. HRB Proc., Vol. 14, pp. 448-477, 1934.
- [14] Papageorgiu M., Blosseville J.M., Hady-Salem H.: *Macroscopic modeling of traffic flow on the Boulevard Peripherique in Paris*. Transportation Research 23 B, 29-47, 1989
- [15] Kerner B.S., Konhäuser P.: *Cluster effect in initially homogeneous traffic flow*. Phys. Rev. E 48 , R2335-2338, 1993
- [16] Brzozowska L., Brzozowski K.: *Modelowanie emisji związków szkodliwych spalin z wykorzystaniem makroskopowego modelu natężenia ruchu*. Teza Komisji Motoryzacji, Kraków: PAN, 2008, Zeszyt nr 33-34 s. 45-52
- [17] Brzozowska L., Brzozowski K., Wojciech S.: *Zastosowanie funkcji Gaussa do wyznaczania charakterystyk dynamicznych emisji związków szkodliwych spalin*. Zeszyty Naukowe OBR BOSMAL 26, 7-22, 2004.
- [18] Brzozowska L., Brzozowski K., Warwas K.: *Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do modelowania ekologicznych właściwości pojazdów*. Archiwum Motoryzacji nr 3, s. 229-247, 2005.

- [19] Brzozowski K: *Mikroskalowe modele emisji i dyspersji zanieczyszczeń samochodowych*. Rozprawy Naukowe, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, nr 18, Bielsko-Biała 2006.
- [20] Brzozowski K., Wojciech S.: *Wyznaczanie natężenia emisji po zimnym rozruchu silnika z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych*. Archiwum Motoryzacji nr 2, s. 119-134, 2007.