

Modelowanie emisji z wykorzystaniem symulacji mikroskopowych^{1,2}

KONRAD BISZKO

mgr inż., doktorant, Katedra Inżynierii Drogowej i Transportowej, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, e-mail: konrad.biszko@pg.edu.pl

JACEK OSKARBSKI

dr hab. inż., prof. PG, Katedra Inżynierii Drogowej i Transportowej, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, e-mail: jacek.oskarbski@pg.edu.pl

Streszczenie: W artykule poruszono zagadnienia związane z modelowaniem emisji spalin z wykorzystaniem mikroskopowych symulacji ruchu drogowego. Celem pracy było opracowanie modelu ruchu, na podstawie którego możliwe jest obliczenie emisji z pojazdów z uwzględnieniem typu skrzyżowania oraz wartości natężeń ruchu. W artykule skupiono się na wartościach zużycia paliwa i emisji dwutlenku węgla. Przeanalizowano literaturę w zakresie czynników wpływających na emisję, które zależne są od człowieka, pojazdu i infrastruktury. Dokonano przeglądu matematycznych modeli pozwalających na obliczenie wartości chwilowych, często związanych ze zużyciem paliwa, które stanowią podstawę do oszacowania emisji. Wybrany model został zaimplementowany do modułu oprogramowania mikrosymulacyjnego w celu analizy wielkości emisji, w zależności od natężenia ruchu na skrzyżowaniu o ruchu okrężnym i skrzyżowaniu z pierwszeństwem przejazdu. Przedstawiono wyniki badań z uwzględnieniem wariantów modeli sieci obejmujących jedynie dojazd i przejazd przez skrzyżowanie oraz niezależnie uwzględniających rozpędzanie pojazdów za skrzyżowaniem. W końcowym fragmencie artykułu objęto dyskusją wybrane założenia, możliwe do uwzględnienia w analizach i mające wpływ na osiągnięte wyniki, omówiono kwestie dokładności modelu oraz zaproponowano rozwiązania pozwalające na zwiększenie poziomu szczegółowości osiąganych wyników.

Słowa kluczowe: modelowanie ruchu, modelowanie emisji spalin, emisja dwutlenku węgla.

Wprowadzenie

Z roku na rok coraz większy nacisk kładzie się na ograniczanie emisji substancji szkodliwych do środowiska. Transport odpowiada za część produkowanych zanieczyszczeń, dlatego podejmowane są różne kroki, by zmniejszyć jego negatywne oddziaływanie na środowisko. Odpowiednim działaniem jest modyfikacja istniejących elementów systemu transportu i zachowań podróżujących tak, by bez znacznego pogorszenia jakości życia społeczeństwa dostarczyć rozwiązania pozwalające na dążenie do ograniczania substancji szkodliwych. Szczególnie w centrach miast, gdzie populacja jest duża, często występują zatory drogowe, a duże natężenie pojazdów przekłada się na wysoką emisję spalin i hałasu, dochodzi do zmniejszenia komfortu mieszkańców.

Systemy transportu miejskiego stoją przed poważnymi wyzwaniami wynikającymi ze wzrostu liczby prywatnych pojazdów i wskaźników motoryzacji (liczba pojazdów prywatnych na liczbę mieszkańców) [1,2]. W 2018 roku

w krajach Unii Europejskiej (UE) było ponad 256 milionów samochodów osobowych [3]. Prognozy Banku Światowego wskazują, że do 2050 roku liczba pojazdów na drogach podwoi się do 2 miliardów, a prawie 70% prognozowanej liczby ludności świata (około 5,4 miliardów) będzie mieszkać na obszarach miejskich, co potroi liczbę podróży w miastach [4,5]. Według najnowszych szacunków, transport pasażerski (w kilometrach) w Stanach Zjednoczonych wzrośnie o 30–50% do 2100 roku [6], a w krajach UE o 42% do 2050 roku [7].

Władze miast starają się poprawiać sytuację, inwestując w rozwój transportu zbiorowego poprzez rozwijanie dostępczej oferty przewozowej i stosowanie dedykowanych rozwiązań, takich jak buspasy czy priorytety w sygnalizacji świetlnej, mające na celu zachęcić podróżnych do korzystania ze środków, jakimi są autobusy czy tramwaje. Ponadto w celu lokalnego ograniczenia emisji dodatkowe przywileje nadawane są pojazdom elektrycznym, jak na przykład możliwość wjazdu na buspasy czy darmowe parkowanie w wyznaczonych strefach. Jednocześnie ograniczana jest możliwość wjazdu do centrum pojazdom nie spełniającym określonych norm lub pojazdom prywatnym w ogóle. Dodatkowo w zakresie infrastruktury często stosuje się rozwiązania ograniczające korzystanie w podróży z samochodu, jak np. zmniejszenie liczby pasów na szerokich arteriach lub przekształcanie dotychczasowych pasów do ruchu ogólnego w buspasy. Wprowadzane są ponadto priorytety dla aktywnych uczestników ruchu – rowerzystów i pieszych, na przykład poprzez budowę odcinków o ruchu współdzielonym, na których prędkość pojazdu dostosowana jest do spacerujących przechodniów. Rzadko jednak zdarza się, by proponowane rozwiązania były dokładnie badane pod kątem emisji substancji szkodliwych dla zdrowia mieszkańców lub wpływających na zmiany klimatyczne [8]. W szczególności w strefach gęstego zaludnienia wydaje się istotne, by liczni mieszkańcy i piesi, znajdujący się w bezpośredniej lokalizacji drogi, byli narażeni na jak najmniejsze działanie substancji szkodliwych.

Celem artykułu jest zbadanie możliwości opracowania modelu będącego w stanie wspomóc proces oceny wpływu wybranych rozwiązań na emisję substancji szkodliwych. Z uwagi na możliwość odwzorowania rzeczywistości w zakresie rozwiązań drogowych oraz zachowań kierowców w relatywnie dużym stopniu, zdecydowano się na opracowanie

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2022.

² Wkład autorów w publikację: Konrad Biszko 60%, Jacek Oskarbski 40%.

modelu w skali mikroskopowej. W artykule skupiono się przede wszystkim na obliczeniu wartości spalnego paliwa oraz emisji dwutlenku węgla (CO_2).

Wpływ transportu na emisję zanieczyszczeń

Na świecie transport odpowiada za 23% emisji CO_2 , w UE wartość ta wynosi 30% [9], w tym 72% pochodzi z transportu drogowego [10]. Choć z biegiem lat pojawiają się nowe, coraz bardziej restrykcyjne normy emisji i widoczne jest to w zmniejszającej się emisji substancji szkodliwych w nowo produkowanych samochodach [11], podobny udział transportu drogowego w produkcji dwutlenku węgla został zachowany na przestrzeni lat [10, 12]. Emitowanych jest wiele substancji szkodliwych [12], natomiast sektor transportu drogowego odpowiada za emisję około 15% gazów cieplarnianych [9]. Dla obszarów zurbanizowanych można oszacować energię potrzebną do funkcjonowania poszczególnych środków transportu [12]. W tabeli 1 widać, że pojazdy poruszające się po drogach, w szczególności samochody osobowe, uwzględniając wskaźnik MJ/pasażerokm, pochłaniają najwięcej energii [12].

