

Politechnika Poznańska
Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu

mgr inż. Karolina Kurtyka

**Ekologiczna ocena samochodów osobowych
o różnych napędach w drogowych testach emisyjnych**

Rozprawa doktorska

Promotor: prof. dr hab. inż. Jacek Pielecha
Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Andrzej Ziółkowski

Poznań 2023

Spis treści

Streszczenie	3
Abstract	4
Wykaz ważniejszych skrótów i symboli	5
1. Wprowadzenie	8
2. Problematyka rozprawy, jej cel i zakres	11
3. Rozwój legislacyjny kontroli emisji spalin z sektora transportu	13
3.1. Zagadnienie zmniejszania emisji spalin z transportu samochodowego	13
3.2. Testy homologacyjne dla samochodów osobowych	15
3.3. Drogowe testy emisyjne	17
3.4. Światowa działalność badawcza w zakresie drogowych testów emisyjnych....	22
4. Metodyka badań	30
4.1. Procedura badawcza	30
4.1.1. Wyznaczenie emisji spalin w teście laboratoryjnym.....	30
4.1.2. Wyznaczenie parametrów dynamicznych w testach drogowych	32
4.1.3. Wyznaczenie emisji drogowej zanieczyszczeń w warunkach ruchu drogowego	33
4.2. Obiekty badań.....	35
4.3. Narzędzia badawcze	36
4.3.1. Hamownia podwoziowa	36
4.3.2. Aparatura pomiarowa do badań drogowych.....	38
4.3.3. Trasa badawcza – testy drogowe	40
4.3.4. Metody porównania danych wykorzystane w pracy	44
5. Wyniki badań własnych i ich analiza	50
5.1. Analiza parametrów dynamicznych w testach emisyjnych.....	50
5.1.1. Porównanie udziałów prędkości w testach	50
5.1.2. Porównanie parametrów dynamicznych testów	52
5.1.3. Korelacja parametrów dynamicznych badanych pojazdów w testach badawczych	59
5.2. Szacowanie emisji drogowej zanieczyszczeń w testach drogowych na podstawie danych z testów homologacyjnych.....	62
5.2.1. Porównanie emisji drogowej zanieczyszczeń dla wszystkich badanych przypadków	62
5.2.2. Porównanie emisji drogowej zanieczyszczeń zgodnie z procedurą badań drogowych	71
5.2.3. Korelacje emisji drogowej zanieczyszczeń między poszczególnymi testami.....	72
5.2.4. Wykorzystanie natężenia emisji zanieczyszczeń w teście homologacyjnym do szacowania wyników w teście drogowym	76
6. Wnioski i kierunki dalszych badań	87
6.1. Podsumowanie.....	87
6.2. Wnioski	88
6.3. Kierunki dalszych prac	91
Literatura	93
Załącznik	98

Streszczenie

Praca dotyczy ekologicznej oceny samochodów osobowych o różnych napędach w drogowych testach emisyjnych. Głównym zagadnieniem a jednocześnie celem pracy była możliwość opracowania metody, określającej emisję zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego na podstawie wyników uzyskanych w teście homologacyjnym. Badania i analizy wykonano dla pojazdów wyposażonych w silnik o zapłonie iskrowym, samoczynnym oraz z napędem hybrydowym. Cechą wspólną wybranych pojazdów była klasa pojazdów – samochody osobowe, o zbliżonej masie własnej oraz zbliżonej mocy maksymalnej silnika spalinowego i tej samej klasie emisyjnej (Euro 6d).

Badania emisji drogowej zanieczyszczeń wykonano na hamowni podwoziowej w teście homologacyjnym oraz w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego. Trasę badawczą w testach drogowych ustalono z podziałem na fazę miejską, pozamiejską oraz autostradową zgodnie z wymaganiami prowadzenia takich badań. Analizie podlegały związki spalin, które są wymagane przy rejestracji w testach drogowych – tlenek węgla, dwutlenek węgla, tlenki azotu oraz liczba cząstek stałych. Na podstawie pomiarów wyznaczono emisję drogową zanieczyszczeń w każdej fazie testu hamownianego oraz testu drogowego.

W ramach pracy opracowano narzędzie analityczne pozwalające na porównywanie testów homologacyjnego i drogowego pod kątem wyników emisji drogowej zanieczyszczeń w całych testach badawczych, ale również w poszczególnych ich fazach. Otrzymane wyniki porównywano z wykorzystaniem procedur obliczeniowych: standardowej procedury homologacyjnej, standardowej procedury dotyczącej testów drogowych, procedury homologacyjnej uwzględniającej połączenie dwóch pierwszych faz testu i procedury testów drogowych do określenia faz w teście homologacyjnym. Taki zakres wynikał z analizy warunków pracy pojazdów w testach badawczych, które okazały się wykazywać duże podobieństwo.

W pracy porównano parametry dynamiczne ruchu pojazdów w testach emisyjnych homologacyjnym i drogowym. Na tej podstawie stwierdzono duże podobieństwo (współczynnik korelacji ponad 0,95) między warunkami pracy pojazdu w teście homologacyjnym a drogowym. Na tej podstawie można było porównać emisję drogową zanieczyszczeń dla każdego pojazdu w dwóch testach emisyjnych. Efektem porównania było stwierdzenie o możliwości szacowania emisji drogowej zanieczyszczeń pojazdów spalinowych i hybrydowych w warunkach testów drogowych, dysponując jedynie wynikami uzyskanymi w teście homologacyjnym (dla wybranych faz testów). Wyniki korelacji testów pod względem natężenia emisji związków szkodliwych, w poszczególnych punktach pracy odniesionych do pojazdu, nie były jednoznaczne. Zaproponowane procedury szacowania emisji drogowej w teście drogowym na podstawie testów hamownianych pozwalają na odzwierciedlenie wyników z dużą dokładnością, jednak nie można zaproponować jednej uniwersalnej procedury.

Zakończenie pracy zawiera wnioski metodyczne dla badań emisji spalin w warunkach dynamicznych, wnioski utylitarne, a także kierunki dalszego rozwoju prac nad katalizatorem wewnętrznym.

Abstract

Ecological rating of passenger cars with different drive systems in on-road emission tests

The dissertation concerns the ecological evaluation of passenger cars with different powertrains in road emission tests. The main issue and, at the same time, the aim of the study was the possibility of developing a method to determine emissions from motor vehicles in real traffic conditions on the basis of the results obtained in the type-approval test. Tests and analyses were carried out for vehicles equipped with spark-ignition, compression-ignition, and hybrid vehicles. The common feature of the selected vehicles was the class of the vehicles – passenger cars, with similar kerb weight and maximum internal combustion engine power, and the same emission standard (Euro 6d).

Road emissions tests were carried out on a chassis dynamometer in a type approval test and in real traffic conditions. The test route for the road tests was established with a division into urban, non-urban, and motorway phases in accordance with the requirements for conducting such tests. The exhaust gas compounds that are required for registration in road tests – carbon monoxide, carbon dioxide, nitrogen oxides, and particles number – were analysed. Based on the measurements, road emissions were determined for each phase of the laboratory test and the road test.

As part of the dissertation, an analytical tool has been developed that allows the comparison of type-approval and road tests in terms of road emission results for the entire test tests, but also for their individual phases. The results obtained were compared using the calculation procedures: the standard approval procedure, the standard road test procedure, the approval procedure taking into account the combination of the first two test phases, and the road test procedure to determine the phases in the approval test. Such a range resulted from an analysis of the operating conditions of the vehicles in the research tests, which appeared to have a great similarity.

The study compares the dynamic parameters of vehicle movement in the homologation and road emission tests. On this basis, a high similarity (correlation coefficient of more than 0.95) was found between the operating conditions of the vehicle in the approval test and the road test. On this basis, it was possible to compare the on-road emissions for each vehicle in two emission tests. The result of the comparison was a statement about the feasibility of estimating the road emissions of combustion and hybrid vehicles under road test conditions, having only the results obtained in the type approval test (for selected test phases). The results of the correlation of the tests in terms of the intensity of emissions of harmful compounds, at individual operating points related to the vehicle, were inconclusive. The proposed procedures for estimating road test emissions from brake tests allow the results to be reflected with a high degree of accuracy, but no universal procedure can be proposed.

The conclusion of the work contains general and detailed conclusions for the exhaust gas emission tests in the performed toxicity tests, as well as directions for further development of the work on the ecological assessment of vehicles and the comparison of dynamometer and road tests.

Wykaz ważniejszych skrótów i symboli

a	przyspieszenie
ACEA	<i>Association des Constructeurs Européens d'Automobile</i> – Stowarzyszenie Europejskich Konstruktorów Samochodów
b	emisja drogowa
c	stężenie
CAN	<i>Controller Area Network</i> – magistrała komunikacyjna
CF	<i>conformity factor</i> – współczynnik zgodności
CLEAR	metoda wyznaczania emisji drogowej zanieczyszczeń w testach drogowych wykorzystująca procedurę kategoryzacji mocy
CNG	<i>compressed natural gas</i> – sprężony gaz ziemny
COC	<i>Certificate of Conformity</i> – certyfikat zgodności
CVS	<i>constant volume sample</i> – system poboru spalin o stałej objętości próbki
DF	<i>dilution factor</i> – współczynnik rozcieńczenia
DI	<i>direct injection</i> – wtrysk bezpośredni
DLR	<i>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt</i> – Niemiecki Instytut Transportu
E	natężenie emisji
EEA	<i>European Environment Agency</i> – Europejska Agencja Środowiska
EEPS	<i>Engine Exhaust Particle Sizer™ Spectrometer</i> – spektrometr masowy do pomiaru średnic cząstek stałych
EiL	<i>Engine-in-the-Loop</i> – oprogramowanie do symulacji pracy silnika
EKG	Europejska Komisja Gospodarcza
EMROAD	metoda wyznaczania emisji drogowej zanieczyszczeń w testach drogowych wykorzystująca procedurę ruchomego okna uśredniania
Euro	normy emisji spalin w Europie
EV	<i>electric vehicle</i> – pojazd elektryczny
EWG	Europejska Wspólnota Gospodarcza
FID	<i>flame ionization detector</i> – analizator płomieniowo-jonizacyjny
GPS	<i>Global Positioning System</i> – system nawigacji satelitarnej
GTR	<i>Global Technical Regulations</i> – ogólnoświatowe przepisy techniczne
HCHO	aldehydy
HEV	<i>hybrid electric vehicle</i> – pojazd hybrydowy
ISC	<i>in-service conformity</i> – badania zgodności eksploatacyjnej
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> – Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna
JRC	<i>Joint Research Centre</i> – Europejskie Centrum Badań
KE	Komisja Europejska
M1	kategoria pojazdów (samochody osobowe)
MAW	<i>moving average window</i> – ruchome okno uśredniania
MEDAS	<i>Multi-Function Efficient Dynamic Altitude Simulation</i> – wielofunkcyjny system symulacji firmy Horiba
MHEV	<i>mild hybrid electric vehicle</i> – pojazd hybrydowy, którego głównym napędem jest silnik spalinowy, a silnik elektryczny działa jedynie wspomagająco
NDIR	<i>non-dispersive infrared</i> – niedispersyjny analizator wykorzystujący promieniowanie podczerwone

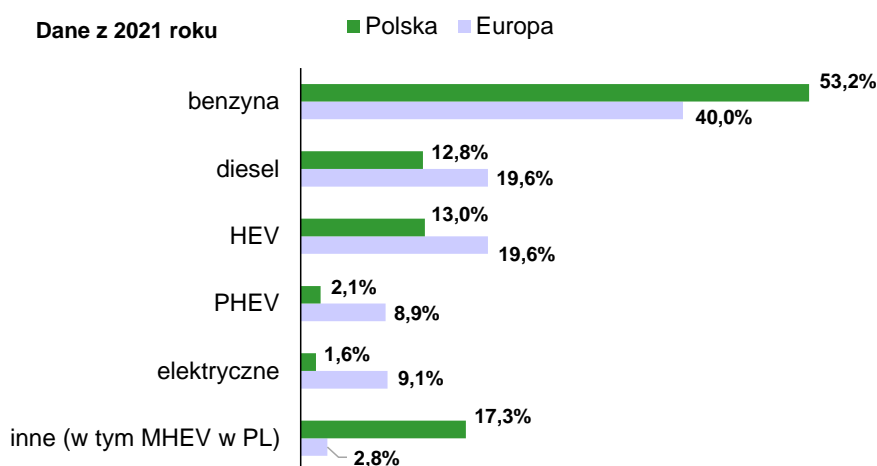
NDUV	<i>non-dispersive ultraviolet</i> – niedispersyjny analizator wykorzystujący promieniowanie ultrafioletowe
NEDC	New European Driving Cycle – <i>nowy europejski test jezdny</i>
NH ₃	amoniak
NMHC	<i>non-methane hydrocarbons</i> – węglowodory bez udziału metanu
NM VOC	<i>non-methane volatile organic compounds</i> – niemetanowe lotne związki organiczne
NOVC-HEV	<i>not off-vehicle chargeable hybrid electric vehicle</i> – hybrydowe pojazdy elektryczne niedoładowywane zewnątrz
NTE	<i>Not-To-Exceed</i> – wartość nieprzekraczalna
OBD	<i>on-board diagnostic</i> – system diagnostyki pokładowej
OEM	<i>original equipment manufacturers</i> – producenci oryginalnego wyposażenia
ONZ	Organizacja Narodów Zjednoczonych
OVC-HEV	<i>off-vehicle charging hybrid electric vehicle</i> – hybrydowe pojazdy elektryczne doładowywane zewnątrz
PAH	<i>polycyclic aromatic hydrocarbons</i> – wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne
PEMS	<i>Portable Emissions Measurement Systems</i> – mobilna aparatura do pomiaru emisji spalin
PHEV	<i>plug-in hybrid</i> – hybrydowy pojazd elektryczny, którego akumulator może być doładowywany przez podłączenie kabla do ładowania do zewnętrznego źródła energii elektrycznej
PM	<i>particle mass</i> – masa cząstek stałych
PM	<i>particulate matter</i> – cząstki stałe
PMD	<i>paramagnetic detector</i> – analizator paramagnetyczny
PN	<i>particle number</i> – liczba cząstek stałych
PWM	<i>pulse-width modulation</i> – modulacja szerokości impulsów
PZPM	Polski Związek Przemysłu Motoryzacyjnego
R2R	<i>Road to Rig</i> – procedura wirtualnego odzwierciedlenia warunków drogowych na hamowni
RDE	<i>real driving emissions</i> – procedura wyznaczania emisji spalin w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego
RF	wskaźnik oceny danych w teście drogowym
RLR	<i>road load reconstruction</i> – odwzorowanie obciążenia drogowego
RPA	<i>relative positive acceleration</i> – względne przyspieszenie dodatnie
SCR	<i>selective catalytic reduction</i> – selektywna redukcja katalityczna
SUMO	<i>Simulation of Urban Mobility</i> – oprogramowanie do symulacji ruchu jazdy miejskiej
TM	<i>torque matching</i> – odwzorowanie momentu obrotowego
u	udział czasu pracy
UE	Unia Europejska
v	prędkość pojazdu
VPW	<i>variable pulse width</i> – system zmiennej modulacji impulsów
ḡ	objętościowe natężenie przepływu spalin
WHO	<i>World Health Organization</i> – Światowa Organizacja Zdrowia
WLTC	<i>worldwide harmonised light vehicles test cycle</i> – ujednolicony cykl jezdny dla lekkich pojazdów samochodowych
WLTC ₁₊₂	analiza testu WLTC według nowego podziału faz (1+2, 3, 4)
WLTC _{RDE}	analiza testu WLTC według procedury RDE

WLTP	<i>worldwide harmonised light vehicles test procedure</i> – ujednolicona procedura badań emisji lekkich pojazdów samochodowych
WP.29	<i>UNECE World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations</i> – światowe forum na rzecz harmonizacji przepisów dotyczących pojazdów
ZI	zapłon iskrowy
ZS	zapłon samoczynny

1. Wprowadzenie

Zjawisko gwałtownego przyspieszenia urbanizacji jest zauważalne na całym świecie. Jednym z wyznaczników takiego zintensyfikowania rozwoju gospodarczego jest mobilność, czyli swoboda w przemieszczaniu się ludzi i transporcie towarów. Spośród wszystkich rodzajów transportu, to właśnie transport drogowy daje poczucie największej elastyczności i niezależności. Jest on jednak obciążony wieloma wadami. Główną z nich jest struktura rynku motoryzacyjnego, która w głównej mierze składa się z pojazdów napędzanych silnikami spalinowymi. Wiąże się to z nadmierną emisją spalin, a w konsekwencji negatywnym wpływem na jakość powietrza, co z kolei prowadzi do zwiększenia zagrożeń nie tylko dla środowiska, ale także dla zdrowia ludzi.

Na rysunku 1.1 porównano udział nowych samochodów osobowych zarejestrowanych w 2021 roku w Polsce i w Europie. Jako kryterium przyjęto rodzaj wykorzystywanego paliwa. Dane Europejskiego Stowarzyszenia Producentów Samochodów (ACEA – *Association des Constructeurs Européens d'Automobile*) [1] oraz Polskiego Związku Przemysłu Motoryzacyjnego (PZPM) [2] potwierdziły, że w 2021 roku niezmiennie najpopularniejszym źródłem zasilania samochodów osobowych były paliwa konwencjonalne, tj. benzyna i olej napędowy. Co więcej, łączny udział samochodów osobowych wyposażonych w silnik spalinowy wynosił około 66% (Polska) i 59,6% (Europa). Widoczna jest również znacząca różnica (szczególnie w Polsce) w porównaniu z rokiem 2020, w którym powyższe statystyki wynosiły odpowiednio 81,5% i 66,4%. Przytoczone dane wskazują, że pojazdy hybrydowe i elektryczne znacząco zyskują na popularności. Według danych PZPM [2] w 2021 roku zarejestrowano w Polsce o około 57% więcej pojazdów hybrydowych (HEV – *hybrid electric vehicle*) oraz około 150% więcej pojazdów z napędem elektrycznym lub typu plug-in, w porównaniu z rokiem poprzednim. Tendencja elektryfikacji napędów pojazdów jest widoczna w całej Europie, dlatego na przestrzeni kolejnych lat proporcja między liczbą pojazdów zasilanych źródłami konwencjonalnymi i alternatywnymi może się wyrównać.

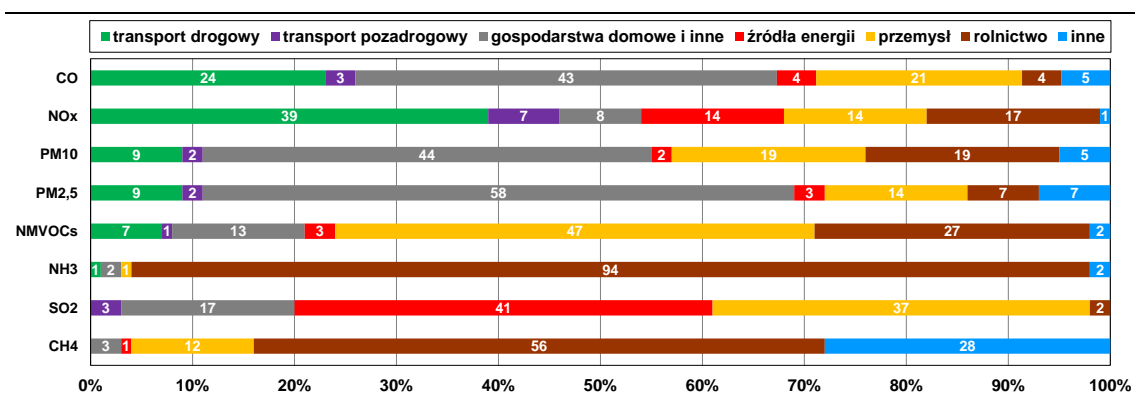


Rys. 1.1. Udział samochodów osobowych z podziałem na rodzaj paliwa w Polsce i Europie [1, 2]

W celu efektywnej kontroli jakości powietrza, kluczowe znaczenie ma identyfikacja źródeł emisji zanieczyszczeń. Dane [2, 3] wskazują, że większość z nich jest bezpośrednio związana z działalnością człowieka. Wskutek tego z sektora gospodarki wyróżnia się następujące kategorie źródeł emisji zanieczyszczeń:

- energetyczne,
- przemysłowe,
- komunikacyjne (w tym emisja z transportu),
- komunalno-bytowe.

Według danych Europejskiej Agencji Środowiska (EEA – *European Environment Agency*) [3], sektor transportu jest odpowiedzialny za około 25% całkowitej emisji gazów cieplarnianych w Unii Europejskiej. Co więcej, około 70% tej wartości pochodzi z transportu drogowego [4]. Na rysunku 1.2 przedstawiono porównanie emisji wybranych składników zanieczyszczenia powietrza z uwzględnieniem ich źródła. Z danych zarejestrowanych w 2020 roku wynika, że w przypadku transportu drogowego i pozadrogowego konieczne jest zintensyfikowanie działań mających na celu zmniejszenie emisji tlenków azotu (NO_x), tlenku węgla (CO) oraz cząstek stałych (PM₁₀ i PM_{2,5}). Niewątpliwie ograniczenie nadmiernej emisji tych składników zanieczyszczenia stanowi kolejne wyzwanie w dążeniu do osiągnięcia neutralności klimatycznej.



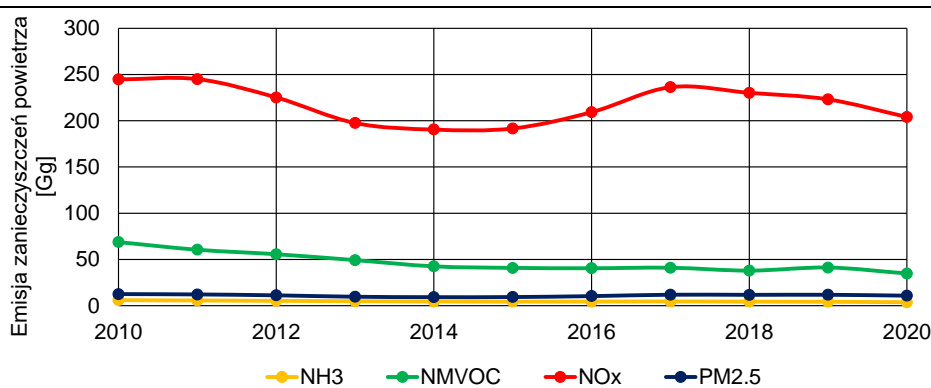
Rys. 1.2. Zestawienie źródeł zanieczyszczenia powietrza w Europie w 2020 roku [5]

Analiza danych [3] uzyskanych na przestrzeni ostatnich 30 lat wskazuje, że większość sektorów gospodarki zanotowało znaczące zmniejszenie emisji zanieczyszczeń. Niestety wyjątkiem okazał się być transport drogowy. W 2018 roku odpowiadał on za prawie 95% emisji z całego sektora transportu. Ponadto według tego samego źródła [3] udział transportu drogowego w wartościach całkowitej emisji zanieczyszczeń wzrósł z mniej niż 13% (w 1990 roku) do prawie 21% (w 2018 roku).

Za główne czynniki powodujące pogorszenie jakości powietrza uznaje się samochody osobowe i lekkie pojazdy użytkowe, które łącznie odpowiadały za prawie 70% emisji z transportu i 15,1% całkowitej emisji gazów cieplarnianych w całej Unii Europejskiej (dane za 2018 rok) [6]. Ze względu na zagrożenie zdrowia ludzkiego i stanu środowiska, zjawisko to jest wyjątkowo niepokojące. Negatywny wpływ pogarszającej się jakości powietrza na zdrowie i samopoczucie mieszkańców jest zauważalny już nie tylko w dużych i małych miastach, ale także coraz częściej na terenach wiejskich. Potwierdzają to zarówno badania naukowe, jak i dane w raportach dotyczących oceny jakości powietrza [7–9]. Jako źródło powyższej sytuacji uznaje się pojazdy emitujące między innymi tlenki azotu i szczególnie niebezpieczny pył zawieszony. Pyłem zawieszonym nazywa się mieszaninę cząstek stałych i kropelek cieczy utrzymujących się w powietrzu, różniących się wielkością, składem i miejscem tworzenia. Za najbardziej niebezpieczne uważa się drobne cząstki stałe o średnicy do 2,5 μm. Co więcej, stwierdzono, że obecność pyłu zawieszonego w powietrzu znacząco zwiększa ryzyko powstawania chorób układu krwionośnego i oddechowego, udaru mózgu, a nawet przedwczesnej śmierci [10]. Pomimo ustalenia dopuszczalnych ograniczeń dla stężenia tych

substancji, wciąż występuje wiele miejsc, w których wartości te są przekroczone, często znacząco [11].

Ograniczenie negatywnego wpływu na środowisko stało się dla Komisji Europejskiej priorytetem. Niewątpliwie dotychczas wprowadzone normy jakości paliwa, zmniejszenie dopuszczalnych wartości emisji spalin dla pojazdów osobowych i ciężarowych oraz stosowanie zaawansowanych technologii w znacznym stopniu przyczyniły się do ograniczenia zanieczyszczenia powietrza pochodzącego z sektora transportu. Niemniej jednak uzyskiwane wartości wciąż nie są satysfakcjonujące. Na rysunku 1.3 przedstawiono wyniki wybranych składników emisji spalin z sektora transportu drogowego, które zarejestrowano w Polsce w latach 2010-2020. Według danych [12] największym wyzwaniem jest redukcja tlenków azotu, niemetanowych lotnych związków organicznych (NMVOC – *non-methane volatile organic compounds*) oraz cząstek stałych. Wprowadzone rozwiązania przyniosły efekt w postaci zmniejszenia tych wartości, ale nie jest to wynik zadowalający.



Rys. 1.3. Emisja z transportu na przestrzeni lat 2010-2020 w Polsce [12]

W celu ograniczenia negatywnego wpływu sektora transportu na środowisko, ustawodawcy już od prawie 30 lat wprowadzają kolejne, coraz bardziej restrykcyjne rozporządzenia. Jednym z najistotniejszych elementów zmian w legislacji jest uregulowanie metod monitorowania i kontroli emisji spalin z pojazdów. W wyniku podjętych działań od 2019 roku stosuje się w Europie dwa testy pomiarowe: laboratoryjny (na hamowni podwoziowej) oraz drogowy (w warunkach rzeczywistej eksploatacji). Według założeń ustawodawców, testy te mają się wzajemnie uzupełniać, dzięki czemu uzyskiwany wynik emisji spalin jest bardziej wiarygodny.

Obecne zadania Komisji Europejskiej w dużej mierze koncentrują się na tym, aby do 2050 roku osiągnąć neutralność klimatyczną związaną z emisją gazów cieplarnianych. W przypadku transportu drogowego podkreśla się także potrzebę zwiększenia świadomości mieszkańców dotyczącej emisyjności pojazdów, z których korzystają na co dzień. Dlatego priorytetem stało się promowanie paliw niskoemisyjnych oraz zwiększenie udziału na rynku pojazdów o niskiej lub zerowej emisji. Jednakże dane przedstawione na rys. 1.1 wskazują, że w strukturze parku samochodowego Unii Europejskiej wciąż główną rolę odgrywają pojazdy napędzane silnikami spalinowymi. Oznacza to, że równie ważnym zadaniem jest udoskonalenie metod do monitorowania i kontrolowania emisji spalin z tych pojazdów. Skupienie się wyłącznie na pojazdach o niskiej lub zerowej emisji będzie niewystarczające.

2. Problematyka rozprawy, jej cel i zakres

Nadmierne zanieczyszczenie powietrza jest obecnie jednym z głównych problemów, z którym mierzy się ludzkość na całym świecie. Zjawisko to dotyczy już nie tylko dużych aglomeracji miejskich lub mniejszych miast, ale coraz częściej także terenów wiejskich. W celu ograniczenia emisji spalin z sektora transportu wprowadzane są kolejne, coraz bardziej restrykcyjne regulacje prawne dotyczące pomiaru emisji spalin z pojazdów. Jednak wraz z ich implementacją uwidaczniają się potrzeby dalszego rozwoju procedur, m. in. przez redukcję istniejących niedoskonałości testów oraz rozszerzenie obszaru monitorowania i kontroli źródeł emisji zanieczyszczeń, które są uwalniane do atmosfery. Ustawodawcy rozpatrują to zjawisko w perspektywie globalnej, stąd coraz większa unifikacja metod pomiarowych.

Wraz z rozwojem zróżnicowanych technologii stosowanych w motoryzacji, pojawia się także wzrost wymagań w zakresie pomiaru emisji i uwzględniania w niej specyficznych faz pracy silnika. Wprowadzenie kolejnej nowelizacji przepisów dotyczących kontroli emisji spalin z pojazdów spowodowało konieczność stosowania dwóch niezależnych testów. Badanie odbywa się zarówno w warunkach laboratoryjnych (WLTC – *worldwide harmonised light vehicles test cycle*), jak i podczas rzeczywistej eksploatacji pojazdu na drodze (RDE – *real driving emissions*). Umożliwiło to lepsze odzwierciedlenie rzeczywistej emisji spalin, która jest uwalniana z sektora motoryzacji do atmosfery. Jednak obecny stan prawny wciąż nie jest pozbawiony wad. Jako główne z nich zalicza się zwiększenie czasochłonności oraz kosztów wykonywania obowiązkowych testów emisyjnych.

W pracy podjęto zagadnienie procedur pomiarowych drogowych testów emisyjnych (WLTC i RDE) dla samochodów osobowych o różnych napędach. Dotychczasowe przepisy prawne, badania i wyniki publikowane w literaturze oraz w oficjalnych dokumentach i interpretacjach Komisji Europejskiej skupiają się głównie na analizie testów emisyjnych jako osobnych i niezależnych procedurach. Jednakże skorelowanie tych procedur może wpłynąć na zmniejszenie liczby wykonywanych testów. Jest to możliwe dzięki wykorzystaniu wyników uzyskanych w teście laboratoryjnym i wykorzystanie go do oszacowania wyników w teście drogowym.

W związku z powyższym cel pracy jest następujący:

Opracowanie metody określającej emisję spalin z pojazdów samochodowych w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego na podstawie wyników uzyskanych w teście homologacyjnym

Główną problematyką rozprawy jest analiza parametrów ekologicznych pojazdów według obowiązujących procedur pomiaru emisji spalin, a w efekcie zaproponowanie nowego narzędzia badawczego. Cel pracy wpisuje się w aktualny trend poszukiwania proekologicznych rozwiązań redukcji zanieczyszczenia powietrza przez poprawę i ujednoczenie procedur do monitorowania i kontroli emisji spalin z transportu drogowego. Takie podejście umożliwi zmniejszenie liczby wykonywanych testów, co bezpośrednio wpłynie na skrócenie czasu badań i ograniczenie ich kosztów.

Przeprowadzone prace badawcze podzielono na trzy etapy:

1. Badania na hamowni podwoziowej.
2. Badania w warunkach rzeczywistego ruchu drogowego.
3. Analiza wyników i skorelowanie procedur testów homologacyjnych i drogowych.

Pierwszy etap badań odbył się na hamowni podwoziowej. Prace dotyczyły pomiarów parametrów ekologicznych trzech pojazdów: dwóch pojazdów z napędem konwencjonalnym – z silnikiem o zapłonie iskrowym i samoczynnym; trzeci pojazd był pojazdem z napędem hybrydowym (silnik spalinowy o zapłonie iskrowym i silnik elektryczny). Ocena ekologiczna tych pojazdów na hamowni podwoziowej odbywała się według procedury WLTP.

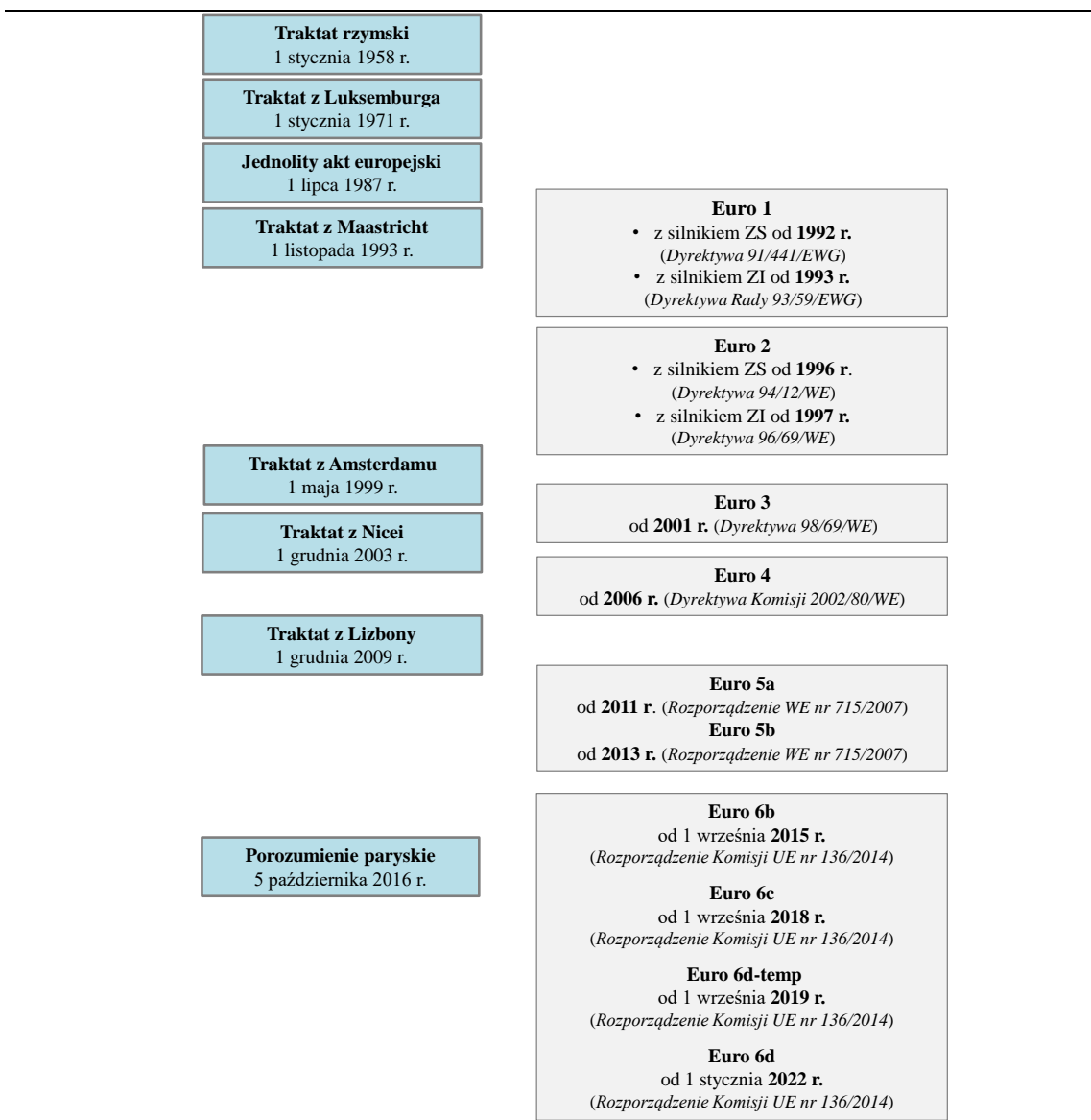
Drugi etap badań dotyczył pomiarów emisji spalin tych samych pojazdów w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego. Do tego etapu wybrano odpowiednią trasę badawczą spełniającą wymagania testów RDE, a jednocześnie przejazd nią musiał spełniać rygorystyczne wytyczne, dotyczące zarówno warunków statycznych oraz dynamicznych.

W trzecim etapie pracy – analitycznym – na podstawie danych uzyskanych w pierwszych dwóch etapach analizy, dokonano weryfikacji rozbieżności między różnymi parametrami testów WLTC i RDE badanych pojazdów. Na tym etapie pracy dokonano również odpowiedzi na zagadnienie przewodnie dysertacji: czy jest możliwe wykorzystanie wartości emisji drogowych wybranych związków szkodliwych spalin uzyskanych w teście WLTC na hamowni podwoziowej do określenia emisji drogowej spalin pojazdu w rzeczywistych warunkach ruchu.

3. Rozwój legislacyjny kontroli emisji spalin z sektora transportu

3.1. Zagadnienie zmniejszania emisji spalin z transportu samochodowego

Historia ograniczania emisji spalin z samochodów osobowych w Europie sięga 1970 roku. Opublikowano wtedy dyrektywę 70/220/EWG, która rozpoczęła działania mające na celu redukcję zanieczyszczenia powietrza pochodzącego z sektora motoryzacyjnego. Na rysunku 3.1 przedstawiono schemat najważniejszych traktatów, które wpłynęły na strukturę obecnych przepisów prawnych dotyczących pomiaru emisji spalin z pojazdów. Na schemacie tym uwzględniono także daty wprowadzenia w życie kolejnych norm emisji spalin, w zależności od rodzaju zapłonu (od Euro 1 do Euro 6d).



Rys. 3.1. Schemat najważniejszych traktatów europejskich, które wpłynęły na rozwój legislacyjny procedur pomiaru emisji spalin w Europie (opracowanie własne na podstawie [14–22])

Znaczące przyspieszenie implementacji tych zmian jest widoczne wraz z wprowadzeniem normy Euro 6 i jej składowych (6b, 6c, 6d-temp, 6d). W tym czasie powstały także największe modyfikacje metody pomiarowej, czyli testów do pomiaru emisji spalin. Nie tylko zmieniono test laboratoryjny NEDC (na WLTC), ale również wprowadzono nowy test emisyjny, który przeprowadzany jest w warunkach rzeczywistej jazdy (RDE). Powyższe działania były efektem wieloletnich badań dotyczących wiarygodności uzyskiwanych wyników emisji, ale także rozwoju technologii oczyszczania spalin, stosowanych w pojazdach samochodowych. To dzięki nim możliwe było wprowadzanie coraz bardziej restrykcyjnych limitów. Na rysunkach 3.2 i 3.3 przedstawiono schematy rozwoju norm emisji spalin i limitów poszczególnych składników zanieczyszczeń odpowiednio z pojazdu z silnikiem o zapłonie iskrowym (rys. 3.2) i o zapłonie samoczynnym (rys. 3.3).

Zapłon iskrowy

		Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 6
CO	[g/km]	2,72	2,2	2,3	1		
HC+NOx	[g/km]	0,97	0,5	–	–		
HC	[g/km]	–	–	0,2	0,1		
NOx	[g/km]	–	–	0,15	0,08		
PM	[g/km]	–	–	–	–		
PN	[1/km]	–	–	–	–		

		Euro 5a	Euro 5b	Euro 6b, 6c, 6d-TEMP, 6d		
CO	[g/km]	1	1	CO	[g/km]	1
THC	[g/km]	0,1	0,1	THC	[g/km]	0,1
NMHC	[g/km]	0,068	0,068	NMHC	[g/km]	0,07
NOx	[g/km]	0,06	0,06	NOx	[g/km]	0,06
PM	[g/km]	0,005	0,005	PM	[g/km]	0,005
PN		–	–	PN	[1/km]	6·10 ¹¹

Rys. 3.2. Dopuszczalne wartości emisji spalin dla samochodów osobowych o zapłonie iskrowym [14–22]

Zapłon samoczynny

		Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 6
CO	[g/km]	2,72	1	0,64	1		
HC+NOx	[g/km]	0,97	0,7	0,56	0,56		
HC	[g/km]	–	–	–	–		
NOx	[g/km]	–	–	0,5	0,5		
PM	[g/km]	0,14	0,08	0,05	–		
PN	[1/km]	–	–	–	–		

		Euro 5a	Euro 5b	Euro 6b, 6c, 6d-TEMP, 6d		
CO	[g/km]	0,5	0,5	CO	[g/km]	0,5
HC+NOx	[g/km]	0,23	0,23	HC+NOx	[g/km]	0,17
NOx	[g/km]	0,18	0,18	NOx	[g/km]	0,08
PM	[g/km]	5,0	4,5	PM	[g/km]	4,5
PN	[1/km]	–	6·10 ¹¹	PN	[1/km]	6·10 ¹¹

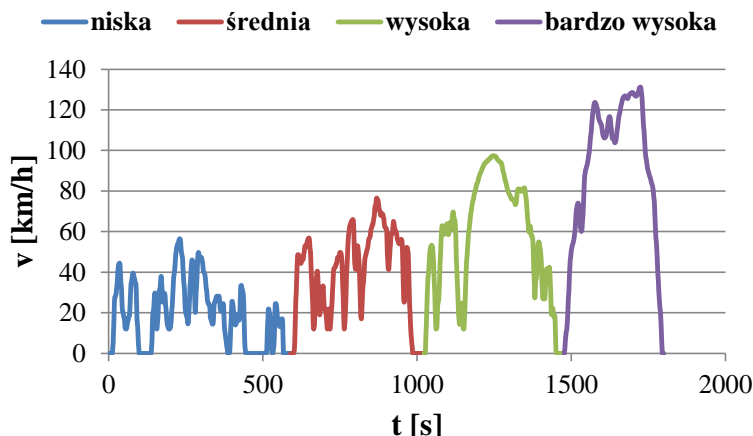
Rys. 3.3. Dopuszczalne wartości emisji spalin dla samochodu osobowego o zapłonie samoczynnym [14–22]

Z perspektywy ostatnich lat, do najważniejszych wydarzeń należy zaliczyć porozumienie paryskie (grudzień 2015 rok). Było to pierwsze prawnie wiążące porozumienie w zakresie klimatu [23]. Zgodnie z jego postanowieniami, przed końcem 2020 roku Komisja Europejska przedstawiła swoją długofalową strategię redukcji emisji i zaktualizowane plany w zakresie klimatu, zobowiązując się do ograniczenia emisji o 55% do 2030 roku (w stosunku do poziomu z 1990 roku). W Rozporządzeniu Parlamentu Europejskiego i Rady UE 2019/631 [24] określono także nowy poziom emisji CO₂ dla całej floty Unii Europejskiej, który ma wynosić do 95 g/km. Aby zrealizować to zadanie należy przyspieszyć przemianę całego sektora transportu w kierunku zerowych emisji. Oznacza to, że do 2030 roku niezbędne jest zwiększenie udziału pojazdów bezemisyjnych i niskoemisyjnych na rynku motoryzacyjnym. We wspomnianym rozporządzeniu określono również pozycję Unii Europejskiej na rynku motoryzacyjnym. Zwrócono uwagę, że konkurencja jest coraz większa i aby państwa Unii Europejskiej utrzymały swoją pozycję, konieczne jest przekształcenie sektora motoryzacyjnego. Takie zadanie jest możliwe do zrealizowania, m.in. poprzez uwzględnienie nowych technologii w dziedzinie elektrycznych mechanizmów napędowych oraz mobilności pojazdów współpracujących, połączonych i zautomatyzowanych [24]. Ustawodawcy przewidują, że do osiągnięcia założonego celu przyczynią się również zachęty dla przemysłu motoryzacyjnego do inwestowania w nowe technologie. Ocena efektów powyższych działań odbędzie się w 2024 roku.

3.2. Testy homologacyjne dla samochodów osobowych

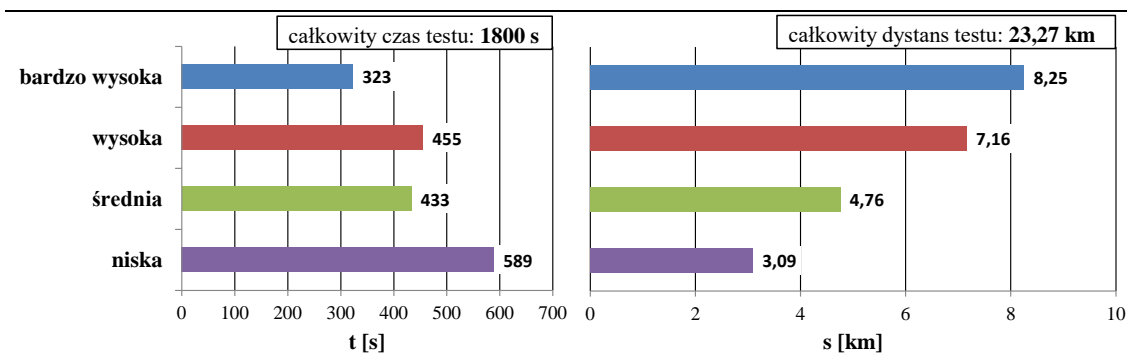
Procedurę WLTP opracowano na szczęblu Europejskiej Komisji Gospodarczej Organizacji Narodów Zjednoczonych (EKG ONZ) i została ona przyjęta jako ogólnosiwiatowy przepis techniczny (GTR) nr 15 przez Światowe Forum na rzecz Harmonizacji Przepisów dotyczących Pojazdów (WP.29) w marcu 2014 roku [25]. Nowa procedura zastąpiła dotychczasowy laboratoryjny test emisyjny NEDC i obowiązuje od września 2017 roku. Jej głównym zadaniem jest utworzenie ogólnych zasad laboratoryjnego badania pojazdów, dzięki czemu możliwa jest międzynarodowa harmonizacja wymogów badawczych. Ponadto dostarcza bardziej realistyczne dane (w porównaniu z poprzednim testem NEDC) dotyczące zużycia paliwa i emisji dwutlenku węgla. Procedura WLTP obejmuje pełny opis cyklu badań pojazdu w odniesieniu do emisji dwutlenku węgla i objętych przepisami emisji zanieczyszczeń w znormalizowanych warunkach otoczenia. W celu jej dostosowania do unijnego systemu homologacji typu, konieczne jest uzupełnienie procedury poprzez dalsze zwiększanie przejrzystości wymogów dotyczących parametrów technicznych oraz ograniczenie elastyczności w prowadzeniu badań. Umożliwi to niezależnym podmiotom odtworzenie wyników badań homologacyjnych.

Test WLTC jest częścią procedury WLTP. Wykonywany jest w warunkach laboratoryjnych, z wykorzystaniem hamowni podwoziowej, a wymagania testu są zróżnicowane w zależności od typu pojazdu. W tej rozprawie doktorskiej omówiony zostanie tylko jeden typ – dla pojazdów klasy 3b, czyli mających stosunek mocy do masy pojazdu gotowego do jazdy wynoszący > 34 W/kg oraz poruszających się z prędkością maksymalną równą lub większą niż 120 km/h. Na rysunku 3.4 przedstawiono przebieg testu z podziałem na poszczególne fazy testu (niskiej, średniej, wysokiej i bardzo wysokiej prędkości pojazdu). Wartości te są ściśle określone w rozporządzeniu 2019/631 [24].



Rys. 3.4. Schemat przebiegu testu WLTC dla kategorii pojazdu 3b [24]

Czas trwania testu wynosi 30 min, a całkowity dystans to 23,27 km. Bardziej szczegółowe dane dotyczące tego przebiegu przedstawiono na rys. 3.5 oraz w tabelicy 3.1. Wynika z nich, że faza niskiej prędkości stanowi 13,3% całkowitego dystansu, faza średniej prędkości 20,4%, faza wysokiej prędkości 30,8%, a faza najwyższej prędkości 35,5%.



Rys. 3.5. Udział poszczególnych faz testu [25]

Jak wspomniano wcześniej, test WLTC jest następcą testu NEDC. Główną różnicą jest zwiększenie dynamiki jazdy pojazdu w teście laboratoryjnym. Przyczyniło się to do konieczności monitorowania większej liczby danych. Ogólne wytyczne dotyczące przebiegu testu przedstawiono w tabelicy 3.1. Uwzględniono w niej udział postoju, średnią prędkość (bez uwzględnienia zatrzymań), maksymalną prędkość oraz przyspieszenia w poszczególnych częściach testu.

Tabela 3.1. Wymagania testu WLTC

Parametr	Niska	Średnia	Wysoka	Bardzo wysoka
Udział postoju [%]	26,5	11,1	6,8	2,2
Średnia prędkość (bez postoju) [km/h]	25,7	44,5	60,8	94
Prędkość maksymalna [km/h]	56,5	76,6	97,4	131,3
Przyspieszenie maksymalne [m/s ²]	1,61	1,61	1,67	1,06
Przyspieszenie minimalne [m/s ²]	-1,50	-1,50	-1,50	-1,44

Procedura WLTP nie jest wykonywana wyłącznie dla pojazdów z napędem konwencjonalnym. W rozporządzeniu [25] uwzględniono także wymagania konieczne do spełnienia przez poniższe kategorie pojazdów:

- hybrydowe pojazdy elektryczne doładowywane zewnątrz (OVC-HEV – *off-vehicle charging hybrid electric vehicle*),
- hybrydowe pojazdy elektryczne niedoładowywane zewnątrz (NOVC-HEV – *not off-vehicle chargeable hybrid electric vehicle*),
- elektryczne (EV – *electric vehicle*).

W zależności od rodzaju i trybu, pojazdy są badane zgodnie z określoną w rozporządzeniu 2017/1151 [25] konfiguracją cyklu testu WLTC (tablica 3.2). Dotyczy to zarówno trybu ładowania, jak i rozładowania. W rozporządzeniu 2017/1151 [25] przewidziano także miejską wersję testu WLTC. Składa się ona wyłącznie z faz o niskiej i średniej prędkości. W przypadku pojazdów elektrycznych zasilanych wyłącznie akumulatorami, wyższa średnia prędkość nowego cyklu testowego prowadzi do większego zużycia energii. Ta energia jest jednak podawana w jednostce kilowatogodziny (kWh) na 100 kilometrów. Szczegółowe wymagania dotyczące procedury testu WLTC wraz z opisem aparatury pomiarowej i warunków pomieszczenia pomiarowego są opisane w rozporządzeniu 2017/1151 [25].

