

INFLUENCE OF PARAMETRIZATION OF VEHICLE DYNAMIC PROPERTIES IN THE MICROSCOPIC FLOW MODEL ON THE COMPUTATIONAL CAR EXHAUST EMISSION

Lukasz Drąg

University of Bielsko-Biala
Willowa Street 2, 43-309 Bielsko-Biala, Poland
tel.: +48 33 8279269, fax: +48 33 8279289
e-mail: ldrag@ath.bielsko.pl

Abstract

In the paper the results of traffic flow modelling using the parameterized and not-parameterized microscopic traffic flow model have been presented. The acceleration, speed and intensity of car exhaust emission have been analysed. On the base on registered motion parameters the analysis of exhaust emission intensity has been performed for a single lane road connecting two intersections. Dynamics characteristic of carbon monoxide, hydrocarbons and nitrogen oxides were used for calculation of the exhaust emission from passenger vehicles with SI engine and the catalytic converter. The traffic simulation was carried out for the road network in which traffic flow is determined by different time of traffic light phases. The functions of the maximal acceleration of vehicles were applied in the parameterized microscopic traffic flow model. These functions were calculated as dependent on angle of road slope and the additional vehicle load using the model of vehicle dynamics. Simulations of traffic of the vehicles stream were carried for the communication system, where the vehicle flow was determined time of duration's individual phases of traffic lights. In the traffic model of the stream the maximum acceleration of vehicles relative to slope angle of a street and the surcharge of the vehicle, appointed with using of the model of dynamics traffic were taken into account.

Keywords: road network, traffic flow, emission, modelling

WPLYW PARAMETRIZACJI WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNYCH POJAZDU W MIKROSKOPOWYM MODELU RUCHU NA OBLICZENIOWĄ EMISJĘ ZANIECZYSZCZEŃ

Streszczenie

Modelowanie emisji substancji szkodliwych spalin z silników pojazdów w warunkach eksploatacji trakcyjnej wymaga zastosowania modelu ruchu potoku pojazdów. Do identyfikacji i analizy procesów zachodzących w układach komunikacyjnych o skali przestrzennej kilku skrzyżowań zazwyczaj stosowane są mikroskopowe modele ruchu. Modele ruchu tego typu umożliwiają symulację potoku pojazdu, w trakcie której rozpatrywany jest ruch każdego z pojazdów z uwzględnieniem jego właściwości dynamicznych. Fakt ten ma zasadnicze znaczenie przy wyborze sposobu obliczania i bilansowania emisji związków szkodliwych spalin. Znając chwilowe przyspieszenie i prędkość pojazdu, obliczenia dotyczące emisji można wykonać w oparciu o jedną z metod: średniej emisji drogowej i natężenia emisji. Przy obliczaniu emisji tymi metodami decydującego znaczenia nabiera rodzaj uwzględnionych w modelu ruchu parametrów wpływających na przyspieszenie i prędkość pojazdów. W pracy przedstawiono wyniki modelowania ruchu potoku pojazdów według mikroskopowego modelu ruchu z pominięciem i uwzględnieniem parametryzacji właściwości dynamicznych pojazdów. Dla wybranego pojedynczego pojazdu z potoku analizowano przyspieszenie i prędkość oraz obliczone natężenie emisji. Na podstawie zarejestrowanych parametrów ruchu dokonano również analizy natężenia emisji wzdłuż odcinka drogi łączącego dwa sąsiednie węzły drogowe. Symulacje ruchu potoku pojazdów przeprowadzono dla układu komunikacyjnego, w którym przepływ pojazdów był zdeterminowany czasem trwania poszczególnych faz sygnalizacji świetlnej. W modelu ruchu potoku uwzględniono maksymalne przyspieszenie pojazdów w zależności od kąta nachylenia jezdni i dodatkowego obciążenia pojazdu, wyznaczone z wykorzystaniem modelu dynamiki ruchu.

Słowa kluczowe: układ komunikacyjny, ruchu potoku pojazdów, emisja, modelowanie

1. Wstęp

Jedną z powszechnie stosowanych metod do oceny wpływu motoryzacji na środowisko jest bilansowanie emisji substancji szkodliwych spalin z silników pojazdów. Metoda ta znajduje zastosowanie w układach komunikacyjnych o skali przestrzennej dzielnicy, miasta, ale może być, także stosowana do analizy emisji w podukładach sieci drogowej (np. pojedynczego pasa drogi łączącej sąsiadujące skrzyżowania). Bilansowanie emisji odbywa się na podstawie zarejestrowanych w rzeczywistych warunkach drogowych lub uzyskanych w wyniku modelowania parametrów opisujących przepływ potoku pojazdów. W obu wymienionych przypadkach istotna jest struktura rodzajowa i wiekowa pojazdów oraz informacje o parametrach charakteryzujących ruch pojazdów.