Tabela 1

Zużycie energii (MJ/paskm) przypadające na poszczególne środki transportu w obszarach zurbanizowanych			
Środek transportu	Produkcja	Eksploatacja	Całość
Rower	0.5	0.3	0.8
Tramwaj	0.7	1.4	2.1
Autobus	0.7	2.1	2.8
Kolej	0.9	1.9	2.8
Samochód (benzyna)	1.4	3	4.4
Samochód (diesel)	1.4	3.3	4.7

Źródło: opracowanie własne na podst. [12]

Czynniki wpływające na wielkość emisji

Większość zanieczyszczeń emitowanych do środowiska można powiązać ze zużyciem paliwa [13–15], dlatego też aspekty z nim związane będą powiązane bezpośrednio z ekologią. Zużycie paliwa jest natomiast powiązane z wieloma różnymi czynnikami, wynikającymi zarówno z otoczenia [13, 16], charakterystyki statycznej i dynamicznej pojazdu [17, 18] oraz czynników ludzkich [19], które często oddziałują na wspomnianą już charakterystykę dynamiczną.

W przypadku cech pojazdów wpływających na emisję, można wyróżnić takie, które pozostają stałe w obrębie danego obszaru analizy. Wśród nich istnieją takie, które zasadniczo nigdy się nie zmieniają, czyli przede wszystkim rodzaj paliwa [10, 14] oraz pojemność silnika [18]. Ponadto pewne cechy mogą ulegać zmianie, jak dodatkowa masa (większa liczba pasażerów, dodatkowy ładunek) [13] oraz powierzchnia przednia pojazdu (rośnie w przypadku przewożenia dodatkowych elementów na dachu pojazdu) [10, 13, 17, 18], ale wymienione cechy nie zmieniają się w przyjętym do badań interwale czasowym. W UE średnia emisja CO_2 wynosi około 125 g/km dla samochodów benzynowych oraz 150 g/km dla pojazdów z silnikiem diesla [10]. Inną możliwością oszacowania emisji CO_2 [14] jest uzależ-

nienie jej ilości wyrażonej w g/km w zależności od średniego zużycia paliwa wyrażonego w l/100km, gdzie zależności prezentują się następująco:

$$CO_2 = 26,5 * FC_d \quad (1)$$

$$CO_2 = 23,6 * FC_g \quad (2)$$

gdzie:

CO_2 [g/km] – emitowany dwutlenek węgla,

FC_d [l/100km] – zużycie paliwa (diesel),

FC_g [l/100km] – zużycie paliwa (benzyna).

Według przedstawionych zależności, może dojść do sytuacji, gdzie faktyczna emisja CO_2 będzie niższa dla samochodów z silnikiem diesla [14], jeżeli odpowiednia eksploatacja (ekonomiczna jazda w sprzyjających warunkach ruchu) pojazdu przełoży się na niższe zużycie paliwa w szerzej analizowanym okresie. Pojemność silnika zwykle związana jest ze stałą wartością zużycia paliwa i emisji spalin, niezależnie od eksploatacji. Zużycie to można obliczyć korzystając z zależności:

$$FC_e = y * EC \quad (3)$$

gdzie:

FC_e [ml/min] – zużycie paliwa,

EC [l] – pojemność silnika,

y – współczynnik modelu (przyjmowany 8,5) [18].

Dodatkowa masa może ulegać zmianie pomiędzy przejazdami, ale w obrębie pojedynczego odcinka zwykle jest stała, dlatego też można uznać ją za cechę pozostającą bez zmian, przynajmniej dla poszczególnych pojazdów w obrębie symulacji mikroskopowej. Zwiększenie masy przekłada się na większe opory ruchu, więc i na większą moc konieczną do wyprodukowania przez silnik, by pojazd był w stanie się poruszać [17, 18]. Ten stały element jest więc związany z charakterystykami dynamicznymi pojazdu. Ponadto według badań [13], gdy zwiększono masę pojazdu o dodatkowe 100 kg, a następnie 200 kg, obliczono, że na tym samym odcinku o długości 14,5 km emisja zwiększyła się odpowiednio o 16,15 g i 32,31 g. W tym konkretnym przypadku i wąskim zakresie analizy można zauważyć liniową zależność pomiędzy zwiększaniem masy pojazdu i wzrostem emisji CO_2 . Powierzchnia czoła pojazdu, podobnie jak masa własna, jest elementem, który pozostanie stały dla danego pojazdu w obrębie analizy i również wpłynie na opory ruchu [17, 18], a co za tym idzie na wartość emisji.

Charakterystyka dynamiczna pojazdu, wpływająca na chwilowe zużycie paliwa i emisje, to przede wszystkim prędkość i przyspieszenie [17, 18, 20]. Zużycie paliwa rośnie najbardziej przy dużych wartościach przyspieszenia. Przy zerowym przyspieszeniu i stałej prędkości wartość zużycia paliwa będzie stała, ale tym większa, im większa prędkość, co wynika z rosnących oporów ruchu (opory powietrza rosną wraz z kwadratem prędkości) [21]. Duże zużycie paliwa można zaobserwować również przy niskich prędkościach [13, 22]. Jednakże same wartości prędkości i przyspieszenia

osiągane w danym momencie zależą od człowieka i sposobu, w jaki dany pojazd kieruje, oraz od otoczenia, w którym się znalazł. Kolejnym aspektem związanym z dynamiką ruchu i sposobem kierowania jest dobór odpowiedniego biegu w pojeździe. W zależności od prędkości kierowcy zmieniają biegi (lub dzieje się to w sposób automatyczny) [22], natomiast poszczególne biegi pozwalają na osiągnięcie oczekiwanych wartości prędkości i przyspieszenia, jest to więc kolejny element zależny od kierowcy.