Tablica 3.2. Procedura testu WLTC dla pojazdów hybrydowych i elektrycznych [25]

WLTP		WLTP (cykl miejski)
Rozładowanie	Ładowanie	Rozładowanie
Kryteria emisji, zużycie paliwa, CO ₂ , zasięg w trybie elektrycznym, równoważny zasięg w trybie elektrycznym, zasięg w cyklu z rozładowaniem, rzeczywisty zasięg z rozładowaniem, energia naładowana	kryteria emisji, zużycie paliwa, CO ₂ ,	zasięg w trybie elektrycznym, równoważny zasięg w trybie elektrycznym (w cyklu miejskim)
OVC-HEV	Niska ₃ + średnia ₃₋₂ + + wysoka ₃₋₂ + + bardzo wysoka ₃	niska ₃ + średnia ₃₋₂
NOVC-HEV	–	–
EV	niska ₃ + średnia ₃₋₂ + + wysoka ₃₋₂ + + bardzo wysoka ₃	–

3.3. Drogowe testy emisyjne

Uzupełnieniem testu laboratoryjnego WLTC jest test drogowy RDE [26–29]. Jednym z kluczowych czynników, które skłoniły ustawodawców do opracowania testu RDE, była rozbieżność między wynikami emisji uzyskiwanymi w laboratorium (z wykorzystaniem testu NEDC) i podczas rzeczywistej jazdy z wykorzystaniem mobilnej aparatury pomiarowej. Nowe procedury dla samochodów osobowych wprowadzono dwuetapowo. W pierwszym etapie (od 1.09.2017) test drogowy RDE służył wyłącznie

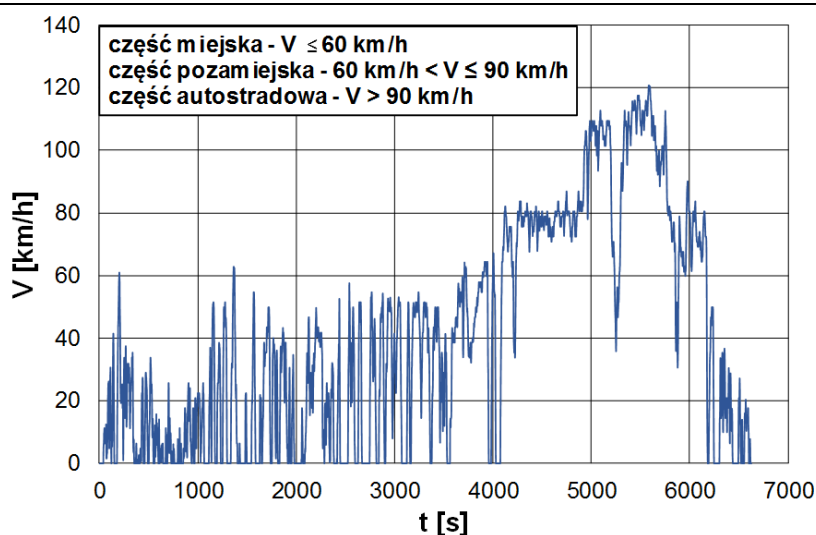
do monitorowania, natomiast w drugim (od 1.09.2019) stał się częścią procedury homologacyjnej. Głównym celem stosowania tego testu jest możliwość ilościowego określenia emisji z pojazdu, przy użyciu mobilnej aparatury pomiarowej typu PEMS, w zróżnicowanych warunkach eksploatacji pojazdu.

Ze względu na zakres prędkości pojazdu, dzieli się go na trzy części:

- miejską ($v \leq 60$ km/h),
- pozamiejską (60 km/h $< v \leq 90$ km/h),
- autostradową ($v > 90$ km/h).

Na rysunku 3.6 przedstawiono przykładowy przebieg testu z podziałem na wymienione wyżej etapy. Test RDE charakteryzuje się szeregiem wymogów, koniecznych do spełnienia, aby przejazd został uznany za poprawnie wykonany (ważny). W rozporządzeniu 2018/1832 [29] precyzyjnie określono nie tylko czas trwania testu, który wynosi od 90 do 120 min, ale także minimalny dystans każdej z faz wraz z ich udziałem w teście. Wymagania szczegółowe testu RDE dotyczą m.in.:

- oceny wpływu zewnętrznych parametrów pogodowych i drogowych, a także stylu jazdy kierowcy,
- stanu termicznego pojazdu przed rozpoczęciem testu,
- działania systemów oczyszczania spalin,
- obciążenia pojazdu.



Rys. 3.6. Przykładowy przebieg testu RDE [29]

W tabelicy 3.3 przedstawiono główne wytyczne testu dla samochodu osobowego spełniającego normę toksyczności Euro 6d. Wymagania procedury RDE dotyczą nie tylko samego przejazdu, ale także aparatury pomiarowej. Do pomiaru emisji zanieczyszczeń stosuje się mobilną aparaturę pomiarową typu PEMS (*Portable Emissions Measurement Systems*). Procedura testu wskazuje, że instalacja oprzyrządowania powinna zostać przeprowadzona w taki sposób, aby do minimum ograniczyć jej wpływ na emisję zanieczyszczeń, działanie pojazdu i jego masę oraz warunki aerodynamiczne. Z tego powodu energia do aparatury badawczej jest dostarczana z zewnętrznego źródła.

Procedura testu RDE dla pojazdów spełniających normę toksyczności Euro 6 została wprowadzona etapowo, w postaci czterech pakietów, których publikacja miała miejsce w terminie od marca 2016 roku do listopada 2018 roku. W tabelicy 3.4 przedstawiono podsumowanie zmian, które weszły w życie na przestrzeni tych lat. Pierwszy pakiet, opublikowany w marcu 2016 roku (Rozporządzenie Komisji Europejskiej 2016/427),

zawierał podstawowe cechy testu RDE, w tym charakterystykę trasy pomiarowej, opis narzędzi do oceny danych, wymagania techniczne sprzętu PEMS oraz obowiązki sprawozdawcze. Skupiono się w nim na pomiarze emisji gazowych (głównie NO_x). Treść pakietu dopuszczała dwie możliwości oceny danych testowych: metodą okna średniej ruchomej i metodą dzielenia mocy. Metody te zostaną opisane w dalszej części pracy. Ustalenia pierwszego pakietu procedury służyły wyłącznie do monitorowania i raportowania, bez wymogu spełnienia ograniczenia limitów emisji spalin. Dotyczyło to pojazdów Euro 6c (zatwierdzonych przez test NEDC) od kwietnia 2016 roku.

Tablica 3.3. Główne wymagania przebiegu testu RDE [29]

Wymagania RDE		Euro 6d	
Współczynnik zgodności		NO _x : 1,43, PN: 1,50	
Emisja z zimnego rozruchu		Tak	
Limity dla części miejskiej i testu RDE		Tak	
Wysokość topograficzna prowadzenia testu	Zakres normalny	≤ 700 m	
	Zakres rozszerzony	700 m–1300m	
Temperatura otoczenia	Zakres normalny	0–30 °C	
	Zakres rozszerzony	–7 °C–0 °C lub 30 °C–35 °C	
Część testu	Miejska	34%	≤ 60 km/h
	Pozamiejska	33%	60–90 km/h
	Autostradowa	33%	> 90 km/h
Prędkość maksymalna		145 km/h	
Czas trwania testu		90–120 min	
Minimalny dystans każdej części testu		16 km	
Weryfikacja dynamiki przejazdu		metoda okien pomiarowych	
Ocena wyników		CO ₂ RDE / WLTC	
Badanie pojazdów hybrydowych		Tak	

Drugi pakiet, opublikowany w kwietniu 2016 roku (Rozporządzenie Komisji Europejskiej 2016/646 [27]), zawierał limity emisji spalin dla NO_x odpowiadające wymaganiom normy emisji Euro 6 pomnożonemu przez współczynnik zgodności i harmonogram wdrażania testu RDE. Zawierał również kilka funkcji technicznych, takich jak ograniczenia parametrów dynamicznych, m.in. względne przyspieszenie dodatnie (RPA – *Relative Positive Acceleration*), iloczyn prędkości i przyspieszenia dodatniego, limit przyrostu wysokości topograficznej i walidacja lokalizacji (z wykorzystaniem systemu GPS). Pojazdy musiały spełniać współczynnik zgodności NO_x (CF – *conformity factor*) wynoszący 2,1 od 1 września 2017 roku (Euro 6d-temp) i 1,5 od 1 stycznia 2020 roku (Euro 6d). W pakiecie nie uwzględniano wartości emisji drogowej uzyskiwanej podczas zimnego rozruchu.

Trzeci pakiet, opublikowany w czerwcu 2017 roku (Rozporządzenie Komisji Europejskiej 2017/1154 [28]) obejmował wprowadzenie protokołu pomiaru liczby cząstek stałych i związanego z nim współczynnika zgodności. Określono w nim także procedury stosowane przy uwzględnianiu zimnego rozruchu i zjawiska regeneracji filtra cząstek stałych podczas wykonywania testu RDE. Co więcej, trzeci pakiet testu wprowadził

również normy prawne dotyczące pomiaru emisji spalin z pojazdów hybrydowych. Ten sam pakiet wprowadził także możliwość złożenia deklaracji przez producentów, w której zaświadcza, że wartość emisji drogowej związków szkodliwych spalin pojazdu znajduje się poniżej maksymalnej wartości, jaką może osiągnąć każdy przejazd w teście RDE.

Czwarty pakiet, opublikowany w listopadzie 2018 roku (Rozporządzenie Komisji Europejskiej 2018/1832 [29]) stanowił podstawę badań zgodności eksploatacyjnej (ISC – *in-service conformity*) i nadzoru wraz z przepisami szczegółowymi dla lekkich samochodów dostawczych. Współczynnik zgodności dla NO_x został zmniejszony do wartości 1,43. Metoda oceny danych została uproszczona w taki sposób, aby zmierzony wynik na konkretny dystans był równy wynikowi testu, chyba że emisja CO_2 w danym etapie testu RDE jest o ponad 20–30% większa niż podczas testu WLTP. W tym drugim przypadku można zastosować korektę mniejszą niż 1.

Z postanowień rozporządzenia Komisji Europejskiej 2016/427 wynika, że podczas eksploatacji, emisja typu pojazdu nie może przekraczać wartości granicznych. Limity dla PN i NO_x przedstawiono w tablicy 3.4.

$$\text{NTE}_{\text{zanieczyszczenie}} = \text{CF}_{\text{zanieczyszczenie}} \cdot \text{Euro 6} \quad (3.1)$$

$$b_{\text{RDE},k} \leq \text{NTE}_{\text{zanieczyszczenie}} \quad (3.2)$$

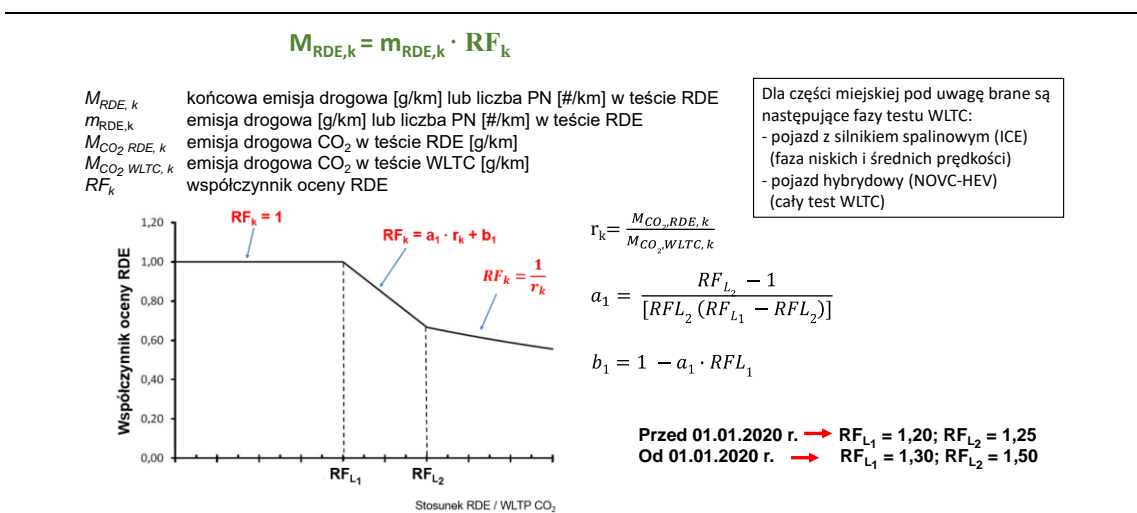
gdzie: Euro 6 – graniczna wartość emisji Euro 6, $\text{CF}_{\text{zanieczyszczenie}}$ – współczynnik zgodności dla danego zanieczyszczenia, $b_{\text{RDE},k}$ – emisja drogowa [g/km] lub liczba cząstek stałych [1/km] w teście RDE.

Tablica 3.4. Rozwój procedury RDE [25–29]

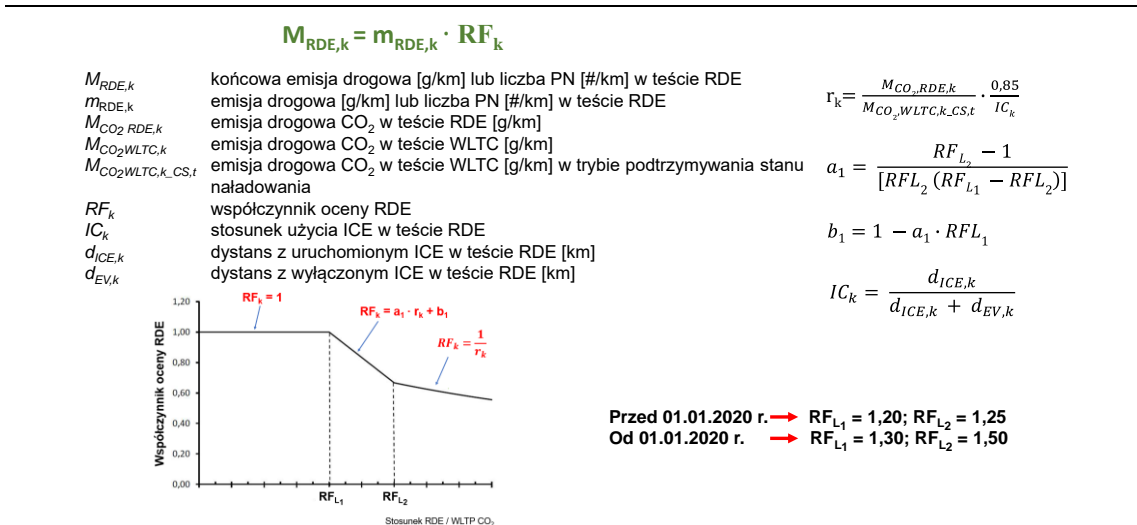
Wymagania testu RDE	Pakiet 1 (2015 r.)	Pakiet 2 (2016 r.)	Pakiet 3 (2017 r.)	Pakiet 4 (2018 r.)
Wymagania trasy i warunków otoczenia	Tak →	→	→	→
Ocena przejazdu	MAW, CLEAR	→	→	MAW
Ocena wyników emisji spalin	MAW, CLEAR	→	→	CO_2 RDE/ WLTC
Wymagania pomiarów związków gazowych	Tak	→	→	→
Procedura badania zanieczyszczeń gazowych	Tak	→	→	→
Warunki dynamiczne		Tak	→	→
Limit CF-NO_x		Tak (2,1)	1,5	1,43
Zimny rozruch			Tak	→
Wymagania pomiarów liczby cząstek stałych			Tak	→
Procedura badania liczby cząstek stałych			Tak	→
Limit: CF-PN			Tak	1,5
Przepisy dla pojazdu hybrydowego			Tak	Zmiana
Uwzględnienie wystąpienia regeneracji			Tak	→
Zgodność eksploatacyjna				Tak

Przed wprowadzeniem czwartego pakietu procedury RDE dostępne były dwie opcje obliczania końcowego wyniku emisji spalin w teście: MAW (*moving average window* – ruchome okno uśredniania) i CLEAR. MAW to metoda wyznaczania emisji spalin w teście RDE z wykorzystaniem tzw. ruchomego okna uśredniania opracowana przez Europejskie Centrum Badań (JRC – *Joint Research Centre*), według której dzielono zmierzone dane na okna pomiarowe i wykorzystywano je do obliczenia wyniku testu. CLEAR to metoda kategoryzacji mocy (*power binning*) opracowana przez uniwersytet w Graz, która dostosowuje zmierzony wynik do punktów odpowiadających chwilowej mocy na kołach.

Czwarta część procedury RDE wprowadziła nową metodę obliczania końcowych wartości emisji drogowej w teście RDE z podziałem na część miejską i cały test RDE. Na rysunku 3.7 przedstawiono schemat postępowania przy obliczaniu emisji drogowej z pojazdu z silnikiem spalinowym i z pojazdu hybrydowego (NOVC-HEV), natomiast na rys. 3.8 z pojazdu hybrydowego typu plug-in (OVC-HEV). Zgodnie z Rozporządzeniem Komisji Europejskiej 2018/1832 [29], wartość współczynnika oceny wyniku RDE zależy od stosunku emisji CO₂ zmierzonej podczas badania RDE do wartości emisji CO₂ uzyskanej w teście WLTC.



Rys. 3.7. Algorytm obliczania końcowych wartości emisji RDE w części miejskiej i w całym teście dla pojazdu konwencjonalnego z silnikiem spalinowym (ICE) i pojazdu hybrydowego (NOVC-HEV) [29]



Rys. 3.8. Metoda obliczania końcowych wartości emisji RDE w części miejskiej i w całym teście dla pojazdu hybrydowego typu plug-in (OVC-HEV) [29]

Czwarty pakiet RDE zawiera również wymóg zgłaszania maksymalnych wartości NO_x i PN uzyskiwanych w części miejskiej i całym teście RDE w certyfikacie zgodności. Niniejsze „zadeklarowane maksymalne wartości RDE” są stosowane w celu zapewnienia zgodności eksploatacyjnej. Wprowadzenie pierwszego pakietu RDE zobowiązało także producentów pojazdów do publikowania danych z badań homologacyjnych typu RDE dla kategorii badań PEMS. Jednym ze źródeł tych danych dla wielu producentów jest ACEA (*Association des Constructeurs Européens d'Automobile* – Stowarzyszenie Europejskich Konstruktorów Samochodów) [30]. Producenci pojazdów mają także możliwość udostępniania danych za pośrednictwem własnych stron internetowych. Przy zakupie nowego pojazdu konsumenci otrzymują certyfikat zgodności (COC – *Certificate of Conformity*), który zawiera wyniki emisji drogowej w teście RDE [31]. W ten sposób nabywają wiedzę o wartościach emisji zanieczyszczeń uzyskiwanych przez pojazd podczas jego rzeczywistej eksploatacji.

3.4. Światowa działalność badawcza w zakresie drogowych testów emisyjnych

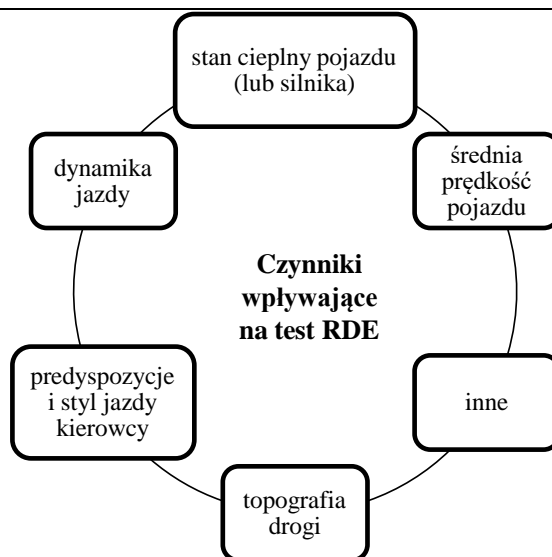
We wcześniejszych podrozdziałach omówiono genezę testów emisyjnych obowiązujących w Europie. Zgodnie z ostatnimi nowelizacjami aktów prawnych, badania wykonywane są nie tylko na hamowni podwoziowej, ale także w warunkach rzeczywistej jazdy. Oznacza to, że do oceny emisji z pojazdów, niezbędne jest stosowanie dwóch, niezależnych testów: WLTC oraz RDE [29]. Co więcej, ich procedury wciąż ewoluują przez wprowadzanie kolejnych, jeszcze bardziej restrykcyjnych wymagań. Niewątpliwie jest to bezpośrednie następstwo realizowania celów Komisji Europejskiej, związanych z ograniczeniem zanieczyszczenia powietrza.

Procedura testu WLTC jest ściśle określona w Rozporządzeniu Komisji Europejskiej 2017/1152 [32] i odbywa się w ustalonych warunkach laboratoryjnych. Inaczej jest w przypadku testu RDE. Jego warunki również są znane i precyzyjnie określone, ale podczas wykonywania przejazdu mogą się pojawić nieprzewidziane sytuacje, które uniemożliwią realizację testu. Niemniej jednak, dotychczasowe badania, m.in. [33–38] wskazują, że to właśnie testy RDE najlepiej odzwierciedlają wyniki emisji spalin uzyskiwanej podczas rzeczywistej eksploatacji pojazdów. Autorzy powyższych publikacji zwrócili uwagę, że dokładność pomiarów emisji spalin głównie zależy od warunków pracy silnika i pojazdu (m.in. prędkości innych pojazdów, nawierzchni drogi, predyspozycji i stylu jazdy kierowcy oraz innych aspektów determinujących ruch drogowy). Warunki te są trudne do przewidzenia i mogą oddziaływać na wyniki pomiarów emisji spalin (rys. 3.9). Potwierdziły to kolejne publikacje, w których dokonano analizy stanu cieplnego pojazdu (lub silnika) [39, 40], średniej prędkości [41], dynamiki jazdy [42] oraz topografii drogi [43].

Autorzy publikacji [43] stwierdzili również, że ten sam pojazd, ale na zróżnicowanych trasach badawczych (spełniających wymagania testu RDE) uzyskuje niejednakowe wyniki emisji spalin. Co więcej, taka sytuacja jest możliwa już podczas zmiany kierowcy lub terminu wykonywania testu. Autorzy artykułu [43] skoncentrowali się na analizie wpływu różnych metod pomiaru i analizy danych (m.in. pracy zimnego silnika, nachylenia drogi, wyboru trasy i stylu jazdy) na emisję CO_2 i NO_x . Testy przeprowadziło dwóch kierowców korzystających z pięciu pojazdów. Każdy z kierowców wykonał po dwa przejazdy pojazdem, jeden normalnym stylem jazdy, a drugi – agresywnym (bardziej dynamicznym). Otrzymane wyniki wskazały, że różnice w uzyskanych wynikach emisji drogowej zanieczyszczeń między kierowcami wynosiły 7% (w przypadku CO_2)

i 55% (w przypadku NO_x). To sprawia, że konieczne są dalsze (jeszcze bardziej szczegółowe) badania, które ocenią istotność wprowadzania dalszych zmian. Dotyczy to zarówno testów laboratoryjnych, jak i drogowych.

Wdrożenie trzeciego pakietu procedury badawczej RDE rozszerzyło metodę pomiarową o uwzględnienie emisji z fazy zimnego rozruchu w całkowitej emisji spalin pojazdu. Na analizie tej części emisji spalin z samochodów osobowych skupili się autorzy publikacji [44, 45]. W artykule [44] analizowali wpływ obniżenia temperatury otoczenia z 25°C do 8°C na emisję spalin podczas fazy zimnego rozruchu ($t = 300$ s). Do badań wykorzystali pojazd wyposażony w silnik o zapłonie iskrowym, spełniający normę emisji spalin Euro 6d-Temp. Z kolei w artykule [45] porównali wpływ emisji z fazy zimnego rozruchu uzyskanej przez dwa samochody osobowe (jeden wyposażony w silnik o zapłonie iskrowym, a drugi w silnik o zapłonie samoczynnym). Z uzyskanych danych wynika, że w teście RDE w fazie zimnego rozruchu pojazd z silnikiem o zapłonie samoczynnym w stosunku do silnika o zapłonie iskrowym charakteryzuje się: 2-krotnie mniejszą masą dwutlenku węgla (a tym samym zużyciem paliwa), 23 razy mniejszą masą tlenku węgla, 16-krotnie wyższą masą tlenków azotu oraz 2-krotnie wyższą liczbą cząstek stałych.



Rys. 3.9. Czynniki wpływające na poprawność wykonywania testów RDE [39–42]

Aby zmniejszyć znaczną liczbę zezwoleń na badania drogowe, które są wymagane do walidacji danego pojazdu w określonych warunkach testu RDE, opracowywane są nowe rozwiązania. Ich głównym celem jest ograniczenie liczby testów realizowanych w warunkach drogowych. Niestety ustawodawcy nie ułatwiają tego zadania i przez wprowadzanie kolejnych ograniczeń, powodują dalsze zmiany w procedurach testów. Takie aktualizacje są niezbędne, ponieważ służą, m.in. dostosowaniu procedur do nowych regulacji prawnych.

Jednym z najważniejszych wymagań dotyczących badań wykonywanych w laboratorium jest jak najlepsze odwzorowanie rzeczywistych warunków ruchu, przy zapewnieniu wiarygodności uzyskiwanych wyników. Cykl testu laboratoryjnego WLTC zakłada przebieg w określonych warunkach pomiarowych. Natomiast podczas rzeczywistej eksploatacji pojazdu, zmiany temperatury i ciśnienia powietrza, stylu jazdy oraz charakterystyki trasy badawczej mogą skutkować zasadniczo różnymi wartościami rzeczywistego zużycia paliwa oraz emisji spalin. Aby producent mógł wykazać zgodność ze wszystkimi warunkami procedury RDE, konieczne są testy wielu prototypowych pojazdów.

dów i układów napędowych. Ostatecznie jest to kosztowne rozwiązanie i prowadzi do wydłużenia czasu rozwoju. Jak wspomniano wcześniej, procedura ta często wymaga przeprowadzenia wielu prób zarówno w laboratorium, jak i na drodze, a to z kolei wiąże się z zwiększonymi nakładami finansowymi (tablica 3.5) i czasowymi. Dlatego konieczne jest opracowanie alternatywnej metody badawczej, która zapewniłaby lepsze odwzorowanie warunków ruchu drogowego i umożliwiłaby indywidualizację testu, np. w zależności od typu pojazdu lub rodzaju napędu [46–48].

Tablica 3.5. Szacowany koszt przeprowadzenia testu RDE w roku 2017 [46]

Przeprowadzenie cyklu RDE (z uwzględnieniem paliwa i kalibracji)	150 Euro /test
Utrzymanie i konserwacja aparatury PEMS	12 000 Euro/rok

Autorzy publikacji [49] zaproponowali metodę pomiaru, która uwzględnia zróżnicowany profil prędkości podczas badań emisji spalin w warunkach laboratoryjnych, przy jednoczesnym odzwierciedleniu warunków ruchu drogowego podczas pomiarów laboratoryjnych. Wykazali oni również, że opracowana metoda odpowiada losowemu charakterowi warunków ruchu drogowego przy zachowaniu podobieństwa emisji toksycznych składników spalin, a zatem stanowi skuteczną i oczekiwaną alternatywę dla obecnie stosowanych procedur homologacyjnych. Względne różnice między średnimi wartościami uzyskanymi podczas badań laboratoryjnych i pomiarów drogowych wynoszą odpowiednio 5,4% (dla badań z dokładnym odwzorowaniem prędkości) i 1,5% (dla badań z losowym doбором odcinków pomiarowych).

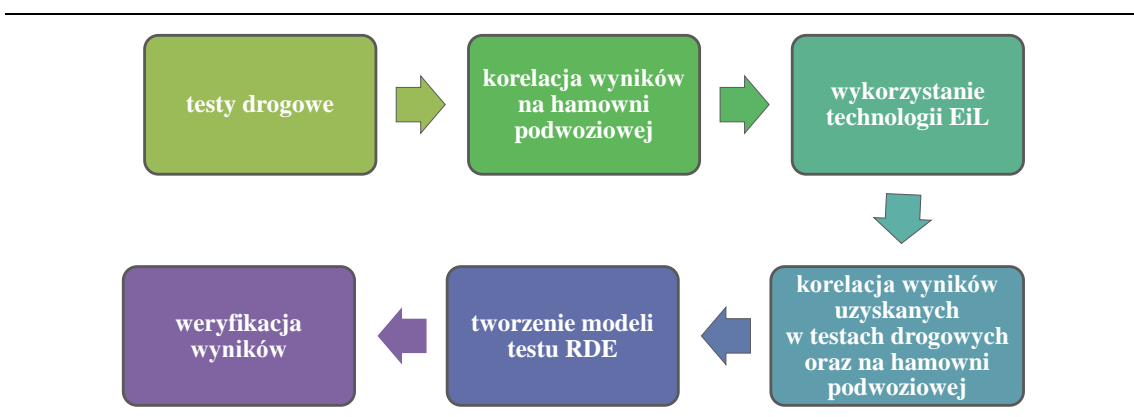
Próbie skorelowania testu WLTC z RDE podjęli także autorzy publikacji [50], w której określili podstawowe kroki w celu przeprowadzania cyklu RDE w warunkach laboratoryjnych. Autorzy analizowali niepewności pomiarowe i powtarzalność wartości uzyskanych w kolejnych próbach testu, przeprowadzonych w tych samych warunkach. W przypadku emisji drogowej tlenków azotu z pojazdów wyposażonych w silnik ZS, autorzy uzyskali niepewność pomiarową rzędu 3,13% (w teście RDE) i 3,9% (w teście WLTC).

Ze względu na wymagania procedury testu RDE, badanie musi być poprzedzone dokładnym zaplanowaniem trasy w celu ograniczenia nieważności testów, a w konsekwencji zmniejszenia kosztów badań. Autorzy pracy [51] przedstawili procedurę budowania cyklu do pomiaru emisji w rzeczywistych warunkach jazdy, która minimalizuje dystans testu przy jednoczesnym spełnieniu regulacji prawnych dotyczących warunków drogowych. W publikacji [51] autorzy zweryfikowali wykonalność cyklu poprzez wykonanie kilku testów na tej samej trasie badawczej, ale podczas zróżnicowanej eksploatacji pojazdu. Stwierdzili, że efekty warunków jazdy można szczegółowo ocenić wykorzystując oprogramowanie do symulacji ruchu, np. SUMO (*Simulation of Urban Mobility*), stworzone przez Niemiecki Instytut Transportu (DLR – *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*). Dzięki temu autorzy publikacji [51] opracowali trasę, która spełnia wymagania Rozporządzenia 2016/646, ale co najistotniejsze, umożliwia zmniejszenie kosztów przeprowadzenia badania przez minimalizację całkowitego dystansu testu.

W kolejnej publikacji [52], autorzy dokonali analizy możliwości wykorzystania wspomnianego wcześniej symulatora ruchu oraz oprogramowania SUMO, które zastosowano do odtworzenia profilu prędkości, uzyskanego w przeprowadzonych testach RDE. W pierwszym etapie badań autorzy wykonali testy drogowe, z których uzyskali parametry cyklu RDE. Do próby wykorzystali pojazd klasy 3b, który później użytkowali w kilku kolejnych przejazdach na tej samej trasie badawczej, z tym samym kierowcą. Uzyskane charakterystyki względnego dodatniego przyspieszenia, autorzy zastosowali

do walidacji oprogramowania SUMO z wyznaczonymi przebiegami prędkości i wartościami emisji CO₂. Badania eksperymentalne wykazały również możliwość skorelowania emisji CO₂ ze specyfikacją cyklu (prędkością i przyspieszeniem pojazdu) lub punktami pracy silnika (obciążeniem i prędkością). Oznacza to, że proponowane narzędzie symulatora ruchu ma potencjał do szacowania i minimalizacji emisji CO₂ w warunkach jazdy RDE w konwencjonalnych i zaawansowanych systemach zasilania. Jednak wstępne wyniki pokazane w tym artykule pokazują, że oprogramowanie SUMO wymaga jeszcze dopracowania i pewnych ulepszeń.

Na najbardziej zaawansowanym etapie projektowania metody korelującej wyniki emisji spalin z obu testów są autorzy publikacji [53, 55]. Opracowują oni podejście do rozwoju R2R (*Road to Rig*), znane jako RDE Plus (RDE+) firmy HORIBA MIRA. Dzięki niemu możliwe będzie opracowywanie rzeczywistych scenariuszy jazdy i wdrażanie ich już na etapie rozwoju pojazdu i silnika, z wykorzystaniem aspektów wirtualnej kalibracji. Takie podejście niewątpliwie obniży koszty rozwoju pojazdów i silników. Na rys. 3.10 przedstawiono ogólne założenia metody RDE+. Elementem wyróżniającym ją na tle innych metod jest wykorzystanie technologii EiL (*Engine-in-the-Loop*). Dokładny opis metody znajduje się w dalszej części pracy.



Rys. 3.10. Założenia metody RDE+ (na podstawie [53])

W publikacji [54] autorzy szczegółowo omówili metodę odtworzenia rzeczywistych warunków towarzyszących testom drogowym RDE na hamowni podwoziowej. Metoda ta obejmuje zastosowanie sterownika do odwzorowania cykli i powtarzalności. Wykorzystano w niej wielofunkcyjny system MEDAS (*Multi Function Efficient Dynamic Altitude Simulation*) firmy Horiba, który symulował warunki drogowy oraz parametry dynamiczne przejazdu. Metoda opisana w artykule [54] umożliwia opracowanie i kalibrację pojazdu oraz układu napędowego przez wykorzystanie technologii drogowej, hamowni podwoziowej i połączonej technologii EiL. Według tej metody, faza rozwoju obejmuje gromadzenie danych z trzech pojazdów poddanych testom RDE, specjalnie skonstruowanych w celu spełnienia normalnych i rozszerzonych warunków brzegowych RDE (opisanych w Rozporządzeniu Komisji Europejskiej 2018/1832). Różnica w wyniku emisji CO₂ uzyskanej z wykorzystaniem metody RLR (*Road Load Reconstruction*) wynosiła 2–3% w stosunku do badań drogowych. Ponadto emisja NO_x i PN jest skorelowana z wartościami rzeczywistymi (różnica wynosi < 10%). Natomiast w przypadku metody TM (*Torque Matching*) różnica wynosiła mniej niż 1%. Docelowo autorzy planują opracowanie metody polegającej na połączeniu strategii EiL z wirtualną symulacją środowiska, warunkami drogowymi i pojazdów z użyciem pełnego systemu symulacji pojazdu. Autorzy zaznaczają, że skorelowanie testów laboratoryjnych i dro-

gowych nie wyeliminuje potrzeby fizycznego testowania prototypów (w perspektywie krótko- i średnioterminowej), ale z pewnością dostarczy dodatkowych narzędzi.

W artykule [55] autorzy wprowadzili nową technikę odwzorowywania jazdy w warunkach rzeczywistych w środowisku laboratoryjnym. Jako część pakietu narzędzi rozwojowych RDE+ firmy HORIBA, HTM (*HORIBA Torque Matching*) stanowi ulepszenie istniejących technik symulacji warunków drogowych, ponieważ jest w stanie osiągnąć bardzo dokładne odwzorowanie emisji spalin (z bardzo niską zmiennością masy między testami). Dodatkowo, można to osiągnąć bez konieczności weryfikowania nachylenia dróg wzdłuż tras testowych, w celu stworzenia dokładnego, symulowanego obciążenia drogowego. W artykule [55] autorzy potwierdzili możliwość zastosowania podejścia HTM nie tylko do pojazdów wyposażonych w silniki konwencjonalne, ale także do pojazdów hybrydowych i elektrycznych.

Opracowanie nowej metody pomiaru emisji spalin to wyzwanie. Należy spełnić nie tylko główne założenia testu, ale jak wynika z przedstawionych powyżej publikacji, konieczna jest dodatkowa i szczegółowa analiza każdego parametru. Oznacza to, że takie metody muszą być nie tylko elastyczne, ale nawet w pewnym zakresie wyprzedzać decyzje ustawodawców. Przykładem takiej sytuacji są autorzy publikacji [56], którzy zwrócili uwagę na lukę w procedurze homologacyjnej, jaką jest brak uwzględnienia prędkości i kierunku wiatru. Ich propozycja polegała na wykorzystaniu metody Monte Carlo [56], która umożliwia ocenę wpływu wiatru na osiągi i emisję z pojazdu. Autorzy wyznaczyli korelacje między zmianą zużycia paliwa i emisją spalin a prędkością i kierunkiem wiatru w poszczególnych fazach cyklu WLTC. Z otrzymanych danych wynika, że w przypadku fazy dużej i bardzo dużej prędkości, wzrost emisji był znacznie większy, wynoszący do 28% dla CO₂, 22% dla NO i 13% dla PN w fazie 4 testu WLTC (fazie bardzo wysokich prędkości) (rys. 3.11).



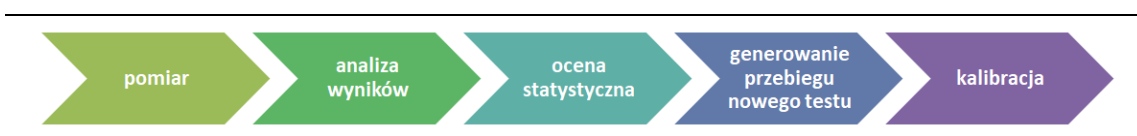
Rys. 3.11. Wpływ wiatru na emisję poszczególnych składników spalin w teście WLTC [56]

Niestety pomimo zrealizowania wielu prac naukowych, problem nadmiernej emisji spalin z samochodów osobowych oraz rozbieżności w wynikach uzyskanych na hamowni podwoziowej i w testach drogowych, wciąż nie został rozwiązany. Co więcej, coraz bardziej zaawansowane analizy wykonywane na terenie Unii Europejskiej wskazują na istnienie kolejnych, dotychczas niewystarczająco zbadanych, obszarów nadmiernej emisji związków szkodliwych w spalinach. Pomimo rozszerzania kontroli emisji spalin o kolejne związki chemiczne, uwzględniania wpływu różnych stanów cieplnych silnika oraz monitorowania emisji spalin w nieprzewidywalnych warunkach ruchu drogowego, wciąż istnieją substancje, które nie podlegają regulacjom. Oznacza to, że konieczna jest dalsza identyfikacja ich źródeł oraz opracowywanie nowych ograniczeń.

Wprowadzanie kolejnych, jeszcze bardziej restrykcyjnych limitów emisji spalin dla samochodów osobowych (szczególnie w warunkach rzeczywistej jazdy) spowodowało,

że pojazdy wyposażono w zaawansowane układy oczyszczania spalin. Autorzy publikacji [57] wskazali, że brakuje informacji na temat wpływu tych technologii na powstawanie związków chemicznych, które wciąż nie podlegają kontroli. Autorzy wykonali analizę drogowej emisji spalin takich związków, jak NH_3 , N_2O , CH_4 i HCHO z pojazdów zasilanych silnikami ZI, ZS i gazem ziemnym CNG (*compressed natural gas*). Niestety te składniki spalin wciąż nie są regulowane na rynku europejskim, a co przedstawiają uzyskane wyniki – powinny być wzięte pod uwagę. Wspomniane wyniki podkreślają również znaczenie uwzględnienia tych zanieczyszczeń podczas rzeczywistej eksploatacji. Jest to związane z niedoszacowaniem emisji NH_3 (prekursor cząstek stałych) oraz N_2O i CH_4 (gazy cieplarniane), a których wartości mogą być wysokie. Emisje NH_3 wynosiły do 49 mg/km dla benzynowych samochodów osobowych, do 69 mg/km dla lekkiego samochodu dostawczego CNG i do 17 mg/km dla samochodu osobowego z silnikiem Diesla wyposażonego w system selektywnej redukcji katalitycznej (SCR – *selective catalytic reduction*).

Na rysunku 3.12 przedstawiono schemat działania stosowany podczas wyznaczania nowych cykli testów emisyjnych. Jest to pewnego rodzaju punkt wyjścia dla kolejnych badaczy. Testy emisyjne z roku na rok stają coraz bardziej skomplikowane, dlatego główna uwaga skupia się obecnie na szczegółach tych procedur. Jednak autorzy pracy [58] zwrócili uwagę na kolejne wyzwanie dla metod opartych na symulacji, jakim jest wprowadzenie kontroli dodatkowych zanieczyszczeń. Według autorów, konieczne będzie opracowanie i walidacja nowych modeli przy nieznanym jeszcze wpływie stanu układu oczyszczania spalin na powstawanie dodatkowych zanieczyszczeń i ich konwersję. W związku z tym główny nacisk w badaniach będzie musiał zostać położony na ocenę tych kwestii, aby móc dalej korzystać z badań symulacyjnych. Ze względu na twierdzenie o rosnącej istotności statystycznej w testach homologacyjnych, badania statystyczne muszą być uwzględnione w tworzeniu scenariuszy testowych dla kalibracji i walidacji emisji spalin. Jest to główna zaleta podejścia do generowania cyklu statystycznego opartego na danych pomiarowych. Ta metoda nie jest uzależniona od modeli tworzenia i konwersji emisji, ponieważ dane pomiarowe są wykorzystywane do automatycznej identyfikacji krytycznych sekwencji jazdy. Uwzględnienie walidacji danych w ocenie sekwencji krytycznych dla istotności i wyznaczenie zakresów docelowych dla wartości charakterystycznych już zapewnia podejście do walidacji statystycznej zgodności scenariusza testowego dla OEM (*Original Equipment Manufacturers*). Stosując to podejście, można opisać typowe zachowanie podczas jazdy dla każdego pojazdu.



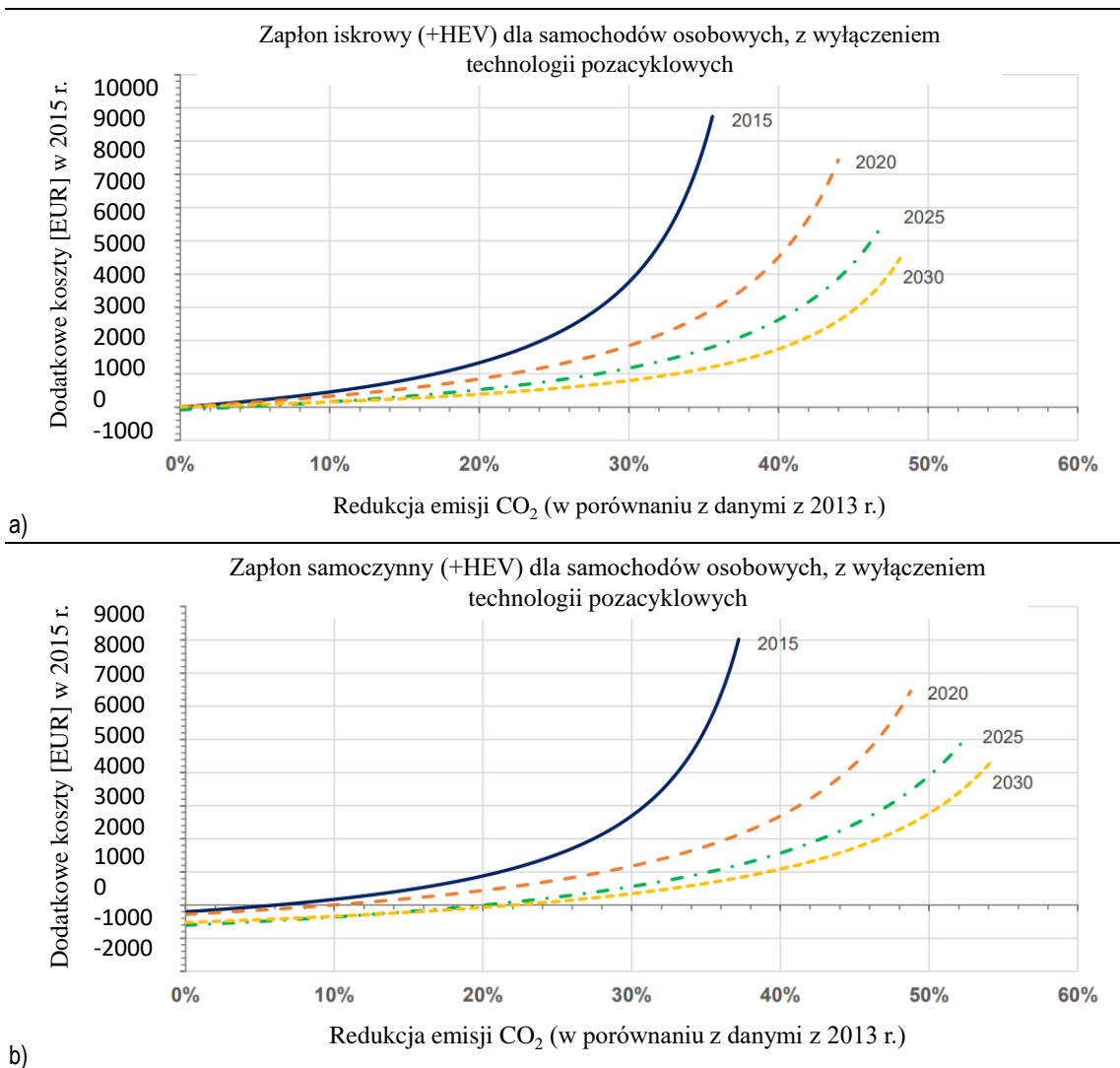
Rys. 3.12. Schemat działań stosowanych podczas wyznaczania nowych metod pomiaru emisji spalin [opracowanie własne]

Autorzy pracy [59] opracowali metodę zarządzania energią dla pojazdów hybrydowych. Polega ona na połączeniu krótkich przejazdów z wykorzystaniem testu WLTC z rzeczywistym natężeniem ruchu drogowego, w celu prognozowania zużycia energii i paliwa przez pojazd. Według autorów, przyszłe badania mogą się koncentrować na wdrożeniu nowej strategii optymalizacji energii hybrydowego pojazdu elektrycznego (HEV) biorąc pod uwagę wyniki z testu WLTC i platformy Google Maps. Autorzy uzyskali obiecujące wyniki, ponieważ wartości wyznaczonych błędów między cyklami eksperymentalnymi i prognozowanymi wynoszą 3,89% dla zużycia paliwa i do 6,8% dla zużycia energii.

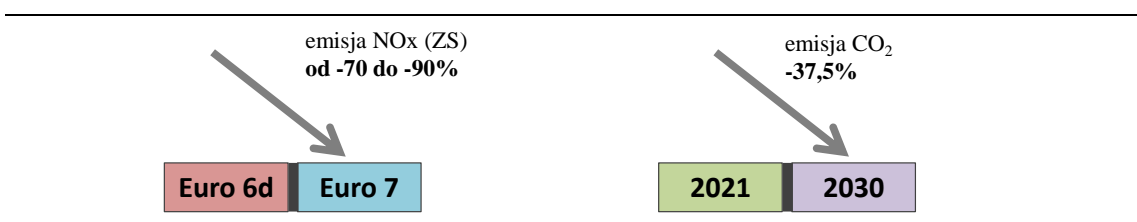
Autorzy pracy [60] zaproponowali dwa testy pomiarowe dla pojazdów hybrydowych, dzięki którym możliwe byłoby skrócenie czasu trwania testów drogowych. Testy te w głównej mierze opierają się na zasadach określonych w procedurze testu RDE (m. in. prędkość jazdy i podział faz testu), a różnice wynikają głównie z cech tych testów, tj. długości i czasu trwania. Wyniki porównania wskazują, że stosowanie do oceny emisji spalin krótkich testów drogowych (o długości każdej fazy około 8 km) wpływa na mniejszą stabilizację termiczną silnika spalinowego i układu oczyszczania spalin. Skutkuje to zwiększoną emisją drogową wszystkich składników spalin: dwutlenku węgla (o 19%), tlenku węgla (o 37%), tlenków azotu (o 9%) i cząstek stałych (o 16%). Jednocześnie zwiększa się emisja związków spalin we wszystkich fazach testu drogowego, co pozytywnie wpływa na dokładność pomiarów, biorąc pod uwagę bardzo małe wartości stężeń rejestrowane przez analizatory.

Oprócz czynności związanych z monitorowaniem ekologicznych aspektów pojazdów, testy silnika (w laboratorium i w badaniach drogowych) przeprowadzane są także w celach badawczych i naukowych. Jest to niezbędne między innymi z perspektywy weryfikacji oszczędności paliwa, charakterystyki emisji spalin określonego typu silnika lub pojazdu, skutków stosowania paliw alternatywnych, ale także oceny skuteczności wykorzystywanych technologii oczyszczania spalin i systemów kontroli emisji. Autorzy publikacji [61] szczegółowo omówili najnowocześniejsze technologie i metody monitorowania emisji z pojazdów podczas ich rzeczywistej eksploatacji. Wyniki uzyskane w warunkach drogowych porównano z wynikami uzyskanymi na hamowni podwozowej. Podczas analizy zidentyfikowano czynniki, które wpływają na oba typy wykonywanych testów (laboratoryjny i drogowy). Autorzy sformułowali także wytyczne dla skutecznego monitorowania emisji oraz minimalizowania rozbieżności między wynikami drogowymi i laboratoryjnymi. Tak, aby w przyszłości między innymi usprawnić system transportu drogowego. Na rysunkach 3.13a i 3.13b przedstawiono możliwe scenariusze kosztów maksymalnej redukcji CO₂ dla samochodów osobowych z segmentu C, wyposażonych w silniki o zapłonie iskrowym (rys. 13a), samoczynnym (rys. 13b) oraz hybrydowym, w latach 2015-2030 uzyskanych według procedury WLTP (z wyłączeniem technologii pozacyklowych). Wszystkie krzywe kosztów zdefiniowano w odniesieniu do 2013 roku.

Autorzy publikacji [62] opracowali przegląd obowiązujących regulacji prawnych dotyczących kontroli emisji spalin oraz związanych z nimi rozwiązań technologicznych. Dane uzyskane podczas badań rzeczywistej eksploatacji pojazdów potwierdzają (rys. 3.14), że nowe restrykcje dotyczące limitów emisji spalin redukują emisję NO_x z silników ZS aż o 70–90% (w porównaniu z normami sprzed Euro 6d). Jednakże, w publikacji zwrócono uwagę na możliwość wystąpienia problemów ze spełnieniem limitu CO₂ równej 95 g/km. Zjawisko to jest związane z ambitnymi celami zaplanowanymi na lata 2025-2030 w zakresie redukcji emisji CO₂, które są najbardziej rygorystyczne na świecie i wymagają 37,5% redukcji do 2030 roku (w porównaniu z 2021 rokiem). Autorzy wskazują również, że konieczna będzie modyfikacja części miejskiej testu RDE, z możliwym wprowadzeniem nowego cyklu, ale z krótszym dystansem, co podkreśli potrzebę skupienia się na redukcji cząstek stałych w powietrzu.



Rys. 3.13. Scenariusze kosztu maksymalnej redukcji CO₂ w latach 2015-2030, uzyskanych według procedury WLTP, dla samochodów osobowych wyposażonych w silnik o zapłonie: a) iskrowym, b) samoczynnym [61]



Rys. 3.14. Szacowany wpływ wprowadzenia nowych restrykcji [62]

Analiza literaturowa wskazuje, że już zostały poczynione prace nad częściowymi elementami nowej metody pomiarowej. Jednakże wciąż nie uzyskano ostatecznej, kompleksowej i użytecznej dla wszystkich procedury. Oznacza to, że konieczne jest uzupełnienie tej luki przez zaproponowanie metody szacowania emisji zanieczyszczeń w teście RDE na podstawie wyników uzyskanych w warunkach laboratoryjnych.

4. Metodyka badań

4.1. Procedura badawcza

4.1.1. Wyznaczenie emisji spalin w teście laboratoryjnym

Obliczenia emisji spalin w teście laboratoryjnym wykonano z wykorzystaniem poniższych wzorów (4.1–4.8). Emisję drogową poszczególnych składników spalin w teście laboratoryjnym WLTC wyznacza się według wzoru:

$$b_i = \frac{v_{\text{mix}} \cdot \rho_i \cdot K_H \cdot c_i \cdot 10^{-6}}{s} \quad (4.1)$$

gdzie:

- b_i – emisja drogową substancji zanieczyszczającej [g/km],
- v_{mix} – objętość rozcieńczonych spalin sprowadzona do warunków normalnych [dm³/test],
- ρ_i – gęstość substancji zanieczyszczającej w normalnej temperaturze i ciśnieniu [g/dm³],
- K_H – współczynnik korekcyjny wilgotności masy tlenków azotu [–],
- c_i – stężenie substancji zanieczyszczającej [ppm],
- s – rzeczywista droga w czasie testu [km].