Modele emisji, na podstawie których dokonuje się bilansowania, formułowane są w oparciu o zarejestrowane dane pomiarowe emisji w zależności od średniej prędkości pojazdu, bądź w zależności od chwilowej prędkości i przyspieszenia, a niekiedy chwilowej prędkości i innej wielkości charakteryzującej obciążenie jednostki napędowej. Oznacza to, że modelowanie emisji odbywa się po przyjęciu jednej z metod opisującej zależność emisji od wielkości charakteryzujących sposób eksploatacji. W praktyce najczęściej stosowanymi metodami są: metoda średnich emisji drogowych lub metoda natężenia emisji. Pierwsza z nich, bazuje na założeniu, że ilość danej substancji emitowanej w spalinach jest zależna od warunków eksploatacji pojazdów charakteryzowanych poprzez średnią prędkość. Z kolei, druga z metod, definiuje emisje składników spalin poprzez natężenie, które przyjmuje się, że w pewnym okresie czasu jest stałe i jest zależne od chwilowych parametrów ruchu pojazdu lub innych parametrów opisujących stan obciążenia jednostki napędowej. Metoda średnich emisji drogowych znajduje zastosowanie w sieciach komunikacyjnych o większej skali przestrzennej, gdy nie są znane szczegółowe informacje dotyczące parametrów ruchu poszczególnych pojazdów. Natomiast, metoda natężenia emisji wykorzystywana jest w przypadku gdy istnieje możliwość rejestracji chwilowych parametrów ruchu każdego z pojazdów [1].

W celu identyfikacji zmian emisji wzdłuż odcinków drogowych pomiędzy węzłami sieci komunikacyjnej, wywołanych sposobem organizacji przepływu pojazdów zazwyczaj stosuje się modele ruchu potoku pojazdów, w których istnieje możliwość uwzględnienia dynamiki ruchu pojedynczych pojazdów. Do tego rodzaju modeli zaliczają się mikroskopowe modele ruchu, w których zachowanie pojazdu zależy od zdefiniowanych zasad ruchu oraz od ograniczeń nałożonych na dynamikę ruchu (maksymalnego przyspieszenia i opóźnienia). W pracy przedstawiono wpływ przyjętego sposobu parametryzacji przyspieszenia pojazdów w mikroskopowym modelu ruchu na obliczeniową emisję zanieczyszczeń. Zastosowana parametryzacja pozwala na uzależnienie możliwych ekstremalnych przyspieszeń od prędkości pojazdu, kąta nachylenia jezdni oraz dodatkowego obciążenia pojazdu.

2. Modelowanie ruchu potoku pojazdów – mikroskopowe modele ruchu

Mikroskopowe modele ruchu umożliwiają modelowanie przepływu potoku pojazdu z uwzględnieniem zasad opisujących ruch pojedynczego pojazdu w potoku. Uwzględniają one między innymi: jazdę swobodną, poruszanie za innym pojazdem (tzw. podążanie), zmianę pasów ruchu, przejazd przez skrzyżowanie, włączanie się do ruchu oraz zawracanie. W literaturze często spotyka się określenie modeli mikroskopowych jako modeli jazdy za liderem lub modeli podążających pojazdów. Klasyfikację mikroskopowych modeli ruchu potoku pojazdów przeprowadza się ze względu na sposób realizacji procesu podążania. Przyjmując to kryterium za podstawę klasyfikacji, wówczas można wyróżnić następujące rodzaje modeli: bodziec-reakcja, bezpiecznej odległości oraz psychofizyczne. Każda z wyszczególnionych grup modeli opisuje poruszanie się pojazdu podczas typowych sytuacji drogowych: jazdy bez ograniczeń, podążania oraz nagłego hamowania. Głównym zadaniem mikroskopowych modeli ruchu jest odzwierciedlenie rzeczywistego zachowania pojedynczego pojazdu w ruchu drogowym, którego ruch jest zdeterminowany zachowaniem pojazdu poprzedzającego [2, 3].

Z przeprowadzonego w pracy [4] porównania mikroskopowych modeli ruchu wynika, że grupa modeli bezpiecznej odległości najlepiej oddaje rzeczywisty proces podążania pojazdu. Nadrzędnym założeniem w modelach tej grupy jest niedopuszczenie do powstania kolizji pomiędzy dwoma sąsiadującymi pojazdami. Założenie to jest realizowane w sposób, który zapewnia utrzymywanie przed pojazdem podążającym bezpiecznej odległości od pojazdu poprzedzającego. Bezpieczna odległość rozumiana jest, jako ta, która zapewnia bezkolizyjne zatrzymanie pojazdu podążającego przez swoim bezpośrednim poprzednikiem.

Wszystkie prezentowane w niniejszej pracy wyniki dotyczące modelowania ruchu pojazdów uzyskano po zastosowaniu modelu Kraussa. Szczegółowy opis modelu bezpiecznej odległości Kraussa można znaleźć między innymi w pracach [4, 5].

Prawidłowe odwzorowywanie zachowania pojazdu w modelach mikroskopowych, również w modelu Kraussa wiąże się z uwzględnianiem ograniczeń zapewniających występowanie realnych przyspieszeń. Stosowane sposoby parametryzacji maksymalnego przyspieszenia pojazdów przedstawiono w dalszej części pracy.