W przypadku otoczenia wpływ na zużycie paliwa i emisje będą miały rozwiązania związane z infrastrukturą [19, 24, 25], zastosowaną organizacją ruchu [24] oraz chwilowymi warunkami atmosferycznymi [15, 16, 26]. Ponadto, do otoczenia można zaliczyć usługi Inteligentnych Systemów Transportu (ITS) [27]. W przypadku infrastruktury różne wartości emisji obliczane są dla różnych typów skrzyżowań [25] lub w zależności od liczby pasów ruchu [24]. Organizacja ruchu związana z zastosowaniem rozwiązań, takich jak dedykowane pasy dla autobusów lub różna struktura programów sygnalizacji świetlnej, które mogą wpływać na zmianę emisji [24]. W przypadku zmiany warunków atmosferycznych (np. opadów deszczu lub śniegu) dochodzi do zmian parametrów ruchu na drodze, zmniejsza się prędkość, zwiększają się odstępstwa między pojazdami, następuje redukcja przepustowości, co może wpływać na powstawanie lub wydłużanie kolejek [16, 26]. Przekłada się to na zmianę dynamiki pojazdów, co może być przyczyną różnego poziomu zużycia paliwa i emisji. Warunki atmosferyczne dotyczą także temperatury otoczenia, która, poza związkiem z panującą pogodą, będzie też wpływać na temperaturę silnika. Jest to aspekt związany z samym pojazdem [15], ponieważ gdy silnik jest rozgrzany, czyli w stanie termicznej stabilności, emitowanych jest mniej substancji szkodliwych. Oczywiście, nawet przy wysokiej temperaturze otoczenia, potrzeba czasu na rozgrzanie się silnika do docelowej temperatury, ale im chłodniejsze otoczenie, tym więcej czasu to zajmie. W mieście, w którym funkcjonują usługi ITS [27], istnieje wiele różnych rozwiązań usprawniających transport, takich jak sterowanie ruchem lub kierowanie pojazdów na alternatywne trasy. To tylko niektóre ze składowych całego systemu przyczyniających się do poprawy warunków ruchu w mieście, jednocześnie wpływając na redukcję emisji.

Elementem spajającym opisane powyżej czynniki jest człowiek odpowiedzialny za prowadzenie pojazdu. To on dobiera prędkość, zachowuje się w różny sposób zależnie od sytuacji i warunków atmosferycznych, w różny sposób reaguje na poszczególne rozwiązania na drodze i panujące warunki ruchu [19, 26, 28].

Podjęcie wykorzystujące symulacje mikroskopowe może pozwolić na odpowiednie skalibrowanie modelu, tak by jak najbardziej odwzorowywał rzeczywistość [29]. Możliwym jest przyjęcie różnych parametrów pozwalających na odwzorowanie rozmaitych warunków pogodowych oraz zachowania kierowców w sieci drogowej. Dobrze skalibrowany model i dokładnie odwzorowane zależności w ruchu drogowym mogą być wykorzystane do analizy

rozwiązań niewystępujących dotychczas w danej lokalizacji [30–34].

Należy pamiętać, że lokalna zmiana w sieci drogowej, może przyczynić się do modyfikacji zachowania kierowców, w odniesieniu np. do wyboru trasy przejazdu. Niektóre podejścia [35, 36] jako jeden z pierwszych kroków przewidują wykonanie i kalibrację rozkładu podróży (źródło-cel), by dopiero w kolejnych krokach kalibrować zachowania kierowców i weryfikować poprawność modelu w skali mikro-skopowej.

Metody obliczania emisji

Można wyróżnić dwa typowe podejścia do obliczania emisji [23, 30]:

- flotowe – polegające na obliczeniu wartości emisji przy znajomości liczby i struktury rodzajowej pojazdów oraz pokonanej przez nie odległości, często zawierające dodatkowe zmienne, jak np. średnia prędkość;
- chwilowe – polegające na obliczaniu chwilowej emisji pochodzącej z symulacji każdego pojazdu indywidualnie, przy uwzględnieniu chwilowych zmiennych opisujących konkretny pojazd, często używane do symulacji mniejszej liczby pojazdów, ale przy większej dokładności.

Na przestrzeni lat powstało wiele różnych sposobów obliczania emisji, bazujących na różnych parametrach zależnych od oczekiwanego poziomu dokładności oraz posiadanych danych wejściowych. W oprogramowaniu SUMO wykorzystano uproszczone równanie związane z oporami ruchu, które powiązane z wartościami emisji dostępnymi w HBEFA [37], otrzymując równanie do obliczeń wartości emisji:

$$c_0 + c_1va + c_2va^2 + c_3v + c_4v^2 + c_5v^3 \quad (4)$$

gdzie:

- v [m/s] – prędkość,
- a [m/s²] – przyspieszenie,
- $c_0 - c_5$ – współczynniki zależne od pojazdu i obliczanej substancji szkodliwej [23].

Jak już wcześniej wspomniano, emisja jest związana ze zużyciem paliwa. Wiele modeli bazuje na wielkości zużycia paliwa, z których następnie wyliczane są ilości szkodliwych substancji dostarczanych do środowiska. Jeden z modeli służących do obliczenia zużycia paliwa został opracowany, bazując na pomiarach rzeczywistych wartości uzyskiwanych w zależności od prędkości i dynamiki ruchu [20] podczas przejazdu przez odcinek drogi ze skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną, gdzie można wydzielić: jazdę ze stałą prędkością, zwalnianie, postój, przyspieszanie. Warto zaznaczyć, że nawet w czasie jazdy ze stałą prędkością występują niewielkie wahania, w których kierowca na przemian nieznacznie zmniejsza i zwiększa swoją prędkość. Pewna wartość zużycia paliwa jest stała, nawet podczas zwalniania oraz postoju, większe prędkości przekładają się na jej wzrost, a największe wartości są osiągnięte w momentach,

w których dochodzi do przyspieszania. Na podstawie pomiarów i charakterystyki dynamicznej analizowanego pojazdu przygotowano funkcję, która umożliwi obliczenie zużycia paliwa [20]:

$$FC_t = \alpha + \beta_1 R_T v + [\beta_2 M a^2 v / 1000]_a \text{ dla } R_T > 0 \quad (5)$$

$$FC_t = \alpha \text{ dla } R_T \leq 0 \quad (6)$$

gdzie:

$\alpha, \beta_1, \beta_2, M, b_1, b_2$ – współczynniki związane z cechami pojazdu,

v [m/s] – prędkość pojazdu,

R_T [kN] – całkowita siła wymagana, aby pojazd się poruszał, wyrażona wzorem:

$$R_T = b_1 + b_2 v^2 + M a / 1000 + 9,81 M (G / 100) / 1000 \quad (7)$$

Istnieją inne matematyczne zależności wiążące wartość mocy ze zużyciem paliwa. Na podstawie pomiarów [17] osiągnięto korelację pomiędzy wartością zużycia paliwa a chwilową mocą silnika. Kolejnym podejściem do obliczenia zużycia paliwa jest obliczenie chwilowego zużycia paliwa, bazując na pokonanym dystansie, z uwzględnieniem takich parametrów jak prędkość, przyspieszenie oraz bieg, na którym znajduje się pojazd [22]. Analizując siły potrzebne do wprowadzenia pojazdu w ruch, można zastosować szereg równań odpowiedzialnych za opory, które pojazd musi pokonać, by zostać wprowadzony w ruch. Sumę tych oporów wyraża się równaniem [18]:

$$Z_t = Z_d + Z_r + Z_a + Z_e + Z_m \quad (8)$$

gdzie:

Z_t [kN] – suma oporów,

Z_d [kN] – opór układu napędowego,

Z_r [kN] – opór toczenia,

Z_a [kN] – opór powietrza,

Z_e [kN] – opór wzniesienia,

Z_m [kN] – opór od dodatkowego wyposażenia (zwykle pomijany).