Kolejnym etapem jest obliczenie objętości gazów spalinowych dla układu z pompą waporową:

$$v = v_o \cdot n \quad (4.2)$$

gdzie:

- v – objętość spalin rozcieńczonych przed korekcją [dm³/test],
- v_o – objętość spalin przeniesionych przez pompę waporową w warunkach testu [dm³/obrót],
- n – liczba obrotów pompy podczas testu [–].

Następnie oblicza się objętość gazów spalinowych sprowadzona do warunków normalnych:

$$v_{\text{mix}} = v \cdot K_1 \cdot \frac{p_B - p_1}{T_p} \quad (4.3)$$

gdzie:

$$K_1 = \frac{273,2 \text{ K}}{101,33 \text{ kPa}} = 2,6961 \text{ (K} \cdot \text{kPa}^{-1}\text{)}$$

- p_B – ciśnienie atmosferyczne w hamowni [kPa],
- p_1 – podciśnienie na wlocie do pompy waporowej [kPa],
- T_p – średnia temperatura rozcieńczonych gazów spalinowych, wchodzących do pompy waporowej [K].

W kolejnym etapie koryguje się stężenie substancji zanieczyszczających zebranych w worku pomiarowym:

$$c_i = c_c - c_d \left(1 - \frac{1}{DF}\right) \quad (4.4)$$

gdzie:

- c_i – stężenie substancji zanieczyszczających w spalinach rozcieńczonych skorygowane o stężenie substancji zanieczyszczającej zawartej w powietrzu [ppm],
- c_c – stężenie substancji zanieczyszczającej w spalinach [ppm],
- c_d – stężenie substancji zanieczyszczającej w powietrzu [ppm],
- DF – współczynnik rozcieńczenia [–].

Współczynnik rozcieńczenia oblicza się według wzoru:

$$DF = \frac{13,4}{c_{CO_2} + (c_{HC} + c_{CO}) \cdot 10^{-4}} \quad (4.5)$$

gdzie:

- c_{CO_2} – stężenie CO_2 w rozcieńczonych gazach spalinowych zawartych w workach pomiarowych [% (v/v)],
- c_{HC} – stężenie HC w rozcieńczonych gazach spalinowych zebranych w worku pomiarowym [ppm],
- c_{CO} – stężenie CO w rozcieńczonych gazach spalinowych zebranych w worku pomiarowym [ppm].

Współczynnik K_H oblicza się według wzoru:

$$K_H = \frac{1}{1 - 0,0329(H - 10,71)} \quad (4.6)$$

gdzie:

- H – wilgotność powietrza zasysanego w gramach wody na 1 kg suchego powietrza (zawartość wilgoci) [g/kg],

$$H = \frac{6,22 \cdot \phi \cdot p_d}{p_B - p_d \cdot \phi \cdot 10^{-2}}$$

- ϕ – wilgotność względna powietrza dolotowego [%],
- p_d – ciśnienie nasycenia pary wodnej w powietrzu dolotowym [kPa],
- p_B – ciśnienie atmosferyczne [kPa].

W przypadku węglowodorów emitowanych z silnika o zapłonie samoczynnym wykorzystuje się zależność:

$$c_e = \frac{\int_{t_1}^{t_2} c_{HC} dt}{t_2 - t_1} \quad (4.7)$$

gdzie:

- $\int_{t_1}^{t_2} c_{HC} dt$ – całka z zapisu analizatora HFID w czasie testu,
- c_e – stężenie węglowodorów w rozcieńczonych gazach spalinowych [ppm].

W przypadku emisji drogowej cząstek stałych b_{PM} wykorzystuje się zależność:

$$b_{PM} = \frac{(v_{mix} + v_{ep}) \cdot m_e}{v_{ep} \cdot s} \quad (4.8)$$

gdzie:

- v_{ep} – objętość gazów spalinowych przepływających przez filtry pomiarowe w warunkach normalnych [dm^3],
- m_e – masa cząstek stałych zebranych na filtrze [g].

4.1.2. Wyznaczenie parametrów dynamicznych w testach drogowych

Wyznaczenie parametrów dynamicznych przejazdu wymaga określenia dwóch wartości:

- względnego przyspieszenia dodatniego (wyrażanego w m/s^2) dla fazy miejskiej, pozamiejskiej i autostradowej,
- 95. centyla iloczynu prędkości pojazdu i przyspieszenia dodatniego większego niż $0,1 m/s^2$ (wyrażanego w m^2/s^3).

Względne przyspieszenie dodatnie (RPA – *relative positive acceleration*) dla każdej fazy testu oblicza się według wzoru:

$$RPA_k = \frac{\sum_{j=1}^{N_k} \Delta t \cdot a_{+,j,k}}{\sum_{j=1}^L d_{i,k}} \quad (4.9)$$

gdzie:

RPA_k – względne przyspieszenie dodatnie dla fazy miejskiej, pozamiejskiej i autostradowej [m/s^2],

Δt – różnica czasu równa 1 s,

N_k – liczba próbek dla fazy miejskiej, pozamiejskiej i autostradowej z przyspieszeniem dodatnim,

L – łączna liczba próbek dla fazy miejskiej, pozamiejskiej i autostradowej.

Weryfikacja ważności przejazdu odbywa się dla każdej fazy (miejskiej, pozamiejskiej i autostradowej). Jeżeli wartość $(v \cdot a_+)_{k,[95]}$ spełnia równanie dla każdej fazy testu:

$$(v \cdot a_+)_{k,[95]} < 0,136 \cdot \bar{v}_k + 14,4 \quad \text{dla } \bar{v}_k \leq 74,6 \text{ km/h} \quad (4.10)$$

$$(v \cdot a_+)_{k,[95]} < 0,0742 \cdot \bar{v}_k + 18,966 \quad \text{dla } \bar{v}_k > 74,6 \text{ km/h} \quad (4.11)$$

to przejazd jest ważny.

Jeżeli wartość RPA_k spełnia równanie dla każdej części testu:

$$RPA > -0,0016 \cdot \bar{v}_k + 0,1755 \quad \text{dla } \bar{v}_k \leq 94,05 \text{ km/h} \quad (4.12)$$

$$RPA > 0,025 \quad \text{dla } \bar{v}_k > 94,05 \text{ km/h} \quad (4.13)$$

to przejazd jest ważny.

Wartość 95. centyla iloczynu $(v \cdot a_+)$ – zapisywanego jako $(v \cdot a_+)_{k,[95]}$ – wyznacza się w następujący sposób: wartości iloczynów $(v \cdot a_+)_{i,k}$ w każdej fazie testu (k oznacza fazę miejską, pozamiejską i autostradową) szereguje się w porządku rosnącym dla wszystkich zbiorów danych o $a_{i,k} \geq 0,1 m/s^2$ (liczba ich zbiorów danych musi być większa niż 150) i określa się łączną liczbę uzyskanych próbek N_k . Na kolejnym etapie przypisuje się wartości centyla do wartości iloczynu $(v \cdot a_+)_{i,k}$: najmniejsza wartość iloczynu $(v \cdot a_+)$ otrzymuje centyl $1/N_k$, druga najmniejsza – $2/N_k$, trzecia najniższa – $3/N_k$, a wartość największa – $N_k/N_k = 100\%$.

Wartość $(v \cdot a_+)_{k,[95]}$ to wartość $(v \cdot a_+)_{i,k}$, dla której $j/N_k = 95\%$ (j – kolejna wartość iloczynu prędkości i dodatniego przyspieszenia). Jeżeli nie można osiągnąć $j/N_k = 95\%$, to $(v \cdot a_+)_{k,[95]}$ oblicza się z wykorzystaniem interpolacji liniowej kolejnych próbek j oraz $(j + 1)$, dla których $j/N_k < 95\%$ oraz $(j + 1)/N_k > 95\%$.

4.1.3. Wyznaczenie emisji drogowej zanieczyszczeń w warunkach ruchu drogowego

Pomiarów natężenia emisji zanieczyszczeń dokonano według poniżej przedstawionego algorytmu, z zastrzeżeniem jego modyfikacji, która polegała na wprowadzeniu do niego elementów pozwalających na wykorzystanie w badaniach dwuwymiarowych charakterystyk we współrzędnych odnoszących się parametrów dynamicznych pojazdu.

Masowe natężenie przepływu spalin wilgotnych G_s [g/s] oblicza się według wzoru:

$$G_s = G_p + G_e \quad (4.14)$$

gdzie:

G_p – masowe natężenie przepływu powietrza wilgotnego [g/s],

G_e – masowe natężenie zużycia paliwa [g/s].

Natężenie emisji poszczególnych zanieczyszczeń gazowych oblicza się w g/s na podstawie zależności:

$$E_{CO} = 0,000966 \cdot c_{CO} \cdot G_s \cdot \beta \quad (4.15)$$

$$E_{NO_x} = 0,001587 \cdot c_{NO_x} \cdot G_s \cdot \beta \cdot K_H \quad (4.16)$$

$$E_{HC} = 0,000479 \cdot c_{HC} \cdot G_s \quad (4.17)$$

gdzie:

c_{CO} , c_{NO_x} , c_{HC} – stężenie CO, NO_x i HC w spalinach [ppm],

K_H – współczynnik korekcyjny wilgotności NO_x [-],

β – współczynnik korekcyjny stężenia CO i NO_x w spalinach suchych [-].

Współczynnik K_H oblicza się według wzoru:

$$K_H = \frac{1}{1+A(H-10,71)+B(T_{ZS}-298)} \quad (4.18)$$

gdzie:

$$A = 0,309 \frac{G_e}{G_p} - 0,0266$$

$$B = -0,209 \frac{G_e}{G_p} + 0,00954$$

T_{ZS} – temperatura zasysanego powietrza [K],

H – wilgotność powietrza zasysanego w gramach wody na 1 kg suchego powietrza (zawartość wilgoci) [g/kg].

Wilgotność bezwzględną powietrza oblicza się z zależności:

$$H = \frac{6,22 \cdot \phi \cdot p}{p_a - \phi \cdot 10^{-2}} \quad (4.19)$$

gdzie:

ϕ_i – wilgotność względna powietrza dolotowego [%],

p_a – ciśnienie atmosferyczne [Pa],

p – ciśnienie nasycenia pary wodnej w powietrzu dolotowym [Pa].

Współczynnik β oblicza się według wzoru:

$$\beta = \left(1 - 1,865 \frac{G_e}{G_p} \right) \quad (4.20)$$

Emisję drogową zanieczyszczeń b_j wyrażoną w g/km obliczono z zależności:

$$b_{\text{CO,HC,NOx}} = \frac{E_{\text{CO,HC,NOx}}}{V} \quad (4.21)$$

gdzie:

v – prędkość pojazdu [m/s].

Dwuwymiarowa charakterystyka udziału czasu pracy została wykorzystana do określenia natężenia emisji zanieczyszczeń w poszczególnych zakresach pracy pojazdu. Charakterystyka ta zastępuje cały cykl drogowy punktami pomiarowymi, co umożliwia wyznaczenie natężenia emisji związków szkodliwych.

W pierwszym etapie wyznacza się dwa synchroniczne przebiegi:

$$v = v(t) \quad i \quad a = a(t) \quad \text{dla } t \in (0, t_t) \quad (4.22)$$

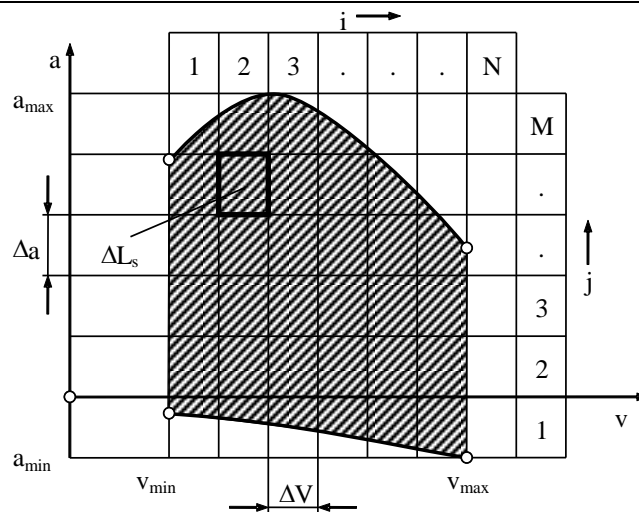
gdzie:

t_t – czas trwania testu lub pomiarów.

Pole pracy pojazdu w układzie v - a dzieli się na prostokątne elementy o wymiarach (rys. 4.1):

$$\Delta v = \frac{v_{\text{max}} - v_{\text{min}}}{N} \quad (4.23)$$

$$\Delta a = \frac{a_{\text{max}} - a_{\text{min}}}{M} \quad (4.24)$$



Rys. 4.1. Podział pola pracy pojazdu na elementy [63]

Dla elementu o numerach (i, j) dwuwymiarowa charakterystyka udziału czasu pracy pojazdu (u) zdefiniowano w następujący sposób:

$$u_{(i,j)} = \frac{t_{(i,j)}}{t_t} \quad (4.25)$$

gdzie

$t_{(i,j)}$ – czas pracy pojazdu, w którym parametry (V, a) należą do pola ΔL_s oznaczonego numerami i, j (rys. 4.1).

Spełnione muszą być przy tym związki:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M t_{(i,j)} = t_t \quad (4.26)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M u_{(i,j)} = 1 \quad (4.27)$$

Rozpatrywana dwuwymiarowa charakterystyka wiąże właściwości pojazdu ze sposobem jego eksploatacji. Prawdopodobieństwo pracy pojazdu w elemencie pola $\Delta L_{s(i,j)}$ wyznacza zależność:

$$f_{(i,j)} = P\{(V, a) \in \Delta L_{s(i,j)}\} = \int_{L_{s(i,j)}} f(V, a) dV da \quad (4.28)$$

Związek między prawdopodobieństwem pracy silnika w elemencie $\Delta L_{s(i,j)}$ a gęstością realizacji procesu losowego jest następujący:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} u_{(i,j)} = f_{(i,j)} \quad (4.29)$$

co dla dostatecznie dużych wartości czasu:

$$u_{(i,j)} \approx f_{(i,j)} \quad (4.30)$$

Charakterystyczną wielkością danego elementu pola pracy pojazdu jest jego środek, który na potrzeby niniejszego zagadnienia wyznaczano jako średnią arytmetyczną początku i końca przedziału danego zakresu prędkości i przyspieszenia pojazdu.

W polu pracy pojazdu każdemu punktowi (V, a) przyporządkować można zbiór wybranych parametrów jazdy pojazdu. Przypisując te parametry współrzędnym środka elementu pola pracy w elemencie (i, j) , otrzymuje się macierze, np. natężenia emisji danego związku szkodliwego $E_{k(i,j)}$. Na tej podstawie dla danego sposobu eksploatacji pojazdu można wyznaczyć np. zużycie paliwa (wzór 4.31), masę (wzór 4.32) i emisję drogową poszczególnych zanieczyszczeń (wzór 4.33):

$$G_e = t_t \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M u_{(i,j)} G_{e(i,j)} \quad (4.31)$$

$$m_k = t_t \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M u_{(i,j)} E_{k(i,j)} \quad (4.32)$$

$$b_k = \frac{t_t}{S} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M u_{(i,j)} E_{k(i,j)} \quad (4.33)$$




4.2. Obiekty badań

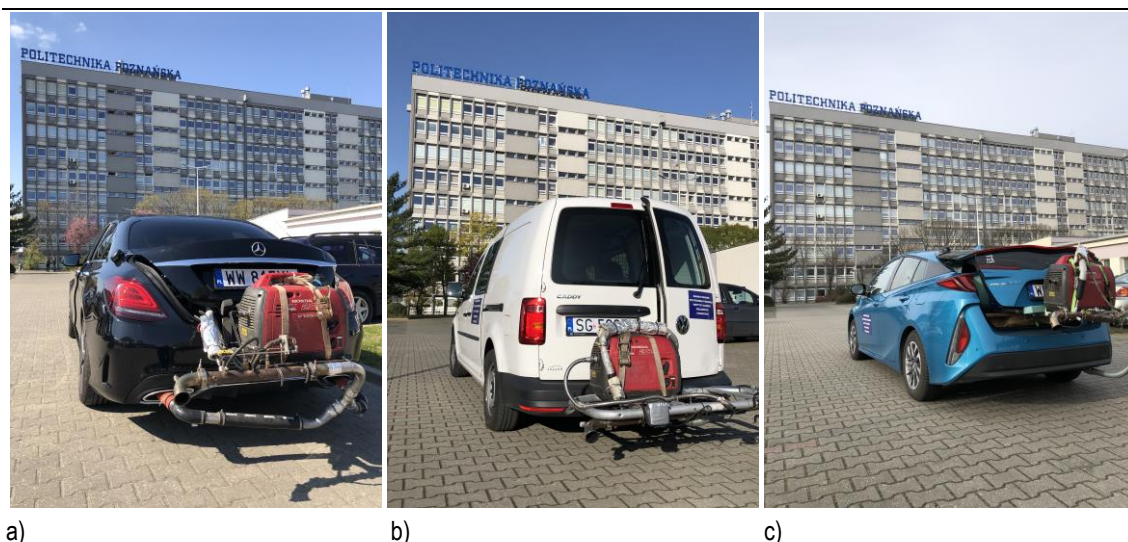
Na potrzeby realizacji badań do powyższej rozprawy doktorskiej wykorzystano trzy pojazdy (samochody osobowe) o różnych technicznych rozwiązaniach układów zasilania i napędów:

- pojazd konwencjonalny wyposażony w silnik o zapłonie iskrowym z bezpośrednim wtryskiem benzyny o objętości skokowej $1,6 \text{ dm}^3$,
- pojazd konwencjonalny wyposażony w silnik o zapłonie samoczynnym z bezpośrednim wtryskiem oleju napędowego typu *common rail*, doładowany turbosprężarką, o objętości skokowej $2,0 \text{ dm}^3$,
- pojazd hybrydowy – wyposażony w dwa silniki: silnik spalinowy o zapłonie iskrowym z bezpośrednim wtryskiem benzyny o objętości skokowej $1,8 \text{ dm}^3$ oraz silnik elektryczny.

Szczegółowe charakterystyki badanych pojazdów przedstawiono w tabelicy 4.1. Cechą wspólną wybranych pojazdów (rys. 4.2) była klasa pojazdów – pojazdy kategorii M1 (samochody osobowe), o zbliżonej masie własnej (przedział 1350–1584 kg) oraz zbliżonej mocy maksymalnej silnika spalinowego (73–81 kW) i tej samej klasie emisyjnej (Euro 6d). Przebiegi pojazdów były zbliżone (około 30 000 km), a eksploatacja odbywała w większości w terenie miejskim.

Tablica 4.1. Charakterystyka jednostek napędowych badanych obiektów

Parametry obiektów	Jednostka	Pojazd z silnikiem ZI	Pojazd z silnikiem ZS	Pojazd hybrydowy
Rodzaj silnika/zasilania	–	ZI/DI	ZS doładowany turbosprężarką/DI	ZI/DI+ silnik elektryczny
Pojemność silnika	dm ³	1,6	2,0	1,8
Liczba cylindrów/zaworów	–	R4/16	R4/8	R4/16
Moc maksymalna	kW/(obr/min)	81/5500	75/2750	73/5200 – silnik spalinowy, 100 – moc układu hybrydowego
Moment obrotowy	N·m/(obr/min)	152/4500	280/1500	142/4000
Objętościowy wskaźnik mocy	kW/dm ³	50,6	37,5	55,5
Masa własna pojazdu	kg	1349	1584	1415
Norma spalin	–	Euro 6	Euro 6	Euro 6
Rodzaj napędu	–	na przednią oś	na przednią oś	na przednią oś
Oznaczenie stosowane w pracy				



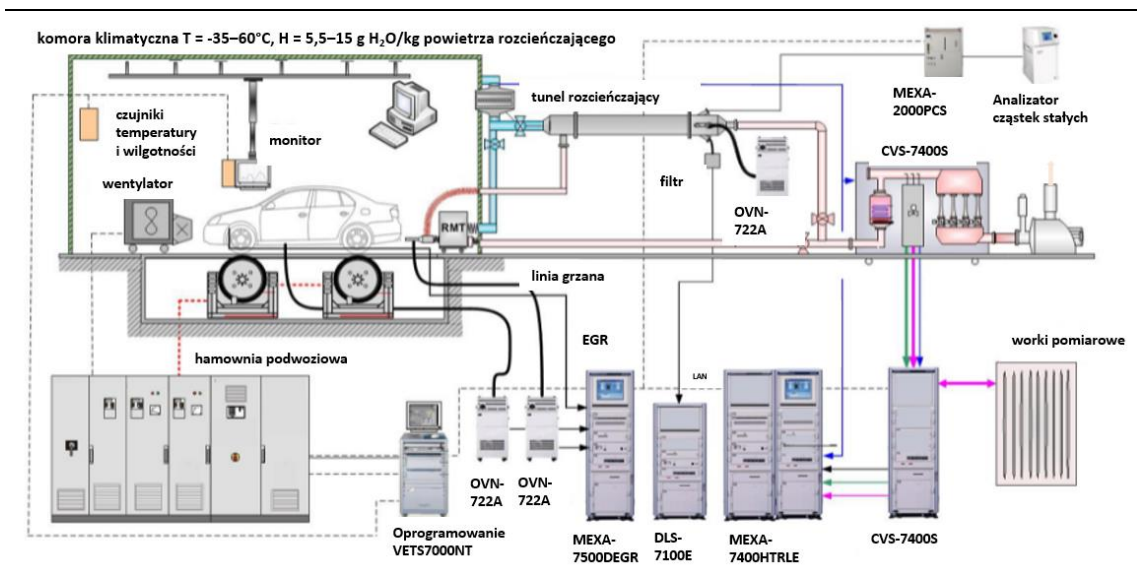
Rys. 4.2. Pojazdy wykorzystane do badań: a) pojazd zasilany silnikiem ZI, b) pojazd zasilany silnikiem ZS, c) pojazd hybrydowy

4.3. Narzędzia badawcze

4.3.1. Hamownia podwoziowa

Badania zrealizowano na hamowni podwoziowej znajdującej się w Instytucie Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o. w Bielsku-Białej. Wszystkie pomiary emisji spalin z obiektów badawczych przeprowadzono zgodnie z wymogami testu WLTC, obowiązującymi w Europie. W tym celu wykorzystano laboratorium wyposażone

w komorę klimatyczną (rys. 4.3), dzięki której możliwe było osiągnięcie temperatury powietrza w zakresie od -35 do 60°C (z dokładnością $\pm 1,2^{\circ}\text{C}$). Wilgotność bezwzględna podczas pomiaru emisji spalin była monitorowana w zakresie od 5,5 do 15,0 g wody na 1 kg suchego powietrza (dla wartości temperatury między 20 i 35°C).



Rys. 4.3. Schemat stanowiska pomiarowego podczas testu WLTC [64]

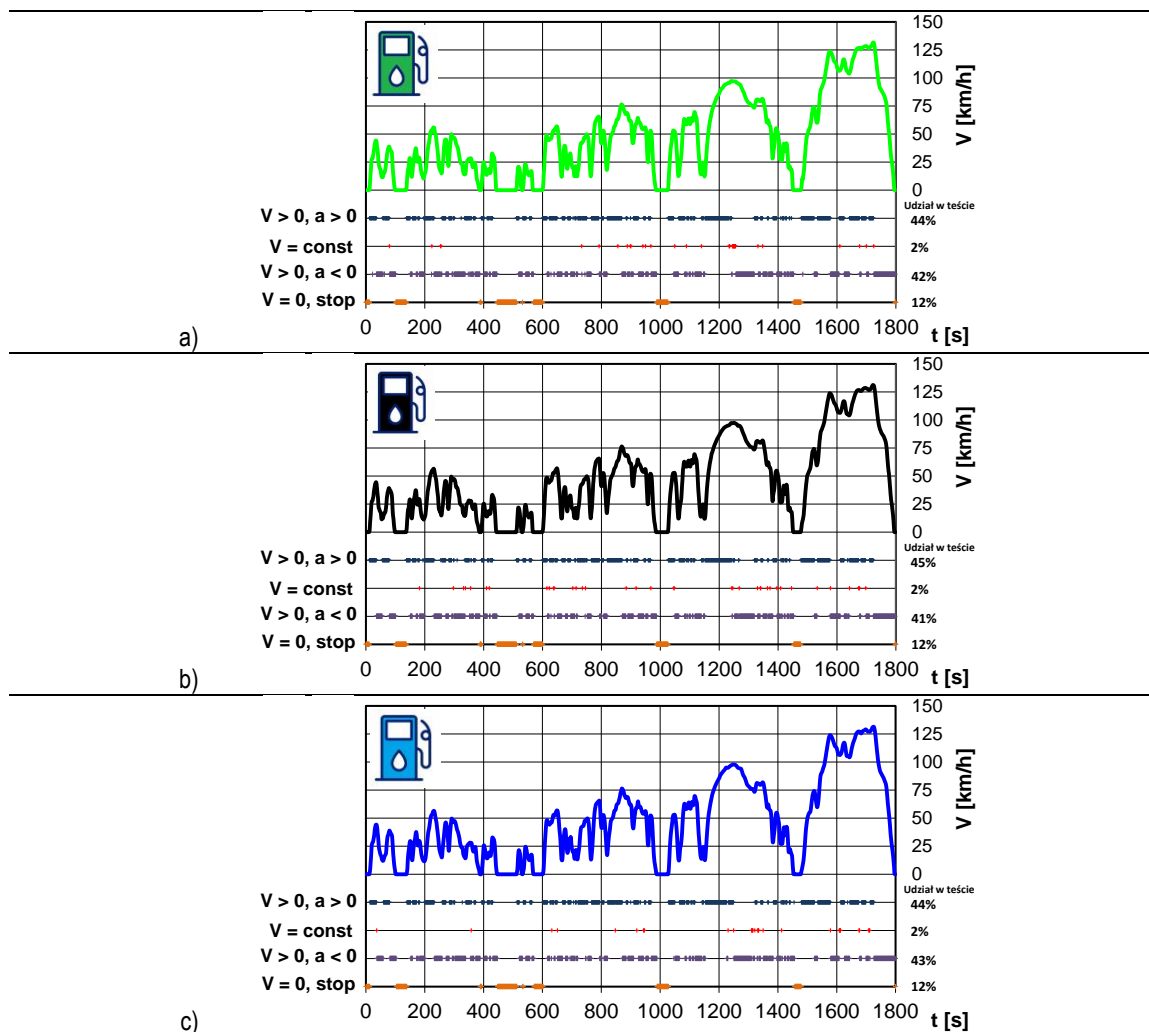
Zastosowane oprogramowanie umożliwiło wykonanie zdefiniowanych przez użytkownika zautomatyzowanych działań jeszcze przed rozpoczęciem testu badawczego.

Podczas badań wykorzystano hamownię podwoziową AVL 4WD, która jest zaprojektowana do badań samochodów osobowych zarówno z przednim, jak i tylnym napędem. Przed hamownią podwoziową ustawiono wentylator z silnikiem o mocy 31,4 kW, który symulował przepływ powietrza od 0 do 125 km/h (proporcjonalnie do prędkości jazdy samochodu na hamowni podwoziowej).

Laboratorium było wyposażone w zestaw badawczy do poboru i analizy spalin firmy HORIBA, składający się z systemu poboru spalin (CVS – *constant volume sample*) wraz z tunelem rozcieńczającym, zestawu analizatorów spalin firmy HORIBA MEXA. Tunel rozcieńczający był zakończony systemem do pomiaru cząstek stałych (ich liczby). Pracą analizatorów podczas testów i analizy stężenia składników spalin sterowano oprogramowaniem VETS7000NT, które wykonywało, m.in. kalibrację i przepłukiwanie analizatorów. Wspomniany system automatycznie przekazywał do monitora kierowcy przebieg cyklu jezdowego testu WLTC. System monitorował także warunki otoczenia (temperaturę, ciśnienie, wilgotność) oraz stężenie węglowodorów, metanu, tlenku węgla i tlenu w komorze.

Do zliczania cząstek stałych w spalinach rozcieńczonych wykorzystano licznik 2000-SPCS firmy HORIBA, który na bieżąco rejestrował liczbę cząstek stałych. Umożliwiło to ocenę skuteczności działania układów oczyszczania spalin w zadanym punkcie pracy silnika podczas wybranego cyklu jezdowego.

Przebiegi prędkości w teście WLTC dla każdego badanego pojazdu pokazano na rys. 4.4 wraz z charakterystyką najważniejszych parametrów. Porównując dane na rys. 4.4, należy zaznaczyć, że zmieniają się one w dość wąskim zakresie, co wynika z wymogów homologacyjnych. Niewielkie zmiany są następstwem innych mas pojazdów, co wiąże się z przyjęciem innych parametrów inercyjnych hamowni podwoziowej. Szczegółowa charakterystyka testów WLTC i wyników badań dla rozpatrywanych pojazdów została przedstawiona w Załączniku (tablice Z1–Z3).



Rys. 4.4. Przebiegi prędkości dla poszczególnych testów WLTC: a) pojazdu konwencjonalnego zasilanego benzyną, b) olejem napędowym, c) pojazdy hybrydowego

4.3.2. Aparatura pomiarowa do badań drogowych

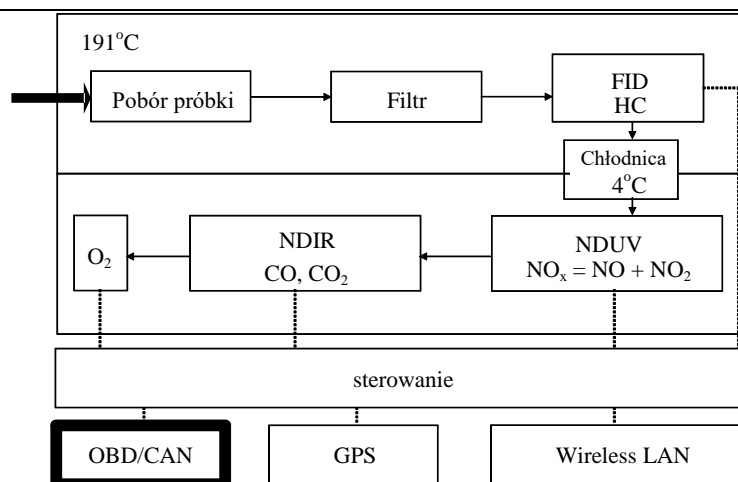
Do pomiarów stężenia związków szkodliwych w spalinach oraz masowego natężenia przepływu spalin (CO , HC , NO_x i CO_2) wykorzystano mobilny analizator Semtech DS firmy Sensors. W tabelicy 4.2 przedstawiono jego charakterystykę wraz z odczytem systemu transmisji danych w pojeździe.

Na rysunku 4.5 przedstawiono schemat działania układu pomiarowego. Analizator Semtech SD składa się z kilku autonomicznych modułów pomiarowych:

- analizatora płomieniowo-jonizacyjnego (FID – *flame ionization detector*) stosowanego do oznaczania w spalinach sumarycznego stężenia węglowodorów określanych jako HC lub THC (*total hydrocarbons*),
- analizatora niedispersyjnego na promieniowanie ultrafioletowe (NDUV – *non-dispersive ultraviolet*), przeznaczonego do stężenia pomiaru tlenku azotu oraz dwutlenku azotu,
- analizatora niedispersyjnego na promieniowanie podczerwone (NIDR – *non-dispersive infrared*), przeznaczonego do pomiaru stężenia tlenku węgla oraz dwutlenku węgla,
- analizatora paramagnetycznego (PMD – *paramagnetic detector*) do określania stężenia tlenu w spalinach.

Tablica 4.2. Charakterystyka analizatora Semtech DS z odczytem systemu transmisji danych w pojeździe [63]

Parametr	Metoda pomiaru	Dokładność
Stężenie związków w spalinach		
CO	NDIR, zakres pomiarowy 0–10%	±3% zakresu pomiaru
HC	FID, zakres 0–10 000 ppm	±2,5% zakresu pomiaru
NO _x = NO + NO ₂	NDUV, zakres 0–3000 ppm	±3% zakresu pomiaru
CO ₂	NDIR, zakres 0–20%	±3% zakresu pomiaru
O ₂	elektrochemiczna, zakres 0–20%	±1% zakresu pomiaru
Przepływ spalin	masowe natężenie przepływu	±2,5% zakresu pomiaru
Czas nagrzewania	900 s	
Czas odpowiedzi	T ₉₀ < 1 s	
Obsługiwane systemy diagnostyczne	OBD: ISO, CAN, VPW, PWM	

**Rys. 4.5.** Schemat mobilnego analizatora Semtech z zaznaczonymi układami dodatkowymi [63]

Gazy spalinowe wprowadzane są do analizatora za pomocą sondy pomiarowej utrzymującej temperaturę 191°C, gdzie następuje ich odfiltrowanie z cząstek stałych. W kolejnym kroku dokonywany jest pomiar stężenia węglowodorów w analizatorze płomieniowo-jonizacyjnym. Następnie spaliny schładzane są do temperatury 4°C, dokonywany jest pomiar stężenia tlenków azotu (metodą niedispersyjną z wykorzystaniem promieniowania ultrafioletowego, umożliwiając jednoczesny pomiar stężenia: tlenku azotu i dwutlenku azotu), tlenku węgla, dwutlenku węgla (metodą niedispersyjną z wykorzystaniem promieniowania podczerwonego) oraz tlenu (analizatorem elektrochemicznym).

Pomiar natężenia przepływu spalin był realizowany z wykorzystaniem sond pomiarowych 2" oraz 2,5" [63]. Ze względu na warunki drogowe konieczne jest zamocowanie sondy w taki sposób, aby zapewnić szczelność z układem wylotowym pojazdu.

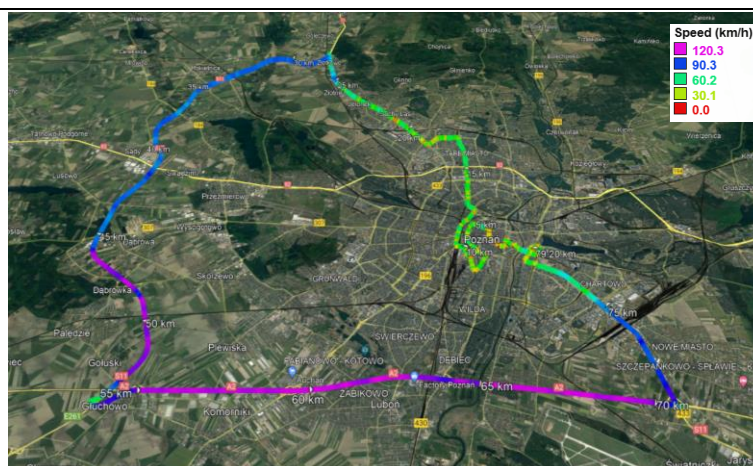
Do pomiaru średnic cząstek wykorzystano analizator TSI Incorporated – EEPS 3090 (*Engine Exhaust Particle Sizer™ Spectrometer*). Pozwalał on na pomiar cząstek stałych w zakresie średnic od 5,6 nm do 560 nm. Dane techniczne analizatora TSI 3090 EEPS przedstawiono w tablicy 4.3.

Tablica 4.3. Dane techniczne analizatora EEPS rozkładu cząstek stałych [63]

Parametr	Wartość
Rozmiar mierzonych cząstek	5,6–560 nm
Liczba kanałów pomiarowych	16 kanałów na dekadę (32 całkowicie)
Liczba kanałów elektrod	22
Rozdzielczość	10 rozmiarów kanałów/s
Przepływ próbki spalin	10 dm ³ /min
Przyływ sprężonego powietrza	40 dm ³ /min
Temperatura próbki wejściowej	10–52 °C
Temperatura pracy urządzenia	0–40 °C

4.3.3. Trasa badawcza – testy drogowe

Trasa badawcza została dobrana w taki sposób, aby spełniała wymagania Komisji Europejskiej scharakteryzowane w rozporządzeniach [14–29], ze szczególnym uwzględnieniem jej topografii. Wszystkie pojazdy wykorzystane w testach drogowych RDE pokonały tę samą trasę. Przebieg zastosowanej trasy badawczej zawierał następujące elementy (rys. 4.6).

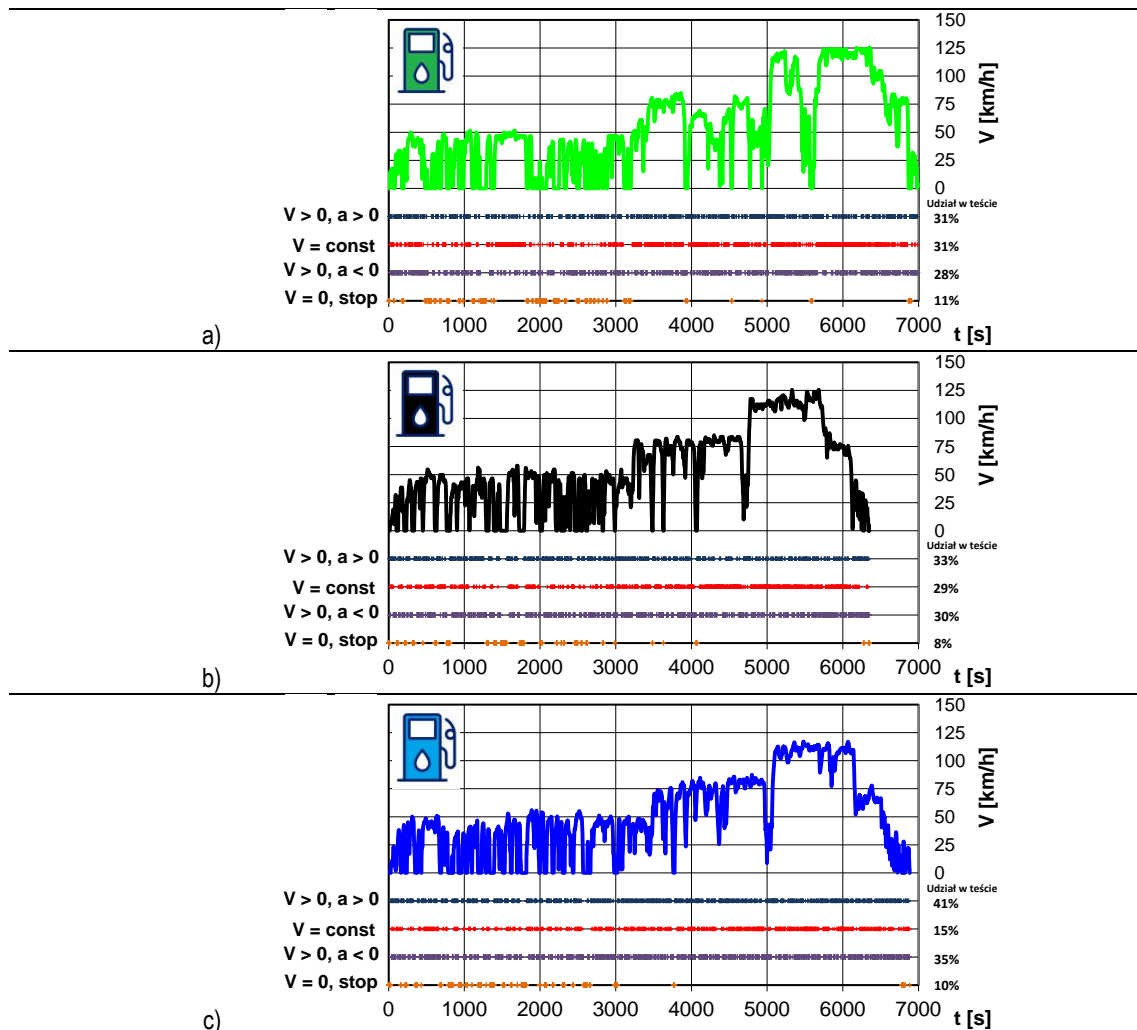
**Rys. 4.6.** Schemat trasy wykorzystanej podczas wykonywanie testów drogowych

Początek i koniec każdego przejazdu stanowił teren Politechniki Poznańskiej przy ulicy Piotrowo 3. Trasa badawcza składała się z części miejskiej (przebiegającej ulicami Poznania), części pozamiejskiej (przebiegającej od Poznania przez Suchy Las i drogę ekspresową S11) oraz części autostradowej (przebiegającej częściowo przez drogę S11 oraz autostradę A2); przebieg prędkości dla każdego pojazdu pokazano na rys. 4.7, zmianę wysokości trasy na rys. 4.8, a charakterystykę przejazdu dla każdego pojazdu podano w tablicy 4.4.

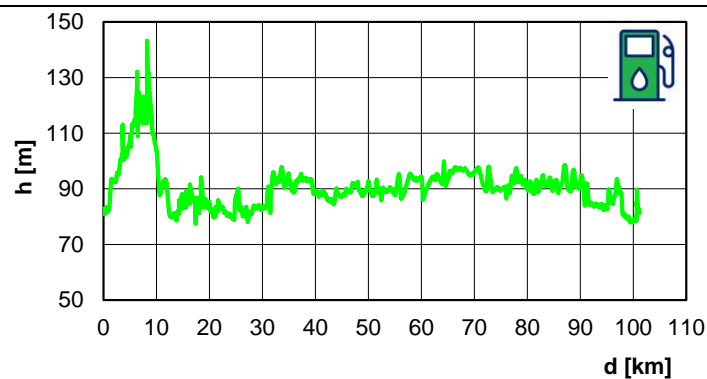
Zmiana wysokości trasy w teście RDE została pokazana dla jednego pojazdu, gdyż wszystkie testy odbyły się na tej samej trasie, w związku z tym charakterystyka wysokościowa byłaby taka sama (jako funkcja drogi).

W ramach badań drogowych mierzono stężenie tlenku i dwutlenku węgla, tlenków azotu oraz liczbę cząstek stałych. W celu dokładnej analizy uzyskanych wyników badań, podczas przejazdów rejestrowano dane lokalizacyjne z systemu GPS oraz chwilo-

we dane określające stan pojazdu na podstawie sygnału z systemu diagnostycznego pojazdu. Dokładne dane dotyczące przejazdów wraz z parametrami ruchu oraz pozostałymi wartościami zamieszczono w Załączniku (tablice Z4–Z6).



Rys. 4.7. Przebiegi prędkości dla poszczególnych testów RDE: a) pojazdu konwencjonalnego zasilanego benzyną, b) olejem napędowym, c) pojazdy hybrydowego



Rys. 4.8. Zmiana wysokości trasy badawczej

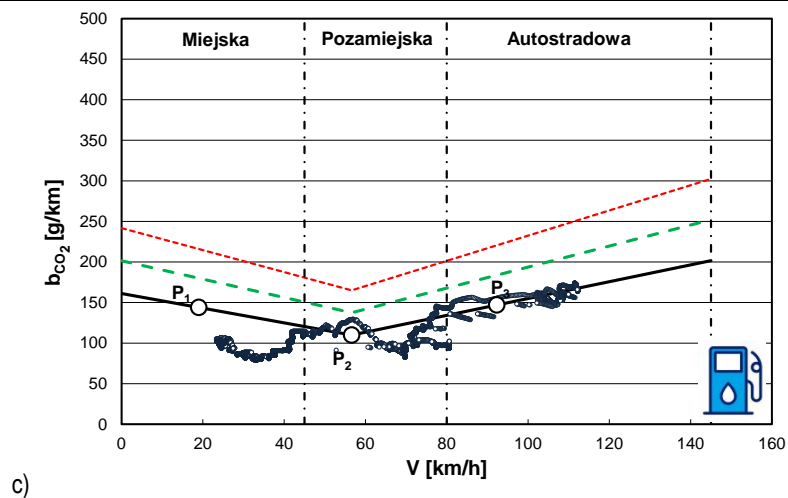
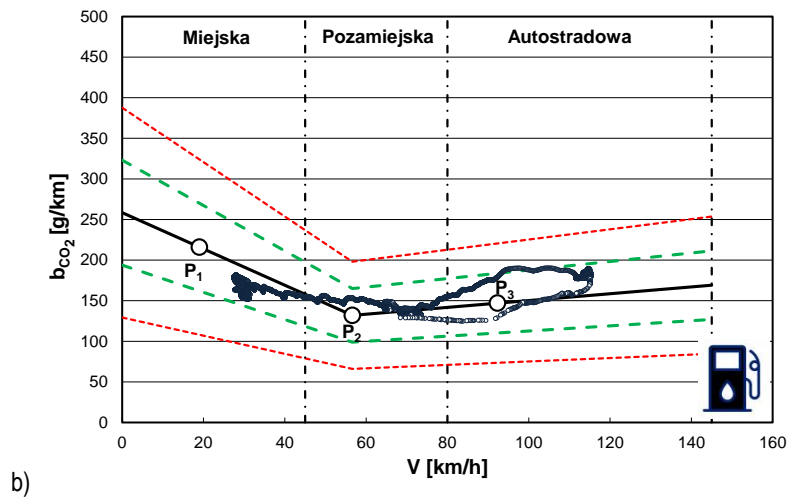
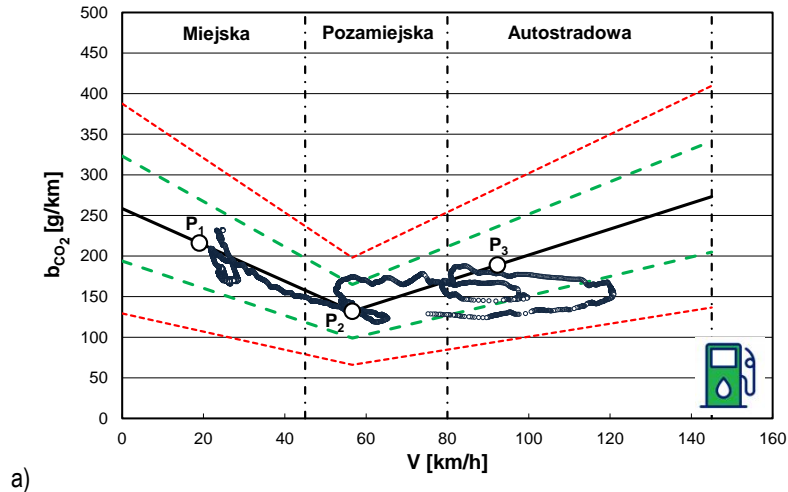
Pomimo widocznych różnic w czasie trwania testu i niewielkich różnic w prędkości (rys. 4.7), wszystkie testy były poprawne pod względem parametrów statycznych. Przedstawiona charakterystyka poszczególnych testów (tabl. 4.4), w szczególności nie-

wielkie różnice między parametrami dla poszczególnych pojazdów potwierdzają, że testy zostały wykonane poprawnie. Uwzględniając poprawność wykonania testów drogowych, możliwa była dalsza analiza ekologiczna na podstawie uzyskanych danych w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego.

Tablica 4.4. Charakterystyka trasy RDE wykorzystywanej podczas badań emisyjnych pojazdów

Parametr	Wymagania RDE	Pojazd z silnikiem ZI	Pojazd z silnikiem ZS	Pojazd hybrydowy
Dystans testu		101,1 km	96,1 km	97,93 km
Faza miejska	min. 16 km	33,7 km	31,7 km	35,3 km
Faza pozamiejska	min. 16 km	29,7 km	33,2 km	31,1 km
Faza autostradowa	min. 16 km	37,7 km	31,2 km	31,5 km
Udział fazy miejskiej	29–44%	33,4%	33,0%	36,0%
Udział fazy pozamiejskiej	23–43%	29,4%	34,5%	31,8%
Udział fazy autostradowej	23–43%	37,3%	32,5%	32,2%
Czas testu	90–120 min	116,5 min	105,9 min	114,7 min
Faza miejska		72,8 min	63,2 min	72,1 min
Faza pozamiejska		24,0 min	26,2 min	25,2 min
Faza autostradowa		19,7 min	16,5 min	17,5 min
Udział postoju w teście		11,3%	8,19%	9,5%
Faza miejska	6–30%	18,0%	13,7%	15,1%
Faza pozamiejska		0,0%	0,0%	0,0%
Faza autostradowa		0,0%	0,0%	0,0%
Średnia prędkość w teście		52,1 km/h	54,5 km/h	51,2 km/h
Faza miejska		27,8 km/h	30,1 km/h	29,4 km/h
Faza pozamiejska		74,3 km/h	76,0 km/h	74,2 km/h
Faza autostradowa		115,0 km/h	113,4 km/h	108,3 km/h
Przyspieszanie w teście		30,6%	32,7%	40,7%
Faza miejska		31,9%	37,9%	39,9%
Faza pozamiejska		29,7%	24,8%	42,7%
Faza autostradowa		27,3%	25,6%	41,0%
Zwalnianie w teście		27,6%	30,3%	34,8%
Faza miejska		28,6%	32,4%	34,9%
Faza pozamiejska		26,7%	27,2%	36,1%
Faza autostradowa		25,4%	27,5%	32,3%
Prędkość stała w teście		31,0%	29,2%	15,4%
Faza miejska		22,4%	16,7%	10,7%
Faza pozamiejska		43,7%	48,1%	21,3%
Faza autostradowa		47,3%	47,0%	26,6%

Porównywanie danych dla badanych pojazdów było możliwe dzięki temu, że emisja drogowa dwutlenku węgla znajdowała się na krzywej charakterystycznej dla każdego pojazdu między wartościami $\pm 50\%$ (linia czerwona na rys. 4.9) od wartości wyznaczonej przez punkty P_1 , P_2 i P_3 . Punkty te odpowiadają wartościom emisji drogowej CO_2 w poszczególnych częściach testu WLTC. W związku z tym, że prawie wszystkie dane zawierały się między wartościami $\pm 25\%$ (linie zielone) można przyjąć, że analiza wartości w oknach pomiarowych oraz z charakterystyk dwuwymiarowych będzie tożsama.

