



POLITECHNIKA POZNAŃSKA
Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu



mgr inż. Natalia Szymlet

**Emisja związków toksycznych z miejskich pojazdów
jednośladowych w rzeczywistych warunkach
eksploatacji**

PRACA DOKTORSKA

Promotor:
dr hab. inż. Piotr Lijewski, prof. PP

Promotor pomocniczy:
dr inż. Beata Kurc

Poznań 2022

Streszczenie

Aktualnie badania emisji związków toksycznych (CO, CO₂, HC oraz NO_x) i zużycia paliwa dla pojazdów jednośladowych są prowadzone w warunkach laboratoryjnych, głównie z wykorzystaniem hamowni podwoziowych. Tego typu prace prowadzone są w ramach opracowanych i ustandaryzowanych cykli jezdnych, jednak ich reprezentatywność jest dyskusyjna, co zostało udowodnione w niniejszej dysertacji. Stanowi to punkt wyjścia do konieczności rozwoju badań w rzeczywistych warunkach eksploatacji przywołanej grupy pojazdów. Do tego celu niezbędny jest rozwój aparatury pomiarowej oraz metod oceny emisji zanieczyszczeń w warunkach rzeczywistej i typowej eksploatacji dla miejskich pojazdów jednośladowych. Rozwój i ewentualna legislacja tego typu badań pozwoli na ustalenie wszelkich relacji przyczynowo-skutkowych zachodzących w czasie użytkowania pojazdów jednośladowych, działania ich układów napędowych oraz umożliwi ocenę rzeczywistych wartości zanieczyszczeń emitowanych związków toksycznych.

Poznanie aktualnego stanu wiedzy i luk poznawczych przyczyniło się do realizacji przedstawionej pracy doktorskiej, której głównymi celami są: identyfikacja emisji związków toksycznych spalin i parametrów ruchu miejskich pojazdów jednośladowych w rzeczywistych warunkach eksploatacji oraz propozycja autorskiej procedury badawczej dla tego typu pojazdów, odpowiadającej lokalnym warunkom drogowym. Może ona jednak stanowić bazę do skonstruowania ustandaryzowanej i globalnej procedury do pomiaru związków toksycznych z miejskich pojazdów jednośladowych w warunkach drogowych. Realizacja tych założeń wymagała od autorki pracy szeregu działań, którym poświęcone zostały odpowiednie jej rozdziały.

W pierwszej kolejności (rozdział 1) nakreślono problematykę oraz genezę podjętej tematyki dysertacji. Przedstawione zostały rozważania dotyczące wielkości populacji miejskich pojazdów jednośladowych w Polsce i na świecie, a także związane z tym koszty zdrowotne oraz środowiskowe. Rozdział drugi stanowi przegląd obecnie obowiązujących regulacji prawnych dotyczących badań emisji związków toksycznych spalin z silników pojazdów jednośladowych. Przedstawiona została ich kategoryzacja na podstawie prawa polskiego oraz kryteriów europejskich oraz rozporządzeń dotyczących prawidłowej interpretacji norm emisji spalin. Omówione zostały poszczególne standardy emisyjne w Europie i na świecie wraz z datami ich wprowadzenia oraz wartościami dopuszczalnymi poszczególnych zanieczyszczeń. Rozdział kończy się wytycznymi i obowiązkami producentów pojazdów kategorii L dotyczących badań efektywności środowiskowej (w tym przebiegami testów homologacyjnych).

W zakresie przygotowań do realizacji podjętej tematyki monografii dokonano analizy literaturowej (rozdział 3). Studia w tym zakresie obejmowały przede wszystkim zagadnienia dotyczące ekologii, energochłonności, budowy nowoczesnych pojazdów silnikowych, w tym należących do kategorii L, jak również badań realizowanych w warunkach laboratoryjnych na jednorolkowych hamowniach podwoziowych. Wykazały one, że obowiązujące testy homologacyjne (obecnie test WMTC – *World Motorcycle Test Cycle*) nie odwzorowują w pełni rzeczywistych parametrów ruchu pojazdów jednośladowych i niezbędne są kroki prowadzące do legislacji procedur badań emisji związków toksycznych z tej kategorii pojazdów w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Kolejny rozdział zawiera cele pracy oraz jej zakres.

Część badawczą poprzedził wybór reprezentatywnej grupy obiektów, które stanowiły miejskie pojazdy jednośladowe, wyposażone w silniki o objętości skokowej nieprzekraczającej 125 cm³. Badania przeprowadzono, w zależności od konstrukcji obiektu, na dwóch lub trzech trasach pomiarowych, składających się z części miejskiej lub części miejskiej oraz pozamiejskiej. Były one zlokalizowane na terenie aglomeracji poznańskiej. Do określenia rzeczywistych parametrów ruchu oraz emisji związków toksycznych posłużyła aparatura z grupy PEMS (*Portable Emissions Measurement System*) – AxionR/S+, charakteryzująca się niewielkimi wymiarami oraz małą masą. Cechy te umożliwiają badania pojazdów jednośladowych (zarówno motocykli, jak i motorowerów), a nawet jeszcze mniejszych maszyn, w warunkach rzeczywistych.

W rozdziale 6 omówiono metodę wyznaczania charakterystyk udziałów czasu eksploatacji i natężenia emisji zanieczyszczeń z rozpatrywanej grupy pojazdów, na podstawie przyjętych przez autorkę założeń. Następnie, bazując na uzyskanych wynikach badań dokonano szczegółowej oceny parametrów ruchu w aspekcie obowiązujących testów homologacyjnych. Stanowiło to podstawę do określenia zależności między parametrami jezdnymi rozpatrywanej grupy pojazdów a emisją związków szkodliwych oraz wyznaczono wartości emisji drogowej wszystkich analizowanych zanieczyszczeń. Co więcej na podstawie tych wartości określono współczynniki emisji, zestawiając wartości emisji drogowej z wartościami dopuszczalnymi określonymi w normach Euro. Analiza porównawcza wykazała znaczące przekroczenia limitów CO oraz NO_x. Rozważania dodatkowo wzbogacono o analizę chemicznego składu benzyny i próbek spalin pobranych z miejskiego pojazdu jednośladowego. Punkty pracy silnika, dla których dokonano poboru próbek określone zostały na podstawie badań empirycznych w rzeczywistych warunkach eksploatacji. W dalszej części, otrzymane w procesie rozdzielania chromatograficznego, poszczególne substancje chemiczne poddane zostały szczegółowej ocenie w aspekcie ich toksykologii.

W rozdziale 7 rozważaniom poddano weryfikację ogólnej dynamiki wszystkich przejazdów obiektów badawczych w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Posłużyło to do oceny ważności przejazdu lekkich pojazdów pasażerskich i użytkowych, na podstawie wartości względnego przyspieszenia dodatniego oraz 95. centyla iloczynu prędkości pojazdu i jego względnego przyspieszenia. Te parametry wraz z wynikami badań emisyjnych pozwoliły określić wytyczne autorskiej procedury badawczej. Dla testu zaproponowano nazwę RUMET – *Real Urban Motorcycle Emission Test*, w którym zdefiniowano wymagania dotyczące aparatury pomiarowej, warunków eksploatacyjnych, dynamiki przejazdu oraz warunków otoczenia. W ostatnim rozdziale zawarto ogólną charakterystykę wyników pracy, wnioski szczegółowe, a także kierunki dalszych prac. Przedstawiona dysertacja dostarcza nowej wiedzy w zakresie rzeczywistych parametrów ruchu oraz emisji z miejskich pojazdów jednośladowych oraz zależności między nimi. Odstępstwa uzyskanych wyników parametrów jezdnych i wartości emisji związków toksycznych od tych uzyskiwanych w obowiązujących testach homologacyjnych potwierdza zasadność podjętej tematyki badawczej.

Spis treści

Streszczenie	2
Wykaz najważniejszych skrótów i oznaczeń	6
1. Wprowadzenie	8
2. Regulacje prawne dotyczące badań emisji związków toksycznych spalin z silników pojazdów jednośladowych	12
2.1. Uwagi ogólne	12
2.2. Kategoryzacja pojazdów jednośladowych	13
2.3. Normy emisji związków toksycznych w Unii Europejskiej i na świecie	21
2.4. Wytyczne legislacyjne w zakresie badań	26
3. Przegląd literatury w aspekcie badań emisji związków toksycznych spalin z silników pojazdów jednośladowych	32
4. Cel, problem badawczy i zakres pracy	38
5. Metodyka badań	41
5.1. Badania emisyjne w rzeczywistych warunkach eksploatacji	41
5.1.1. Aparatura pomiarowa	41
5.1.2. Obiekty badawcze	44
5.1.3. Trasy badawcze	45
5.2. Badania jakościowe	49
5.2.1. Wstęp do badań jakościowych	49
5.2.2. Pobór i przygotowanie próbek pomiarowych	49
5.2.3. Aparatura pomiarowa	52
5.2.4. Warunki analizy chromatograficznej	54
6. Analiza emisji związków toksycznych w rzeczywistych warunkach eksploatacji z miejskich pojazdów jednośladowych	55
6.1. Wstęp do analizy badań	55
6.2. Analiza parametrów eksploatacyjnych	56
6.3. Analiza parametrów ruchu w aspekcie obowiązujących testów homologacyjnych	58
6.4. Analiza emisji związków toksycznych w rzeczywistych warunkach eksploatacji z miejskich pojazdów jednośladowych	76
6.5. Analiza porównawcza współczynników emisji drogowej	107
6.6. Analiza chromatograficzna składu chemicznego próbek spalin	110
7. Opracowanie autorskiego testu dla miejskich pojazdów jednośladowych w warunkach rzeczywistej eksploatacji	120
7.1. Wymagania testu RDE dla pojazdów osobowych	120
7.2. Weryfikacja ogólnej dynamiki przejazdów miejskich pojazdów jednośladowych w rzeczywistych warunkach eksploatacji	122

7.3. Propozycja autorskiej procedury badawczej dla miejskich pojazdów jednośladowych w rzeczywistych warunkach eksploatacji	127
8. Wnioski.....	132
Literatura.....	136
Abstract.....	146

Wykaz najważniejszych skrótów i oznaczeń

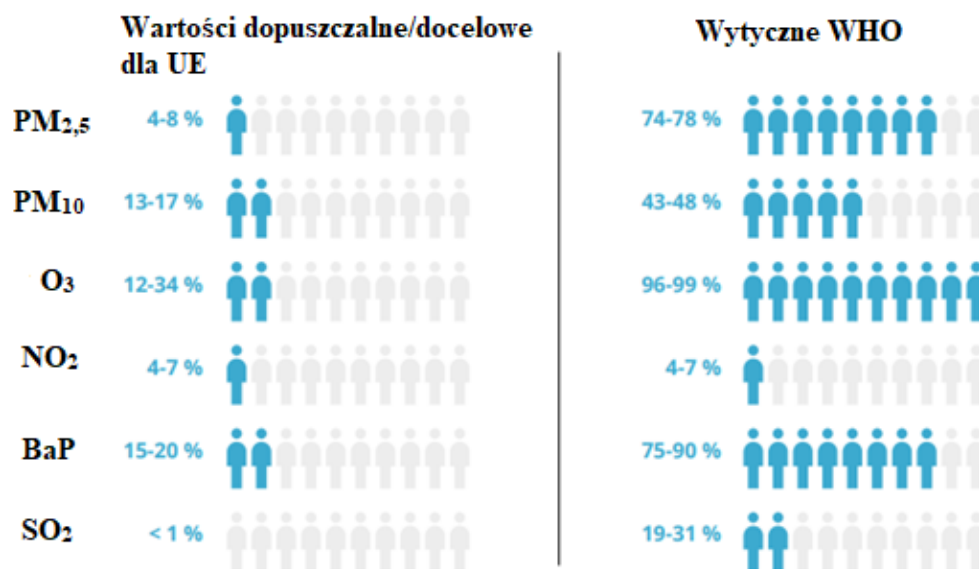
a	– przyspieszenie [m/s^2]
amu	– <i>atomic mass unit</i> – jednostka masy atomowej
BTX	– <i>Benzene, Toluene, Xylene</i> – grupa węglowodorów aromatycznych (benzen, toluen, ksylen)
CECDC	– <i>The Centre for Environmental Monitoring Motorcycle Driving Cycle</i> – Centrum Monitorowania Środowiska Motocykli
CF	– <i>Conformity Factor</i> – współczynnik zgodności emisji zanieczyszczeń
CO	– <i>Carbon Oxide</i> – tlenek węgla
CO₂	– <i>Carbon Dioxide</i> – dwutlenek węgla
COVID-19	– <i>Coronavirus Disease 2019</i>
ECE	– <i>Economic Commission for Europe</i> – Europejska Komisja Gospodarcza
e_{dop}	– dopuszczalna emisja drogową związku toksycznego zgodnie z normą Euro
EEA	– <i>European Environment Agency</i> – Europejska Agencja Środowiskowa
EKG/ONZ	– Europejska Komisja Gospodarcza Organizacji Narodów Zjednoczonych
EPA	– <i>Environmental Protection Agency</i> – Agencja Ochrony Środowiskowej
e_{rzc}	– emisja drogową związku toksycznego uzyskana w warunkach drogowych
ETV	– <i>Environmental Technology Verification</i> – Program Weryfikacji Technologii Środowiskowej
EU	– <i>European Union</i> – Unia Europejska
EURO	– normy emisji spalin w Europie
GC	– <i>Gas Chromatography</i> – chromatografia gazowa
GHE	– <i>Greenhouse Effect</i> – efekt cieplarniany
GHG	– <i>Greenhouse Gas</i> – gazy cieplarniane
GPS	– <i>Global Positioning System</i> – system globalnego pozycjonowania
HC	– <i>Hydrocarbons</i> – węglowodory
KHM	– <i>Khiaosung Driving Cycle</i> – Cykl Jezdny Khiaosung
k_j	– wskaźnik emisji drogową związku szkodliwego
LDV	– <i>Light Duty Vehicle</i> – pojazd lekki
LZO	– Lotne Związki Organiczne
m	– <i>mass</i> – masa
MS	– <i>Mass Spectrometry</i> – Spektrometria Mas
n	– prędkość obrotowa wału korbowego

NDIR	– <i>Nondispersive Infrared Sensor</i> – niedispersyjny czujnik podczerwieni
NIST	– <i>Nationale Institute of Standards and Technology</i> – Narodowy Instytut Standardów i Technologii
NMHC	– <i>Non-Methane Hydrocarbons</i> – węglowodory niemetaanowe
NO_x	– <i>Nitrogen Oxides</i> – tlenki azotu
OBD	– <i>On-Board Diagnostics</i> – pokładowy system diagnostyczny
OHC	– <i>Overhead Camshaft</i> – wałek rozrządu w głowicy
ONZ	– Organizacja Narodów Zjednoczonych
PEMS	– <i>Portable Emission Measurement System</i> – mobilne urządzenie do pomiarów mobilnych emisji spalin
PM	– <i>Particulate Mass</i> – masa cząstek stałych
RDE	– <i>Real Driving Emission</i> – emisja w rzeczywistych warunkach jazdy
RPA	– <i>Relative Positive Acceleration</i> – względne przyspieszenie dodatnie
R_t	– <i>Retention time</i> – czas retencji
RUMET	– <i>Real Urban Motorcycle Emission Test</i> – emisyjny test miejskich pojazdów jednośladowych w rzeczywistych warunkach eksploatacji
s	– droga [km/h]
t	– czas [s]
t_{bj}	– udział czasu pracy na biegu jałowym
TD	– <i>Thermal Desorption</i> – desorpcja termiczna
u_t	– udział czasowy
V	– objętość skokowa silnika
v	– prędkość pojazdu
WHO	– <i>World Health Organization</i> – Światowa Organizacja Zdrowia
WLTP	– <i>Worldwide Harmonized Light Vehicles</i> – Światowa Zharmonizowana procedura badania pojazdów lekkich
WMTC	– <i>World Motorcycle Test Cycle</i> – Światowy Cykl Badań Motocykli\
WWA	– wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne
z	– ładunek jonu
ZI	– zapłon iskrowy
ZS	– zapłon samoczynny

1. Wprowadzenie

Jakość powietrza, zwłaszcza w dużych ośrodkach miejskich, jest przedmiotem poważnej troski zarówno ich mieszkańców, jak i odpowiedzialnych za nie decydentów. Mimo, iż mobilność jest kluczowym czynnikiem umożliwiającym wzrost gospodarczy i dobrobyt obywateli, aspekt jej zrównoważoności stał się fundamentalny. Transport stanowi bowiem jedno z głównych źródeł zanieczyszczenia środowiska w skali globalnej [39], czego efektem jest ocieplenie klimatu spowodowane gazami cieplarnianymi oraz lokalnej przejawiającej się występowaniem smogu w aglomeracjach miejskich. Większość naukowców obecnie zgadza się, że zmiana klimatu wynika z efektu cieplarnianego (GHE – *Greenhouse Effect*), który w dużej mierze jest spowodowany emisją CO₂ (*Carbon Dioxide*) [60, 77, 106].

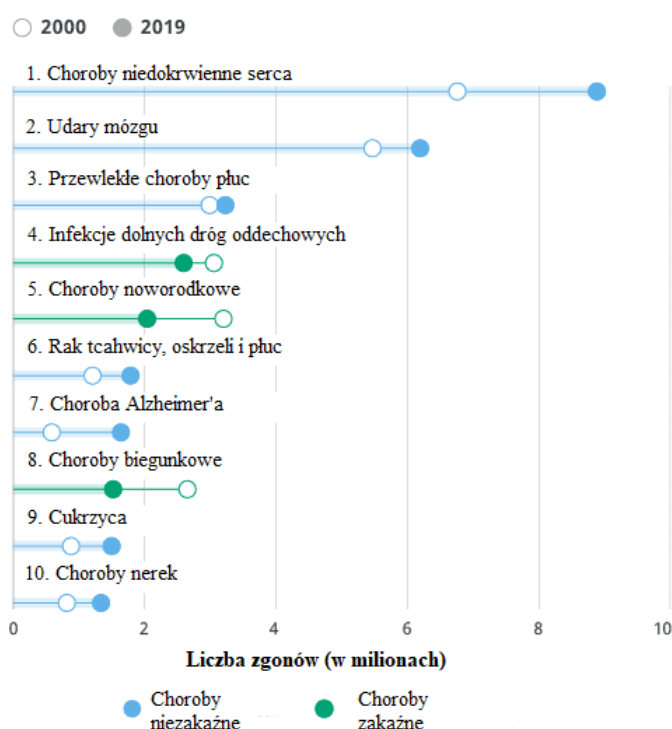
Ostatnie ustalenia potwierdzają także niekorzystne skutki zdrowotne spowodowane zanieczyszczeniem powietrza (nanocząsteczki, masa pyłu zawieszonego, ozon, tlenki azotu itp.). W pobliżu głównych dróg ich poziom jest znacząco wyższy, niż ten wynikający z ogólnego zanieczyszczenia na obszarach miejskich. Ludność mieszkająca i pracująca w pobliżu głównej infrastruktury transportowej może być zatem bardziej narażona na negatywne skutki zwiększonego poziomu zanieczyszczenia powietrza [58, 64, 94, 123, 137]. Zgodnie z raportem Światowej Organizacji Zdrowia (WHO – *World Health Organization*) [137] poziom zanieczyszczeń w aglomeracjach miejskich jest istotny zarówno w krajach rozwiniętych jak i rozwijających się. Zgodnie z danymi podanymi przez organizację, 90% populacji miejskiej na całym świecie oddycha powietrzem znacznie przewyższającym wartości dopuszczalne związków toksycznych (rys. 1.1), nadmierna jest także liczba zgonów spowodowanych zanieczyszczeniem powietrza [137].



Rys. 1.1. Odsetek ludności i miejskiej w UE narażonej na stężenia zanieczyszczeń powietrza przekraczające wartości referencyjne UE i WHO w latach 2016-2018 [137]

Jeden z raportów Światowej Organizacji Zdrowia traktuje o dziesięciu najczęstszych przyczynach śmierci w 2019 roku [137], które stanowiły 55% z 55,4 milionów zgonów na całym

świecie. Najważniejsze globalne przyczyny zgonów, uszeregowane według całkowitej liczby ofiar śmiertelnych, są związane z trzema szerokimi tematami: układ sercowo-naczyniowy (choroba niedokrwienna serca, udar), układ oddechowy (przewlekła choroba płuc, infekcje dolnych dróg oddechowych) i choroby noworodków – w tym urazy porodowe oraz powikłania przedwczesnego porodu. Zagrożenie jakie niesie za sobą zanieczyszczone powietrze – przewlekła choroba płuc stanowi jedną z najczęstszych przyczyn śmierci, odpowiedzialną za około 6% wszystkich zgonów na świecie (rys. 1.2). Z kolei zgony z powodu raka tchawicy, oskrzeli i płuc wzrosły z 1,2 miliona do 1,8 miliona od 2000 roku i obecnie zajmują 6 miejsce wśród głównych przyczyn śmierci.

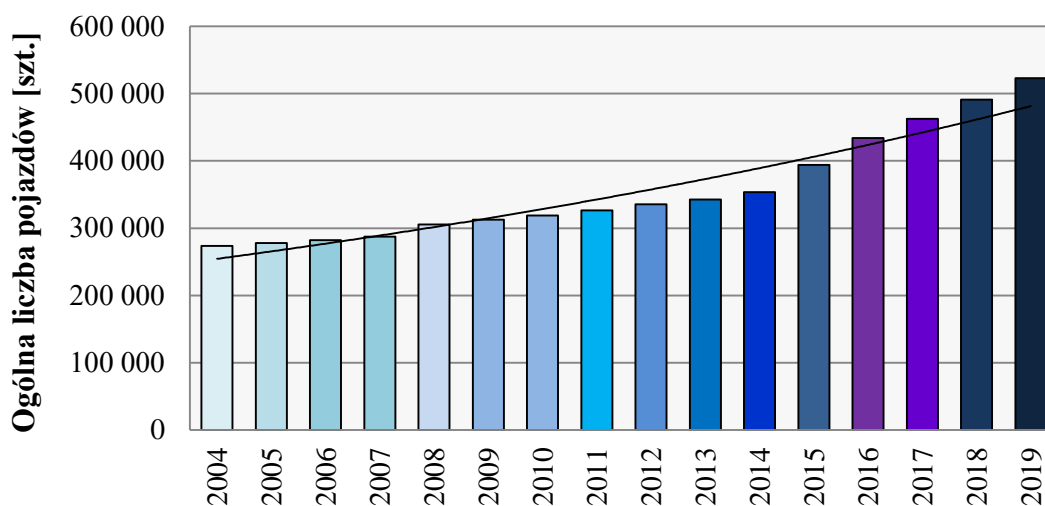


Rys. 1.2. Przyczyny zgonów na świecie w 2019 roku [137]

Nieustanny rozwój gospodarczy i związany z nim wzrost zamożności ludności światowych aglomeracji, prowadzi do zwiększającego się udziału transportu drogowego. Obecnie transport jest jednym z głównych konsumentów energii, z udziałem wynoszącym blisko 30% [135]. Badania Europejskiej Agencji Środowiskowej (EEA – *European Environment Środowiska*) wskazują, że transport generuje 20% całkowitej emisji CO₂, blisko 10% PM₁₀ (*Particulate mass*) i 45% NO_x (*Nitrogen Oxides*) [37, 38]. Prognozuje się, że do 2050 roku liczba pojazdów na świecie podwoi się [51]. Uzasadnia to konieczność badań i rozwoju nad niskoemisyjnymi rozwiązaniami układów napędowych. Zwiększenie liczby pojazdów w ostatnich latach dotyczy wszystkich kategorii, w tym pojazdów jednośladowych, stanowiących przedmiot podjętej tematyki dysertacji.

Grupa pojazdów jednośladowych pozwala na spełnienie codziennych potrzeb transportowych, szczególnie w Afryce oraz w Azji, gdzie udział motocykli oraz motorowerów stanowi 70% całej floty pojazdów drogowych [126]. W Chinach w 2016 roku sprzedano 16,8 miliona

egzemplarzy dwu- i trzykołowców, co oznacza zwiększenie o 38% w odniesieniu do 2008 roku [89]. W innych krajach azjatyckich liczba eksploatowanych dwu- i trzykołowców również jest znaczna i corocznie zwiększają swój udział. Za przykład należy wskazać Indie, gdzie w latach 2017 i 2018 sprzedano około 20 milionów sztuk jednośladów [7], a w Tajlandii 56% wszystkich pojazdów to pojazdy kategorii L. Pod względem liczby eksploatowanych i sprzedawanych motocykli oraz motorowerów rynek Unii Europejskiej wygląda zdecydowanie gorzej, mimo to w ostatnich kilku latach również obserwowany jest trend wzrostowy [35]. Prym pod względem liczby nowo zarejestrowanych motocykli oraz motorowerów wiodą Niemcy, Francja oraz Włochy (stan na 2016 rok). W pięciu największych europejskich krajach (tj. Francja, Niemcy, Włochy, i Wielka Brytania) w 2020 roku zarejestrowano łącznie 883 102 motocykli [35]. Na terenie Polski w 2019 roku ogólna liczba zarejestrowanych motocykli osiągnęła wartość prawie 1,6 miliona, w tym motocykli do 125 cm³ ponad pół miliona (rys. 1.3), natomiast liczba motorowerów w tym czasie wynosiła prawie 1,4 miliona egzemplarzy.



Rys. 1.3. Ogólna liczba motocykli < 125 cm³ w Polsce w 2019 roku [48]

Zgodnie z polityką transportową Unii Europejskiej, w tym także Polski, niezwykle istotnym zagadnieniem jest eliminacja zatorów drogowych i emisji gazów cieplarnianych, które ściśle ze sobą korelują. Kwestia ograniczenia kongestii miejskiej wpisuje się również w ideę zrównoważonego rozwoju, która cieszy się powszechną znajomością, czego dowodzą liczne opracowania na jej temat. Jednym z nich jest Dokument wydany 28 marca 2011 roku jako Biała Księga "Plan utworzenia jednolitego europejskiego obszaru transportu – dążenie do osiągnięcia konkurencyjnego i zasobooszczędnego systemu transportu". Jest on podstawowym zapisem, który charakteryzuje spójną i zrównoważoną politykę transportową dla krajów członkowskich UE [69]. Dokument ten ma status raportu, zawierający propozycję dotyczącą konkretnego zagadnienia wydanego przez Komisję Europejską i nie jest aktem prawnym, do którego są zobowiązane kraje UE. Według zapisów zawartych w Księdze, najważniejszym zadaniem polityki transportowej jest „Zapewnienie wzrostu sektora transportu i wspieranie mobilności przy jednoczesnym osiągnięciu celu obniżenia emisji o 60%” [69]. Należy ten plan rozumieć jako nieustanne zwiększanie udziału usług transportowych w gospodarce przy jednoczesnym dbaniu o środowisko naturalne i zmniejszenia szkodliwych związków generowanych przez rozważany

sektor. Podsumowując, połączenie dynamicznej gospodarki i integralności społecznej powinno koncentrować się na spójności działań człowieka z wymaganiami ekosystemu.

Rozwiązanie, mające na celu zmniejszenie poziomu zatorów komunikacyjnych w miastach i na obszarach pozamiejskich, stanowi wykorzystanie właśnie jednośladów, co powoduje ciągły wzrost udziału tej kategorii pojazdów, w głównej mierze w krajach azjatyckich, gdzie problem zatorów miejskich jest szczególnie widoczny. Co więcej, pojazdy jednośladowe rekompensują brak transportu publicznego na odległych obszarach pozamiejskich, zapewniają również efektywną i zrównoważoną mobilność usług i towarów oraz transportu szczególnego tj. ratownictwa medycznego czy sił policyjnych. Rok 2020, w którym cały świat zmagał się z pandemią COVID19 (*Coronavirus Disease 2019*), ukazał kolejną zaletę użytkowania pojazdów jednośladowych, a mianowicie nastąpiło ożywienie na rynku ich sprzedaży. Wynikało to z ponownej atrakcyjności i wygody dwukołowych pojazdów silnikowych do dojazdów do pracy w mieście i na obszarach podmiejskich, w kontekście sanitarnym, w którym transport publiczny nie został uznany za bezpieczną opcję dla wielu jej wcześniejszych użytkowników. Jednakże zwiększający się udział motocykli i motorowerów przekłada się oczywiście na znaczący ich udział w generowaniu emisji związków toksycznych, szczególnie w aglomeracjach miejskich. Potwierdzeniem są liczne prace dotyczące tego problemu; Sahu et al., 2014 [110] szacują, że w Indiach 37% emisji CO (*Carbon Oxides*) pochodzącej z transportu generują jednoślady, natomiast zdaniem Wu et al. 2016 [139] w Chinach 17,5% Lotnych Związków Organicznych (LZO) pochodzą z pojazdów dwukołowych. Przywołane dane świadczą o skali problemu emisji z pojazdów jednośladowych, chociaż skala ta jest zróżnicowana w zależności od lokalizacji.

W ostatnich latach coraz większe znaczenie odgrywają badania RDE (*Real Driving Emission*) dotyczące m.in. zużycia paliwa i emisji związków szkodliwych spalin. Od 1 września 2017 roku Komisja Europejska takie badania wprowadziła do procedur homologacyjnych pojazdów LDV (*Light Duty Vehicle*). Badania typu RDE stwarzają nowe perspektywy poznawcze i rozwojowe pojazdów. Ponadto pomiary w rzeczywistych warunkach eksploatacji umożliwiają pełne poznanie zależności między parametrami jezdnyimi i emisją związków toksycznych spalin, takiej możliwości nie dają badania prowadzone w warunkach laboratoryjnych, gdzie nie jest możliwe wierne odtworzenie wszystkich warunków eksploatacji. Prowadząc badania RDE można zatem ustalić wszelkie relacje przyczynowo-skutkowe zachodzące w czasie eksploatacji pojazdów i ich silników. Metodyka typu RDE jest obecnie dynamicznie rozwijana dla innych typów pojazdów – lekkich oraz ciężkich pojazdów samochodowych czy pojazdów pozadrogowych [1, 14, 41, 42, 81, 109]. Długoletnia i intensywna faza badawcza oraz prace pilotażowe dla pojazdów z grup LDV+PC [85-87, 103] oraz HDV (*Heavy Duty Vehicles*) [3, 11, 43, 82, 107] skutkowały wprowadzeniem odpowiednich procedur dotyczących kontroli emisji związków toksycznych w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Brak jest jednak badań pozwalających na ocenę emisyjności pojazdów jednośladowych w rzeczywistych warunkach drogowych, co zostało udowodnione w rozdziale trzecim niniejszej dysertacji.

2. Regulacje prawne dotyczące badań emisji związków toksycznych spalin z silników pojazdów jednośladowych

2.1. Uwagi ogólne

Wytyczne w zakresie badań emisji związków szkodliwych spalin z silników pojazdów jednośladowych zawarto w dyrektywie 2002/51/WE [27] dotyczącej zmniejszenia poziomu emisji substancji zanieczyszczającej środowisko z silnikowych pojazdów dwu- i trzykołowych (zwanych w późniejszych dyrektywach pojazdami kategorii L) oraz zmieniającą wcześniejszą dyrektywę 97/24/WE. Na jej podstawie w późniejszych latach wprowadzono liczne poprawki oraz uzupełnienia, wynikające ze standaryzacji przepisów w skali światowej. W 2013 roku Rozporządzeniem (UE) nr 168/2013 [30], a w 2014 roku uzupełniającym Rozporządzeniem Technicznym (UE) 134/2014 [31] wprowadzono istotnie zmiany:

- całkowicie uchylono dyrektywę 2002/51/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 19 lipca 2002 roku,
- rozszerzono liczbę kategorii L,
- określono wymogi środowiskowe oraz terminy wdrożenia norm Euro 4 i 5 (przy czym drugi etap – Euro 5 – jest obowiązkowy dla nowych typów pojazdów od dnia 1 stycznia 2020 roku),
- wprowadzono nieregulowaną do tamtej pory wartość dopuszczalną emisji cząstek stałych: dla jednej z klas pojazdów trzykołowych oraz ciężkich czterokołowców drogowych – Euro 4; dla wszystkich pojazdów kategorii L – Euro 5,
- wszystkie nowe typy pojazdów dla poszczególnych (pod-)kategorii motocykli, pojazdów trzykołowych oraz lekkich i ciężkich czterokołowców oprócz OBD I (*On-Board Diagnostic*) muszą zostać wyposażone w system OBD II na etapie obowiązywania normy Euro 5, który monitoruje oraz sygnalizuje awarie i pogorszenie się stanu systemu kontroli emisji, których skutkiem jest przekroczenie wartości progowych emisji,
- określono wytyczne i zaimplementowano, częściowo na etapie normy Euro 4 oraz całkowicie na etapie normy Euro 5, laboratoryjny światowy zharmonizowany cykl badań nad emisjami WMTC, który określony został w Światowym Regulaminie Technicznym Europejskiej Komisji Gospodarczej ONZ.

W krajach azjatyckich tj. Chinach czy Japonii przepisy regulujące badania emisji związków szkodliwych zawierają się w dokumentach wydawanych przez krajowe Ministerstwa Środowiska. Analiza regulacji wykazuje, że przepisy europejskie i amerykańskie stanowią podstawę do formułowania ich w pozostałych częściach świata. Co więcej, zauważalne są nieco bardziej liberalne nakłady ustawodawców związanych z zaostrzaniem przepisów dotyczących emisji spalin emitowanych przez pojazdy z grupy jednośladowych w porównaniu do regulacji dotyczących samochodów osobowych. Historia przepisów dla pojazdów kategorii L jest stosunkowo krótka, pierwsza norma (Euro 1) weszła w życie w 2000 roku, podczas gdy dla samochodów osobowych już 7 lat wcześniej, wejście kolejnej (EURO 2) nastąpiło po kolejnych sześciu latach. W okresach 1990–2000 oraz 2011–2020 na jedną normę dla pojazdów jednośladowych przypadły kolejno aż trzy i dwie normy dla samochodów osobowych (tab. 2.1).

Tabela 2.1. Lata wprowadzania norm EURO dla pojazdów kategorii PC, HDV oraz L

Kategoria L	PC	HDV	Rok obowiązywania	Lata
		EURO I	1992	1990–2000
	Euro 1		1993	
	Euro 2	EURO II	1996	
Euro 1			1999	
	Euro 3	EURO III	2000	
Euro 2			2002	>2000–2010
		EURO IV	2005	
Euro 3	Euro 4		2006	
		EURO V	2008	
	Euro 5a		2009	
	Euro 5b		2011	>2010–2020
		EURO VI	2013	
	Euro 6b		2014	
Euro 4			2016	
	Euro 6d Temp		2017	
Euro 5	Euro 6d		2020	

2.2. Kategoryzacja pojazdów jednośladowych

Zgodnie z polskim prawem o ruchu drogowym z 20 czerwca 1997 roku grupa pojazdów jednośladowych obejmuje motocykle oraz motorowery [66]. Prawo to definiuje motocykl jako pojazd samochodowy zaopatrzone w silnik spalinowy o pojemności skokowej przekraczającej 50 cm³, dwukołowy lub z bocznym wózkiem – wielośladowy; określenie to obejmuje również pojazd trójkołowy o symetrycznym rozmieszczeniu kół. Ta sama ustawa określa motorower jako pojazd dwu- lub trójkołowy zaopatrzone w silnik spalinowy o pojemności skokowej nieprzekraczającej 50 cm³ lub w silnik elektryczny o mocy nie większej niż 4 kW, którego konstrukcja ogranicza prędkość jazdy do 45 km/h. W tytule niniejszej pracy pojawia się sformułowanie miejskich pojazdów jednośladowych, odnoszące się przede wszystkim do konstrukcji pojazdu, a nie do parametrów technicznych, według których kwalifikuje się określony pojazd zgodnie z przepisami. W pracy opisane zostały zatem pojazdy, które na podstawie przytoczonej ustawy definiowane są zarówno jako motocykle, jak i motorowery. Charakteryzują się one jednak określoną konstrukcją (małe koła, nisko zawieszony silnik, obudowane podwozie), która znajduje swoje zastosowanie szczególnie na krótkich dystansach na obszarach miejskich oraz pozamiejskich. Pojazd o takiej konstrukcji potocznie nazywany jest skuterem, a uniwersalny słownik języka polskiego definiuje go jako lekki motocykl lub motorower [25].

Do prawidłowej interpretacji norm emisji spalin należy przyporządkować pojazdy jednośladowe do odpowiedniej kategorii zgodnie z klasyfikacją pojazdów określonych w rozporządzeniu Parlamentu Europejskiego i Rady (EU) nr 168/2013 z dnia 15 stycznia 2013 roku [30]. Pojazdy kategorii L to pojazdy dwu-, trzy- lub czterośladowe, których szczegółowy podział został przedstawiony w tabeli 2.2.

Tabela 2.2. Podział pojazdów kategorii L [30]

Kategoria	Podkategoria
L1e (lekki pojazd silnikowy)	L1e-A (rower z napędem)
	L1e-B (dwukołowy motorower)
L2e (trzykołowy motorower)	L2e-P (trzykołowy motorower przeznaczony do przewozu pasażerskich)
	L2e-U (trzykołowy motorower przeznaczony do celów użytkowych)
L3e (dwukołowy motocykl podział według osiągnięć motocykla)	L3e-A1 (motocykl o niskich osiągnięciach)
	L3e-A2 (motocykl o średnich osiągnięciach)
	L3e-A2 (motocykl o wysokich osiągnięciach)
L3e (dwukołowy motocykl podział według użytku specjalnego)	L3e-A1E, L3e-A2E lub L3e-A3E (motocykle enduro)
	L3e-A1T, L3e-A2T lub L3e-A3T (motocykle trailowe)
L4e (dwukołowy motocykl z bocznym wózkiem)	
L5e (trzykołowy pojazd silnikowy)	L5e-A trzykołowy pojazd przeznaczony głównie do przewozu pasażerów
	L5e-B trzykołowy pojazd przeznaczony wyłącznie do przewozu towarów
L6e (lekki czterokołowiec)	L6e-A (lekki czterokołowiec drogowy)
	L6e-B (lekki pojazd czterokołowy)
	L6eBP (do przewozu pasażerów)
	L6eBU (do celów użytkowych)
L7e (czterokołowiec)	L7e-A (ciężki czterokołowiec drogowy)
	L7e-B (ciężki czterokołowiec terenowy)

Pojazdy kategorii L opisane powyżej są następnie klasyfikowane na podstawie rodzaju ich napędu:

- a) pojazdy wyposażone w silnik spalinowy o spalaniu wewnętrznym:
 - z zapłonem iskrowym,
 - z zapłonem samoczynnym,
- b) pojazdy wyposażone w silnik spalinowy o spalaniu zewnętrznym, turbinę lub silnik, w którym tłok obraca się wewnątrz cylindra. Do celów zgodności z wymogami w zakresie ochrony środowiska i bezpieczeństwa funkcjonalnego, pojazd napędzany w taki sposób uznawany jest za taki sam jak pojazd z silnikiem spalinowym ZI o spalaniu wewnętrznym,
- c) pojazdy wyposażone w silnik z wstępnie sprężanym powietrzem, który nie emituje poziomów zanieczyszczeń lub gazów obojętnych wyższych niż poziomy obecne w otaczającym powietrzu; przy czym, w odniesieniu do wymogów w zakresie bezpieczeństwa funkcjonalnego oraz przechowywania paliwa i zasilania w nie, pojazdy takie uważa się za pojazdy z napędem na paliwo gazowe,
- d) pojazdy elektryczne,
- e) pojazdy hybrydowe.