Na podstawie uzyskanej wartości można obliczyć wartość zużycia paliwa, korzystając z zależności [18]:

$$F_c = \alpha + \beta Z_t = \gamma * EC + \beta Z_t \quad (9)$$

gdzie:

F_c [ml/min] – zużycie paliwa,

γ i β – współczynniki modelu (przyjmowane na poziomie 8,5 i 8,8),

Z_t – opory z równania (8).

Dodatkowo uwzględniając fakt, że występuje duża korelacja pomiędzy zużyciem paliwa a emisjami, przyjmując odpowiednie współczynniki i możliwe jest obliczenie wartości emisji CO, HC, NO_x bezpośrednio korzystając ze wzoru (9) [18].

Badania emisji na skrzyżowaniach

Analizując literaturę w zakresie wykonanych badań mających na celu porównanie różnych rozwiązań, bardzo często można trafić na różnicę w emisjach osiągniętych pomiędzy skrzyżowaniami z sygnalizacją świetlną [30, 38, 39] lub z określonymi zasadami pierwszeństwa przejazdu [25], które następnie zostały przebudowane na skrzyżowania o ruchu okrężnym. W większości przypadków wyniki wskazywały na rondo jako bardziej ekologiczne. Czasem wyniki różniły się w zależności od rodzaju emisji [39], gdzie wartości NO_x były niższe dla skrzyżowań z sygnalizacją, ale wartości CO₂ zawsze były niższe dla skrzyżowań o ruchu okrężnym. Należy zwrócić uwagę, że zależnie od analizowanego rozwiązania otrzymano różny rozkład prędkości przy porównywalnym obciążeniu ruchem [39], w przypadku sygnalizacji częściej występowały wartości niskie (około 10 km/h) i wyższe (około 40 km/h), podczas gdy w przypadku rond najczęściej osiągnięta prędkość wynosiła przez cały analizowany okres około 20 km/h. W kolejnym przypadku [38] stwierdzono, że wielkość emisji CO₂ różni się w zależności od strategii sterowania sygnalizacją. W przypadku koordynacji skrzyżowań z sygnalizacją emitowanych było mniej substancji szkodliwych niż w przypadku jej braku, niemniej najniższe wartości emisji wystąpiły dla skrzyżowań o ruchu okrężnym. Dodatkowo stwierdzono, że większe wartości emisji występują przy wyższym stopniu wykorzystania przepustowości. Różnice w emisjach pomiędzy rondem a pozostałymi typami skrzyżowań są zauważalne w szczególności przy bardzo wysokich natężeniach ruchu [38]. W kolejnej pracy [25] analizie poddano miejsca, gdzie skrzyżowania najpierw miały określone pierwszeństwo przejazdu ze znakami stop na wlotach dróg podporządkowanych lub zastosowano skrzyżowania równorzędne ze znakiem stop na każdym wlocie, a następnie zostały one przekształcone w skrzyżowania typu rondo. W każdym przypadku wyniki otrzymane z modelu wykazały, że rondo przyczyniają się do znacznego zmniejszenia emisji analizowanych substancji szkodliwych [25]. W opisanych przypadkach rondo okazały się lepsze pod kątem ekologii, ale zostały przeanalizowane tylko wybrane przypadki, co nie pozwala na jednoznaczne stwierdzenie, że w każdym przypadku skrzyżowanie o ruchu okrężnym będzie lepszym rozwiązaniem niż skrzyżowanie z pierwszeństwem przejazdu.

W celu przeprowadzenia analizy wpływu typu skrzyżowania oraz natężenia ruchu na emisję, autorzy niniejszego artykułu przygotowali model z wykorzystaniem modułu w oprogramowaniu PTV Vissim, pozwalającego na uwzględnienie zmiennych, takich jak prędkość, przyspieszenie, waga i klasa pojazdu oraz pochylenie jezdni [40]. Ze względu na przyjęcie metody mikroskopowej w badaniach został wykorzystany model chwilowy, ponieważ wybrane narzędzie pozwoliło na pozyskiwanie parametrów pojazdu w każdym kroku czasowym. Wykorzystano zależności ze wzoru (8). Poszczególne równania, odpowiadające za poszczególne opory ruchu, które pojazd pokonuje, wyrażono następująco [18]:

$$Z_d = 2,36 * 10^{-7} v^2 M \quad (10)$$

$$Z_r = (3,72 * 10^{-5} v + 3,09 * 10^{-8} v^2) M \quad (11)$$

$$Z_a = 1,29 * 10^{-5} C_d A v^3 \quad (12)$$

$$Z_e = 2,78 * 10^{-4} (a + g \sin \theta) M v \quad (13)$$

gdzie:

v [km/h] – prędkość,

a [m/s²] – przyspieszenie,

A [m²] – powierzchnia przednia pojazdu,

C_d – współczynnik oporu powietrza,

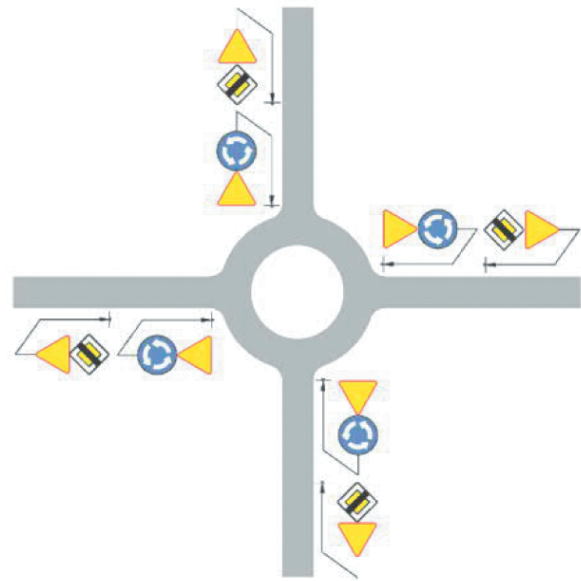
M [kg] – masa pojazdu,

θ – kąt pochylenia drogi.