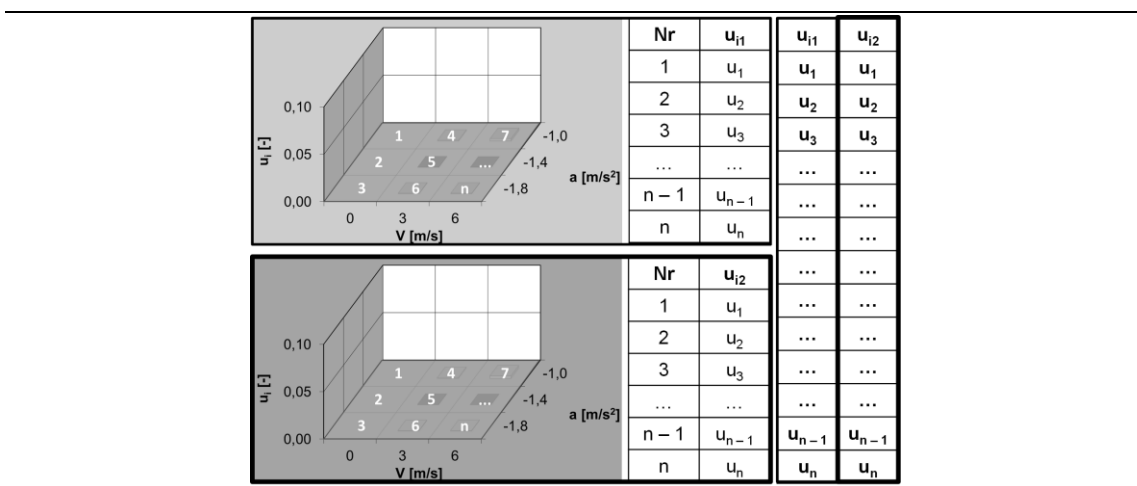


Rys. 4.9. Krzywe charakterystyczne emisji drogowej dwutlenku węgla dla badanych pojazdów: a) z silnikiem o zapłonie iskrowym, b) z silnikiem o zapłonie samoczynnym, c) z napędem hybrydowym

4.3.4. Metody porównania danych wykorzystane w pracy

Możliwość porównania wyników emisji drogowej spalin w testach drogowych jest słuszna jedynie w przypadku podobieństwa przejazdów podczas wykonywania prób drogowych. Jednak testy drogowe charakteryzują się dużą niepowtarzalnością warunków panujących na drodze. Definicja poprawności wykonywania testów drogowych, opisana parametrami dynamicznymi (względny przyspieszeniem dodatnim lub iloczynem prędkości i dodatniego przyspieszenia) może być niewystarczająca do potwierdzenia porównywalności wyników uzyskanych w testach drogowych.

Kilkukrotne wykonanie testów na tej samej trasie pomiarowej charakteryzuje się różnymi warunkami pracy pojazdu, a także różnymi warunkami pracy silnika. Porównanie warunków pracy pojazdu (lub silnika) można wykonać na podstawie dwuwymiarowych charakterystyk pracy pojazdu. W tym celu na porównywanych charakterystykach dwuwymiarowych numeruje się poszczególne zakresy prędkości pojazdu i przyspieszenia (rys. 4.9).



Rys. 4.9. Numeracja poszczególnych zakresów prędkości i przyspieszenia na porównywanych charakterystykach dwuwymiarowych

Ponumerowane poszczególne zakresy prędkości pojazdu i jego przyspieszenia dla danego przejazdu porównuje się z tymi samymi przedziałami (numerami pól) z przejazdu porównywanego. W ten sposób uzyskuje się dwie kolumny danych, które posłużą do wyznaczenia równania regresji ($y = ax + b$), w którym współczynnik determinacji (R^2) jest miarą, na podstawie której można porównać przejazdy. Porównywane dane są podobne, jeżeli współczynnik kierunkowy prostej (a) jest bliski wartości 1 oraz wartość wyrazu wolnego (b) jest bliska wartości 0.

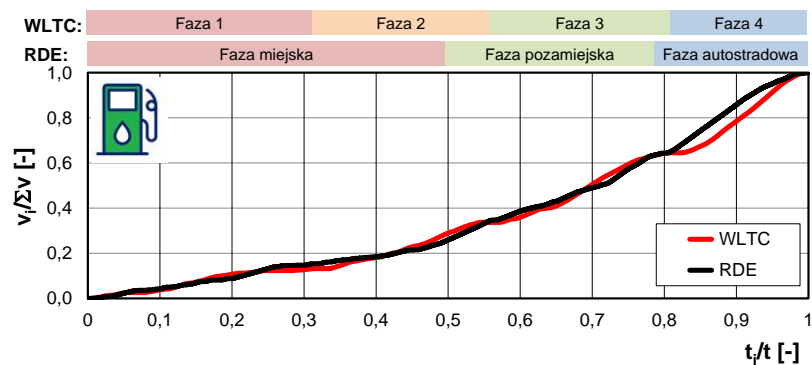
Rozpatrywane w pracy testy emisyjne – zarówno wykonywane na hamowni podwoziowej oraz w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego – nie są spójne pod względem ich podziału funkcjonalnego. Test homologacyjny wykonywany na hamowni podwoziowej jest podzielony na cztery części:

- faza 1 (czas 0–589 s), w której pojazd porusza się ze zróżnicowaną prędkością w zakresie 0–55 km/h,
- faza 2 (czas 590–1022 s), w której pojazd porusza się z prędkością w zakresie 0–76 km/h,
- faza 3 (czas 1023–1477 s), w której pojazd porusza się z prędkością w zakresie 0–98 km/h,
- faza 4 (czas 1478–1800 s), w której pojazd porusza się z chwilowo maksymalną prędkością wynoszącą około 130 km/h.

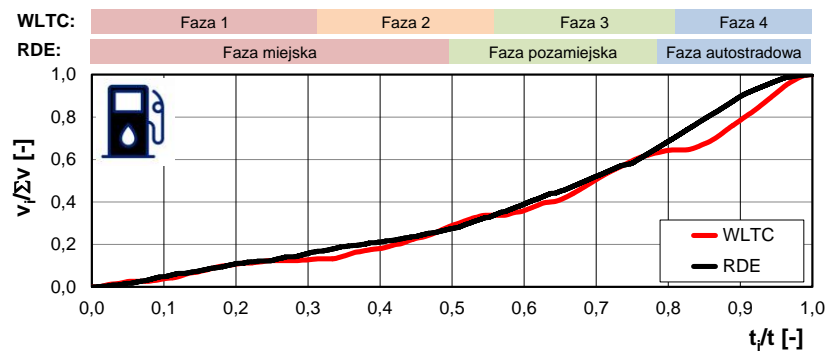
Test drogowy według procedury RDE wykonywany w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego składa się z natomiast z trzech faz:

- faza miejska, w której pojazd porusza się ze zróżnicowaną prędkością w zakresie 0–60 km/h,
- faza pozamiejska, w której pojazd porusza się z prędkością w zakresie od 60 km/h do 90 km/h,
- faza autostradowa, w której pojazd porusza się z prędkością większą od 90 km/h, przy czym możliwe są sytuacje, w których pojazd porusza się chwilowo z mniejszą prędkością (np. z uwagi na warunki ruchu, sygnalizację świetlną lub punkty poboru opłat na autostradzie).

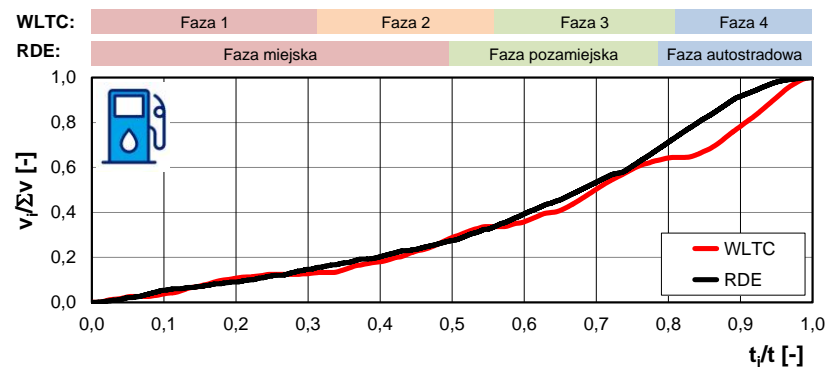
W związku z taką sytuacją, porównanie końcowych wartości w teście WLTC oraz RDE nie budzi wątpliwości, jednak chcąc porównywać konkretne fazy testu WLTC z odpowiadającymi im fazami testu RDE należało przyjąć założenia o podobieństwie poszczególnych faz testu.



a)



b)



c)

Rys. 4.10. Porównanie udziału względnej prędkości jako funkcji udziału względnego czasu dla poszczególnych testów WLTC i RDE pojazdu: a) zasilanego benzyną, b) zasilanego olejem napędowym, c) hybrydowego

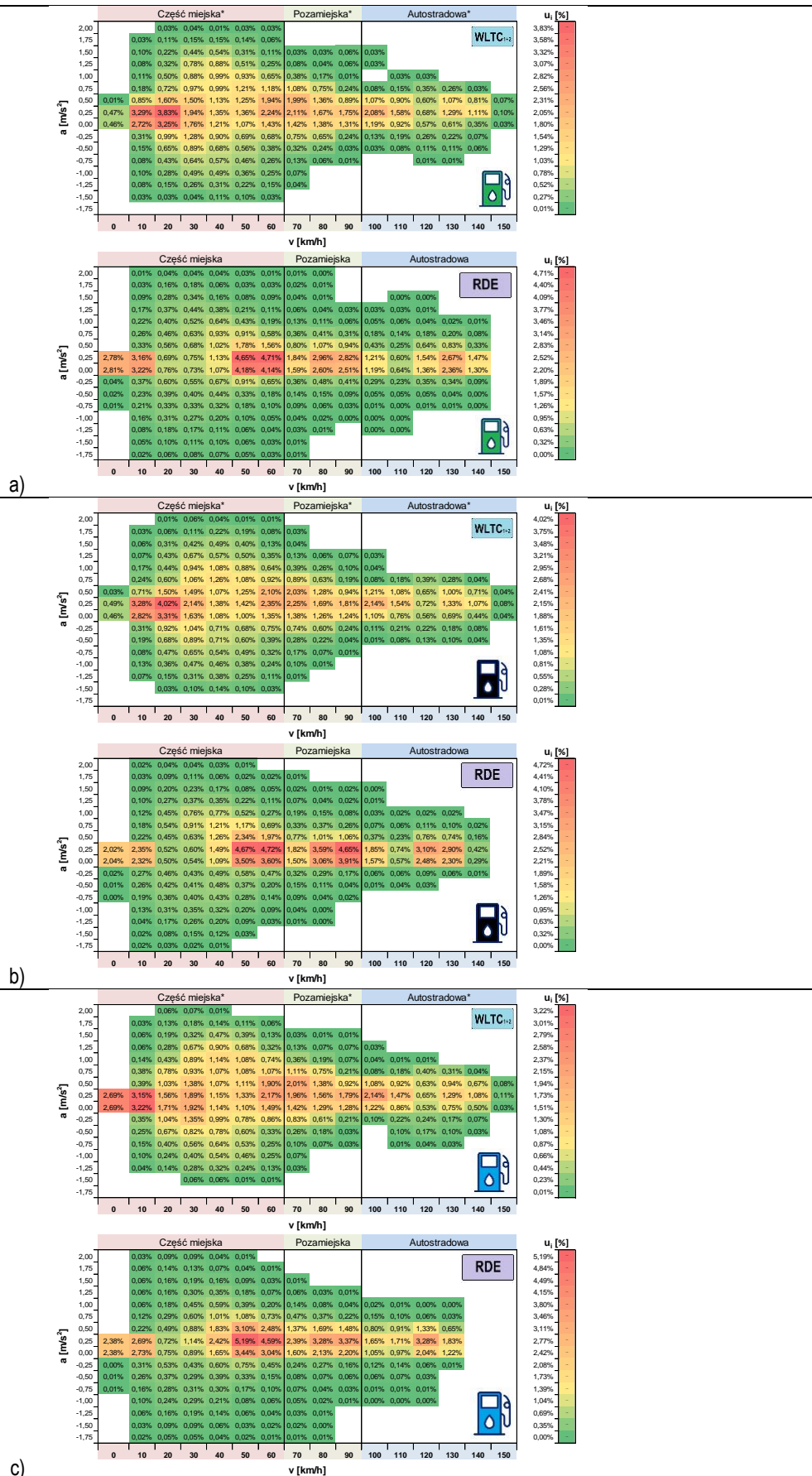
Pierwszym etapem analizy było porównanie udziału bieżącej prędkości w stosunku do udziału sumy prędkości w testach WLTC oraz RDE w odniesieniu do względnego czasu testu. Porównanie udziałów względnych w tym przypadku było pomocne z uwagi na różną długość testów oraz różny ich czas trwania. Z przedstawionych zależności na rys. 4.10 wynika, że pierwsza i druga faza testu WLTC odpowiada fazie miejskiej testu RDE, a pozostałe fazy również można porównać odpowiednio ze sobą. W związku z tym przyjęto, że możliwe jest porównanie fazy miejskiej testu RDE z połączoną fazą 1 i 2 testu WLTC (przy zachowaniu odpowiednich zależności w stosunku do czasu lub drogi).

Kolejnym etapem możliwości porównania fazy 1 i 2 testu WLTC z fazą miejską testu RDE było odniesienie wspólne udziałów czasu pracy pojazdu we współrzędnych prędkość pojazdu–przyspieszenie. Porównanie takie zaprezentowane na rysunku 4.10 dla wszystkich badanych pojazdów uwidacznia, że przedziały określone prędkością i przyspieszeniem są zbieżne dla odpowiednich przedziałów. W fazie 1 i 2 testu WLTC oznaczonej na rysunku 4.11 już z nowym oznaczeniem z gwiazdką (jako „część miejska*”) kolory oznaczające udział czasu pracy są bardzo zbliżone do kolorów (i odpowiadających im udziałów) w części miejskiej testu RDE. Oczywiście nie jest to odpowiednik o bardzo dużym stopniu korelacji, jednak zestawienie odpowiednich udziałów czasu pracy w części miejskiej testu WLTC i RDE (rys. 4.12) obrazuje, że współczynnik determinacji dla pojazdów konwencjonalnych (czyli zasilanego benzyną i olejem napędowym) jest dokładnie taki sam i wynosi 0,44, natomiast dla pojazdu hybrydowego taki współczynnik wynosi 0,63. Wynika z tego, że założenie o połączeniu 1 i 2 fazy testu WLTC odpowiada fazie miejskiej testu RDE.

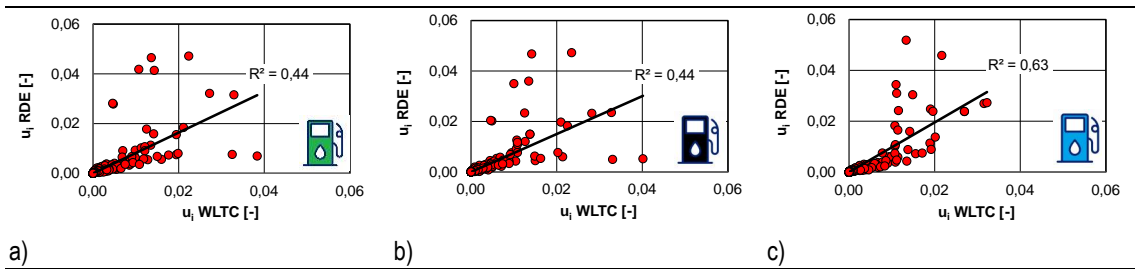
W kolejnym etapie porównano również pozostałe fazy testu WLTC oraz RDE. Z porównania fazy 3 testu WLTC oraz fazy pozamiejskiej testu RDE (rys. 4.13) wynika, że najlepsze odwzorowanie jest dla pojazdu hybrydowego, gdzie współczynnik determinacji wynosi 0,85, a kolejne wartości 0,81 oraz 0,78 odnoszą się odpowiednio dla pojazdu zasilanego benzyną i olejem napędowym. Szczegółowe dane dotyczące testu WLTC, w którym zastosowano połączenie 1 i 2 fazy (oznaczonego jako WLTC₁₊₂), zaprezentowano w Załączniku (tabl. Z7–Z9).

Porównując fazę 4 testu WLTC oraz fazę autostradową testu RDE (rys. 4.14) uzyskano mniejsze wartości współczynnika determinacji dla pojazdu zasilanego benzyną, olejem napędowym oraz pojazdu hybrydowego, który wynosił odpowiednio 0,59, 0,46 oraz 0,85. Znacznie mniejsze wartości współczynników determinacji wynikają również z mniejszej liczby danych wykorzystywanych w takim porównaniu. W części miejskiej porównywano około 90 danych (w zależności od pojazdu), natomiast w części pozamiejskiej i autostradowej – po około 35 danych.

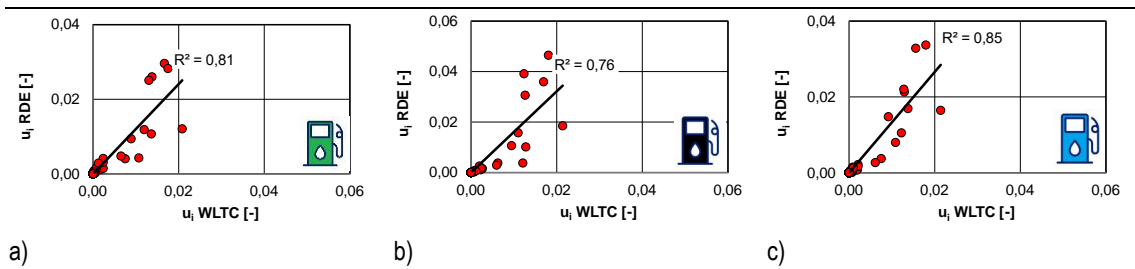
Porównanie wszystkich danych, dotyczących całego testu WLTC oraz RDE, uwidacznia mniejsze wartości współczynników determinacji: wynoszą one 0,37, 0,32 oraz 0,55, odpowiednio dla pojazdu zasilanego benzyną, olejem napędowym oraz pojazdu hybrydowego (rys. 4.15). Taka zależność wynika z faktu niejednakowego udziału czasu pracy pojazdu odniesionych do współrzędnych prędkość–przyspieszenie. Rozpatrywanie nie tylko prędkości, ale także wzięcie pod uwagę również przyspieszenia obrazuje, że testy homologacyjne i testy drogowe nie są pod tym względem takie same, stąd możliwość określania wyników testu RDE z wykorzystaniem wartości uzyskiwanych w teście homologacyjnym jest zagadnieniem złożonym.



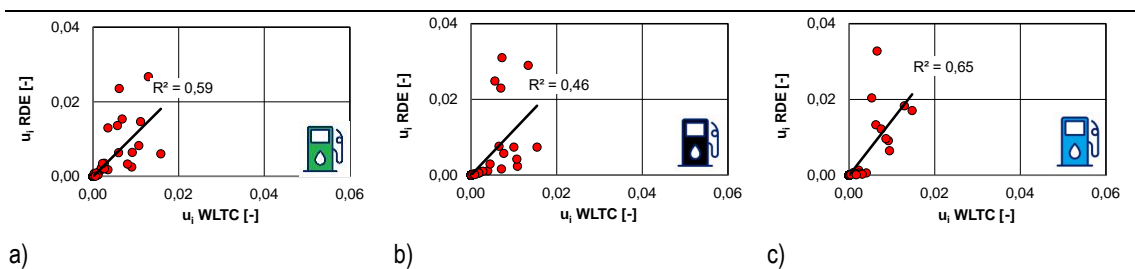
Rys. 4.11. Porównanie udziałów czasu pracy pojazdu w teście WLTC oraz RDE pojazdu: a) zasilanego benzyną, b) zasilanego olejem napędowym, c) hybrydowego



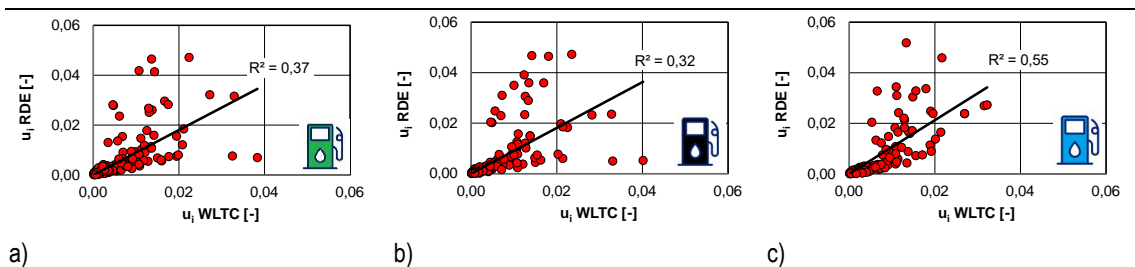
Rys. 4.12. Porównanie udziałów czasu pracy z rysunku 4.10, dla fazy 1 i 2 testu WLTC (oznaczanej jako WLTC₁₊₂) oraz części miejskiej testu RDE pojazdu: a) zasilanego benzyną, b) zasilanego olejem napędowym, c) hybrydowego



Rys. 4.13. Porównanie udziałów czasu pracy z rysunku 4.10, dla fazy 3 testu WLTC oraz części pozamiejskiej testu RDE pojazdu: a) zasilanego benzyną, b) zasilanego olejem napędowym, c) hybrydowego



Rys. 4.14. Porównanie udziałów czasu pracy z rysunku 4.10, dla fazy 4 testu WLTC oraz części autostradowej testu RDE pojazdu: a) zasilanego benzyną, b) zasilanego olejem napędowym, c) hybrydowego



Rys. 4.15. Porównanie udziałów czasu pracy z rysunku 4.10, dla całego testu WLTC oraz całego testu RDE pojazdu: a) zasilanego benzyną, b) zasilanego olejem napędowym, c) hybrydowego

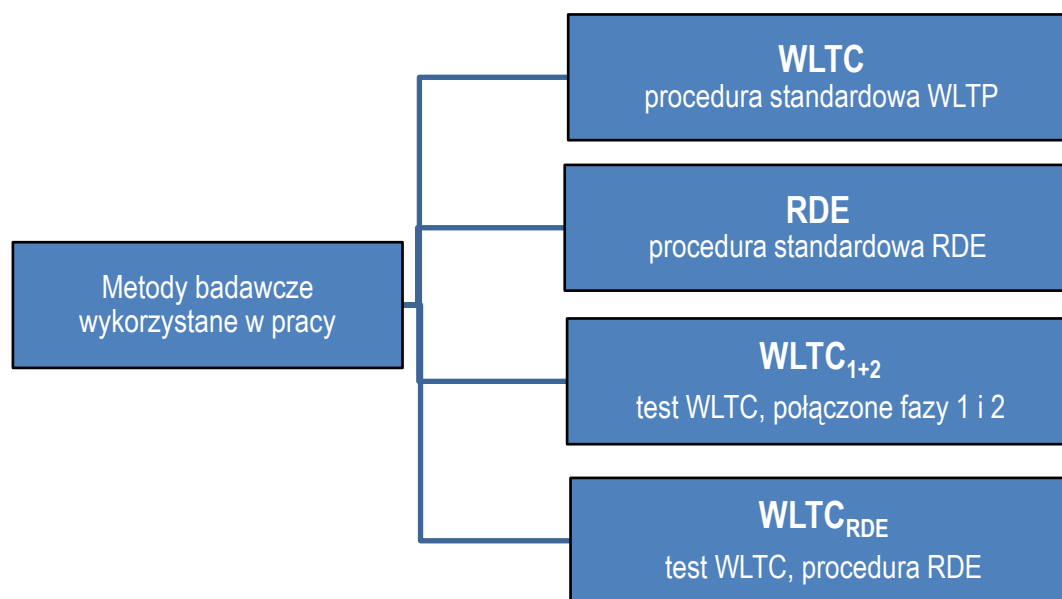
Kolejnym ważnym punktem w analizie testów homologacyjnych i testów drogowych jest odmiennosc wyznaczania końcowych wartości emisji drogowej dowolnych zanieczyszczeń. W pracy zaproponowano – oprócz łączenia fazy 1 i 2 testu WLTC (oznaczanej jako WLTC₁₊₂) – kolejną zmianę dotyczącą wyznaczania emisji drogowej w teście WLTC zgodnie z procedurą RDE. Zastosowano algorytm wyznaczania emisji nie w kolejnych fazach testu WLTC, ale fazy nazwano podobne jak w teście RDE, a klasy-

fikacja przedziałów do poszczególnych faz następowała po zakresach prędkości. Oznacza to, że część miejska testu WLTC to taka, w której prędkość była mniejsza niż 60 km/h. Odpowiednio do wymagań procedury RDE wyznaczano również fazę pozamiejską i autostradową w teście WLTC. Każdorazowo w pracy taka procedura postępowania oznaczana zgodnie z przeprowadzonym testem, a indeks będzie odnosił się do sposobu wyznaczania emisji spalin (oznaczenie $WLTC_{RDE}$). Szczegółowe dane, dotyczące testu WLTC, w którym zastosowano procedurę RDE (oznaczonego jako $WLTC_{RDE}$), zaprezentowano w Załączniku (tabl. Z10–Z12).

Podsumowując: do analizy i porównywania wyników emisyjnych w teście WLTC i RDE wykorzystano cztery procedury obliczeniowe:

- procedura 1 (oznaczona jako **WLTC**) – podział testu oraz określenie emisji drogowej spalin według standardowej procedury WLTP,
- procedura 2 (oznaczona jako **RDE**) – podział testu drogowego na fazy i wyznaczanie emisji zanieczyszczeń według standardowej procedury RDE,
- procedura 3 (oznaczona jako **WLTC₁₊₂**) – podział testu na fazy: 1+2, 3 oraz 4; połączenie fazy 1 i 2 odpowiadającej fazie miejskiej testu RDE,
- procedura 4 (oznaczona jako **WLTC_{RDE}**) – podział faz i wyznaczenie emisji w teście homologacyjnym według procedury RDE, zakładającej podział faz w zależności od prędkości jazdy pojazdu.

Schemat opisujący analizę poszczególnych procedur pomiarowych z uwzględnieniem wprowadzonych zmian, czyli nowego sposobu analizowania parametrów testów przedstawiono na rys. 4.16. Zgodnie z rysunkiem przyjęto nazewnictwo procedur, gdzie skrót oznacza wykonany test, a indeks oznacza procedurę analizy testu.



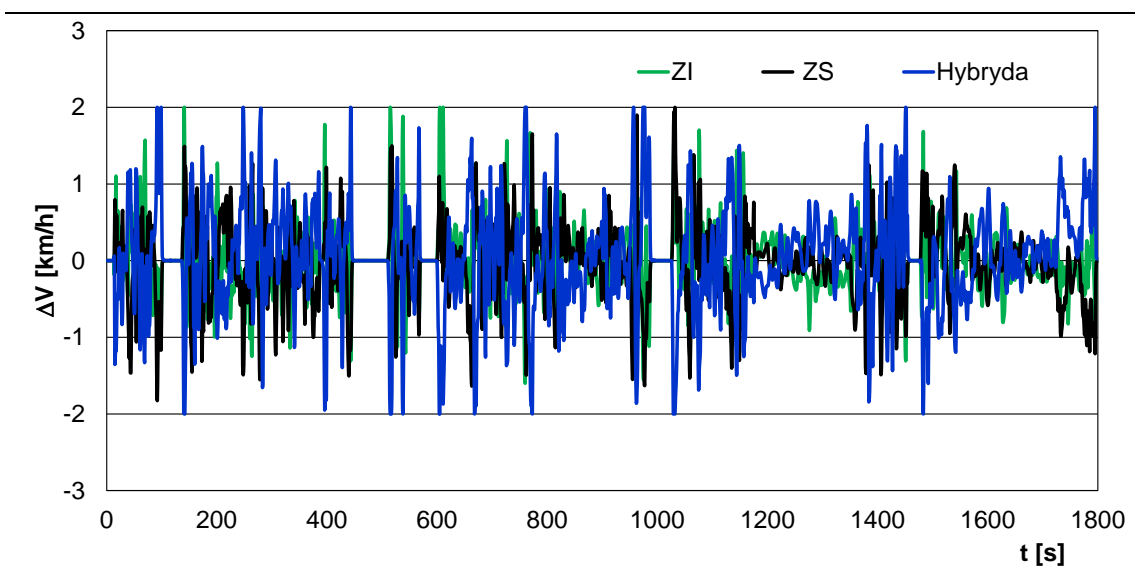
Rys. 4.16. Schemat zastosowanych metod obliczeniowych

5. Wyniki badań własnych i ich analiza

5.1. Analiza parametrów ruchu w testach emisyjnych

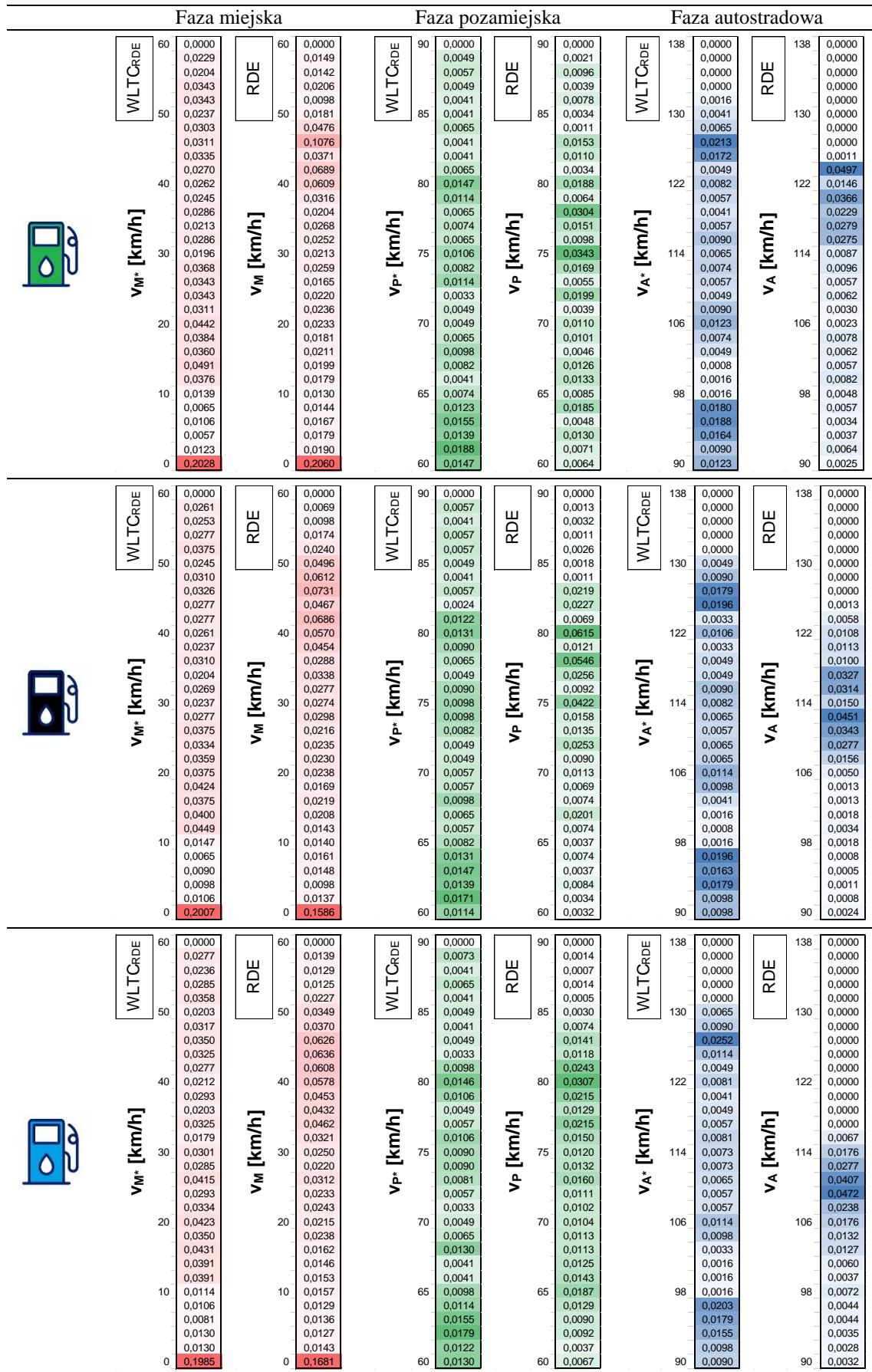
5.1.1. Porównanie udziałów prędkości w testach emisyjnych

Przedstawione profile prędkości w teście WLTC badanych pojazdów (pkt 4.3.1, rys. 4.4) oraz parametry charakterystyczne w teście RDE (pkt 4.3.3, rys. 4.7) posłużyły do porównania testów WLTC i RDE, odpowiednio dla pojazdów z zasilanych silnikiem o zapłonie iskrowym, samoczynnym oraz z napędem hybrydowym. Zarejestrowane przebiegi zarówno w testach na hamowni podwoziowej, jak i w rzeczywistych warunkach jazdy charakteryzowały się, odpowiednio, podobnymi parametrami. Różnice prędkości chwilowej w teście WLTC między kolejnymi testami a wartością średnią z trzech testów nie przekraczały 2 km/h (rys. 5.1). We wszystkich testach WLTC największy udział miały warunki zmienne (prędkość i przyspieszenie różne od zera); średnie wartości to 47% (WLTC) oraz 33% (RDE). Jednakże udziały przyspieszeń i opóźnień były zdecydowanie większe w przypadku testu WLTC (ponad 45%). Ponadto prędkość jazdy w teście WLTC dla wszystkich badanych pojazdów charakteryzowała się znikomym udziałem jazdy ze stałą prędkością (2%), podczas gdy w teście RDE udziały te sięgały ponad 30%. Każdy przebieg testu WLTC wykonany podczas badań wyróżniał się większą dynamiką, w porównaniu do przebiegów testu RDE.



Rys. 5.1. Porównanie prędkości jazdy w teście WLTC dla badanych pojazdów

Porównania udziałów prędkości dokonano z wykorzystaniem podziału testów (WLTC i RDE) na fazę jazdy miejskiej, pozamiejskiej i autostradowej. W związku z tym wykorzystano procedurę podziału oznaczoną jako $WLTC_{RDE}$, oznaczającą badania według testu WLTC, a przyjęty podział faz według procedury RDE. Udziały prędkości pojazdu z podziałem na trzy części (miejską, pozamiejską i autostradową), analizowane według procedur $WLTC_{RDE}$ oraz RDE, uzyskane dla trzech różnych rodzajów napędu przedstawiono na rys. 5.2. Największy udział prędkości pojazdu w części miejskiej zarejestrowano dla fazy postoju ($v = 0$ km/h). Dotyczy to wszystkich rodzajów napędu w części miejskiej niezależnie od zastosowanej procedury.



Rys. 5.2. Porównanie udziałów prędkości pojazdu uzyskane według procedur pomiarowych WLTCrDE oraz RDE z uwzględnieniem poszczególnych faz testu i rodzaju napędu pojazdu

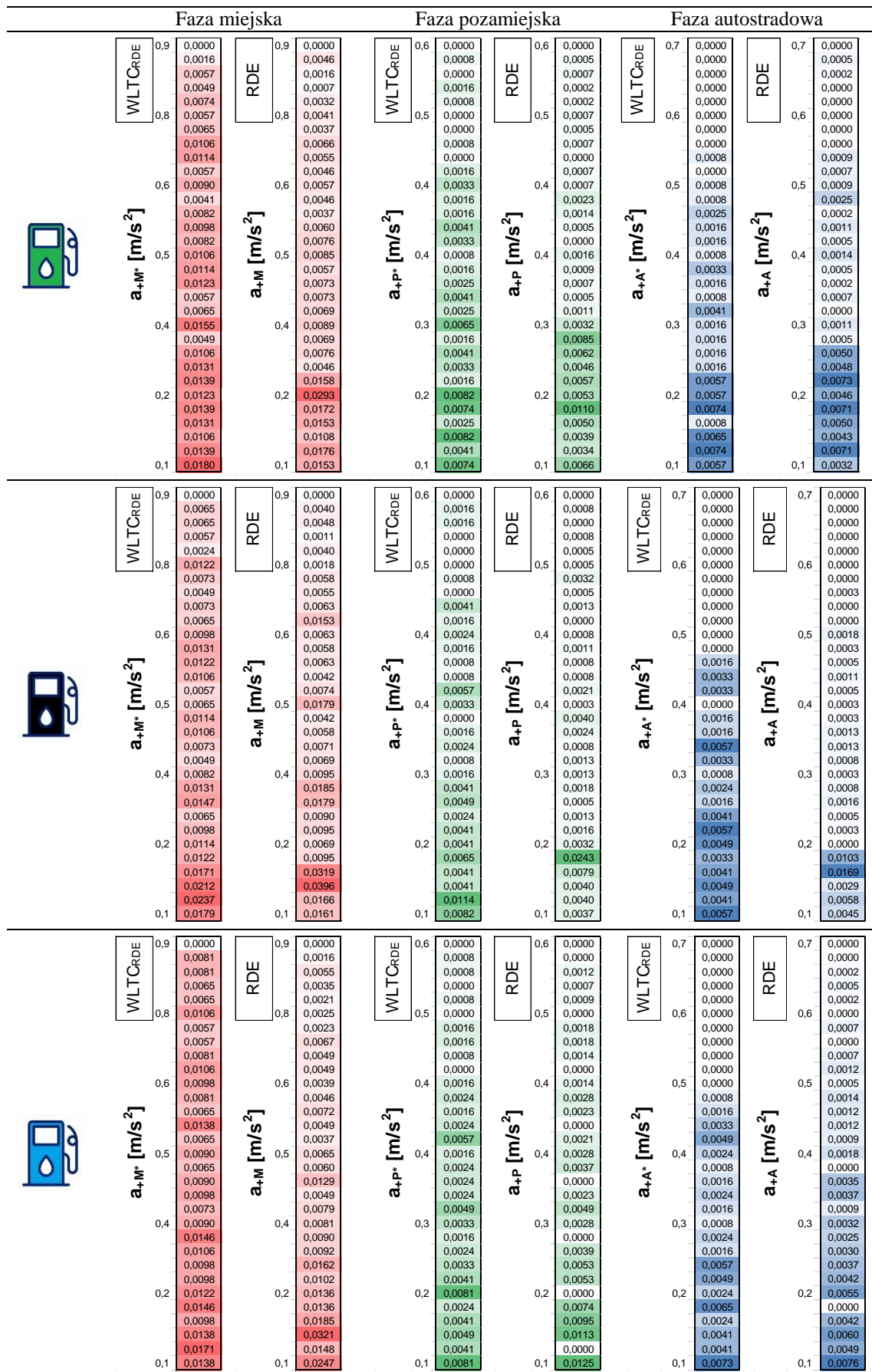
Udziały prędkości pojazdu uzyskane w części miejskiej (dla wszystkich rodzajów napędu w zakresie prędkości pojazdu od 0 do 60 km/h) według procedury WLTC_{RDE} są porównywalne. Analogiczne uwarunkowanie występuje w przypadku procedury RDE. Aczkolwiek dane wskazują, że bezpośrednie porównanie udziałów prędkości pojazdu uzyskanych według różnych procedur (w tym przypadku WLTC_{RDE} i RDE) nie jest możliwe. Rozmieszczenie udziałów nie jest zbieżne. Podobne warunki występują w części pozamiejskiej i autostradowej procedur WLTC_{RDE} i RDE. We wszystkich fazach testu uzyskane według niejednakowych procedur należy analizować osobno.

Następnym analizowanym parametrem dynamicznym było porównanie udziałów przyspieszenia dodatniego (rys. 5.3). Podobieństwo uzyskanych wyników jest widoczne przy wykorzystaniu procedury WLTC_{RDE} dla wszystkich rodzajów wykorzystanych obiektów badawczych. Dotyczy to całego zakresu części miejskiej (0,1–0,9 m/s²), jednakże największe podobieństwo występuje w obszarze mniejszych wartości z zakresu 0–0,2 m/s². Wizualizacja kolorystyczna (udziałów czasu występowania danej wartości przyspieszenia) uwidacznia skalę podobieństwa, które dla testu WLTC (wyznaczone według procedury WLTC_{RDE}) jest rozłożone bardziej równomiernie niż w dla testu RDE (duży udział czasu pracy dla dość wąskiego zakresu zmienności przyspieszenia dodatniego). W przypadku fazy pozamiejskiej podobieństwo rozmieszczenia udziałów przyspieszenia dodatniego przy wykorzystaniu procedury WLTC_{RDE} jest widoczne szczególnie dla pojazdu wyposażonego w silnik benzynowy oraz z napędem hybrydowy. Dla pojazdu wyposażonego w silnik zasilany olejem napędowym wartości najczęściej występujące przyspieszenia dodatniego są zlokalizowane w dość wąskim zakresie (dla WLTC – od 0,1 m/s² do 0,2 m/s², dla testu RDE – od 0,18 m/s² do 0,20 m/s²). W części autostradowej podobieństwo wyników jest zauważalne w zakresie od 0,1 m/s² do 0,5 m/s² dla wszystkich rodzajów napędów, natomiast duże podobieństwo występuje dla pojazdu wyposażonego w silnik zasilany benzyną, a także z napędem hybrydowym. Dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie samoczynnym to podobieństwo jest szczególnie wyraźne dla zakresu przyspieszenia dodatniego od 0,16–0,20 m/s².

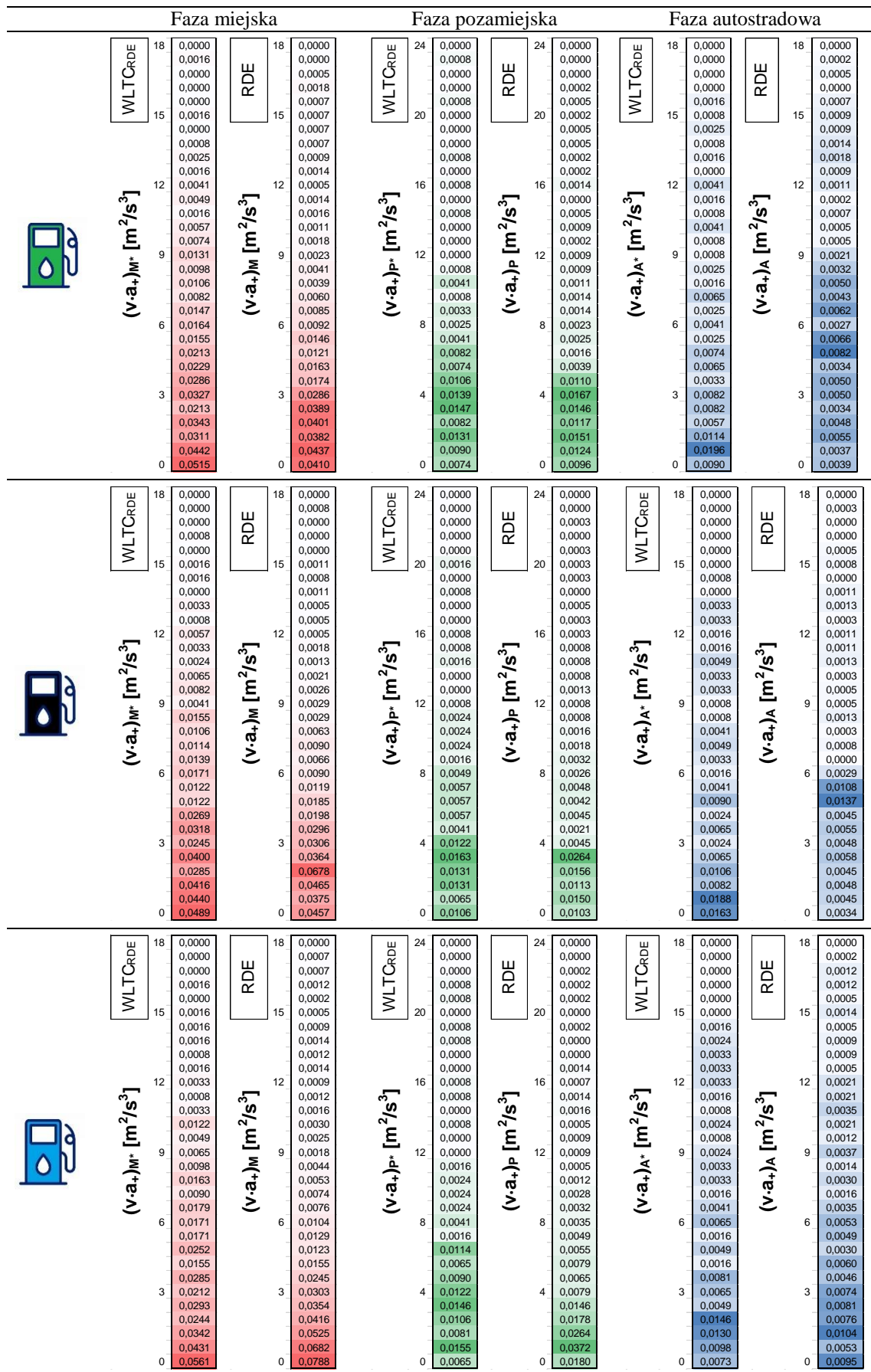
Analiza rysunku 5.3 pod względem przejazdów w rzeczywistych warunkach ruchu uwidacznia podobieństwo przejazdów pojazdami w warunkach miejskich, natomiast w pozostałych fazach podobieństwo występowało między pojazdami wyposażonymi w silniki benzynowe (łącznie z pojazdem hybrydowym).

5.1.2. Porównanie parametrów dynamicznych testów

Kolejnym analizowanym parametrem jest iloczyn prędkości i przyspieszenia dodatniego (rys. 5.4). Wyniki uzyskane według procedur WLTC_{RDE} i RDE dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie iskrowym są podobne w zakresie od 0 m²/s³ do 6 m²/s³ (w części miejskiej). W podobnych proporcjach (zakresów) są również zachowane podobieństwa dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie samoczynnym oraz dla pojazdu z napędem hybrydowym. W części pozamiejskiej duże podobieństwo występuje dla pojazdów wyposażonych w silnik o zapłonie iskrowym i samoczynnym (duży udział parametru z dolnego zakresu 0–84 m²/s³). Natomiast w części autostradowej podobieństwo między testem na hamowni podwoziowej a rzeczywistymi warunkami ruchu występuje w niewielkim zakresie. Rozpatrując jednak warunki ruchu dla tych samych testów pomiarowych (osobno WLTC i RDE) można przyjąć założenie o dużym ich wzajemnym podobieństwie, co nie jest zaskoczeniem dla testów hamownianych, natomiast jest potwierdzeniem znacznej powtarzalności testów drogowych.



Rys. 5.3. Porównanie przyspieszenia dodatniego pojazdów uzyskane według procedur pomiarowych WLTC_{RDE} oraz RDE z uwzględnieniem poszczególnych faz testu i rodzaju napędu pojazdu

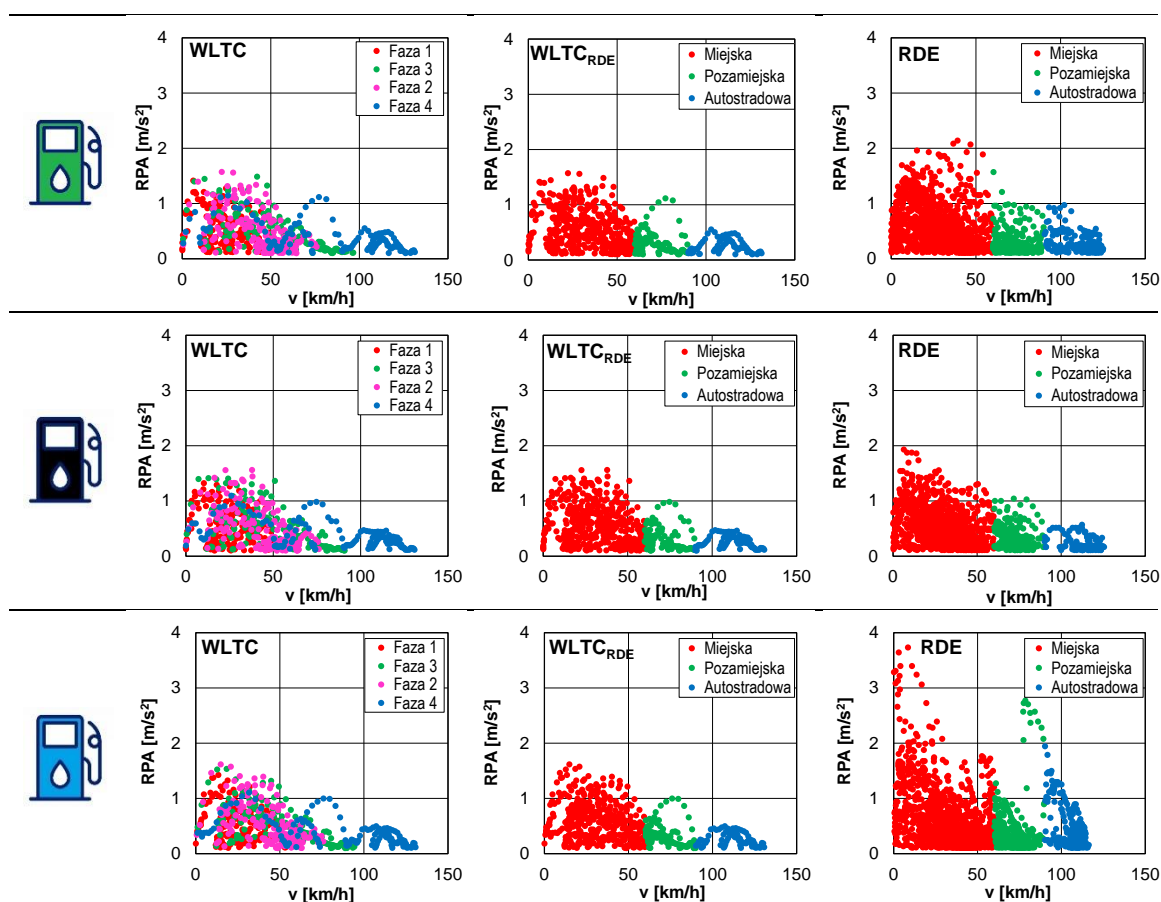


Rys. 5.4. Porównanie udziałów iloczynu prędkości i przyspieszenia dodatniego uzyskane według procedur pomiarowych WLTCrDE oraz RDE z uwzględnieniem poszczególnych faz testu i rodzaju napędu pojazdu

Wymogiem w testach w rzeczywistych warunkach ruchu jest ocena parametrów dynamicznych zdefiniowanych jako względne przyspieszenie dodatnie oraz 95. centyl prędkości i przyspieszenia dodatniego. Procedurę taką zastosowano do wykonanych testów na hamowni podwoziowej w teście WLTC (z podziałem na 4 fazy), również w odniesieniu do testu WLTC z podziałem na fazy według procedury RDE – oznaczenie testu $WLTC_{RDE}$, a także w teście drogowym RDE. Wyniki dla względnego przyspieszenia dodatniego pokazano dla wszystkich punktów pomiarowych a także zbiorczo dla każdej rozpatrywanej fazy ruchu.

