

METODY MODELOWANIA EMISJI ZANIECZYSZCZEŃ Z POJAZDÓW SAMOCHODOWYCH

W artykule omówione zostały dwa wybrane programy służące do modelowania zanieczyszczeń emitowanych przez pojazdy samochodowe, tj. Enviver oraz COPERT 5. Część badawcza dotyczy analizy wybranego ronda działającego w Rzeszowie względem generowanych emisji toksycznych składników spalin samochodowych. Obliczenia ilości emisji spalin dokonane zostały na podstawie danych z programu do mikrosymulacji ruchu Vissim.

WSTĘP

Postęp techniki we wszystkich dziedzinach przemysłu stwarza konieczność ograniczenia jego negatywnego wpływu na środowisko. Motoryzacja nie jest wyjątkiem, bowiem przyczynia się do generowania emisji szkodliwych spalin samochodowych. Prowadzi to do pogorszenia jakości powietrza, jak i zdrowia mieszkańców. Pomimo tego, że podjęto się eliminacji tego problemu poprzez wprowadzenie norm, realizacji wielu kampanii społecznych oraz projektów badawczych, emisja spalin z transportu drogowego jest wciąż istotnym zagrożeniem. Emisja spalin z transportu drogowego zależy od wielu czynników, m.in. wielkości ruchu drogowego, charakterystyki drogi i samochodów, warunków atmosferycznych, zachowań kierowców, jak również rodzaju zastosowanych skrzyżowań. Na skrzyżowaniach pojazdy zazwyczaj zwalniają albo się zatrzymują, co prowadzi do zakłócenia przepływu potoków ruchu. Skrzyżowania typu rondo są bezpieczne i efektywne, potrafią również poprawić przepływ pojazdów w porównaniu do konwencjonalnych skrzyżowań z sygnalizacją świetlną. Jednakże brak jest danych, w jakim stopniu różne rozwiązania tego typu redukują emisję toksycznych składników spalin samochodowych [4,6,8,9].

Celem niniejszej pracy jest określenie wielkości emisji zanieczyszczeń w spalinach odnośnie środków transportu drogowego dla wybranego, wyjątkowo obciążonego, dwupasmowego ronda w Rzeszowie. Do uzyskania wyników drogowych przeprowadzono mikrosymulację przepływu ruchu drogowego w programie Vissim z użyciem rzeczywistych wartości natężenia ruchu drogowego, na podstawie istniejących w mieście punktów liczenia pojazdów. W sumie zestawiono ze sobą 2 scenariusze reprezentujące dwie pory dnia, które cechują się odmiennym natężeniem ruchu drogowego. Uzyskane rezultaty ruchu drogowego posłużyły do określenia ilości tlenków azotu NO_x oraz cząstek stałych PM_{10} emitowanych przez pojazdy samochodowe. Do weryfikacji wyników emisji uzyskanych przez program Enviver wykorzystano model emisji COPERT 5.

1. MODELOWANIE EMISJI ZANIECZYSZCZEŃ Z POJAZDÓW SAMOCHODOWYCH

Klasyfikacja modeli ruchu drogowego i emisji zanieczyszczeń spalin dzieli się ze względu na skalę dokładności na makroskopową (regionalną), mezoskopową (lokalną) oraz mikroskopową (skrzyżowania, odcinki ulic). Natomiast modele emisji zanieczyszczeń spalin

możemy zróżnicować ze względu na występujące kongestie ruchu drogowego (średnie prędkości jazdy, gęstość ruchu) do 3 typów: A, B i C. Modele typu A wymagają danych wejściowych poszczególnych sytuacji drogowych definiowanych jako profile prędkości. Modele typu B generują te dane podczas modelowania procesów emisji. Zarówno modele typu A i B są odpowiednie do analizy w skali mikro. Natomiast modele typu C zawierają dane wzorcowe jazdy w swoim modelu emisji i są odpowiednie do aplikacji dla skali mezo [11].