Tabele o numeracji od 2.3 do 2.9 opisują szczegółową klasyfikację poszczególnych kategorii wraz z ich charakterystycznymi kryteriami.

Tabela 2.3. Kryteria wspólne dla wszystkich kategorii [30]

Kategoria	Nazwa kategorii	Kryteria
L1e-L7e	Wszystkie pojazdy kategorii L	1) długość: ≤ 4000 mm lub ≤ 3000 mm dla pojazdu dla pojazdu L6e-B lub ≤ 3700 mm dla pojazdu L7e-C; 2) szerokość: ≤ 2000 mm lub ≤ 1000 mm dla pojazdu L1e lub ≤ 1500 mm dla pojazdu L6e-B lub L7e-C; 3) wysokość ≤ 2500 mm.

Tabela 2.4. Kryteria dla kategorii L1e [30]



Kategoria oraz podkategoria	Nazwa kategorii	Kryteria
L1e	<u>Lekki dwukołowy pojazd silnikowy</u>	4) dwa koła i napęd; 5) pojemność silnika ≤ 50 cm ³ , jeśli silnik spalinowy ZI o spalaniu wewnętrznym jest częścią konfiguracji napędu pojazdu; 6) maksymalna prędkość konstrukcyjna ≤ 45 km/h; 7) maksymalna moc znamionowa lub netto ≤ 4 kW; 8) masa maksymalna = masa technicznie podana przez producenta;
L1e-A	Rower z napędem 	9) rower z pedałami wyposażony w dodatkowy napęd, 10) moc dodatkowego napędu spada do zera, gdy pojazd osiągnie prędkość ≤ 25 km/h; 11) maksymalna ciągła moc znamionowa lub netto ≤ 1 kW;
L1e-B	Dwukołowy motorower 	każdy inny pojazd kategorii L1e, którego nie można sklasyfikować według kryteriów 9–11.

Tabela 2.4. Kryteria dla kategorii L2e [30]



Kategoria oraz podkategorie	Nazwa kategorii	Kryteria
L2e	<u>Trzykołowy motorower</u>	4) trzy koła i napęd; 5) pojemność silnika $\leq 50 \text{ cm}^3$ w przypadku silnika spalinowego ZI o spalaniu wewnętrznym lub pojemność silnika $\leq 500 \text{ cm}^3$, jeśli silnik spalinowy ZS jest częścią konfiguracji napędu pojazdu; 6) maksymalna prędkość konstrukcyjna $\leq 45 \text{ km/h}$; 7) maksymalna ciągła moc znamionowa lub netto $\leq 4 \text{ kW}$; 8) masa w stanie gotowym do jazdy $\leq 270 \text{ kg}$; 9) wyposażony w nie więcej niż dwa miejsca siedzące, w tym miejsce siedzące dla kierującego pojazdem;
L2e-P	Trzykołowy motorower do przewozu pasażerów 	pojazd L2e inny niż pojazd spełniający szczególne kryteria klasyfikacji dla pojazdu L2e-U;
L2e-U	Trzykołowy motorower do celów użytkowych 	10) przeznaczony wyłącznie do transportu towarów i wyposażony w otwartą lub zamkniętą praktycznie prostą i poziomą przestrzeń ładunkową spełniającą następujące kryteria: <ol style="list-style-type: none"> $\text{długość}_{\text{przestrzeń ładunkowa}} \times \text{szerokość}_{\text{przestrzeń ładunkowa}} \geq 0,3 \times \text{długość}_{\text{pojazd}} \times \text{maksymalna szerokość}_{\text{pojazd}}$ lub; równoważna przestrzeń ładunkowa określona powyżej w celu instalacji maszyn lub wyposażenia; przestrzeń ładunkowa wyraźnie oddzielona sztywną przegrodą od przestrzeni przeznaczonej dla osób znajdujących się w pojeździe; przestrzeń ładunkowa zdolna pomieścić co najmniej sześćian o długości boku 600 mm.

Tabela 2.5. Kryteria dla kategorii L3e [30]





Kategoria oraz podkategorie	Nazwa kategorii	Kryteria
L3e	<u>Dwukołowy motocykl</u>	4) dwa koła i napęd; 5) masa maksymalna = masa techniczna dopuszczalna przez producenta; 6) pojazd dwukołowy, którego nie można sklasyfikować do kategorii L1e;
L3e-A1	Motocykl o niskich osiąгах	7) pojemność silnika $\leq 125 \text{ cm}^3$; 8) maksymalna ciągła moc znamionowa lub netto $\leq 11 \text{ kW}$; 9) stosunek moc /masa $\leq 0,1 \text{ kW/kg}$;
L3e-A2	Motocykl o średnich osiąгах 	7) maksymalna ciągła moc znamionowa lub netto $\leq 35 \text{ kW}$; 8) stosunek moc /masa $\leq 0,2 \text{ kW/kg}$; 9) nie pochodzi z pojazdu wyposażonego w silnik o ponad dwukrotnie większej mocy; 10) pojazd L3e, którego nie można sklasyfikować na podstawie dodatkowych kryteriów pod klasyfikacji 7, 8 i 9;
L3e-A3	Motocykl o wysokich osiąгах 	każdy inny pojazd L3e, którego nie można sklasyfikować w oparciu o kryteria klasyfikacji pojazdu L3e-A1 lub L3e-A2;
L3e-AxE (x = 1, 2 lub 3)	Motocykle enduro 	a) wysokość siedzenia $\geq 900 \text{ mm}$; b) prześwit $\geq 310 \text{ mm}$; c) całkowite przełożenie na najwyższym biegu (przełożenie przekładni wstępnej \times przełożenie skrzyni biegów umożliwiające osiągnięcie największej prędkości \times przełożenie przekładni głównej) $\geq 6,0$; d) masa w stanie gotowym do jazdy plus masa akumulatora napędowego w przypadku napędu elektrycznego lub hybrydowego napędu elektrycznego $\leq 140 \text{ kg}$; e) brak miejsca siedzącego dla pasażera;
L3e-AxT (x = 1, 2 lub 3)	Motocykle trialowe 	a) wysokość siedzenia $\leq 700 \text{ mm}$; b) prześwit $\geq 280 \text{ mm}$; c) pojemność zbiornika na paliwo $\leq 4 \text{ litry}$; d) całkowite przełożenie na najwyższym biegu (przełożenie przekładni wstępnej \times przełożenie skrzyni biegów umożliwiające osiągnięcie największej prędkości \times przełożenie przekładni głównej) $\geq 7,5$; e) masa w stanie do jazdy $\leq 100 \text{ kg}$.

Tabela 2.6. Kryteria dla kategorii L4e [30]

Kategoria oraz podkategorie	Nazwa kategorii	Kryteria
L4e	Dwukołowy motocykl z bocznym wózkiem 	4) podstawowy pojazd silnikowy zgodny z kryteriami klasyfikacji i pod klasyfikacji dla pojazdu L3e; 5) podstawowy pojazd silnikowy wyposażony w jeden boczny wózek; 6) maksymalnie cztery miejsca siedzące, w tym miejsce dla kierowcy, na motocyklu z bocznym wózkiem; 7) maksymalnie dwa miejsca siedzące dla pasażerów w bocznym wózku; 8) masa maksymalna = masa technicznie dopuszczalna podana przez producenta.

Tabela 2.7. Kryteria dla kategorii L5e [30]



Kategoria oraz podkategorie	Nazwa kategorii	Kryteria
L5e	<u>Trzykołowy pojazd silnikowy</u>	4) trzy koła i napęd; 5) masa w stanie gotowym do jazdy ≤ 1000 kg; 6) pojazd trzykołowy, którego nie można sklasyfikować jako pojazdu L2e;
L5e-A	Pojazd trzykołowy 	7) pojazd L5e inny niż pojazdy zgodne ze szczególnymi kryteriami klasyfikacji dla pojazdu L5e-B; 8) maksymalnie 5 miejsc siedzących, w tym miejsce siedzące dla kierowcy;
L5e-B	Użytkowy pojazd trzykołowy 	7) zaprojektowany jako pojazd użytkowy i charakteryzujący się zamkniętym przedziałem kierowcy i pasażerów dostępnym nie więcej niż z trzech stron; 8) maksymalnie 2 miejsca siedzące, w tym miejsce siedzące dla kierowcy; 9) przeznaczony wyłącznie do transportu towarów i wyposażony w otwartą lub zamkniętą praktycznie prostą i poziomą przestrzeń ładunkową.

Tabela 2.8. Kryteria dla kategorii L6e [30]




Kategoria oraz podkategorie	Nazwa kategorii	Kryteria
L6e	<u>Lekki czterokołowiec</u>	4) cztery koła i napęd; 5) maksymalna prędkość konstrukcyjna pojazdu $\leq 45\text{km/h}$; 6) masa w stanie gotowym do jazdy $\leq 425\text{ kg}$; 7) pojemność silnika $\leq 50\text{ cm}^3$ w przypadku silnika ZI lub pojemność silnika $\leq 500\text{ cm}^3$, jeśli silnik ZS jest częścią konfiguracji napędu pojazdu; 8) maksymalnie 2 miejsca siedzące, w tym miejsce siedzące dla kierującego pojazdem;
L6e-A	Lekki czterokołowiec drogowy 	9) pojazd kategorii L6e niezgodny ze szczególnymi kryteriami klasyfikacji dla pojazdu L6e-B; 10) maksymalna ciągła moc znamionowa lub netto $\leq 4\text{ kW}$;
L6e-B	Lekki pojazd czterokołowy	9) zamknięty przedział dla kierowcy i pasażerów dostępny maksymalnie z trzech stron 10) maksymalna ciągła moc znamionowa lub netto $\leq 6\text{ kW}$;
L6e-BP	Lekki pojazd czterokołowy do przewozu pasażerów 	11) pojazd L6e-B przeznaczony głównie do przewozu pasażerów; 12) pojazd L6e inny niż pojazdy spełniające szczególne kryterium klasyfikacji dla pojazdu L6e-BU;
L6e-BU	Lekki pojazd czterokołowy do celów użytkowych 	11) przeznaczony wyłącznie do transportu towarów i wyposażony w otwartą lub zamkniętą praktycznie prostą i poziomą przestrzeń ładunkową spełniającą następujące kryteria: <ul style="list-style-type: none"> a) długość przestrzeni ładunkowa \times szerokość przestrzeni ładunkowa $\geq 0,3 \times$ długość pojazdu \times szerokość pojazdu; b) równoważna przestrzeń ładunkowa określona powyżej w celu instalacji maszyn lub wyposażenia; c) z przestrzenią ładunkową wyraźnie oddzieloną sztywną przegrodą od przestrzeni przeznaczonej dla osób znajdujących się w pojeździe.

Tabela 2.9. Kryteria dla kategorii L7e [30]







Kategoria oraz podkategorie	Nazwa kategorii	Kryteria
L7e	<u>Ciężki czterokołowiec</u>	4) cztery koła i napęd; 5) masa w stanie gotowym do jazdy: a) ≤ 450 kg do przewozu pasażerów; b) ≤ 600 kg do transportu towarów; 6) pojazd L7e, którego nie można sklasyfikować jako pojazdu L6e;
L7e-A	Ciężki czterokołowiec drogowy	7) pojazd L7e niezgodny ze szczególnymi kryteriami klasyfikacji dla pojazdu L7e-B lub L7e-C; 8) pojazd przeznaczony jedynie do przewozu pasażerów; 9) maksymalna ciągła moc znamionowa lub netto ≤ 15 kW;
L7e-A1	Ciężki czterokołowiec drogowy A1 	10) maksymalnie 2 siedzenia siodłowe, w tym siedzenie dla kierującego pojazdem; 11) drążek kierownicy;
L7e-A2	Ciężki czterokołowiec drogowy A2 	10) pojazd L7e-A niezgodny ze szczególnymi kryteriami klasyfikacji dla pojazdu L7e-A1; 11) maksymalnie 2 siedzenia, w tym siedzenie dla kierującego pojazdem;
L7e-B	Ciężki czterokołowiec terenowy	7) pojazd L7e niezgodny ze szczególnymi kryteriami klasyfikacji dla pojazdu L7e-C; 8) prześwit ≥ 180 mm;
L7e-B1	Czterokołowiec terenowy 	9) maksymalnie 2 siedzenia siodłowe, w tym siedzenie dla kierującego pojazdem; 10) wyposażony w drążek kierownicy; 11) maksymalna prędkość konstrukcyjna pojazdu ≤ 90 km/h; 12) stosunek rozstawu osi do prześwitu ≤ 6 ;
L7e-B2	Pojazd typu side-by-side buggy 	9) pojazd L7e-B inny niż pojazd L7e-B1; 10) maksymalnie 3 siedzenia, 2 siedzenia umiejscowione obok siebie; 11) maksymalna ciągła moc znamionowa lub netto ≤ 15 kW; 12) stosunek rozstawu osi do prześwitu ≤ 8 ;

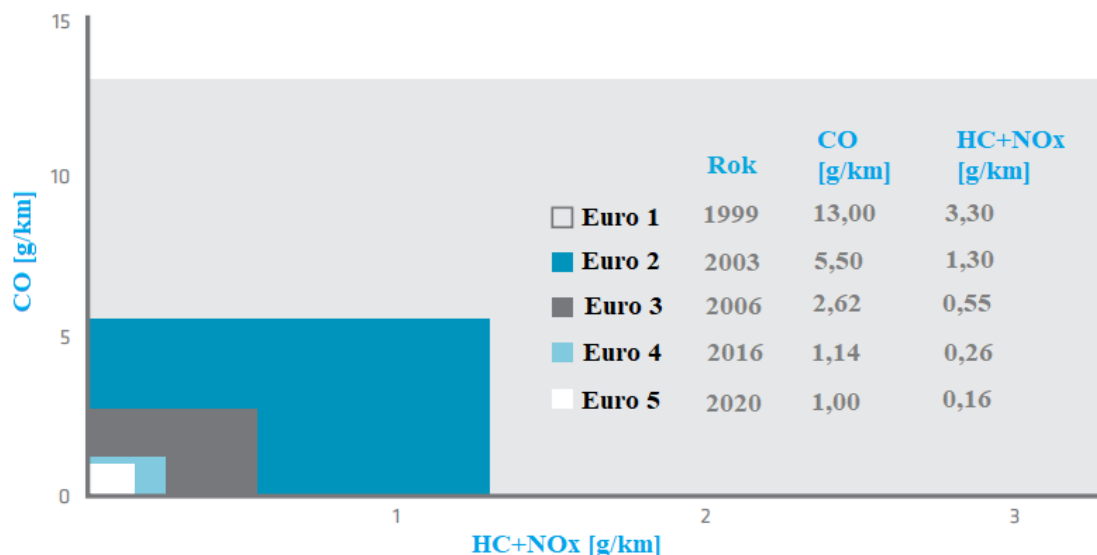
Tabela 2.9. cd. Kryteria dla kategorii L7e [30]

L7e-C	Ciężki pojazd czterośladowy	<p>7) pojazd L7e niezgodny ze szczególnymi kryteriami klasyfikacji dla pojazdu L7e-B;</p> <p>8) maksymalna ciągła moc znamionowa lub netto ≤ 15 kW;</p> <p>9) maksymalna prędkość konstrukcyjna pojazdu ≤ 90 km/h;</p> <p>10) zamknięty przedział dla kierowcy i pasażerów dostępny maksymalnie z trzech stron;</p>
L7e-CP	<p>Ciężki pojazd czterośladowy do przewozu pasażerów</p> 	<p>11) pojazd L7e-C niezgodny ze szczególnymi kryteriami klasyfikacji dla pojazdu L7e-CU</p> <p>12) maksymalnie 4 siedzenia, w tym siedzenie dla kierowcy;</p>
L7e-CU	<p>Ciężki pojazd czterośladowy do celów użytkowych</p> 	<p>11) przeznaczony wyłącznie do transportu towarów i wyposażony w otwartą lub zamkniętą praktycznie prostą i poziomą przestrzeń ładunkową spełniającą następujące kryteria:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) długość przestrzeni ładunkowa \times szerokość przestrzeni ładunkowa $\geq 0,3 \times$ długość pojazdu \times szerokość pojazdu lub; b) równoważna przestrzeń ładunkowa określona powyżej zaprojektowana do instalacji maszyn lub wyposażenia; c) z przestrzenią ładunkową wyraźnie oddzieloną sztywną przegrodą od przestrzeni przeznaczonej dla osób znajdujących się w pojeździe; d) przestrzeń ładunkowa zdolna pomieścić co najmniej sześćian o długości 600 mm; e) maksymalnie 2 siedzenia, w tym siedzenie dla kierowcy.

2.3. Normy emisji związków toksycznych w Unii Europejskiej i na świecie

Normy emisji spalin, które obowiązują na terenie Europy określone są normami Euro, w wolnym przekładzie oznaczają „Europejski standard emisji spalin”. Zawierają one dopuszczalne wartości emisji zanieczyszczeń, obowiązujących dla pojazdów użytkowanych na obszarze Unii Europejskiej. Opracowuje się je w serii dyrektyw europejskich, które cechują się określoną restrykcyjnością. Początek lat 90-tych charakteryzował się 20% udziałem pojazdów jednośladowych w całkowitej emisji związków toksycznych, pochodzących ze wszystkich pojazdów drogowych [38]. W związku z tym od czerwca 1999 roku obowiązywać zaczęła norma Euro 1 przeznaczona wyłącznie dla pojazdów dwukołowych (motocykle i motorowery),

a ich wartości uwarunkowane były jedynie objętością skokową silnika [27]. W trakcie opracowywania kolejnych standardów Euro, proces restrukturyzacji między Euro 1 i Euro 3 doprowadził do znacznej, 80% redukcji emisji tlenku węgla i węglowodorów oraz 83% redukcji emisji tlenków azotu (rys. 2.1). Wartości dopuszczalne dla standardów Euro 2 i 3 uregulowane są dyrektywą 2002/51/WE [30].



Rys. 2.1. Opracowanie europejskich przepisów dotyczących pojazdów jednośladowych [36]

Od 1 stycznia 2016 roku na mocy rozporządzenia (UE) 168/2013 dla nowych typów pojazdów jednośladowych zaczął obowiązywać kolejny etap – Euro 4, a po kolejnych czterech latach standard Euro 5. Dokument rozszerzył liczbę kategorii L, uregulował nieznormalizowaną do tamtej pory wartość dopuszczalną emisji masy cząstek stałych oraz objął w regulacji także pojazdy hybrydowe. Wartości dopuszczalne, z podziałem na poszczególne podkategorie dla kolejnych etapów Euro, zostały przedstawione w tabelach 2.10. do 2.13.

Tabela 2.10. Wartości dopuszczalne emisji związków toksycznych spalin silników pojazdów jednośladowych poszczególnych kategorii w Europie; Euro 1–3 [27, 30]

Euro 1							
Kategoria	Nazwa kategorii	Klasyfikacja	Norma Euro	Emisja [g/km]			
				CO	HC	NO _x	HC+NO _x
wszystkie	motorowery	< 150 cm ³	1	13	3	0,3	-
	motocykle	≥ 150 cm ³	1				
Euro 2+3							
L1e	motorowery	< 50 cm ³	2+3	1	-	-	1,2
L3e	motocykle	< 150 cm ³	2	5,5	1,2	3	-
		≥ 150 cm ³	2	5,5	1	3	-
		< 150 cm ³	3	2	0,8	1,5	-
		≥ 150 cm ³	3	2	0,3	1,5	-
		v _{max} < 130 km/h	3	2,62	0,75	1,7	-
		v _{max} ≥ 130 km/h	3	2,62	0,33	2,2	-

Tabela 2.11. Wartości dopuszczalne emisji związków toksycznych spalin silników pojazdów jednośladowych poszczególnych kategorii w Europie; Euro 2–3 [27]

Euro 2+3							
Kategoria	Nazwa kategorii	Klasyfikacja	Norma Euro	Emisja [g/km]			
				CO	HC	NO _x	HC+NO _x
Zapłon iskrowy							
L2e	Trzykołowy motorower	< 50 cm ³	2+3	7	1,5	0,4	-
L5e	Trzykołowy pojazd silnikowy	≥ 50 cm ³	2				
L6e	Lekki czterokołowiec	< 50 cm ³	2+3				
L7e	Ciężki czterokołowiec	≥ 50 cm ³	2				
Zapłon samoczynny							
L2e	Trzykołowy motorower	< 50 cm ³	2	2	1	0,65	-
L5e	Trzykołowy pojazd silnikowy	≥ 50 cm ³	2				
L6e	Lekki Czterokołowiec	< 50 cm ³	2				
L7e	Ciężki czterokołowiec	≥ 50 cm ³	2				

Tabela 2.12. Wartości dopuszczalne emisji związków toksycznych spalin silników pojazdów jednośladowych poszczególnych kategorii w Europie; Euro 4 [30]

Euro 4						
Kategoria	Nazwa kategorii	Klasa napędu	Emisja [g/km]			
			CO	HC	NO _x	PM
L1e-A	Rower z napędem	ZI/ZS/hybrydowy	0,56	0,1	0,07	-
L1e-B	Dwukołowy motorower	ZI/ZS/hybrydowy	1	0,63	0,17	-
L2e	Trzykołowy motorower	ZI/ZS/hybrydowy	1,9	0,73	0,17	-
L3e L4e	Dwukołowy Motocykl i z bocznym wózkiem	ZI/ZS/hybrydowy v _{max} ≥ 130 km/h	1,14	0,38	0,07	-
L5e-A L7e-A	Pojazd trzykołowy Ciężki pojazd czterokołowy	ZI/ZS/hybrydowy v _{max} ≤ 130 km/h	1,14	0,17	0,09	-
L5e-B	Użytkowy pojazd trzykołowy	ZS; ZS/hybrydowy	1	0,1	0,3	0,08
		ZI; ZI/hybrydowy	2	0,55	0,25	-
L6e-A	Lekki czterokołowiec drogowy	ZI; ZI/hybrydowy	1,9	0,73	0,17	-
L6a-B	Lekki pojazd czterokołowy	ZS; ZS/hybrydowy	1	0,1	0,55	0,08
L7e-B	Ciężki czterokołowiec terenowy	ZI; ZI/hybrydowy	2	0,55	0,25	-
L7e-C	Ciężki pojazd czterokołowy	ZS; ZS/hybrydowy	1	0,1	0,55	0,08

Tabela 2.13. Wartości dopuszczalne emisji związków toksycznych spalin silników pojazdów jednośladowych poszczególnych kategorii w Europie; Euro 5 [30]

Euro 5							
Kategoria	Nazwa kategorii	Klasa napędu	Emisja [g/km]				
			CO	THC	NHMC	NO _x	PM
L1e-A	Rower z napędem	ZI; ZS/hybrydowy	0,5	0,1	0,068	0,06	0,0045
L1e-B-L7e	Pozostałe pojazdy z kategorii L	ZI; ZI/hybrydowy	1	0,1	0,068	0,06	0,0045
		ZS; ZS/hybrydowy	0,5	0,1	0,068	0,06	0,0045

W Stanach Zjednoczonych wartości dopuszczalne emisji pojazdów jednośladowych regulowane były jednym niezmiennym zestawem norm dla wszystkich lat modelowych w latach 1978–2005 (tab. 2.14).

Tabela 2.14. Wartości dopuszczalne emisji związków toksycznych spalin silników pojazdów jednośladowych w Stanach Zjednoczonych; lata modelowe 1978–2005 [138]

1978–2005				
Klasa	Klasyfikacja	Emisja [g/km]		
		HC	CO	NO _x
I	50–169 cm ³	5	12	-
II	170–279 cm ³	5	12	-
III	> 279 cm ³	5	12	-

Od 15 stycznia 2004 roku na mocy dokumentu 69 FR 2398 sygnowanego przez Agencję Ochrony Środowiskowej EPA (*Environmental Protection Agency*) ustanowiono przepisy federalne Tier. Standard Tier 1 wszedł w życie w 2006 roku wraz z nowym zdefiniowaniem klas (tab. 2.15).

Tabela 2.15. Wartości dopuszczalne emisji związków toksycznych spalin silników pojazdów jednośladowych w Stanach Zjednoczonych; Tier 1–2 [131]

Tier 1				
Klasa	Klasyfikacja	Emisja [g/km]		
		HC	HC + NO _x *	CO
I–A	< 50 cm ³	-	-	-
I–B	50–169 cm ³	1	1,4	-
II	170–279 cm ³	1	1,4	-
III	> 279 cm ³	-	1,4	-
Tier 2				
III	> 279 cm ³	-	0,8	12

* Jest to opcjonalna norma, która umożliwia producentom uśrednianie ich emisji lub przenoszenie wartości emisji między klasami.

Wcześniej nieregulowane pod względem emisyjności pojazdy, wyposażone w silnik o pojemności skokowej poniżej 50 cm³, należą do klasy I–A, a istniejąca wcześniej klasa I została zastąpiona klasą I–B. Standard rozszerzono również opcjonalnie o wartość dopuszczalną emisji

tlenków azotu, przedstawiana jest jako suma emisji z węglowodorami. W 2010 roku normy dla motocykli klasy III zostały zaktualizowane do normy Tier 2.

Obecnie w Indiach udział pojazdów jednośladowych wynosi ponad 80% wszystkich pojazdów drogowych. Historia przepisów dotyczących regulacji emisji związków toksycznych z pojazdów dwu- i trzykołowych w tym kraju rozpoczyna się w 1991 roku ograniczeniem tlenku węgla oraz węglowodorów. Od tego czasu pozostałe związki toksyczne zostały objęte rozporządzeniami, a ograniczenia emisyjne uległy znacznemu zaostrzeniu (tab. 2.16).

W dniach 4 lipca 2014 roku oraz 12 czerwca 2015 roku Indie wprowadziły kolejny, czwarty etap norm emisji spalin dla pojazdów dwu- i trójkołowych nazywanych Bharat Stage IV. Rozporządzenie zmniejszyło wartości dopuszczalne HC + NO_x średnio o 42 % (w zależności od klasy pojazdu), w porównaniu do poprzednio obowiązującej normy BS III. Wymusiło to producentach pojazdów jednośladowych zastosowanie reaktorów trójfunkcyjnych i ekletycznego wtrysku paliwa. Klasyfikacja pojazdów w aspekcie konkretnych wartości dopuszczalnych związków toksycznych odnosi się do objętości skokowej silnika oraz prędkości maksymalnej pojazdu (tab. 2.17). Ministerstwo Transportu Drogowego i Autostrad w dniu 18 lutego 2016 roku wydało komunikat o kolejnym etapie norm Bharat Stage VI, obejmującego całe Indie dla lekkich i ciężkich pojazdów, w tym dwu- i trójkołowców. Wartości dopuszczalne emisji związków toksycznych w tym standardzie zostały ujednocnione z wartościami europejskiej normy Euro 5, a ich poziomy uzależnione są rodzajem zasilania silnika.

Tabela 2.16. Wartości dopuszczalne emisji związków toksycznych spalin silników pojazdów jednośladowych w Indiach; Bharat Stage I–III [138]

BS I–III				
Rok wdrożenia	Standard	Emisja [g/km]		
		HC	CO	HC+ NO _x
1991	-	8–12	12–30	-
1996	-	-	4,5	3,6
2000	Bharat I	-	2	2
2005	Bharat II	-	1,5	1,5
2010	Bharat III	-	1	1

Tabela 2.17. Wartości dopuszczalne emisji związków toksycznych spalin silników pojazdów jednośladowych w Indiach; Bharat Stage IV–VI [138]

BS IV						
Kategoria	Rok wdrożenia	Klasyfikacja	Emisja [g/km]			
			CO	HC	NO _x	PM
Pojazdy dwukołowe	2016	Klasa 1	1,403	-	0,39	
		Podklasa 1–2				
		Podklasa 2–1	1,97	-	0,34	
		Podklasa 3–1, 3–2	1,97	-	0,2	
BS VI						
Pojazdy dwukołowe	2020	Silnik ZI	1			

Chińskie przepisy dotyczące pojazdów jednośladowych wyróżniają dwie ich grupy: dwukołowe oraz trzykołowe. Dopuszczalny poziom emisji spalin uzależniony jest od objętości skokowej silnika oraz maksymalnej prędkości pojazdu, a w przypadku pojazdów trzykołowych znaczenie ma także rodzaj zasilania silnika. Wprowadzanie norm emisji spalin, podobnie jak w Europie, Stanach Zjednoczonych i Indiach odbywało się w etapach (Stage) rozłożonych w czasie. Obecnie obowiązującym standardem na terenie Chin dla pojazdów jednośladowych jest Stage IV (tab. 2.18). Zdecydowanie większy udział tej grupy pojazdów w krajach azjatyckich nie odnalazł przełożenia na nakłady ustawodawców w aspekcie zaostrożenia wartości dopuszczalnych związków toksycznych, które równałyby się z wartościami obowiązującymi na terenie UE. Niemniej jednak wyraźną tendencją jest systematyczne zmniejszanie dopuszczalnych wartości emisji związków toksycznych spalin oraz ujednoczenie ich na całym świecie.

Tabela 2.18. Wartości dopuszczalne emisji związków toksycznych spalin silników pojazdów jednośladowych w Chinach; Stage IV [138]

Stage IV								
Typ pojazdu	Klasa pojazdu	Objętość skokowa [cm ³]	Prędkość Pojazdu [km/h]	Emisja [g/km]				
Pojazdy dwukołowe	motorowery	≤ 50	$v_{\max} \leq 50$	HC	NO _x	CO	HC+NO _x	PM
	I	$50 < V < 150$	$v_{\max} \leq 50$	0,63	0,17	1	-	-
		$V < 150$	$50 < v_{\max} < 100$	0,38	0,07	1,14	-	-
	II	$V < 150$	$100 < v_{\max} < 115$				-	-
		$V \geq 150$	$v_{\max} < 115$				-	-
	III	$V \leq 1500$	$115 < v_{\max} < 130$	0,17	0,09	1,14	-	-
		$V > 1500$ lub $v_{\max} \geq 140$	-				-	
Pojazdy trzykołowe	motorowery	$V \leq 50$	$v_{\max} \leq 50$	0,73	1,9	1,9	-	-
	silniki ZI	$V > 50$ lub $v_{\max} > 50$		0,55	2	2	-	-
	silniki ZS	$V > 50$ lub $v_{\max} > 50$		-	0,74	740	0,46	0,06

2.4. Wytyczne legislacyjne w zakresie badań

Obowiązki producentów pojazdów kategorii L dotyczące badań efektywności środowiskowej (w tym przebiegi testów homologacyjnych) dla normy Euro 4 oraz 5, których konkretne wymogi zostały opisane artykułami 6–13 określono rozdziałem II Rozporządzenia Komisji UE z 16 grudnia 2013 roku. Poszczególne artykuły traktują o (tab. 2.19.):

- *Artykuł 6* – wymogi w zakresie badania typu I: emisja z układu wylotowego po rozruchu silnika zimnego;
- *Artykuł 7* – wymogi w zakresie badania typu II: badanie emisji z układu wylotowego (przy podwyższonych obrotach) na biegu jałowym oraz przy swobodnym przyspieszeniu;
- *Artykuł 8* – wymogi w zakresie badania typu III: emisja ze skrzyni korbowej;
- *Artykuł 9* – wymogi w zakresie badań typu IV: emisja oparów;

- *Artykuł 10* – wymogi w zakresie badania typu V: trwałość urządzeń kontrolujących emisję zanieczyszczeń;
- *Artykuł 11* – wymogi w zakresie badania typu VII: emisja CO₂, zużycie paliwa, zużycie energii elektrycznej lub zasięg przy zasilaniu energią elektryczną;
- *Artykuł 12* – wymogi środowiskowe dotyczące pokładowego układu diagnostycznego;
- *Artykuł 13* – wymogi w zakresie badania typu IX: poziom hałasu.

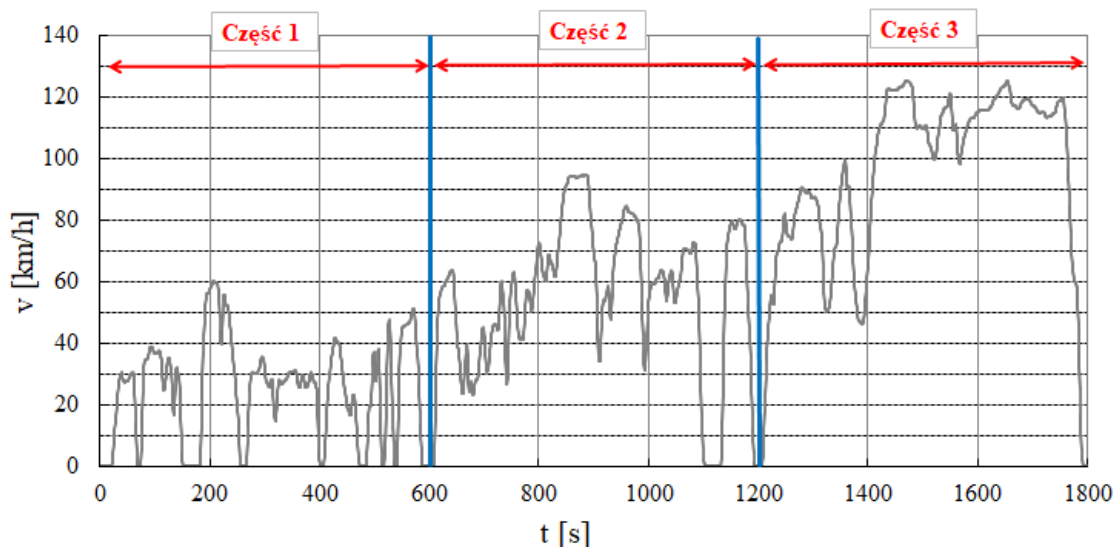
Tabela 2.19. Obowiązki producentów pojazdów kategorii L dotyczące badań efektywności środowiskowej (w tym przebiegi testów homologacyjnych) dla normy Euro 4 oraz 5 [31]

Typ testu	Opis	Wymagania	
		Euro 4	Euro 5
I	Emisja z układu wylotowego po rozruchu silnika zimnego	Aneks VI (A1)	Aneks VI (A2)
II	Badanie emisji z układu wylotowego (przy podwyższonych obrotach) na biegu jałowym oraz przy swobodnym przyspieszaniu	Przekształcona dyrektywa 2009/40/EC	
III	Emisja ze skrzyni korbowej	Związki szkodliwe ze skrzyni korbowej nie mogą przedostawać się do otoczenia przez cały okres życia pojazdu	
IV	Emisja oparów	Aneks VI (C1)	Aneks VI (C2)
V	Trwałość urządzeń kontrolujących emisję zanieczyszczeń	Aneks VI (A), VII (A), VII (B) Ograniczenia i procedury testowe Euro IV	Aneks VI (A), VII (A), VII (B) Ograniczenia i procedury testowe Euro V
VI	Nie został przypisany	Nie dotyczy	
VII	Emisja CO ₂ , zużycie paliwa, zużycie energii elektrycznej lub zasięg przy zasilaniu energią elektryczną	Brak określonych wartości dla celów homologacyjnych – tylko pomiary i dokumentacja	
VIII	Badania środowiskowe dotyczące pokładowego układu diagnostycznego	OBd etap I, aneks VI (B1)	OBd etap II, aneks VI (B2)
IX	Poziom hałasu	Aneks VI (D), ograniczenia i procedury testowe Euro IV	Aneks VI (D), ograniczenia i procedury testowe Euro V

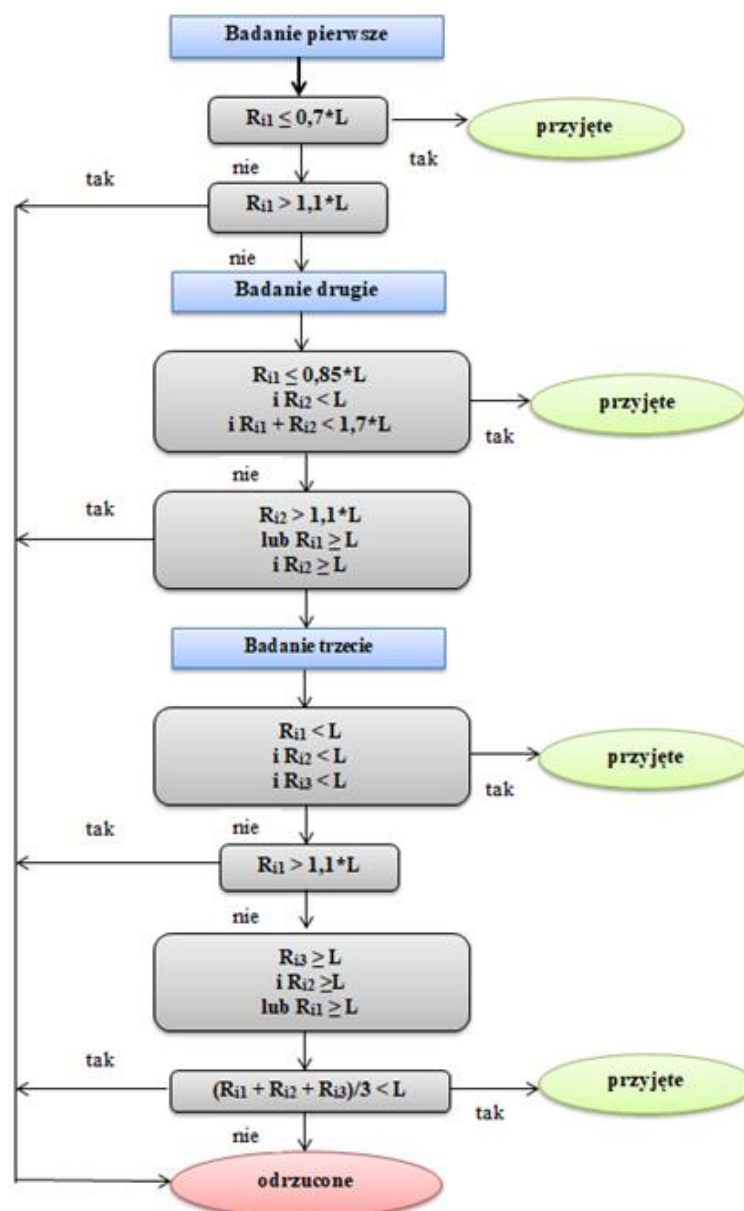
Test typu I odbywa się w cyklu jezdnym WMTC na jednorolkowej hamowni podwoziowej, na której symulowane są opory ruchu i masa odniesienia pojazdu, która rozumiana jest jako masa pojazdu ze wszystkimi płynami, powiększona o 75 kg (rys. 2.2). Zbiornik paliwa napełniony jest do połowy swojej pojemności. Temperatura otoczenia, w której przeprowadzany jest pomiar musi mieścić się w przedziale 20–30°C. Pojazd jest w niej kondycjonowany przez 6–36 godzin przed rozpoczęciem pomiaru lub do chwili, w którym temperatura płynu chłodniczego, temperatura oleju lub temperatura gniazda świecy zapłonowej/podkładki jest zbliżona

do temperatury otoczenia. Od testów dla pojazdów lekkich różni się stałym przyspieszeniem i zmianami biegów prowadzonymi zgodnie z zaleceniem producenta. Wykonuje się trzy pomiary. W jednym z nich emisja może przekroczyć wartości dopuszczalne maksymalnie o 10%, jednak średnia arytmetyczna wszystkich pomiarów musi mieścić się w wyznaczonych granicach. Wyjątkiem od tej reguły jest sytuacja, gdy dla wszystkich zanieczyszczeń emisja nie przekracza 70% wartości dopuszczalnej. Wtedy testy można zakończyć na jednym pomiarze. Co najmniej dwa pomiary wykonuje się wtedy, gdy dla wszystkich zanieczyszczeń spełnione są trzy warunki: emisja w pierwszym pomiarze nie przekracza 85% wartości dopuszczalnej, sumaryczna emisja w obu pomiarach nie przekracza 170% wartości dopuszczalnej pojedynczego pomiaru i emisja w drugim pomiarze nie przekracza wartości dopuszczalnej (rys. 2.3).