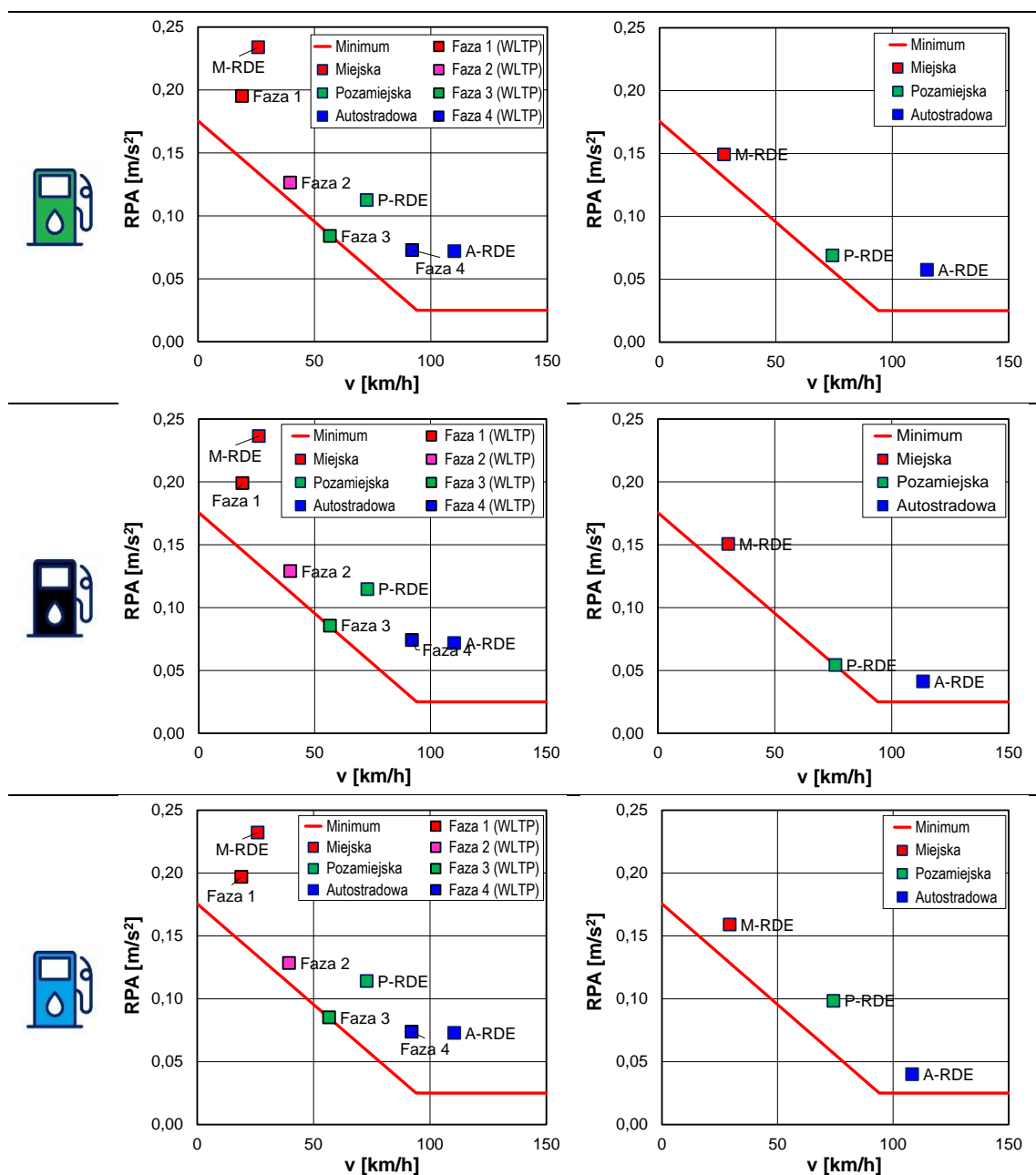
Na rysunku 5.5 pokazano dane dotyczące dynamiki przejazdów w zależności od prędkości pojazdu dla wszystkich analizowanych przypadków (procedur badawczych WLTC, $WLTC_{RDE}$ i RDE) dla trzech badanych pojazdów (wyposażonych w silnik o zapłonie iskrowym, samoczynnym oraz z napędem hybrydowym). Poniższe charakterystyki wskazują na podobieństwo rozmieszczenia uzyskanych wyników, a wartości parametru dynamiki przejazdu RPA nie przekraczają $2,0 \text{ m/s}^2$. Wyjątkiem są dane uzyskane w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego – szczególnie dla pojazdu hybrydowego. W tym przypadku wartości RPA osiągają chwilowo wartości do 4 m/s^2 , a ich rozmieszczenie odbiega od pozostałych wartości.

Testy wykonywane na hamowni podwoziowej i ich podział zgodnie z wymaganiami procedury WLTP uwidacznia wykorzystywanie minimalnych prędkości w każdej fazie testu, przez co niemożliwe jest porównanie z fazami występującymi w testach drogowych. Jednakże wstępne porównanie według procedury $WLTC_{RDE}$ z procedurą RDE



Rys. 5.5. Dynamika przejazdów dla wszystkich badanych pojazdów w zależności od testu badawczego i procedur obliczeniowej – WLTC, $WLTC_{RDE}$ i RDE z podziałem na fazy testów

umożliwia porównanie danych między sobą, co zostało przedstawione w kolejnym etapie pracy. Na podstawie wyznaczonych chwilowych wartości względnego przyspieszenia dodatniego wyznaczono wartości uśrednione dynamiki przejazdów (dla faz testów WLTC, WLTC_{RDE} – przedstawionych łącznie oraz RDE). Dodatkowo w celu zweryfikowania poprawności testów, na wykresach umieszczono czerwoną linię, która oznacza wartość minimalną parametru RPA (zgodnie z procedurą RDE). Z uzyskanych danych wynika, że we wszystkich przypadkach wartości nie są mniejsze od wartości minimalnej. Oznacza to, że przejazdy wykonano zgodnie z wymaganiami ustawodawców (pod względem dynamiki testu). Na wykresach porównano także wartości uzyskane zarówno według testu WLTC oraz WLTC_{RDE}. Otrzymane charakterystyki wskazują, że uśrednione wartości z faz nie są jednakowe dla różnych procedur pomiarowych. W przypadku pojazdu wyposażonego w silnik benzynowy, wartości parametru RPA są podobne

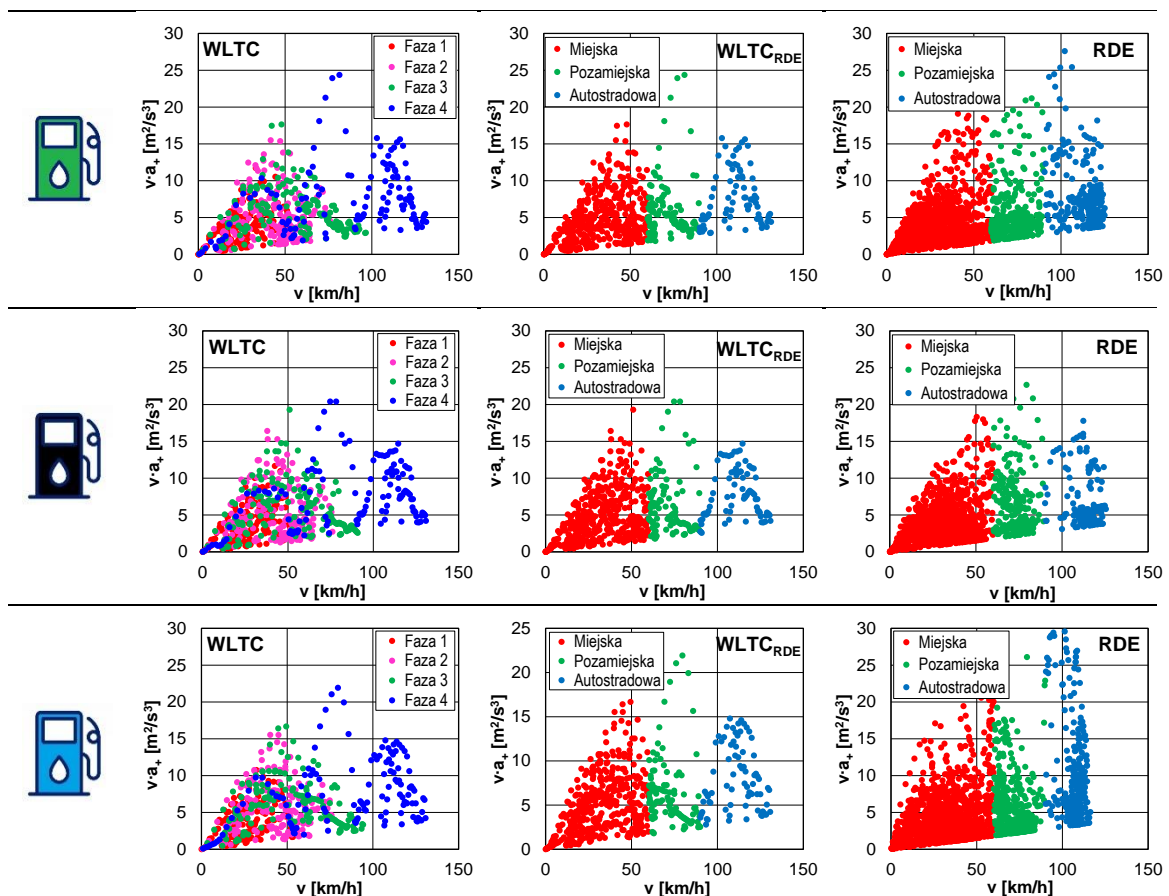


Rys. 5.6. Uśrednione wartości względnego przyspieszenia dodatniego dla badanych pojazdów w zależności od testu badawczego i procedury obliczeniowej – WLTC, WLTC_{RDE} i RDE z podziałem na fazy testów

dla wykorzystania procedury $WLTC_{RDE}$ i RDE jedynie w części autostradowej. W pozostałych przypadkach brak jest zgodności dynamiki określonej w teście WLTC z testem RDE. Jednakże można zauważyć zależność, która dowodzi że połączenie fazy 1 i 2 testu WLTC przybliży dynamikę określoną w tych fazach do fazy miejskiej testu RDE.

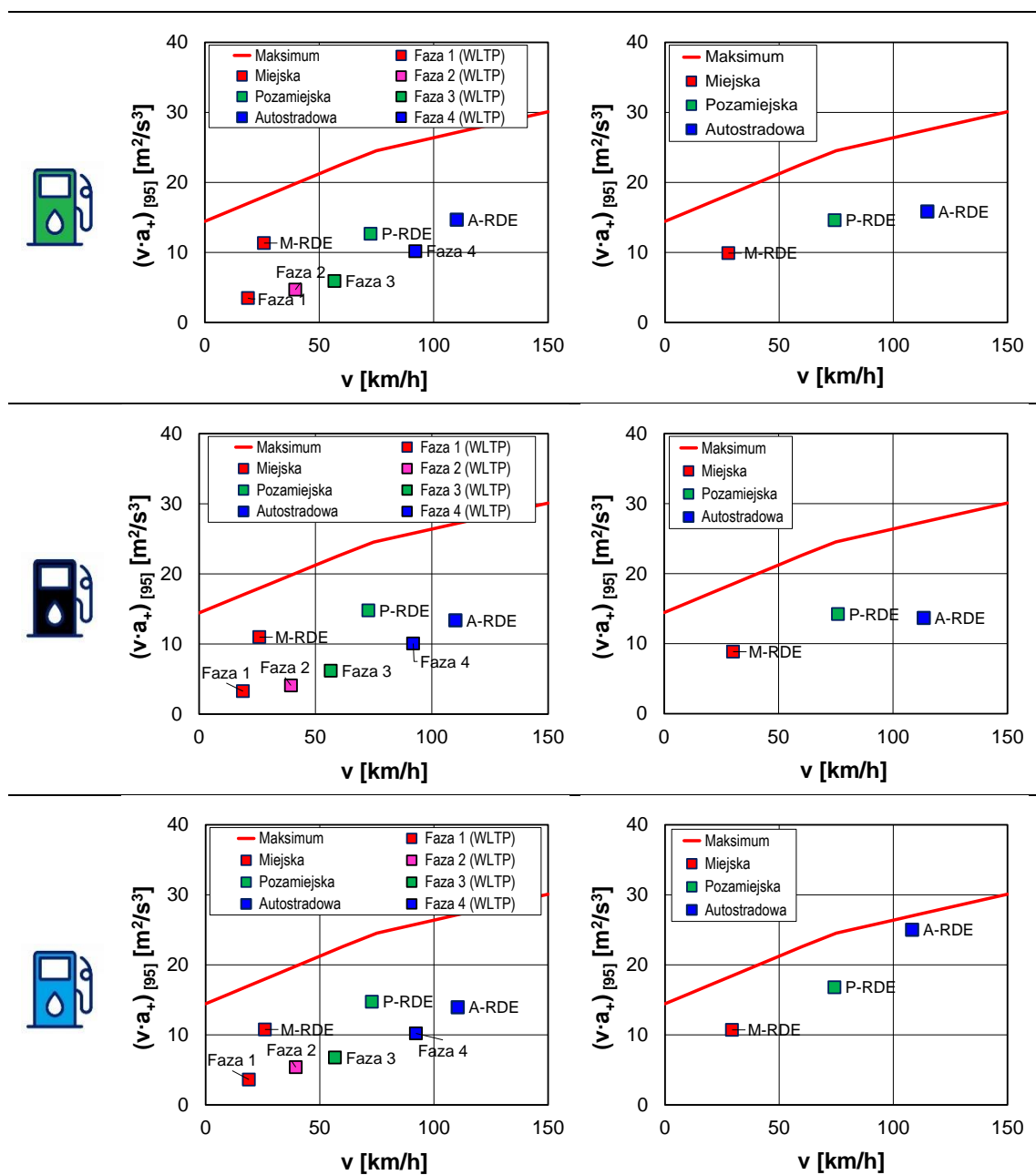
Kolejnym rozpatrywanym parametrem dynamicznym jest iloczyn prędkości i przyspieszenia dodatniego. Wymóg prawny dotyczący procedury RDE dotyczy określenia 95-procentowego centyla, jednak na potrzeby pracy wykonano obliczenia w dwóch etapach; po pierwsze jako wartości chwilowe iloczynu prędkości i przyspieszenia dodatniego oraz wartości końcowe (zgodnie z procedurą opisaną w pkt 4.1.2).

Na rysunku 5.7 przedstawiono chwilowe wyniki iloczynu prędkości i przyspieszenia dodatniego w zależności od prędkości pojazdu, uzyskane podczas wykorzystania trzech różnych metod badawczych (procedury WLTC, $WLTC_{RDE}$ i RDE) dla badanych pojazdów. Porównanie uzyskiwanych wartości dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie iskrowym w teście WLTC (z podziałem na 4 fazy) oraz z podziałem na fazy według procedury RDE uwidacznia jedynie inne przypisanie danego punktu pracy pojazdu do innej fazy testu. Zarejestrowane wyniki wykazują podobieństwo w każdym z trzech przypadków. Wartości uzyskiwane zarówno w testach WLTC oraz RDE są zbliżone ze sobą, co wskazuje na podobieństwo warunków dynamicznych przejazdu (a konkretnie jednego z nich). Zauważalne jest, że wyniki uzyskane podczas testu RDE (dla wszystkich rodzajów napędów) są znacząco większe od testu WLTC. W związku z tym możliwe jest porównanie jedynie wartości końcowych, wyznaczonych według procedury RDE.



Rys. 5.7. Iloczyn chwilowej prędkości i przyspieszenia dodatniego dla wykonanych testów z wykorzystaniem trzech procedur badawczych oznaczonych jako WLTC, $WLTC_{RDE}$ i RDE

Wyznaczając wartości końcowe 95-procentowego centyla iloczynu prędkości i przyspieszenia dodatniego (rys. 5.8) można stwierdzić duże podobieństwo w teście WLTC (według procedury RDE) oraz w teście drogowym. Dodatkowo w celu zweryfikowania poprawności testów, na wykresach umieszczono czerwoną linię, która oznacza wartość maksymalną 95-procentowego centyla prędkości i przyspieszenia dodatniego (zgodnie z procedurą RDE). Z uzyskanych danych wynika, że we wszystkich przypadkach wartości nie przekraczają wartości maksymalnej. Oznacza to, że przejazdy wykonano zgodnie z wymaganiami ustawodawców (pod względem dynamiki testu). Otrzymane charakterystyki wskazują, że uśrednione wartości omawianego parametru z faz testu oznaczonego jako $WLTC_{RDE}$ w znacznie lepszym stopniu odpowiadają wyznaczonym wartościom z testu RDE.

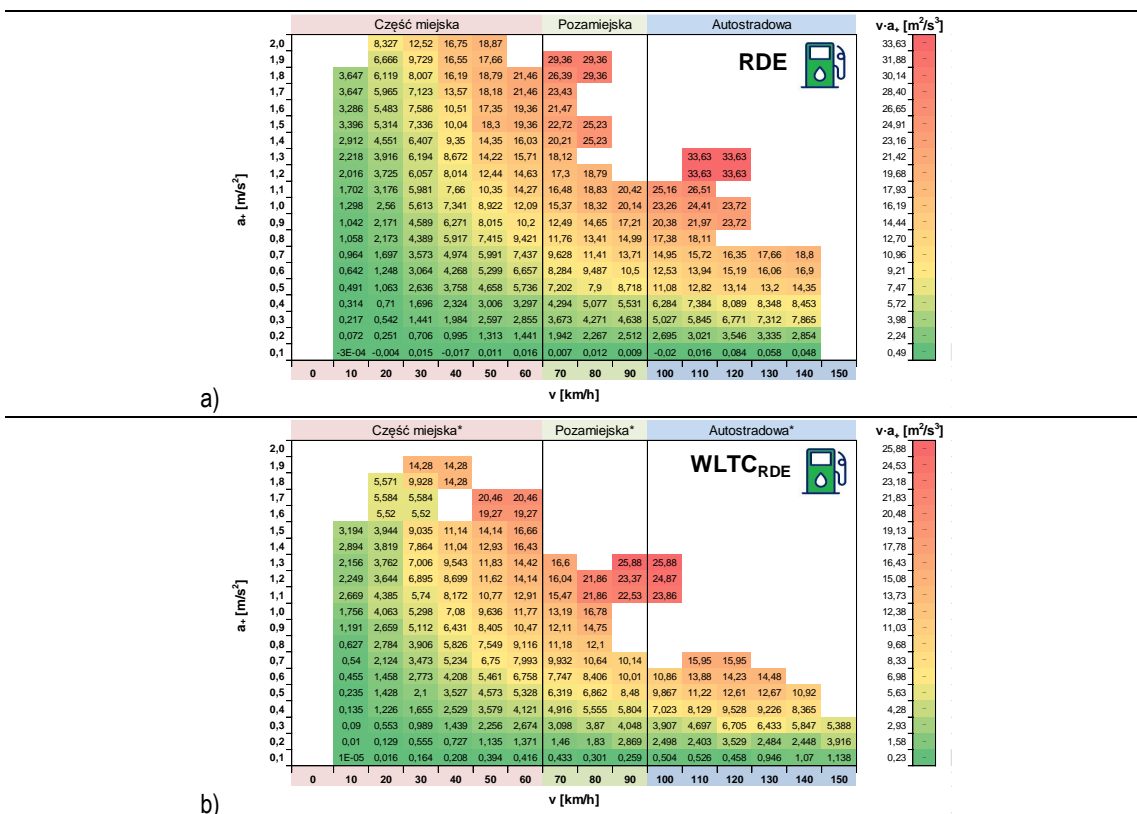


Rys. 5.8. 95-procentowy centyl iloczynu prędkości i przyspieszenia dodatniego w zależności od prędkości pojazdu dla badanych pojazdów

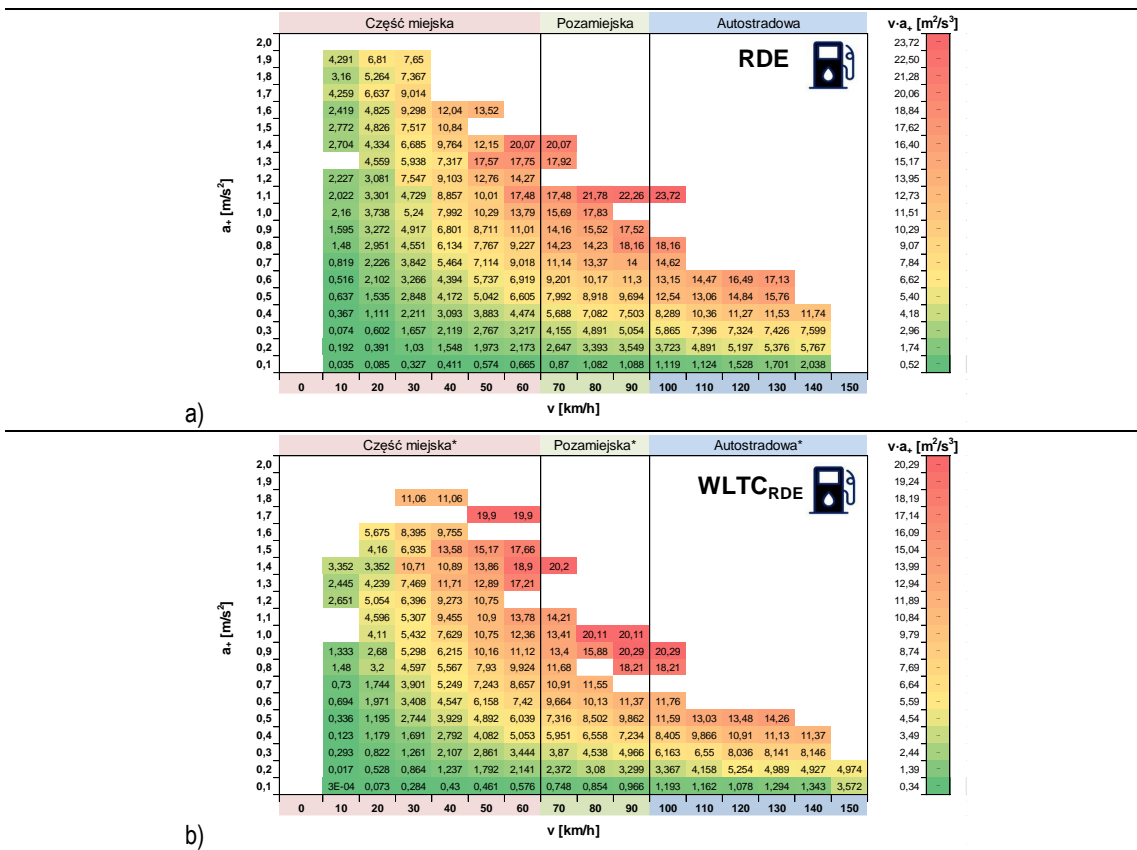
5.1.3. Korelacja parametrów dynamicznych badanych pojazdów w testach badawczych

Kolejnym etapem pracy było wyznaczenie korelacji między parametrami dynamicznymi badanych pojazdów. Najbardziej miarodajnym wskaźnikiem – według autorki pracy – był iloczyn prędkości i przyspieszenia dodatniego. Taki wskaźnik jest często przytaczany w porównaniach, gdyż jest związany z dwoma charakterystycznymi wielościami – prędkością i przyspieszeniem pojazdu. Wskaźnik ten porównano dla warunków ruchu testu RDE oraz WLTC. Nie ma tutaj znaczenia czy fazy rozpatrywano łącznie (WLTC₁₊₂) czy też w całym teście WLTC, jednakże na rysunku 5.9 zaznaczono podział na fazy zgodnie w procedurą RDE. Dane przedstawiono we współrzędnych prędkość–przyspieszenie pojazdu, ze względu na możliwość porównania pól o tych samych współrzędnych. Należy dodać, że porównania dokonano jedynie dla przyspieszenia dodatniego, które ma największy udział w testach oraz największy wpływ na emisję spalin. Porównanie odpowiednich danych – wartości iloczynu prędkości i przyspieszenia dodatniego w testach RDE oraz WLTC_{RDE} (rys. 5.9–5.11) uwidacznia bardzo zbliżone rozkłady kolorystyczne, odpowiadające zróżnicowaniu porównywanych wartości.

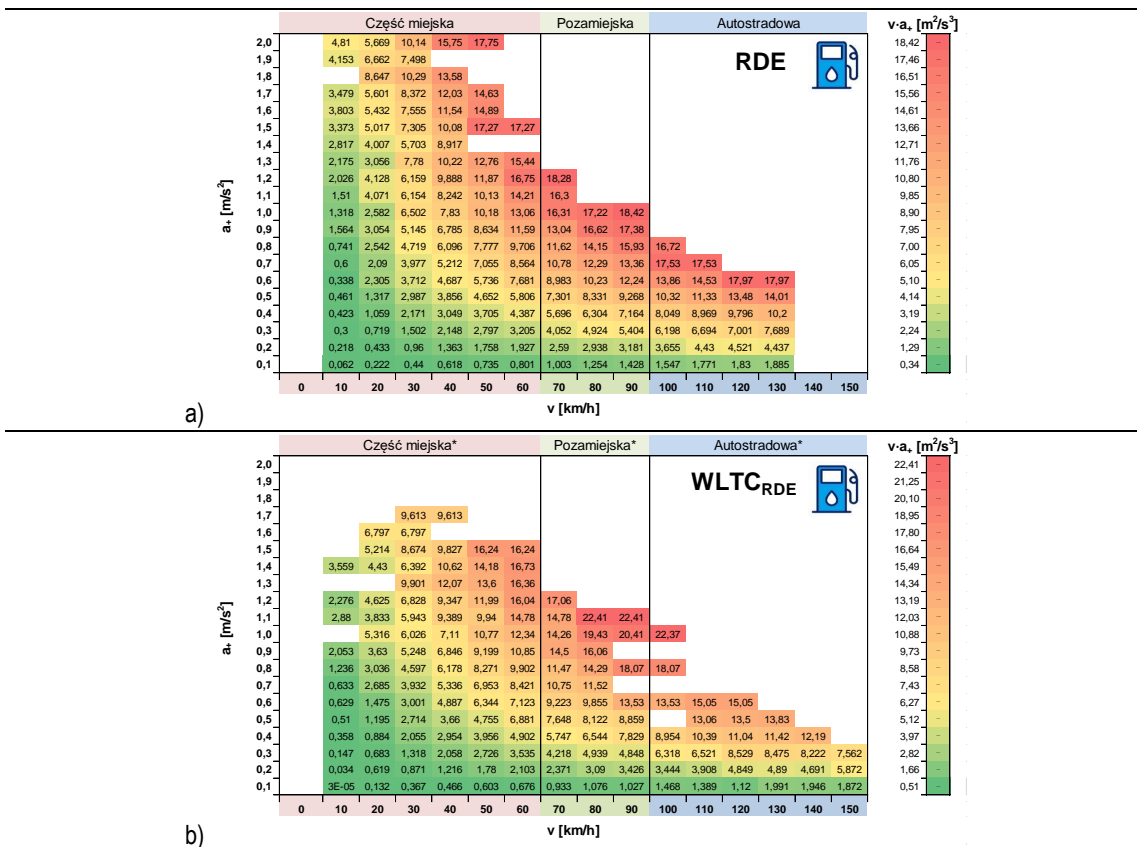
Największe wartości iloczynu prędkości i przyspieszenia dodatniego występują zarówno w fazie pozamiejskiej i autostradowej (dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie iskrowym, rys. 5.9). Dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie samoczynnym maksymalne wartości iloczynu prędkości i przyspieszenia występują w fazie jazdy miejskiej i pozamiejskiej (rys. 5.10). Natomiast dla pojazdu wyposażonego w napęd hybrydowy (rys. 5.11) wartości maksymalne omawianego wskaźnika występują we wszystkich fazach testu RDE oraz części pozamiejskiej i autostradowej testu WLTC.



Rys. 5.9. Wartości iloczynu prędkości i przyspieszenia dodatniego dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie iskrowym: a) w teście RDE, b) w teście WLTC_{RDE}

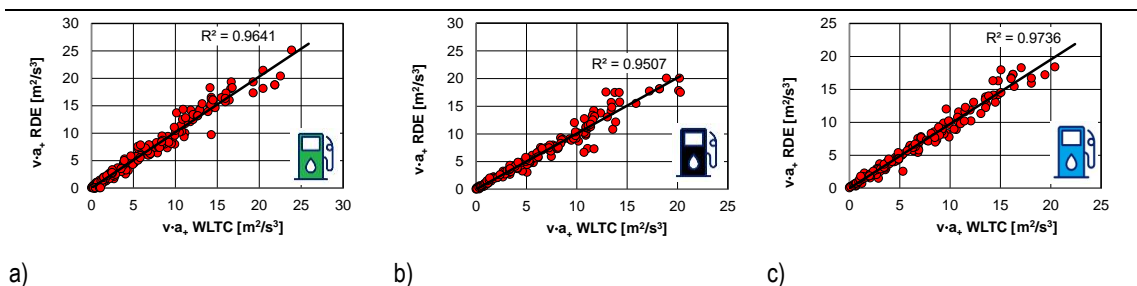


Rys. 5.10. Wartości iloczynu prędkości i przyspieszenia dodatniego dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie samoczynnym: a) w teście RDE, b) w teście WLTC_{RDE}



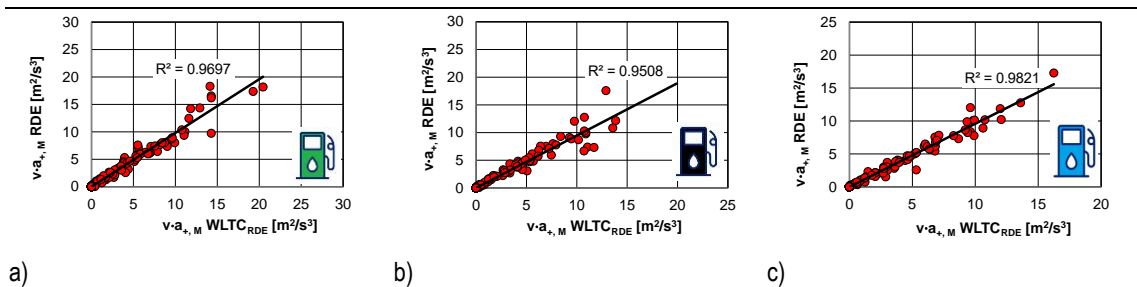
Rys. 5.11. Wartości iloczynu prędkości i przyspieszenia dodatniego dla pojazdu wyposażonego w napęd hybrydowy: a) w teście RDE, b) w teście WLTC_{RDE}

Odpowiednie porównanie przedstawionych na rys. 5.9–5.11 danych pozwala na wyznaczenie współczynnika determinacji dla wykonanych testów RDE i WLTC pod względem zgodności iloczynu prędkości i przyspieszenia dodatniego. Wartości współczynników determinacji są bardzo zbliżone do siebie i wynoszą ponad 0,95 niezależnie od badanego pojazdu (rys. 5.12). Dowodzi to wykorzystywanie porównywalnych parametrów dynamicznych pojazdów w całym teście badawczym.

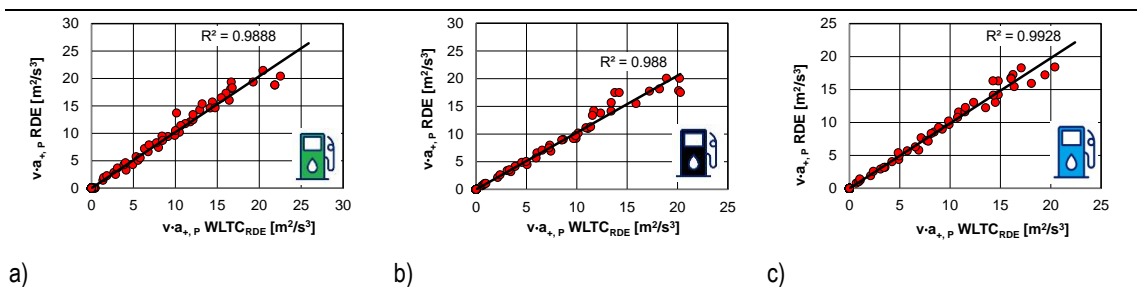


Rys. 5.12. Korelacje iloczynu prędkości i przyspieszenia dodatniego w teście RDE i WLTC dla badanych pojazdów wyposażonych: a) w silnik o zapłonie iskrowym, b) w silnik o zapłonie samoczynnym, c) w napęd hybrydowy

Jednakże dodatkowym pytaniem może być zgodność tych parametrów w poszczególnych fazach testów. Takie porównanie przeprowadzono w kolejnym etapie tego podrozdziału, które zaprezentowano na rys. 5.13–5.15. Porównanie wartości współczynników determinacji sugeruje bardzo dużą zgodność wartości iloczynu prędkości i przyspieszenia dla każdego badanego pojazdu.



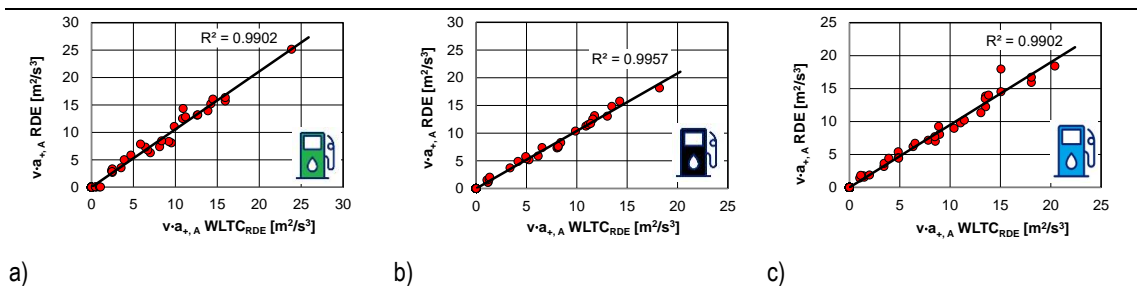
Rys. 5.13. Korelacje iloczynu prędkości i przyspieszenia dodatniego w fazie miejskiej testów RDE i WLTC_{RDE} dla badanych pojazdów wyposażonych: a) w silnik o zapłonie iskrowym, b) w silnik o zapłonie samoczynnym, c) w napęd hybrydowy



Rys. 5.14. Korelacje iloczynu prędkości i przyspieszenia dodatniego w fazie pozamiejskiej testów RDE i WLTC_{RDE} dla badanych pojazdów wyposażonych: a) w silnik o zapłonie iskrowym, b) w silnik o zapłonie samoczynnym, c) w napęd hybrydowy

Niestety takie porównanie ma też swoje wady. Można do nich zaliczyć samą charakterystykę, która wykonywana jest we współrzędnych, które odpowiadają wartościom uzyskiwanym. Jednak rozpatrując zakresy zmian prędkości i przyspieszenia, które wy-

noszą odpowiednio $0,1 \text{ m/s}^2$ oraz 10 km/h trzeba zauważyć, że nie muszą być to zależności dokładnie proporcjonalne. Jednakże tak duży przedział, który został porównywany nie miał wpływu na wynik współczynnika determinacji. Wartości tego ostatniego wynosiły ponad 0,99 dla pojazdów w fazie autostradowej, ponad 0,98 dla fazy pozamiejskiej oraz powyżej 0,95 dla fazy miejskiej.



Rys. 5.15. Korelacje iloczynu prędkości i przyspieszenia dodatniego w fazie autostradowej testów RDE i $WLTC_{RDE}$ dla badanych pojazdów wyposażonych: a) w silnik o zapłonie iskrowym, b) w silnik o zapłonie samoczynnym, c) w napęd hybrydowy

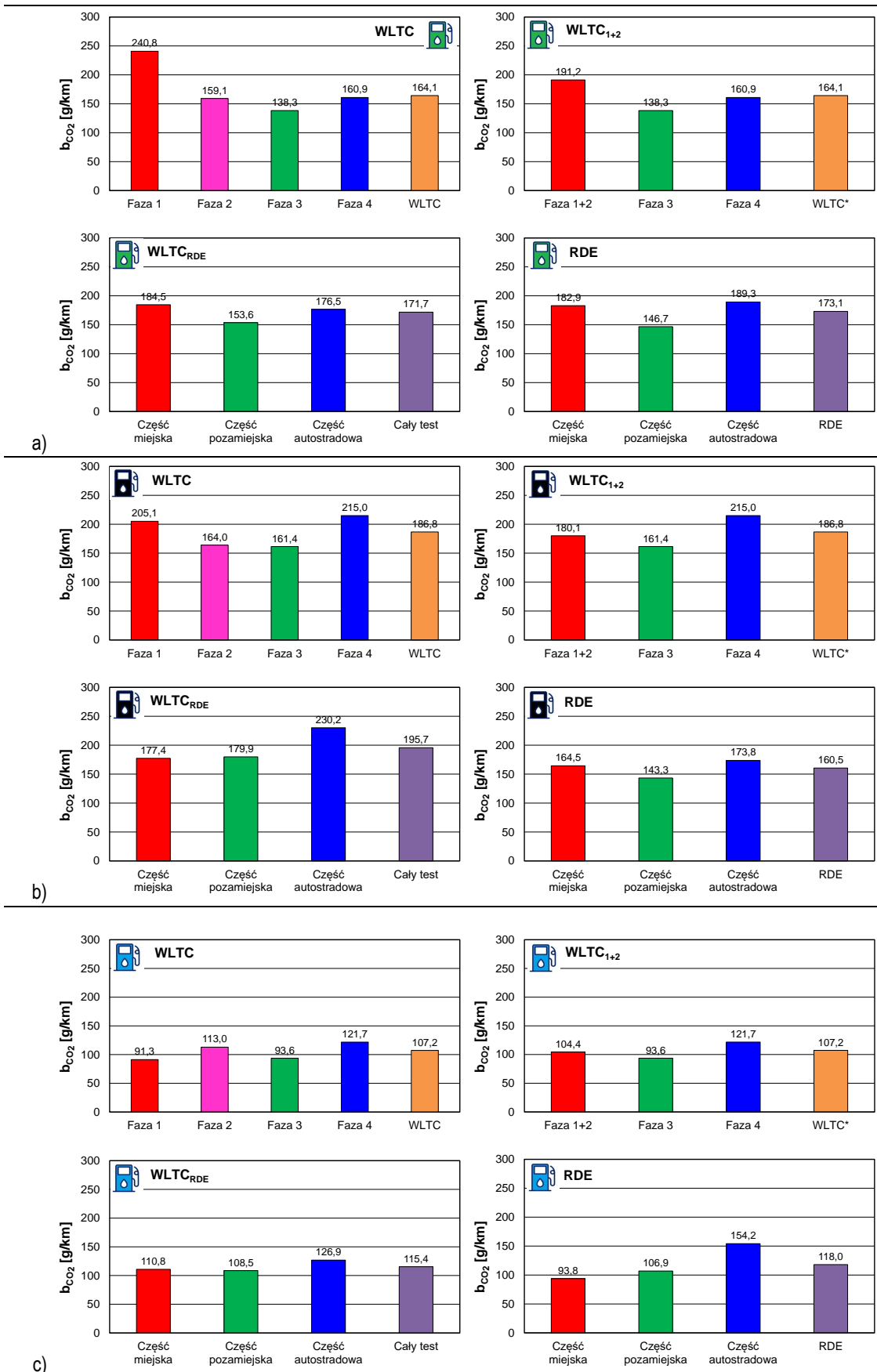
Omówione powyżej dane wskazują, że zauważalne jest podobieństwo uzyskanych wyników warunków dynamicznych (niezależnie od rodzaju napędu). Niestety nie jest to podobieństwo, na podstawie którego można wnioskować o tych samych warunkach ruchu pojazdów. Niemniej jednak możliwa jest dalsza procedura porównywania emisji drogowej (lub natężenia emisji) w wykonanych testach z wykorzystaniem różnych procedur obliczeniowych.

5.2. Szacowanie emisji drogowej zanieczyszczeń w testach drogowych na podstawie danych z testów homologacyjnych

5.2.1. Porównanie emisji drogowej zanieczyszczeń dla wszystkich badanych przypadków

Kolejnym etapem mającym na celu porównanie wyników uzyskanych w testach laboratoryjnym i drogowym było wyznaczenie drogowej emisji spalin w poszczególnych fazach testów według ustalonych wcześniej procedur badawczych ($WLTC$, $WLTC_{1+2}$, $WLTC_{RDE}$ oraz RDE). Na rysunkach 5.16–5.19 przedstawiono wyniki drogowej emisji dwutlenku węgla, tlenku węgla, tlenków azotu oraz liczby cząstek stałych uzyskanej przez badane pojazdy. Wartości końcowe obliczono zgodnie z przyjętymi założeniami czterech procedur pomiarowych. Dane podzielono ze względu na poszczególne fazy procedur oraz wartość uzyskaną w całym teście. Różnice wartości emisji drogowej dwutlenku węgla (rys. 5.16) z fazy 1+2 ($WLTC_{1+2}$) i części miejskiej ($WLTC_{RDE}$) w stosunku do wyników uzyskanych według procedury RDE wynoszą odpowiednio:

- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie iskrowym 5%, 1%,
- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie samoczynnym 9%, 8%,
- dla pojazdu z napędem hybrydowym 11%, 18%.



Rys. 5.16. Drogowa emisja CO₂ w zależności od testu badawczego i zastosowanej procedury obliczeniowej (WLTC, WLTC₁₊₂, WLTC_{RDE}, RDE) dla badanych pojazdów: a) z silnikiem ZI, b) z silnikiem ZS, c) z napędem hybrydowym

W przypadku wartości emisji drogowej dwutlenku węgla z fazy 3 (WLTC₁₊₂ lub WLTC) i części pozamiejskiej (WLTC_{RDE}) w stosunku do wyników uzyskanych według procedury RDE różnice wynoszą odpowiednio:

- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie iskrowym 6%, 5%,
- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie samoczynnym 13%, 26%,
- dla pojazdu z napędem hybrydowym 12%, 1%.

W przypadku wartości emisji drogowej dwutlenku węgla z fazy 4 (WLTC₁₊₂ lub WLTC) i części autostradowej (WLTC_{RDE}) w stosunku do wyników uzyskanych według procedury RDE różnice wynoszą odpowiednio:

- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie iskrowym 15%, 7%,
- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie samoczynnym 24%, 32%,
- dla pojazdu z napędem hybrydowym 21%, 18%.

W przypadku wartości emisji drogowej dwutlenku węgla z całych testów WLTC₁₊₂ i WLTC_{RDE} w stosunku do wyników uzyskanych według procedury RDE różnice wynoszą odpowiednio:

- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie iskrowym 5%, 1%,
- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie samoczynnym 16%, 22%,
- dla pojazdu z napędem hybrydowym 9%, 2%.

Należy zaznaczyć, że końcowa emisja drogowa CO₂ (zużycie paliwa) jest podobna dla badanego typu pojazdu, niezależnie od wykonanych procedur badawczych. Jest to spowodowane głównie tym, że wpływ na zużycie paliwa mają warunki ruchu pojazdu, a ewentualne ich zróżnicowanie nie ma znaczącego wpływu na zmianę zużycie paliwa. Różnice między poszczególnymi fazami nie przekraczają 25% (dla konkretnego typu pojazdu), a charakter zmian między poszczególnymi fazami testów jest zachowany niezależnie od typu napędu (pojazdu).

Na rysunku 5.17 przedstawiono wyniki drogowej emisji tlenku węgla uzyskanej przez badane samochody. Różnice wartości emisji drogowej tlenku węgla z fazy 1+2 (WLTC₁₊₂) i części miejskiej (WLTC_{RDE}) w stosunku do wyników uzyskanych według procedury RDE wynoszą odpowiednio:

- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie iskrowym 17%, 10%,
- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie samoczynnym 4%, 9%,
- dla pojazdu z napędem hybrydowym 16%, 3%.

W przypadku wartości emisji drogowej tlenku węgla z fazy 3 (WLTC₁₊₂ lub WLTC) i części pozamiejskiej (WLTC_{RDE}) w stosunku do wyników uzyskanych według procedury RDE różnice wynoszą odpowiednio:

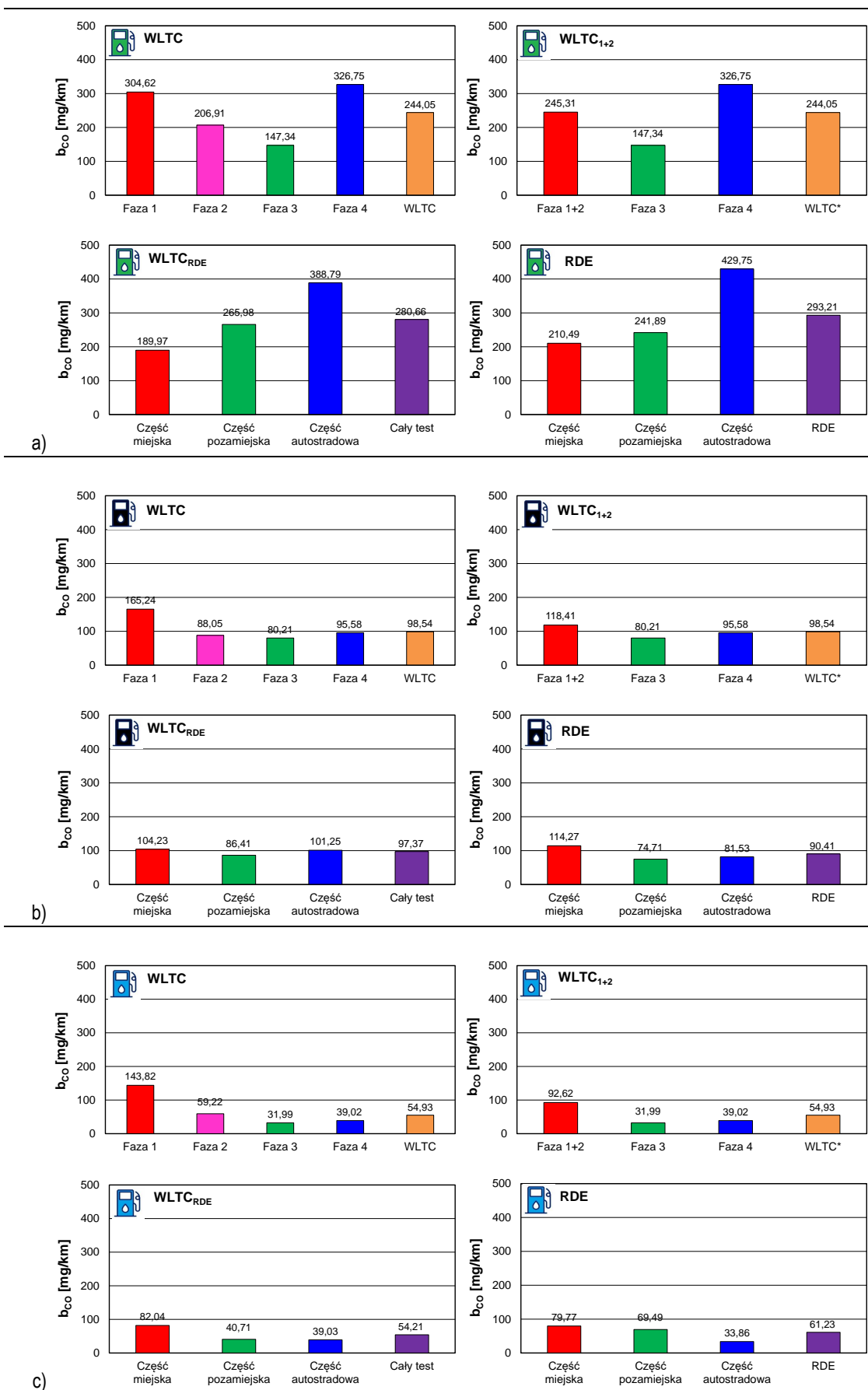
- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie iskrowym 39%, 10%,
- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie samoczynnym 7%, 16%,
- dla pojazdu z napędem hybrydowym 54%, 41%.

W przypadku wartości emisji drogowej tlenku węgla z fazy 4 (WLTC₁₊₂ lub WLTC) i części autostradowej (WLTC_{RDE}) w stosunku do wyników uzyskanych według procedury RDE różnice wynoszą odpowiednio:

- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie iskrowym 24%, 10%,
- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie samoczynnym 17%, 24%,
- dla pojazdu z napędem hybrydowym 15%, 15%.

W przypadku wartości emisji drogowej tlenku węgla z testów WLTC₁₊₂ i WLTC_{RDE} w stosunku do wyników uzyskanych według procedury RDE różnice wynoszą odpowiednio:

- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie iskrowym 17%, 4%,
- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie samoczynnym 9%, 8%,
- dla pojazdu z napędem hybrydowym 10%, 11%.



Rys. 5.17. Drogowa emisja CO w zależności od testu badawczego i zastosowanej procedury obliczeniowej (WLTC, WLTC₁₊₂, WLTC_{RDE}, RDE) dla badanych pojazdów z silnikiem: a) ZI, b) ZS, c) z napędem hybrydowym

Podobnie postąpiono z prezentowaniem obliczonej emisji drogowej tlenków azotu (rys. 5.18). Różnice tej emisji z fazy 1+2 ($WLTC_{1+2}$) i części miejskiej ($WLTC_{RDE}$) w stosunku do wyników uzyskanych według procedury RDE wynoszą odpowiednio:

- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie iskrowym 203%, 27%,
- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie samoczynnym 22%, 46%,
- dla pojazdu z napędem hybrydowym 294%, 13%.

W przypadku wartości emisji drogowej tlenków azotu z fazy 3 ($WLTC_{1+2}$ lub $WLTC$) i części pozamiejskiej ($WLTC_{RDE}$) w stosunku do wyników uzyskanych według procedury RDE różnice wynoszą odpowiednio:

- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie iskrowym 24%, 16%,
- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie samoczynnym 94%, 88%,
- dla pojazdu z napędem hybrydowym 78%, 72%.

W przypadku wartości emisji drogowej tlenków azotu z fazy 4 ($WLTC_{1+2}$ lub $WLTC$) i części autostradowej ($WLTC_{RDE}$) w stosunku do wyników uzyskanych według procedury RDE różnice wynoszą odpowiednio:

- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie iskrowym 53%, 55%,
- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie samoczynnym 55%, 59%,
- dla pojazdu z napędem hybrydowym 13%, 54%.

W przypadku wartości emisji drogowej tlenków azotu z całych testów ($WLTC_{1+2}$ i $WLTC_{RDE}$) w stosunku do wyników uzyskanych według procedury RDE różnice wynoszą odpowiednio:

- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie iskrowym 29%, 38%,
- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie samoczynnym 12%, 57%,
- dla pojazdu z napędem hybrydowym 52%, 10%.