Zmienne wprowadzono do modelu ruchu, a potem, na etapie prowadzenia obliczeń w ciągu trwania symulacji, wyniki były odczytywane przez interfejs modułu służącego do obliczania wartości emisji. Po uzyskaniu sumy oporów ruchu zastosowano równanie (9) [18]. Uzyskana wartość wyrażona jest w ml/min, dokonano zatem odpowiednich przekształceń, by dostosować ją do przyjętego kroku czasowego. Można uznać, że zużycie paliwa jest głównym wyznacznikiem tego, jak bardzo emisje rosną lub maleją, aczkolwiek żeby poznać poszczególne wartości wybranych substancji szkodliwych, należy dokonać odpowiednich przeliczeń. Należy zwrócić uwagę, że z biegiem lat normy emisji uległy zmianie, tak więc poszczególne współczynniki również mogą przyjmować różne wartości w zależności od struktury wiekowej pojazdów występujących w obszarze analizy.

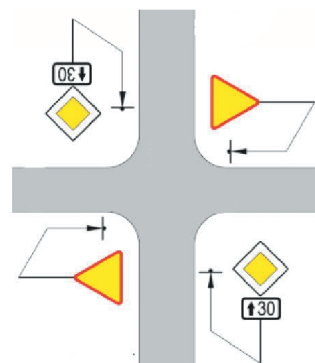
Zdecydowano się na przeanalizowanie wybranych przypadków, które były dotychczas badane w literaturze. Badanie miało na celu rozpoznanie, przynajmniej we wstępnym zakresie, jakie rozwiązanie będzie odpowiednie, jeśli jedynym rozpatrywanym kryterium są emisje substancji szkodliwych do środowiska. Najważniejsze czynniki wpływające na emisję to: sposób prowadzenia pojazdu przez kierowcę, rodzaj paliwa i napędu, rozmiar silnika, wiek pojazdu, masa własna i dodatkowe obciążenie pojazdu, warunki ruchu, struktura rodzajowa i kierunkowa ruchu, pochylenie drogi, typ skrzyżowania, pochylenie jezdni, warunki pogodowe. Na potrzeby tego artykułu uwzględniono zmienność tylko niektórych czynników (natężenie ruchu i typ skrzyżowania). Analizie poddano skrzyżowanie czterowlotowe z pierwszeństwem przejazdu oraz skrzyżowanie czterowlotowe o ruchu okrężnym. Schematyczne rysunki skrzyżowań przedstawiono na rysunkach 1 i 2.

W obu przypadkach dodatkowo przyjęto dwa możliwe warianty do analizy. Pierwszy obejmuje obszar skrzyżowania wraz odcinkiem o długości 1000 m przed nim, drugi obejmuje większy zakres z uwzględnieniem skrzyżowania oraz odcinka drogi o długości 1000 m przed i za skrzyżowaniem. Zabieg ten ma na celu zbadanie emisji powstałych przy rozpędzaniu pojazdów po zjechaniu ze skrzyżowania oraz redukcji prędkości i oczekiwania w kolejce podczas dojazdu. Na drogach miejskich skrzyżowania często są zlokalizowane częściej niż co 1 km, ale w przypadku niniejszej analizy zdecydowano się na taką długość odcin-



Rys. 1. Schemat skrzyżowania w ruchu okrężnym

Źródło: opracowanie własne na podst. [41]



Rys. 2.

Schemat skrzyżowania z pierwszeństwem przejazdu

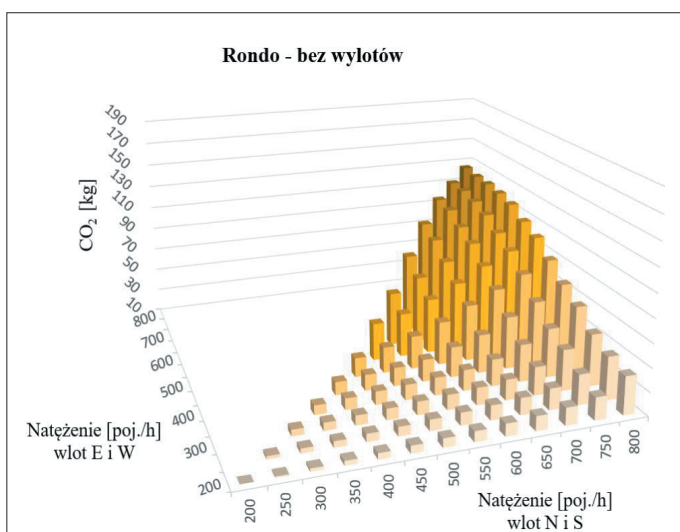
Źródło: opracowanie własne na podst. [41]

ków, by umożliwić w symulacji wjazd do sieci jak największej liczbie pojazdów. Prędkość dopuszczalna w sieci dróg miejskich to 50 km/h, przy czym w celu lepszego odwzorowania rzeczywistości przyjęto, że kierowcy, zgodnie z domyślnym rozkładem prędkości w oprogramowaniu PTV Vissim, wybierają wartości z przedziału od 48 do 58 km/h [42]. Na potrzeby analizy założono, że wszystkie pojazdy to samochody osobowe z silnikiem benzynowym. Ich waga zawiera się w przedziale od 900 do 2000 kg. Przyjęto, że pierwszeństwo przejazdu występuje na wlocie północnym i południowym. W każdym z przypadków założono taką samą strukturę kierunkową, tzn. na wlocie północnym i południowym 70% kierowców jedzie na wprost, 20% skręca w prawo, 10% skręca w lewo. Na wlocie wschodnim 70% kierowców skręca w prawo, 20% jedzie prosto, 10% skręca w lewo. Na wlocie zachodnim 50% skręca w lewo, 30% skręca w prawo, 20% jedzie na wprost. Symulacja dla każdego wariantu została przeprowadzona ze stopniowym wzrostem natężenia co 50 pojazdów (w przedziale od 200 do 800 P/h). Przyjęto, że natężenie na drogach podporządkowanych nie przekracza natężenia na drogach głównych. Takie założenia pozwoliły na porównanie 396 modeli symulacyjnych.