3. Parametryzacja właściwości dynamicznych pojazdów w mikroskopowych modelach ruchu

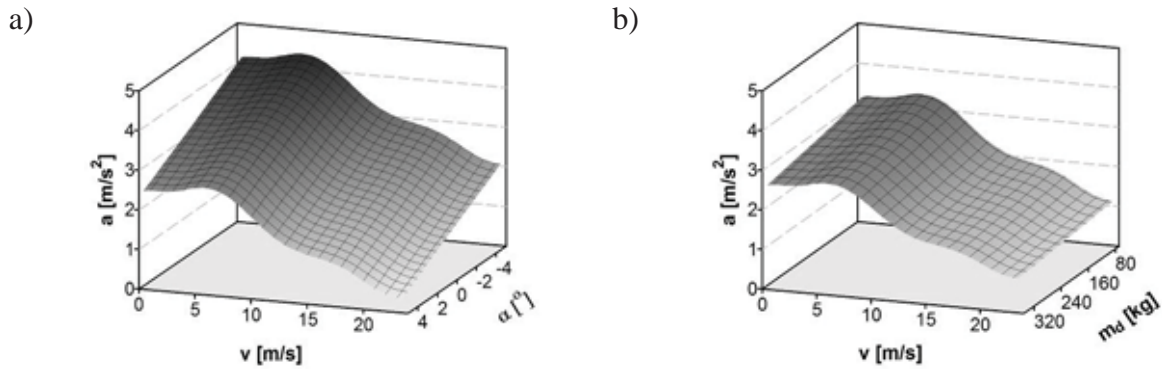
Najprostszym podejściem wykorzystywanym w parametryzacji właściwości dynamicznych pojazdu w mikroskalowych modelach ruchu jest przyjęcie stałych wartości maksymalnego przyspieszenia i opóźnienia. Takie rozwiązanie niewątpliwie zabezpiecza pojazdy przed osiągnięciem przez nie nierealnych przyspieszeń. Jednak ze względu na konsekwencje ograniczenia przyspieszenia pojazdu w ten sposób, jest ono stosowane stosunkowo rzadko. Innym, powszechnie stosowanym podejściem pozwalającym na ograniczenie dynamiki pojazdu jest uzależnienie wartości maksymalnych przyspieszeń od aktualnej prędkości oraz kategorii pojazdu. W takim rozwiązaniu również obserwuje się pewne wady. Do najistotniejszych z nich zalicza się brak uwzględnienia parametrów, mających bezpośredni wpływ na dynamikę pojazdu, związanych z rodzajem i stanem technicznym nawierzchni jezdni oraz obciążeniem pojazdu.

Rozwiązaniem zapewniającym poprawne uwzględnienie właściwości dynamicznych pojazdu w modelu ruchu jest wyznaczenie jego maksymalnego przyspieszenia w postaci ciągłej funkcji zależnej od dodatkowych parametrów, które istotnie wpływają na wartości przyspieszenia uzyskiwane przez pojazdy. Takie podejście zaprezentowano między innymi w pracach [3, 6]. W obu przypadkach wartości maksymalnego przyspieszenia w postaci funkcji ciągłej wyznaczono z wykorzystaniem modelu dynamiki ruchu, który uwzględnia parametry fizyczne pojazdu, rodzaj jednostki napędowej oraz różne typy nawierzchni i różne kąty jej nachylenia. Model dynamiki przedstawiony w drugiej z wymienionych prac, pozwala na modelowanie rozpędzania pojazdu z uwzględnieniem zmiany przełożeń skrzyni biegów dla różnych warunków atmosferycznych. Oba modele poddano walidacji z wynikami badań drogowych uzyskując zadawalające odzwierciedlenie rzeczywistych wartości maksymalnego przyspieszenia.

W pracy podczas modelowania przepływu potoku pojazdów stosowano parametryzację maksymalnego przyspieszenia w zależności od kategorii pojazdu, rodzaju jednostki napędowej, prędkości ruchu, kąta nachylenia jezdni oraz dodatkowego obciążenia pojazdu. Maksymalne przyspieszenie pojazdu osobowego wyposażonego w silnik ZI w zależności od prędkości i kąta nachylenia jezdni oraz prędkości i dodatkowego obciążenia zastosowane w modelu ruchu przedstawiono na Rys. 1.

4. Modelowanie emisji w układach komunikacyjnych – wpływ parametryzacji własności dynamicznych pojazdów w modelu ruchu na obliczeniową emisję