Obecnie obowiązującym na całym świecie testem homologacyjnym dla pojazdów kategorii L jest cykl badawczy WMTC, składający się z trzech części. Każda z nich trwa 600 sekund i cechuje się różną maksymalną wartością prędkości pojazdu. Część pierwsza charakteryzuje się maksymalną prędkością 60 km/h a pojazd pokonuje dystans 4,1 km. W części drugiej wartości maksymalnej oraz średniej prędkości pojazdu wynoszą odpowiednio 95 km/h oraz 54,7 km/h na dystansie 9,1 km. Część trzecia jest odzwierciedleniem warunków jazdy autostradowej z maksymalną prędkością 125,3 km/h. Test stanowi część regulacji Globalnego Regulaminu Technicznego, ustanowionego przez ONZ w ramach spotkania World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations. Historia stosowania testu rozpoczyna się wraz z wejściem w życie normy Euro 4, a jego obowiązywanie ograniczało się do kategorii L3e, L4e, L5e-A oraz L7e-A. Od 2020 roku i standardu Euro 5, europejscy producenci wszystkich pojazdów kategorii L są zobligowani do stosowania i spełniania homologacji na podstawie testu jezdnyego „Zmienione WMTC”, zwanym także „WMTC etap 3”. Dla pojazdów kategorii L3e, L4e, L5e-A, L7e-A, L7e-B oraz L7e-C zastosowanie ma przebieg opisanego testu.

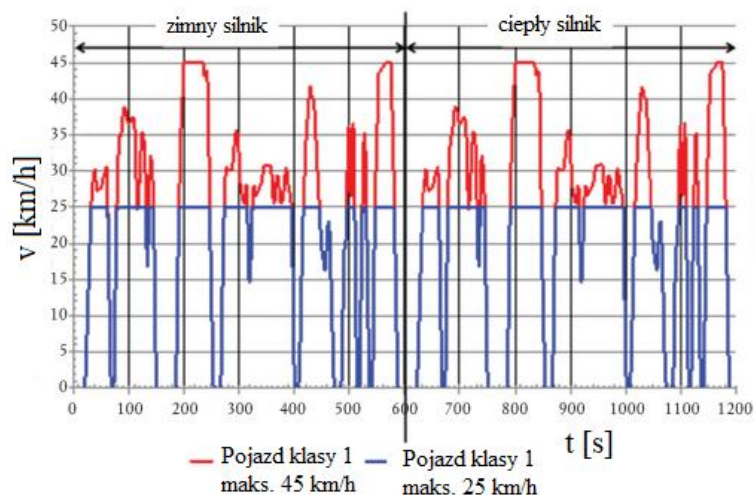


Rys. 2.2. Przebieg testu WMTC [31]



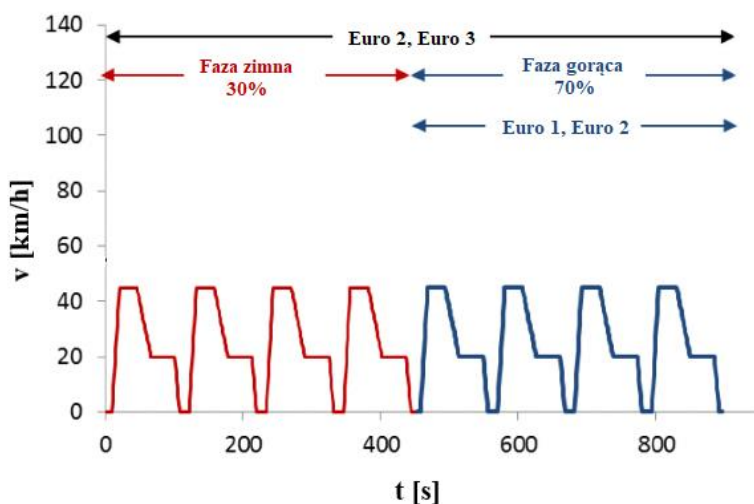
Rys. 2.3. Schemat sekwencji działań w odniesieniu do liczby badań typu I [31]

Test badawczy WMTC etap 3, który ma być stosowany na hamowni podwoziowej w odniesieniu do pojazdów (pod-)kategorii L1e-A, L1e-B, L2e, L6e-A oraz L6e-B, musi charakteryzować się przebiegiem przedstawionym na rysunku 2.4. Odcięty przebieg wykresu prędkości pojazdu ograniczony do 25 km/h ma zastosowanie do pojazdów L1e-A i L1e-B o maksymalnej prędkości konstrukcyjnej ograniczonej do 25 km/h. Test ten trwa 1200 sekund i składa się z dwóch równoważnych części, które należy przeprowadzać bez przerwy. Celem badania w teście WMTC jest wyznaczenie emisji tlenku węgla, dwutlenku węgla, tlenków azotu, węglowodorów, a w stosownych przypadkach także masy pyłów oraz zużycia paliwa czy zasięgu w sytuacji zasilania energią elektryczną. Badania wykonywane są na hamowni podwoziowej, której wymogi specyfikacyjne oraz niezbędne prace przygotowawcze zostały określone w Rozporządzeniu Komisji UE z 16 grudnia 2013 roku.



Rys. 2.4. Przebieg skróconego testu WMTC [31]

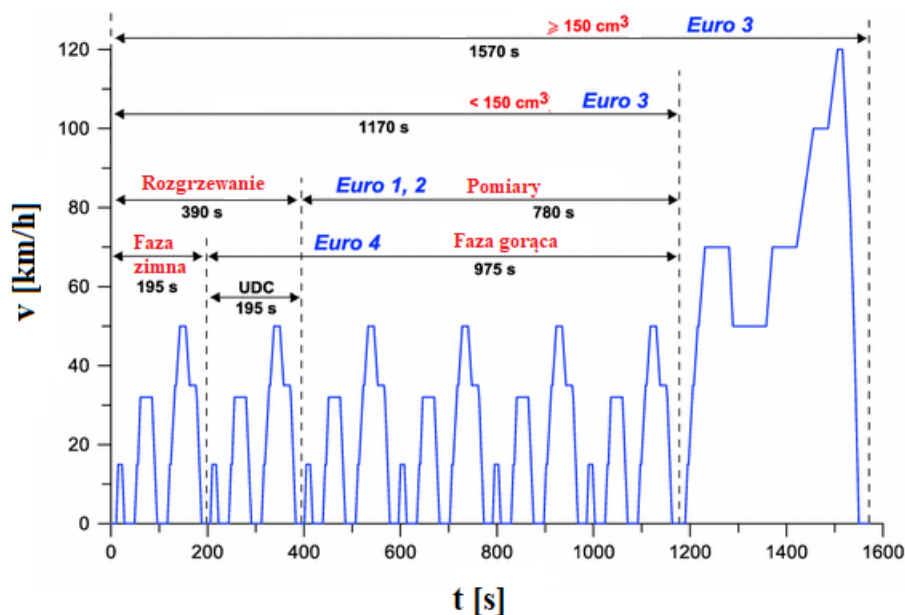
Test badawczy ECE (*Economic Commission for Europe*) R47 obowiązujący dla podkategorii L1e, L2e oraz L6 dla norm poprzedzających normę Euro 5, trwa 896 sekund i składa się z ośmiu podstawowych cykli (rys. 2.5). Należy je przeprowadzić bez przerwy, a pomiar dokonywany jest w całym cyklu jezdnym, już od momentu uruchomienia rozrusznika. Każdy z cykli składa się z siedmiu faz. Dla pojazdów jednośladowych kategorii L1e-A i L1e-B o maksymalnej prędkości konstrukcyjnej, wynoszącej 25 km/h, zastosowanie znajduje odcięty przebieg wykresu prędkości.



Rys. 2.5. Przebieg testu ECE R47 [31]

Test badawczy ECE R40 trwa 1170 sekund i składa się z sześciu podstawowych cykli miejskich, a każdy z nich należy przeprowadzać bez przerwy (rys. 2.6). Na jeden podstawowy cykl składa się piętnaście faz, które odzwierciedlają warunki związane z jazdą:

- ze stałą prędkością (3 fazy),
- pracą na biegu jałowym (6 faz),
- przyspieszenie (2 fazy),
- zmniejszenie prędkości (4 fazy).



Rys. 2.6. Przebieg testu ECE R40 [31]

Faza zimna testu badawczego odbywa się przez pierwsze 195 sekund (jeden podstawowy cykl), liczony od rozruchu zimnego silnika. Faza pracy na ciepłym silniku obejmuje natomiast ostatnie 975 sekund (pięć podstawowych cykli miejskich), w trakcie których silnik nadal się rozgrzewa i osiąga ostatecznie temperaturę roboczą. Test był obowiązujący dla podkategorii L5e-B, L7e-B, L7e-C w przypadku normy Euro 4, oraz dla L1e, L2e, L6e dla normy Euro 2+3, obowiązującej od 2003 roku. Podsumowując, badania typu I w zależności od (pod)kategorii pojazdu i normy emisji spalin należy przeprowadzić dla konkretnych cykli badawczych opisanych powyżej (tab. 2.20).

Tabela 2.20. Cykle badawcze wykorzystywane w badaniu typu I w zależności od podkategorii pojazdu jednośladowego [31]

Euro 4			
Kategoria pojazdu	Test badawczy	t [s]	s [m]
L1e, L2e, L6e	ECE R47	897	4433/6529
L3e, L4e, L5e-A, L7e-A	WMTC, etap 2	1800	28 912
L5e-B, L7e-B, L7e-C	ECE R40	1170	5971
Euro 5			
L1e, L2e, L6e-A, L6e-B	WMTC, etap 3	1200	11 541
L3e, L4e, L5e -A L7e-A, L7e-A, L7-C	WMTC, etap 3	1800	28 912

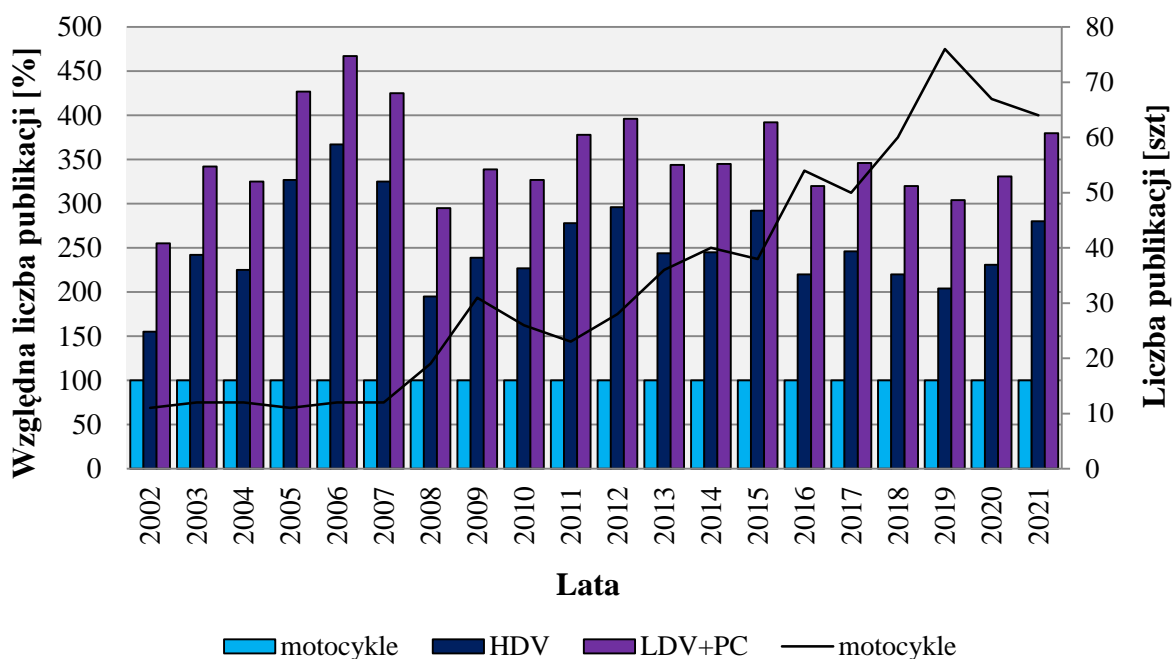
3. Przegląd literatury w aspekcie badań emisji związków toksycznych spalin z silników pojazdów jednośladowych

W zakresie przygotowań do realizacji podjętej tematyki monografii, dokonano analizy literaturowej. Studia w tym zakresie obejmowały zarówno zagadnienia dotyczące ekologii, energochłonności, budowy nowoczesnych pojazdów silnikowych, w tym należących do kategorii L, jak również badań realizowanych w warunkach laboratoryjnych na jednorolkowych hamowniach podwoziowych oraz w rzeczywistych warunkach eksploatacji.

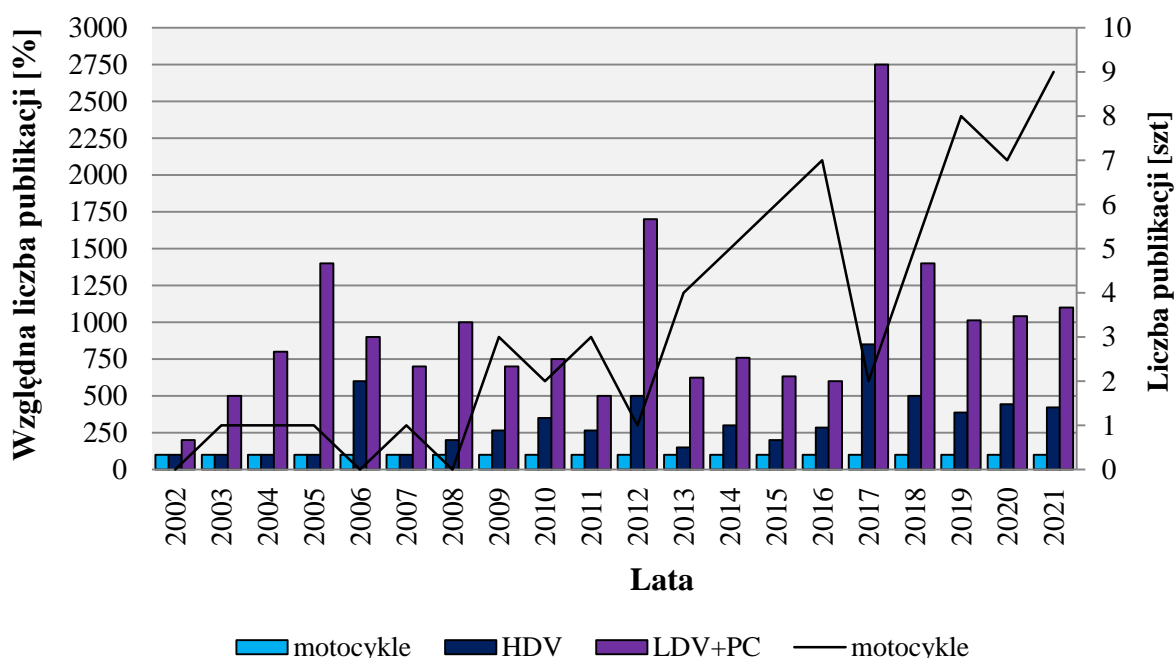
Przegląd wykazał, iż w ostatnich latach coraz większe znaczenie odgrywają badania RDE zużycia paliwa i emisji związków szkodliwych spalin, a od 1 września 2017 roku Komisja Europejska takie badania wprowadziła do procedur homologacyjnych pojazdów LDV. Badania RDE stwarzają bowiem nowe perspektywy poznawcze i rozwojowe pojazdów. Prowadząc badania w warunkach rzeczywistych można ustalić wszelkie relacje przyczynowo-skutkowe zachodzące w czasie eksploatacji obiektów i ich silników. W literaturze naukowej wielu badaczy opisuje różne aspekty badań typu RDE. W związku z wprowadzaniem takich badań do procedur homologacyjnych liczne pozycje dotyczą opracowań metodyki badań i porównania z testami laboratoryjnymi. W pracach publikowanych na ten temat zwracano uwagę na niereprezentatywność testów laboratoryjnych [67, 83, 96, 98, 116, 120, 124]. Jednocześnie wyniki tych badań zwracają uwagę na mnogość czynników wpływających na poziom emisji i zużycia paliwa przez pojazdy w zależności od warunków rzeczywistej eksploatacji, takich jak np.: congestia drogowa, profil drogi, warunki otoczenia.

Tradycyjnie, już od wielu lat badania emisji i zużycia paliwa dla pojazdów jednośladowych są prowadzone w warunkach laboratoryjnych, głównie z wykorzystaniem hamowni podwoziowych. Badania te są prowadzone w ramach opracowanych ustandaryzowanych cykli jezdnych, jednak ich reprezentatywność jest dyskusyjna. Stanowiło to punkt wyjścia do rozwoju badań w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Tego typu badania obejmują już pojazdy samochodowe oraz ciężarowe [32] i powinny być rozszerzane na inne kategorie silników, ponieważ badania w warunkach laboratoryjnych nie odzwierciedlają w pełni rzeczywistej eksploatacji, co potwierdzają liczne publikacje [10, 24, 74, 80, 95, 102, 105, 108]. Grupą pojazdów, które nie są jeszcze objęte badaniami w warunkach drogowych są pojazdy jednośladowe. Etapem poprzedzającym kroki ustawodawcze jest zazwyczaj długoletnia faza badawcza. Przegląd literaturowy z ostatnich dwudziestu lat wykazał dużą dysproporcję między liczbą publikowanych opracowań dotyczących emisyjności pojazdów jednośladowych i pojazdów z kategorii LDV+PC oraz HDV. W bazie internetowej czasopism techniczno-naukowych – WebofScience.com w pierwszej kolejności wpisano frazy „emisja z pojazdów [..]” kolejno dla LDV+PC, HDV oraz motocykli. Odnotowano, że w latach 2002–2021 całkowita liczba publikacji dla pojazdów jednośladowych wyniosła zaledwie 644, co stanowi niewielki udział opublikowanych prac dla lekkich pojazdów i samochodów osobowych, dla których uzyskano 5123 wyników wyszukiwania. Dla pojazdów ciężkich odnotowano 1669 publikacji dotyczących tego zagadnienia (rys. 3.1). Kolejną analizę wykonano dla precyzyjniejszej frazy, tj. „emisja w rzeczywistych warunkach drogowych [..]” analogicznie dla tych samych grup pojazdów. W ostatnich dwudziestu latach opublikowano jedynie 66 opracowań dla pojazdów jednośladowych, podczas gdy w samym 2002 roku 58 dla pojazdów z kategorii LDV+PC, a liczba ta tylko

zwiększa się do osiągnięcia maksimum w 2017 roku, wynoszącego 397 publikacji (rys. 3.2). Do najczęściej cytowanych prac odnoszących się do emisyjności pojazdów jednośladowych, wraz z opracowaniami dotyczącymi zagadnienia badań emisji w rzeczywistych warunkach eksploatacji należą [4, 8, 16, 62, 111, 124].



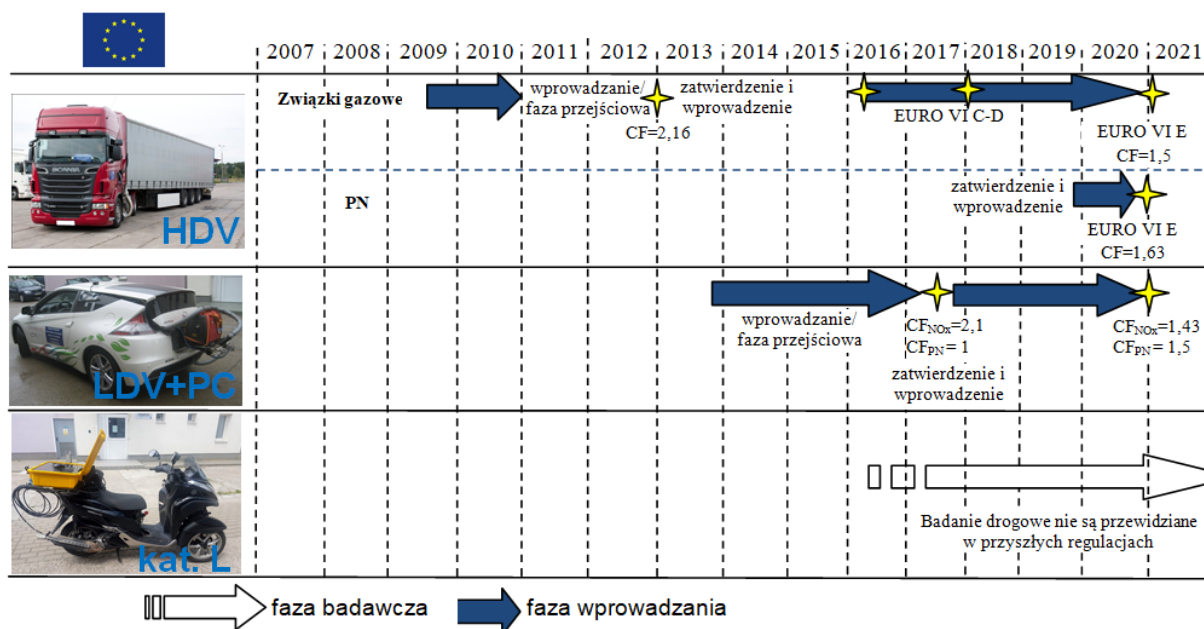
Rys. 3.1. Względna liczba publikacji na temat emisji związków toksycznych z różnych kategorii pojazdów



Rys. 3.2. Względna liczba publikacji na temat emisji związków toksycznych z różnych kategorii pojazdów w warunkach drogowych

Długoletnia i intensywna faza badawcza oraz prace pilotażowe dla pojazdów z grup LDV+PC oraz HDV skutkowały wprowadzeniem odpowiednich procedur dotyczących kontroli emisji związków toksycznych w rzeczywistych warunkach eksploatacji. W 2013 roku dla normy Euro VI na mocy rozporządzenia UE 582/2011 [29] przedstawiono szczegółowe wymagania dotyczące określania zgodności w eksploatacji użytkowanych silników lub pojazdów. Dokument traktuje o obowiązku wykonywania pomiarów emisji jednostkowej zanieczyszczeń w rzeczywistych warunkach drogowych, z użyciem aparatury typu PEMS. Istotną zmianą jest, wraz z zatwierdzeniem kroku E normy Euro VI w 2021 roku, uzupełnienie kontroli o pomiar liczby cząstek stałych z CF (*Conformity Factor* – współczynnik zgodności), wynoszącym 1,63. Zmniejszono również wskaźnik zgodności dla związków gazowych z 2,16 do 1,5. W przypadku pojazdów LDV i PC Komisja Europejska badania tego typu wprowadziła we wrześniu 2017 roku wraz z normą EURO 5. Wytyczne procedury RDE dla tej grupy pojazdów została zawarta w Rozporządzeniu Komisji (UE) 2017/1154 z dnia 7 czerwca 2017 roku [33]. Kolejne etapy wprowadzania badań w rzeczywistych warunkach eksploatacji dla poszczególnych grup pojazdów w Europie schematycznie przedstawiono na rysunku 3.3.

Dla motocykli i motorowerów, ze względu na niewielką liczbę opracowań i co za tym idzie brak nakreślonego problemu związanego z emisją związków toksycznych, badania drogowe nie są nawet przewidziane w przyszłych regulacjach. Niemniej jednak zauważa się tendencję wzrostową pojawiania się opracowań dotyczących tego zagadnienia. Na podstawie historii przebiegu prac dla innych kategorii pojazdów możliwe jest, że przyczyni się to do badań pilotażowych i w następstwie ich legislacji.



Rys. 3.3. Względna liczba publikacji na temat emisji związków toksycznych z różnych kategorii pojazdów w warunkach drogowych

Należy zauważyć, że pojazdy jednośladowe stanowią liczną grupę, szczególnie w Azji i Ameryce Południowej. Badania tego typu dla pojazdów jednośladowych są wykonywane bar-

dzo rzadko. W zasadzie problem badań typu RDE pojazdów jednośladowych jest przedstawiony tylko w kilku publikacjach. Wynika to przede wszystkim z ograniczonej przestrzeni dostępnej do zabudowy aparatury PEMS oraz jej masy. Mimo to, próby badań w rzeczywistych warunkach eksploatacji dla pojazdów kategorii L były i są nadal podejmowane. Wobec problemów z zaadoptowaniem aparatury PEMS do badań typu RDE pojazdów jednośladowych liczni badacze skupili się na prowadzeniu badań w rzeczywistych warunkach eksploatacji i stworzeniu na ich podstawie reprezentatywnych testów, które następnie były odtwarzane na stanowiskach laboratoryjnych [2, 16, 52, 70, 72, 91, 11, 116, 117, 121, 129, 130]. W wyniku tych badań opracowano cykle badawcze, które są bardziej reprezentatywne od cykli ustandaryzowanych, jednak mają one charakter lokalny, zwykle odzwierciedlają warunki eksploatacji dla wybranych miast i aglomeracji, np. Neapol, Włochy [91], Kaohsiung, Tajwan [124] i innych regionach Tajwanu [16], Edynburg, Szkocja [111], Darmstadt, Niemcy [116], Hanoi, Wietnam [121]. Analizując wymienione cykle należy zauważyć, że różnią się one znacznie, co świadczy o tym, że zbudowanie reprezentatywnego testu globalnego jest trudne. Najczęściej lokalne testy były wykorzystywane do określenia wskaźników emisyjnych i zużycia paliwa.

Podkreślić należy natomiast, że nadal zauważalny jest niedostatek opracowań opisujących pomiary emisji bezpośrednio w warunkach drogowych. Pomiary takie są opisane w pracach [76, 114, 118], jednak nie były one wykonywane z użyciem typowej aparatury PEMS. Pomimo tego w pracach tych określono rzeczywistą emisję, występującą w warunkach drogowych. Analiza metod i wyników badań tych prac ujawnia bardzo duże zróżnicowanie w odniesieniu do cykli – tras badawczych, wykorzystanej aparatury i uzyskanych wyników (tab. 3.1). Jednak jedna z nielicznych pozycji literaturowych, opisująca badania emisji w rzeczywistych warunkach eksploatacji, opierała się na pomiarach dokonanych za pomocą aparatury (AVL M.O.V.E.) dedykowanej dla samochodów osobowych, której wymiary i waga uniemożliwiają badania na mniejszym pojeździe jednośladowym. Badania zostały wykonane przez naukowców z Uniwersytetu w Grazu [56, 57] na motocyklu o objętości skokowej 800 cm³. Wyniki uzyskane w rzeczywistych warunkach eksploatacji znacznie różniły się od tych uzyskanych w teście homologacyjnym WMTC.

Tabela 3.1. Analiza metod i wyników badań zawartych w wymienionych pracach badawczych

Referencja	Test/Region	s [km]	t [s]	t _{bj} [%]	v _{sr} [km/h]	a _{sr} [m/s ²]
[16]	URB (Tajwan)	4,232	877	28	23,95	0,66
[124]	KHM (Kaohsiung, Tajwan)	4,35	753	28	28,3	0,61
[130]	CECDC (Hanoi, Wietnam)	11,51	2061	8	21,7	0,46
[2]	Dhanbad (Indie)	12,998	1683	2,91	28,65	0,81
[118]	Khon Kean (Tajlandia)	7,14	1279	20	b. danych	0,62
[76]	Chennai (Indie)	14	2296	26	b. danych	b. danych
[91]	Neapol (Włochy)	18,9	2742	14,6	b. danych	b. danych
[70]	Chennai (Indie)	4,887	775	26,73	30,76	0,65

W tabeli 3.2 przedstawiono porównanie uzyskanych wyników badań emisji związków toksycznych spalin z wymienionych prac naukowych. W zestawieniu tym dobrano pojazdy, które były podobne do obiektów badawczych w pracy doktorskiej, o zbliżonej masie, z silnikami o objętości skokowej do 125 cm³, a więc typowe stosowane w lekkich pojazdach dwukołowych. Zestawione wyniki, ze względu na metodykę badań, można podzielić na dwie grupy. Pierwsza reprezentuje wyniki badań dla testów odwzorowujących cykle zarejestrowane w rzeczywistych warunkach eksploatacji, w warunkach drogowych, ale wykonywane na hamowni podwoziowej [2, 16, 52, 91, 111, 117, 121, 124, 129, 130]. Drugą grupę stanowią wyniki badań typu RDE, a więc pozyskane bezpośrednio w rzeczywistej eksploatacji [76, 118]. Bardzo szeroko swoje badania opisali Chen i inni, 2003 [16] i w tym przypadku do porównania wybrano wyniki z testu URB, który jest ogólny i reprezentatywny dla kilku miast Tajwanu, a wyniki są wartościami uśrednionymi dla kilkunastu pojazdów dwukołowych.

Tabela 3.2. Porównanie uzyskanych wyników badań emisji związków toksycznych spalin z wymienionych prac naukowych

Referencja	Rodzaj silnika	Test	Rodzaj badań	CO [g/km]	HC [g/km]	NO _x [g/km]
[16]	2-suwowy 4-suwowy	URB (Tajwan)	Hamownia podwoziowa	7,41	2,36	0,11
[124]	50 cm ³ 2-suwowy	KHM (Kaohsiung, Tajwan)	Hamownia podwoziowa	4,71	1,88	0,002
[124]	125 cm ³ , 4-suwowy	KHM (Kaohsiung, Tajwan)	Hamownia podwoziowa	2,28	0,48	0,17
[130]	70–100 cm ³	CECDC (Hanoi, Wietnam)	Hamownia podwoziowa	10,02	0,80	0,20
[130]	100–125 cm ³	CECDC (Hanoi, Wietnam)	Hamownia podwoziowa	8,86	0,79	0,13
[2]	4-suwowy	Dhanbad (Indie)	Hamownia podwoziowa	1,60	0,45	0,46
[52]	125 cm ³ 4-suwowy	Teheran (Iran)	Hamownia podwoziowa	15,62	0,50	0,074
[91]	125 cm ³ 4-suwowy	Neapol (Włochy)	Hamownia podwoziowa	n/a	n/a	0,072
[118]	108 cm ³ , 4-suwowy	Khon Kean (Tajlandia)	RDE	1,17	n/a	n/a
[76]	70 cm ³ 2-suwowy	Chennai (Indie)	RDE	18,44	3,12	0,11
[76]	100 cm ³ 4-suwowy	Chennai (Indie)	RDE	4,77	0,24	0,24
[76]	109 cm ³ 4-suwowy	Chennai (Indie)	RDE	9,71	0,46	0,23
[76]	124 cm ³ 4-suwowy	Chennai (Indie)	RDE	5,84	0,29	0,18

Z zestawionych w tabeli wartości emisji związków toksycznych wynika, że są one bardzo zróżnicowane. Różnice te są spowodowane różnymi pojazdami, paliwami, normami emisyjnymi

mi lub przebiegiem. Warto zwrócić uwagę, że emisja CO i HC (*Hydrocarbons*) jest duża nie tylko dla pojazdów z silnikami dwusuwowymi [76], znaczące wartości odnotowali w swoich badaniach autorzy pracy [52], pomimo zastosowania pojazdu z silnikiem czterosuwowym. Nie można jednak jednoznacznie wnioskować, jak poszczególne parametry cykli jezdnych wpłynęły na emisję, uniemożliwia to zbyt duża liczba czynników różniących porównywane badania.

Szerokie studium literaturowe i przywołane przykłady badań pojazdów jednośladowych w rzeczywistych warunkach eksploatacji pozwalają na sformułowanie twierdzenia, że prace podjęte przez autora niniejszej dysertacji są nieliczne i obecnie nadal w początkowym stadium rozwoju. Wynika to głównie z braku na rynku aparatury przeznaczonej do badań pojazdów jednośladowych. Jest to związane także z ograniczeń ilości i jakości przepisów wymuszających takie badania, ponadto nie są one również przewidziane w przyszłych regulacjach. Jednak postępujący rozwój technologiczny i miniaturyzacja aparatury pomiarowej umożliwia obecnie wykonywanie badań typu RDE dla pojazdów jednośladowych. Niewątpliwie badania takie są w pełni uzasadnione w kontekście zdobywania doświadczenia na potrzeby przyszłych rozwiązań pomiarów emisji z pojazdów jednośladowych.

Ponadto istnieje wiele pozycji literaturowych, przedstawiających konkretne rozwiązania mające na celu obniżenie wartości emisji, często mają one charakter porównawczy tych rozwiązań (zastosowanie różnych paliw czy pozasilnikowych układów oczyszczania spalin). Publikacje te obejmują takie rozwiązania jak: opracowanie systemu elektronicznego wtrysku paliwa [12], modyfikacja powłoki katalitycznej trójfunkcyjnego reaktora katalitycznego [13], czy analiza porównawcza zastosowania paliwa o różnej zawartości siarki [141]. Co więcej takie pozycje jak [21, 40, 113] oraz [46] opisują badania i analizę nieregulowanej do roku 2020 roku i standardu Euro 5 emisji cząstek stałych. Pomiary te wykonano w warunkach laboratoryjnych na różnych motocyklach oraz motorowerach, przy zastosowaniu różnorodnych metod badawczych.

Na podstawie analizy literaturowej należy stwierdzić brak istniejących opracowań i publikacji, zawierających kompleksowy opis problemu emisji związków toksycznych spalin z silników miejskich pojazdów jednośladowych w rzeczywistych warunkach eksploatacji.

4. Cel, problem badawczy i zakres pracy

Analiza literatury, regulacji prawnych oraz własne obserwacje pozwoliły określić stan wiedzy dotyczący emisji związków toksycznych spalin z silników miejskich pojazdów jednośladowych. Najważniejsze pozyskane informacje sformułowano w formie następujących wniosków:

1. Brak jest badań pozwalających na ocenę emisji pojazdów jednośladowych w rzeczywistych warunkach drogowych. Badania emisji związków toksycznych z pojazdów, należących do kategorii L (motocykli i motorowerów), prowadzone są głównie w warunkach laboratoryjnych na podwoziowych stanowiskach hamulcowych, a wyniki uzyskiwane tą metodą są dalekie od wartości emisji, rejestrowanych w warunkach rzeczywistych.
2. Obecnie nie istnieją procedury legislacyjne dotyczące badań emisji związków toksycznych z pojazdów jednośladowych w rzeczywistych warunkach eksploatacji, nie są one także przewidziane w przyszłych regulacjach. Ponadto w ośrodkach badawczych nie prowadzi się obecnie żadnych badań pilotażowych, które mogłyby poprzedzać działania legislacyjne.
3. Liczne badania (opisane w rozdziale 3) naukowców z całego świata wykazały, że obowiązujące testy homologacyjne (obecnie test WMTC) nie w pełni odwzorowują rzeczywiste parametry pracy silników pojazdów jednośladowych.
4. Zauważalny jest ograniczony dostęp i zbyt wolny rozwój aparatury pomiarowej umożliwiającej przeprowadzenie badań emisji z pojazdów jednośladowych w rzeczywistych warunkach eksploatacji.

Zasadnicze pytanie badawcze rozprawy doktorskiej sformułowano w następujący sposób: *jaka jest emisja związków toksycznych spalin w rzeczywistych warunkach eksploatacji i jaka jest jej zależność od warunków eksploatacji pojazdów jednośladowych, jak mierzyć emisję, jakie powinny być wytyczne dotyczących testów drogowych dla tej grupy pojazdów?* Rozwiązanie tego zagadnienia wymagało zrealizowania głównych celów pracy zdefiniowanych jako:

1. **Identyfikacja emisji związków toksycznych spalin z uwzględnieniem analizy jakościowej lotnych związków organicznych i parametrów pracy silników miejskich pojazdów jednośladowych w rzeczywistych warunkach eksploatacji.**
2. **Propozycja autorskiej procedury badawczej dla miejskich pojazdów jednośladowych w rzeczywistych warunkach eksploatacji, odpowiadającej lokalnym warunkom drogowym (aglomeracja poznańska).**

Do osiągnięcia powyższych celów część badawczą pracy podzielono na 3 etapy. Etap pierwszy dotyczył opracowania odpowiedniej metodyki badawczej – dobór reprezentatywnej grupy pojazdów jednośladowych wpisujących się w miano „miejskich” oraz skonstruowanie tras badawczych, odpowiadających typowym warunkom ich użytkowania. W tym etapie istotny był także właściwy dobór aparatury badawczej typu PEMS. Do badań wykorzystano zatem aparaturę Axion R/S+, która przeszła rygorystyczną ocenę Państwowej (USA) Agencji Ochrony Środowiskowej USEPA (*United States Environmental Protection Agency*). Opis aparatury, jej montażu oraz niezbędnych procedur przygotowawczych zostały przedstawione w rozdziale 5 dysertacji.