W podobnym charakterze przedstawiono porównywanie liczby cząstek stałych (rys. 5.19). Na rysunku tym przedstawiono wyniki liczby drogowej cząstek stałych uzyskanej przez badane pojazdy w każdej części testu $WLTC$ oraz RDE z podziałem na ich fazy (wraz z procedurami obliczeniowymi $WLTC_{1+2}$ oraz $WLTC_{RDE}$). Różnice wartości łącznej liczby drogowej cząstek stałych z fazy 1 i 2 ($WLTC_{1+2}$) i części miejskiej ($WLTC_{RDE}$) w stosunku do wyników uzyskanych według procedury RDE wynoszą odpowiednio:

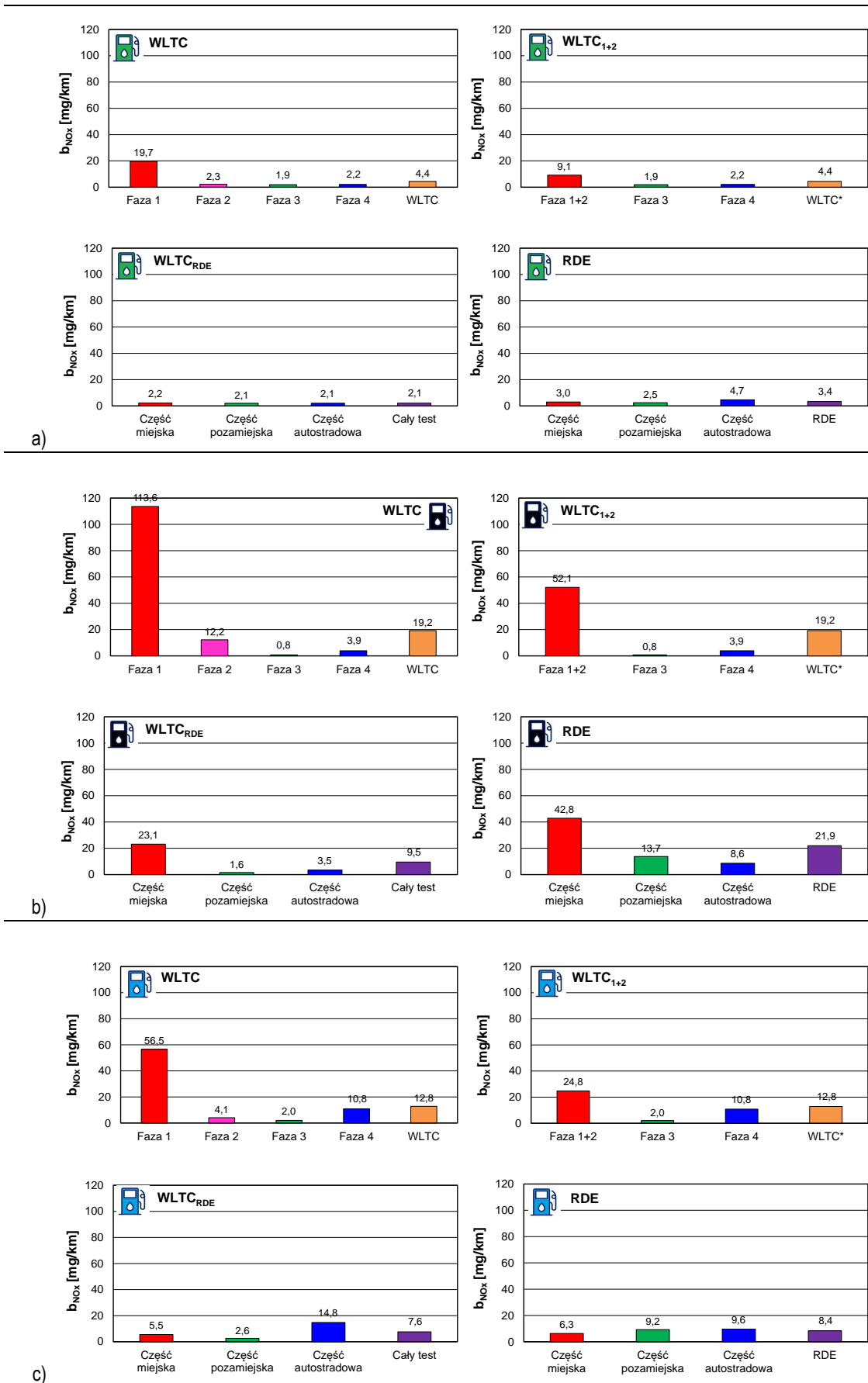
- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie iskrowym 69%, 0%,
- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie samoczynnym 15%, 6%,
- dla pojazdu z napędem hybrydowym 10%, 1%.

W przypadku wartości liczby drogowej cząstek stałych z fazy 3 ($WLTC_{1+2}$ lub $WLTC$) i części pozamiejskiej ($WLTC_{RDE}$) w stosunku do wyników uzyskanych według procedury RDE różnice wynoszą odpowiednio:

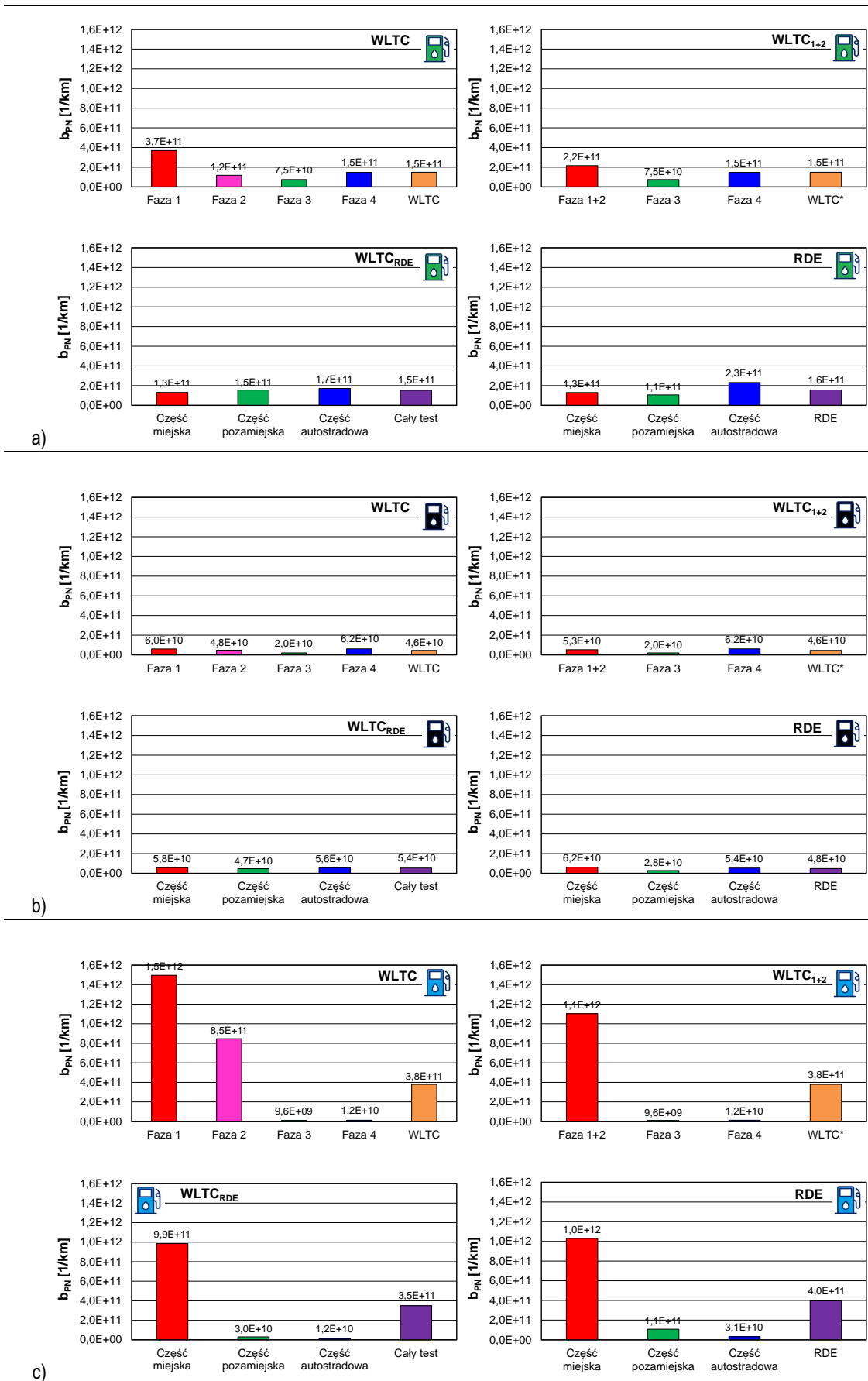
- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie iskrowym 32%, 36%,
- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie samoczynnym 29%, 68%,
- dla pojazdu z napędem hybrydowym 91%, 73%.

W przypadku wartości liczby drogowej cząstek stałych z fazy 4 ($WLTC_{1+2}$ lub $WLTC$) i części autostradowej ($WLTC_{RDE}$) w stosunku do wyników uzyskanych według procedury RDE różnice wynoszą odpowiednio:

- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie iskrowym 35%, 26%,
- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie samoczynnym 11%, 4%,
- dla pojazdu z napędem hybrydowym 61%, 61%.



Rys. 5.18. Drogowa emisja NO_x w zależności od testu badawczego i zastosowanej procedury obliczeniowej (WLTC, WLTC₁₊₂, WLTC_{RDE}, RDE) dla badanych pojazdów z silnikiem: a) ZI, b) ZS, c) z napędem hybrydowym



Rys. 5.19. Liczba drogowych cząstek stałych w zależności od testu badawczego i zastosowanej procedury obliczeniowej (WLTC, WLTC₁₊₂, WLTC_{RDE}, RDE) dla badanych pojazdów z silnikiem: a) ZI, b) ZS, c) z napędem hybrydowym

W przypadku wartości liczby drogowej cząstek stałych z całych testów ($WLTC_{1+2}$ i $WLTC_{RDE}$) w stosunku do wyników uzyskanych według procedury RDE różnice wynoszą odpowiednio:

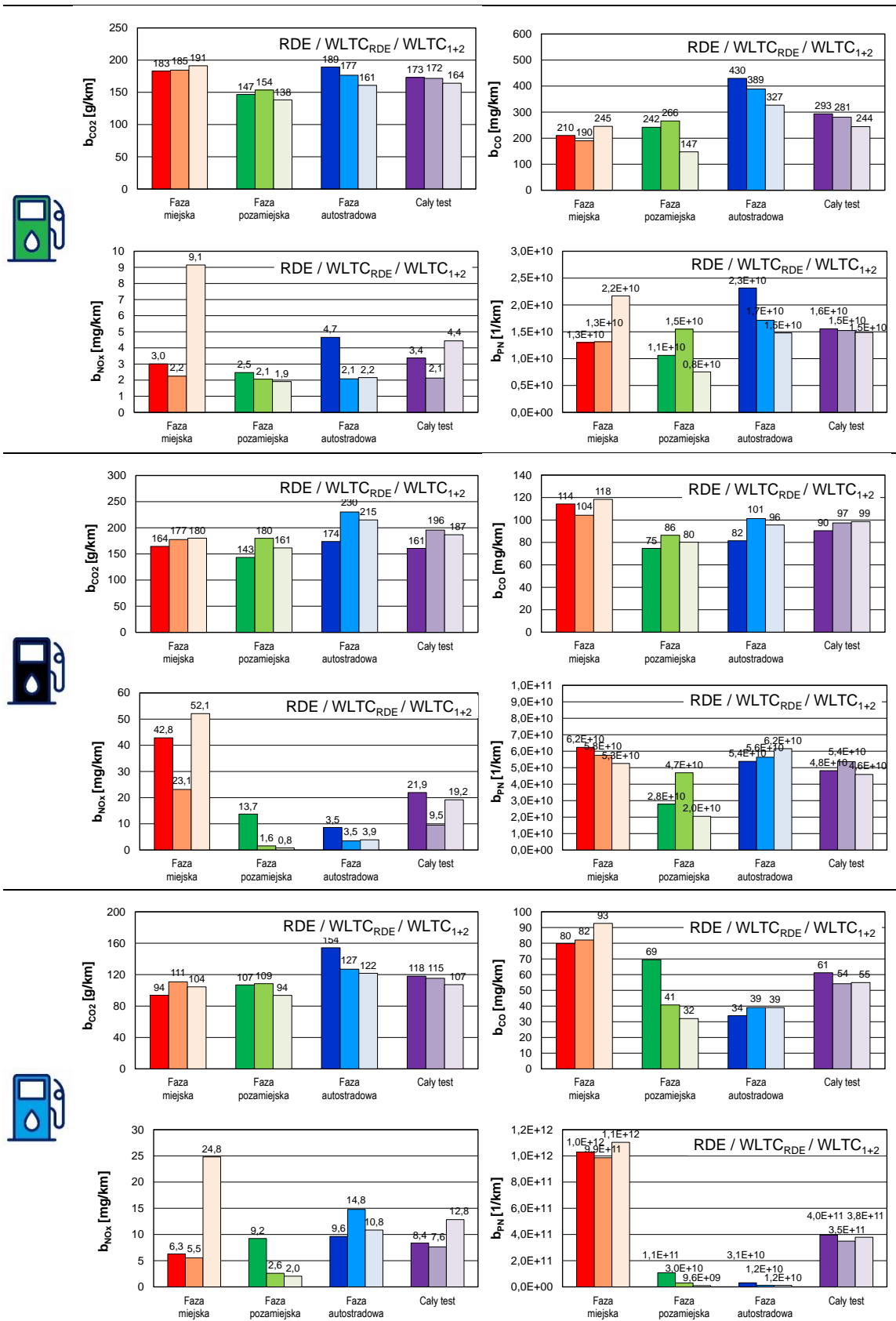
- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie iskrowym 6%, 6%,
- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie samoczynnym 4%, 13%,
- dla pojazdu z napędem hybrydowym 5%, 13%.

Komentarza wymaga uzyskiwanie znacznych różnic w wynikach liczby drogowej cząstek stałych przez badane pojazdy. Pojazdy wyposażone w silniki o zapłonie iskrowym i samoczynnym były wyposażone w filtr cząstek stałych – z tego powodu wartości odnotowywane w testach są znacząco mniejsze niż limit homologacyjny ($6 \cdot 10^{11}$ 1/km), natomiast pojazd z napędem hybrydowym nie był wyposażony w taki system w układzie oczyszczania spalin. Z tego powodu liczba cząstek stałych dla pojazdu hybrydowego jest kilkakrotnie większa niż dla pozostałych typów pojazdów, jednakże i tak nie przekracza dopuszczalnych wartości ustalonych limitem.

Przedstawione porównanie danych dotyczyło wartości końcowych emisji drogowej w testach emisyjnych, jednak to nie doprowadziło do zadowalających rezultatów. Kolejnym etapem pracy jest więc analiza poszczególnych danych w teście WLTC według procedur obliczeniowych uwzględniających połączenie 1 i 2 fazy oraz podział na fazy według procedury RDE.

Zbiorcze przedstawienie uzyskanych wyników (rys. 5.20), w podziale na fazę miejską, pozamiejską i autostradową w wykonywanych testach, uwidacznia zbieżność uzyskiwanych wyników. Wyniki emisji drogowej zanieczyszczeń uzyskiwane dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie iskrowym najbardziej są zbliżone w odniesieniu do emisji drogowej dwutlenku węgla. Różnice w tym przypadku są niewielkie, a przedział uzyskiwanych wyników to: dla fazy miejskiej 183–191 g/km, dla fazy pozamiejskiej 147–154 g/km, dla fazy autostradowej 161–189 g/km oraz dla całego testu 164–173 g/km. Różnice w emisji drogowej tlenku węgla były znaczące: największą wartością charakteryzowała się faza autostradowa (327–430 mg/km), a najmniejszą – faza pozamiejska (147–242 mg/km). Emisja drogowa tlenków azotu była największa w fazie 1 i 2 testu WLTC i wynosiła 3-krotnie więcej niż w fazie miejskiej testu RDE oraz według procedury $WLTC_{RDE}$. Liczba drogowa cząstek stałych najbardziej była zbliżona do testu RDE podczas fazy miejskiej i w całym teście podczas wyznaczania jej według procedury $WLTC_{RDE}$.

Wyniki emisji drogowej zanieczyszczeń uzyskiwane dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie samoczynnym są podobne do siebie (niezależnie od wykonywanego testu) w odniesieniu do emisji drogowej dwutlenku węgla oraz tlenku węgla. Różnice w emisji drogowej dwutlenku węgla są niewielkie, a przedział uzyskiwanych wyników to: dla fazy miejskiej 164–180 g/km, dla fazy pozamiejskiej 143–180 g/km, dla fazy autostradowej 174–215 g/km oraz dla całego testu 161–196 g/km. Różnice w emisji drogowej tlenku węgla to: dla fazy miejskiej 104–118 mg/km, dla fazy pozamiejskiej 75–86 mg/km, dla fazy autostradowej 82–101 mg/km oraz dla całego testu 90–99 mg/km. Emisja drogowa tlenków azotu była największa w fazie miejskiej (przedział 23–52 mg/km), w pozostałych fazach nie przekraczała, odpowiednio, 14 mg/km, 4 mg/km oraz 22 mg/km, w fazie pozamiejskiej, autostradowej i w całym teście badawczym. Największe (poza fazą miejską) wartości odnotowano w standardowym teście RDE, a najmniejsze – wyznaczone w teście WLTC według procedury RDE. Liczba drogowa cząstek stałych najbardziej była zbliżona do testu RDE podczas fazy miejskiej i w całym teście podczas wyznaczania jej według procedury $WLTC_{RDE}$.



Rys. 5.20. Emisja drogowa zanieczyszczeń w zależności od testu badawczego z zastosowaniem procedury dzielącej test na fazę miejską, pozamiejską i autostradową dla badanych pojazdów

Wyniki emisji drogowej zanieczyszczeń uzyskiwane dla pojazdu wyposażonego w napęd hybrydowy były zbliżone w odniesieniu do emisji drogowej dwutlenku węgla, tlenku węgla oraz liczby cząstek stałych. Różnice w pierwszym przypadku są niewielkie niezależnie od procedury badawczej, a przedział uzyskiwanych wyników to:

- dla fazy miejskiej 94–111 g/km,
- dla fazy pozamiejskiej 94–109 g/km,
- dla fazy autostradowej 122–154 g/km,
- dla całego testu 107–118 g/km.

Różnice w emisji drogowej tlenku węgla były większe (szczególnie w fazie pozamiejskiej), a wyniki emisji drogowej wynosiły:

- dla fazy miejskiej 80–93 mg/km,
- dla fazy pozamiejskiej 32–69 mg/km,
- dla fazy autostradowej 34–39 mg/km,
- dla całego testu 54–61 mg/km.

Emisja drogowa tlenków azotu była największa w fazie 1 i 2 testu WLTC i wynosiła 4-krotnie więcej niż w fazie miejskiej testu RDE oraz według procedury WLTC_{RDE}. Najmniejsze różnice w emisji drogowej tlenków azotu odnotowano dla fazy autostradowej oraz w całym teście. Liczba drogowa cząstek stałych była zbliżona do siebie odpowiednio w każdej fazie testów; największa występowała w fazie miejskiej i była około 10–20 razy większa niż w fazie pozamiejskiej i autostradowej. Wartości końcowe były zbliżone do siebie (przedział 3,5–4,0·10¹¹ 1/km).

5.2.2. Porównanie emisji drogowej zanieczyszczeń zgodnie z procedurą badań drogowych

Obecna procedura RDE wymaga porównywania wyników emisji drogowej w fazie miejskiej testu RDE oraz w całym teście z wartościami dopuszczalnymi. Pozostałe fazy nie są brane osobno pod uwagę, a jedynie mają udział w wyznaczaniu drogowej emisji całkowitej. Z tego też względu porównano wyniki emisji końcowych w części miejskiej testu WLTC_{RDE}, WLTC₁₊₂ z wartościami testu RDE (rys. 5.21). Wartości testu WLTC_{RDE} potraktowano jako odniesienie (100%). Wstępne porównanie otrzymanych wyników sugeruje, że wyniki otrzymane w teście WLTC₁₊₂ znacząco różnią się od wyników według procedury RDE, szczególnie w fazie miejskiej prowadzonych testów.

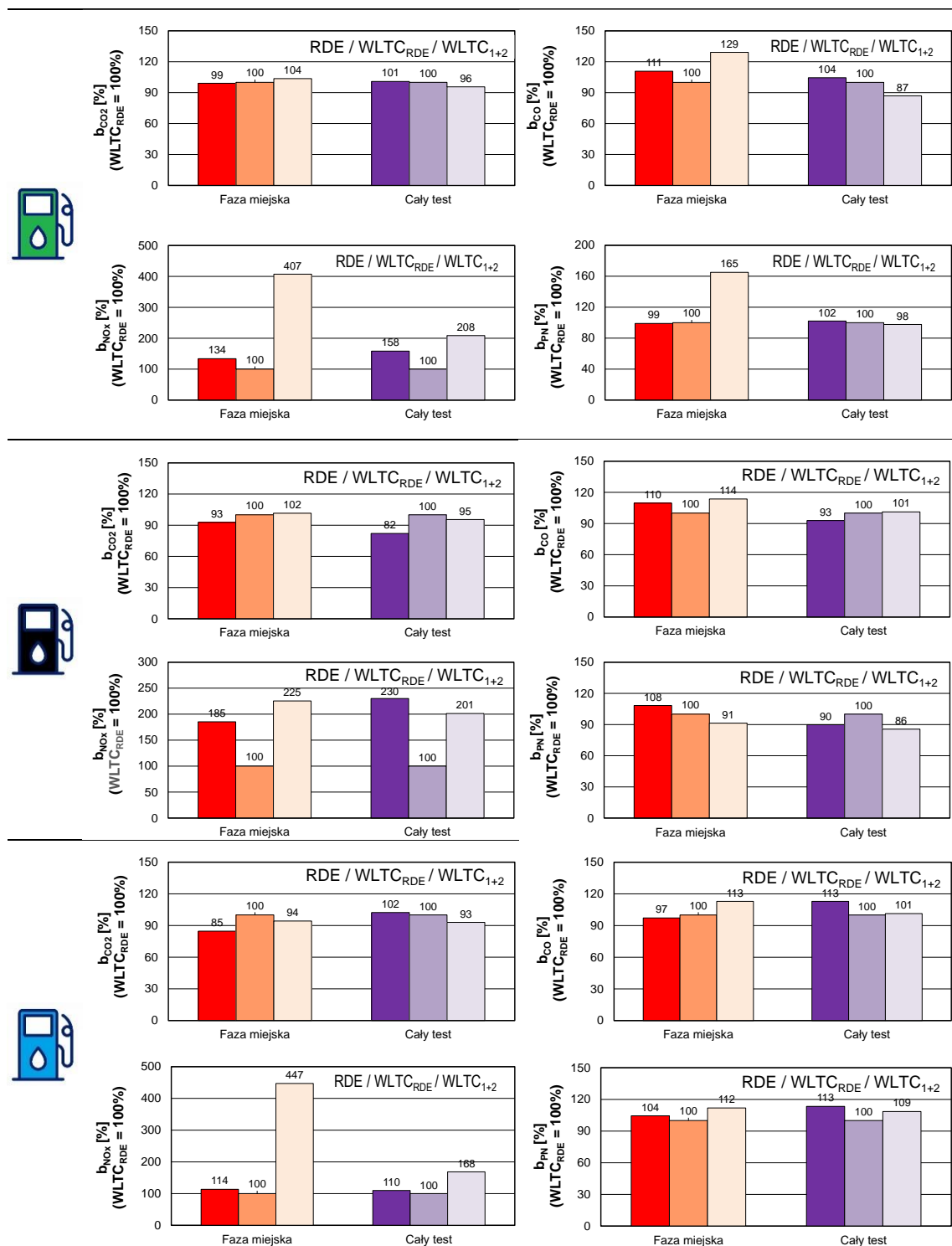
Dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie iskrowym najlepsze odzwierciedlenie testu RDE testem WLTC_{RDE} występuje w fazie miejskiej oraz w całym teście dla emisji drogowej:

- dwutlenku węgla (różnica względna to 1%),
- tlenku węgla (różnica względna to, odpowiednio, 11% i 4%)
- liczby cząstek stałych (różnica względna to, odpowiednio, 1% i 2%).

W przypadku emisji drogowej tlenków azotu różnice są większe i wynoszą: w fazie miejskiej – 34%, a w całym teście 58%.

Dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie samoczynnym względne różnice są większe niż dla silnika ZI i wynoszą: dla emisji drogowej dwutlenku węgla – 7% i 18%, tlenku węgla 10% i 7%, tlenków azotu 85% i 130% oraz liczby cząstek stałych 8% i 10%, odpowiednio w fazie miejskiej i w całym teście.

Dla pojazdu hybrydowego określenie emisji drogowej zanieczyszczeń w teście RDE z wykorzystaniem wyników otrzymanych w teście WLTC_{RDE} obarczone jest następującymi różnicami: w przypadku dwutlenku węgla – 15% i 2%, tlenku węgla – 3% i 13%, tlenków azotu 14% i 10% oraz liczby cząstek stałych – 4% i 13%, odpowiednio w fazie miejskiej i w całym teście.



Rys. 5.21. Względna różnica emisji drogowej zanieczyszczeń w zależności od testu badawczego z zastosowaniem procedury dzielącej test na fazę miejską, pozamiejską i autostradową dla badanych pojazdów; jako odniesienie przyjęto wyniki testu WLTC_{RDE}

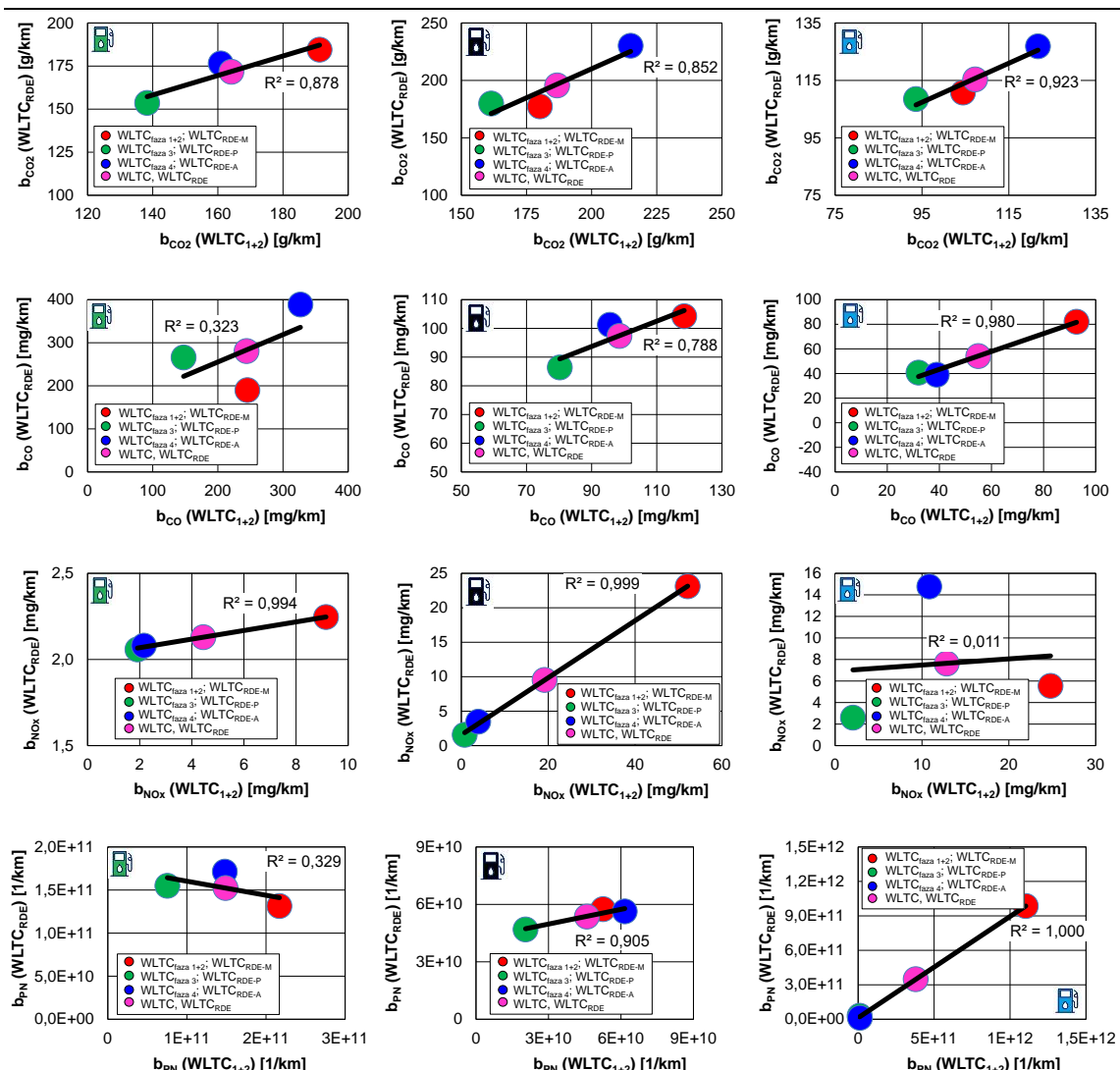
5.2.3. Korelacje wyników emisji drogowej zanieczyszczeń między poszczególnymi testami

Korelacje wyników emisji drogowej zanieczyszczeń między poszczególnymi testami wykonano w trzech etapach, w których dokonano porównania nie tylko wartości koń-

cowych, ale również w poszczególnych fazach (lub ich grupach) zgodnie z obowiązującym nazewnictwem w pracy:

- etap I: porównanie emisji drogowej zanieczyszczeń w teście WLTC według procedury obliczeniowej łączącej fazę 1 i 2 z emisją drogową zanieczyszczeń w teście WLTC według procedury obliczeniowej RDE,
- etap II: porównanie emisji drogowej zanieczyszczeń w teście WLTC według procedury obliczeniowej łączącej fazę 1 i 2 z emisją drogową zanieczyszczeń w teście RDE,
- etap III: porównanie emisji drogowej zanieczyszczeń w teście WLTC według procedury obliczeniowej RDE z emisją drogową zanieczyszczeń w teście RDE.

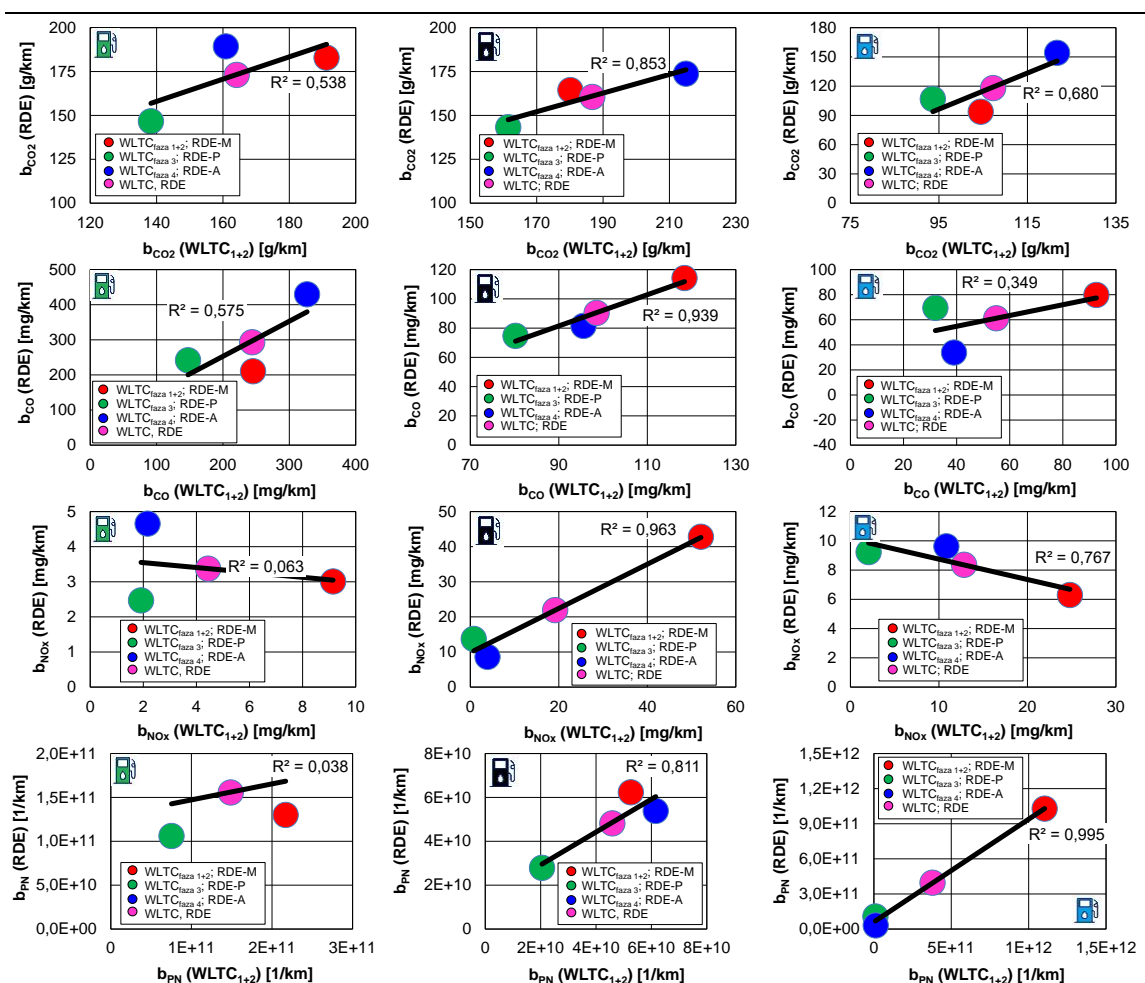
Porównanie uzyskanych wartości emisji drogowej w teście WLTC z wykorzystaniem dwóch metod obliczeniowych: pierwszej – łączącej fazę 1 i 2 testu oraz drugiej – wykorzystującej podział faz według procedury RDE przedstawiono na rys. 5.22 (etap I). Wynika z niego, że emisja drogowa dwutlenku węgla wyznaczona tymi dwoma sposobami jest zbliżona do siebie ($R^2 > 0,85$) niezależnie od rodzaju badanego pojazdu. Również duże wartości współczynnika determinacji otrzymano podczas porównania wartości emisji drogowej tlenu węgla dla pojazdu z silnikiem ZS oraz dla pojazdu z napędem



Rys. 5.22. Porównanie emisji drogowej zanieczyszczeń w teście WLTC wyznaczonej z wykorzystaniem procedury łączącej 1 i 2 fazę testu oraz procedury uwzględniającej podział faz według zasad RDE dla pojazdów z silnikiem ZI, ZS oraz z napędem hybrydowym

hybrydowym ($R^2 > 0,78$). Emisja drogowa tlenków azotu określona dla procedury WLTC₁₊₂ wykazuje dużą zgodność w odniesieniu do procedury WLTC_{RDE} ($R^2 > 0,96$), z wyłączeniem pojazdu z napędem hybrydowym, dla którego takiej zależności nie stwierdzono. Również satysfakcjonujące wyniki uzyskano dla liczby cząstek stałych – dobrą zgodność otrzymano dla pojazdu wyposażonego w silnik ZS oraz dla pojazdu z napędem hybrydowym.

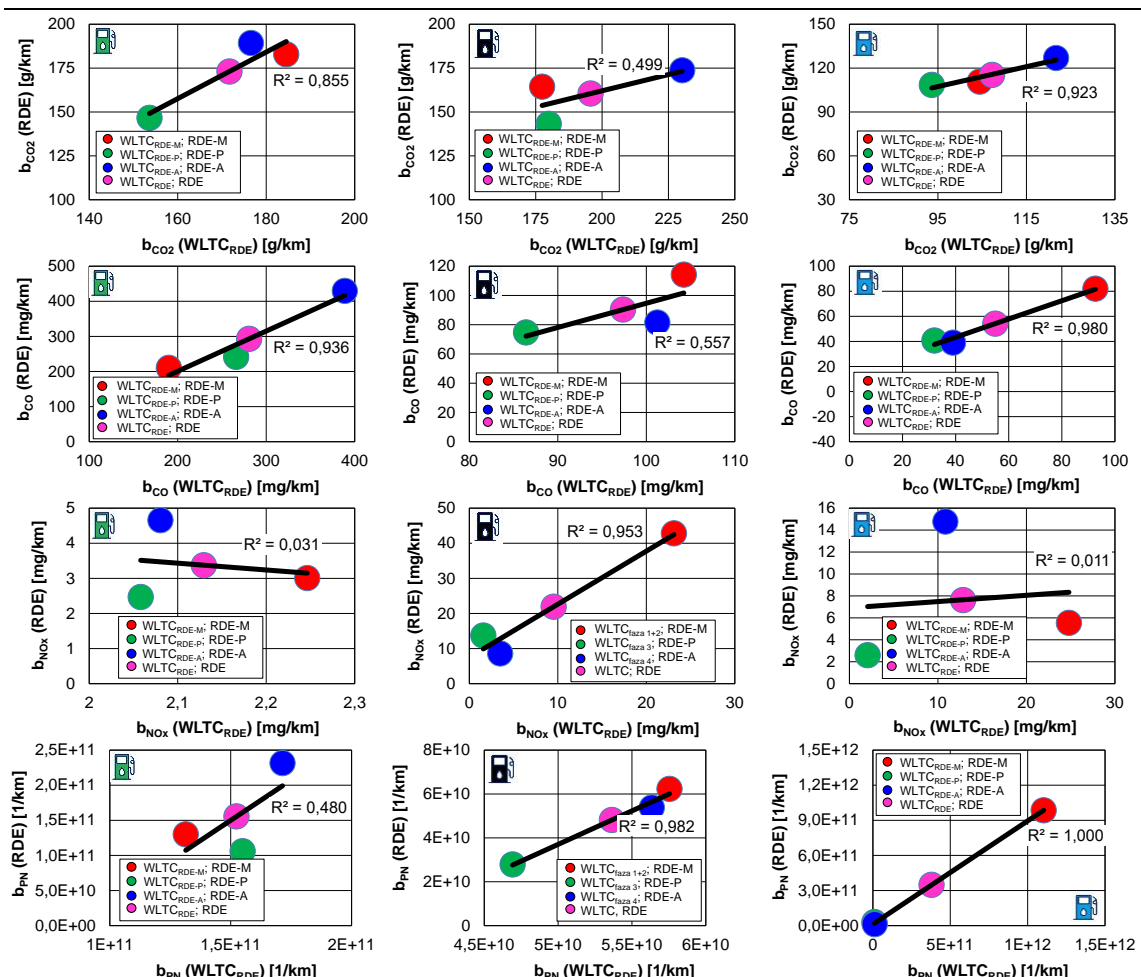
W drugim etapie porównano emisję drogową zanieczyszczeń w teście WLTC według procedury obliczeniowej łączącej fazę 1 i 2 z emisją drogową zanieczyszczeń w poszczególnych fazach i całym teście RDE (rys. 5.23). Największą wartość współczynnika determinacji dla emisji drogowej dwutlenku węgla w rozpatrywanych testach uzyskano dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie samoczynnym (0,853), natomiast dla pozostałych pojazdów uzyskano mniejszą wartość; 0,538 – dla pojazdu wyposażonego w silnik ZI oraz 0,68 – dla pojazdu z napędem hybrydowym. Porównując emisję drogową tlenku węgla można zaobserwować największą wartość współczynnika determinacji również dla pojazdu z silnikiem o zapłonie samoczynnym (0,939), natomiast najmniejszą – dla pojazdu z napędem hybrydowym (0,3849). Podobna sytuacja ma miejsce przy porównywaniu współczynników determinacji podczas analizy emisji drogowej tlenków azotu – największa wartość (0,963) dotyczy również pojazdu z silnikiem ZS, a najmniejsza dla pojazdu z silnikiem ZI. Odmienne wyniki uzyskano rozpatrując liczbę cząstek stałych, gdzie uzyskano bardzo dużą zgodność otrzymanych wyników między testami.



Rys. 5.23. Porównanie emisji drogowej zanieczyszczeń w teście WLTC wyznaczonej z wykorzystaniem procedury łączącej 1 i 2 fazę testu oraz testu RDE dla pojazdów: z silnikiem ZI, ZS oraz z napędem hybrydowym

Rozpatrywane wyniki emisji drogowej zanieczyszczeń w testach WLTC₁₊₂ oraz RDE uzyskały największą zgodność dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie samoczynnym. Natomiast wyniki emisji drogowej zanieczyszczeń dla innych pojazdów charakteryzowały się niewielką zgodnością.

W trzecim etapie analizy dokonano porównania emisji drogowej zanieczyszczeń w teście WLTC według procedury obliczeniowej RDE z emisją drogową zanieczyszczeń w teście RDE (rys. 5.24). Duże wartości współczynnika determinacji uzyskano w odniesieniu do emisji drogowej dwutlenku węgla, niezależnie od rodzaju pojazdu (0,499–0,923). Niestety zależność jednoznaczna (największa wartość współczynnika determinacji) występowała jedynie dla pojazdu z napędem hybrydowym. W przypadku emisji drogowej tlenku węgla największe wartości współczynnika determinacji uzyskano przy porównaniu testów dla pojazdów: z silnikiem ZI (0,936) oraz z napędem hybrydowym (0,980). Dla pojazdu z silnikiem ZS uzyskano wartość o połowę mniejszą (0,557), co nie jest wynikiem zadowalającym. W przypadku emisji drogowej tlenków azotu jedynie dla pojazdu z silnikiem ZS można wnioskować o jej wartości w teście RDE na podstawie testu WLTC i procedury RDE (oznaczenie WLTC_{RDE}); w tym przypadku współczynnik determinacji wynosił 0,953. Rozpatrując liczbę cząstek stałych – najlepsze dopasowanie testów dotyczy pojazdu hybrydowego i pojazdu z silnikiem ZS.



Rys. 5.24. Porównanie emisji drogowej zanieczyszczeń w teście WLTC wyznaczonej z wykorzystaniem procedury uwzględniającej podział faz według zasad RDE oraz testu RDE dla pojazdów: z silnikiem ZI, ZS oraz z napędem hybrydowym

Podsumowując, brak jest jednoznacznych przesłanek do zastępowania końcowych wyników emisji drogowej zanieczyszczeń w testach drogowych (RDE) wynikami uzyskiwanymi w poszczególnych fazach (określanych również według procedury RDE) w teście homologacyjnym WLTC. Zgodność poszczególnych wyników musiałaby być potwierdzana dla każdego konkretnego przypadku badawczego. Należy zauważyć jednocześnie, że uzyskiwana duża wartość współczynnika determinacji dla konkretnego badania nie oznacza, że można przyjąć bezpośrednio wynik z testu WLTC jako wartość, którą otrzyma się w teście RDE. Współczynnik determinacji informuje jedynie, że wartości są proporcjonalne, ale każdorazowo należy określić równanie, które zostanie wykorzystane do przeliczenia wartości z testu $WLTC_{RDE}$ na wartości szacowane w teście RDE.

W związku z tym, że nie została potwierdzona uogólniona możliwość szacowania emisji drogowej zanieczyszczeń w warunkach drogowych na podstawie testu homologacyjnego, konieczne było podjęcie kolejnej analizy, jaką było opracowanie zgodności wyników badań na podstawie natężenia emisji zanieczyszczeń, co uczyniono w następnym podrozdziale pracy.

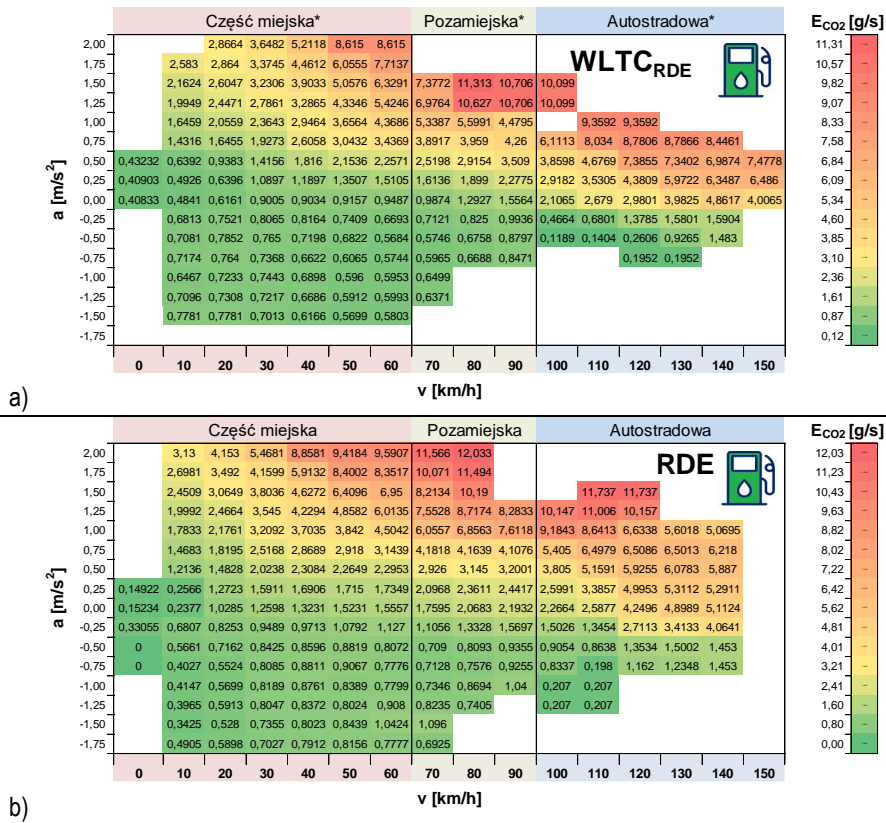
5.2.4. Wykorzystanie natężenia emisji zanieczyszczeń w teście homologacyjnym do szacowania wyników w teście drogowym

Kolejnym etapem prac była szczegółowa analiza natężenia emisji dwutlenku węgla, tlenu węgla, tlenków azotu oraz liczby cząstek stałych względem parametrów dynamicznych pojazdu (prędkości i przyspieszenia). W tym celu wykorzystano dane natężenia emisji poszczególnych związków szkodliwych uzyskane w procedurach $WLTC_{RDE}$ oraz RDE dla badanych rodzajów napędu. Otrzymane wyniki przedstawiono jako macierze natężenia emisji we współrzędnych prędkość–przyspieszenie pojazdu z podziałem ze względu na fazę testu.

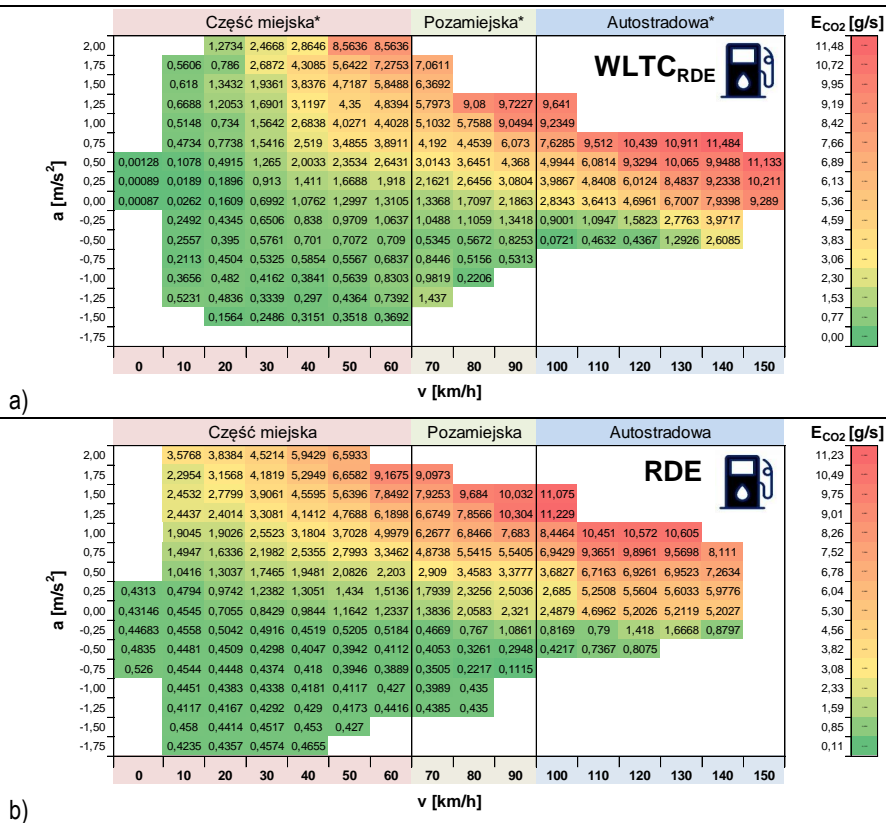
Analizując natężenie emisji dwutlenku węgla z badanych pojazdów można zauważyć dość dużą zbieżność uzyskanych wyników (rys. 5.25–5.27). Dla pojazdu konwencjonalnego wyposażonego w silnik o zapłonie iskrowym największe wartości natężenia emisji dwutlenku węgla (10–12 g/s) występują w zakresie prędkości 80–110 km/h i przyspieszenia 1,25–1,5 m/s² w teście $WLTC_{RDE}$, a w teście RDE są to przedziały prędkości 70–90 km/h i przyspieszenia 1,75–2 m/s² a także przedziały $v = 110–130$ km/h; $a = 1,5$ m/s² (rys. 5.25). Zakres zmienności natężenia emisji dwutlenku węgla jest dla obu testów bardzo zbliżony (maksymalna wartość to około 12 g/s). Podobne są również wartości natężenia emisji dwutlenku węgla w przedziałach faz: miejskiej, pozamiejskiej i autostradowej, co stwarza możliwości, że wzajemne porównanie wartości tego parametru w dwóch różnych testach będzie zbliżone.

Analiza natężenia emisji dwutlenku węgla dla pojazdu z silnikiem o zapłonie samoczynnym (rys. 5.26), uwidacznia, że największe wartości występują w zakresie prędkości 130–160 km/h i przyspieszenia z zakresu 0,5–0,75 m/s² (w teście $WLTC_{RDE}$), a w teście RDE jest to zakres prędkości 100–140 km/h i przyspieszenia 1,0–1,5 m/s². Wartości zmian natężenia emisji tego składnika to przedział od 0 g/s do 11,5 g/s – niezależnie od testu badawczego. W tym przypadku również występują podobna tendencja zmian w obu testach badawczych.