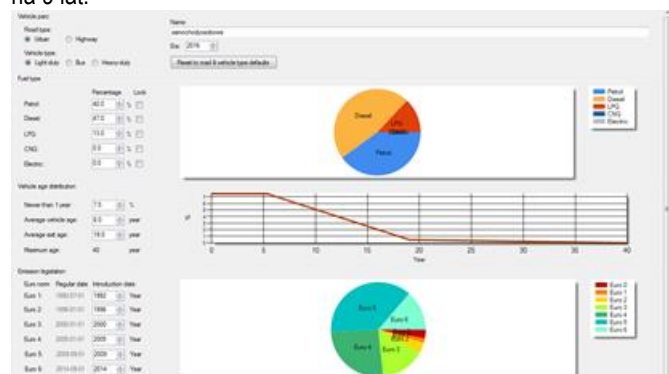
Do potrzeb badań emisji skrzyżowania wybrano narzędzie do modelowania ruchu drogowego w skali mikro PTV Vissim. Na podstawie danych ruchu pojazdów z programu Vissim obliczono emisję toksycznych składników spalin przy pomocy programu TNO Enviver. Programy te i utworzone w nich modele dostarczają danych emisji odpowiednich dla skali mikro [1,2,3]. Dodatkowo, uzyskane wyniki zestawiono z mezoskopowym modelem emisji programu COPERT 5.

Model emisji VERSIT+, który wykorzystywany jest w programie Enviver, jest to wieloczynnikowy regresyjny model, w którym zmienną jest cykl danego pojazdu (model emisji A). Wymaga to wcześniejszego uzyskania profili prędkości w programie Vissim, na podstawie których możliwe jest oszacowanie współczynników emisji (g/km) dla różnych klas pojazdów [10]. VERSIT+ zawiera serię 246 klas modeli emisji, których algorytmy są odpowiednio wyznaczone dla każdej z kategorii pojazdów oraz rodzaju toksycznych składników spalin. W przeciwieństwie do wskaźników emisji uzyskanych z Nowego Europejskiego Cyklu Jeźdźczego (NEDC), wykorzystywane w tym modelu profile prędkości są reprezentatywne dla rzeczywistych warunków drogowych [9]. Wskaźniki emisji uzyskiwane są z wielokrotnej regresji liniowej celem znalezienia empirycznych relacji pomiędzy stopniem emisji, profilem prędkości oraz zmiennymi dynamicznymi [12].

W badanym przypadku obliczono emisję NO_x oraz PM_{10} w rozdzielczości przestrzennej $5 \times 5 \text{m}$ z wykorzystaniem programu Enviver. Emisję badano dla warunków miejskich, czyli model uwzględniał pewien odsetek pojazdów, które cechują się zwiększoną emisją zanieczyszczeń w spalinach z powodu zjawiska zimnego startu silnika.

Czas trwania symulacji ruchu drogowego w programie Vissim ustawiony został na wartość 3600s. Przyjęto 2 klasy pojazdów: samochody osobowe (które stanowiły 80% wszystkich pojazdów) oraz samochody ciężarowe i autobusy (w ilości 20%). Na klasę pojazdów osobowych składało się 40% pojazdów z silnikiem benzynowym, 47% pojazdów z silnikiem wysokoprężnym oraz 13% po-

jazdów napędzanych paliwem LPG. Średni wiek pojazdów dla samochodów osobowych ustawiony został na 8 lat. Dla klasy samochodów ciężarowych i autobusów przyjęto, że 82% stanowiły pojazdy z silnikiem wysokoprężnym, natomiast 18% autobusy zasilane paliwem CNG. Średni wiek pojazdów dla tej klasy ustawiony został na 9 lat.