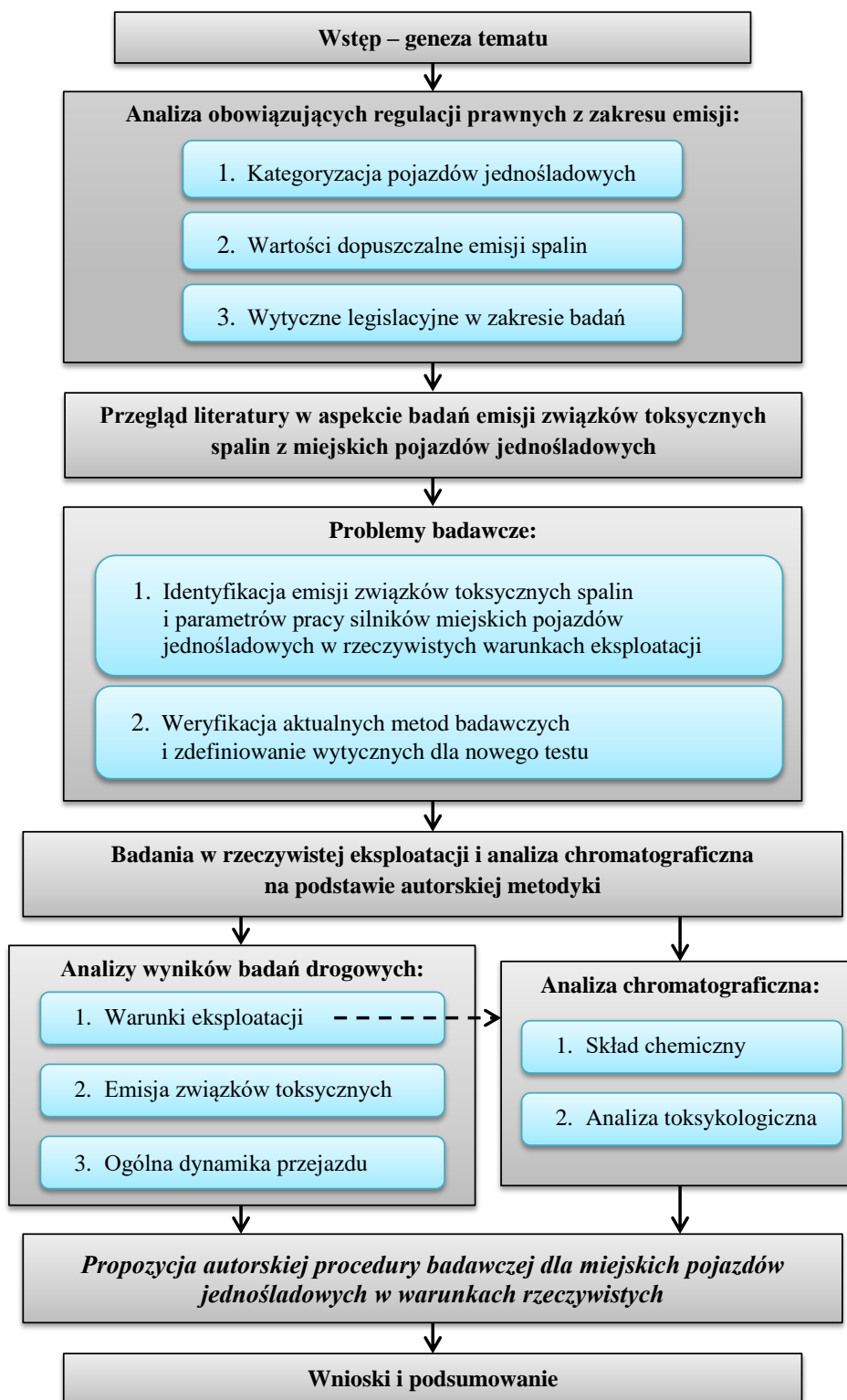
Etap drugi obejmował jakościowe i ilościowe badania empiryczne w rzeczywistych warunkach eksploatacji, które umożliwiły:

1. określenie wpływu rzeczywistej eksploatacji miejskich pojazdów jednośladowych na parametry pracy ich silników spalinowych,
2. wyznaczenie zależności między parametrami jezdnyymi tej grupy pojazdów a emisją związków szkodliwych,
3. analizę porównawczą parametrów ruchu miejskich pojazdów jednośladowych i ich silników spalinowych w testach homologacyjnych i rzeczywistych warunkach eksploatacji,
4. weryfikację ogólnej dynamiki przejazdów reprezentatywnej grupy miejskich pojazdów jednośladowych w rzeczywistych warunkach eksploatacji, bazując na wytycznych procedury RDE dla pojazdów samochodowych, której główną miarę stanowi względne przyspieszenie dodatnie.

Etap 3 stanowiły badania jakościowe dotyczące składu chemicznego składu próbek spalin z miejskich pojazdów jednośladowych. Etap ten wymagał doboru narzędzia pomiarowego, sposobu poboru próbek, ich przechowywania jak i opracowania techniki pomiarowej m. in. ustalenia programu temperaturowego analizy chromatograficznej. W dalszej części, otrzymane w procesie rozdziału chromatograficznego, poszczególne związki chemiczne poddane zostały szczegółowej ocenie w aspekcie ich toksykologii.

Schematyczną strukturę pracy z wyszczególnionymi problemami badawczymi przedstawiono na rysunku 4.1. W rozdziale pierwszym, na podstawie danych statystycznych dotyczących liczby pojazdów jednośladowych na świecie i w kraju oraz ich wpływu na środowisko, a także zdrowie ludzkie, określono genezę podjętej tematyki pracy. Rozdział drugi traktuje o regulacjach prawnych dotyczących badań emisyjnych silników pojazdów jednośladowych. Opisano w jaki sposób dokonuje się kategoryzacji pojazdów jednośladowych na podstawie krajowego prawa o ruchu drogowym oraz w aspekcie europejskich i światowych norm emisji spalin. Co więcej, analizie poddane zostały wytyczne legislacyjne w zakresie badań emisji pojazdów jednośladowych. Rozdział trzeci stanowi syntetyczne zestawienie dostępnej literatury w aspekcie badań emisji związków toksycznych spalin z silników pojazdów jednośladowych i rozwiązań mających na celu jej redukcję. W rozdziale piątym przedstawiono opracowaną i wykorzystaną metodykę badawczą z podziałem na aparaturę badawczą (urządzenie typu PEMS, chromatograf gazowy z desorberem termicznym), obiekty badawcze i trasy wykorzystane do badań w warunkach rzeczywistej eksploatacji. Rozdział 6, stanowiący główną część dysertacji, zawiera szereg analiz, będących wynikiem badań empirycznych miejskich pojazdów jednośladowych w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Badania zostały wzbogacone o chemiczną analizę jakościową składu spalin. Treści w nim zawarte odpowiadają bezpośrednio za realizację pierwszego celu pracy tj. identyfikację emisji związków toksycznych spalin (z uwzględnieniem analizy jakościowej lotnych związków organicznych) i parametrów pracy silników miejskich pojazdów jednośladowych w rzeczywistych warunkach eksploatacji oraz pośrednio za realizację drugiego celu pracy tj. propozycję autorskiej procedury badawczej dla miejskich pojazdów jednośladowych, odpowiadającego lokalnym warunkom drogowym (aglomeracja poznańska). Procedura ta wraz ze szczegółowymi wymaganiami opisana została

w rozdziale 7 pracy. Jej wytyczne zdefiniowane zostały w oparciu o obowiązującą dla pojazdów LDV procedurę RDE. Weryfikacji poddana została ogólna dynamika przejazdu i na jej podstawie zaproponowano autorską procedurę badawczą dla miejskich pojazdów jednośladowych. Praca zakończona została podsumowaniem i wnioskami z podziałem na merytoryczne, aplikacyjne, metodyczne oraz wskazane zostały kierunki dalszych działań.



Rys. 4.1. Schematyczna struktura pracy

5. Metodyka badań

5.1. Badania emisyjne w rzeczywistych warunkach eksploatacji

5.1.1. Aparatura pomiarowa

Obecnie w badaniach pojazdów jednośladowych powszechnie wykorzystywane są hamowne podwoziowe, dotyczy to zarówno badań rozwojowych, jak i homologacyjnych. Wynika to głównie z ograniczonej przestrzeni do zamontowania sprzętu pomiarowego typu PEMS, szczególnie uwzględniając jego masę. Postęp technologiczny oraz miniaturyzacja dostępnej na świecie aparatury badawczej stwarza nowe możliwości poznawcze. Jedną z nich jest aparatura Axion R/S+, którą wykorzystano podczas realizacji badań w ramach dysertacji.

Aparatura typu PEMS – Axion R/S+ wyprodukowana została przez amerykańską firmę Global MRV (rys. 5.1). Axion™ Micro PEMS przeszedł rygorystyczną ocenę programu weryfikacyjnego technologii środowiskowych ETV (*Environmental Technology Verification*) Agencji Ochrony Środowiska Stanów Zjednoczonych (USEPA). Cechy urządzenia – masa 18 kg oraz niewielkie wymiary umożliwiają badania pojazdów jednośladowych (zarówno motocykli jak i motorowerów) w warunkach rzeczywistych. Aparatura wyposażona jest w szereg analizatorów do pomiaru emisji związków gazowych spalin: HC, CO₂, CO, NO oraz PM i tlenu O₂. Wartości emisji/stężeń wymienionych związków rejestrowane są równoległe przez dwa niezależne zestawy analizatorów, co umożliwia naprzemienne i automatyczne zerowanie pojedynczych torów pomiarowych w trakcie testu.



Rys. 5.1. Aparatura badawcza – Axion R/S+ [47]

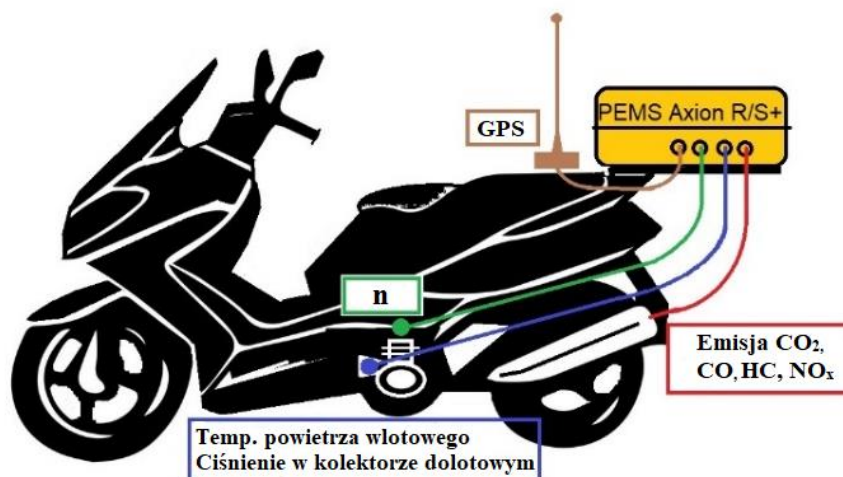
Pomiar stężeń CO, CO₂ oraz HC realizowany jest za pośrednictwem analizatora NDIR (*Nondispersive Infrared Sensor*). Zasada działania analizatora tego typu oparta jest metodzie spektrometrycznej, w której fotometr mierzy całkowitą absorpcję promieniowania w dość wąskim paśmie długości fali, charakterystycznej dla danego związku. Wykorzystana jest tutaj zasada porównywania absorpcji wiązki światła podczerwonego badanego związku zawartego w spalinach z gazem wzorcowym, którego pochłanianie jest równe zero. Do oznaczania zawartości NO i O₂ w spalinach służą natomiast analizatory elektrochemiczne, w których określana

substancja podlega elektrochemicznej zamianie na sygnał elektryczny. W pomiarach PM stosuje się metodę opartą na rozproszeniu laserowym – Laser Scatter. Parametry pomiarowe urządzenia przedstawiono w tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Charakterystyka przyrządu AxionR/S+ [47]

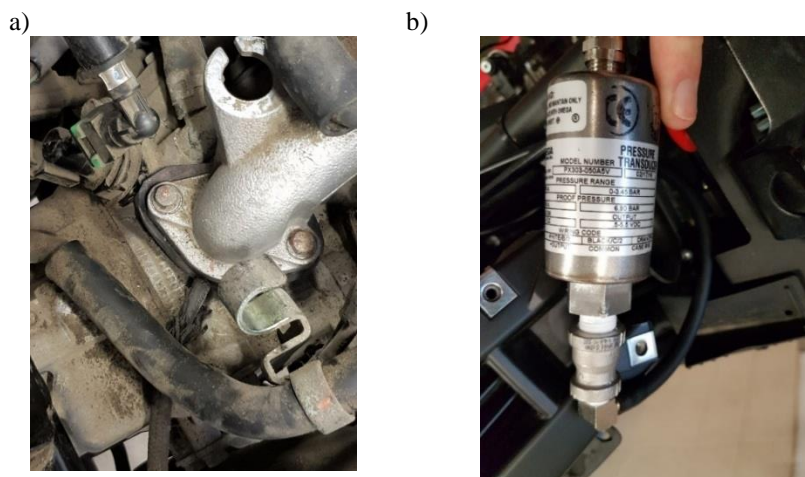
Substancja	Zakres pomiarowy	Dokładność	Rozdzielczość	Metoda pomiaru
CO ₂	0–16%	± 0,3%	0,01%	NDIR
CO	0–10%	± 0,002%	0,001%	NDIR
THC	0–4000 ppm	± 8 ppm	1 ppm	NDIR
NO	0–4000 ppm	± 25 ppm	1 ppm	Elektrochemiczna
O ₂	0–25%	± 0,1%	0,01%	Elektrochemiczna
PM	0–300 mg/m ³	± 2%	0,01 mg/m ³	Laser Scatter
Masa aparatury: 18,2 kg		Wymiary aparatury: 551×429 mm		

Producent wyposażył aparaturę badawczą w stację meteorologiczną, system pozycjonowania GPS (*Global Positioning System*) oraz moduł pozwalający na rejestrację danych z pokładowego systemu diagnostyki pojazdów OBD. Pomiar i akwizycja danych odbywa się z częstotliwością 1 Hz. Na podstawie uzyskanych danych dokonuje się korekty uzyskanych wyników oraz oblicza się emisję drogową/jednostkową zmierzonych zanieczyszczeń. Urządzenie może pracować w temperaturach z zakresu 5–35 °C, przy wilgotności względnej 0–90%. Ze względu na obecny brak pokładowego systemu diagnostycznego OBD w większości pojazdów jednośladowych niezbędne było zamontowanie do pojazdu szeregu sond oraz czujników dodatkowych (rys. 5.2).



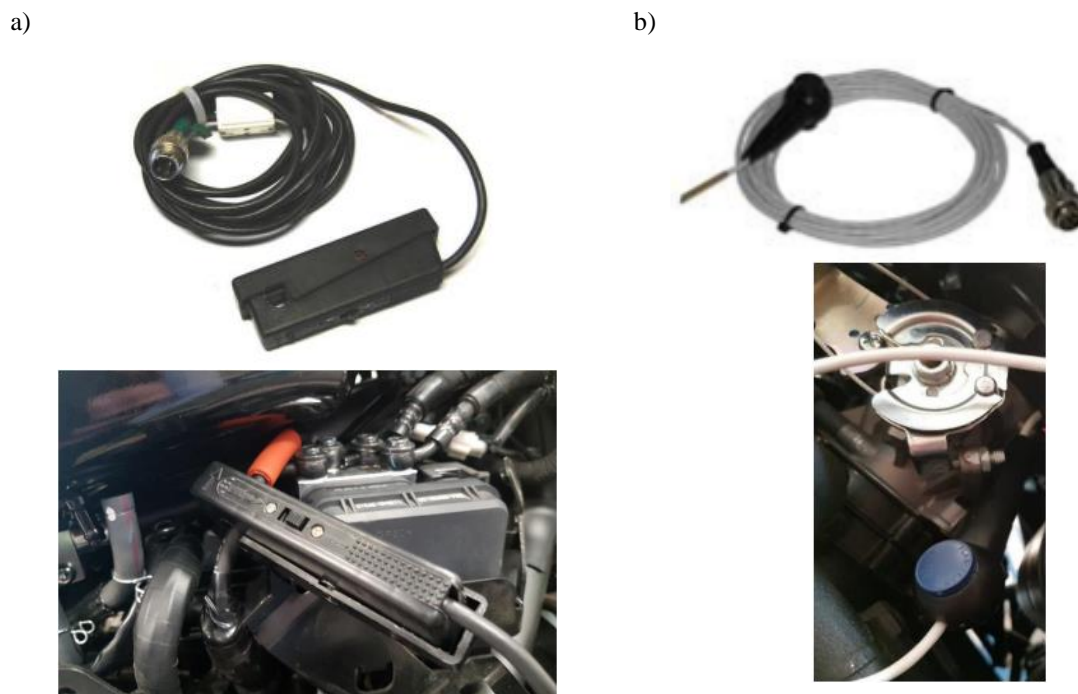
Rys. 5.2. Aparatura badawcza – Axion R/S+

W pierwszej kolejności, w celu wyznaczenia masy strumienia powietrza, w silniku zastosowano dodatkowy czujnik ciśnienia w kolektorze dolotowym (rys. 5.3a). Przetwornik czujnika (rys. 5.3b) dokonuje zamiany wartości ciśnienia na odpowiadające mu napięcie prądu stałego w zakresie 0,5–5,5 V. Łączy się on bezpośrednio z urządzeniem Axion R/S+, dostarczając natychmiastową informację o ciśnieniu w kolektorze. Dane służą do obliczenia gęstości powietrza i określenia natężenia przepływu powietrza w silniku.



Rys. 5.3. a) podłączenie czujnika do kolektora dolotowego b) Czujnik ciśnienia

Odczyt prędkości obrotowej wału korbowego realizowany jest przez czujnik indukcyjny zapinany na przewód wysokiego napięcia za cewką zapłonową (rys. 5.4a). Do jego działania potrzebne jest zdefiniowanie typu silnika i sposobu pracy układu zapłonowego. Ostatnie dodatkowe urządzenie stanowi sonda temperatury w układzie dolotowym (rys. 5.4b). Rezystancja czujnika temperatury zmienia się w zależności od temperatury powietrza zasysanego. Przy rosnącej temperaturze rezystancja maleje – spada wskutek tego napięcie na czujniku. Sterownik ocenia te wartości napięcia, które stoją w bezpośredniej zależności od temperatury powietrza zasysanego (niskie temperatury powodują wysokie, a wysokie temperatury niskie napięcie czujnika).



Rys. 5.4. a) Indukcyjny miernik prędkości obrotowej b) sonda temperatury

Urządzenie Axion R/S+, podobnie jak inne systemy typu PEMS wymagają, przed przystąpieniem do badań, odpowiedniej procedury przygotowawczej:

- rozgrzewanie (minimum 45 minut),
- kalibracja gazami wzorcowymi,
- test szczelności,
- zerowanie w warunkach otoczenia.

5.1.2. Obiekty badawcze

Do badań emisji związków toksycznych spalin w rzeczywistych warunkach eksploatacji wykorzystano 4 pojazdy jednośladowe przeznaczone do eksploatacji przede wszystkim w ruchu miejskim. Obiekty charakteryzowały się objętością skokową silnika równą lub mniejszą od 125 cm³ i spełniały normy emisji spalin Euro 3 oraz Euro 4. Obiekty zostały dobrane w taki sposób, aby charakteryzowały się określoną konstrukcją (małe koła, nisko zawieszony silnik, obudowane podwozie), która znajduje swoje zastosowanie szczególnie na krótkich dystansach na obszarach miejskich oraz pozamiejskich. Przed przystąpieniem do badań wszystkie pojazdy zostały poddane przeglądowi technicznemu, w celu wykrycia ewentualnych usterek (mogą mieć one znaczący wpływ na końcowy wynik emisji związków toksycznych). W tabeli 5.2 przedstawiono najważniejsze parametry badanych pojazdów oraz ich widok wraz z zamontowaną aparaturą badawczą

Tabela 5.2. Zestawienie badanych pojazdów oraz główne parametry ich silników

Pojazdy kategorii L1e	
	<p style="text-align: center;">Pojazd 1</p> <p>Typ silnika: <i>czterosuwowy</i> Objętość skokowa: <i>43 cm³</i> Budowa: <i>jednocylindrowy, 2 zawory</i> Średnica / Skok tłoka: <i>37,8 mm / 44 mm</i> Maksymalna moc: <i>2,2 kW / 7000 obr/min</i> Maksymalny moment obrotowy: <i>3,5 Nm / 6750 obr/min</i> Chłodzenie: <i>cieczą</i> Rozrząd: <i>SOHC</i> Rok produkcji: <i>2013</i> Zgodność z normą: <i>Euro 3</i></p>
	<p style="text-align: center;">Pojazd 2</p> <p>Typ silnika: <i>dwusuwowy</i> Objętość skokowa: <i>49,3 cm³</i> Budowa: <i>jednocylindrowy</i> Średnica / Skok tłoka: <i>40,3 mm / 39 mm</i> Maksymalna moc: <i>2,5 kW / 7000 obr/min</i> Maksymalny moment obrotowy: <i>3,9 Nm / 7000 obr/min</i> Chłodzenie: <i>powietrzem</i> Rozrząd: <i>-</i> Rok produkcji: <i>2008</i> Zgodność z normą: <i>Euro 3</i></p>

Pojazdy kategorii L3e	
	<p>Pojazd 3</p> <p>Typ silnika: <i>czterosuwowy</i> Objętość skokowa: <i>124,8 cm³</i> Budowa: <i>jednocylindrowy, 2 zawory</i> Średnica / Skok tłoka: <i>52,4 mm / 57,9 mm</i> Maksymalna moc: <i>8,1 kW / 9000 obr/min</i> Maksymalny moment obrotowy: <i>10,4 Nm / 5000 obr/min</i> Chłodzenie: <i>cieczą</i> Rozrząd: <i>SOHC</i> Rok produkcji: <i>2016</i> Zgodność z normą: <i>Euro 4</i></p>
	<p>Pojazd 4</p> <p>Typ silnika: <i>czterosuwowy</i> Objętość skokowa: <i>125 cm³</i> Budowa: <i>jednocylindrowy, 4 zawory</i> Średnica / Skok tłoka: <i>57 mm / 49 mm</i> Maksymalna moc: <i>11 kW / 9300 obr/min</i> Maksymalny moment obrotowy: <i>11,8 Nm / 8600 obr/min</i> Chłodzenie: <i>cieczą</i> Rozrząd: <i>OHC</i> Rok produkcji: <i>2012</i> Zgodność z normą: <i>Euro 3</i></p>

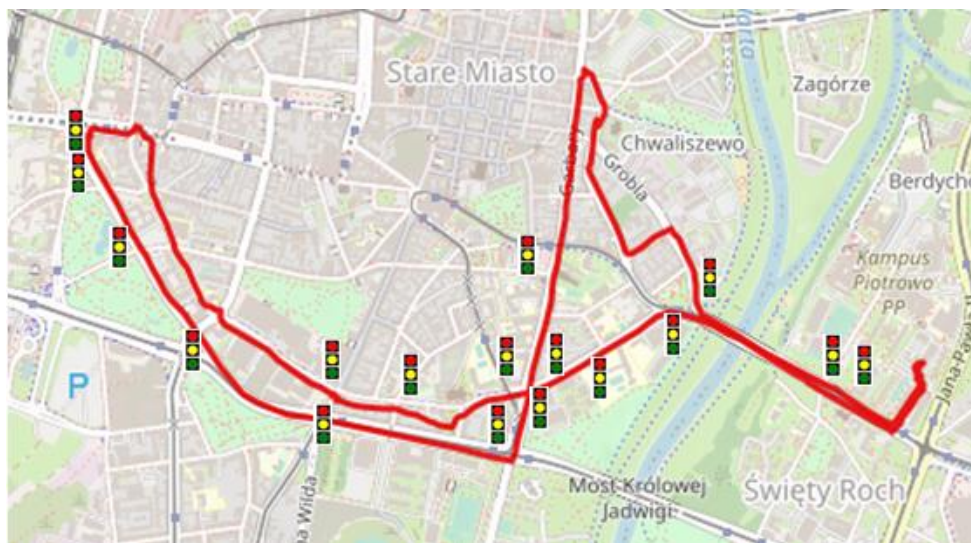
5.1.3. Trasy badawcze

Do badań emisyjnych miejskich pojazdów jednośladowych w rzeczywistych warunkach eksploatacji posłużyły trzy trasy badawcze: dwie trasy miejskie oraz trasa, składająca się z cyklu miejskiego oraz pozamiejskiego. Ze względu na fakt, iż pojazdy jednośladowe umożliwiają szybkie przemieszczanie się nawet w warunkach dużego natężenia ruchu i kongestii ulicznej, są one wykorzystywane głównie w ruchu miejskim. W związku z tym trasy skonstruowane zostały w sposób uwzględniający przede wszystkim obszar ścisłego centrum miasta Poznania. Badania wykonano w dni robocze w godzinach „pozaszczytowych”, co jest zgodne z wytycznymi procedury RDE dla pojazdów LDV. Ponadto wszystkie przejazdy trasami testowymi wykonywał ten sam kierowca. Miało to na celu zachowanie powtarzalności pomiarowej, wpływ zmiany stylu jazdy na emisję związków toksycznych oraz zużycia paliwa udowodniony został w wielu publikacjach m.in. [6].

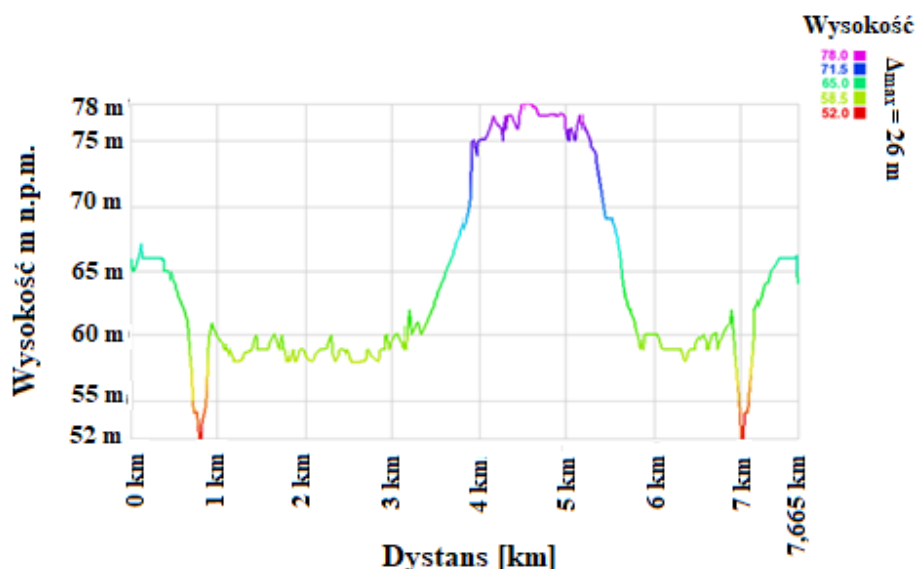
Trasa A zawierała odcinki obszaru ścisłego centrum miasta Poznania. W związku z tym udział cyklu miejskiego dla testów na tej trasie badawczej wyniósł około 100%. Została

ona tak dobrana, aby stanowiła zbiór dróg z licznymi skrzyżowaniami, sygnalizacjami świetlnymi oraz z maksymalną prędkością jazdy, wynoszącą 50 km/h, a jej całkowita długość wyniosła 7,4 km. W wytycznych istniejącej procedury RDE dla pojazdów lekkich widnieje również zapis o maksymalnej różnicy wysokości drogi nad poziomem morza, która między startem a zatrzymaniem nie może przekraczać 100 m. W związku z tym na poniższym rysunku wraz z mapą zarejestrowanej trasy pomiarowej (rys 5.6a) przedstawiono profil jazdy (rys. 5.6b). W tym przypadku różnica pomiędzy najmniejszą a największą zarejestrowaną wartością wysokości nad poziomem morza wyniosła 26 m.

a)



b)

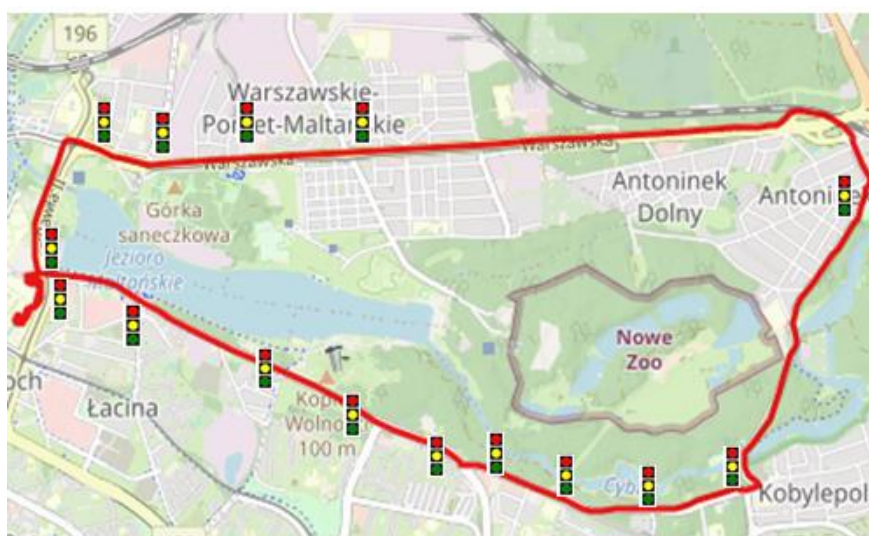


Rys. 5.6. a) Widok trasy badawczej A b) Profil jazdy

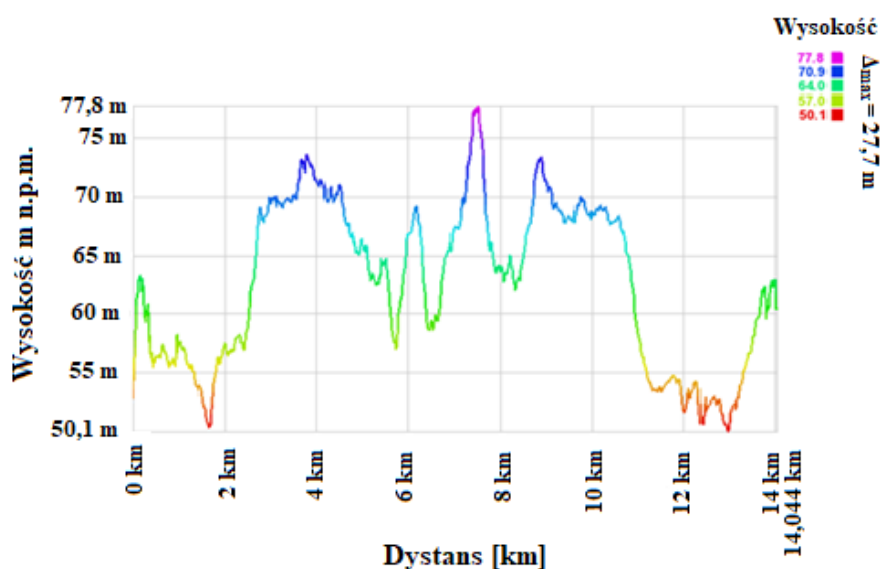
Trasa badawcza B również przedstawia warunki typowe dla centrum miasta (udział cyklu miejskiego ~100%), przy czym jej długość wyniosła 13,7 km. Jest zatem prawie dwukrotnie dłuższa, pod względem dystansu, niż trasa A. Składa się ona z dróg o różnych prędkościach maksymalnych, odcinków prostych, a także wielu skrzyżowań (rys 5.7a). Profil jazdy jest

podobny do profilu trasy A, a różnica pomiędzy najmniejszą, a największą zarejestrowaną wartością wysokości nad poziomem morza wyniosła 27,7 m (rys. 5.7b).

a)



b)



Rys. 5.7. a) Widok trasy badawczej B b) Profil jazdy

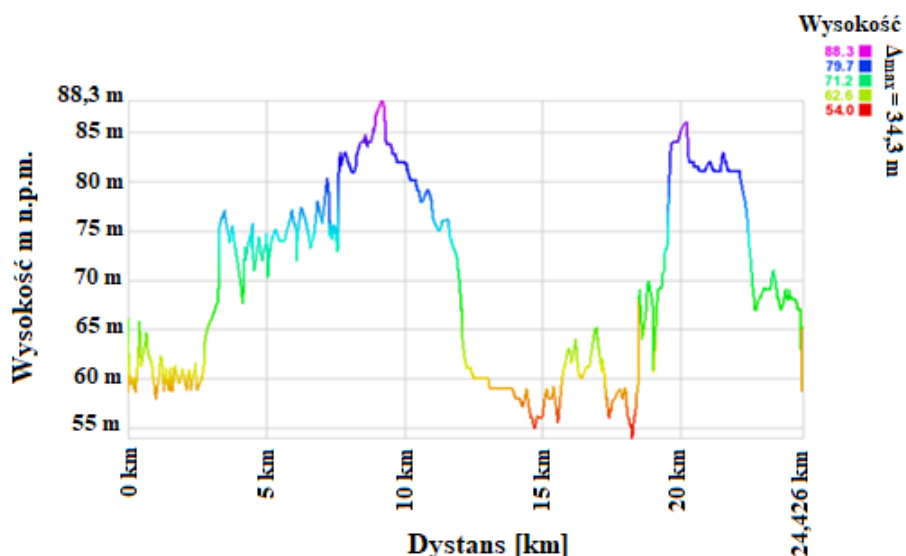
W początkowej fazie prac założono przeprowadzenie testów tylko w warunkach miejskich. Autorka pracy postanowiła rozszerzyć testy emisyjności również dla cyklu pozamiejskiego, w związku z tym dla dwóch z czterech obiektów badawczych przeprowadzony został test na trasie pomiarowej C. Oryginalnie trasa została zaprojektowana na potrzeby badań pojazdów LDV zgodnie z wytycznymi procedury RDE. Początkowo zatem trasa składała się z trzech odcinków: miejskiego, pozamiejskiego oraz autostradowego, które definiowane są na podstawie profili prędkości. Zgodnie z procedurą każdy odcinek stanowi około 23–43% całkowitego dystansu jazdy, a średnie zakresy prędkości pojazdu wynoszą 15–40 km/h, 60–90 km/h i powyżej 90 km/h odpowiednio dla cyklu miejskiego, pozamiejskiego i autostradowego. Ze względu na ograniczenia konstrukcyjne miejskich pojazdów jednośladowych, a co za tym

idzie warunki ich eksploatacji, trasę zredukowano o cykl autostradowy, a udział cykli miejskiego oraz pozamiejskiego wynosiły po 50%. Podobnie jak dwie pierwsze, trasa C obejmowała drogi na obszarze aglomeracji poznańskiej, a jej średnia długość wyniosła 24 km (rys. 5.8a). Profil jazdy jest nieco bardziej zróżnicowany, a zakres wysokości zwiera wartości od 54 do 88,3 m n.p.m. (rys 5.8b).

a)



b)



Rys. 5.8. a) Widok trasy badawczej C b) Profil jazdy

Odnośząc się do procedur RDE dla pojazdów lekkich należy zwrócić uwagę, że konstrukcja tras badawczych powinna umożliwiać zachowanie wytycznych ogólnej dynamiki przejazdu. Głównym parametrem dynamicznym, koniecznym do zweryfikowania poprawności całego przejazdu jest RPA, czyli względne przyspieszenie dodatnie. Weryfikacja ta została szeroko opisana w rozdziale 7 niniejszej pracy.

Wszystkie trasy badawcze miały swój początek na terenie Politechniki Poznańskiej, co ułatwiało proces pomiarowy i związane z nim kwestie techniczne. Ze względu na różnice wynika-

jące z odmiennych chwilowych warunków drogowych np. sygnalizacji świetlnej, w tabeli 5.3 przedstawiono wartości średnie parametrów charakteryzujących trasy badawcze.