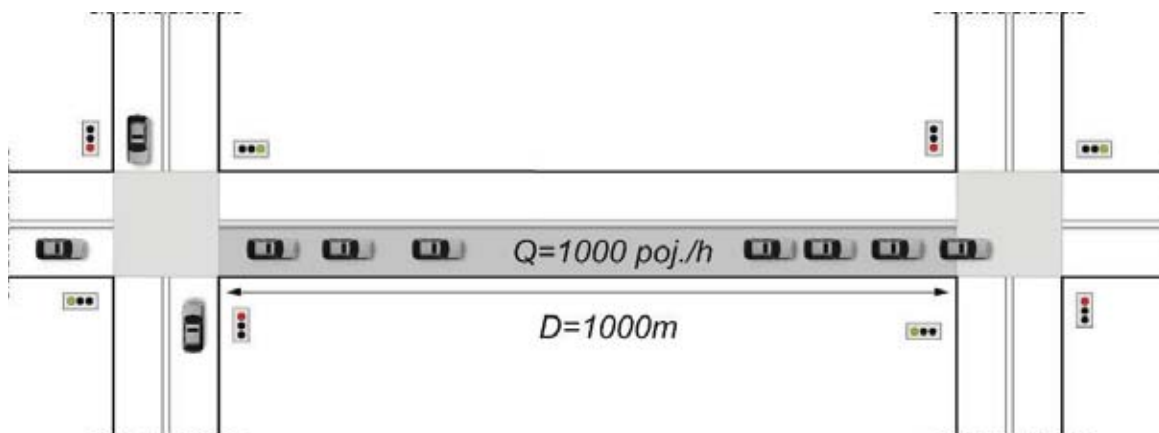
Ocenę wpływu przyjętego sposobu parametryzacji na obliczeniową emisję zanieczyszczeń dokonano dla pojedynczego pasa drogi pomiędzy dwoma skrzyżowaniami, należącego do układu komunikacyjnego przedstawionego na Rys. 2. Wszystkie symulacje ruchu potoku pojazdów



Rys. 1. Maksymalne przyspieszenie a [m/s^2] pojazdu osobowego wyposażonego w silnik ZI w trakcie rozpędzania przez biegi w zależności od a) prędkości pojazdu v i kąta nachylenia jezdni α , b) prędkości pojazdu v i dodatkowego obciążenia pojazdu m_d

Fig. 1. Maximal acceleration a [m/s^2] of passenger car with SI engine during speeding up with changing shifts of a gearbox in dependence on a) the vehicle speed v and the angle of road slope α b) the vehicle speed v and an additional vehicle load m_d

przeprowadzono dla jednej wybranej kategorii pojazdów (samochody osobowe z silnikiem ZI wyposażonym w reaktor katalityczny) dla czasu $T = 3600$ s. Przepływ pojazdów w rozpatrywanym układzie był zdeterminowany czasem trwania poszczególnych faz sygnalizacji świetlnej (światło zielone: 50 s, żółte: 5 s, czerwone: 70 s). Maksymalną prędkość pojazdów ustalono na 50 km/h. Długość analizowanego odcinka drogi przyjęto za $D = 1000$ m. Średnie natężenie ruchu pojazdów na wlocie drogi kształtowało się na poziomie $Q = 1000$ poj./h.