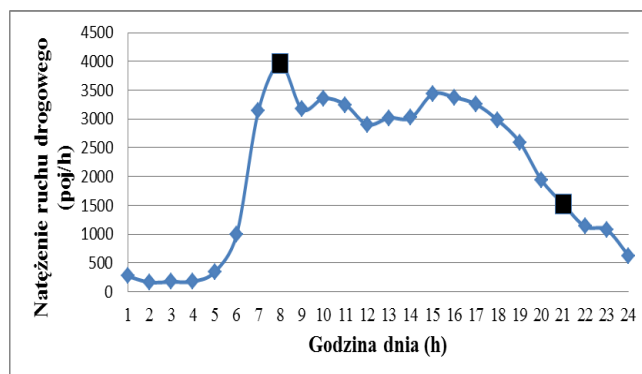
Rys. 1. Pogląd na ustawienia klasy pojazdów osobowych z programu Enviver

Rezultaty emisji uzyskane z programu Enviver zestawiono z wynikami z Komputerowego Programu do obliczania Emisji z Transportu Drogowego (ang. COPERT 5). COPERT 5 to model, który opiera swoje wyniki na średniej prędkości pojazdów, które przejechały dany odcinek wybranej trasy [7]. Klasyfikowany jest on jako model emisyjności typu C [11]. Używany jest głównie do obliczania emisyjności w skali regionu oraz danego kraju. Może być on również użyty jako model odniesienia względem innych modeli mikroskopowych. Dla przedmiotowego badania danymi wejściowymi dla modelu COPERT były średnie prędkości pojazdów uzyskane z programu Vissim. Dla badanych scenariuszy są one następujące: A1 – 13,1 km/h, A2 – 34,4 km/h.

2. METODYKA BADAŃ

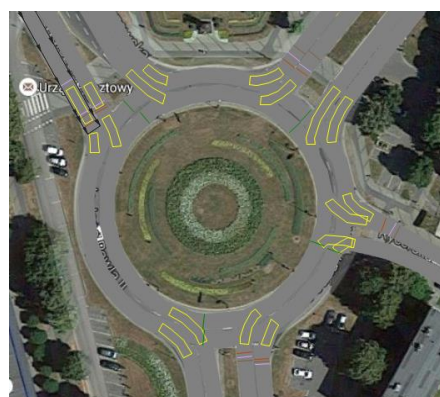
Do analizy emisji wybrano funkcjonujące na terenie Rzeszowa rondo dwupasmowe znajdujące się na przecięciu ulic Warszawskiej, Marszałkowskiej, Rycerskiej oraz Lubelskiej. Rondo to posiada cztery główne wloty, z których trzy są wlotami z dwoma pasami ruchu. Wloty od strony ulic Warszawskiej, Lubelskiej oraz Marszałkowskiej cechują się wysokim natężeniem ruchu, natomiast wlot od ulicy Rycerskiej niskim. Ruch na drogach wlotowych dwupasmowych w godzinach dojazdu i wyjazdu z miejsc pracy powoduje blokowanie się dróg dojazdowych do skrzyżowania na długości ok. 100 m od wjazdu na rondo.

Podczas pomiarów ruch pieszych był bardzo mały, dlatego też pominięto go w dalszej analizie. Wszystkie dane drogowe zostały mierzone w dniu 18.12.2016 r. Dane geometrii skrzyżowania pobrane zostały na podstawie zdjęcia satelitarnego dostępnego w serwisie Google Maps. Zdjęcie zostało odpowiednio wyskalowane do pracy w programie do mikrosymulacji ruchu Vissim. Liczba natężenia ruchu drogowego z poszczególnych wlotów na rondzie została uzyskana przy pomocy danych z bazy systemu preselekcyjnego ważenia pojazdów. Do badania emisji wybrane zostały dwie pory dnia. Pierwsza, która dotyczy godziny 8:00-9:00 reprezentuje poranny szczyt drogowy, natomiast druga w godzinach 20:00-21:00 charakteryzuje się małym ruchem. Zestawienie sumarycznego natężenia ruchu z wszystkich wlotów na rondzie przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Sumaryczne dzienne natężenie ruchu drogowego w dniu 18.12.2015 dla badanego ronda (czarne kwadraty oznaczają wybrane do badania pory dnia)

Zamodelowany w programie Vissim wariant badanego skrzyżowania przedstawiono na rys. 3. Dane natężeń ruchu dla poszczególnych wlotów ustawiono zgodnie z wartościami rzeczywistymi zestawionymi w tabeli 1.