Tabela 5.3. Zestawienie charakterystyk tras badawczych

Parametr	Trasa A	Trasa B	Trasa C
Średnia prędkość [km/h]	19,9	33,9	29,5
Średnia długość [km]	7,4	13,7	24
Średni czas przejazdu [s]	1373	1454	2938
Udział cyklu miejskiego [%]	~ 100	~ 100	~ 50
Udział cyklu pozamiejskiego [%]	-	-	~ 50
Liczba sygnalizacji świetlnej [szt.]	17	15	43

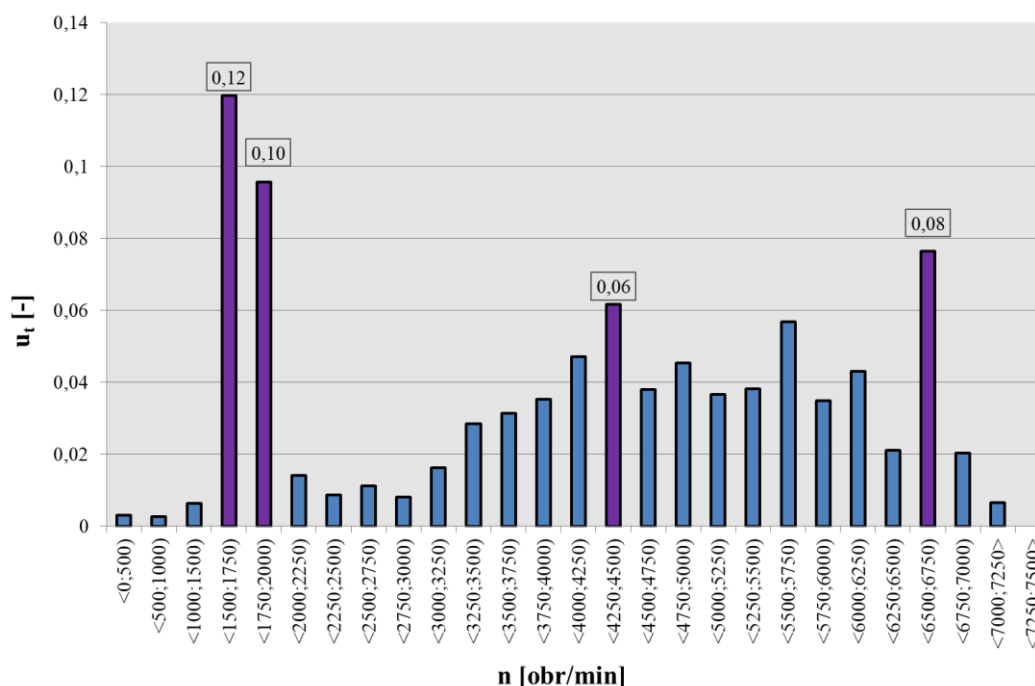
5.2. Badania jakościowe

5.2.1. Wstęp do badań jakościowych

Obecnie istotna jest interdyscyplinarność badań naukowych, co umożliwi wieloaspektowe podejście do wybranego zagadnienia. W związku z tym, identyfikację związków toksycznych z miejskich pojazdów jednośladowych w rzeczywistych warunkach eksploatacji rozszerzono dodatkowo o jakościową analizę chemiczną. Z uwagi na fakt, iż niektóre półlotne związki organiczne emitowane z pojazdów silnikowych (tj. WWA – *Wielopierścieniowe Węglowodory Aromatyczne*) odgrywają znaczącą rolę w tworzeniu się smogu fotochemicznego i wtórnego aerozolu organicznego, istnieje potrzeba zrozumienia źródeł i losów tych związków w atmosferze. Analizy tego typu wymagają od badaczy optymalizacji poboru próbek, jak i określenia odpowiedniej metody analitycznej. Przegląd literaturowy wykazał, że naukowcy wykorzystują w tym celu szereg dostępnych sposobów poboru materiału badawczego i metod chromatograficznych tj. GC-MS [23, 45, 61, 65, 112, 132, 133, 140, 142], LC-MS [53] TD-GC-MS [17] z poborem próbki na rurki sorbentowe [5, 142], całego powietrza lub surowych spalin do worków tedlarowych [44, 63, 65, 68, 93, 127, 128], mikroekstrakcję do fazy stałej [49] czy metodę jonizacji płomieniowej [18, 19, 79]. W pracach innych ośrodków naukowych [127, 128] dokonano poboru lotnych związków organicznych z pojazdów jednośladowych do zestawu worków tedlarowych podczas przejazdu w rzeczywistych warunkach eksploatacji.

5.2.2. Pobór i przygotowanie próbek pomiarowych

Badania wykonane w rzeczywistych warunkach eksploatacji miejskich pojazdów jednośladowych pozwoliły na wyznaczenie najczęściej wykorzystywanych (w ujęciu czasowym) punktów pracy silnika. W punktach tych dokonano poboru próbek gazowych do dalszej analizy chromatograficznej. Na podstawie wykreślonej charakterystyki uśrednionych wyników dla wszystkich obiektów badawczych można zauważyć, że pojazdy pracowały najczęściej w okolicach biegu jałowego. Udział czasu pracy w tym obszarze wyniósł średnio 22% (rys. 5.9). Dwa kolejne najczęściej wykorzystywane przez pojazdy punkty pracy silnika w trakcie testów badawczych to przedziały prędkości z zakresów (4250 obr/min; 4500 obr/min) oraz (6500– 6750 obr/min). Silniki pojazdów pracowały w tych punktach średnio przez 6 i 8% czasu trwania całego testu.



Rys. 5.9. Charakterystyka udziału czasu pracy trzech miejskich pojazdów jednośladowych w rzeczywistych warunkach eksploatacji

Znaczące obszary, uzyskane podczas badań pojazdów w rzeczywistych warunkach eksploatacji, pozwoliły na wyznaczenie punktów pracy silnika obiektu badawczego, podczas których dokonano poboru gazowej próbki spalin w warunkach laboratoryjnych. Próbki gazów pobrano z miejskiego pojazdu jednośladowego, należącego do grupy przebadanych pojazdów opisanych w niniejszej dysertacji, określany w niej jako pojazd 1.

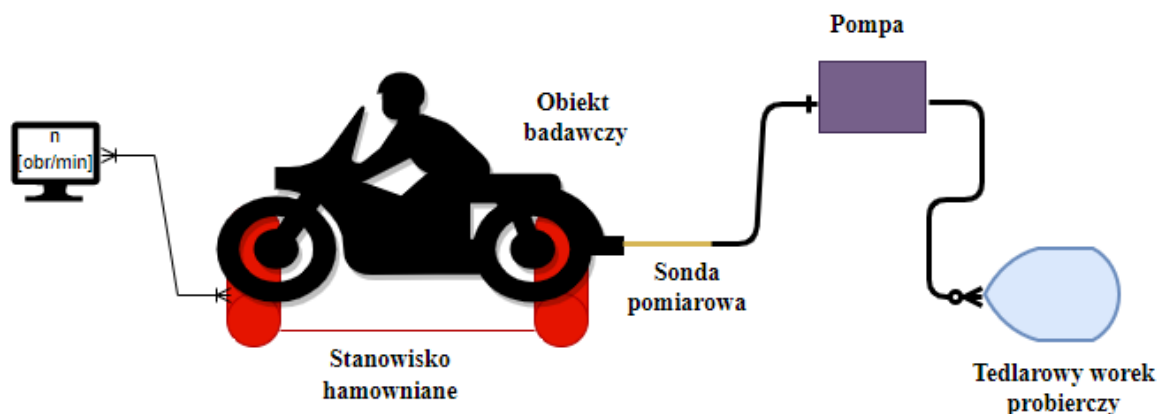
W procesie badawczym dokonano poboru próbek gazów spalinowych do tedlarowych worków próbiecznych. Badania motoroweru przeprowadzono na podwoziowym stanowisku hamownianym z pojedynczą rolką hamulcową, przeznaczonym do badań pojazdów dwukołowych. Stanowisko testowe dla motocykli DYNomite zostało wyprodukowane przez firmę LAND&Sea. Urządzenie może rejestrować parametry eksploatacyjne pojazdu (chwilowa moc, moment obrotowy, prędkość, przyspieszenie) oraz przebytą odległość. Dane techniczne stanowiska hamownianego zostały przedstawione w tabeli 5.4.

Tabela 5.4. Dane techniczne hamowni podwoziowej [144]

Parametr techniczny	Wartość
Rodzaj siłomierza	bezwładnościowy
Maksymalna odbierana moc [kW]	59
Maksymalna odbierana prędkość [km/h]	180
Wymiary: długość / szerokość / wysokość [mm]	1900 / 800 / 4200
Masa własna [kg]	450
Oprogramowanie	INERTIAL 3.0

Próbki lotnych związków organicznych pobierano do specjalnych worków próbiecznych, po dwa dla każdego punktu pracy silnika, celem uśrednienia wyników późniejszej analizy

chromatograficznej. W pierwszej kolejności próbki z miejskiego pojazdu jednośladowego pobrano podczas pracy na biegu jałowym dla różnego stopnia rozgrzania silnika: zimnego oraz gorącego. Kolejną próbkę otrzymano podczas poboru gazów spalinowych dla pracy silnika przy prędkości z drugiego obszaru znaczącego (4250 obr/min; 4500 obr/min), a ostatnią pobrano przy prędkości obrotowej wału korbowego z zakresu (6500 obr/min; 6750 obr/min). Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 5.10.



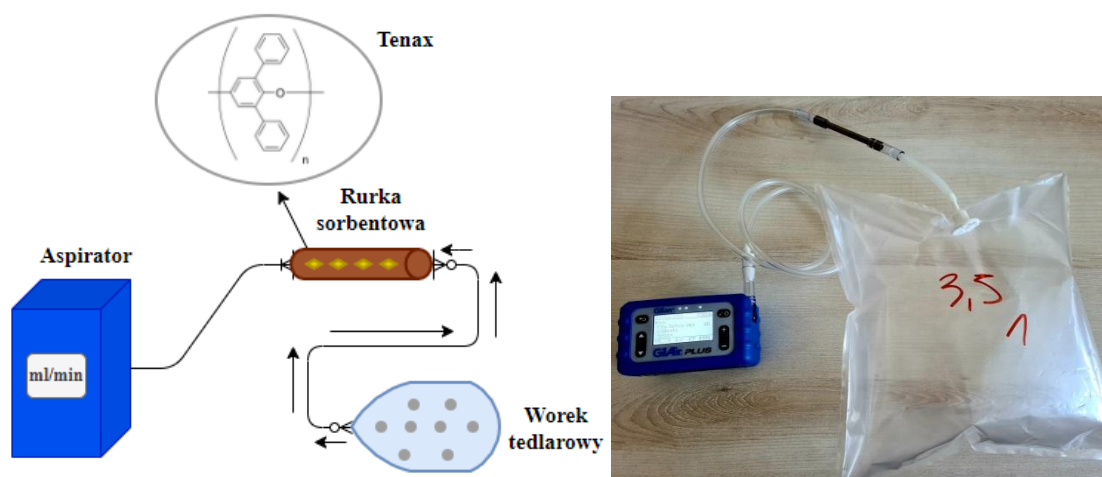
Rys. 5.10. Schemat stanowiska pomiarowego do poboru próbek spalin

Kolejny etap przygotowania próbek do analizy chemicznej stanowił odzysk materiału badawczego, który polegał na poborze spalin z worków probierczych na sorbent w postaci Tenaxu. W tym celu wykorzystano aspirator, a wartość przepływu spalin ustalono na 20 ml/min. W tabeli 5.5 przedstawiono dane techniczne wykorzystanego aspiratora. W związku z tym, iż lotne związki organiczne zawarte w gazach spalinowych są światłoczułe, próbki przechowywano w brązowych butelkach celem minimalizacji fotolitycznego rozkładu. Wypełnienie sorbcyjne – Tenax znajdowało się zatem w miedzianej rurce sorbentowej.

Porowate polimery Tenax, oparte na tlenku 2,6-difenylo-p-fenylenu, są szeroko stosowane jako adsorbent zarówno w zastosowaniach do zbierania powietrza, jak i do przedmuchiwania. Jego unikalna struktura zapewnia alternatywne i pożądane właściwości adsorpcji/desorpcji w porównaniu z innymi porowatymi polimerami [145]. Poli(tlenek 2,6 –difenylofenylen) charakteryzuje się niskim stopniem przeciekania, niskim poziomem zanieczyszczeń oraz wysoką stabilnością termiczną do 350°C. Na rysunku 5.11 przedstawiono schemat procesu poboru spalin na powierzchnię Tenaxu.

Tabela 5.5. Dane techniczne zastosowanego aspiratora [143]

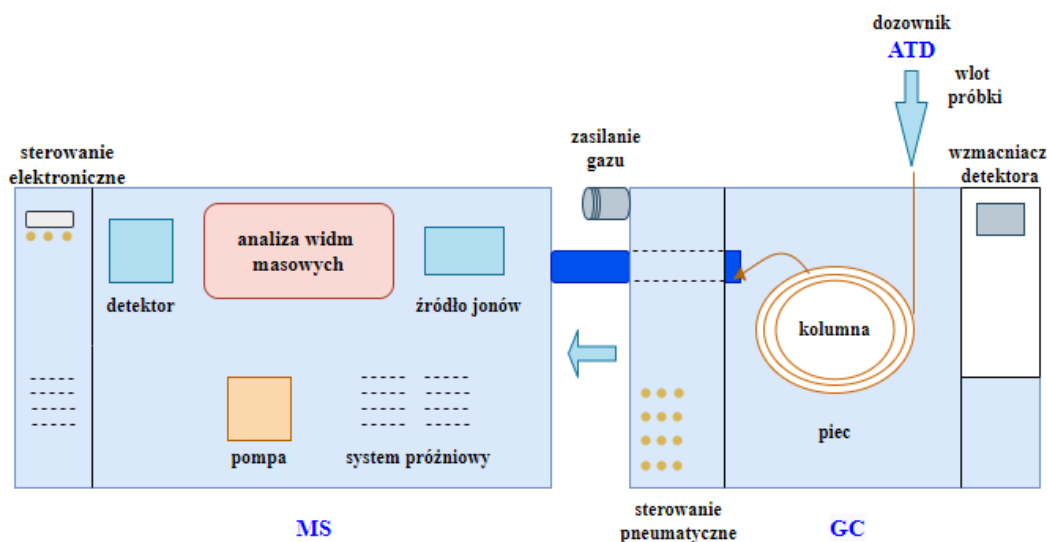
Parametr techniczny	Wartość
Zakres przepływu [ml/min]	20–500
Stabilizacja przepływu [%]	± 5
Czas ciągłej pracy [h]	minimum 8
Masa [g]	580
Temperatura pracy [°C]	0–45



Rys. 5.11. Schemat poboru próbki na powierzchnię Tenaxu

5.2.3. Aparatura pomiarowa

Analizę jakościową składników wydzielonych przy użyciu kolumny kapilarnej o średnicy 0,25 mm przeprowadzono i zidentyfikowano metodą chromatografii gazowej (GC – *Gas Chromatography*) z desorpcją termiczną (TD – *Thermal Desorption*) sprzężoną ze spektrometrią mas (MS – *Mass Spectrometry*). Technika TD-GC-MS umożliwia ustalenie składu mieszanin, w których występuje nawet kilkaset związków chemicznych. Ze względu na swoją uniwersalność znajduje szerokie zastosowanie m. in w rolnictwie czy farmaceutyce. Schemat pomiarowy, wykorzystujący technikę TD-GC-MS przedstawiono na rysunku 5.12.

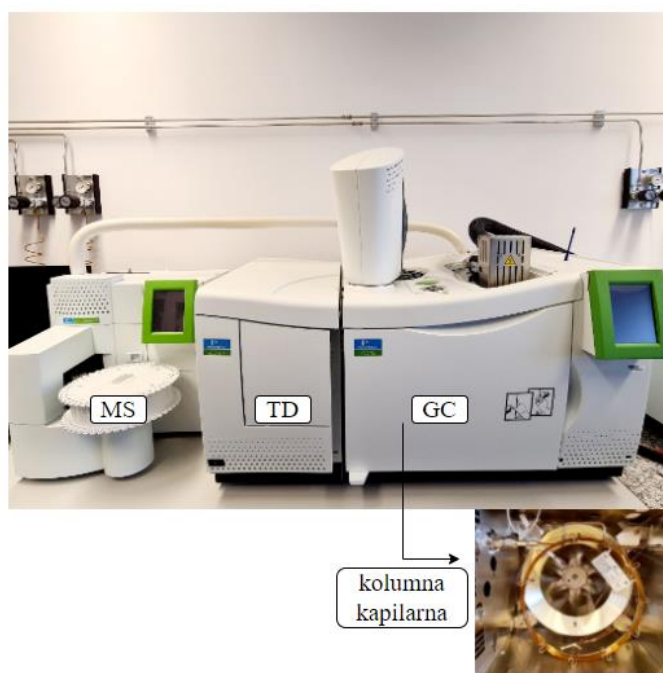


Rys. 5.12. Schemat techniki pomiarowej ATD-GC-MS

Wykorzystany w badaniach chromatograf gazowy Clarus 690 pozwala na stosunkowo szybką i dokładną analizę złożonych substancji, które mają postać gazów lub par. Metoda analizy chromatograficznej gazu wieloskładnikowego polega na rozdzieleniu mieszaniny na poszczególne składniki chemiczne poprzez ich migrowanie między fazą ruchomą i fazą stacjonarną w kolumnie rozdzielczej, a następnie na pomiarach zawartości każdego z tych składników

w gazie nośnym na wylocie z kolumny rozdzielczej. Proces rozdzielczy w układzie chromatograficznym odbywa się na dwie fazy – fazę mobilną (gaz nośny) i fazę stacjonarną (kolumna pakowana ciekłą powłoką lub odpowiednim materiałem). Komponenty rozdzielane są w procesie termicznym oraz na podstawie różnic w powinowactwie do fazy danego komponentu. Technika chromatografii gazowej dokonuje identyfikacji poszczególnych składników na podstawie lokalizacji pików chromatograficznych odpowiadających konkretnym substancjom i poprzez określenie ich czasów retencji. Wykorzystane urządzenie cechuje się szybkością grzania równą 160°C/min, natomiast chłodzenie z 450°C do 50°C trwa poniżej 2 minut. Zakres temperatury pieca chromatografu wynosi –99–450°C. Wszystkie funkcje czasu i temperatury są sterowane za pomocą mikroprocesora.

Ostateczną analizę jakościową próbek gazów wylotowych przeprowadzono poprzez jednoznaczną identyfikację poszczególnych składników za pomocą widm masowych analizowanej próbki. Do tego celu posłużył spektrometr masowy Clarus SQ8, pełniący rolę detektora. Główną zaletą tego detektora jest to, że umożliwia identyfikację związków na podstawie stosunków masy do ładunku (m/z) oraz względnych ilości jonów cząsteczkowych i fragmentarycznych, wynikających z jonizacji elektronowej. Zatem identyfikację związku można zasugerować poprzez analizę widma MS i porównanie go z komercyjną biblioteką MS. Urządzenie wykorzystuje zaawansowane technologie, dzięki którym cechuje się dużą czułością i stabilnością zarówno w przypadku analiz wymagających samej identyfikacji, jak również przy ocenie ilościowej. Szybkość zbierania danych umożliwia rejestrację dużej liczby widm w zakresie mas 1–1200 amu, co pozwala na jednoznaczną identyfikację i określanie zawartości składników na podstawie wyjątkowo wąskich pików chromatograficznych. Próbki dozowano za pomocą desorbera termicznego TurboMatrix 350 ATD z automatyczną pneumatyką i podajnikiem na 50 rurek sorbcyjnych (rys. 5.13). W zastosowanej metodzie niezwykle istotne jest duża częstotliwość wykonywania pomiarów.

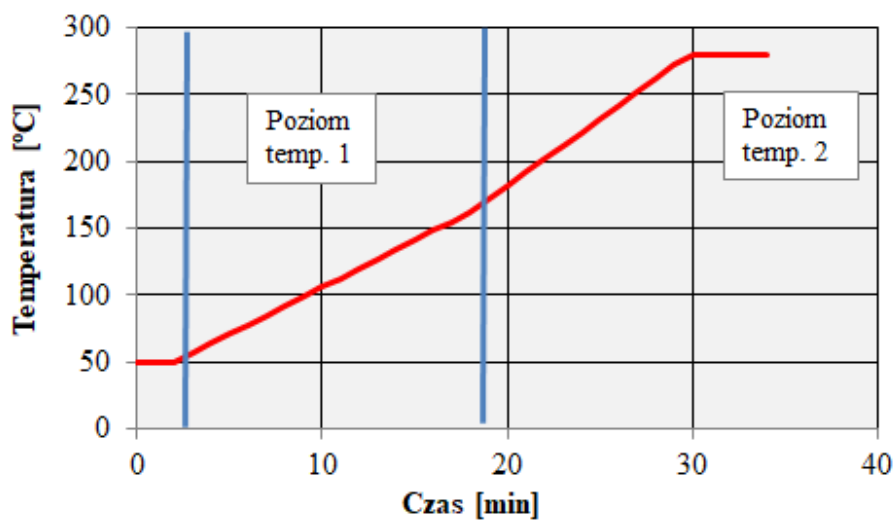


Rys. 5.13. Widok aparatury badawczej

5.2.4. Warunki analizy chromatograficznej

Analizę jakościową pobranych próbek z miejskiego pojazdu jednośladowego wykonano przy przepływie gazów 30 ml/min i temperaturze dozownika równej 270 °C. Czas eksperymentu dla każdej z próbek został ustalony na 34 minuty, a program temperaturowy pieca i kolumny został zdefiniowany następująco:

- temperatura początkowa: 50°C, utrzymywana przez 2 minuty,
- poziom temperaturowy 1: 7°C/min do osiągnięcia temperatury 160°C,
- poziom temperaturowy 2: 10°C/min do osiągnięcia temperatury 280 °C, utrzymywana przez 4.29 minuty (rys. 5.14).



Rys. 5.14. Program temperaturowy pieca i kolumny

6. Analiza emisji związków toksycznych w rzeczywistych warunkach eksploatacji z miejskich pojazdów jednośladowych

6.1. Wstęp do analizy badań

Zrealizowane badania w warunkach drogowych umożliwiły zebranie danych nt. rzeczywistych parametrów eksploatacji miejskich pojazdów jednośladowych i ich silników. Przeprowadzenie szczegółowych analiz parametrów ruchu i pracy ich układów napędowych jest niezbędne do dalszych rozważań dotyczących oceny wskaźników ekologicznych rozpatrywanej grupy pojazdów oraz oceny powiązań między nimi. Rozdział ten stanowi główną część dysertacji, zawiera bowiem szereg analiz, będących wynikiem badań empirycznych. Szczególnie istotne jest porównanie parametrów ruchu przebadanych pojazdów w rzeczywistych warunkach drogowych z parametrami określonymi przez obecnie obowiązujące testy homologacyjne. W tym celu wykonano:

- analizę porównawczą charakterystyk gęstości czasowej w przedziałach prędkości pojazdu i przyspieszenia,
- analizę różnic w udziałach czasu eksploatacji obiektów badawczych na trasach pomiarowych w odniesieniu do obowiązujących testów homologacyjnych,
- analizę porównawczą przebiegów prędkości obiektów badawczych na trasach pomiarowych w funkcji czasu w odniesieniu do przebiegów prędkości w testach homologacyjnych.

Zrealizowane rozważania na temat parametrów ruchu przebadanej grupy pojazdów umożliwiły dokonanie szczegółowych analiz ich wpływu na emisję związków toksycznych. W tym celu wyznaczono trójwymiarowe charakterystyki natężenia emisji poszczególnych związków dla konkretnych przedziałów prędkości oraz przyspieszeń pojazdów, które określone zostały w podrozdziale dotyczącym analizy parametrów eksploatacyjnych. Dodatkowo w zakresie analizy wskaźników ekologicznych przedstawiono przebiegi natężenia emisji związków szkodliwych, które uzupełniono krzywymi opisującymi zamiany prędkości i przyspieszeń pojazdów oraz prędkości obrotowej wału korbowego. Analizy te przeprowadzono dla wszystkich tras i obiektów badawczych. Podsumowanie stanowi zestawienie wartości całkowitej emisji drogowej poszczególnych związków toksycznych z wartościami dopuszczalnymi, określonymi na podstawie testów homologacyjnych, dla odpowiednich norm emisji spalin. Rozważania uzupełnia analiza chromatograficzna składu chemicznego spalin.

Treści zawarte w niniejszym rozdziale przyczyniły się w bezpośredni sposób do realizacji pierwszego celu pracy tj. identyfikacji emisji związków toksycznych spalin (z uwzględnieniem analizy jakościowej lotnych związków organicznych) i parametrów pracy silników w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Pośrednio przyczyniły się także do realizacji drugiego celu pracy tj. propozycji autorskiej procedury badawczej dla miejskich pojazdów jednośladowych w rzeczywistych warunkach eksploatacji, odpowiadającego lokalnym warunkom drogowym (aglomeracja poznańska). Jednakże mogą one stanowić bazę do skonstruowania ustandaryzowanej i globalnej procedury do pomiaru związków toksycznych z miejskich pojazdów jednośladowych w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Propozycja ta została szczegółowo opisana w rozdziale 7.

6.2. Analiza parametrów eksploatacyjnych

Badania pojazdów w rzeczywistych warunkach eksploatacji umożliwiają uzyskanie wielu wyników w zakresie zarówno parametrów jezdnych obiektu, jak i wskaźników emisyjnych. W celu uzyskania ich rzetelnej analizy, konieczne jest zastosowanie narzędzi matematycznych, pozwalających wyznaczyć wzajemne zależności pomiędzy zbiorami poszczególnych wartości. W pierwszym etapie, na podstawie zebranych danych, sporządzono charakterystyki gęstości czasowej eksploatacji pojazdów jednośladowych. Charakterystyki te stanowią graficzne przedstawienie udziału czasu pracy (w odniesieniu do czasu trwania całego testu) dla przedziałów konkretnych parametrów pracy pojazdu lub silnika. Charakterystyki gęstości czasowej u_t (*udział czasowy*) są wykorzystywane w pracach konstrukcyjno- optymalizacyjnych silników spalinowych i całych układów napędowych, a nawet pojazdów. Opierając się na jej założeniach, możliwe jest określenie udziałów czasu eksploatacji oraz emisji związków szkodliwych w przedziałach prędkości i przyspieszenia pojazdu w określonym cyklu pomiarowym. Przy jej zastosowaniu możliwe jest wyrażenie wymienionych wartości w funkcji innych parametrów, np. prędkości obrotowej wału korbowego i obciążenia. Warunki eksploatacji analizowanej grupy pojazdów mieszczą się w pewnym zakresie określonym przez możliwości trakcyjne ich układów napędowych. Dzięki temu, uwzględniając czas eksploatacji obiektu, możliwe jest scharakteryzowanie parametrów jego ruchu przez użycie funkcji o współrzędnych a i v . W tym celu konieczne jest rejestrowanie danych z systemu diagnostycznego pojazdu lub systemu GPS. W ten sposób określa się:

$$v = v(t) \text{ oraz } a = a(t) \text{ dla } t \in (0, t_c) \quad (6.1)$$

gdzie: t_c – czas trwania cyklu pomiarowego

Do wyznaczenia charakterystyki gęstości czasowej konieczne jest podzielenie pola eksploatacji pojazdu we współrzędnych v - A (rys. 6.1). Do tego celu przyjmuje się:

$$\Delta v = \frac{v_{\max} - v_{\min}}{V} \quad (6.2)$$

$$\Delta a = \frac{a_{\max} - a_{\min}}{A} \quad (6.3)$$

gdzie: V i A – liczba elementarnych obszarów na polu eksploatacji pojazdu.

Definiowanie gęstości czasu eksploatacji dla pojedynczego obszaru w kierunkach k, p definiuje się przez zapis:

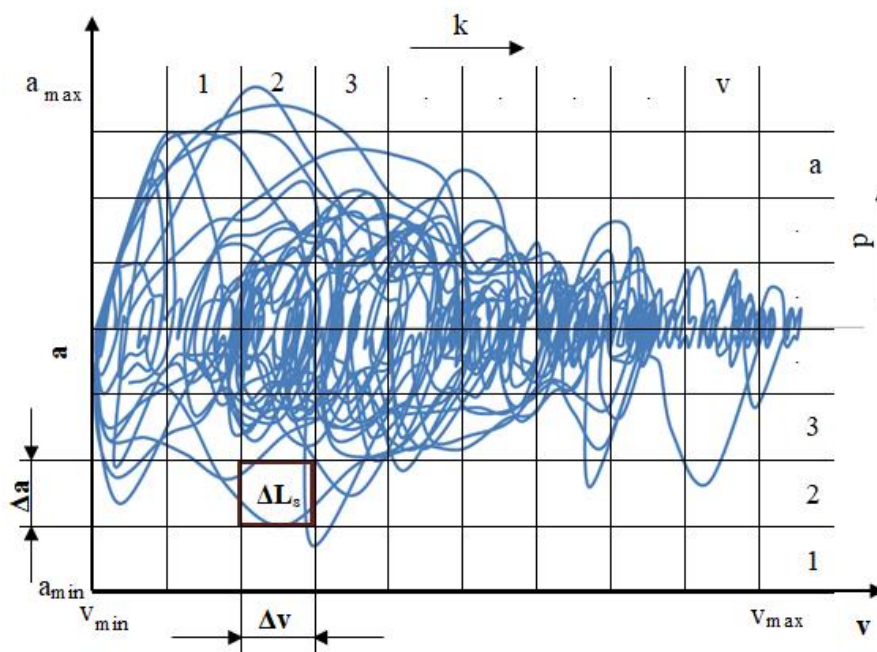
$$u_{t_{k,p}} = \frac{t_{k,p}}{t_c} \quad (6.4)$$

gdzie: $t_{(k,p)}$ – czas ruchu pojazdu, w którym V oraz s znajdują się w polu $\Delta L_{s(k,p)}$.

Prawidłowe określenie charakterystyki wymaga spełnienia dwóch warunków:

$$\sum_{k=1}^V \sum_{p=1}^A t_{(k,p)} = t_{(c)} \quad (6.5)$$

$$\sum_{k=1}^V \sum_{p=1}^A ut_{(k,p)} = 1 \quad (6.6)$$



Rys. 6.1. Podział obszaru pola ruchu pojazdu w teście

Biorąc pod uwagę budowę charakterystyki gęstości czasowej, można stwierdzić, że w jej zapisie zawarty jest sposób eksploatacji obiektu, który podczas rzeczywistej eksploatacji ma charakter losowy. Prawdopodobieństwo uzyskania parametrów v i a w polu $\Delta L_{s(k,p)}$ określa wzór:

$$f_{(k,p)} = P\{(v, a) \in \Delta L_{s(k,p)}\} = \int_{L_{s(k,p)}} f(v, a) dv da \quad (6.7)$$

gdzie : k, p opisują oś odciętych i rzędnych.

Zależność między przedstawionym prawdopodobieństwem, a gęstością losowego wystąpienia warunków to:

$$\lim_{t_c \rightarrow \infty} ut_{(k,p)} = f_{(k,p)} \quad (6.8)$$

Dla typowych testów w rzeczywistej eksploatacji, trwających co najmniej kilkadziesiąt minut, przyjmuje się:

$$ut_{(k,p)} \approx f_{(k,p)} \quad (6.9)$$

Dla pola oznaczonego $\Delta L_{s(k,p)}$ wielkość charakterystyczną stanowi jego środek, zdefiniowany w rozprawie jako średnia arytmetyczna początku i końca zakresów prędkości oraz przyspie-

szenia. Dla danego testu możliwe jest wyznaczenie zbiorów różnego rodzaju danych dla współrzędnych v - a . Odnosząc się do zagadnień poruszanych w dysertacji, uwzględniono w tym zakresie emisję zanieczyszczeń. Przypisanie jej konkretnych wartości do środka elementarnego pola $\Delta L_{s(k,p)}$ pozwala budować macierze, umożliwiające wyznaczanie np. całkowitej emisji drogowej poszczególnych związków szkodliwych dla całego przeprowadzonego testu badawczego lub jego fragmentów.

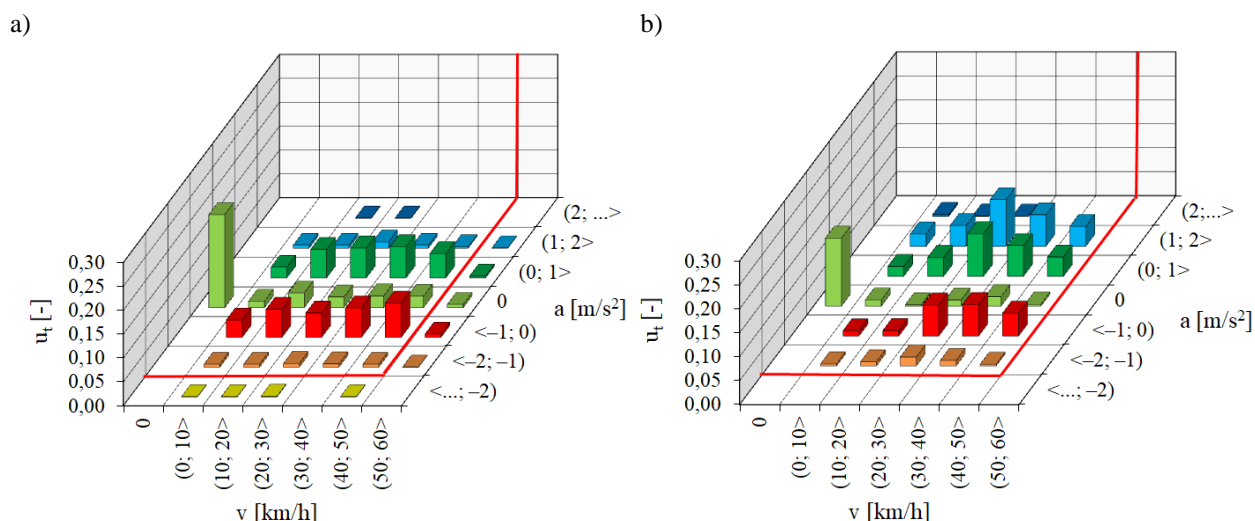
Uwzględniając warunki eksploatacji badanej grupy pojazdów, w rozprawie przyjęto pewne założenia podczas wyznaczania charakterystyk udziałów czasu eksploatacji i natężenia emisji zanieczyszczeń we współrzędnych v - a . Dla analizowanych testów pomiarowych stosowano zawsze taki sam całkowity zakres rozpatrywanych przyspieszeń. Dla prędkości pojazdu natomiast liczba przedziałów definiowana była w zależności od prędkości maksymalnej obiektu. Istotnym założeniem było zastosowanie dla przyjętych zakresów przedziałów jednostronnie domkniętych. Pozwoliło to uzyskać większą dokładność dla wykonywanych analiz i poprawiło czytelność uzyskanych wykresów. Dodatkowo w analizie warunków eksploatacji i emisji zanieczyszczeń uwzględniono postój – prędkość i przyspieszenie równe 0. Jest to ważne ze względu na specyfikę testów realizowanych w ruchu miejskim. Wykorzystano to do oceny rzeczywistego udziału tego zakresu, pomimo niespełnienia równań (6.5) i (6.6). Wykorzystanie przywołanego narzędzia matematycznego wraz z przyjętymi założeniami pozwoliło przeprowadzić porównania, wskazać różnice, a także wykonać pełne analizy wskaźników ekologicznych dla uzyskanych wyników badań pojazdów.

6.3. Analiza parametrów ruchu w aspekcie obowiązujących testów homologacyjnych

Zebrane w rzeczywistych warunkach eksploatacji dane, dotyczące prędkości pojazdu i jego przyspieszeń, odniesiono do wytycznych testów homologacyjnych WMTC. Analizę porównawczą wykonano za pomocą opisanych wcześniej charakterystyk gęstości czasowej. Wyznaczono zatem udziały czasu eksploatacji pojazdów w odniesieniu do przedziałów prędkości i przyspieszenia (z uwzględnieniem postoju) dla konkretnych przypadków relacji pojazd – trasa pomiarowa. Podczas badań wszystkie pojazdy eksploatowane były zgodnie z ich przeznaczeniem, a więc wykonywano przejazdy po rzeczywistych drogach w aglomeracji poznańskiej.

W pierwszej kolejności przeprowadzono rozważania dotyczące pojazdów wyposażonych w silniki o objętości skokowej do 50 cm^3 , określanych w pracy jako pojazd 1 i pojazd 2, dla poszczególnych tras pomiarowych w aspekcie obowiązującego testu WMTC. Ze względu na ograniczenia konstrukcyjne (maksymalna możliwa prędkość poruszania się pojazdów) jako odniesienie zastosowano test badawczy WMTC etap 3 odpowiedni do pojazdów (pod-)kategorii L1e-B, L2e, L6e-A oraz L6e-B.

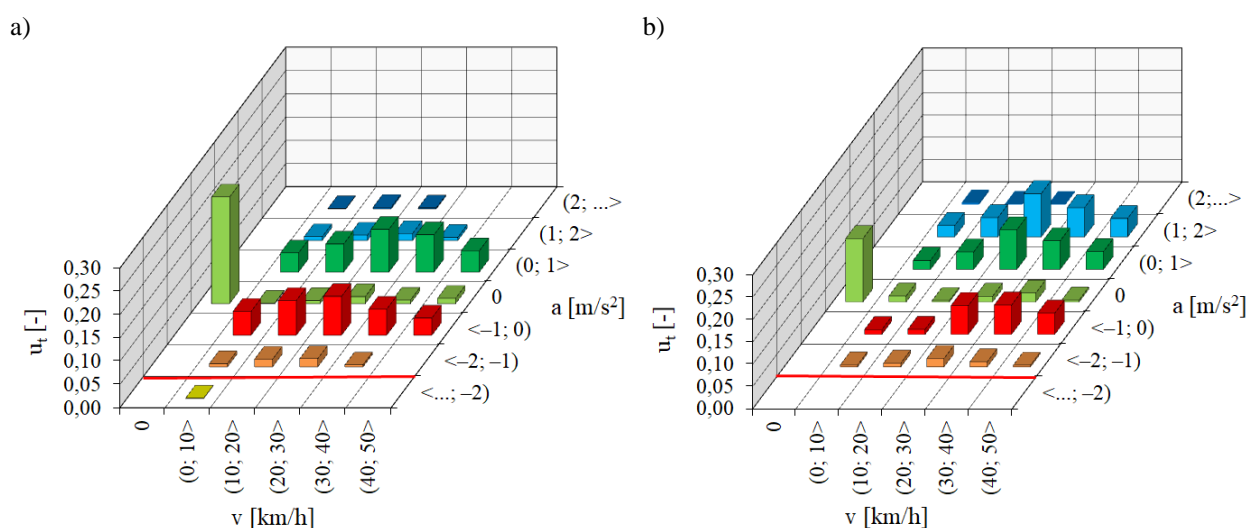
W przypadku badań w rzeczywistych warunkach eksploatacji dla relacji pojazd – trasa A odnotowano wartości udziałów czasu eksploatacji dla prędkości z zakresu $\langle 0 \text{ km/h}; 60 \text{ km/h} \rangle$, podczas gdy dla testu homologacyjnego wyznaczono wartości z przedziału $\langle 0 \text{ km/h}; 50 \text{ km/h} \rangle$ (rys. 6.2). Wynika to z chwilowej zmiany ukształtowania terenu na tej trasie, co umożliwiło „jazdę wybiegiem”. W związku z tym udział czasu eksploatacji w przedziale prędkości $\langle 50 \text{ km/h}; 60 \text{ km/h} \rangle$ w całym zakresie przyspieszeń pojazdu wyniósł zaledwie 2,01%.