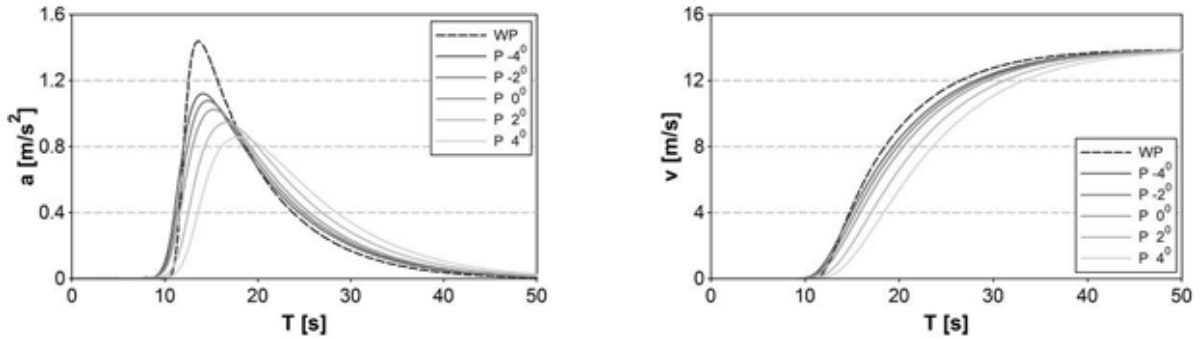


Rys. 2. Analizowany układ drogowy

Fig. 2. Investigated road network

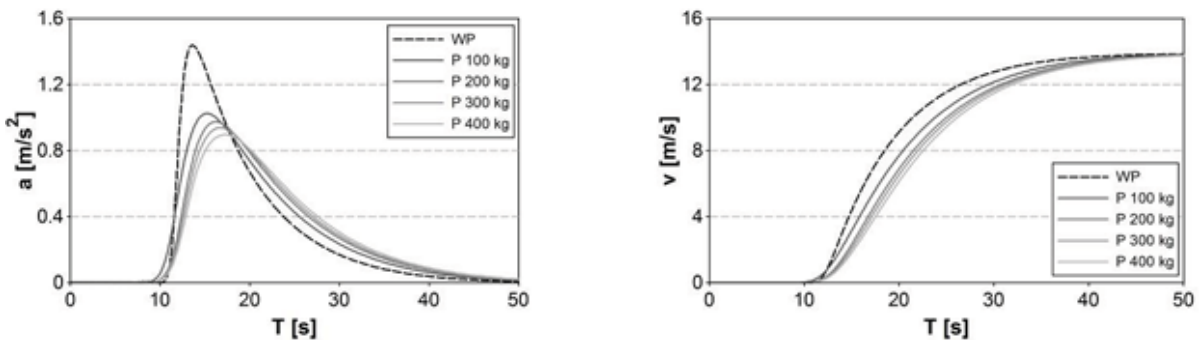
Symulacje ruchu potoku pojazdów w rozpatrywanym układzie komunikacyjnym przeprowadzono, zmieniając kąt nachylenia jezdni oraz uwzględniając dodatkowe obciążenie pojazdów. Najpierw analizowano różnice w obliczonych przyspieszeniach i prędkościach (Rys. 3 i 4) dla pojedynczego pojazdu z potoku. Następnie, na podstawie zarejestrowanych w trakcie symulacji parametrów dynamiki ruchu obliczono natężenie emisji tlenku węgla, węglowodorów i tlenków azotu. W tym celu wykorzystano charakterystyki dynamiczne emisji przedstawione na Rys. 5. Na Rys. 6 przedstawiono uzyskane wyniki obliczeń natężenia emisji dla pojazdu w zależności od kąta nachylenia jezdni oraz gdy był on obciążony dodatkową masą.

Na Rys. 3, 4, 6, oznaczenie WP odnosi się do modelu ruchu, który nie uwzględnia parametryzacji własności dynamicznych pojazdu. Natomiast, oznaczenie P odnosi się do modelu ruchu, w którym zastosowano parametryzację maksymalnego przyspieszenia w zależności od prędkości ruchu, kąta nachylenia jezdni i dodatkowego obciążenia.



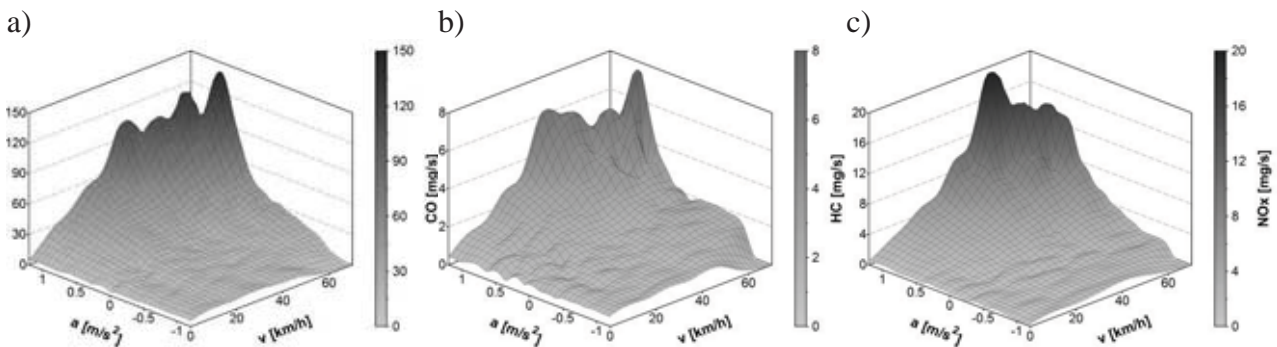
Rys. 3. Przyspieszenie a [m/s²] i prędkość v [m/s] pojazdu w potoku w trakcie rozpędzania w zależności od kąta nachylenia jezdni

Fig. 3. The acceleration a [m/s²] and speed v [m/s] of vehicle in traffic during speeding up in dependence on the angle of road slope



Rys. 4. Przyspieszenie a [m/s²] i prędkość v [m/s] pojazdu w potoku w trakcie rozpędzania w zależności od dodatkowego obciążenia pojazdu

Fig. 4. The acceleration a [m/s²] and speed v [m/s] of vehicle in traffic during speeding up in dependence on the additional vehicle load