Wyniki badań

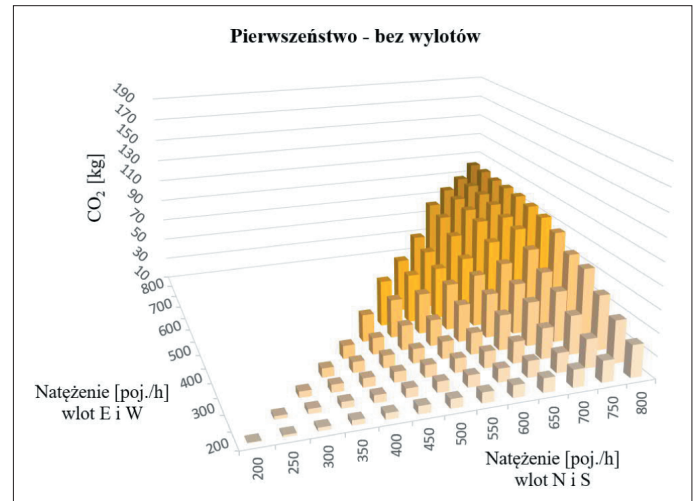
Emisja CO₂ wynika wprost ze zużycia paliwa [43] w stosunku 2,3 kg CO₂ na 1l benzyny, wobec tego model obliczający zużycie paliwa był też odpowiednim narzędziem do obliczenia emitowanego przez pojazdy dwutlenku węgla. Na rysunkach 3–6 przedstawiono wykresy dla każdego z rozpatrywanych wariantów typu skrzyżowania i zakresu obszarowego analizy. Dla dużych wartości natężeń ruchu pojazdy, w szczególności na wlotach podporządkowanych, oczekiwały na wjazd na skrzyżowanie przez długi czas, wypełniając cały model sieci, dlatego przy dalszym zwiększaniu obciążenia, nowe pojazdy nie były w stanie wjechać nawet na odcinek o długości 1 km. Przy przyjętej strukturze kierunkowej, gdzie z wlotu północnego i południowego większość pojazdów jechała na wprost, nawet na skrzyżowaniu typu rondo dochodziło chwilami do sytuacji, gdzie nieprzerwany strumień pojazdów blokował możliwość wjazdu na skrzyżowanie z wlotu wschodniego i zachodniego.

Analizując osiągnięte wartości emisji CO₂ dla wycinka sieci, bez uwzględnienia wartości emisji za skrzyżowaniem, otrzymano różne wyniki zależnie od natężenia. Do wielkości natężenia wynoszącej około 600 P/h, skrzyżowanie typu rondo (rys. 3) było zwykle bardziej ekologiczne – różnice w wartościach emisji CO₂ wynosiły od kilkuset gramów do 12 kilogramów. Dla natężenia przekraczającego 600 P/h, na skrzyżowaniach o ruchu okrężnym, zostało wyemitowane więcej spalin, a różnica ta wynosiła od kilkuset gramów do 23 kilogramów. Wartości emisji dla skrzyżowania z pierwszeństwem przejazdu (rys. 4) szybciej rosły do momentu, kiedy krytyczna wartość natężenia dla skrzyżowania została przekroczona. Pojazdy na wlotach głównych dalej były w stanie przejechać przez skrzyżowanie, podczas gdy na wlotach podporządkowanych kolejka sięgała granicy sieci. Dla skrzyżowania o ruchu okrężnym, po osiągnięciu krytycznej wartości natężenia, dochodziło do tworzenia się kolejek na wszystkich wlotach.



Rys. 3. Emisje CO₂ zależne od natężenia ruchu na skrzyżowaniu typu rondo bez uwzględnienia wylotów

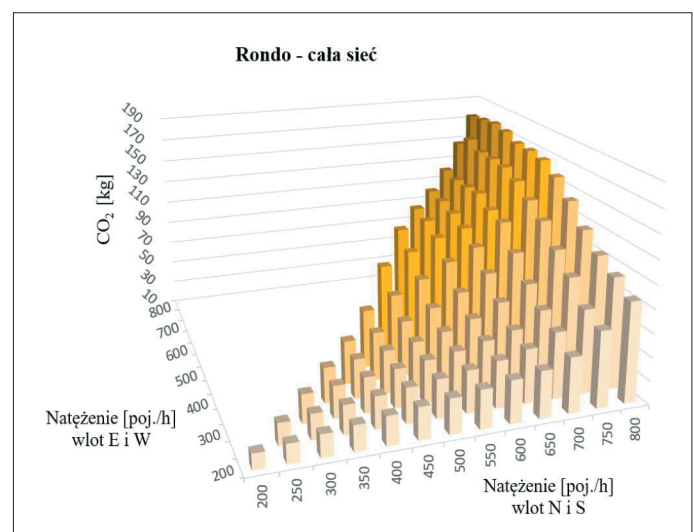
Źródło: opracowanie własne



Rys. 4. Emisje CO₂ zależne od natężenia ruchu na skrzyżowaniu z pierwszeństwem przejazdu bez uwzględnienia wylotów

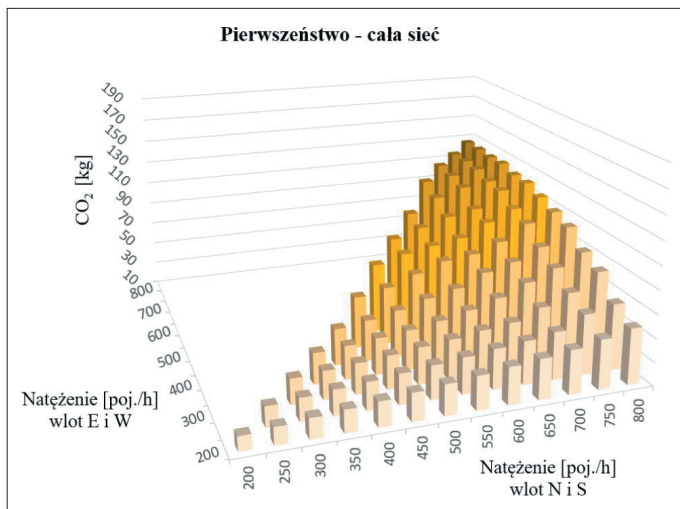
Źródło: opracowanie własne

Analizując warianty uwzględniające całą sieć (dojazd do skrzyżowania, skrzyżowanie i odcinek za skrzyżowaniem) dla wszystkich wartości analizowanego natężenia, skrzyżowanie z pierwszeństwem przejazdu (rys. 5) było bardziej ekologiczne. Emisja dwutlenku węgla na skrzyżowaniu o ruchu okrężnym (rys. 6) była większa od kilkuset gramów do 52 kilogramów. Poza sytuacją związaną z osiągnięciem krytycznego natężenia, tak jak w przypadku analizy jedynie wycinka sieci, dochodzi tutaj do rozpędzania się kierowców do prędkości 50 km/h po zjechaniu ze skrzyżowania. W przypadku pierwszeństwa przejazdu rozpędzają się kierowcy oczekujący na wlotach podporządkowanych oraz wszyscy, którzy wykonują manewr skrętu, jednakże jadący na wprost, szczególnie w relacji nadrzędnej, często mogą przejechać przez skrzyżowanie bez zmniejszania prędkości. W przypadku ronda, niezależnie od kierunku jazdy, zawsze dochodzi do ponownego rozpędzania się po zjechaniu ze skrzyżowania.