Rys. 6.2. Udziały czasu eksploatacji w przedziałach prędkości i przyspieszenia a) trasa A; pojazd 1, b) test WMTC

Największy udział dla badań w rzeczywistych warunkach eksploatacji zarejestrowano podczas postoju pojazdu, a jego wartość wyniosła 19,50%. Udział czasu w tym punkcie eksploatacji pojazdu w teście WMTC wynosi natomiast tylko 14,20%. Analizując obszar zmienności parametrów eksploatacyjnych wspólny dla obu testów (ograniczony czerwoną linią ciągłą), udział czasowy w zakresie prędkości $\langle 0 \text{ km/h}; 50 \text{ km/h} \rangle$ i w przedziałach przyspieszeń $(0 \text{ m/s}^2; 1 \text{ m/s}^2)$ oraz $(1 \text{ m/s}^2; 2 \text{ m/s}^2)$ stanowił 31,55%, a dla parametrów $\langle 0 \text{ km/h}; 50 \text{ km/h} \rangle$ oraz $\langle -2 \text{ m/s}^2; -1 \text{ m/s}^2 \rangle$ i $\langle -1 \text{ m/s}^2; 0 \text{ m/s}^2 \rangle$ jego sumaryczna wartość osiągnęła 32,79%. Udziały czasu eksploatacji odpowiednio dla tych samych obszarów prędkości i przyspieszeń wyniosły odpowiednio 70,03% i 24,71% w teście WMTC. Ruch ze stałą prędkością wystąpił dla 12,31% czasu całego przejazdu na trasie pomiarowej A, podczas gdy w teście WMTC wartość ta stanowi 5,32%.

Dla przejazdu pojazdu nr 2 na trasie pomiarowej A odnotowano, że obiekt badawczy pracował, w odniesieniu do testu WMTC, praktycznie w tym samym obszarze zmienności parametrów jezdnych (rys. 6.3).



Rys. 6.3. Udziały czasu eksploatacji w przedziałach prędkości i przyspieszenia a) trasa A; pojazd 2, b) test WMTC

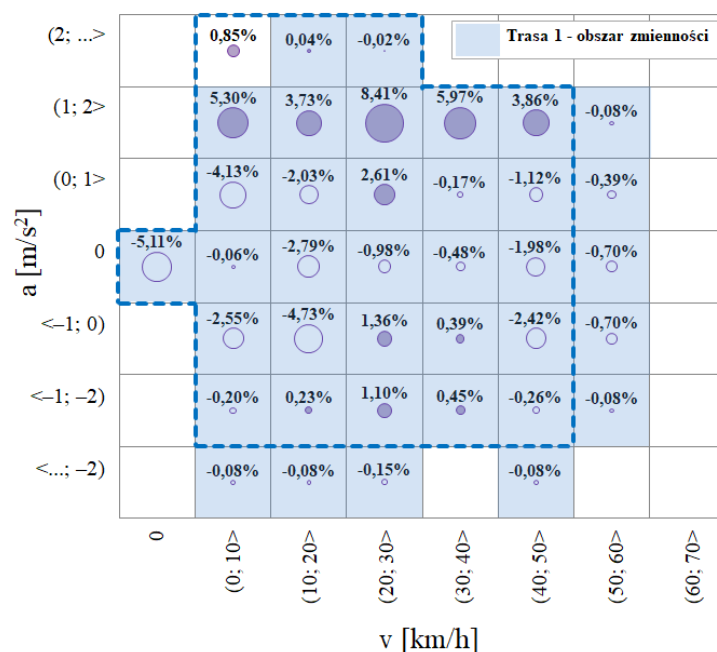
Podobnie jak w przypadku pojazdu 1, największy udział czasu eksploatacji dla rozpatrywanego obiektu wystąpił podczas postoju i stanowił 22,95%. W teście WMTC wynosi on 14,20%. Udział czasowy w zakresie prędkości $\langle 0 \text{ km/h}; 50 \text{ km/h} \rangle$ i przedziałach przyspieszeń $\langle 0 \text{ m/s}^2; 1 \text{ m/s}^2 \rangle$ oraz $\langle 1 \text{ m/s}^2; 2 \text{ m/s}^2 \rangle$ stanowił 36,10%, natomiast dla ujemnych przyspieszeń opisanych przedziałami $\langle -2 \text{ m/s}^2; -1 \text{ m/s}^2 \rangle$ oraz $\langle -1 \text{ m/s}^2; 0 \text{ m/s}^2 \rangle$ w całym zakresie prędkości pojazdu, sumaryczna wartość osiągnęła 35%. W teście WMTC dla tych samych obszarów parametrów jezdnych wartości udziału czasu eksploatacji wyniosły 70,03% i 24,71%. Ruch z prędkością stałą wystąpił dla 4,25 % czasu trwania całego przejazdu w przypadku testu w rzeczywistych warunkach eksploatacji, jest to zbliżona wartość do uzyskiwanej w teście WMTC.

Rozważania dotyczące parametrów ruchu w aspekcie obowiązujących testów homologacyjnych uzupełniono o analizy porównawcze udziału czasu eksploatacji pojazdów 1 i 2 w przedziałach prędkości i przyspieszenia, zarejestrowanych na poszczególnych trasach pomiarowych. W tym celu dokonano graficznego przedstawienia wartości różnic pomiędzy testem WMTC (odjemna) oraz testem w rzeczywistych warunkach eksploatacji (odjemnik). Każdemu pojazdowi przypisano konkretny kolor, który obrazuje obszar zmienności jego parametrów ruchu podczas rzeczywistej eksploatacji. Przerywaną linią oznaczono obszar zmienności zarejestrowany dla testu WMTC. Wielkość okręgów jest proporcjonalna do uzyskanej różnicy. Ponadto okręgi dla wartości dodatnich zostały oznaczone jako pełne (kolor fioletowy), natomiast zakres wyników ujemnych jako puste. Analiza tego typu umożliwiła wskazanie jak bardzo różnią się warunki testu homologacyjnego od badań w warunkach rzeczywistych.

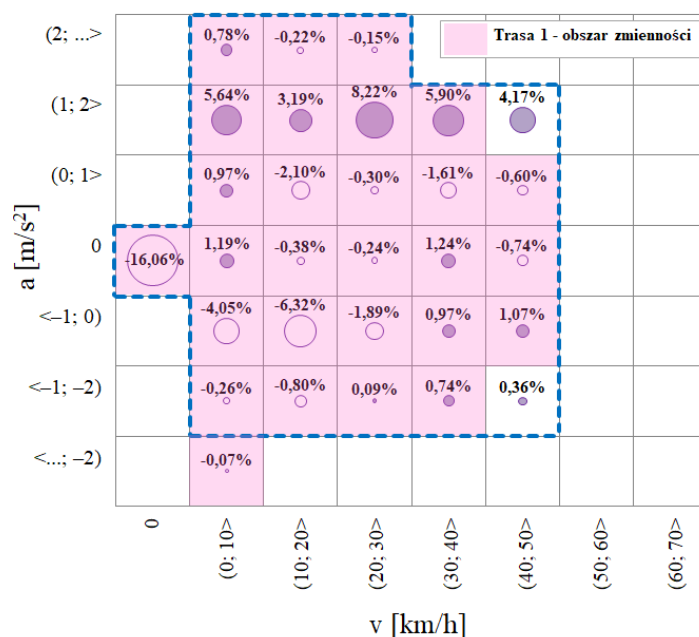
Dla relacji pojazd 1 – trasa A największą różnicę odnotowano dla przedziału średnich prędkości $\langle 20 \text{ km/h}; 30 \text{ km/h} \rangle$ oraz dodatnich przyspieszeń opisanych przedziałem wartości $\langle 1 \text{ m/s}^2; 2 \text{ m/s}^2 \rangle$ i wyniosła ona 8,41% (rys. 6.4a). Dla pojazdu 2 w tym samym polu eksploatacji odnotowano podobną różnicę, która wyniosła 8,22% (rys. 6.4b).

Jednak największą różnicę między przejazdem na trasie pomiarowej A przez pojazd 2 w odniesieniu do testu homologacyjnego, zarejestrowano dla postoju, a jej wartość wyniosła -16,06% oraz -5,11% dla pojazdu 1. Istotne rozbieżności wystąpiły również w zakresie prędkości $\langle 0 \text{ km/h}; 50 \text{ km/h} \rangle$ dla przyspieszeń z przedziału $\langle 1 \text{ m/s}^2; 2 \text{ m/s}^2 \rangle$, których wartości wyniosły od 3,73% do 8,41% oraz od 3,19% do 8,22% odpowiednio dla pojazdów 1 i 2. Co więcej przejazdy w rzeczywistych warunkach eksploatacji charakteryzowały się znacząco większym udziałem w przedziale ujemnych przyspieszeń $\langle -1 \text{ m/s}^2; 0 \text{ m/s}^2 \rangle$ i prędkości z zakresu $\langle 0 \text{ km/h}; 20 \text{ km/h} \rangle$, a różnice w odniesieniu do testu WMTC, wyniosły od -2,55% do -6,32%. Porównując między sobą charakterystyki dla pojazdu 1 i 2 obserwuje się podobny rozkład wartości różnic w całym zakresie obszaru zmienności parametrów ruchu. Podczas badań pojazdu 1 uzyskano obszar zmienności większy o 8 pól pomiarowych, dla których jednak średnia wartość różnicy wyniosła -0,23%.

a)



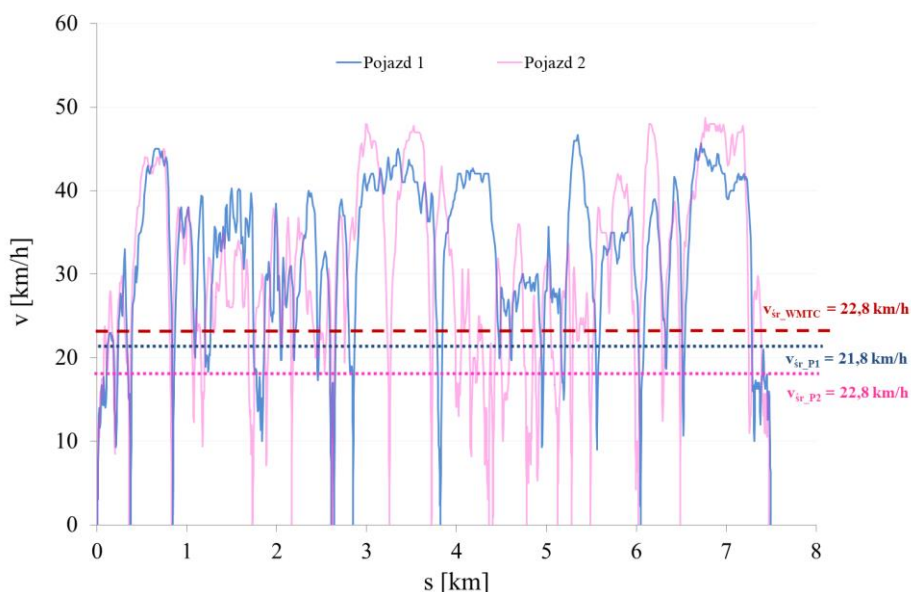
b)



Rys. 6.4. Różnica udziałów czasu eksploatacji podczas pomiarów dla trasy badawczej A oraz w teście WMTC w przedziałach prędkości i przyspieszenia: a) Pojazd 1, b) Pojazd 2

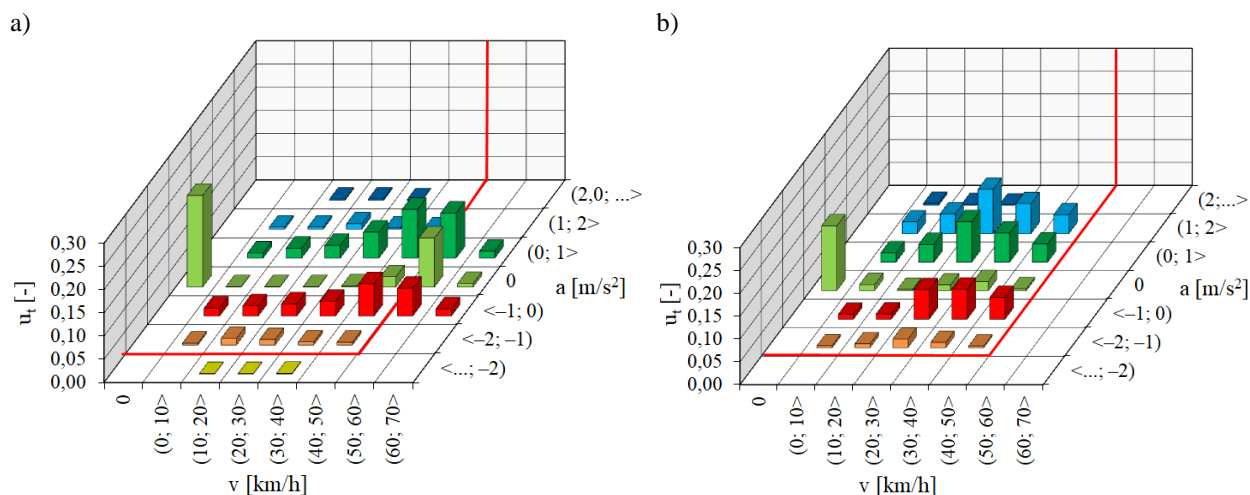
Dane zebrane w rzeczywistych warunkach eksploatacji obu pojazdów na trasie pomiarowej A pozwoliły na wykreślenie profili prędkości w funkcji przebytego dystansu, porównania tych przebiegów między sobą oraz wyznaczenia ich średnich wartości. Pojazdy poruszały się średnio z prędkościami 21,8 km/h (pojazd 1) oraz 18,3 km/h (pojazd 2). Uzupełnienie przedstawionej charakterystyki stanowi prosta określająca prędkość średnią dla testu laboratoryjnego WMTC – 22,8 km/h (rys. 6.5). Bardziej zbliżoną wartość średnią otrzymano zatem dla pojazdu 1, różnica pomiędzy testem WMTC a przejazdem na trasie A przez pojazd 2 wyniosła 4,5

km/h. Nie jest bowiem możliwe uzyskanie identycznych przebiegów ze względu na chwilowe warunki ruchu np. sterowanie sygnalizacją świetlną.



Rys. 6.5. Przebiegi prędkości pojazdów 1 i 2 na trasie A

Kolejnym analizowanym przypadkiem jest relacja pojazd 1 – trasa B, gdzie odnotowano większy o 2 przedziały prędkości obszar zmienności parametrów jezdnych względem testu WMTC (rys. 6.6). Udział czasu eksploatacji w tych przedziałach tj. (50 km/h; 60 km/h) oraz (60 km/h; 70 km/h) w całym zakresie przyspieszenia wyniósł aż 30,28%.

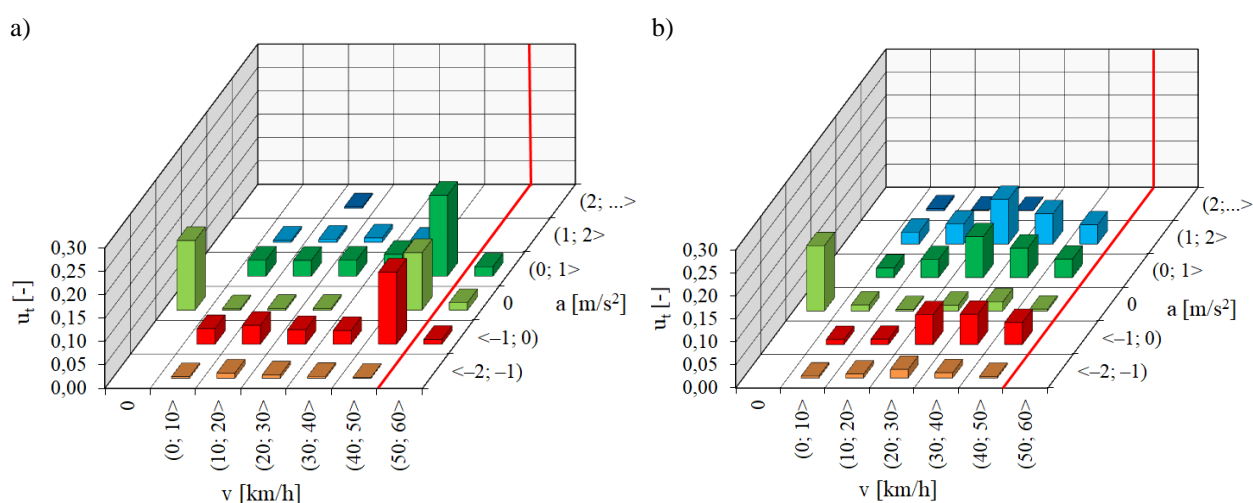


Rys. 6.6. Udziały czasu eksploatacji w przedziałach prędkości i przyspieszenia a) trasa B; pojazd 1, b) test WMTC

Wartość maksymalną udziału czasu pracy 19,86% odnotowano podczas postoju pojazdu. Dla prędkości pojazdu z zakresu $\langle 0 \text{ km/h}; 50 \text{ km/h} \rangle$ i w przedziałach przyspieszeń $\langle -2 \text{ m/s}^2; -1 \text{ m/s}^2 \rangle$ oraz $\langle -1 \text{ m/s}^2; 0 \text{ m/s}^2 \rangle$ udział czasowy osiągnął wartość 20,64%, natomiast w teście WMTC 24,71%. Dla obszaru $\langle 0 \text{ km/h}; 50 \text{ km/h} \rangle$ prędkości pojazdu oraz przyspieszenia $\langle 0 \text{ m/s}^2; 1 \text{ m/s}^2 \rangle$ i $\langle 1 \text{ m/s}^2; 2 \text{ m/s}^2 \rangle$ sumaryczna wartość osiągnęła 24,64%. W przypadku testu homologa-

cyjnego pojazd pracuje w tym obszarze z udziałem czasowym równym 70,03%. Pojazd 1 na trasie B poruszał się ze stałą prędkością przez 14,09% całkowitego czasu trwania testu badawczego.

Pojazd 2 na tej samej trasie pracował najdłużej w przedziale prędkości (40 km/h; 50 km/h) w zakresie przyspieszeń $\langle -1 \text{ m/s}^2; 1 \text{ m/s}^2 \rangle$, a sumaryczna wartość udziału czasu eksploatacji wyniosła 45,83% (rys. 6.7). W tym obszarze zarejestrowano także wartość maksymalną (17,32%) dla parametrów opisanych przedziałami (40 km/h; 50 km/h) i $\langle 0 \text{ m/s}^2; 1 \text{ m/s}^2 \rangle$, odpowiednio dla prędkości przyspieszenia pojazdu. Postój pojazdu odbywał się przez 14,91% czasu trwania całego testu badawczego. Analizując obszary dodatnich i ujemnych przyspieszeń w całym zakresie prędkości pojazdu odnotowano odpowiednio wartości 38,13% i 31,88% udziału czasu eksploatacji. Pojazd 2 na trasie B poruszał się ze stałą prędkością przez 15,04% całkowitego czasu trwania testu badawczego.



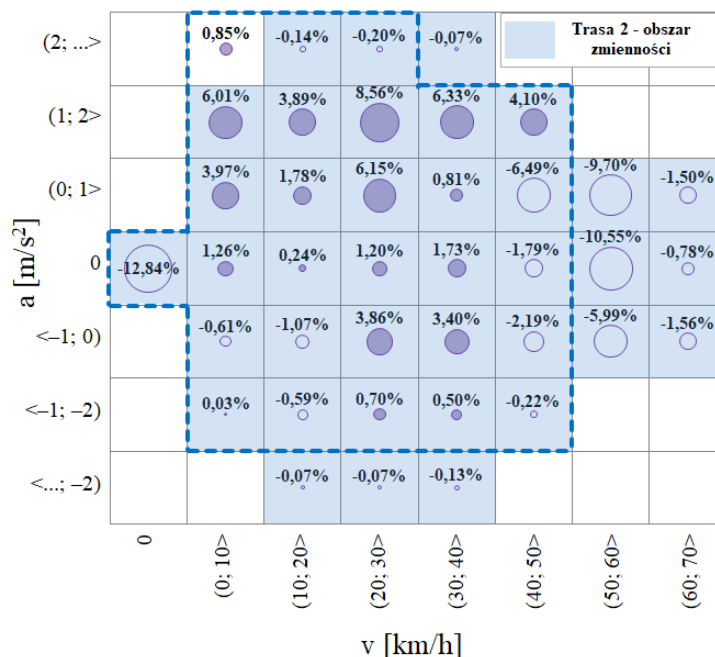
Rys. 6.7. Udziały czasu eksploatacji w przedziałach prędkości i przyspieszenia a) trasa B; pojazd 2, b) test WMTC

Analiza porównawcza udziałów czasu eksploatacji pojazdów 1 i 2 na trasie badawczej B oraz w teście homologacyjnym WMTC wykazała znacząco większe różnice niż dla przejazdu trasą A. Trasa badawcza B zawierała elementy cyklu pozamiejskiego, co spowodowało rozkład wartości udziału czasu eksploatacji na większy obszar zmienności. Różnice dla punktu opisanego parametrami $\langle 0 \text{ km/h}; 0 \text{ m/s}^2 \rangle$ tj. postoju pojazdu, wyniosły $-12,84\%$ (wartość maksymalna dla przypadku) oraz $-8,02\%$ odpowiednio dla pojazdu 1 i 2 (rys. 6.8).

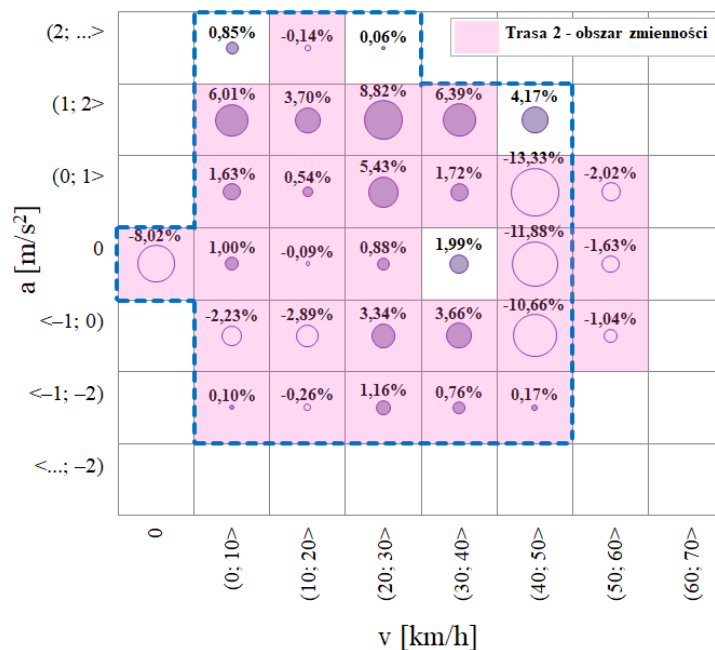
W obszarze charakterystyki różnicy udziałów czasu pracy dla pojazdu 2 w poszczególnych przedziałach parametrów ruchu największe rozbieżności (wraz z największą wartością) odnotowano dla prędkości z przedziału (40 km/h; 50 km/h) i przyspieszenia z zakresu $\langle -1 \text{ m/s}^2; 1 \text{ m/s}^2 \rangle$, których wartości wyniosły od $-10,66\%$ do $-13,33\%$. Pojazd 1 osiągnął podobne różnice w tym samym zakresie przyspieszeń, jednak dla sąsiadującego przedziału prędkości tj. (50 km/h; 60 km/h), a jej wartości wyniosły od $-5,99\%$ do $-10,55\%$. Tych pól obszaru zmienności parametrów ruchu nie zarejestrowano bowiem dla pojazdu 2. W obu przypadkach odnotowano ten sam obszar, w którym test homologacyjny WMTC charakteryzował się większym udziałem czasu eksploatacji, a tym samym zarejestrowano w nim znaczące rozbieżności. Jest to obszar dodatnich przyspieszeń opisanych przedziałem $\langle 0 \text{ m/s}^2; 1 \text{ m/s}^2 \rangle$ w całym zakresie prę-

kości pojazdu, w którym wartości różnicy wyniosły od 3,89% do 8,56% (pojazd 1) oraz od 3,70% do 8,82% (pojazd 2), w zależności od konkretnego przedziału prędkości.

a)



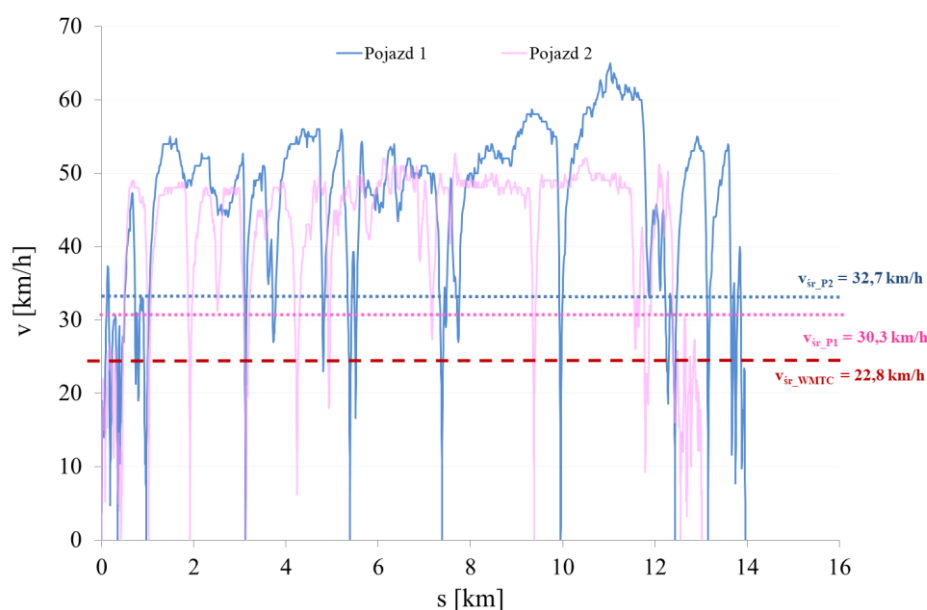
b)



Rys. 6.8. Różnica udziałów czasu eksploatacji podczas pomiarów dla trasy badawczej B oraz w teście WMTC w przedziałach prędkości i przyspieszenia: a) Pojazd 1, b) Pojazd 2

Podobnie jak dla trasy badawczej A, na podstawie zarejestrowanych danych, wyznaczono przebiegi prędkości rozpatrywanego testu pomiarowego w funkcji przebytego dystansu (rys. 6.9). Jako uzupełnienie przedstawionych zależności, naniesiono na wykres linię określającą wartość średniej prędkości testu laboratoryjnego WMTC – 22,8 km/h. Dla pojazdu 1 wartość uśrednionej prędkości przejazdu wyniosła 32,7 km/h, natomiast pojazd 2 poruszał się średnio

z prędkością 30,3 km/h. Oznacza to, że średnia różnica między prędkościami uzyskanymi w testach drogowych i testem homologacyjnym wynosi 8,7 km/h.



Rys. 6.9. Przebiegi prędkości pojazdów 1 i 2 na trasie B

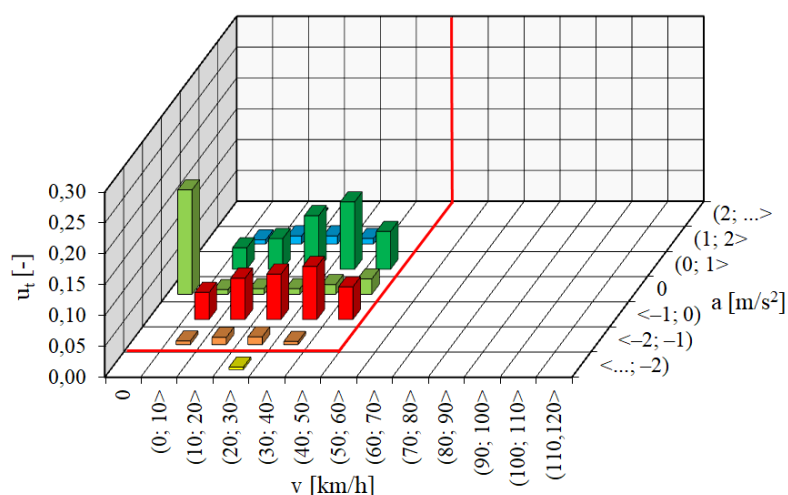
Tożsamy zestaw analiz wykonano dla pojazdów nr 3 i 4, różniących się od dwóch pierwszych objętością skokową silnika, która w tym przypadku wynosiła 125 cm³. Analizy zostały wykonane dla wcześniej rozpatrywanych tras badawczych. Ponadto ze względu na konstrukcję, a co za tym idzie brak ograniczenia prędkości pojazdu, dla omawianych obiektów badawczych analizy dokonano również dla trasy zawierającej część pozamiejską, zwanej dalej trasą C. Jej przebieg został szczegółowo przedstawiony i opisany w rozdziale piątym. Wszystkie charakterystyki udziału czasu eksploatacji pojazdów odniesiono do testu homologacyjnego WMTC.

Dla trasy A i pojazdu 3 otrzymane zależności wskazują na znaczące różnice już dla samego obszaru zmienności parametrów ruchu. W przypadku badań pojazdu w rzeczywistych warunkach eksploatacji odnotowano wartości udziałów dla prędkości z zakresu (0 km/h; 50 km/h), podczas gdy dla testu homologacyjnego z zakresu (0 km/h; 120 km/h). Wynika to z charakterystyki trasy A, zawierającej odcinki obszaru ścisłego centrum miasta Poznania, odzwierciedlającej typowe warunki eksploatacji tej grupy pojazdów. W praktyce bowiem trudne do uzyskania są prędkości przekraczające 100 km/h. W związku z tym udział cyklu miejskiego dla testów na tej trasie badawczej wyniósł około 100%, a dopuszczalna prędkość maksymalna wynosiła 50 km/h (rys. 6.10). Warunki te są znacząco bliższe rzeczywistej eksploatacji tej grupy pojazdów niż warunki testu WMTC.

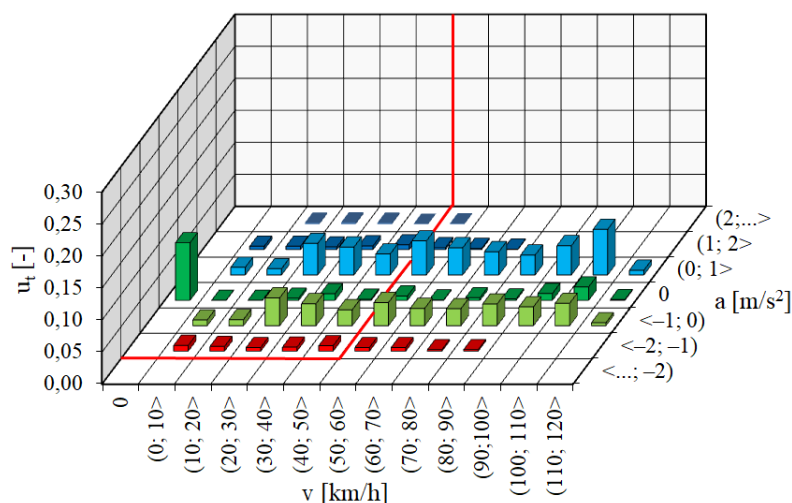
Analizując obszar zmienności parametrów ruchu wspólny dla obu testów (oznaczony czerwoną linią ciągłą) (pojazd 3 – trasa A; test WMTC) tj. obszar z zakresu (0 km/h; 50 km/h) i (-2 m/s^2 ; ... m/s^2), odpowiednio dla prędkości pojazdu i przyspieszenia, odnotowano bardziej równomierny rozkład wartości dla testu WMTC. W obu przypadkach największy udział czasu eksploatacji zarejestrowano podczas postoju, który wyniósł 16,93% i 8,99% odpowiednio dla przejazdu na trasie A i w teście WMTC. Charakterystyka gęstości czasowej uzyskana dla testu

w rzeczywistych warunkach eksploatacji wykazuje podobny rozkład wartości udziału czasu pracy dla przyspieszeń opisanych przedziałami $\langle -1 \text{ m/s}^2; 0 \text{ m/s}^2 \rangle$ oraz $\langle 0 \text{ m/s}^2; 1 \text{ m/s}^2 \rangle$ podczas zwiększania się prędkości od 0 do 50 km/h, które sumarycznie wyniosły odpowiednio 32,29% oraz 34,10%. Podobną tendencję zaobserwowano dla charakterystyki dla testu WMTC. Podczas zwiększania prędkości od 0 do 120 km/h, wartości udziału czasu eksploatacji wyniosły 31,43% i 43,41% odpowiednio dla tych samych przedziałów przyspieszeń.

a)



b)

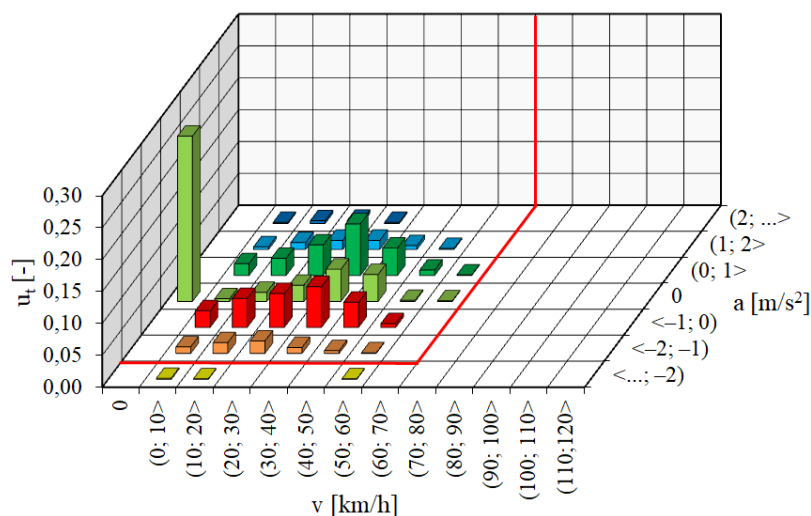


Rys. 6.10. Udziały czasu eksploatacji w przedziałach prędkości i przyspieszenia a) trasa A; pojazd 3, b) test WMTC

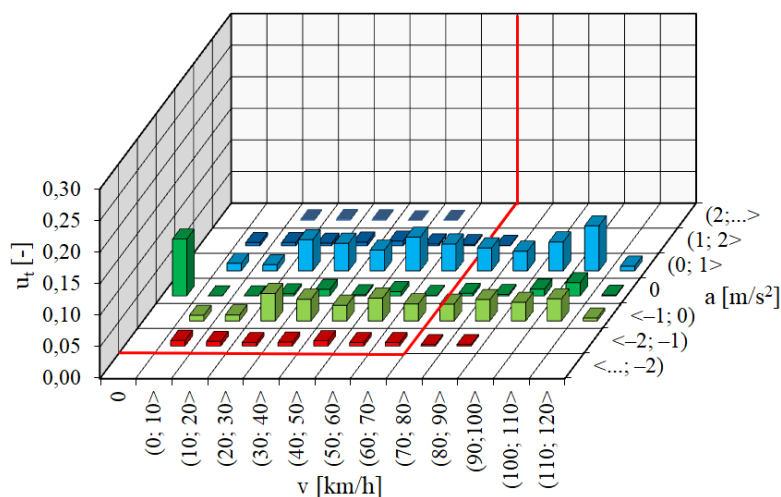
Na rysunku 6.11 przedstawiono zestawienie trasy A z testem WMTC dla pojazdu 4. Dla tego przypadku odnotowano większy obszar zmienności parametrów jezdnych tj. prędkości pojazdu z zakresu $\langle 0 \text{ km/h}; 70 \text{ km/h} \rangle$, jednak udział czasu eksploatacji dla prędkości z przedziałów $\langle 50 \text{ km/h}; 60 \text{ km/h} \rangle$ oraz $\langle 60 \text{ km/h}; 70 \text{ km/h} \rangle$ wyniósł sumarycznie jedynie 2,11%. Wartość udziału czasu eksploatacji uzyskana w teście WMTC dla powyższych prędkości w całym zakresie przyspieszeń wyniosła 21,14%. Największy udział czasu pracy wystąpił podczas postoju i stanowił 25,86%. Udział czasowy w zakresie prędkości $\langle 0 \text{ km/h}; 50 \text{ km/h} \rangle$ i w przedziałach przyspieszeń $\langle 0 \text{ m/s}^2; 1 \text{ m/s}^2 \rangle$ oraz $\langle 1 \text{ m/s}^2; 2 \text{ m/s}^2 \rangle$ stanowił 26,66%, a dla parametrów $\langle 0 \text{ km/h};$

50 km/h) oraz $\langle -2 \text{ m/s}^2; 0 \text{ m/s}^2 \rangle$ sumaryczna wartość osiągnęła 29,68%. Ruch ze stałą prędkością wystąpił dla 13,90% całego przejazdu, podczas gdy w teście WMTC wartość ta stanowi 8,99%.

a)



b)

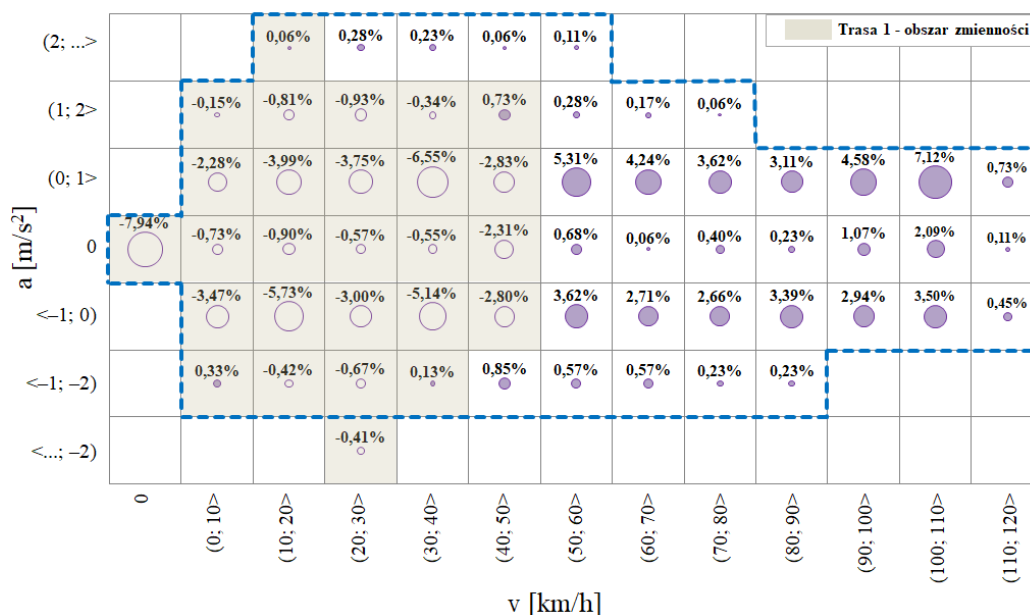


Rys. 6.11. Udziały czasu eksploatacji w przedziałach prędkości i przyspieszenia a) trasa A; pojazd 4, b) test WMTC