Rys. 3. Obecnie funkcjonujące rondo dwupasmowe zamodelowane w programie Vissim

Tab. 1. Natężenia ruchu drogowego dla poszczególnych wlotów ulic w wybranych godzinach dnia z podziałem na analizowane scenariusze

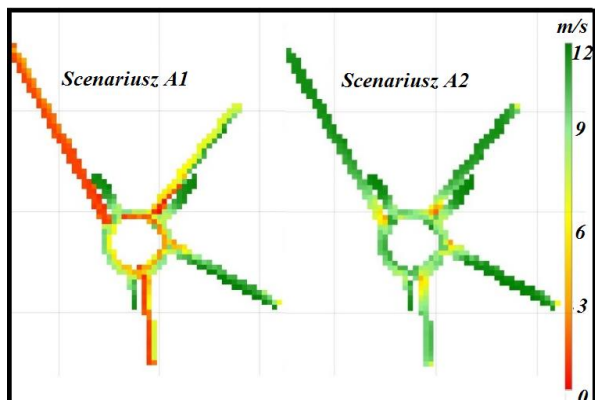
Scenariusz	Dzień	Godzina	Wlot ulicy	Natężenie ruchu drogowego (poj/h)
A1		8:00-9:00	Warszawskiej	1507
			Marszałkowskiej	1453
			Lubelskiej	1000
			Rycerskiej	100
A2	18.12.2016	20:00-21:00	Warszawskiej	462
			Marszałkowskiej	761
			Lubelskiej	296
			Rycerskiej	47

Należy zaznaczyć, że pierwsze 5 minut trwania symulacji zostało wykluczone z analizy z powodu braku wystarczającego nasycenia modelu. Symulacja startuje z zerową liczbą pojazdów, dlatego na początku potrzebna jest pewna faza napełnienia sieci drogowej. W przypadku niewykonania tej fazy „rozgrzania” modelu, autentyczne dane drogowe nie pokrywałyby się z danymi uzyskiwanymi podczas symulacji [8].

3. WYNIKI BADAŃ

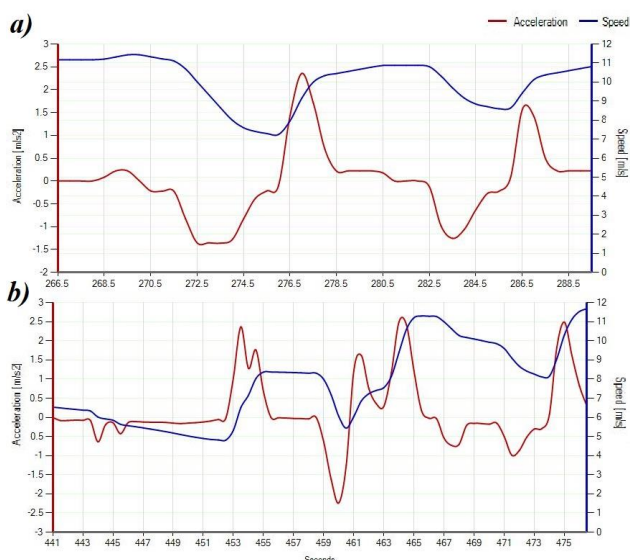
Dane potrzebne do określenia czasowych profili prędkości dla każdego z pojazdów, uzyskane były z programu VISSIM z czasową rozdzielczością 5s. Dane te niezbędne były do obliczenia przez

program ENVIVER średnich prędkości jazdy pojazdów dla siatki komórek o rozdzielczości 5x5m. W ten sposób uzyskano dane na zmianę prędkości, która następuje podczas wjeżdżania pojazdów na rondo (rys. 4).