Rys. 5. Emisje CO₂ zależne od natężenia ruchu na skrzyżowaniu typu rondo z uwzględnieniem wylotów

Źródło: opracowanie własne



Rys. 6. Emisje CO₂ zależnie od natężenia ruchu na skrzyżowaniu z pierwszeństwem przejazdu z uwzględnieniem wlotów
Źródło: opracowanie własne

Podsumowanie

W artykule scharakteryzowano czynniki wpływające na emisje spalin w ruchu drogowym, przedstawiono wybrane modele matematyczne służące obliczaniu zużycia paliwa i emisji substancji szkodliwych oraz zaimplementowano wybrany model w oprogramowaniu PTV Vissim. Przeanalizowano wartości emisji dwutlenku węgla w zależności od natężenia ruchu typu skrzyżowania oraz zakresu obszarowego analizy. Uzyskane wyniki wskazują, że dla natężeń do około 600 P/h dla każdego z wlotów ronda są bardziej ekologiczne, jeśli nie uwzględnia się ponownego rozpędzania pojazdów po zjechaniu ze skrzyżowania. Większe wartości natężenia oraz większy zakres obszarowy analizy, uwzględniający ponowne rozpędzanie pojazdów za skrzyżowaniem, wskazują, że skrzyżowania z pierwszeństwem przejazdu są bardziej ekologiczne pod kątem wartości emisji dwutlenku węgla.

Osiągnięte wyniki pokazują pewne zależności, ale nie są uniwersalne. Została zbadana tylko przykładowa struktura kierunkowa dla założonej organizacji ruchu. Inny rozkład relacji skrętnych może mieć wpływ na wyniki badań. Kolejny aspekt to sama geometria skrzyżowania, dodatkowe pasy, inna organizacja ruchu, które będą wpływać na osiągnięte wyniki. Założona długość odcinka 1 km przed i za skrzyżowaniem jest znaczna. W rzeczywistych miejskich sieciach drogowych skrzyżowania często są zlokalizowane relatywnie blisko siebie, a na drogach występują dodatkowe ograniczenia prędkości, przejścia dla pieszych, przystanki dla pojazdów transportu zbiorowego, które mogą wpływać na wyniki badań. Dalsze elementy istotne dla wartości zużycia paliwa to struktura rodzajowa pojazdów oraz rodzaj i rozmiar silnika, które będą uwzględnione w dalszych badaniach.

Kolejnym aspektem, który ograniczał dokładność uzyskanych wyników, jest struktura zastosowanego modelu. Zależności pozwalające na obliczenie zużycia paliwa, które zostały wykorzystane w modelu, zostały przygotowane dla wartości ml/min. Model mikroskopowy oblicza wartości

w kroku czasowym, który może wynosić sekundę lub jej część. W ciągu minuty możliwe jest wielokrotne zatrzymanie, zmiana biegu, przejechanie przez skrzyżowanie. W przeszłych badaniach wskazane jest poszukiwanie możliwości zwiększenia szczegółowości modelu, na przykład poprzez uwzględnienie w algorytmie obliczeniowym biegu, na którym pojazd się porusza. Ponadto zależnie od regionu oraz roku, w którym przeprowadzane są badania, mogą obowiązywać różne normy, różny wiek pojazdów w sieci. Nawet w przypadku stosowania zależności fizycznych, które się nie zmieniają, wskazanym będzie sprawdzenie poprawności pod kątem użytych współczynników.

Pomimo wskazanych ograniczeń przeprowadzone analizy pozwoliły na pokazanie wątpliwości w odniesieniu do dotychczasowych wyników badań, które wskazywały jednoznacznie skrzyżowania typu rondo, jako rozwiązania przyczyniające się do redukcji emisji substancji szkodliwych.

W dalszych pracach badawczych przewidziano analizę kolejnych rozwiązań drogowych w zakresie wpływu typu, organizacji ruchu i geometrii skrzyżowań na wartość emisji. Zbadane zostaną wartości emisji na rzeczywistych skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną. Rozwinięcie modelu będzie obejmować wykorzystanie dodatkowych dostępnych wzorów i zależności wraz z kalibracją współczynników w celu bardziej wiernego odwzorowania rzeczywistości na przyjętym stopniu szczegółowości.

Literatura

1. Ferenchak N.N., Katirai M., *Pedestrian Crossing Behavior in Relation to Grouping and Gender in a Developing Country Context*. *Journal of Global Epidemiology and Environmental Health*, 2017, <https://doi.org/10.29199/geeh.101018>.
2. Lloyd L., Wallbank C., Broughton J., Cuerden R., *Estimating the potential impact of vehicle secondary safety regulations and consumer testing programs on road casualties in emerging markets*, *Journal of Transportation Safety and Security*, 2017, 9(1), <https://doi.org/10.1080/19439962.2016.1228091>.
3. Eurostat Passenger Cars, by Size and Type of Fuel Engine, 2021, Retrieved from <http://ec.europa.eu/eurostat/data/database>.
4. Machado C. A. S., Hue N. P. M. de S., Berssaneti F. T., Quintanilha J. A., *An overview of shared mobility*, *Sustainability (Switzerland)*, 2018, 10(12), <https://doi.org/10.3390/su10124342>.
5. Lerner W., *The Future of Urban Mobility. Towards Networked, Multimodal Cities of 2050*, 2011, <https://robertoigarza.files.wordpress.com/2009/07/rep-the-future-of-urban-mobility-2050-little-2011.pdf> [dostęp: 7.08.2019], *Arthur D. Little*, (October), 28.
6. Schäfer A. W., *Long-Term Trends in Domestic US Passenger Travel: The Past 110 Years and the Next 90*, *Transportation (amst)*, 2017, (44).
7. European Commission, *Transport in the European Union Current Trends and Issues*, March 2019.
8. Oskarbski J., Birr K., Żarski K., *Bicycle traffic model for sustainable urban mobility planning*, *Energies*, 2021, 14(18), <https://doi.org/10.3390/en14185970>.
9. Oecd & International Transport Forum, *Reducing transport greenhouse gas emissions*, *Trends & Data*, 2010. Oecd, 1–94.