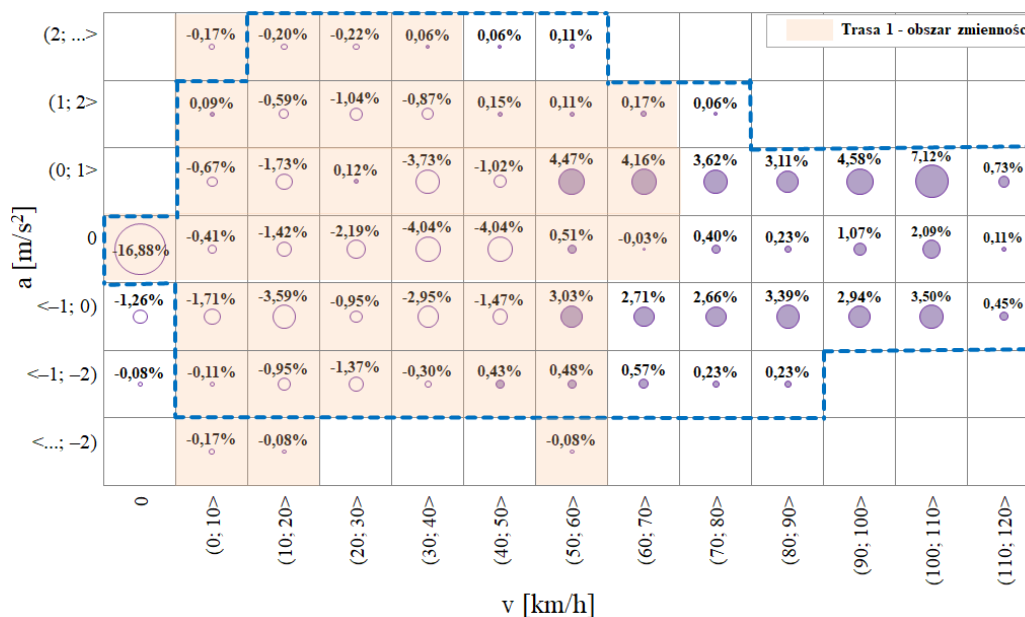
Dla pojazdów wyposażonych w silniki o objętości skokowej 125 cm^3 dokonano zestawienia różnic w udziałach czasu eksploatacji, w przedziałach prędkości i przyspieszenia zarejestrowanych podczas badań w teście homologacyjnym WMTC i na poszczególnych trasach badawczych. Dla omawianego przypadku (trasa A) największą różnicę odnotowano dla postoju i wyniosła ona 7,94% dla pojazdu 3 oraz 16,88% dla pojazdu 4 (rys. 6.12). Istotne rozbieżności wystąpiły również w zakresie prędkości $\langle 0 \text{ km/h}; 40 \text{ km/h} \rangle$ dla przyspieszenia z przedziałów $\langle -1 \text{ m/s}^2; 0 \text{ m/s}^2 \rangle$ oraz $\langle 0 \text{ m/s}^2; 1 \text{ m/s}^2 \rangle$, których wartości wynosiły od $-2,80\%$ do $6,55\%$ dla pojazdu 3. Podczas badań pojazdu 4 uzyskano nieco mniejsze różnice wartości udziałów czasu eksploatacji na trasie A w porównaniu z testem WMTC (poza postojem) dla wspólnego obszaru zmienności parametrów ruchu. Odnotowano także wartość różnicy wynoszącą $-3,73\%$ dla prędkości z zakresu $\langle 30 \text{ km/h}; 40 \text{ km/h} \rangle$ i przyspieszenia opisanego przedziałem $\langle 0 \text{ m/s}^2 \text{ oraz } 1 \text{ m/s}^2 \rangle$. Porównanie obu pojazdów między sobą wykazało, że w przypadku pojazdu 4 występują

znacząco większe różnice (maksimum $-4,04\%$), w odniesieniu do testu homologacyjnego WMTC, dla obszaru eksploatacji ze stałą prędkością.

a)

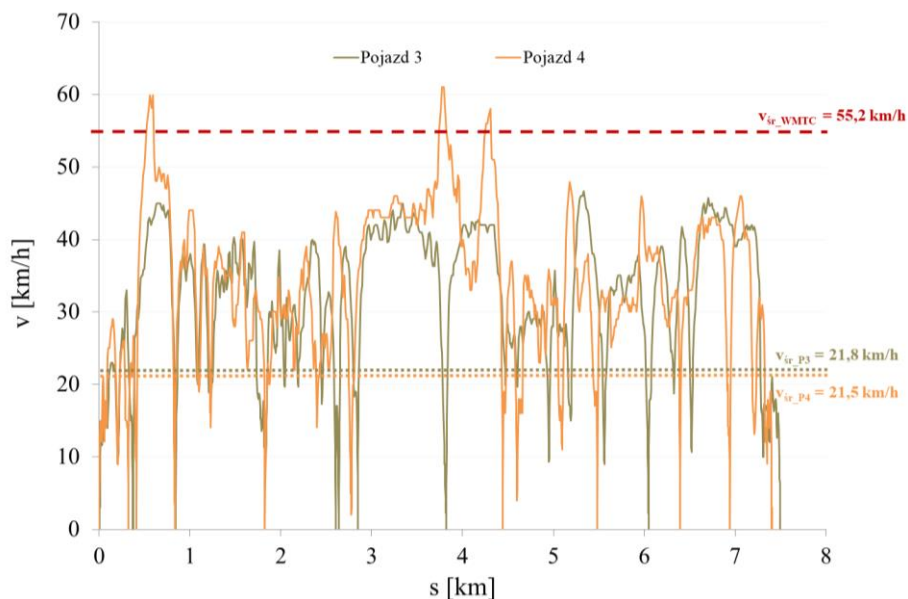


b)



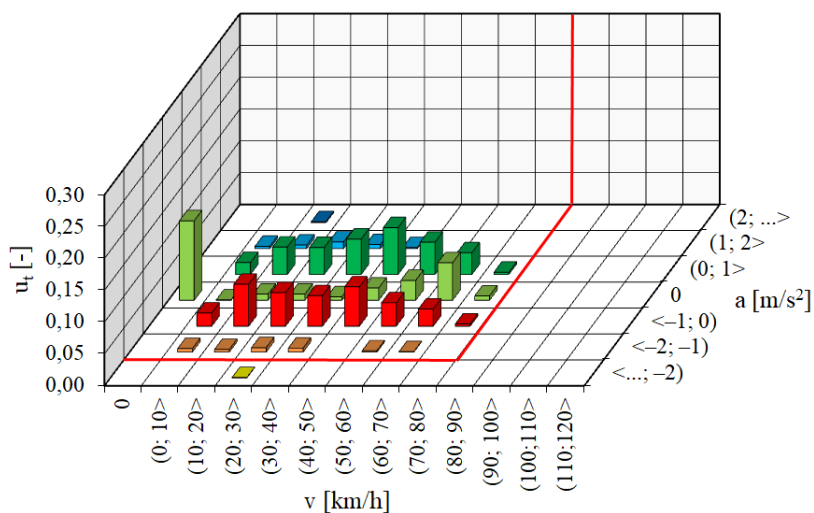
Rys. 6.12. Różnica udziałów czasu eksploatacji podczas pomiarów na trasie badawczej A oraz w teście WMTC w przedziałach prędkości i przyspieszenia: a) Pojazd 3, b) Pojazd 4

Na podstawie zarejestrowanych w rzeczywistych warunkach eksploatacji danych wyznaczono przebiegi prędkości rozpatrywanego testu pomiarowego (rys. 6.13) w funkcji przebytego dystansu. Jako uzupełnienie przedstawionych zależności, naniesiono na wykres linię określającą wartość średniej prędkości testu laboratoryjnego WMTC – 55,2 km/h. Dla pojazdu 3 wartość uśrednionej prędkości przejazdu wyniosła 21,8 km/h, natomiast pojazd 4 poruszał się średnio z prędkością 21,5 km/h. Charakterystykę eksploatacyjną pojazdu 3 i 4 na trasie B przedstawiono odpowiednio na rysunkach rys. 6.14 i 6.15.

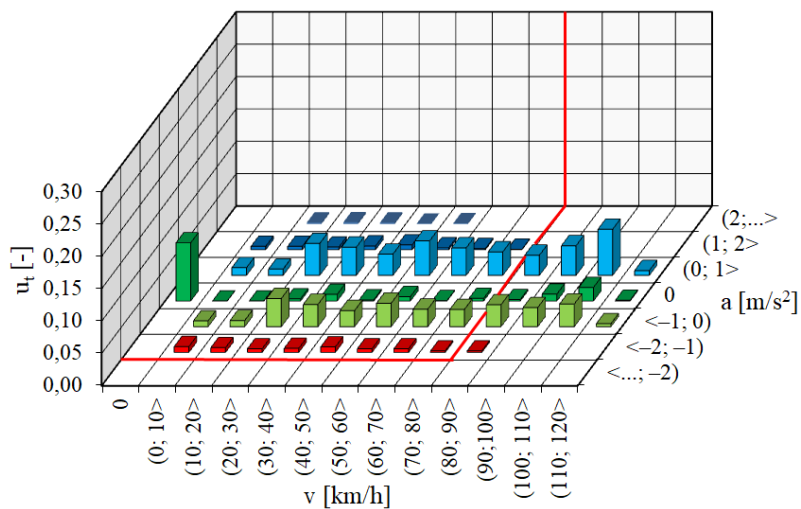


Rys. 6.13. Przebiegi prędkości pojazdów 3 i 4 na trasie A

a)



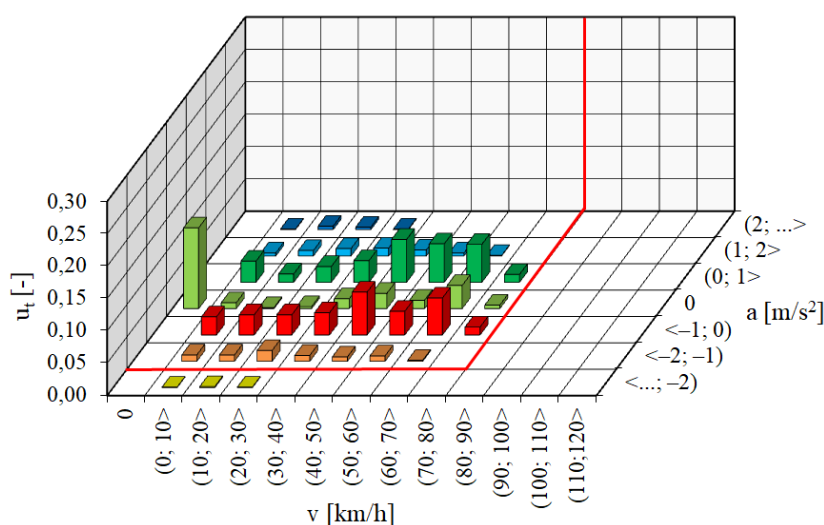
b)



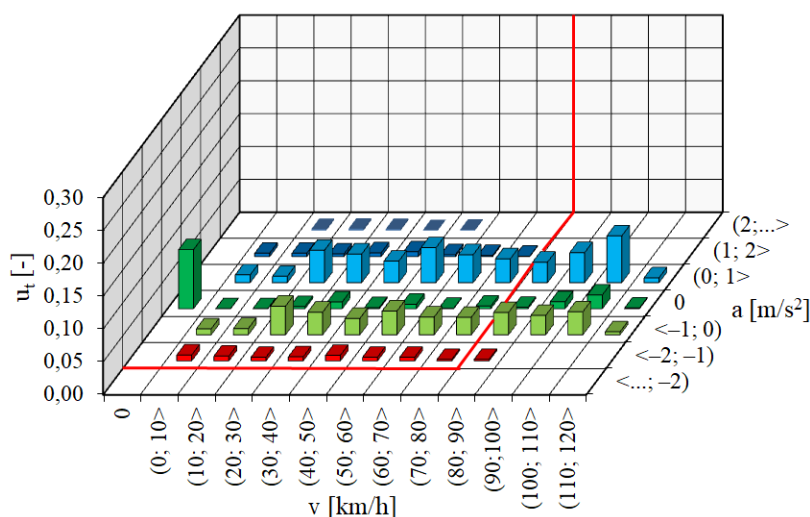
Rys. 6.14. Udziały czasu eksploatacji w przedziałach prędkości i przyspieszenia a) trasa B; pojazd 3, b) test WMTC

Podczas przejazdu trasą miejską B obiekt badawczy 3 osiągnął większy obszar zmienności parametrów jezdnych w porównaniu z trasą A, zakres prędkości wyniósł $\langle 0 \text{ km/h}; 80 \text{ km/h} \rangle$. Przy czym udział czasu eksploatacji dla przedziału prędkości $\langle 70 \text{ km/h}; 80 \text{ km/h} \rangle$ wyniósł jedynie 1,44%. Natomiast w przypadku obszaru eksploatacji dla przedziału prędkości $\langle 60 \text{ km/h}; 70 \text{ km/h} \rangle$ odnotowano bardzo podobne sumaryczne wartości udziałów czasowych tj. 12,49% oraz 10,57% odpowiednio dla trasy B i testu WMTC. Największą wartość udziału czasu eksploatacji zarejestrowano podczas postoju obiektu, a jego wartość jest równa 12,92%. Udział czasowy w zakresie prędkości $\langle 0 \text{ km/h}; 60 \text{ km/h} \rangle$ i przedziałach przyspieszeń $\langle 0 \text{ m/s}^2; 1 \text{ m/s}^2 \rangle$ oraz $\langle 1 \text{ m/s}^2; 2 \text{ m/s}^2 \rangle$ stanowił 36,04%, a dla parametrów $\langle 0 \text{ km/h}; 60 \text{ km/h} \rangle$ oraz $\langle -1 \text{ m/s}^2; 0 \text{ m/s}^2 \rangle$ sumaryczna wartość osiągnęła 33,74%. Ruch ze stałą prędkością wystąpił dla 14,72% czasu trwania całego przejazdu, podczas gdy w teście WMTC wartość ta stanowi 8,99%.

a)



b)



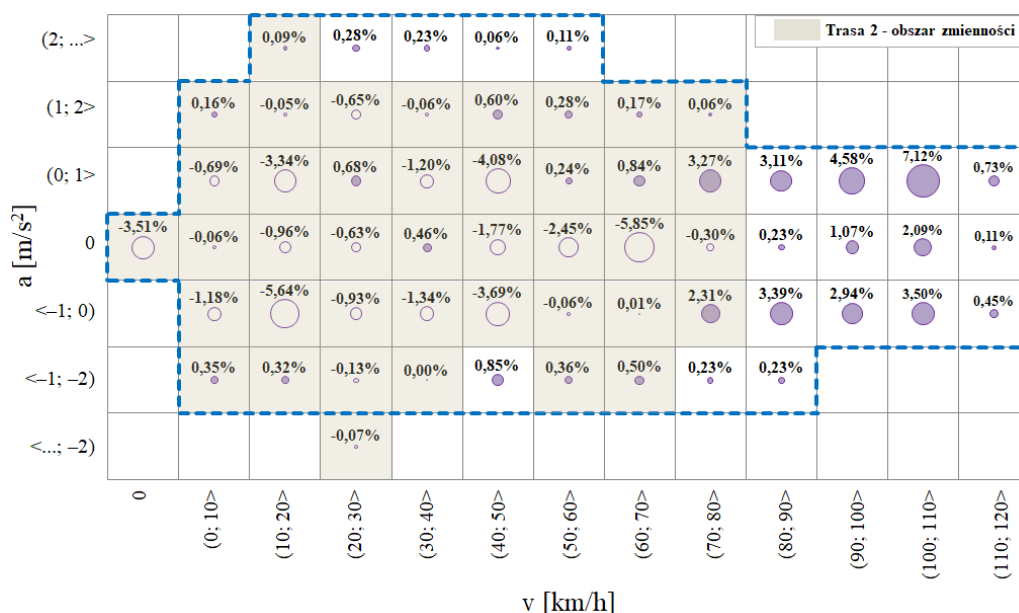
Rys.6.15. Udziały czasu eksploatacji w przedziałach prędkości i przyspieszenia a) trasa B; pojazd 4, b) test WMTC

Ocena charakterystyk gęstości czasowej dla trasy B i pojazdu 4 wykazała, iż obszar zmienności parametrów eksploatacyjnych jest taki sam jak w przypadku pojazdu 3 na tej samej trasie. Co więcej, uzyskano zbliżoną wartość udziału czasu eksploatacji dla postoju obiektu badaw-

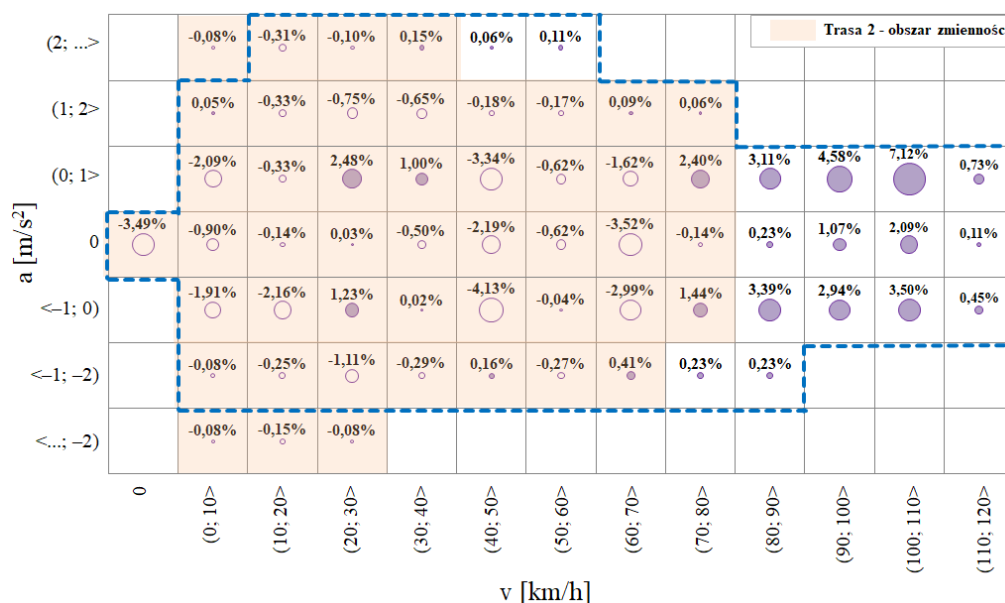
czego, tj. 12,48%. Dla prędkości pojazdu z zakresu $\langle 0 \text{ km/h}; 80 \text{ km/h} \rangle$ i w przedziałach przyspieszeń $\langle -2 \text{ m/s}^2; -1 \text{ m/s}^2 \rangle$ oraz $\langle -1 \text{ m/s}^2; 0 \text{ m/s}^2 \rangle$ udział czasowy osiągnął wartość 35,92%, natomiast w teście WMTC 26,17%. Dla obszaru $\langle 0 \text{ km/h}; 80 \text{ km/h} \rangle$ prędkości pojazdu oraz $\langle 0 \text{ m/s}^2; 1 \text{ m/s}^2 \rangle$ i $\langle 1 \text{ m/s}^2; 2 \text{ m/s}^2 \rangle$ przyspieszenia, sumaryczna wartość osiągnęła 33,98%. W przypadku testu homologacyjnego w tym obszarze pojazd pracuje z udziałem czasowym równym 31,09%. Pojazd 4 na trasie B poruszał się ze stałą prędkością przez 10,65% całkowitego czasu trwania testu badawczego.

Analiza porównawcza udziałów czasu eksploatacji pojazdów 3 i 4 na trasie badawczej B oraz w teście homologacyjnym WMTC wykazała znacząco mniejsze różnice niż w przypadku przejazdu trasą A (rys. 6.16). Trasa badawcza B zawierała elementy cyklu pozamiejskiego, co

a)



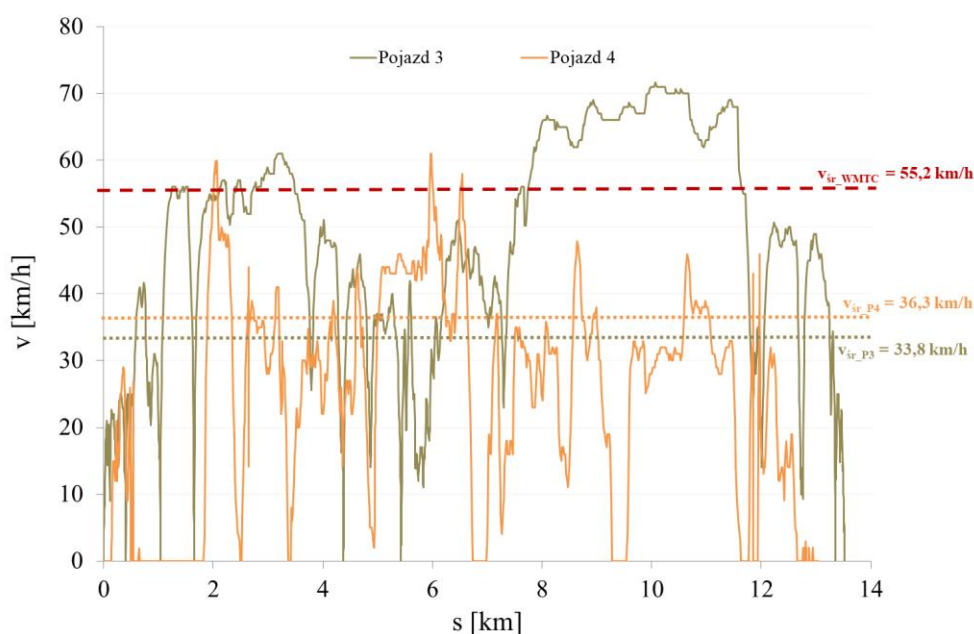
b)



Rys. 6.16. Różnica udziałów czasu eksploatacji podczas pomiarów na trasie badawczej B oraz w teście WMTC w przedziałach prędkości i przyspieszenia: a) Pojazd 3, b) Pojazd 4

spowodowało rozkład wartości udziału czasu eksploatacji na większy obszar zmienności parametrów jezdnych. Różnice dla punktu eksploatacji $\langle 0 \text{ km/h}; 0 \text{ m/s}^2 \rangle$ tj. postoju pojazdu wyniosły $-3,51\%$ oraz $-3,49\%$ odpowiednio dla pojazdu 3 i 4. Największe różnice odnotowano dla przedziałów prędkości $(40 \text{ km/h}; 50 \text{ km/h})$ i $(60 \text{ km/h}; 70 \text{ km/h})$, w których wartości wyniosły od $-1,77\%$ do $5,85\%$ dla pojazdu 3 oraz od $-2,19\%$ do $-4,13\%$ dla pojazdu 4, w zależności od konkretnego przedziału przyspieszenia.

Dla pojazdu 3 zarejestrowano 6 pojedynczych obszarów eksploatacji, których nie odnotowano podczas przejazdu obiektu badawczego 4. Ich udział czasu eksploatacji oraz różnice w nim, w odniesieniu do testu homologacyjnego, są jednak niewielkie i wynoszą maksymalnie $0,28\%$. Na podstawie zarejestrowanych przebiegów prędkości wyznaczono średnie wartości, które wyniosły: dla pojazdu 3 – $33,8 \text{ km/h}$ oraz pojazd 4 – $36,3 \text{ km/h}$ (rys. 6.17). Odnosząc je do średniej prędkości testu laboratoryjnego WMTC – $55,2 \text{ km/h}$, wynika że średnia różnica między prędkościami uzyskanymi w testach drogowych a testem homologacyjnym wynosi aż $20,2 \text{ km/h}$.

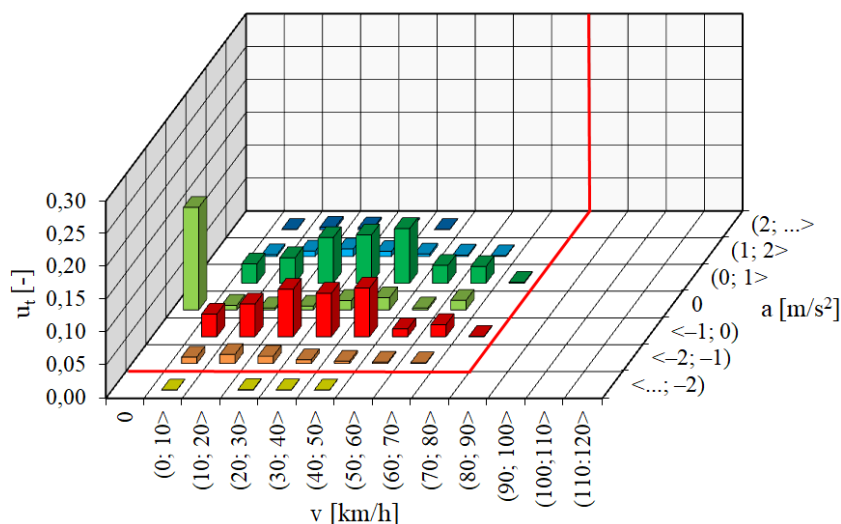


Rys. 6.17. Przebiegi prędkości pojazdów 3 i 4 na trasie B

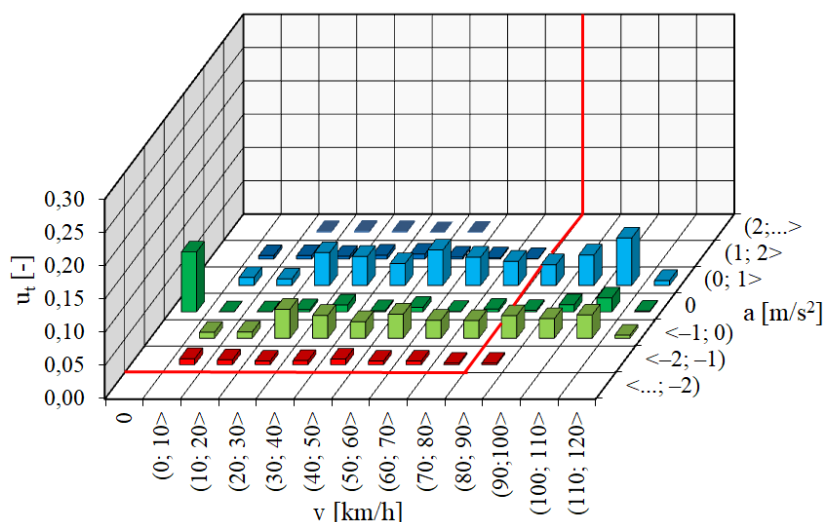
Dla pojazdów 3 i 4 dodatkowo wykonano przejazdy na trasie C, która składa się w 50% z części miejskiej a pozostałe 50% stanowi część pozamiejska. W związku z tym zarejestrowano wspólny dla pojazdu 3 i testu WMTC obszar zmienności parametrów jezdnych dla prędkości z zakresu $\langle 0 \text{ km/h}; 80 \text{ km/h} \rangle$ oraz przyspieszeń z zakresu $\langle -2 \text{ m/s}^2; \dots \text{ m/s}^2 \rangle$. W tym przypadku (pojazd 3 – trasa C) postój obiektu badawczego charakteryzował się największym udziałem czasu eksploatacji, który wyniósł $15,59\%$ (rys. 6.18). W rozpatrywanej próbie wykonanej na trasie C, istotny był udział eksploatacji w prawie całym obszarze zarejestrowanych prędkości opisanego zakresem $(0 \text{ km/h}; 70 \text{ km/h})$ i przedziałami przyspieszenia $\langle -1 \text{ m/s}^2; 0 \text{ m/s}^2 \rangle$ oraz $\langle 0 \text{ m/s}^2; 1 \text{ m/s}^2 \rangle$. W tych obszarach odnotowano wartości, które wyniosły odpowied-

nio, 32,75% i 34,79% udziału czasu eksploatacji. Ruch ze stałą prędkością wystąpił dla 6,64% całego przejazdu, a więc różnica między trasą C a testem homologacyjnym wyniosła tylko 0,45% dla tego obszaru.

a)



b)

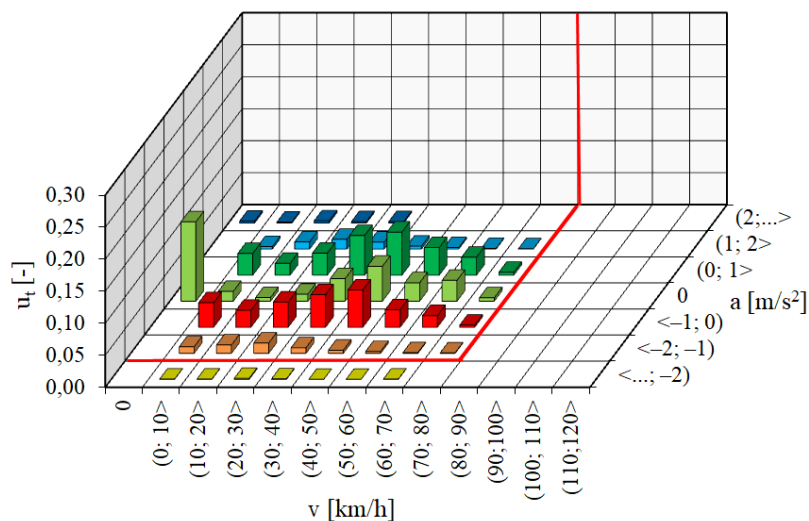


Rys. 6.18. Udziały czasu eksploatacji w przedziałach prędkości i przyspieszenia a) trasa C; pojazd 3, b) test WMTC

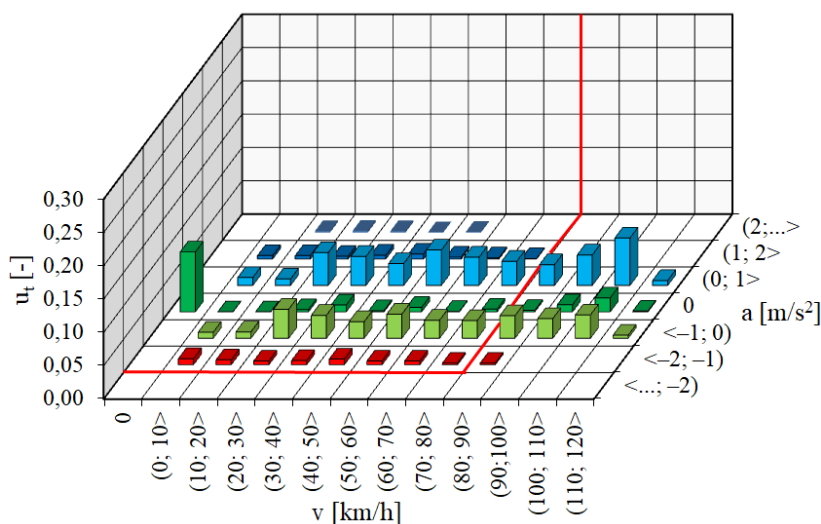
Dla ostatniego, analizowanego przejazdu na trasie C osiągnięto, wspólny z testem laboratoryjnym WMTC, obszar zmienności parametrów eksploatacyjnych dla prędkości z zakresu $\langle 0 \text{ km/h}; 80 \text{ km/h} \rangle$ oraz przyspieszeń z zakresu $\langle -2 \text{ m/s}^2; \dots \text{ m/s}^2 \rangle$. Charakterystyki udziału czasu eksploatacji dla pojazdu 4 w teście na trasie C i testu WMTC przedstawiono na rysunku 6.19. Maksymalną wartość udziału czasu eksploatacji zarejestrowano podczas postoju pojazdu, a jej wartość wyniosła 12,40%. Ruch ze stałą prędkością odbywał się natomiast przez 18,87% czasu trwania testu na trasie C. Sumaryczna wartość udziału czasu eksploatacji dla obszaru poprzedzającego ruch ze stałą prędkością, opisanego przedziałami przyspieszeń $\langle -2 \text{ m/s}^2; -1 \text{ m/s}^2 \rangle$ oraz $\langle -1 \text{ m/s}^2; 0 \text{ m/s}^2 \rangle$ w całym zakresie zarejestrowanej prędkości pojazdu wyniosła

32,00%. Udział czasowy w zakresie prędkości $\langle 0 \text{ km/h}; 80 \text{ km/h} \rangle$ i przedziałach przyspieszeń $\langle 0 \text{ m/s}^2; 1 \text{ m/s}^2 \rangle$ i $\langle 1 \text{ m/s}^2; 2 \text{ m/s}^2 \rangle$ równał się 24,02%. Dla skrajnych przedziałów przyspieszeń tj. $\langle \dots \text{ m/s}^2; -2 \text{ m/s}^2 \rangle$ oraz $\langle 2 \text{ m/s}^2; \dots \text{ m/s}^2 \rangle$ odnotowano nieznaczącą wartość 1,57%.

a)



b)

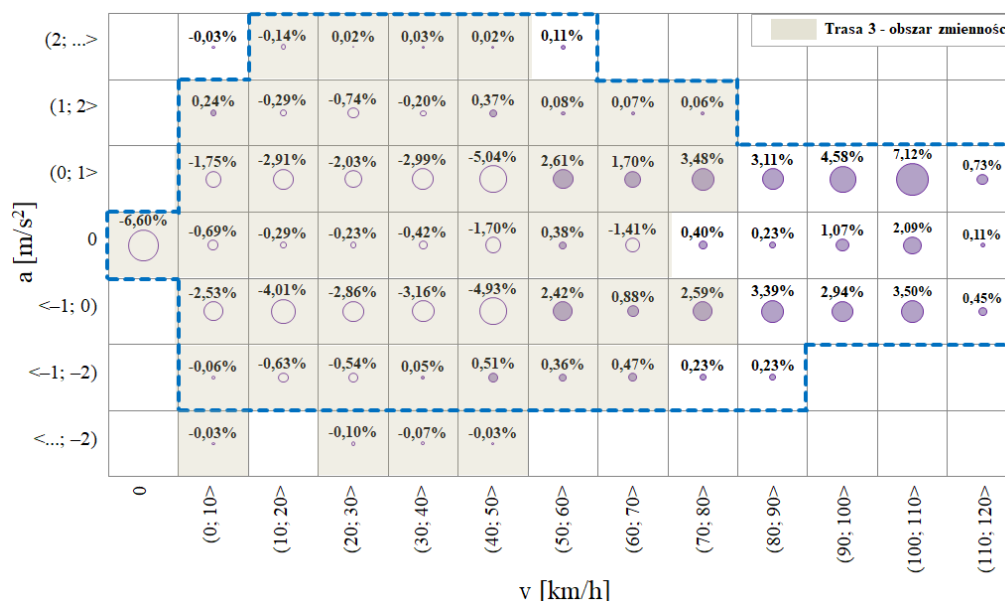


Rys. 6.19. Udziały czasu eksploatacji w przedziałach prędkości i przyspieszenia a) trasa C; pojazd 4, b) test WMTC

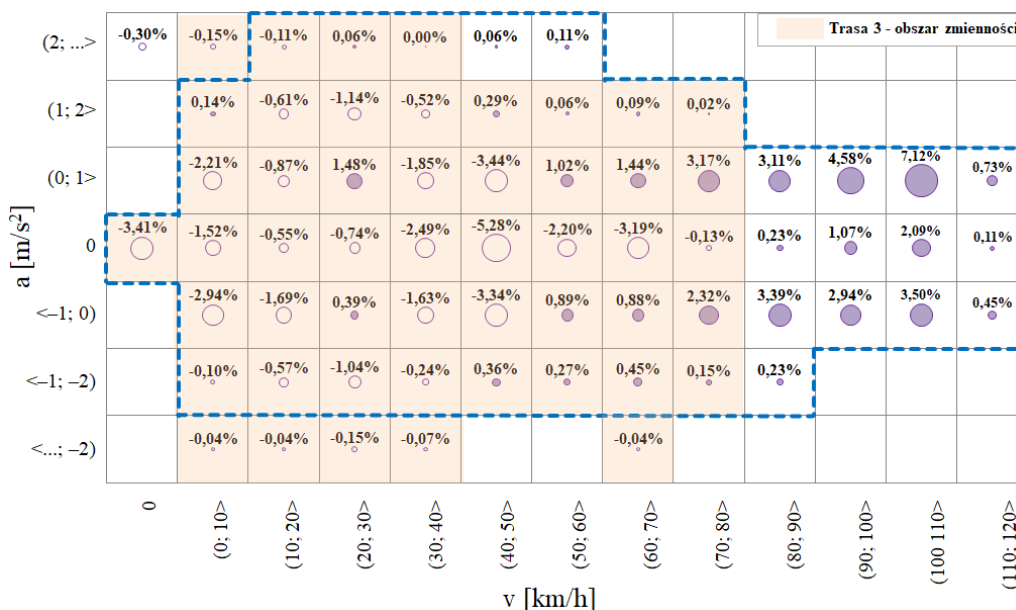
Dane dotyczące testu WMTC i pojazdu 3 podczas przejazdu na trasie pomiarowej C, wykazały największe rozbieżności w zakresie pola eksploatacji oznaczającego postój pojazdu (różnica $-6,6\%$). W tym samym punkcie dla pojazdu 4 odnotowano wartość różnicy, wynoszącą $-3,41\%$ (rys. 6.20). Dla tego przypadku największa rozbieżność wystąpiła dla pola opisanego przedziałem prędkości pojazdu $\langle 40 \text{ km/h}; 50 \text{ km/h} \rangle$ i zerowego przyspieszenia, a jej wartość wyniosła $-5,28\%$. Dla tego samego przedziału prędkości i przyspieszenia $\langle 0 \text{ m/s}^2; 1 \text{ m/s}^2 \rangle$ zarejestrowano różnicę $-5,04\%$ dla pojazdu 3. Test WMTC charakteryzował się natomiast większymi wartościami udziału czasu eksploatacji w obszarze prędkości z zakresu $\langle 50 \text{ km/h}; 80$

km/h) dla przyspieszeń z przedziałów $\langle -1 \text{ m/s}^2; 0 \text{ m/s}^2 \rangle$ i $\langle 0 \text{ m/s}^2; 1 \text{ m/s}^2 \rangle$. Wartości różnic wyniosły od 0,88% do 3,48% oraz od 0,88% do 3,17% odpowiednio dla pojazdu 3 i 4.

a)

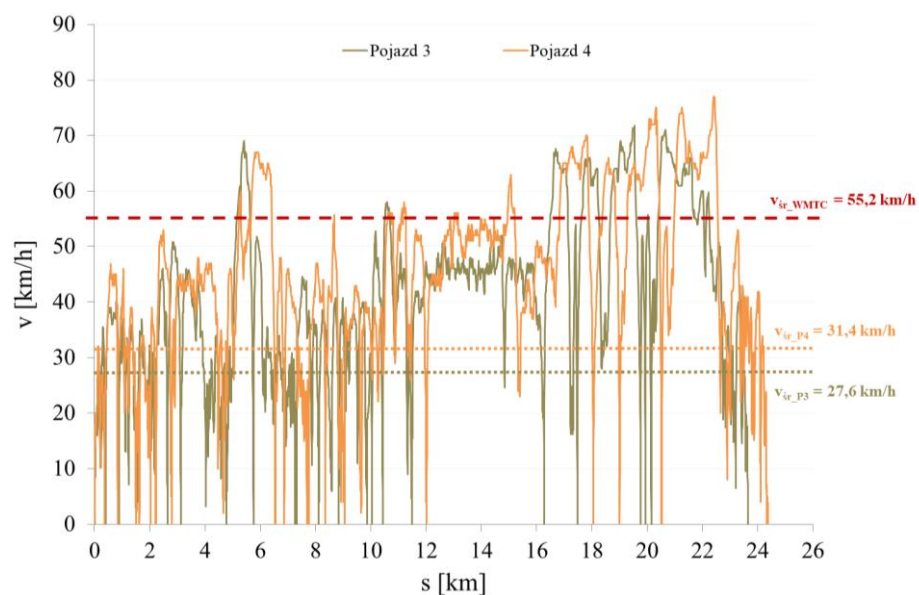


b)



Rys. 6.20. Różnica udziałów czasu eksploatacji podczas pomiarów na trasie badawczej C oraz w teście WMTC w przedziałach prędkości i przyspieszenia: a) Pojazd 3, b) Pojazd 4

Charakterystyka prędkości pojazdu w funkcji przebytego dystansu wykazała, że trzeci obiekt badawczy podczas całego przejazdu na trasie C, osiągnął wartość maksymalną prędkości 70,3 km/h, przy średniej wartości 27,6 km/h. Pojazd 4 osiągnął natomiast średnią w teście 31,4 km/h, a różnica względem homologacyjnego testu laboratoryjnego WMTC wyniosła 23,8 km/h (rys. 6.21).