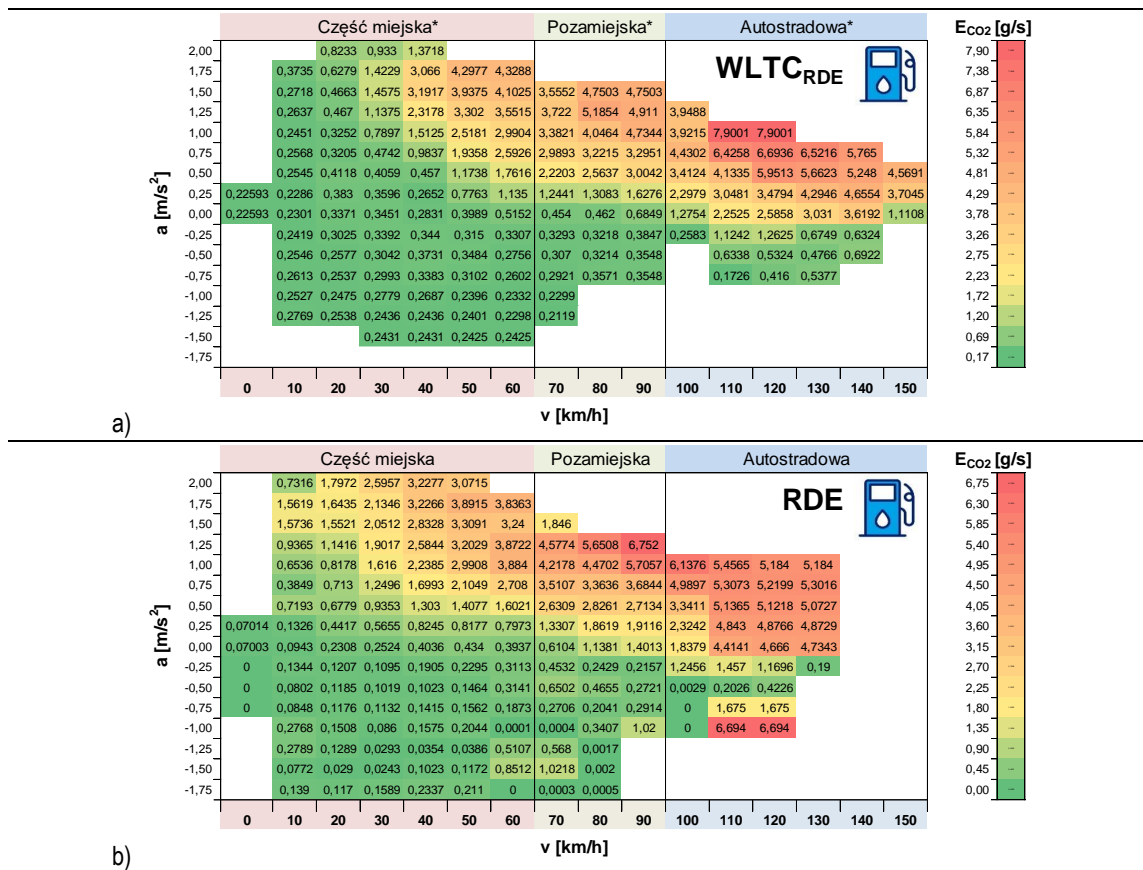
Dla pojazdu hybrydowego uzyskano najmniejsze wartości natężenia emisji dwutlenku węgla (rys. 5.27), a wartości ekstremalne uzyskano w zakresie prędkości 110–130 km/h i przyspieszenia 1,0–1,25 m/s² (w teście $WLTC_{RDE}$) oraz $V = 80–90$ km/h i $a = 1,0–1,5$ m/s² (w teście RDE w fazie pozamiejskiej).



Rys. 5.25. Natężenie emisji dwutlenku węgla we współrzędnych prędkości i przyspieszenie pojazdu z silnikiem o zapłonie iskrowym uzyskane według procedur WLTC_{RDE} (a) oraz RDE (b)



Rys. 5.26. Natężenie emisji dwutlenku węgla we współrzędnych prędkości i przyspieszenie pojazdu z silnikiem o zapłonie samoczynnym uzyskane według procedur WLTC_{RDE} (a) oraz RDE (b)

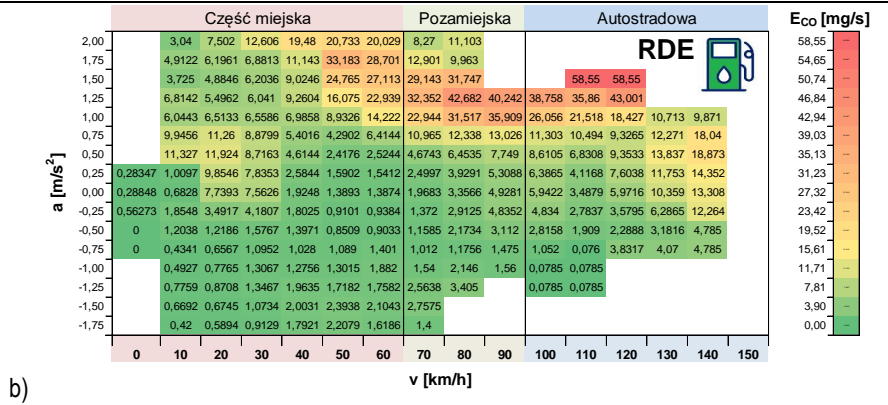
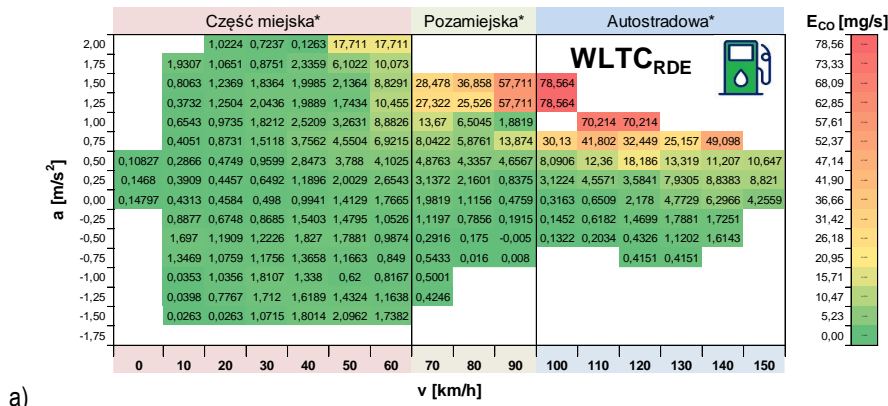


Rys. 5.27. Natężenie emisji dwutlenku węgla we współrzędnych prędkości i przyspieszenia pojazdu z napędem hybrydowym uzyskane według procedur WLTC_{RDE} (a) oraz RDE (b)

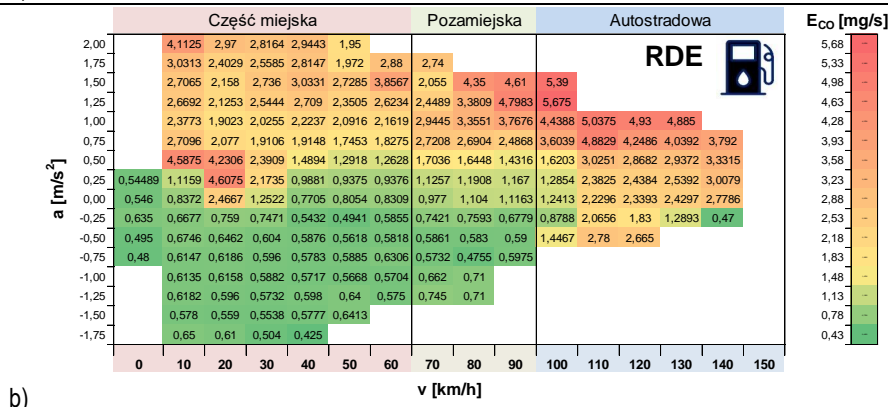
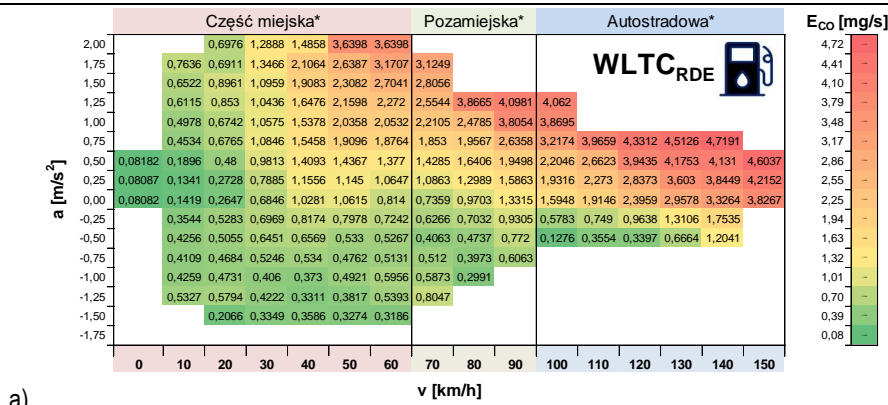
Analizując natężenie emisji tlenku węgla z badanych pojazdów można zauważyć dużą zbieżność uzyskanych wyników, jednakże jest ona mniejsza niż w przypadku związku poprzedniego (rys. 5.28–5.30). Dla pojazdu konwencjonalnego wyposażonego w silnik o zapłonie iskrowym największe wartości natężenia emisji tlenku węgla (ok. 80 mg/s) występują w zakresie prędkości 100–110 km/h i przyspieszenia 1,25–1,5 m/s² w teście WLTC_{RDE}, a w teście RDE są to przedziały prędkości 110–130 km/h i przyspieszenia 1,5–1,75 m/s² (rys. 5.28). Zakres zmienności natężenia emisji tlenku węgla jest większy dla testu WLTC_{RDE} – ok. 80 mg/s, a dla testu RDE jest to wartość ok. 60 mg/s.

Analiza natężenia emisji tlenku węgla dla pojazdu z silnikiem o zapłonie samoczynnym (rys. 5.29), uwidacznia, że wartości te są zdecydowanie mniejsze – a ekstremalne występują w zakresie prędkości 130–160 km/h i przyspieszenia z zakresu 0,75–1,0 m/s² (w teście WLTC_{RDE}), a w teście RDE jest to zakres prędkości 100–110 km/h i przyspieszenia 1,25–1,5 m/s². Wartości zmian natężenia emisji tego składnika to przedział od 0 mg/s do 4,7 mg/s (dla testu WLTC_{RDE}) oraz do 5,7 mg/s (w teście RDE).

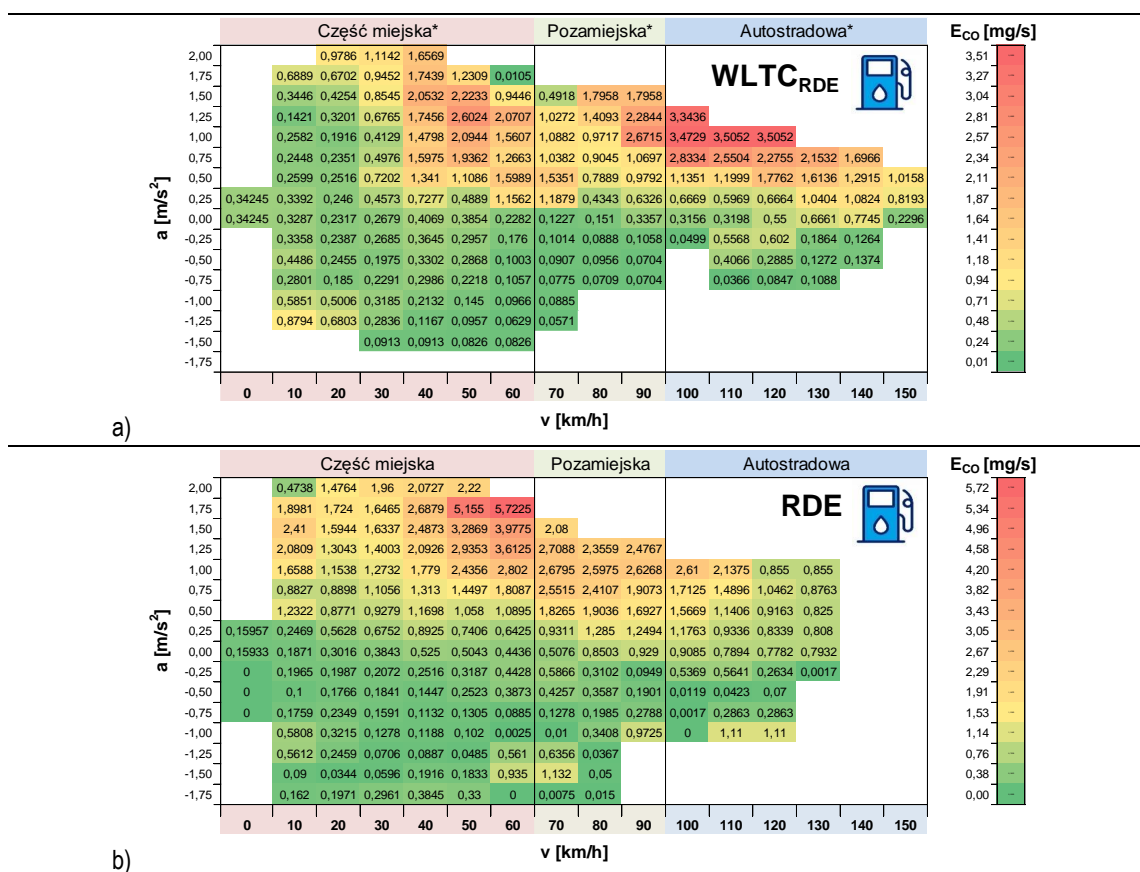
Dla pojazdu hybrydowego uzyskano najmniejsze wartości natężenia emisji tlenku węgla (rys. 5.30), a wartości ekstremalne uzyskano w zakresie prędkości 100–130 km/h i przyspieszenia 1,25–1,5 m/s² (w teście WLTC_{RDE}) oraz $V = 100\text{--}110\text{ km/h}$ i $a = 1,25\text{--}1,5\text{ m/s}^2$ (w teście RDE w fazie miejskiej). Charakterystyka pracy silnika hybrydowego sprawia, że nie występuje znaczące podobieństwo w natężeniu emisji tlenku węgla zarówno w całym teście badawczym, jak i w poszczególnych jego częściach.



Rys. 5.28. Natężenie emisji tlenku węgla we współrzędnych prędkość i przyspieszenie pojazdu z silnikiem o zapłonie iskrowym uzyskane według procedur WLTC_{RDE} (a) oraz RDE (b)



Rys. 5.29. Natężenie emisji tlenku węgla we współrzędnych prędkość i przyspieszenie pojazdu z silnikiem o zapłonie samoczynnym uzyskane według procedur WLTC_{RDE} (a) oraz RDE (b)

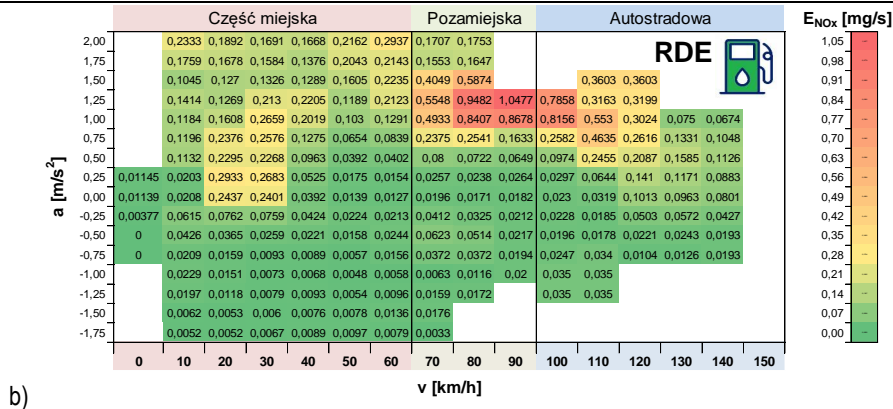
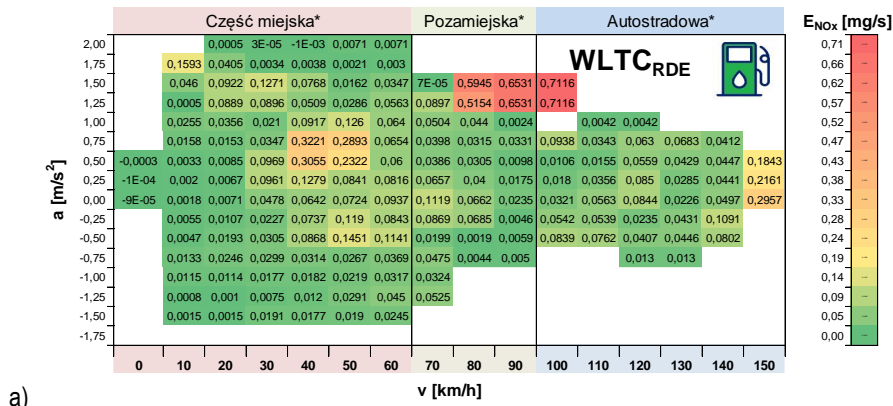


Rys. 5.30. Natężenie emisji tlenku węgla we współrzędnych prędkość i przyspieszenie pojazdu z napędem hybrydowym uzyskane według procedur WLTC_{RDE} (a) oraz RDE (b)

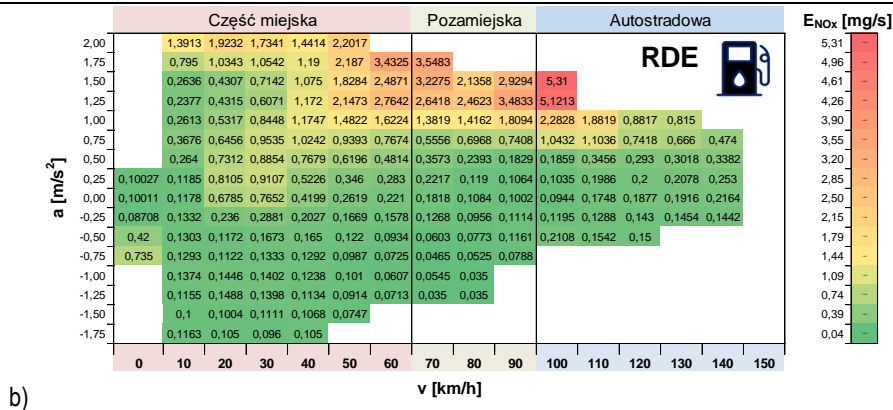
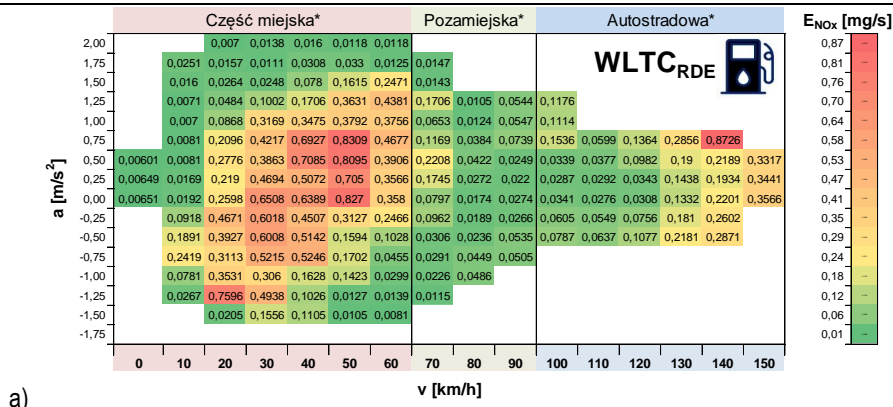
Analizując natężenie emisji tlenków azotu z badanych pojazdów można zauważyć dużą zbieżność uzyskanych wyników, szczególnie wartości maksymalnych i tylko dla pojazdu z silnikiem o zapłonie iskrowym (rys. 5.31–5.33). Dla pojazdu konwencjonalnego wyposażonego w silnik o zapłonie iskrowym największe wartości natężenia emisji tlenków azotu (ok. 0,7 mg/s) występują w zakresie prędkości 100–110 km/h i przyspieszenia 1,25–1,5 m/s² w teście WLTC_{RDE}, a w teście RDE są to przedziały prędkości 90–100 km/h i przyspieszenia 1,25–1,5 m/s² (rys. 5.31). Zakres zmienności natężenia emisji tlenku węgla jest większy dla testu RDE – ok. 1,05 mg/s, a dla testu WLTC_{RDE} jest to wartość ok. 0,7 mg/s.

Analiza natężenia emisji tlenków azotu dla pojazdu z silnikiem o zapłonie samoczynnym (rys. 5.32), uwidacznia, że wartości ekstremalne są 6-krotnie większe w teście RDE od testu WLTC_{RDE}. Maksimum natężenia emisji tlenków azotu występują w zakresie prędkości 50–60 km/h i przyspieszenia z zakresu 0–1,75 m/s² (w teście WLTC_{RDE}), a w teście RDE jest to zakres prędkości 100–110 km/h i przyspieszenia 1,25–1,5 m/s². Wartości zmian natężenia emisji tego składnika to przedział od 0 mg/s do 0,9 mg/s (dla testu WLTC_{RDE}) oraz do 5,3 mg/s (w teście RDE).

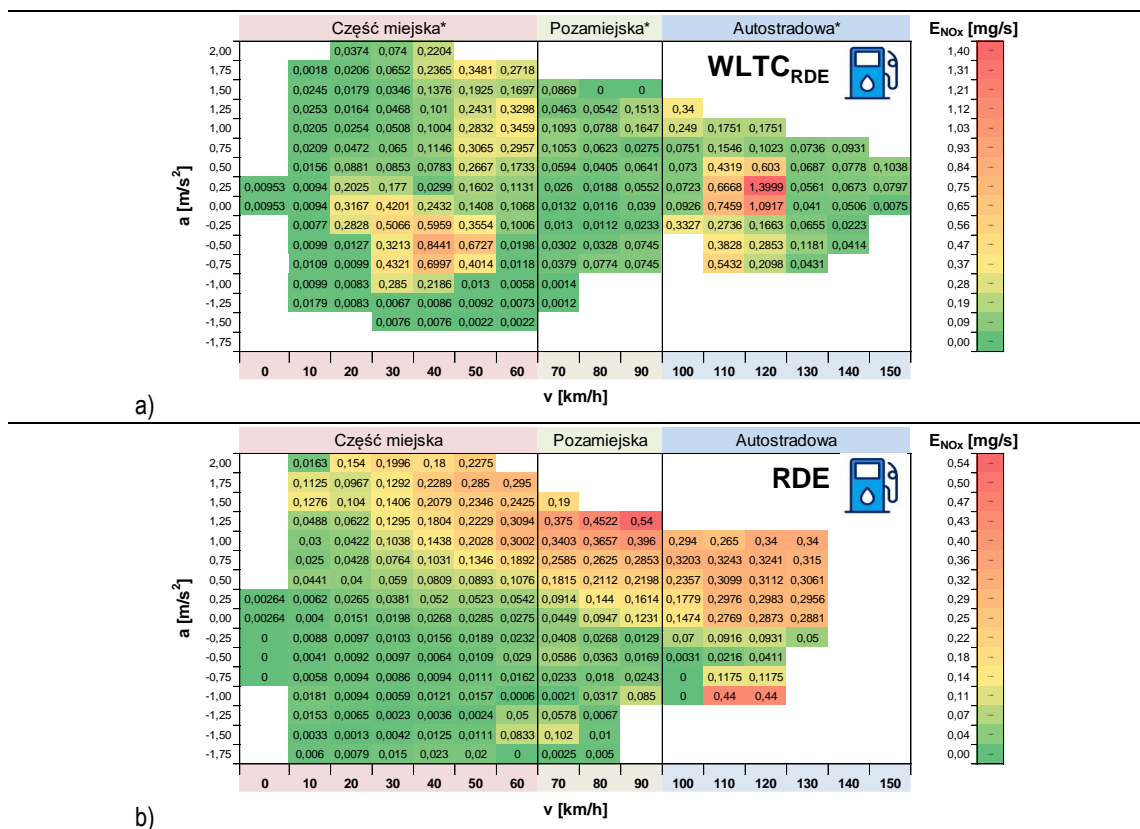
Dla pojazdu hybrydowego uzyskano najmniejsze wartości natężenia emisji tlenków azotu (rys. 5.33), a wartości ekstremalne uzyskano w zakresie prędkości 120–130 km/h i przyspieszenia 0,25–0,5 m/s² (w teście WLTC_{RDE}) oraz $V = 90\text{--}100$ km/h i $a = 1,25\text{--}1,5$ m/s² (w teście RDE w fazie miejskiej). Charakterystyka pracy silnika hybrydowego sprawia, że nie występuje znaczące podobieństwo w natężeniu emisji tlenków azotu zarówno w całym teście badawczym, jak i w poszczególnych jego częściach.



Rys. 5.31. Natężenie emisji tlenków azotu we współrzędnych prędkość i przyspieszenie pojazdu z silnikiem o zapłonie iskrowym uzyskane według procedur WLTC_{RDE} (a) oraz RDE (b)



Rys. 5.32. Natężenie emisji tlenków azotu we współrzędnych prędkość i przyspieszenie pojazdu z silnikiem o zapłonie samoczynnym uzyskane według procedur WLTC_{RDE} (a) oraz RDE (b)

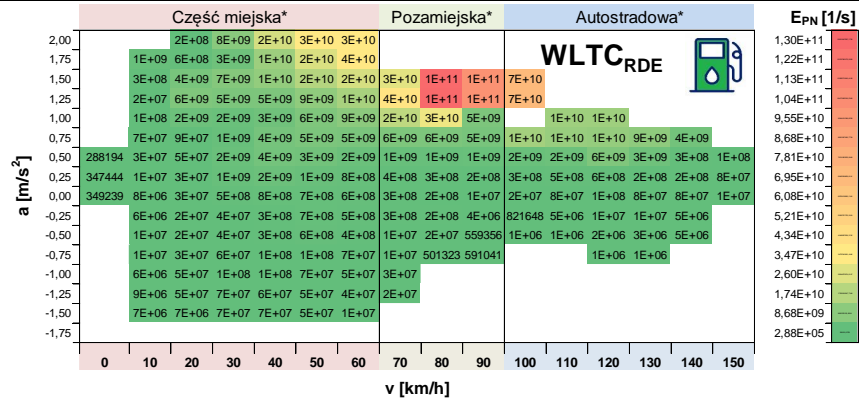


Rys. 5.33. Natężenie emisji tlenków azotu we współrzędnych prędkość i przyspieszenie pojazdu z napędem hybrydowym uzyskane według procedur WLTC_{RDE} (a) oraz RDE (b)

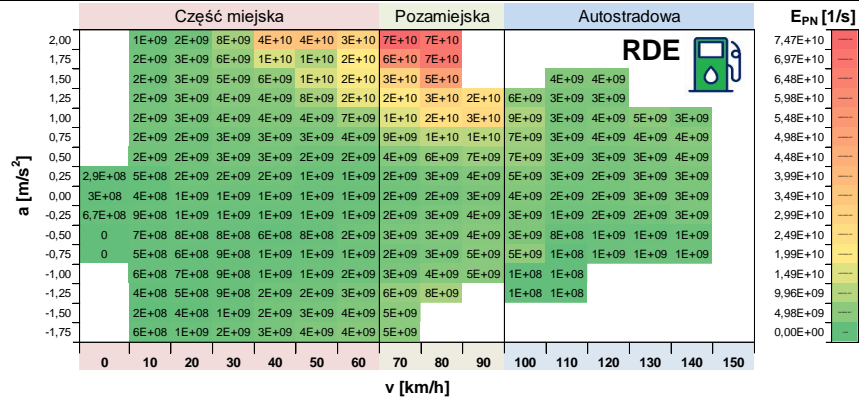
Analizując natężenie liczby cząstek stałych z badanych pojazdów można zauważyć zbieżność uzyskanych wyników tylko dla pojazdu z silnikiem o zapłonie iskrowym (rys. 5.34–5.36). Dla pojazdu konwencjonalnego wyposażonego w silnik o zapłonie iskrowym największe wartości natężenia liczby cząstek stałych (ok. $1,3 \cdot 10^{11}$ 1/s) występują w zakresie prędkości 80–90 km/h i przyspieszenia 1,25–1,5 m/s² w teście WLTC_{RDE}, a w teście RDE są to przedziały prędkości 70–90 km/h i przyspieszenia 1,75–2,0 m/s² (rys. 5.34). Zakres zmienności natężenia liczby cząstek stałych jest większy dla testu WLTC_{RDE} – ok. $1,3 \cdot 10^{11}$ 1/s, a dla testu RDE to wartość ok. $7,5 \cdot 10^{10}$ 1/s.

Analiza natężenia liczby cząstek stałych dla pojazdu z silnikiem o zapłonie samoczynnym (rys. 5.35), uwidacznia, że wartości ekstremalne są 2-krotnie większe w teście hamownianym niż w rzeczywistych warunkach ruchu. Maksimum natężenia liczby cząstek stałych występują w zakresie prędkości 80–100 km/h i przyspieszenia z zakresu 1,0–1,25 m/s² (w teście WLTC_{RDE}), a w teście RDE jest to zakres prędkości 110–120 km/h i przyspieszenia 0,75 m/s². Wartości zmian natężenia tego składnika to przedział do $6,5 \cdot 10^9$ 1/s (dla testu WLTC_{RDE}) oraz do $3,2 \cdot 10^9$ 1/s (w teście RDE).

Dla pojazdu hybrydowego uzyskano, podobne jak dla pojazdu z silnikiem ZI, wartości natężenia liczby cząstek stałych (rys. 5.36), a wartości ekstremalne uzyskano w zakresie prędkości 50–70 km/h i przyspieszenia do 0,5 m/s² (w teście WLTC_{RDE}) oraz $V = 50–70$ km/h i $a = 1,0–1,5$ m/s² (w teście RDE w fazie miejskiej, przy znacznych wartościach przyspieszenia).

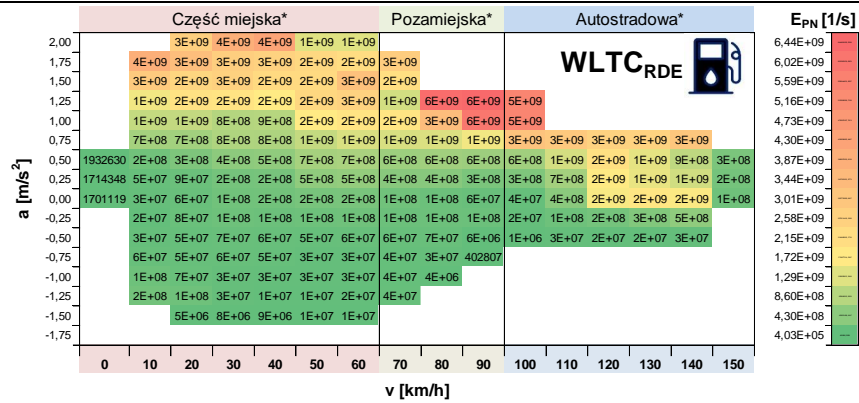


a)

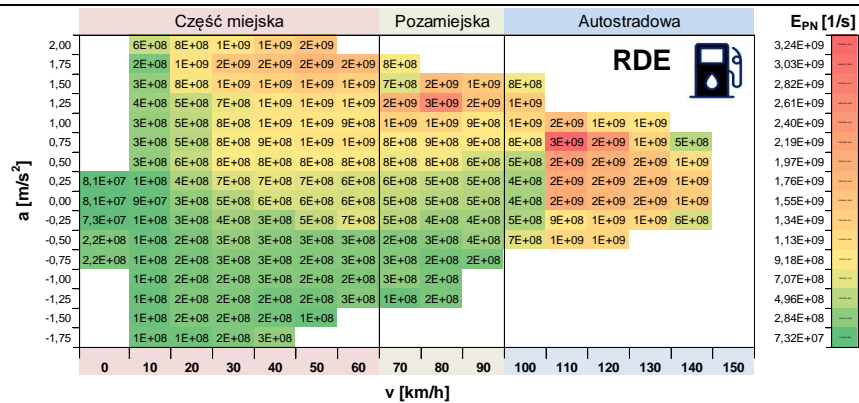


b)

Rys. 5.34. Natężenie liczby cząstek stałych azotu we współrzędnych prędkość i przyspieszenie pojazdu z silnikiem o zaplonie iskrowym uzyskane według procedur WLTC_{RDE} (a) oraz RDE (b)

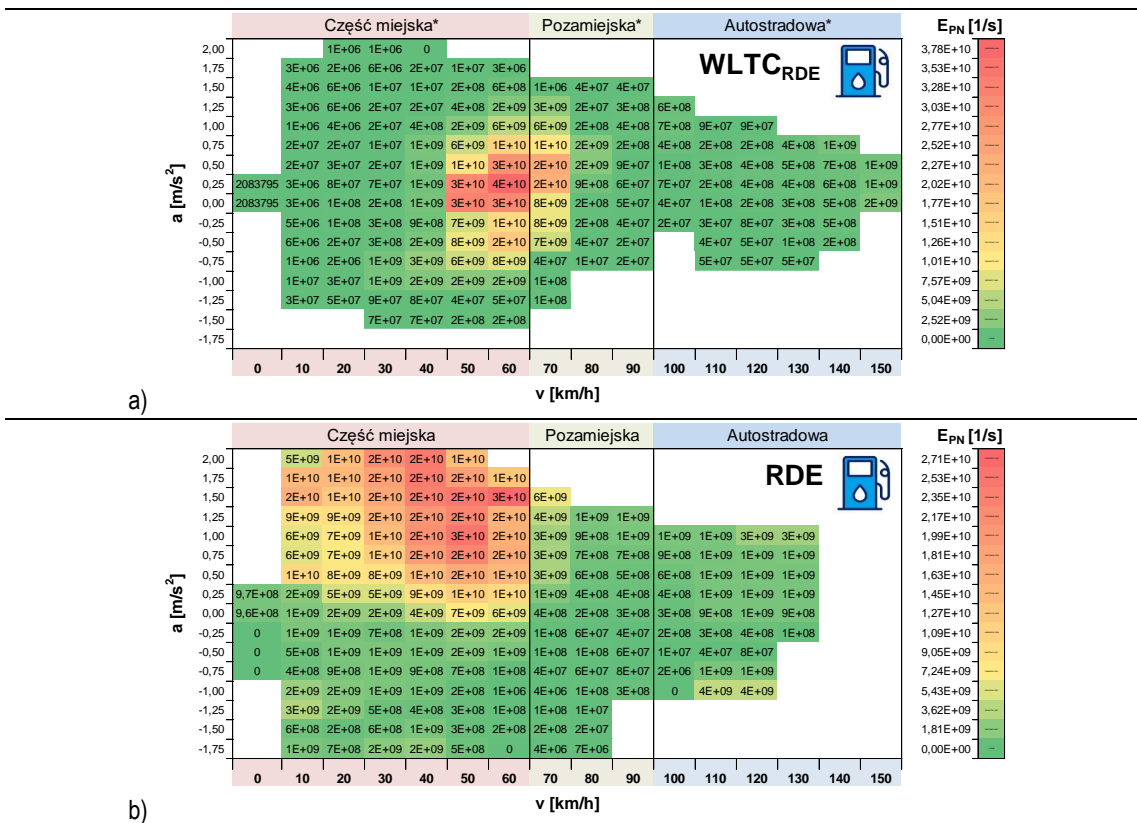


a)



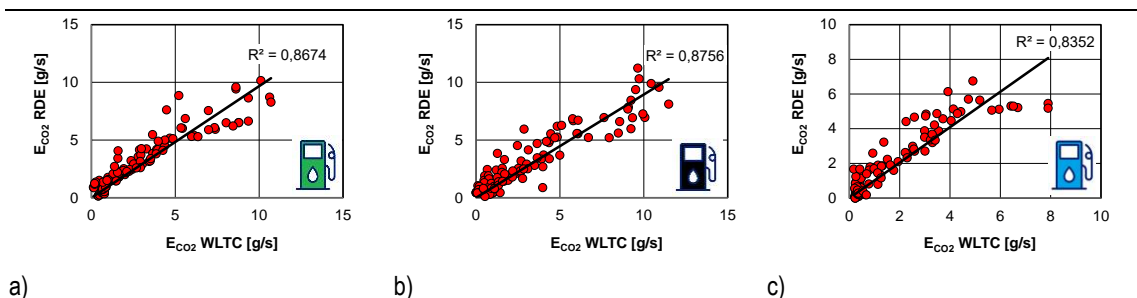
b)

Rys. 5.35. Natężenie liczby cząstek stałych azotu we współrzędnych prędkość i przyspieszenie pojazdu z silnikiem o zaplonie samoczynnym uzyskane według procedur WLTC_{RDE} (a) oraz RDE (b)



Rys. 5.36. Natężenie liczby cząstek stałych azotu we współrzędnych prędkość i przyspieszenie pojazdu z napędem hybrydowym uzyskane według procedur WLTC_{RDE} (a) oraz RDE (b)

W celu porównania powyższych danych wyznaczono zależności natężenia emisji analizowanych składników spalin (tlenku i dwutlenku węgla, tlenków azotu oraz liczby cząstek stałych) w obu testach: WLTC oraz RDE. Przy analizie natężenia emisji nie ma znaczenia procedura oceny testu, gdyż natężenie emisji i tak rozpatrywane jest dla każdego punktu pracy pojazdu. Otrzymane wyniki podzielono ze względu na rodzaj badanego pojazdu. Dla każdej korelacji wyznaczono współczynnik determinacji. Na rysunkach 5.37–5.40 przedstawiono zależności wyznaczone dla natężenia emisji rozpatrywanych związków szkodliwych spalin uwzględniając wszystkie punkty pracy (dla całego testu badawczego). Dla natężenia emisji dwutlenku węgla (rys. 5.37) wyniki współczynnika determinacji zmieniają się w zakresie od 0,835 (pojazd z napędem hybrydowym) do 0,876 (pojazd wyposażony w silnik ZS). Dla pojazdu z silnikiem o zapłonie iskrowym wartość współczynnika determinacji wynosiła 0,867.

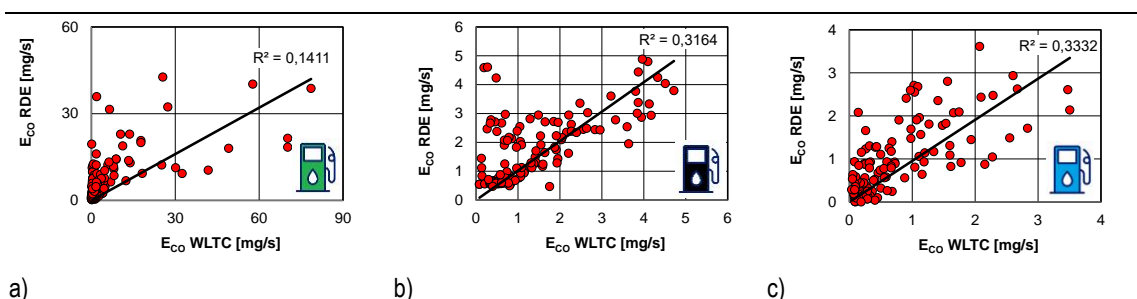


Rys. 5.37. Korelacje natężenia emisji dwutlenku węgla w teście WLTC i RDE dla badanych pojazdów wyposażonych: a) w silnik o zapłonie iskrowym, b) w silnik o zapłonie samoczynnym, c) w napęd hybrydowy

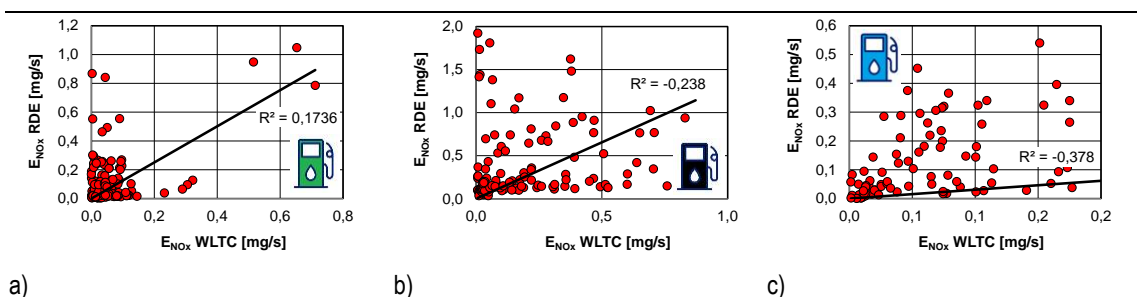
Dla natężenia emisji tlenku węgla (rys. 5.38) wartości współczynnika determinacji były znacząco mniejsze i zmieniały się w zakresie od 0,141 (pojazd wyposażony w silnik ZI) do 0,333 (pojazd z napędem hybrydowym). Dla pojazdu z silnikiem o zapłonie samoczynnym wartość współczynnika determinacji wynosiła 0,316.

Dla natężenia emisji tlenków azotu (rys. 5.39) wartość współczynnika determinacji była większa od zera jedynie dla pojazdu wyposażonego w silnik ZI – wynosiła 0,174. Dla pozostałych badanych pojazdów wartość wskaźnika była mniejsza od zera, co świadczy o braku jakiegokolwiek zależności między wartościami natężenia emisji tlenków azotu wyznaczonych w dwóch różnych testach.

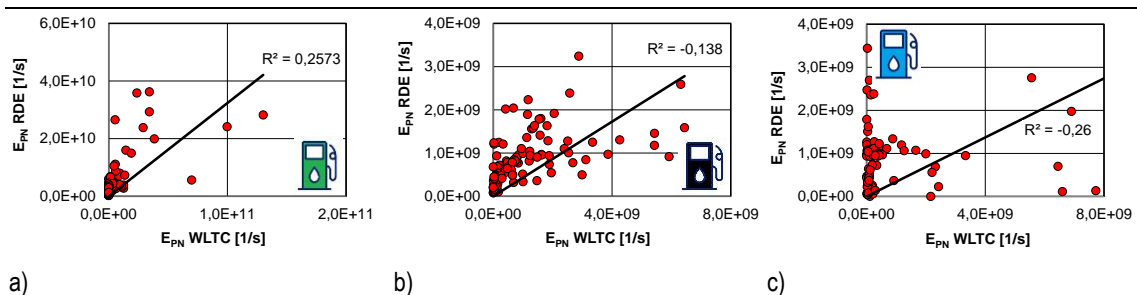
W przypadku natężenia liczby cząstek stałych (rys. 5.40) sytuacja była podobna do poprzedniej – wartość współczynnika determinacji była większa od zera jedynie dla pojazdu wyposażonego w silnik ZI (wynosiła 0,257). Dla pozostałych badanych pojazdów wartość wskaźnika była mniejsza od zera, co świadczy o braku jakiegokolwiek zależności między wartościami natężenia liczby cząstek stałych wyznaczonych w dwóch różnych testach.



Rys. 5.38. Korelacje natężenia emisji tlenku węgla w teście WLTC i RDE dla badanych pojazdów wyposażonych: a) w silnik o zapłonie iskrowym, b) w silnik o zapłonie samoczynnym, c) w napęd hybrydowy



Rys. 5.39. Korelacje natężenia emisji tlenków azotu w teście WLTC i RDE dla badanych pojazdów wyposażonych: a) w silnik o zapłonie iskrowym, b) w silnik o zapłonie samoczynnym, c) w napęd hybrydowy






Rys. 5.40. Korelacje natężenia liczby cząstek stałych w teście WLTC i RDE dla badanych pojazdów wyposażonych: a) w silnik o zapłonie iskrowym, b) w silnik o zapłonie samoczynnym, c) w napęd hybrydowy

Aby wskazać wszystkie wartości współczynnika determinacji, w tabelicy 5.1 zebrano wyniki w podziale na fazy testu. Jak wynika z danych zawartych w niej danych, tylko nieliczne korelacje charakteryzują się współczynnikiem większym od 0,7, który sugerowałby dobre skorelowanie porównywanie danych. Najbardziej możliwe jest szacowanie natężenia emisji dwutlenku węgla w poszczególnych fazach i w całym teście RDE na podstawie testu WLTC, natomiast dla pozostałych związków szkodliwych spalin taka sytuacja nie występuje. Wartość współczynnika determinacji wynosząca ponad 0,7, która pozwala na szacowanie wyników w teście RDE na podstawie WLTC występuje dla:

- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie iskrowym dla natężenia emisji tlenu węgla (w fazie pozamiejskiej) oraz dla natężenia liczby cząstek stałych (w fazie miejskiej),
- dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie samoczynnym dla natężenia emisji tlenu węgla (w fazie pozamiejskiej i autostradowej) oraz dla natężenia liczby cząstek stałych (w fazie pozamiejskiej),
- dla pojazdu wyposażonego w napęd hybrydowy dla natężenia emisji tlenu węgla (w fazie miejskiej, pozamiejskiej i autostradowej).

Tablica 5.1. Wartości współczynników determinacji w testach wyznaczone dla rozpatrywanych testów w poszczególnych fazach i w całym teście (wartości zaznaczone kolorem czerwonym są mniejsza od 0,7)

		Faza miejska	Faza pozamiejska	Faza autostradowa	Cały test
	CO ₂	0,957	0,975	0,930	0,867
	CO	0,261	0,867	0,570	0,141
	NO _x	0,023	0,468	0,509	0,174
	PN	0,923	0,597	0,293	0,257
	CO ₂	0,801	0,964	0,953	0,876
	CO	0,189	0,963	0,883	0,316
	NO _x	0,157	0,307	0,047	-0,238
	PN	0,504	0,733	0,354	-0,138
	CO ₂	0,835	0,985	0,885	0,835
	CO	0,740	0,821	0,742	0,333
	NO _x	0,012	0,428	0,256	-0,378
	PN	-0,064	0,357	0,535	-0,260

Dokonana analiza natężenia emisji poszczególnych składników spalin pozwala na stwierdzenie, że możliwe jest szacowanie tej wartości w teście RDE na podstawie wartości uzyskiwanych w teście WLTC dla wszystkich rodzajów napędów, natomiast dla pozostałych związków – jest możliwa taka sytuacja ale w bardzo ograniczonym zakresie.

6. Wnioski i kierunki dalszych badań

6.1. Podsumowanie

Negatywny wpływ pogarszającej się jakości powietrza jest zauważalny już nie tylko w dużych i małych miastach, ale coraz częściej również na terenach pozamiejskich. Alarmujące dane są dostępne nie tylko w pracach naukowych publikowanych w różnych częściach świata, ale także w raportach dotyczących oceny jakości powietrza. Informacje te potwierdzają, że wciąż niezmiennie konieczne jest skupienie szczególnej uwagi na emisję spalin między innymi z sektora transportu drogowego. Ten rodzaj emisji zanieczyszczeń jest istotny głównie ze względu na strukturę rynku motoryzacyjnego, w której wciąż dominującą rolę odgrywają pojazdy napędzane silnikami spalinowymi. Co prawda ta struktura sukcesywnie zmienia się na korzyść pojazdów elektrycznych, ale osiągnięcie poziomu pełnej elektryfikacji zajmie jeszcze wiele lat. Szczególnie dotyczy to krajów o niestabilnej sytuacji gospodarczej.

W celu zredukowania negatywnego wpływu sektora transportu drogowego na środowisko, ustawodawcy już od prawie 30 lat wprowadzają kolejne, coraz bardziej restrykcyjne akty prawne. Jednym z najistotniejszych elementów zmian legislacyjnych jest uregulowanie zarówno metod monitorowania, jak i kontroli emisji spalin z pojazdów. W wyniku podjętych działań od 2019 roku stosuje się w Europie dwa testy pomiarowe, laboratoryjny (wykonywany na hamowni podwoziowej) oraz drogowy (wykonywany w warunkach rzeczywistej eksploatacji). Według założeń ustawodawców, testy te mają się wzajemnie uzupełniać, dzięki czemu uzyskiwany wynik emisji spalin będzie bardziej wiarygodny.

W efekcie tych działań uzyskano dwa testy pomiarowe, których procedury stanowią międzynarodową harmonizację wymogów badawczych. Dzięki ujednoczeniu metod pomiarowych i zwiększeniu przejrzystości wymogów dotyczących parametrów technicznych oraz ograniczeniu elastyczności w prowadzeniu badań, niezależne podmioty mają możliwość odtworzenia wyników badań homologacyjnych. Jednakże dalsze nowelizacje spowodowały, że test drogowy, który z założenia miał reprezentować wyniki rzeczywistej eksploatacji pojazdu, jest ograniczony coraz większą liczbą wymagań i obostrzeń. Spowodowało to, że w pewnym zakresie test ten stał się w kolejnym ustalonym testem.

Testy emisyjne bez wątpienia są niezbędne. Warto jednak zaznaczyć, że ich przeprowadzenie jest nie tylko kosztowne, ale również czasochłonne. Skorelowanie procedur wykonywania tych testów mogłoby wpłynąć na ograniczenie liczby wykonywanych testów, a w konsekwencji oszczędności czasowe i finansowe. Przedmiot tej rozprawy doktorskiej wpisuje się w zakres tych rozważań. Głównym celem tej pracy jest opracowanie metody określającej emisję spalin z pojazdów samochodowych w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego na podstawie wyników uzyskanych w teście homologacyjnym.

Badania wykonane w pracy zrealizowano zgodnie z wymaganiami procedur WLTP i RDE dla samochodów osobowych. Do testów wykorzystano pojazdy klasy 3b, czyli mających stosunek mocy do masy pojazdu gotowego do jazdy wynoszący ponad 34 W/kg oraz poruszających się z prędkością maksymalną równą lub większą niż 120 km/h. Pierwszy etap badań dotyczył badań emisji zanieczyszczeń z pojazdów na hamowni podwoziowej. W drugim etapie testów zrealizowano badania w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego. Trasę badawczą opracowano w taki sposób, aby spełniała wymagania Komisji Europejskiej opisane w rozporządzeniach [14–29]. Wszystkie po-

jazdy wykorzystane w testach drogowych pokonały tę samą trasę, a ich przejazdy były poprawne, czyli zgodne z wymaganiami legislacyjnymi. Do badań wykorzystano dedykowaną aparaturę pomiarową.

Otrzymane wyniki analizowano według czterech różnych metod pomiarowych (w tym dwóch opracowanych na potrzeby tej rozprawy doktorskiej):

- metoda 1 (oznaczona jako **WLTC**), w której dokonano podziału testu oraz wyznaczono emisję drogową zanieczyszczeń według standardowej procedury WLTP,
- metoda 2 (oznaczona jako **RDE**), w której dokonano podziału testu drogowego na fazy i wyznaczono emisję drogową zanieczyszczeń według standardowej procedury RDE,
- metoda 3 (oznaczona jako **WLTC₁₊₂**), w której dokonano podziału testu na fazy: 1+2, 3 oraz 4; połączenie fazy 1 i 2 odpowiadającej fazie miejskiej testu RDE,
- procedura 4 (oznaczona jako **WLTC_{RDE}**) – podział faz i wyznaczenie emisji w teście homologacyjnym według procedury RDE, zakładającej podział faz w zależności od prędkości jazdy pojazdu.

Główny cel pracy, jakim było opracowanie metody określającej emisję spalin z pojazdów samochodowych w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego na podstawie wyników uzyskanych w teście homologacyjnym został zrealizowany. W ramach pracy opracowano narzędzie analityczne umożliwiające porównywanie testów homologacyjnego i drogowego pod kątem wyników emisji drogowej w całych testach badawczych, ale również w poszczególnych ich fazach. Wynikało to z analizy warunków pracy pojazdów w testach badawczych, które okazały się wykazywać duże podobieństwo. Jednakże wynik korelacji testów pod względem natężenia emisji związków szkodliwych, w poszczególnych punktach pracy odniesionych do pojazdu, nie jest jednoznaczny. Ilościową charakterystykę uzyskanych wyników podano w kolejnym podpunkcie.