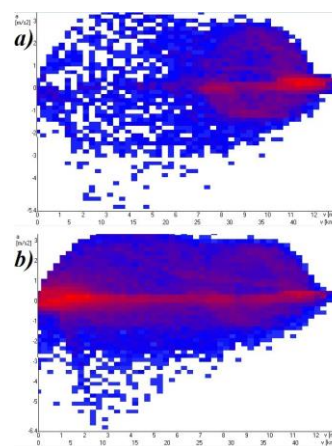
Rys. 4. Średnie prędkości pojazdów na analizowanych odcinkach dróg dla badanych scenariuszy

Przykładowo, na rys. 5 przedstawiono profile prędkości i przyspieszeń dla pojazdów w różnych warunkach zagęszczenia ruchu drogowego. Natomiast na rys. 6 ukazane zostały przykładowe wykresy dystrybucji prędkości i przyspieszeń.



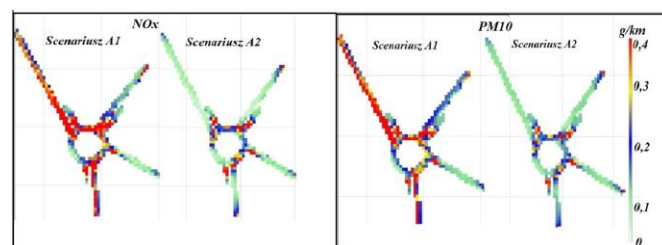
Rys. 5. Przykładowe profile prędkości i przyspieszeń dla wybranych pojazdów w warunkach: a) niskiego zagęszczenia ruchu b) wysokiego zagęszczenia ruchu

Na podstawie rys. 5b, czyli przypadku dużego zagęszczenia ruchu drogowego zauważyć można, że pojazdy potrzebują więcej czasu na przejechanie tego samego odcinka drogi w porównaniu do przypadku niskiego zagęszczenia ruchu drogowego (rys. 5a). Spowodowane jest to tym, że wykonują one więcej operacji hamowania oraz przyspieszania, co przekłada się bezpośrednio na wzrost emisji szkodliwych zanieczyszczeń. Porównując czas przejazdu dla obu przypadków, to wydłuża się on o 35% dla warunków zatłoczenia ruchu drogowego.



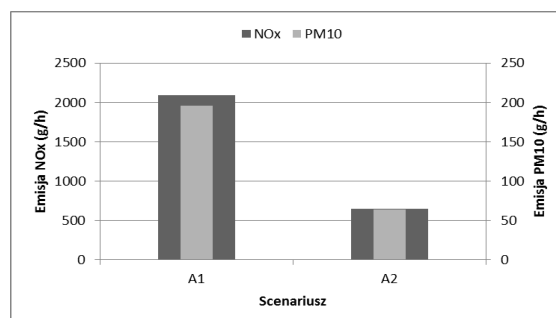
Rys. 6. Przykładowe wykresy dystrybucji prędkości i przyspieszeń w warunkach: a) niskiego zagęszczenia ruchu b) wysokiego zagęszczenia ruchu

Modele mikroskopowe dobrze odzwierciedlają wpływ niskich prędkości, a tym samym kongestii drogowych, na emisję zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych.

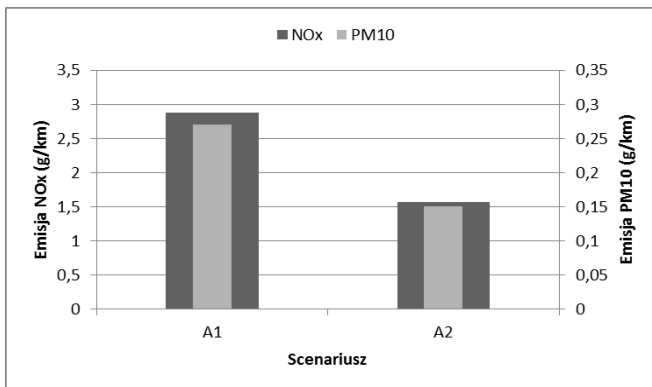


Rys. 7. Emisja NOx/PM10 dla badanych scenariuszy względem wybranego ronda i jego dróg dojazdowych w rozdzielczości przestrzennej 5x5m