10. Parlament Europejski, *Emisje CO₂ z samochodów fakty i liczby*, 2019, <https://www.europarl.europa.eu/news/pl/headlines/society/20190313STO31218/emisje-co2-z-samochodow-fakty-i-liczby-infografika>.
11. EEA & DG-CLIMA, 2022, *Average CO₂ emissions per km from new passenger cars*, https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/t2020_rk330/default/table?lang=en.
12. Roselló X., Langeland A., Viti F., *Public Transport in the Era of ITS: The Role of Public Transport in Sustainable Cities and Regions*, Springer Tracts on Transportation and Traffic, 2016, Vol. 1004, https://doi.org/10.1007/978-3-319-25082-3_4.
13. Nouri P., Morency C., *Untangling the Impacts of Various Factors on Emission Levels of Light Duty Gasoline Vehicles*, 2015, (October), <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11428.48008>.
14. Sullivan J. L., Baker R.E., *Policy Analysis CO₂ Emission Benefit of Diesel (versus Gasoline)*, "Powered Vehicles", 2004, 38(12).
15. Kan Z., Tang L., Kwan M.P., Zhang X., *Estimating vehicle fuel consumption and emissions using GPS big data*, International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(4), <https://doi.org/10.3390/ijerph15040566>.
16. Chen C., Zhao X., Liu H., Ren G., Zhang Y., Liu X., *Assessing the influence of adverse weather on traffic flow characteristics using a driving simulator and VISSIM*, Sustainability (Switzerland), 2019, 11(3), 1–16, <https://doi.org/10.3390/su11030830>.
17. Edwardes W., Rakha H., *Virginia tech comprehensive power-based fuel consumption model*, Transportation Research Record, 2014, 2428(312), <https://doi.org/10.3141/2428-01>.
18. Leung D. Y. C., Williams D. J., *Modelling of motor vehicle fuel consumption and emissions using a power-based model*, Environmental Monitoring and Assessment, 2000, 65(1–2), https://doi.org/10.1007/978-94-010-0932-4_3.
19. Bengler K., Drüke J., Hoffmann S., Manstetten D., Neukum A., *{UR:BAN} Human Factors in Traffic: Approaches for Safe, Efficient and Stress-free Urban Traffic*, 2017, <https://market.android.com/details?id=book-S2gpDwAAQBAJ>.
20. Biggs D.C., Akcelik R., *Models for Estimation of Car Fuel Consumption in Urban Traffic*, "ITE Journal" (Institute of Transportation Engineers), 1986, 56(7).
21. Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M., *Inżynieria ruchu drogowego*, 2014.
22. Treiber M., Kesting A., Thiemann C., *How Much does Traffic Congestion Increase Fuel Consumption and Emissions? Applying a Fuel Consumption Model to the NGSIM Trajectory Data*, Transportation Research Board, August 2018.
23. Krajzewicz D., Behrisch M., Wagner P., Luz R., Krumnow M., *Second generation of pollutant emission models for SUMO*, Lecture Notes in Control and Information Sciences, 2015, 13, 203–221, https://doi.org/10.1007/978-3-319-15024-6_12.
24. Kun C., Lei Y. U., *Microscopic Traffic-Emission Simulation and Case Study for Evaluation of Traffic Control Strategies*, "Journal of transportation systems engineering and information technology", 2007, Vol. 7.
25. Mandavilli S., Russell E., Rys M., *Impact of Modern Roundabouts on Vehicular Emissions*, Proceedings of the 2003 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, IA, USA, August 2003.
26. Bie Y., Qiu T. Z., Zhang C., Zhang C., *Introducing weather factor modelling into macro traffic state prediction*, Journal of Advanced Transportation, 2017, <https://doi.org/10.1155/2017/4879170>.
27. Jonkers E., Klunder G., Mahmud M., Benz T., *Methodology and framework architecture for the evaluation of effects of ICT measures on CO₂ emissions*, 20th ITS World Congress Tokyo, 2013, 1–9.
28. Higgs B., Abbas M., Medina A., *Analysis of the Wiedemann Car Following Model over Different Speeds using Naturalistic Data*, 3rd International Conference on ..., 2011, <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/conferences/2011/RSS/3/Higgs,B.pdf>.
29. Pourabdollah M., Bjarkvik E., Furer F., Lindenberg B., Burgdorf K., *Calibration and evaluation of car following models using real-world driving data*, IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC, 2018-March(October), <https://doi.org/10.1109/ITSC.2017.8317836>.
30. Gastaldi M., Meneguzzer C., Rossi R., Lucia L. Della, Gecchele G., *Evaluation of air pollution impacts of a signal control to roundabout conversion using microsimulation*, Transportation Research Procedia, 3, July 2014, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.10.083>.
31. Oskarski J., Gumińska L., Żarski K., *Influence of toll collection method on motorways on traffic safety and efficiency*, Communications in Computer and Information Science, 2018, Vol. 897, https://doi.org/10.1007/978-3-319-97955-7_10.
32. Oskarski J., Kaszubowski D., *Applying a mesoscopic transport model to analyse the effects of urban freight regulatory measures on transport emissions—an assessment*, Sustainability (Switzerland), 2018, 10(7), <https://doi.org/10.3390/su10072515>.
33. Oskarski J., Żarski K., *Methodology of research on the impact of ramp metering on the safety and efficiency of road traffic using transport models*, 6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS), 2019, Cracow, Poland: IEEE. <https://doi.org/10.1109/MTITS.2019.8883355>.
34. Oskarski J., Kamiński T., Kyamakya K., Chedjou J.C., Żarski K., Pędzierska M., *Assessment of the speed management impact on road traffic safety on the sections of motorways and expressways using simulation methods*, Sensors (Switzerland), 2020, 20(18), <https://doi.org/10.3390/s20185057>.
35. Toledo T., Koutsopoulos H.N., Davol A., Ben-Akiva M.E., Burghout W., Andréasson, I., ... Andréasson, I. (n.d.). *Calibration and Validation of Microscopic Traffic Simulation Tools Stockholm Case Study*.
36. Oskarski J., Żarski K., *Uwarunkowania realizacji kontrapasa autobusowego w zmiennokierunkowej organizacji ruchu*, "Transport Miejski i Regionalny", 2020, nr 5.
37. HBEFA Handbook emission factors for road transport, 2010, <https://www.hbefa.net/e/index.html>.
38. Salamati K., Roupail N.M., Frey H.C., Liu B., Schroeder B.J., *Simplified method for comparing emissions in roundabouts and at signalized intersections*, Transportation Research Record, 2015, 2517(2517), <https://doi.org/10.3141/2517-06>.
39. Meneguzzer C., Gastaldi M., Rossi R., Gecchele G., Prati M.V., *Comparison of exhaust emissions at intersections under traffic signal versus roundabout control using an instrumented vehicle*, Transportation Research Procedia, 2017, 25, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.204>.
40. PTV Vissim Emission model DLL interface documentation, PTV AG, 2017, http://cgi.ptvgroup.com/download/ptv_vision/VISSIM/downloads/API/API_VISSIM_DriverModel_DLL.zip.
41. *Szczegółowe warunki techniczne dla znaków drogowych pionowych i warunki ich umieszczania na drogach*, Załącznik nr 1, 2019.
42. PTV Vissim. User Manual, PTV Group, 2022.
43. Natural Resources Canada, *Learn the facts: Fuel consumption and CO₂*, 2016, Autosmart, 2, 1–2, http://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/oeo/pdf/transportation/fuel-efficient-technologies/autosmart_factsheet_6_e.pdf.