6.2. Wnioski

W pracy dokonano porównania testów wykonywanych na hamowni podwoziowej oraz w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego dla pojazdów wyposażonych w silnik o zapłonie iskrowym, samoczynnym oraz z napędem hybrydowym. Porównanie to zrealizowano dzięki porównaniu parametrów pojazdów:

- udziałów prędkości w testach i w poszczególnych ich fazach,
- udziałów przyspieszenia w całych testach oraz w ich częściach,
- udziałów iloczynów prędkości i przyspieszenia w testach i w poszczególnych ich fazach,
- względnego przyspieszenia dodatniego w fazach testów oraz jego wartości modalnych (wyznaczonych w każdej sekundzie testów),
- 95 centyla prędkości i przyspieszenia w fazach testów.

Wykazano znaczące zależności między rozpatrywanymi parametrami w teście WLTC oraz RDE, co powodowało możliwość porównywania emisji drogowej lub natężenia emisji poszczególnych zanieczyszczeń w testach badawczych (lub ich częściach). Na podstawie wyników otrzymanych podczas wykonania testów hamownianych i drogowych oraz ich analizie według zaproponowanych procedur (WLTC, WLTC₁₊₂, WLTC_{RDE} oraz RDE) wyciągnięto następujące wnioski ogólne:

- zaproponowano w pracy nową metodę porównywania wyników określonych we współrzędnych dwuwymiarowych prędkość pojazdu–przyspieszenie; porównanie

poszczególnych wartości w odpowiednich polach pracy powoduje utworzenie dwóch niezależnych zbiorów danych możliwych do skorelowania,

- porównanie testów WLTC oraz RDE pozwala na porównanie łączne fazy pierwszej i drugiej z fazą miejską testu drogowego; faza trzecia testu WLTC odpowiada fazie pozamiejskiej testu RDE, a faza 4 testu WLTC – fazie autostradowej testu RDE,
- podział testu WLTC na fazy (miejską, pozamiejską i autostradową) według procedury RDE i obliczenie całkowitej emisji w teście też według tej procedury powoduje otrzymanie zbliżonych wartości.

Porównania wyników emisji drogowej zanieczyszczeń w teście WLTC z podziałem na: łączoną fazę pierwszą i drugą oraz na podział według procedury RDE dokonano zestawiając ich wartości w całym teście i w poszczególnych fazach, uzyskując następujące rezultaty:

- 1) dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie iskrowym:
 - dwutlenku węgla – $R^2 = 0,878$,
 - tlenku węgla – $R^2 = 0,323$,
 - tlenków azotu – $R^2 = 0,994$,
 - liczby cząstek stałych – $R^2 = 0,329$,
- 2) dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie samoczynnym:
 - dwutlenku węgla – $R^2 = 0,852$,
 - tlenku węgla – $R^2 = 0,788$,
 - tlenków azotu – $R^2 = 0,999$,
 - liczby cząstek stałych – $R^2 = 0,905$,
- 3) dla pojazdu z napędem hybrydowym:
 - dwutlenku węgla – $R^2 = 0,923$,
 - tlenku węgla – $R^2 = 0,980$,
 - tlenków azotu – $R^2 = 0,011$,
 - liczby cząstek stałych – $R^2 = 1,000$.

Porównania wyników emisji drogowej zanieczyszczeń w teście homologacyjnym z połączoną fazą pierwszą i drugą oraz w rzeczywistych warunkach ruchu dokonano zestawiając ich wartości w całym teście i w poszczególnych fazach, uzyskując następujące rezultaty:

- 1) dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie iskrowym:
 - dwutlenku węgla – $R^2 = 0,538$,
 - tlenku węgla – $R^2 = 0,575$,
 - tlenków azotu – $R^2 = 0,063$,
 - liczby cząstek stałych – $R^2 = 0,038$,
- 2) dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie samoczynnym:
 - dwutlenku węgla – $R^2 = 0,853$,
 - tlenku węgla – $R^2 = 0,939$,
 - tlenków azotu – $R^2 = 0,963$,
 - liczby cząstek stałych – $R^2 = 0,811$,
- 3) dla pojazdu z napędem hybrydowym:
 - dwutlenku węgla – $R^2 = 0,680$,
 - tlenku węgla – $R^2 = 0,349$,
 - tlenków azotu – $R^2 = 0,767$,
 - liczby cząstek stałych – $R^2 = 0,995$.

Porównania wyników emisji drogowej zanieczyszczeń w teście homologacyjnym z wyznaczeniem emisji według procedury RDE oraz w rzeczywistych warunkach ruchu

dokonano zestawiając ich wartości w całym teście i w poszczególnych fazach, uzyskując następujące rezultaty:

- 1) dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie iskrowym:
 - dwutlenku węgla – $R^2 = 0,855$,
 - tlenku węgla – $R^2 = 0,936$,
 - tlenków azotu – $R^2 = 0,031$,
 - liczby cząstek stałych – $R^2 = 0,480$,
- 2) dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie samoczynnym:
 - dwutlenku węgla – $R^2 = 0,499$,
 - tlenku węgla – $R^2 = 0,557$,
 - tlenków azotu – $R^2 = 0,953$,
 - liczby cząstek stałych – $R^2 = 0,982$,
- 3) dla pojazdu z napędem hybrydowym:
 - dwutlenku węgla – $R^2 = 0,923$,
 - tlenku węgla – $R^2 = 0,980$,
 - tlenków azotu – $R^2 = 0,011$,
 - liczby cząstek stałych – $R^2 = 1,000$.

Wnioski ilościowe dotyczące uzyskanych wartości emisji drogowej zanieczyszczeń dla badanych pojazdów w całym teście WLTC_{RDE} i RDE są następujące:

- 4) dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie iskrowym różnica względna między wynikami testów była następująca:
 - dwutlenku węgla – 1%,
 - tlenku węgla – 4%,
 - tlenków azotu – 58%,
 - liczby cząstek stałych – 2%,
- 5) dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie samoczynnym różnica względna między wynikami testów była następująca:
 - dwutlenku węgla – 18%,
 - tlenku węgla – 7%,
 - tlenków azotu – 130%,
 - liczby cząstek stałych – 10%,
- 6) dla pojazdu z napędem hybrydowym różnica względna między wynikami testów była następująca:
 - dwutlenku węgla – 2%,
 - tlenku węgla – 13%,
 - tlenków azotu – 10%,
 - liczby cząstek stałych – 13%,

Podobne wartości emisji drogowej zanieczyszczeń dla badanych pojazdów uzyskano rozpatrując jedynie część miejską testów:

- 1) dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie iskrowym różnica względna między wynikami testów była następująca:
 - dwutlenku węgla – 1%,
 - tlenku węgla – 11%,
 - tlenków azotu – 34%,
 - liczby cząstek stałych – 1%,
- 2) dla pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie samoczynnym różnica względna między wynikami testów była następująca:
 - dwutlenku węgla – 7%,
 - tlenku węgla – 10%,

- tlenków azotu – 85%,
 - liczby cząstek stałych – 8%,
- 3) dla pojazdu z napędem hybrydowym różnica względna między wynikami testów była następująca:
- dwutlenku węgla – 15%,
 - tlenku węgla – 3%,
 - tlenków azotu – 14%,
 - liczby cząstek stałych – 4%.

Wartości te świadczą o możliwości porównywania wyników, a także o wzajemnym szacowaniu ich wartości na podstawie innego rodzaju testów, jednakże jest to zagadnienie o dość małym zakresie stosowalności.

Zaproponowane procedury szacowania emisji drogowej w teście drogowym na podstawie testów hamownianych pozwalają na odzwierciedlenie wyników z dużą dokładnością, jednak nie można zaproponować jednej uniwersalnej procedury. W tabelicy 6.1 wykazano możliwości szacowania emisji drogowej w teście RDE na podstawie testu WLTC.

Tablica 6.1. Możliwości szacowania emisji drogowej w teście drogowym na podstawie testu hamownianego (WLTC₁₊₂ – połączone fazy 1 i 2, WLTC_{RDE} – test hamowniany + procedura RDE)

		Możliwe określenie emisji drogowej spalin w teście RDE z wykorzystaniem	
Pojazd wyposażony w silnik o zapłonie iskrowym	CO ₂	WLTC _{RDE}	
	CO	WLTC _{RDE}	
	NO _x	–	
	PN	WLTC _{RDE}	
Pojazd wyposażony w silnik o zapłonie samoczynnym	CO ₂	WLTC ₁₊₂	
	CO	WLTC ₁₊₂	
	NO _x	WLTC ₁₊₂	
	PN	WLTC _{RDE}	
Pojazd z napędem hybrydowym	CO ₂	WLTC _{RDE}	
	CO	WLTC _{RDE}	
	NO _x	WLTC ₁₊₂	
	PN	WLTC _{RDE}	

Jak z niej wynika, nie jest możliwe oszacowanie wszystkich parametrów testu RDE dysponując jedynie wynikami uzyskanymi w teście WLTC dla badanego pojazdu. Istnieje jednak możliwość oszacowania poszczególnych parametrów (według procedury WLTC₁₊₂ lub WLTC_{RDE}), dla jednych parametrów dokładność tego szacowania będzie wynosiła ponad 90%, a dla innych znacznie mniej. Niemniej jednak zagadnienie ma ogromny potencjał i zdecydowanie jest warte dalszych, bardziej pogłębionych analiz.

6.3. Kierunki dalszych prac

Zaproponowane procedury szacowania emisji spalin w testach drogowych są zagadnieniem, które należy rozwijać w następujący sposób:

- dokonać oceny dla większej grupy pojazdów danego rodzaju a także rozszerzyć na pojazdy hybrydowe typu plug-in,

- dokonać porównania danych z wykorzystaniem innych metod korelacyjnych, uwzględniających prawdopodobieństwo uzyskiwanych wyników,
- rozszerzyć możliwość szacowania emisji drogowej zanieczyszczeń na kolejne związki szkodliwe, amoniak, aldehydy, podtlenek azotu, które mają być wprowadzone w kolejnych latach (w normie Euro 7),
- wprowadzić większą liczbę testów drogowych różniących się dynamiką jazdy, tak aby rozszerzyć zakres parametrów dynamicznych wykonywanych testów,
- wprowadzić ograniczenia związane z czasem lub długością trwania testów, mogących mieć wpływ na uzyskiwane wyniki emisji drogowej zanieczyszczeń (np. przez skrócenie fazy miejskiej do wartości minimalnych).

Literatura

1. ACEA. Fuel types of new passenger cars in the EU, **2022**. On-line: <https://www.acea.auto/figure/fuel-types-of-new-passenger-cars-in-eu/> (dostęp: 6.01.2023).
2. PZPM. Raport 2021, **2021**. On-line: <https://www.pzpm.org.pl/pl/Rynek-motoryzacyjny/Rejestracje-samochody-osobowe-i-dostawcze/Rok-2021/Grudzien-2021r> (dostęp: 6.01.2023).
3. EEA. Monitoring CO₂ emissions from passenger cars and vans in 2018. European Environment Agency, Report 2, **2020**.
4. Transport, **2023**. On-line: <https://www.eea.europa.eu/pl/themes/transport/intro> (dostęp: 6.01.2023).
5. EEA. Sources and emissions of air pollutants in Europe. Air quality in Europe 2021.
6. EEA. Explaining road transport emissions. A Non-Technical Guide. Publications Office of the European Union, Luxembourg **2016**.
7. Suman, Air quality indices: a review of methods to interpret air quality status. *Materials Today*, 34 (3), **2021**, 568–880. doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.141.
8. Doval Minarro M., Banon D., Egea J.A., Costa-Gomez I., Baeza Caracena A., A multi-pollutant methodology to locate a single air quality monitoring station in small and medium-size urban areas. *Environmental Pollution*, 266, **2021**. doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115279.
9. Jakość powietrza w Polsce w roku 2020 w świetle wyników pomiarów prowadzonych w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska (PMŚ). Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy, INFAIR Dominik Kobus na zlecenie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska. Warszawa **2021**.
10. Sienkiewicz-Jarosz H., Udar mózgu w kontekście zanieczyszczeń powietrza. Posiedzenie Rady Naukowej przy Ministrze Zdrowia, Konsekwencje zdrowotne zanieczyszczeń powietrza, **2018**.
11. Earl T., Key transport trends in Q1 2021. *Transport Environment*, **2021**.
12. EEA. National air pollutant emissions data viewer 1990-2019. On-line: <https://www.eea.europa.eu/themes/air> (dostęp: 19.01.2022).
13. Burchart D., Fołęga P., Impact of road transport means on climate change and human health in Poland. *Promet-Traffic & Transportation*, 31(2), **2019**, 195–204. doi:10.7307/ptt.v31i2.3074.
14. Dyrektywa Rady z dnia 26 czerwca 1991 r. zmieniająca dyrektywę 70/220/EWG w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do działań, jakie mają być podjęte w celu ograniczenia zanieczyszczenia powietrza przez emisje z pojazdów silnikowych (91/441/EWG), **1991**.
15. Dyrektywa Rady 93/59/EWG z dnia 28 czerwca 1993 r. zmieniająca dyrektywę 70/220/EWG w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do działań, jakie mają być podjęte w celu ograniczenia zanieczyszczenia powietrza przez emisje z pojazdów silnikowych, **1993**.

16. Dyrektywa 94/12/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 marca 1994 r. odnosząca się do środków, jakie mają być podjęte w celu ograniczenia zanieczyszczenia powietrza przez emisje z pojazdów silnikowych i zmieniająca dyrektywę 70/220/EWG, **1994**.
17. Dyrektywa 96/69/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 8 października 1996 r. zmieniająca dyrektywę 70/220/EWG w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do działań, jakie mają być podjęte w celu ograniczenia zanieczyszczenia powietrza przez spaliny z silników o zapłonie iskrowym pojazdów silnikowych **1996**.
18. Dyrektywa 98/69/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 13 października 1998 r. odnosząca się do środków mających zapobiegać zanieczyszczeniu powietrza przez emisje z pojazdów silnikowych i zmieniająca dyrektywę Rady 70/220/EWG, **1998**.
19. Dyrektywa Komisji 2002/80/WE z dnia 3 października 2002 r. dostosowująca do postępu technicznego dyrektywę Rady 70/220/EWG odnoszącą się do działań, jakie mają być podjęte w celu ograniczenia zanieczyszczenia powietrza przez emisje z pojazdów silnikowych, **2002**.
20. Rozporządzenie (WE) nr 715/2007 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 20 czerwca 2007 r. w sprawie homologacji typu pojazdów silnikowych w odniesieniu do emisji zanieczyszczeń pochodzących z lekkich pojazdów pasażerskich i użytkowych (Euro 5 i Euro 6) oraz w sprawie dostępu do informacji dotyczących naprawy i utrzymania pojazdów. L171/1, **2007**.
21. Rozporządzenie Komisji (UE) nr 136/2014 z dnia 11 lutego 2014 r. zmieniające dyrektywę 2007/46/WE Parlamentu Europejskiego i Rady, rozporządzenie Komisji (WE) nr 692/2008 w odniesieniu do emisji zanieczyszczeń pochodzących z lekkich pojazdów pasażerskich i użytkowych (Euro 5 i Euro 6) oraz rozporządzenie Komisji (UE) nr 582/2011 w odniesieniu do emisji zanieczyszczeń pochodzących z pojazdów ciężarowych o dużej ładowności (Euro VI), **2014**.
22. Parlament Europejski i traktaty. On-line: <https://www.europarl.europa.eu/about-parliament/pl/in-the-past/the-parliament-and-the-treaties> (dostęp: 02.09.2021).
23. Porozumienie paryskie. On-line: https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_pl (dostęp: 02.09.2021).
24. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/631 z dnia 17 kwietnia 2019 r. określające normy emisji CO₂ dla nowych samochodów osobowych i dla nowych lekkich pojazdów użytkowych oraz uchylające rozporządzenia (WE) nr 443/2009 i (UE) nr 510/2011. L111/13, **2019**.
25. Rozporządzenie Komisji (UE) 2017/1151 z dnia 1 czerwca 2017 r. uzupełniające rozporządzenie (WE) nr 715/2007 Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie homologacji typu pojazdów silnikowych w odniesieniu do emisji zanieczyszczeń pochodzących z lekkich pojazdów pasażerskich i użytkowych (Euro 5 i Euro 6) oraz w sprawie dostępu do informacji dotyczących naprawy i utrzymania pojazdów, zmieniające dyrektywę 2007/46/WE Parlamentu Europejskiego i Rady, rozporządzenie Komisji (WE) nr 692/2008 i rozporządzenie Komisji (UE) nr 1230/2012 oraz uchylające rozporządzenie Komisji (WE) nr 692/2008. L175/1, **2017**.
26. Rozporządzenie Komisji (UE) 2016/427 z dnia 10 marca 2016 r. zmieniające rozporządzenie (WE) nr 692/2008 w odniesieniu do emisji zanieczyszczeń pochodzących z lekkich pojazdów pasażerskich i użytkowych (Euro 6). L82/1, **2016**.

27. Rozporządzenie Komisji (UE) 2016/646 z dnia 20 kwietnia 2016 r. zmieniające rozporządzenie (WE) nr 692/2008 w odniesieniu do emisji zanieczyszczeń pochodzących z lekkich pojazdów pasażerskich i użytkowych (Euro 6). L109/1, 2016.
28. Rozporządzenie Komisji (UE) 2017/1154 z dnia 7 czerwca 2017 r. zmieniające rozporządzenie Komisji (UE) 2017/1151 uzupełniające rozporządzenie (WE) nr 715/2007 Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie homologacji typu pojazdów silnikowych w odniesieniu do emisji zanieczyszczeń pochodzących z lekkich pojazdów pasażerskich i użytkowych (Euro 5 i Euro 6) oraz w sprawie dostępu do informacji dotyczących naprawy i utrzymania pojazdów, zmieniające dyrektywę 2007/46/WE Parlamentu Europejskiego i Rady, rozporządzenie Komisji (WE) nr 692/2008 i rozporządzenie Komisji (UE) nr 1230/2012 oraz uchylające rozporządzenie Komisji (WE) nr 692/2008 oraz dyrektywę 2007/46/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w odniesieniu do emisji zanieczyszczeń w rzeczywistych warunkach jazdy pochodzących z lekkich pojazdów pasażerskich i użytkowych (Euro 6). L175/708, **2017**.
29. Rozporządzenie Komisji (UE) 2018/1832 z dnia 5 listopada 2018 r. zmieniające dyrektywę Parlamentu Europejskiego i Rady 2007/46/WE, rozporządzenie Komisji (WE) nr 692/2008 i rozporządzenie Komisji (UE) 2017/1151 w celu udoskonalenia badań i procedur homologacji typu w odniesieniu do lekkich pojazdów pasażerskich i użytkowych, w tym badań i procedur dotyczących zgodności eksploatacyjnej i emisji zanieczyszczeń w rzeczywistych warunkach jazdy, a także wprowadzenia urządzeń służących do monitorowania zużycia paliwa i energii elektrycznej, **2018**.
30. ACEA. On-line: <https://www.acea.auto/> (dostęp: 22.01.2023).
31. Euro 7/VII Emission Standards.
32. Rozporządzenie wykonawcze Komisji (UE) 2017/1152 z dnia 2 czerwca 2017 r. ustanawiające metodę określania parametrów korelacji niezbędnych do odzwierciedlenia zmian w regulacyjnej procedurze badań w odniesieniu do lekkich samochodów dostawczych oraz zmieniające rozporządzenie wykonawcze (UE) nr 293/2012 (Tekst mający znaczenie dla EOG). C/2017/3519, **2017**.
33. Merkisz J., Lijewski P., Fuc P., Rymaniak L., Ziolkowski A., Measurement of exhaust emissions under actual operating conditions with the use of PEMS: review of selected vehicles. *Improvement Trends for Internal Combustion Engines*, **2018**, 99–127. doi:10.5772/intechopen.70442.
34. Kurtyka K., Pielecha J., The evaluation of exhaust emission in RDE tests including dynamic driving conditions. *Transportation Research Procedia*, 40, **2019**, 338–345. doi:10.1016/j.trpro.2019.07.050.
35. Kurtyka K., Pielecha J., Merkisz J., The evaluation of NOx emissions in RDE tests including dynamic driving conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 642, **2021**, 012017. doi: 10.1088/1755-1315/642/1/012017.
36. Lambert C., Is the real driving emission methodology really representative of the people's driving behaviour? Study of the driving patterns in Brussels. Ecole polytechnique de Louvain, Université catholique de Louvain **2019**, On-line: <http://hdl.handle.net/2078.1/thesis:19472> (dostęp: 15.12.2022)..

37. Varella R.A., Faria M.V., Mendoza-Villafuerte P., Baptista P.C., Sousa L., Duarte G.O., Assessing the Influence of boundary conditions, driving behavior and data analysis methods on real driving CO₂ and NO_x emissions. *Science of The Total Environment*, 685, **2019**, 879–894. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.053.
38. Suarez-Bertoa R., Valverde V., Clairotte M., Pavlovic J., Giechaskiel B., Franco V., Kregar Z., Astorga C., On-road emissions of passenger cars beyond the boundary conditions of the real-driving emissions test. *Environmental Research*, 176, **2019**, 108572. doi: 10.1016/j.envres.2019.108572.
39. Yan S., Fangxi X., Wei H., Xiaoping L., Tingting H., Experimental study of particulate emission characteristics from a gasoline direct injection engine during starting process. *International Journal of Automotive Technology*, 20(2), **2019**, 411-421.
40. Pielecha J., Skobiej K., Kurtyka K. Testing and evaluation of cold-start emissions from a gasoline engine in RDE test at two different ambient temperatures. *Open Engineering*, 11(1), **2021**, 425–434. doi:10.1515/eng-2021-0047.
41. Pielecha I., Cieslik W., Szalek A., Operation of electric hybrid drive systems in varied driving conditions. *Eksploracja i Niezawodność*, 20(1), **2018**, 16–23. doi: 10.17531/ein.2018.1.3.
42. Weiss M., Paffumi E., Clairotte M., Drossinos Y., Vlachos T., Bonnel P., Giechaskiel B., Including cold-start emissions in the real-driving emissions (RDE) test procedure. Publications Office of the European Union **2017**. doi: 10.2760/70237.
43. Merkisz J., Bielaczyc P., Pielecha J., Woodburn J., RDE testing of passenger cars: the effect of the cold start on the emissions results. SAE Technical Paper 2019-01-0747, **2019**. doi: 10.4271/2019-01-0747.
44. Kurtyka K., Pielecha J., Cold start emissions from gasoline engine in RDE tests at different ambient temperatures. *Combustion Engines*, 181(2), 2020, 24–30. doi: 10.19206/CE-2020-204.
45. Pielecha J., Merkisz J., Kurtyka K., Skobiej K., Cold start emissions of passenger cars with gasoline and diesel engines in real driving emissions tests. *Combustion Engines*, 179(4), **2019**, 160–168. doi: 10.19206/CE-2019-427.
46. Donateo T., Giovinazzi M., Some repeatability and reproducibility issues in real driving emission tests. SAE Technical Paper 2018-01-5020, **2018**. doi: 10.4271/2018-01-5020.
47. Pielecha J., Jasiński R., Magdziak A., Practicability of passenger vehicle driving emission tests according to new European Union procedures. *MATEC Web of Conferences*, 118, **2017**, 00021. doi: 10.1051/mateconf/201711800021.
48. Pielecha J., Skobiej K., Kurtyka K., Exhaust emissions and energy consumption analysis of conventional, hybrid, and electric vehicles in real driving cycles. *Energies*, 13(23), **2020**, 6423. doi: 10.3390/en13236423.
49. Borucka A., Wiśniowski P., Mazurkiewicz D., Świdorski A., Laboratory measurements of vehicle exhaust emissions in conditions reproducing real traffic. *Measurement*, 174, **2021**, 108998. doi: 10.1016/j.measurement.2021.108998.
50. Luján J.M., Bermudez V., Pla B., Redondo F., Engine test bench feasibility for the study and research of real driving cycles: pollutant emissions uncertainty characterization. *International Journal of Engine Research*, 23(7), **2021**. doi: 10.1177/14680874211007999.

51. Donateo T., Giovinazzi M., Building a cycle for real driving emissions. *Energy Procedia*, 126, **2017**, 891–898. doi: 10.1016/j.egypro.2017.08.307.
52. Donateo T., Giovinazzi M., Tamborrino A., Reproducing real world emission tests with a traffic simulator. SAE Technical Papers 2018-37-0001, **2018**. doi: 10.4271/2018-37-0001.
53. Roberts P., Mumby R., Mason A., Redford-Knight L., Kaur P., RDE plus – the development of a road, rig and engine-in-the-loop test methodology for real driving emissions compliance. SAE Technical Paper 2019-01-0756, **2019**. doi: 10.4271/2019-01-0756.
54. Mason A., Roberts P., Whelan S., Kondo Y., Brenton L., RDE plus – a road to rig development methodology for complete RDE compliance: road to chassis perspective. SAE Technical Paper 2020-01-0378, **2020**. doi: 10.4271/2020-01-0378.
55. Mason A., Mumby R., Roberts P., Kondo Y., Komatsu Y., et al., RDE plus: accurate replication of real-world vehicle testing within the chassis dynamometer laboratory using HORIBA RDE+ solutions. In: Powertrain Systems for Net-Zero Transport. *CRC Press*, 37, **2021**. doi: 10.1201/9781003219217-14.
56. Zachiotis A.T., Giakoumis E.G., Monte Carlo simulation methodology to assess the impact of ambient wind on emissions from a light-commercial vehicle running on the worldwide-harmonized light-duty vehicles test cycle (WLTC). *Energies*, 14, **2021**, 661. doi: 10.3390/en14030661.
57. Suarez Bertoa R., Pechout M., Vojtíšek-Lom M., Astorga-Llorens M., Regulated and Non-Regulated Emissions from Euro 6 Diesel, Gasoline and CNG Vehicles under Real-World Driving Conditions. *Atmosphere*, 11(2), 2020, 204, JRC119010.
58. Claßen J., Krysmon S., Dorscheidt F., Sterlepper S., Pischinger S., Real driving emission calibration – review of current validation methods against the background of future emission legislation. *Applied Sciences*, 11(12), **2021**, 5429. doi: 10.3390/app11125429.
59. Galvagno A., Previti U., Famoso F., Brusca S., An innovative methodology to take into account traffic information on WLTP cycle for hybrid vehicles. *Energies*, 14(6), **2021**, 1548. doi: 10.3390/en14061548.
60. Skobieć K., Pielecha J., Analysis of the exhaust emissions of hybrid vehicles for the current and future RDE driving cycle. *Energies*, 15(22), **2022**, 8691. doi: 10.3390/en15228691.
61. Report for DG Climate Action. Improving understanding of technology and costs for CO₂ reductions from cars and LCVs in the period to 2030 and development of cost curves. Ref. CLIMA.C.2/FRA/2012/0006.
62. Joshi A., Review of vehicle engine efficiency and emissions. SAE Int. J. Advances & Curr. Prac. in Mobility, 2(5), **2020**, 2479-2507. doi: 10.4271/2020-01-0352.
63. Pielecha J., Badania emisji zanieczyszczeń silników spalinowych. Wyd. Politechniki Poznańskiej. Poznań **2017**.
64. Badania emisji spalin pojazdów w temperaturach z zakresu od -35°C do 60°C. On-line: https://www.bosmal.com.pl/367-badania_emisji_spalin_pojazdow_w_temperaturach_z_zakresu_od_-35%CB%9Ac_do_60%CB%9Ac (dostęp: 7.01.2023).

Załącznik

Tablica Z1. Szczegółowa charakterystyka wyników testu WLTC dla pojazdu konwencjonalnego zasilanego benzyną

Test: WLTC		Procedura WLTP				
Rodzaj napędu	Klasyczny					
Rodzaj paliwa	Benzyna					
	Faza 1	Faza 2	Faza 3	Faza 4	WLTC	Jednostka
Wymagania testu						
Czas wymagany	0 - 589	590 - 1022	1023 - 1477	1477 - 1800		km/h
Czas fazy	589	433	455	323	1800	s
Dystans fazy	3,08	4,76	7,16	8,26	23,26	km
Udział fazy (czas)	32,7%	24,1%	25,3%	17,9%		% (s/s)
Udział fazy (dystans)	13,3%	20,5%	30,8%	35,5%		% (km/km)
Zużycie paliwa						
Zużycie paliwa	0,31	0,32	0,42	0,56	1,62	dm ³
Zużycie paliwa (przebiegowe)	10,19	6,73	5,85	6,81	6,95	dm ³ /100 km
Postój						
Postój	23,60%	10,62%	6,15%	1,24%	12,06%	
Średnia prędkość	18,87	39,57	56,67	92,02	46,53	km/h
a < 0	40,24%	38,80%	44,62%	44,89%	41,83%	%
a = 0	0,68%	2,08%	4,40%	1,24%	2,06%	%
a > 0	35,48%	48,50%	44,84%	52,63%	44,06%	%
Średnie przyspieszenie	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	m/s ²
Emisja drogowa						
b _{CO}	304,62	206,91	147,34	326,75	244,05	mg/km
b _{NOx}	19,75	2,29	1,91	2,16	4,44	mg/km
b _{CO2}	240,84	159,07	138,30	160,87	164,15	g/km
b _{PN}	3,69E+11	1,18E+11	7,53E+10	1,48E+11	1,49E+11	1/km

Tablica Z2. Szczegółowa charakterystyka wyników testu WLTC dla pojazdu konwencjonalnego zasilanego olejem napędowym

Test: WLTC		Procedura WLTP				
Rodzaj napędu	Klasyczny					
Rodzaj paliwa	Olej napędowy					
	Faza 1	Faza 2	Faza 3	Faza 4	WLTC	Jednostka
Wymagania testu						
Czas wymagany	0 - 589	590 - 1022	1023 - 1477	1477 - 1800		km/h
Czas fazy	589	433	455	323	1800	s
Dystans fazy	3,08	4,75	7,16	8,26	23,24	km
Udział fazy (czas)	32,7%	24,1%	25,3%	17,9%		% (s/s)
Udział fazy (dystans)	13,2%	20,4%	30,8%	35,5%		% (km/km)
Zużycie paliwa						
Zużycie paliwa	0,27	0,33	0,49	0,75	1,84	dm ³
Zużycie paliwa (przebiegowe)	8,68	6,94	6,83	9,10	7,90	dm ³ /100 km
Postój						
Postój	23,77%	10,62%	6,15%	0,93%	12,06%	
Średnia prędkość	18,85	39,49	56,61	92,01	46,49	km/h
a < 0	39,05%	37,41%	43,52%	46,13%	41,06%	%
a = 0	1,19%	2,54%	2,86%	2,17%	2,11%	%
a > 0	35,99%	49,42%	47,47%	50,77%	44,78%	%
Średnie przyspieszenie	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	m/s ²
Emisja drogowa						
b _{CO}	165,24	88,05	80,21	95,58	98,54	mg/km
b _{NOx}	113,62	12,22	0,77	3,89	19,17	mg/km
b _{CO2}	205,11	163,96	161,42	214,97	186,75	g/km
b _{PN}	6,00E+10	4,77E+10	2,05E+10	6,16E+10	4,59E+10	1/km

Tablica Z3. Szczegółowa charakterystyka wyników testu WLTC dla pojazdu hybrydowego (silnik zasilany benzyną oraz silnik elektryczny)

Test: WLTC		Procedura WLTP				
Rodzaj napędu	Hybrydowy					
Rodzaj paliwa	Benzyna					
	Faza 1	Faza 2	Faza 3	Faza 4	WLTC	Jednostka
Wymagania testu						
Czas wymagany	0 - 589	590 - 1022	1023 - 1477	1477 - 1800		km/h
Czas fazy	589	433	455	323	1800	s
Dystans fazy	3,10	4,75	7,16	8,27	23,28	km
Udział fazy (czas)	32,7%	24,1%	25,3%	17,9%		% (s/s)
Udział fazy (dystans)	13,3%	20,4%	30,8%	35,5%		% (km/km)
Zużycie paliwa	0,12	0,23	0,28	0,43	1,06	dm ³
Zużycie paliwa (przebiegowe)	3,86	4,78	3,96	5,15	4,54	dm ³ /100 km
Postój	23,77%	10,62%	5,71%	0,93%	11,94%	
Średnia prędkość	18,97	39,49	56,68	92,13	46,57	km/h
a < 0	40,75%	38,57%	46,37%	45,82%	42,56%	%
a = 0	0,34%	1,62%	3,08%	3,41%	1,89%	%
a > 0	35,14%	49,19%	44,84%	49,85%	43,61%	%
Średnie przyspieszenie	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	m/s ²
Emisja drogowa						
b _{CO}	143,82	59,22	31,99	39,02	54,93	mg/km
b _{NOx}	56,54	4,09	2,05	10,84	12,84	mg/km
b _{CO2}	91,30	113,02	93,61	121,70	107,24	g/km
b _{PN}	1,50E+12	8,46E+11	9,55E+09	1,17E+10	3,79E+11	1/km

Tablica Z4. Szczegółowa charakterystyka przejazdu w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego dla pojazdu konwencjonalnego zasilanego benzyną

Test: RDE Procedura RDE					
Rodzaj napędu	Klasyczny				
Rodzaj paliwa	Benzyna				
	Część miejska	Część pozamiejska	Część autostradowa	RDE	Jednostka
Wymagania testu					
Prędkość wymagana	0-60	60-90	90-		km/h
Czas fazy	4371	1437	1181	6989	s
Dystans fazy	33,72	29,67	37,71	101,10	km
Udział fazy (wymóg)	29 - 44	33 ±10	33 ±10		% (km/km)
Udział fazy (dystans)	33,4%	29,4%	37,3%	100%	% (km/km)
Zużycie paliwa					
Zużycie paliwa	2,87	1,52	2,39	6,77	dm ³
Zużycie paliwa (przebiegowe)	8,50	5,12	6,33	6,70	dm ³ /100 km
Postój					
Średnia prędkość	18,03%	0,00%	0,00%	11,27%	km/h
a < 0	27,79	74,32	114,94	52,08	km/h
a = 0	28,57%	26,65%	25,40%	27,64%	%
a > 0	22,40%	43,70%	47,33%	30,99%	%
Średnie przyspieszenie	31,85%	29,65%	27,27%	30,62%	%
	-0,0023	0,0062	0,0014	0,00	m/s ²
Masa związków szkodliwych					
m _{CO}	7097,79	7177,452286	16204,53	30479,77	mg
m _{NOx}	101,46	73,27	175,56	350,29	mg
m _{CO2}	6167,72	4352,31	7138,53	17658,56	g
L _{PN}	4,38E+12	3,15E+12	8,73E+12	1,63E+13	szt
Natężenie emisji					
E _{CO}	1,62	4,99	13,72	4,36	mg/s
E _{NOx}	0,02	0,05	0,15	0,05	mg/s
E _{CO2}	1,411,05	3,028,74	6,044,48	2503,51	mg/s
E _{PN}	1,00E+09	2,19E+09	7,39E+09	2,33E+09	1/s
Emisja drogowa					
b _{CO}	210,49	241,89	429,75	293,207	mg/km
b _{NOx}	3,01	2,47	4,66	3,374	mg/km
b _{CO2}	182,91	146,68	189,32	173,07	g/km
b _{PN}	1,30E+11	1,06E+11	2,32E+11	1,56E+11	1/km

Tablica Z5. Szczegółowa charakterystyka przejazdu w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego dla pojazdu konwencjonalnego zasilanego olejem napędowym

Test: RDE Procedura RDE					
Rodzaj napędu	Klasyczny				
Rodzaj paliwa	Olej napędowy				
	Część miejska	Część pozamiejska	Część autostradowa	RDE	Jednostka
Wymagania testu					
Prędkość wymagana	0-60	60-90	90-		km/h
Czas fazy	3790	1571	991	6352	s
Dystans fazy	31,70	33,15	31,23	96,08	km
Udział fazy (wymóg)	29 - 44	33 ±10	33 ±10		% (km/km)
Udział fazy (dystans)	33,0%	34,5%	32,5%	100%	% (km/km)
Zużycie paliwa					
Zużycie paliwa	2,33	1,73	2,33	6,39	dm ³
Zużycie paliwa (przebiegowe)	7,35	5,20	7,46	6,65	dm ³ /100 km
Postój					
Średnia prędkość	13,72%	0,00%	0,00%	8,19%	
a < 0	30,13	75,95	113,44	54,46	km/h
a = 0	32,40%	27,18%	27,45%	30,34%	%
a > 0	16,68%	48,06%	46,92%	29,16%	%
Średnie przyspieszenie	37,86%	24,76%	25,63%	32,71%	%
	-0,0022	0,0045	0,0011	0,00	m/s ²
Masa związków szkodliwych					
m _{CO}	3622,45	2476,591144	2546,16	8645,20	mg
m _{NOx}	1358,07	455,08	268,67	2081,82	mg
m _{CO2}	5213,29	4750,35	5426,59	15390,23	g
L _{PN}	1,98E+12	9,25E+11	1,68E+12	4,58E+12	szt
Natężenie emisji					
E _{CO}	0,96	1,58	2,57	1,36	mg/s
E _{NOx}	0,36	0,29	0,27	0,33	mg/s
E _{CO2}	1,375,54	3,023,77	5,475,87	2428,41	mg/s
E _{PN}	5,21E+08	5,89E+08	1,70E+09	7,21E+08	1/s
Emisja drogowa					
b _{CO}	114,27	74,71	81,53	90,411	mg/km
b _{NOx}	42,84	13,73	8,60	21,935	mg/km
b _{CO2}	164,45	143,29	173,77	160,55	g/km
b _{PN}	6,23E+10	2,79E+10	5,38E+10	4,82E+10	1/km

Tablica Z6. Szczegółowa charakterystyka przejazdu w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego dla pojazdu hybrydowego (silnik zasilany benzyną oraz silnik elektryczny)

Test: RDE Procedura RDE					
Rodzaj napędu	Hybrydowy				
Rodzaj paliwa	Benzyna				
	Część miejska	Część pozamiejska	Część autostradowa	RDE	Jednostka
Wymagania testu					
Prędkość wymagana	0-60	60-90	90-	6884	km/h
Czas fazy	4327	1509	1048	97,93	s
Dystans fazy	35,29	31,13	31,52	100%	km
Udział fazy (wymóg)	29 - 44	33 ±10	33 ±10		% (km/km)
Udział fazy (dystans)	36,0%	31,8%	32,2%	100%	% (km/km)
Zużycie paliwa					
Zużycie paliwa	1,46	1,23	2,10	4,79	dm ³
Zużycie paliwa (przebiegowe)	4,14	3,94	6,66	4,89	dm ³ /100 km
Postój					
Średnia prędkość	15,11%	0,00%	0,00%	9,50%	km/h
a < 0	29,37	74,24	108,26	51,22	%
a = 0	34,90%	36,05%	32,35%	34,76%	%
a > 0	10,70%	21,27%	26,62%	15,44%	%
Średnie przyspieszenie	39,94%	42,68%	41,03%	40,70%	m/s ²
	-0,0028	0,0073	0,0012	0,00	
Masa związków szkodliwych					
m _{CO}	2814,65	2163,042766	1067,12	6044,82	mg
m _{NOx}	222,16	287,32	303,50	812,98	mg
m _{CO2}	3308,25	3327,26	4858,92	11494,43	g
L _{PN}	3,63E+13	3,36E+12	9,83E+11	4,07E+13	szt
Natężenie emisji					
E _{CO}	0,65	1,43	1,02	0,88	mg/s
E _{NOx}	0,05	0,19	0,29	0,12	mg/s
E _{CO2}	764,56	2,204,94	4,636,37	1679,03	mg/s
E _{PN}	8,39E+09	2,23E+09	9,38E+08	5,91E+09	1/s
Emisja drogowa					
b _{CO}	79,77	69,49	33,86	61,226	mg/km
b _{NOx}	6,30	9,23	9,63	8,365	mg/km
b _{CO2}	93,75	106,89	154,18	118,03	g/km
b _{PN}	1,03E+12	1,08E+11	3,12E+10	3,96E+11	1/km

Tablica Z7. Szczegółowa charakterystyka testu homologacyjnego WLTC z połączoną fazą 1 i 2 (oznaczonych jako WLTC₁₊₂) dla pojazdu konwencjonalnego zasilanego benzyną

Test: WLTC₁₊₂ Procedura WLTP					
Rodzaj napędu	Klasyczny				
Rodzaj paliwa	Benzyna				
	Faza 1-2	Faza 3	Faza 4	WLTC*	Jednostka
Wymagania testu					
Czas wymagany	0 - 1022	1023 - 1477	1477 - 1800		km/h
Czas fazy	1022	455	323	1800	s
Dystans fazy	7,84	7,16	8,26	23,26	km
Udział fazy (czas)	56,8%	25,3%	17,9%		% (s/s)
Udział fazy (dystans)	33,7%	30,8%	35,5%		% (km/km)
Zużycie paliwa					
Zużycie paliwa	0,63	0,42	0,56	1,62	dm ³
Zużycie paliwa (przebiegowe)	8,09	5,85	6,81	6,95	dm ³ /100 km
Postój					
Średnia prędkość	18,10%	6,15%	1,24%	12,06%	km/h
a < 0	27,65	56,67	92,02	46,54	km/h
a = 0	39,63%	44,62%	44,89%	41,83%	%
a > 0	1,27%	4,40%	1,24%	2,06%	%
Średnie przyspieszenie	41,00%	44,84%	52,63%	44,06%	%
	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%	m/s ²
Emisja drogowa					
b _{CO}	245,31	147,34	326,75	244,052	mg/km
b _{NOx}	9,15	1,91	2,16	4,440	mg/km
b _{CO2}	191,21	138,30	160,87	164,15	g/km
b _{PN}	2,17E+11	7,53E+10	1,48E+11	1,49E+11	1/km

Tablica Z8. Szczegółowa charakterystyka testu homologacyjnego WLTC z połączoną fazą 1 i 2 (oznaczonych jako WLTC₁₊₂) dla pojazdu konwencjonalnego zasilanego olejem napędowym

Test: WLTC₁₊₂ Procedura WLTP					
Rodzaj napędu	Klasyczny				
Rodzaj paliwa	Olej napędowy				
	Faza 1-2	Faza 3	Faza 4	WLTC*	Jednostka
Wymagania testu					
Czas wymagany	0 - 1022	1023 - 1477	1477 - 1800		km/h
Czas fazy	1022	455	323	1800	s
Dystans fazy	7,83	7,16	8,26	23,24	km
Udział fazy (czas)	56,8%	25,3%	17,9%		% (s/s)
Udział fazy (dystans)	33,7%	30,8%	35,5%		% (km/km)
Zużycie paliwa					
Zużycie paliwa	0,60	0,49	0,75	1,84	dm ³
Zużycie paliwa (przebiegowe)	7,63	6,83	9,10	7,90	dm ³ /100 km
Postój					
Średnia prędkość	18,20%	6,15%	0,93%	12,06%	km/h
a < 0	27,60	56,61	92,01	46,49	km/h
a = 0	38,36%	43,52%	46,13%	41,06%	%
a > 0	1,76%	2,86%	2,17%	2,11%	%
Średnie przyspieszenie	41,68%	47,47%	50,77%	44,78%	%
	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%	m/s ²
Emisja drogowa					
b _{CO}	118,41	80,21	95,58	98,537	mg/km
b _{NOx}	52,10	0,77	3,89	19,172	mg/km
b _{CO2}	180,15	161,42	214,97	186,75	g/km
b _{PN}	5,26E+10	2,05E+10	6,16E+10	4,59E+10	1/km

Tablica Z9. Szczegółowa charakterystyka testu homologacyjnego WLTC z połączoną fazą 1 i 2 (oznaczonych jako WLTC₁₊₂) dla pojazdu hybrydowego (silnik zasilany benzyną oraz silnik elektryczny)

Test: WLTC₁₊₂ Procedura WLTP					
Rodzaj napędu	Hybrydowy				
Rodzaj paliwa	Benzyna				
	Faza 1-2	Faza 3	Faza 4	WLTC*	Jednostka
Wymagania testu					
Czas wymagany	0 - 1022	1023 - 1477	1477 - 1800	1800	km/h
Czas fazy	1022	455	323	1800	s
Dystans fazy	7,85	7,16	8,27	23,28	km
Udział fazy (czas)	56,8%	25,3%	17,9%		% (s/s)
Udział fazy (dystans)	33,7%	30,8%	35,5%		% (km/km)
Zużycie paliwa					
Zużycie paliwa	0,35	0,28	0,43	1,06	dm ³
Zużycie paliwa (przebiegowe)	4,42	3,96	5,15	4,54	dm ³ /100 km
Postój					
Postój	18,20%	5,71%	0,93%	11,94%	
Średnia prędkość	27,67	56,68	92,13	46,57	km/h
a < 0	39,82%	46,37%	45,82%	42,56%	%
a = 0	0,88%	3,08%	3,41%	1,89%	%
a > 0	41,10%	44,84%	49,85%	43,61%	%
Średnie przyspieszenie	0,0000	0,0000	0,0000	0,00%	m/s ²
Emisja drogowa					
b _{CO}	92,62	31,99	39,02	54,930	mg/km
b _{NOx}	24,80	2,05	10,84	12,839	mg/km
b _{CO2}	104,44	93,61	121,70	107,24	g/km
b _{PN}	1,10E+12	9,55E+09	1,17E+10	3,79E+11	1/km

Tablica Z10. Szczegółowa charakterystyka testu homologacyjnego WLTC wyznaczona według procedury RDE (oznaczonych jako WLTC_{RDE}) dla pojazdu konwencjonalnego zasilanego benzyną

Test: WLTC_{RDE}		Procedura RDE				
Rodzaj napędu	Klasyczny					
Rodzaj paliwa	Benzyna					
	Część miejska	Część pozamiejska	Część autostradowa	Cały	test	Jednostka
Wymagania testu						
Prędkość wymagana	0-60	60-90	90-		1800	km/h
Czas fazy	1224	301	275		1800	s
Dystans fazy	8,79	6,06	8,41		23,26	km
Udział fazy (wymóg)	29 - 44	33 ±10	33 ±10			% (km/km)
Udział fazy (dystans)	38%	26%	36%		100%	% (km/km)
Zużycie paliwa						
Zużycie paliwa	0,77	0,30	0,55		1,62	dm ³
Zużycie paliwa (przebiegowe)	8,72	4,98	6,51		6,95	dm ³ /100 km
Postój						
Średnia prędkość	17,73%	0,00%	0,00%		10,50%	km/h
a < 0	25,88	72,44	110,12		46,54	km/h
a = 0	40,11%	50,50%	40,00%		41,83%	%
a > 0	0,90%	2,33%	6,91%		2,06%	%
Średnie przyspieszenie	41,26%	47,18%	53,09%		44,06%	%
	-0,0026	0,0092	0,0013		0,00	m/s ²
Emisja drogowa						
b _{CO}	189,97	265,98	388,79		280,663	mg/km
b _{NOx}	2,25	2,06	2,08		2,130	mg/km
b _{CO2}	184,51	153,62	176,55		171,69	g/km
b _{PN}	1,31E+11	1,55E+11	1,71E+11		1,52E+11	1/km

Tablica Z11. Szczegółowa charakterystyka testu homologacyjnego WLTC wyznaczona według procedury RDE (oznaczonych jako WLTC_{RDE}) dla pojazdu konwencjonalnego zasilanego olejem napędowym

Test: WLTC_{RDE}		Procedura RDE				
Rodzaj napędu	Klasyczny					
Rodzaj paliwa	Olej napędowy					
	Część miejska	Część pozamiejska	Część autostradowa	Cały test	test	Jednostka
Wymagania testu						
Prędkość wymagana	0-60	60-90	90-		1800	km/h
Czas fazy	1229	297	274		1800	s
Dystans fazy	8,85	6,00	8,39		23,24	km
Udział fazy (wymóg)	29 - 44	33 ±10	33 ±10			% (km/km)
Udział fazy (dystans)	38%	26%	36%		100%	% (km/km)
Zużycie paliwa						
Zużycie paliwa	0,70	0,38	0,77		1,84	dm ³
Zużycie paliwa (przebiegowe)	7,87	6,26	9,12		7,90	dm ³ /100 km
Postój						
Średnia prędkość	17,66%	0,00%	0,00%		10,50%	km/h
a < 0	25,95	72,72	110,20		46,49	km/h
a = 0	38,41%	50,17%	43,07%		41,06%	%
a > 0	2,03%	1,35%	3,28%		2,11%	%
Średnie przyspieszenie	41,90%	48,48%	53,65%		44,78%	%
	-0,0030	0,0108	0,0019		0,00	m/s ²
Emisja drogowa						
b _{CO}	104,23	86,41	101,25		97,365	mg/km
b _{NOx}	23,12	1,58	3,48		9,529	mg/km
b _{CO2}	177,43	179,91	230,20		195,66	g/km
b _{PN}	5,75E+10	4,69E+10	5,63E+10		5,36E+10	1/km

Tablica Z12. Szczegółowa charakterystyka testu homologacyjnego WLTC wyznaczona według procedury RDE (oznaczonych jako WLTC_{RDE}) dla pojazdu hybrydowego (silnik zasilany benzyną oraz silnik elektryczny)

Test: WLTC_{RDE} Procedura RDE					
Rodzaj napędu	Hybrydowy				
Rodzaj paliwa	Benzyna				
	Część miejska	Część pozamiejska	Część autostradowa	Cały test	Jednostka
Wymagania testu					
Prędkość wymagana	0-60	60-90	90-		km/h
Czas fazy	1229	298	273	1800	s
Dystans fazy	8,87	6,03	8,38	23,28	km
Udział fazy (wymóg)	29 - 44	33 ±10	33 ±10		%(km/km)
Udział fazy (dystans)	38,1%	25,9%	36,0%	100%	%(km/km)
Zużycie paliwa					
Zużycie paliwa	0,41	0,22	0,43	1,06	dm ³
Zużycie paliwa (przebiegowe)	4,67	3,58	5,09	4,54	dm ³ /100 km
Postój					
Postój	17,49%	0,00%	0,00%	10,50%	
Średnia prędkość	26,03	72,78	110,44	46,57	km/h
a < 0	40,76%	47,65%	45,05%	42,56%	%
a = 0	0,81%	3,69%	4,76%	1,89%	%
a > 0	40,93%	48,66%	50,18%	43,61%	%
Średnie przyspieszenie	-0,0045	0,0170	0,0017	0,00	m/s ²
Emisja drogowa					
b _{CO}	82,04	40,71	39,03	54,207	mg/km
b _{NOx}	5,55	2,60	14,78	7,620	mg/km
b _{CO2}	110,79	108,53	126,90	115,36	g/km
b _{PN}	9,86E+11	3,04E+10	1,22E+10	3,49E+11	1/km