Na podstawie analizy rys. 7 można zauważyć, na których drogach dojazdowych do skrzyżowania powstają największe kolejki i jak wpływają one na emisyjność wybranych składników spalin samochodowych. W miejscach gdzie emisja ta zaznaczona jest czerwonym i żółtym kolorem, pojazdy poruszają się z małą prędkością, chwilowo się zatrzymują, kolejno przyspieszają, co przyczynia się do wzrostu emisyjności. Ma to miejsce głównie w przypadku występowania kongestii w scenariuszu A1, na odcinkach dróg dojazdowych, które charakteryzują się największym natężeniem ruchu. Natomiast scenariusz A2, w którym występuje płynny przepływ pojazdów, ma zdecydowanie niższą emisyjność względem scenariusza A1. Bezpośrednio wpływ na to ma mniejsza liczba pojazdów jak również utrzymywanie przez nie stałej prędkości przejazdu przez skrzyżowanie, bez potrzeby hamowania czy nagłego przyspieszania.

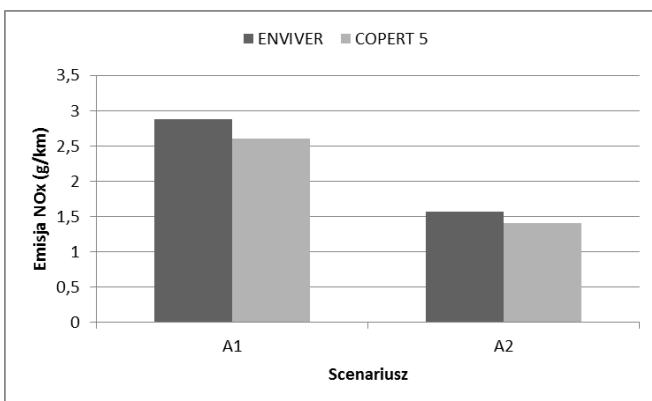


Rys. 8. Całkowita emisja NOx oraz PM10 dla badanych scenariuszy



Rys. 9. Wskaźniki emisji NOx oraz PM10 dla badanych scenariuszy

Emisja dla godzin wieczornych jest w przybliżeniu 70% niższa w porównaniu do porannego szczytu drogowego dla obu badanych składników spalin.



Rys. 10. Zestawienie wyników wskaźnika emisji NOx (g/km) dla ENVIVER oraz COPERT5

W celu weryfikacji wyników uzyskanych w programie ENVIVER dokonano ich porównania z rezultatami z programu COPERT 5. Rys. 10 uwidacznia, że wyniki emisji składnika spalin NOx z programu Enviver oraz COPERT 5 są do siebie zbliżone. Różnice w obliczeniach emisji wykonane przez model VERSIT+ wahają się w granicach 7 – 18% w porównaniu do COPERT 5. Te dwa modele różni głównie to, że VERSIT+ oblicza różne czynniki emisji dla różnych sytuacji drogowych, które cechują się podobnymi średnimi prędkościami ale inną dynamiką [12]. VERSIT+ używa wzorców jezdnych dla specyficznych lokalnych sytuacji, które pobiera z programu Vissim, kiedy COPERT 5 oblicza uśrednione wzorce jezdne. Dlatego też program Enviver powinien lepiej odwzorowywać emisję w skali mikro [3]. Największe odchyłki wyników emisji są dla tych scenariuszy, które cechują się dużą kongestią i wysoką emisją.

PODSUMOWANIE

Zgodnie z użytą metodologią badawczą, całkowita emisja zanieczyszczeń spalin w analizowanym obszarze potwierdza, że zmienia się ona istotnie w ciągu dnia. Dla wybranych składników spalin, czyli NOx i PM10, jest ona 3-4 krotnie większa dla godzin wzmożonego ruchu na drogach (scenariusz A1) w porównaniu do godzin poza szczytem ruchu (scenariusz A2). Z pewnością wpływa na to natężenie ruchu drogowego, jak również wynikające z tego warunki drogowe. Wskaźnik emisji podczas godzin porannego

szczytu drogowego wzrasta dla składnika NOx o 35-45%, natomiast dla składnika PM10 o 32-43%.