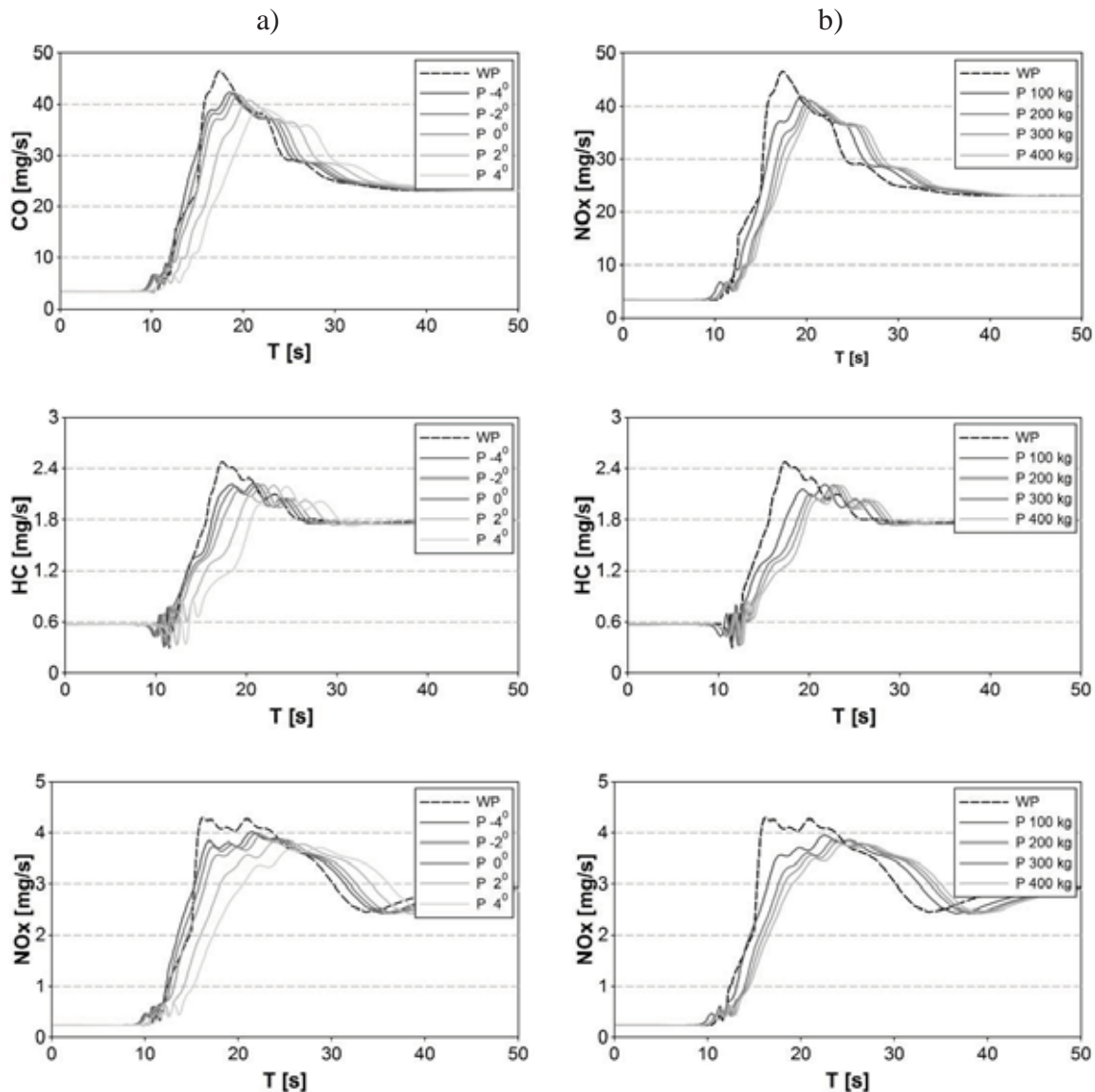


Rys. 5. Natężenie emisji a) tlenku węgla, b) węglowodorów, c) tlenków azotu dla pojazdu z silnikiem ZI wyposażonym w reaktor katalityczny

Fig. 5. Emission intensity of a) carbon monoxide, b) hydrocarbon, c) nitrogen oxides for the passenger vehicle with SI engine and the catalytic converter

Analiza wyników rozpędzania pojazdu według modelu ruchu z i bez parametryzacji (Rys. 3, 4) pozwala na stwierdzenie, że mniejsze przyspieszenia pojazd uzyskuje wówczas gdy w modelu ruchu uwzględnia się dodatkowe parametry uzależniające maksymalne przyspieszenie pojazdu od kąta nachylenia jezdni oraz obciążenia dodatkową masą. Ponadto, w modelu ruchu uwzględniającym parametryzację, prędkość docelowa osiągnięta jest później, faza przyspieszenia trwa dłużej, bezpośrednio wpływa to na różnice w chwilowym natężeniu emisji związków szkodliwych spalin, jak przedstawiono na Rys. 6.

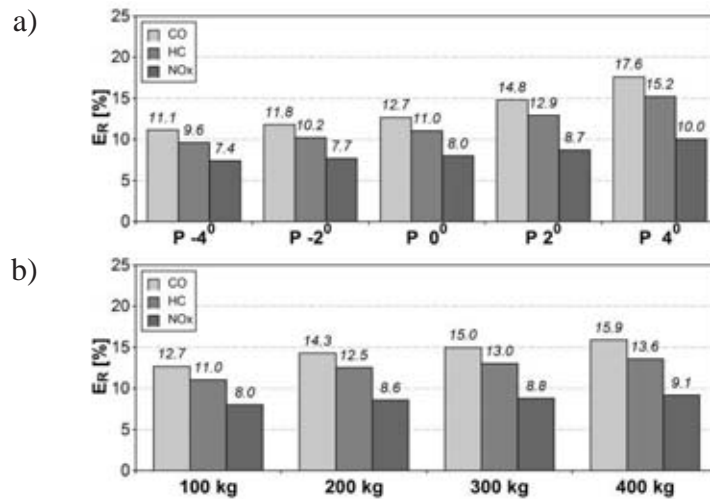
Kolejnym krokiem było porównanie wyników obliczeń emisji drogowej dla rozpatrywanego przypadku rozpędzania. Różnice procentowe w obliczonej emisji drogowej dla modelu ruchu uwzględniającego parametryzację i modelu ruchu, który tej parametryzacji nie uwzględnia przedstawiono na Rys. 7. Jak łatwo można zauważyć, każdorazowo emisję większą uzyskano według modelu ruchu uwzględniającego parametryzację maksymalnego przyspieszenia. Zwiększa się ona wraz ze wzrostem kąta nachylenia jezdni i obciążeniem pojazdu.