W pracy porównano również uzyskane wartości emisji modelu w mikroskali z modelem w skali mezo. Zestawienie obliczeń wskaźnika emisji NOx wykazało różnice w zakresie 7-18% w zależności od badanego scenariusza. Jednakże wyniki te można uznać za satysfakcjonujące i dalsze prace w zakresie poprawy działania mezoskopowego modelu powinny skupić się na korekcy jego algorytmów obliczania, głównie w zakresie emisji spoza układów wylotowych pojazdów.

BIBLIOGRAFIA

- Al Alami Y.R., *Application of traffic emission models to the estimation of local pollutant hotspots in South Kensington*. 1st Civil and Environmental Engineering Student Conference Energy Vol. 11. Imperial College London 2012.
- Bigazzi A., Van Lint J.W.C., Klunder G., Stelwagen U., Ligterink N., *Traffic data for local emissions monitoring at a signalized intersection*, 13th International IEEE Conference "Intelligent Transportation Systems (ITSC)". Madeira Island, Portugal 2010.
- Csikós A., Varga I., *Real-time modeling and control objective analysis of motorway emissions*, Proceedings of Ewgt 2012 - 15th Meeting of the Euro Working Group on Transportation Vol. 54, 2012.
- Franco V.; Kousoulidou M., Muntean M., Ntziachristos L., Hausberger S., Dilara P., *Road vehicle emission factors development: A review*, Atmos, vol.7. Environ. 2013.
- Jaworski A., Lejda K., Mądziel M., *Analiza opóźnienia ruchu drogowego dla wybranych rozwiązań odnośnie pierwszeństwa przejazdu na skrzyżowaniu typu X*, Monografia pod redakcją naukową Kazimierza Lejdy, Rzeszów 2016.
- Maykut N.N., Lewtas J., Kim E., Larson T.V., *Source apportionment of PM 2.5 at an urban IMPROVE site in Seattle, Washington*. Environ. Sci. Technol vol. 37, 2003.
- Ntziachristos L., Gkatzoflias D., Kouridis C., Samaras Z., *COPERT: a European road transport emission inventory model*, Inf. Technol. Environ. Eng., 2009.
- Querol X., Viana M., Alastuey, A., Amato F., Moreno T., Castillo S., Pey J., de la Rosa J., de La Campa A.S., Artíñano B., *Source origin of trace elements in PM from regional background, urban and industrial sites of Spain*. Atmos, vol. 41. Environ, 2007.
- Rexeis M., Hausberger S., *Trend of vehicle emission levels until 2020 – prognosis based on current vehicle measurements and future emission legislation*, Atmos. Environ. 43, 2009.
- Smit R., McBroom J., *Development of a new high-resolution traffic emissions and fuel consumption model*, Road Transp. Res. 18 (4), 2009.
- Smit R., Poelman M., Schrijver J., *Improved road traffic emission inventories by adding mean speed distributions*. Atmos. Environ. 42 (5), 2008.
- Smit R., Smokers R., Rabe E., *A new modelling approach for road traffic emissions: VERSIT+*, Transp. Res. Part D: Transp. Environ. 12 (6), 2007.
- Smit R., Smokers R., Shoen E., Hensema A., *A new modelling approach for road traffic emissions: VERSIT+ LD – background and methodology*, Report 06.ORPT.016.1/RS, The Hague. TNO Science and Industry, 2006.

Modern methods of modeling of emissions from motor vehicles

In the article discussed two selected programs for modeling of pollutants emitted by motor vehicles, such as Enviver and COPERT 5. The practical part concerns the analysis of the selected roundabout working in Rzeszow in terms of generated toxic exhaust emissions. The calculations of emissions were made on the basis of data from the microsimulation program Vissim.

Autorzy:

dr inż. **Artur Jaworski** – Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Silników Spalinowych i Transportu

prof. dr hab. inż. **Kazimierz Lejda** – Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Silników Spalinowych i Transportu

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