Rys. 6. Natężenie emisji tlenku węgla, węglowodorów i tlenków azotu dla pojazdu w potoku w trakcie rozpędzania w zależności od a) kąta nachylenia jezdni oraz b) dodatkowego obciążenia samochodu

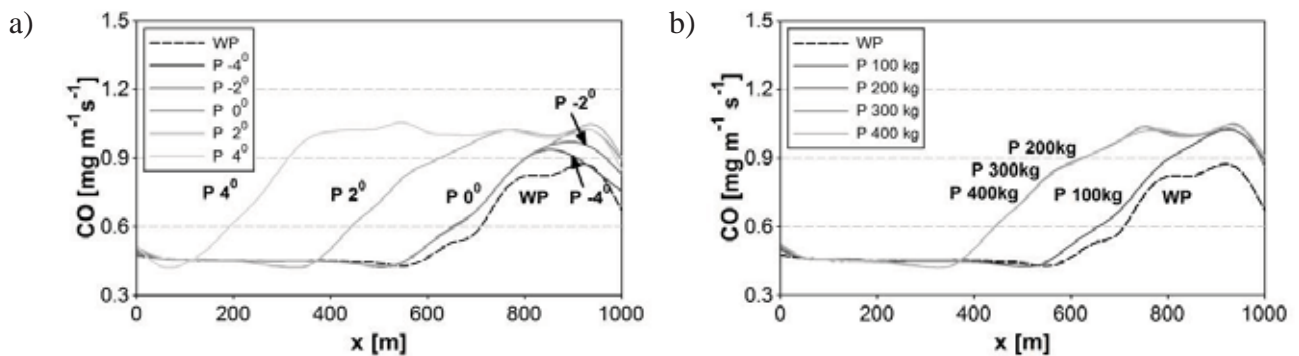
Fig. 6. Emission intensity of carbon monoxide, hydrocarbons and nitrogen oxides for passenger vehicle in traffic during speeding up in dependence on a) the angle of road slope and b) the additional vehicle load

Różnice procentowe w obliczonej emisji drogowej wahają się w przedziale kilku do kilkunastu procent (CO – 11,1%-17,6% i 12,7%-15,9%, HC – 9,6%-15,2% i 11%-13,6%, NOx – 7,4%-10% i 8%-9,1%). Największą różnicę zanotowano dla tlenku węgla, a najmniejszą dla tlenków azotu. Natomiast, analizując emisję drogową wyłącznie dla modelu ruchu uwzględniającego parametryzację maksymalnego przyspieszenia dostrzega się, że różnice w obliczonej emisji nie są już tak duże i wynoszą kilka procent (CO – 6,5% i 3,2%, HC – 5,6% i 2,6%, NOx – 2,6% i 1,1%).



Rys. 7. Różnica w emisji drogowej ER [%] obliczonej w trakcie rozpędzania pojazdu w zależności od a) kąta nachylenia jezdni oraz b) obciążenia pojazdu dodatkową masą, w stosunku do modelu bez parametryzacji
 Fig. 7. Difference in road emission ER [%] calculated during vehicle speeding up in dependence on a) the angle of road slope and b) the additional vehicle load, in relation to emission calculated for non-parameterized model

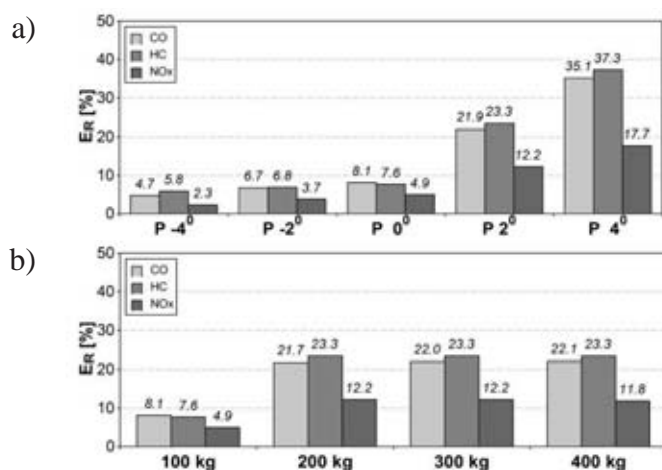
Różnica w obliczonej emisji jest również widoczna wzdłuż całego rozpatrywanego układu drogowego, po którym poruszają się pojazdy. Sterowanie przepływem potoku pojazdów przez sygnalizację świetlną ma zasadnicze znaczenie w procesie formowania się kolejki przed skrzyżowaniem. Na długość kolejki, oprócz czasu faz sygnalizacji świetlnej ma również wpływ sposób parametryzacji maksymalnego przyspieszenia w modelu ruchu. Sytuację tą można obserwować na wykresie średniego natężenia danego składnika spalin odniesionego do jednostki długości. Dla analizowanego pasa drogi wykresy zmian natężenia emisji tlenku węgla w zależności od kąta nachylenia jezdni oraz obciążenia pojazdów dodatkowa masą wzdłuż całej długości drogi przedstawiono Rys. 8.



Rys. 8. Średnie natężenie emisji tlenku węgla odniesione do jednostki długości wzdłuż rozpatrywanego układu komunikacyjnego w zależności od a) kąta nachylenia jezdni oraz b) obciążenia pojazdów dodatkową masą
 Fig. 8. Mean emission intensity of carbon monoxide per length unit along investigated road in dependence on a) the angle of road slope and b) the additional vehicles load

Uwzględnienie parametryzacji w modelu ruchu wyraźnie skutkuje zwiększeniem kolejki pojazdów przed skrzyżowaniem, co wpływa na rozkład przestrzenny natężenia emisji zanieczyszczeń pomiędzy dwoma skrzyżowaniami. Zmniejszenie przepływu pojazdów wpływa na zwiększenie sumarycznej emisji.

Do potwierdzenia istotności prowadzonych rozważań w kontekście problemu bilansowania emisji, wystarczy porównać wyniki obliczeń sumarycznej emisji przedstawione na Rys. 9. Różnica w obliczonej sumarycznej emisji według modelu ruchu uwzględniającego i nieuwzględniającego ograniczenia dynamiki w skrajnych przypadkach może sięgać prawie 40%.



Rys. 9. Różnice w sumarycznej emisji E_R [%] obliczonej dla rozpatrywanego pasa drogowego w ciągu 1 h w zależności od a) kąta nachylenia jezdni oraz b) obciążenia pojazdów dodatkową masą, w stosunku do modelu bez parametryzacji

Fig. 9. Difference in total emission E_R [%] calculated for investigated road lane during 1h in dependence on a) the angle of road slope and b) the additional vehicles load, in relation to emission calculated for non-parameterized model

6. Podsumowanie

Z przeprowadzonych w pracy symulacji numerycznych wynika, że uwzględnienie parametryzacji maksymalnego przyspieszenia w mikroskopowym modelu ruchu ma zasadniczy wpływ na własności dynamiczne pojazdu, jak i całego potoku. Obliczona emisja zanieczyszczeń, na podstawie zarejestrowanych wartości prędkości i przyspieszeń według modelu ruchu, uwzględniającego i nieuwzględniającego parametryzację, różni się znacząco. Sumaryczna emisja zanieczyszczeń obliczona według nieparametryzowanego modelu ruchu jest każdorazowo zaniżana. Sytuacja ta jest spowodowana niedoszacowaniem kolejki pojazdów w warunkach zmiennego kąta nachylenia, rodzaju i stanu nawierzchni jezdni.

Zastosowany sposób parametryzacji maksymalnego przyspieszenia pojazdu w zależności od kąta nachylenia jezdni i obciążenia dodatkową masą pojazdów umożliwia modelowanie ruchu potoku pojazdów z uwzględnieniem rzeczywistych czynników mających wpływ na ruch pojazdu. Jak wykazano w pracy uwzględnienie tego typu czynników może mieć decydujący wpływ na przepływ potoku pojazdów, tworzenie się zatorów drogowych oraz bilans emisji. Dlatego, zdaniem autora w trakcie modelowania przepływu z wykorzystaniem mikroskopowego modelu ruchu powinno uwzględniać się parametryzację maksymalnego przyspieszenia pojazdów.

Literatura

- [1] Brzozowska, L., Brzozowski, K., Drąg, Ł., *Road transport - quality of atmospheric air. Computational modelling in mesoscale*, in Polish, WKiŁ, Warszawa 2009.
- [2] Datka, S., Suchorzewski, W., Tracz, M., *Traffic engineering*, WKiŁ, Warszawa 1997.
- [3] Drąg, Ł., *Influence of car motion models on the computational car exhaust emission*, in Polish, Ph.D. Thesis, University of Bielsko-Biala, 2008.
- [4] Drąg, Ł., Wojciech, S., *Evaluation of car following process in microscopic flow models*, Transport Problems – I Int. Scien. Conf., pp. 73-80, Katowice-Korczyce 2009.
- [5] Krauss, S., *Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics*, Ph.D. Thesis, University of Cologne, Germany 1998.
- [6] Rakha, H., Snare, M., Dion, F., *Vehicle Dynamics Model for Estimating Maximum Light Duty Vehicle Acceleration Levels*, Journal of the Transp. Research Board, No. 1883, pp. 40-49, 2004.
- [7] *Traffic Flow Theory Monographs, Revised Traffic Flow Theory. A state of the Art Report*. Transportation Research Board, National Academy of Science, USA 2001.