Rys. 6.21. Przebiegi prędkości pojazdów 3 i 4 jednośladowych na trasie C

Analizując wszystkie przejazdy można zauważyć pewne tendencje, które zdefiniowano w następujący sposób:

- Największe udziały czasu eksploatacji osiągnięto dla postoju pojazdu, a ich wartości mieściły się w przedziale 12–26%, a wartość średnia wyniosła 17,30%. Test laboratoryjny WMTC w tym polu eksploatacji charakteryzował się wartościami 14,20% oraz 8,99% odpowiednio dla jego skróconej i pełnej wersji.
- Drugim znaczącym obszarem były przedziały dodatnich wartości przyspieszeń w całych zakresach analizowanych prędkości, a wartości udziału czasu eksploatacji w tym obszarze mieściły się w przedziale 24–39%, wartość średnia wyniosła 32,72%.
- Pojazdy na poszczególnych trasach pomiarowych poruszały się ze stałą prędkością średnio przez 11,7% całkowitego czasu trwania testu.
- Podczas badań w rzeczywistych warunkach eksploatacji żaden obiekt nie uzyskał średniej wartości prędkości, odpowiadającej średniej w teście homologacyjnym WMTC. Szczególne rozbieżności odnotowano dla pojazdów 3 i 4.

6.4. Analiza emisji związków toksycznych w rzeczywistych warunkach eksploatacji z miejskich pojazdów jednośladowych

Dopełnienie rozważań przeprowadzonych w poprzednim podrozdziale i zarazem główny cel dysertacji stanowi analiza wskaźników ekologicznych z miejskich pojazdów jednośladowych w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Analizie poddano otrzymane wartości gazowych związków toksycznych, których wartości dopuszczalne opisane zostały odpowiednimi rozporządzeniami [27, 30] tj. CO, HC, NO_x oraz nielimitowany przez ustawodawców CO₂. W pierwszej kolejności wyznaczono wartości natężenia związków toksycznych i szkodliwych w odniesieniu do przedziałów prędkości i przyspieszeń (z uwzględnieniem postoju) dla konkretnych pojazdów i tras pomiarowych. Umożliwiło to przeprowadzenie szczegółowych analiz oraz określenie zależności pomiędzy parametrami jazdy a emisją związków szkodliwych. Ponadto przedstawiono przebiegi stężeń związków toksycznych wraz z prędkościami pojazdów i prędkościami obrotowymi wału korbowego w funkcji czasu. Wyznaczono również emisję

drogową następujących związków: CO, HC, NO_x, a ich wartości porównano z wartościami dopuszczalnymi dla określonych norm emisji spalin poszczególnych pojazdów.

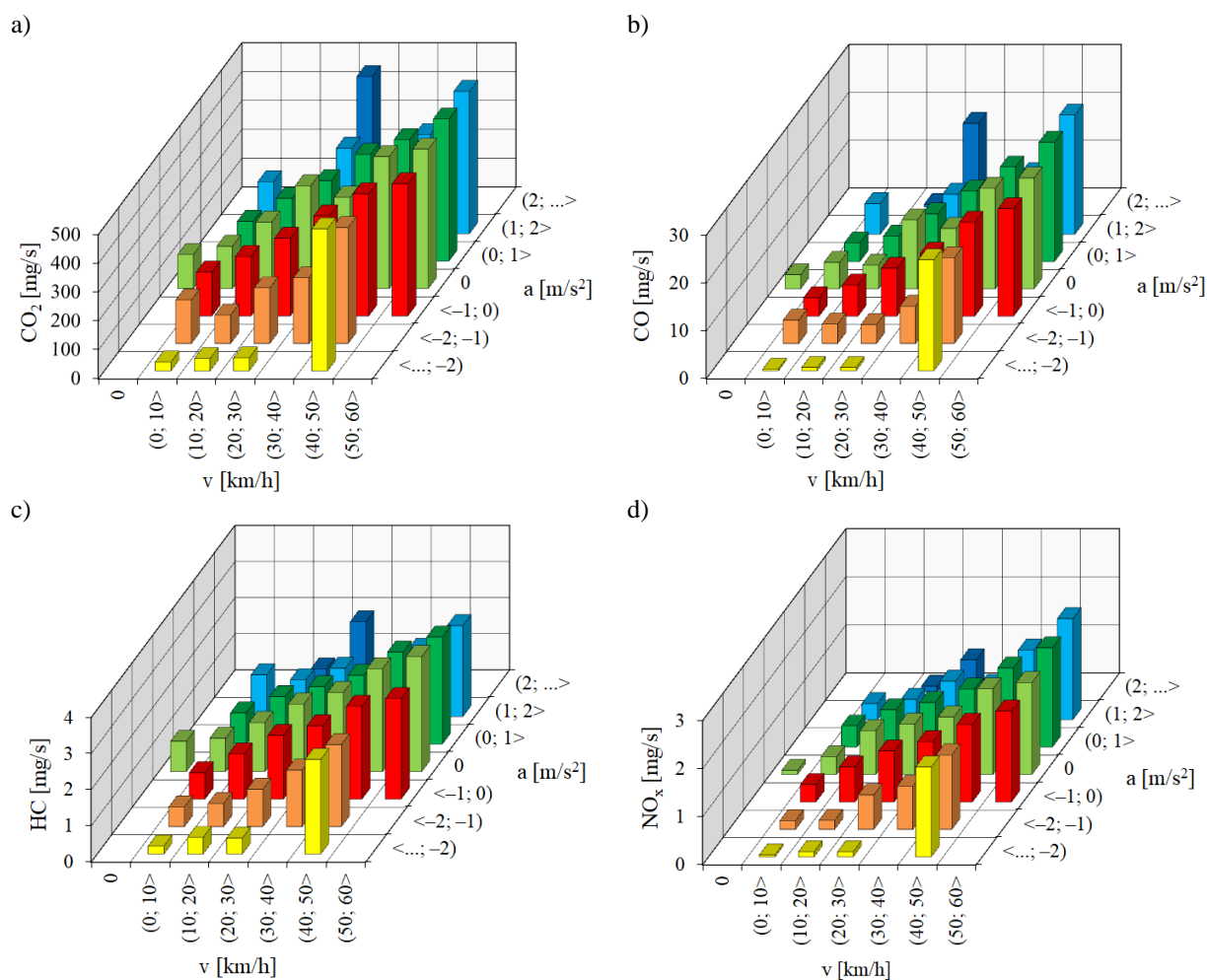
Emisja CO₂ jest ściśle i wprost skorelowana ze zużyciem paliwa, a jej wartość jest zależna zarówno od prędkości pojazdu, jak i jego przyspieszeń (rys. 6.22a). Ze zwiększaniem wartości obu wielkości wzrasta także wartość natężenia emisji CO₂. W związku z tym dla analizowanego przypadku relacji pojazd 1 – trasa A największą wartość zarejestrowano podczas dodatnich przyspieszeń z przedziału (1 m/s²; 2 m/s²) oraz dużych prędkości pojazdu opisanego przedziałem (50 km/h; 60 km/h). Jednak obiekt badawczy pracował na tym polu jedynie przez 0,17% całkowitego czasu trwania testu. Wartość natężenia emisji CO₂ dla parametrów opisujących postój pojazdu wyniosła 32,45 mg/s, natomiast wartość średnia emisji tego związku w całym teście stanowi 234,01 mg/s.

Analizując charakterystykę natężenia emisji CO można zauważyć, że jej wartości zarejestrowano dla całego zakresu prędkości pojazdu, jednakże ich rozkład nie jest tak równomierny jak w przypadku charakterystyki dla CO₂. Największą wartość, wynoszącą 24,96 mg/s, zarejestrowano w polu charakterystyki opisanym przedziałami (1 m/s²; 2 m/s²) oraz (50 km/h; 60 km/h) odpowiednio dla przyspieszeń i prędkości pojazdu, tak jak w przypadku emisji CO₂. Warunki wystąpienia wartości maksymalnej, czyli duże prędkości pojazdu, duże dawki dostarczanego paliwa, sprzyjają formowaniu się tego związku, ponieważ powodują lokalne i globalne niedobory tlenu. Wartość średnia natężenia emisji CO dla całego testu wyniosła 8,76 mg/s.

Wartości natężenia emisji HC tak jak w przypadku poprzednich związków szkodliwych są również zależne od parametrów eksploatacyjnych pojazdu (rys. 6.22c). Największe wartości tego związku zarejestrowano dla dużych prędkości opisanych przedziałami (40 km/h; 50 km/h) oraz (50 km/h; 60 km/h) w prawie całym zakresie przyspieszeń pojazdu. Wartość maksymalną (3,18 mg/s) odnotowano dla dużej prędkości opisanego przedziałem (50 km/h; 60 km/h) w ruchu jednostajnym. Do zwiększania się natężenia emisji HC przyczynia się duża prędkość pojazdu, przy której wtryskiwana dawka paliwa nie ulega dokładnemu wymieszaniu. Prowadzi to do zjawiska spalania niezupełnego, które skutkuje formowaniem się analizowanego związku. Otrzymana wartość średnia emisji HC w teście pojazdu 1 na trasie pomiarowej A wyniosła 1,38 mg/s. Ostatnim analizowanym związkiem toksycznym w przedziałach prędkości pojazdu i jego przyspieszeń jest NO_x (rys. 22d). W tym przypadku natężenie jego emisji jest zależne przede wszystkim od przyspieszenia. Największą wartość odnotowano dla przedziałów (1 m/s²; 2 m/s²) przyspieszenia i (50 km/h; 60 km/h) prędkości pojazdu, a jego wartość wyniosła 2,1 mg/s. Duże przyspieszenia pojazdu generują wyższą temperaturę i ciśnienie w cylindrze, co bezpośrednio sprzyja formowaniu emisji NO_x.

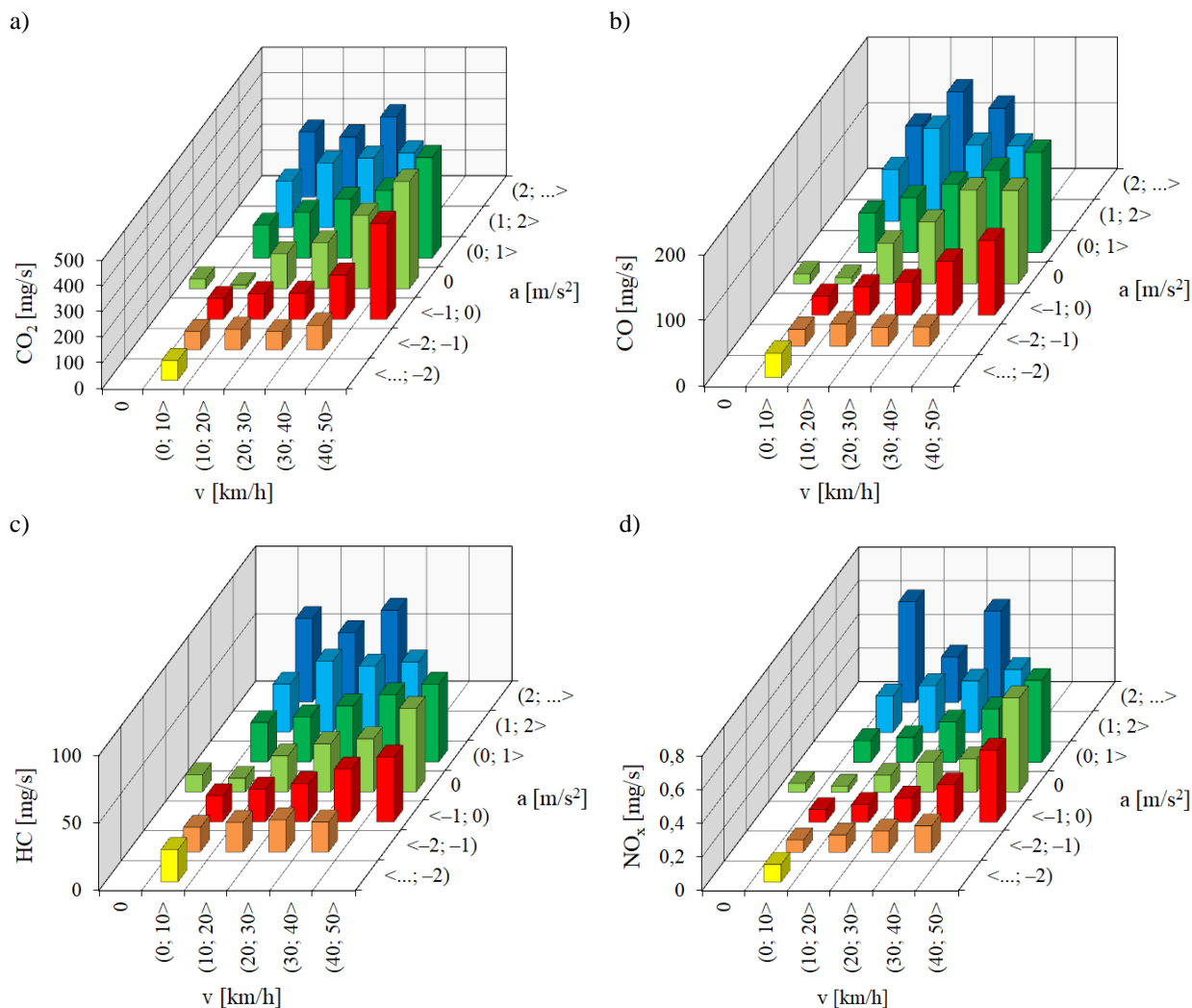
Analiza natężenia emisji CO₂ z pojazdu 2 na trasie pomiarowej A wykazała, że jej znaczące wartości odnotowano w całym zakresie prędkości pojazdu z wyraźnym przesunięciem w kierunku dodatnich wartości przyspieszeń (rys. 6.23a). Wartość maksymalna wyniosła 417,46 mg/s i została zarejestrowana dla zerowego przyspieszenia i prędkości pojazdu opisanego przedziałem (40 km/h; 50 km/h). Podobna tendencja została uzyskana dla natężenia emisji CO i HC (rys. 6.23b,c), co niewątpliwie jest związane z ilością wtryskiwanego paliwa. Jej zwiększenie powoduje chwilowy globalny i lokalny niedobór tlenu, co w konsekwencji prowadzi do kształtowania się wartości tych związków na relatywnie wyższych poziomach. Wartość maksymalną

CO, która wyniosła 152,60 mg/s, odnotowano podczas dodatnich przyspieszeń z przedziału (0 m/s^2 ; 1 m/s^2) i prędkości pojazdu opisanej przedziałem (40 km/h ; 50 km/h). Wartość średnia dla tego związku w całym teście na trasie pomiarowej A jest równa $67,16 \text{ mg/s}$. Należy zauważyć, że jest to prawie 8-krotna różnica względem pojazdu 1. Silnik dwusuwowy, w który wyposażony jest pojazd 2, charakteryzuje się b znaczącą emisją związków toksycznych, szczególnie CO i HC. Wynika to z konieczności stosowania oleju smarującego w paliwie, który zapobiega zatarciu silnika. W przypadku charakterystyki natężenia emisji HC największą wartość zarejestrowano w obszarze opisanym parametrami (2 m/s^2 ; ... m/s^2) oraz (20 km/h ; 30 km/h), a jego wynik wyniósł $68,05 \text{ mg/s}$. Średnia natężenia emisji HC w całym teście jest równa $30,92 \text{ mg/s}$.



Rys. 6.22. Natężenie emisji a) CO₂, b) CO, c) HC, d) NO_x w przedziałach prędkości i przyspieszenia pojazdu 1 podczas badań na trasie A

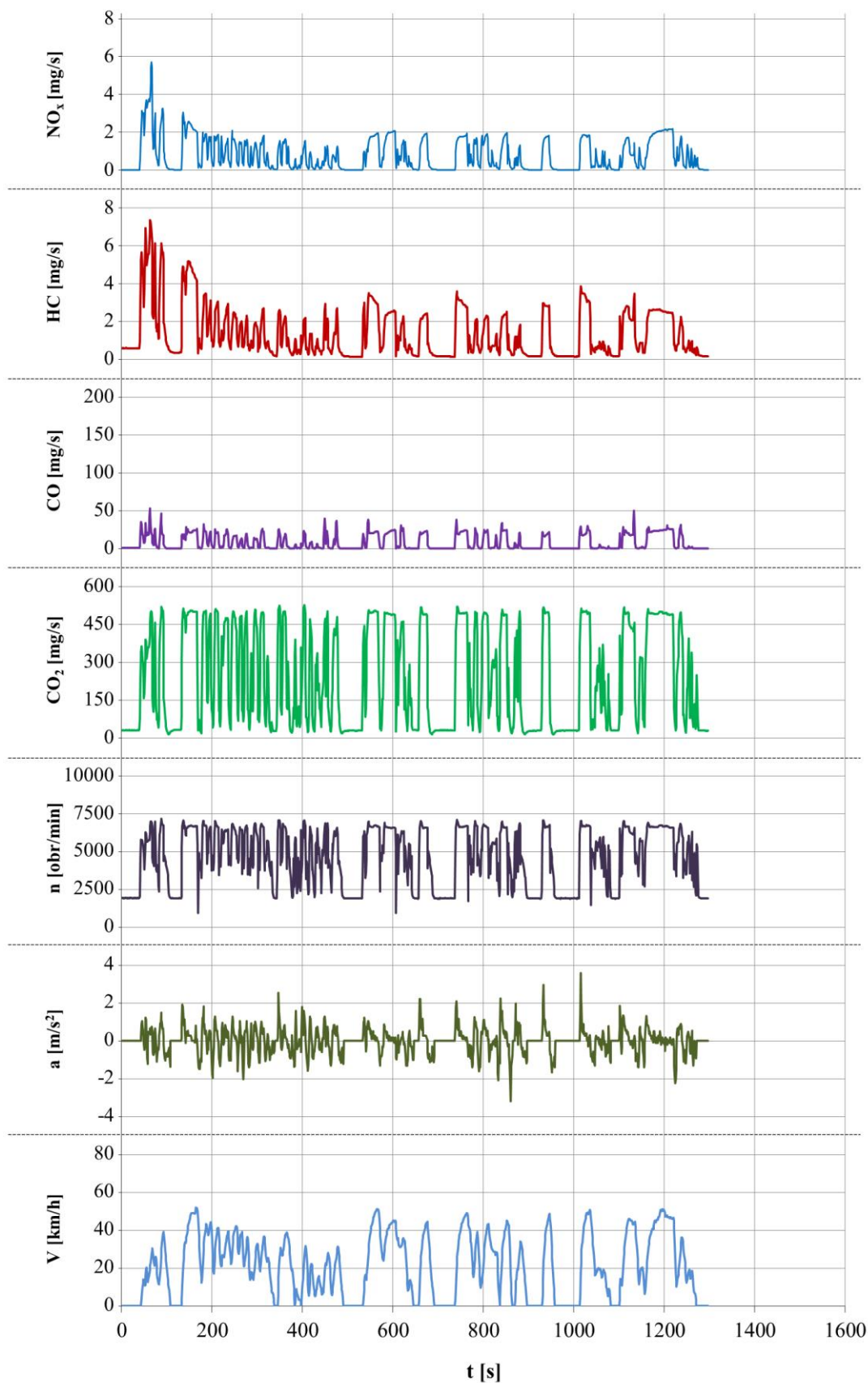
Znaczące wartości natężenia emisji NO_x obserwuje się przede wszystkim w zakresie maksymalnych przyspieszeń pojazdu (rys. 6.23d). Dla omawianego przypadku największe natężenie emisji NO_x, wynoszące $0,59 \text{ mg/s}$, zmierzone zostało w obszarze prędkości pojazdu (0 km/h ; 10 km/h) i przyspieszeń w przedziale (2 m/s^2 ; ... m/s^2). Minimalne wartości analizowanego związku toksycznego uzyskano natomiast w obszarze eksploatacji na postoju i podczas małych prędkości pojazdu w przedziałach ujemnych wartości przyspieszeń.



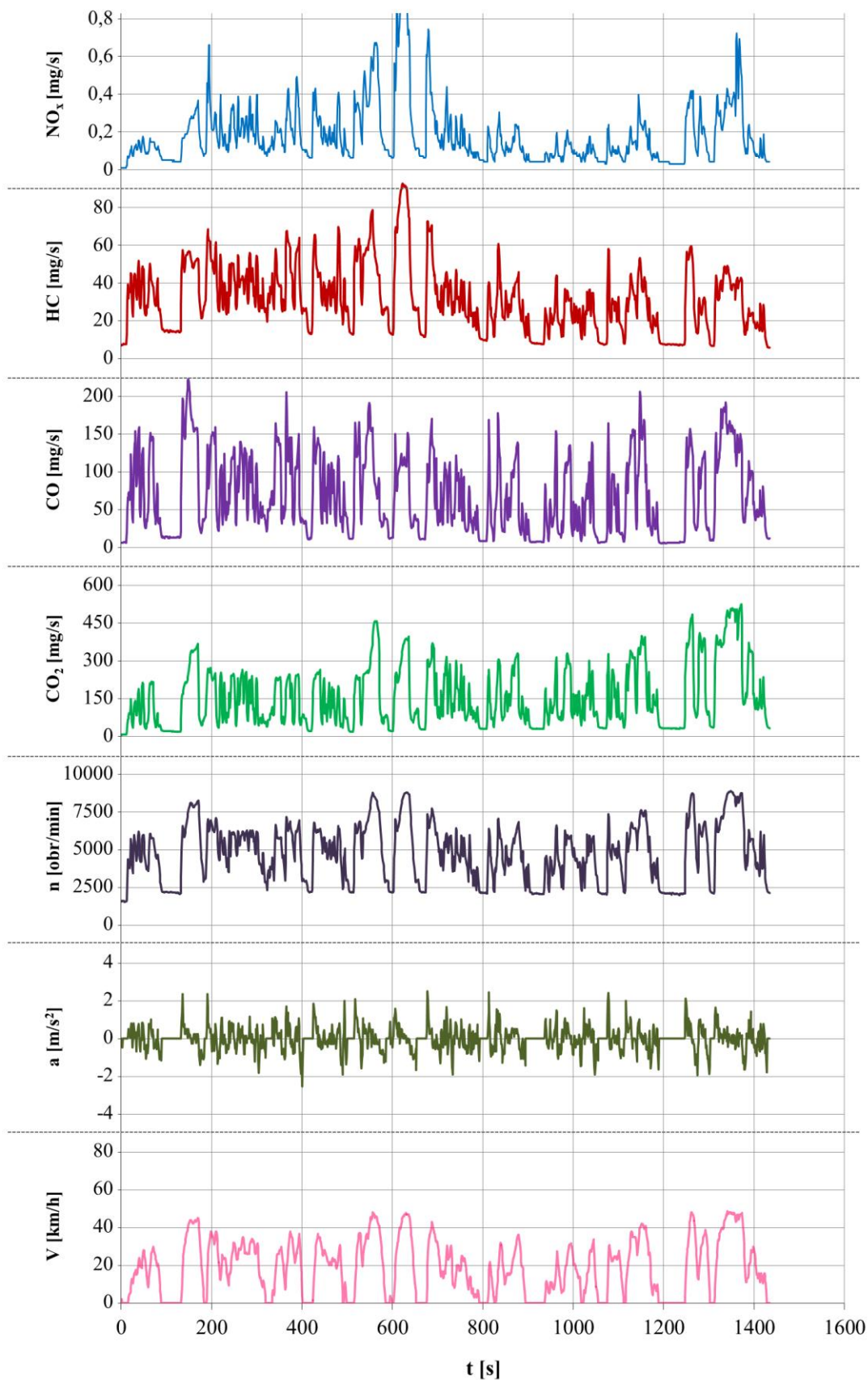
Rys. 6.23. Natężenie emisji a) CO₂, b) CO, c) HC, d) NO_x w przedziałach prędkości i przyspieszenia pojazdu 2 podczas badań na trasie badawczej A

Uzyskane w rzeczywistych warunkach eksploatacji dane pozwoliły na wykreślenie krzywych przebiegów parametrów ruchu i pracy silnika tj. prędkości pojazdu, przyspieszenia, prędkości obrotowej wału korbowego oraz natężenia emisji związków toksycznych w funkcji czasu. Stanowi to podstawę do określenia zarówno zależności pomiędzy wspomnianymi parametrami a emisją związków toksycznych, jak i do porównywania wyników testów na tej samej trasie badawczej (trasa A) dla różnych pojazdów jednośladowych (pojazd 1 – pojazd 2) (rys. 6.24 i 6.25). Na ich podstawie można zauważyć te same zależności dla obu obiektów badawczych pomiędzy parametrami jezdnyimi i przebiegiem natężenia emisji związków szkodliwych, jednakże dla drugiego pojazdu odnotowano znacznie większe wartości HC i CO.

W obu analizowanych przypadkach zauważono ścisłą zależność pomiędzy prędkością obrotową wału korbowego i emisją szkodliwego CO₂. Pojazdy uzyskały znaczące wartości emisji podczas zwiększania się tego parametru eksploatacyjnego. W silnikach dwusuwowych cykl pracy odbywa się podczas dwóch suwów tłoka, czyli w czasie jednego obrotu wału korbowego. Czynności związane z wymianą ładunku, tzn. napełnienie cylindra oraz wylot spalin, wykonywane są równocześnie. W związku z tym w przypadku pojazdu 2, który jest wyposażony w taki silnik, zwiększenie dawki paliwa powoduje zwiększenie natężenia emisji HC powstałych wskutek niespalenia oleju smarującego i strat związanych z przepłukaniem komory spalania.

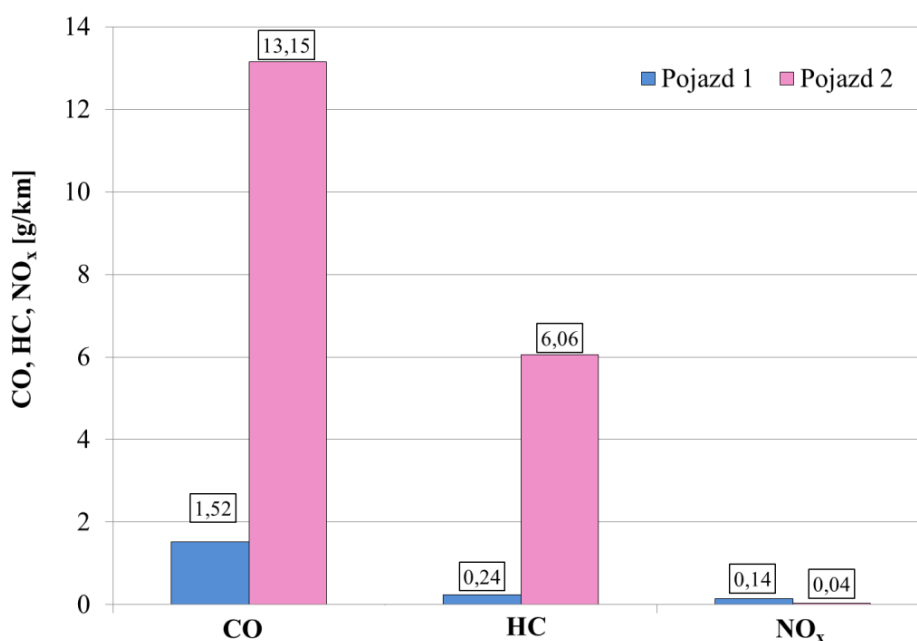


Rys. 6.24. Przebieg prędkości i przyspieszeń pojazdu, prędkości obrotowej wału korbowego oraz natężenia emisji: CO, HC, NO_x, i CO₂ zarejestrowane podczas badań pojazdu 1 na trasie pomiarowej A



Rys. 6.25. Przebieg prędkości i przyspieszeń pojazdu, prędkości obrotowej wału korbowego oraz natężenia emisji: CO, HC, NO_x, i CO₂ zarejestrowane podczas badań pojazdu 2 na trasie pomiarowej A

W celu dokonania oceny porównawczej otrzymanych wyników badań uzyskanych na trasie pomiarowej A, zestawiono otrzymane dla pojazdów 1 i 2 wartości emisji drogowej składników toksycznych spalin (rys. 6.26). Pojazd 2 uzyskał znacząco większe wartości emisji drogowej HC i CO. Wartość emisji CO dla pojazdu 2 wyniosła 13,15 g/km, różnica w stosunku do pojazdu 1 wyniosła 765%. W przypadku HC wartość emisji drogowej, z 2425% różnicą w odniesieniu do pojazdu 1, wyniosła 6,06 g/km. Odwrotna sytuacja wystąpiła w przypadku emisji drogowej NO_x, jej wartość dla pierwszego obiektu badawczego była 3,5 krotnie mniejsza w stosunku do pojazdu 2.

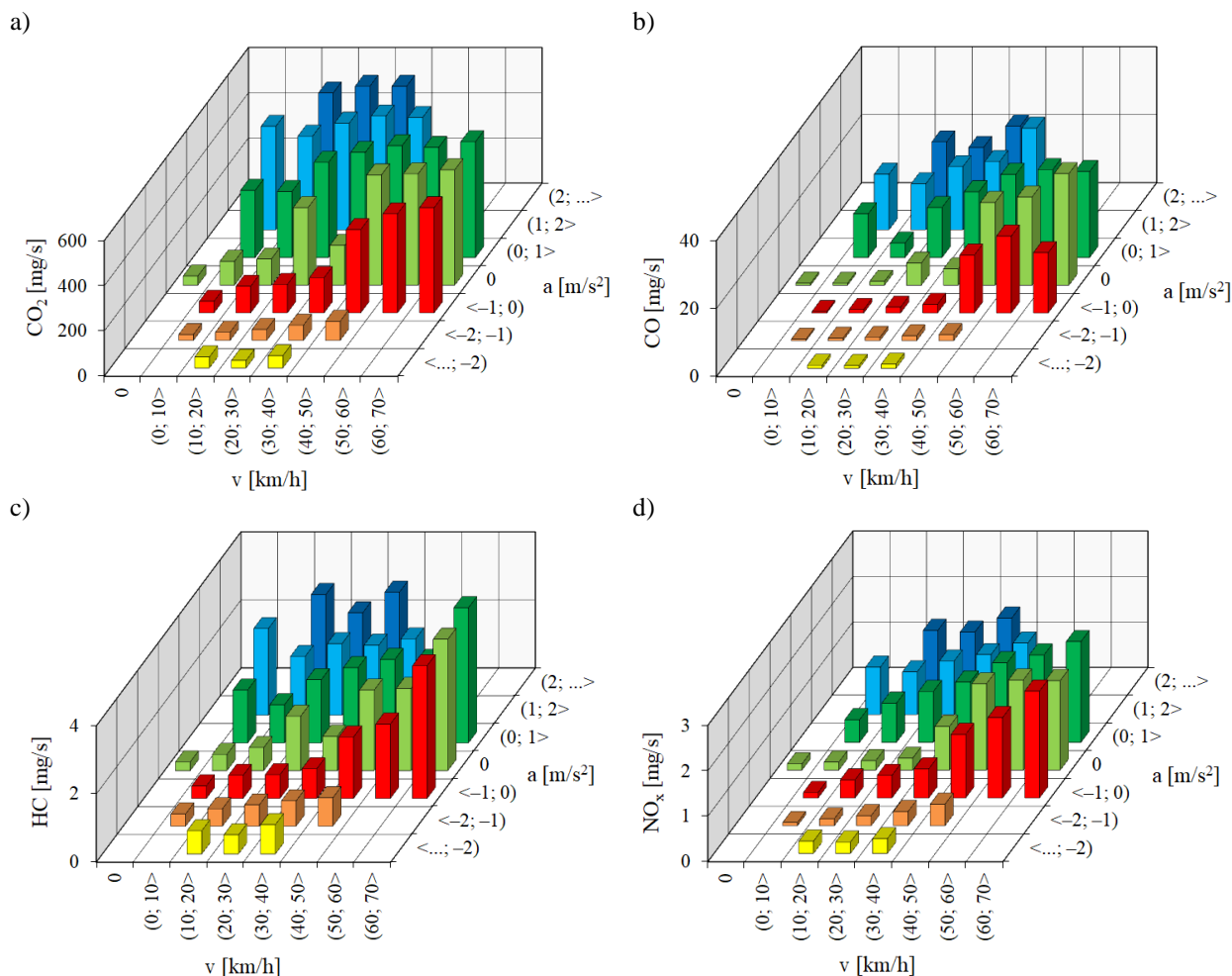


Rys. 6.26. Emisja drogowa CO, HC oraz NO_x dla pojazdów 1 i 2 na trasie A

Na rysunku 6.27 przedstawiono charakterystyki emisyjne w przedziałach parametrów ruchu na podstawie danych uzyskanych podczas testu relacji pojazd 1 – trasa B. Analizując charakterystykę natężenia emisji CO₂ zauważalna jest ścisła zależność pomiędzy kształtowaniem się wartości tego związku a parametrami jezdnyymi. Obszar, w którym wystąpiły znaczące wartości natężenia emisji CO₂ to zakres średnich i dużych prędkości pojazdu (20 km/h; 70 km/h) i dodatnich przyspieszeń. Wartość maksymalną (513,80 mg/s) odnotowano w polu opisanym przedziałami (2 m/s²; ... m/s²) oraz (20 km/h; 30 km/h) odpowiednio dla przyspieszenia i prędkości pojazdu. Przybliżoną wartość, która wyniosła 513,60 mg/s, zarejestrowano w tym samym przedziale przyspieszeń dla prędkości z sąsiadującego przedziału (30 km/h; 40 km/h). Średnia wartość tego związku w całym teście jezdnyim wyniosła 318,11 mg/s.

Z rozkładu wartości natężenia emisji CO wynika, że pojazd 1 na trasie pomiarowej B emitował najwięcej tego związku w obszarze dodatnich przyspieszeń i ruchu jednostajnego w szczególności podczas średnich i dużych prędkości pojazdu. Największą wartość odnotowano dla prędkości opisanego przedziałem (60 km/h; 70 km/h) i zerowego przyspieszenia, a jego wartość wyniosła 32,82 mg/s. Wartości minimalne zarejestrowano natomiast podczas hamowa-

nia pojazdu w zakresie małych i średnich prędkości oraz w trakcie postoju, wartość emisji spalin w tym punkcie eksploatacji wyniosła 0,6 mg/s. Pojazd 1 w całym teście na trasie pomiarowej B emitował średnio 14,43 mg/s CO.



Rys. 6.27. Natężenie emisji a) CO₂, b) CO, c) HC, d) NO_x w przedziałach prędkości i przyspieszenia pojazdu 1 podczas badań na trasie badawczej B

Wartości na charakterystyce natężenia emisji HC rozkładały się bardziej równomiernie w uzyskanym obszarze zmienności parametrów ruchu niż to miało miejsce w przypadku emisji CO. Zauważalne są jednak te same zależności między parametrami jezdnyymi a formowaniem się emisji CO i HC. Wartość maksymalną (3,97 mg/s) dla omawianego przypadku odnotowano w tym samym przedziale prędkości pojazdu tj. (60 km/h; 70 km/h) oraz sąsiadującego przedziału dodatniego przyspieszenia (0 m/s²; 1 m/s²). Wartość średnia w całym teście wyniosła 1,64 mg/s. Pojazd 2 emitował średnio 1,14 mg/s HC w całym teście dla omawianego przypadku trasy pomiarowej. Ostatnim analizowanym związkiem toksycznym są NO_x, dla którego otrzymano zbliżony do CO rozkład wartości jego natężenia emisji. Obszar znaczących wartości emisji NO_x wyznaczono przede wszystkim w zakresie dużych prędkości pojazdu. Największą wartość (2,35 mg/s) zarejestrowano zatem w polu eksploatacji pojazdu opisanym przedziałami (60 km/h; 70 km/h) i <-1 m/s²; 0 m/s²> odpowiednio dla prędkości i przyspieszenia.

Emisja CO₂ jest ściśle i wprost skorelowana ze zużyciem paliwa, a jej wartość jest zależna zarówno od prędkości pojazdu, jak i jego przyspieszeń (rys. 6.28a). W przypadku badań w rzeczywistych warunkach eksploatacji dla relacji pojazd 2 – trasa B ze wzrostem wartości przede wszystkim prędkości pojazdu, zwiększa się również wartość natężenia emisji rozpatrywanego związku szkodliwego. Dla analizowanego przypadku największą wartość (528, 48 mg/s) zarejestrowano w ruchu jednostajnym dla dużych prędkości pojazdu z zakresu (50 km/h; 60 km/h), jednak obiekt badawczy pracował na tym polu jedynie przez 1,63% całkowitego czasu trwania testu.

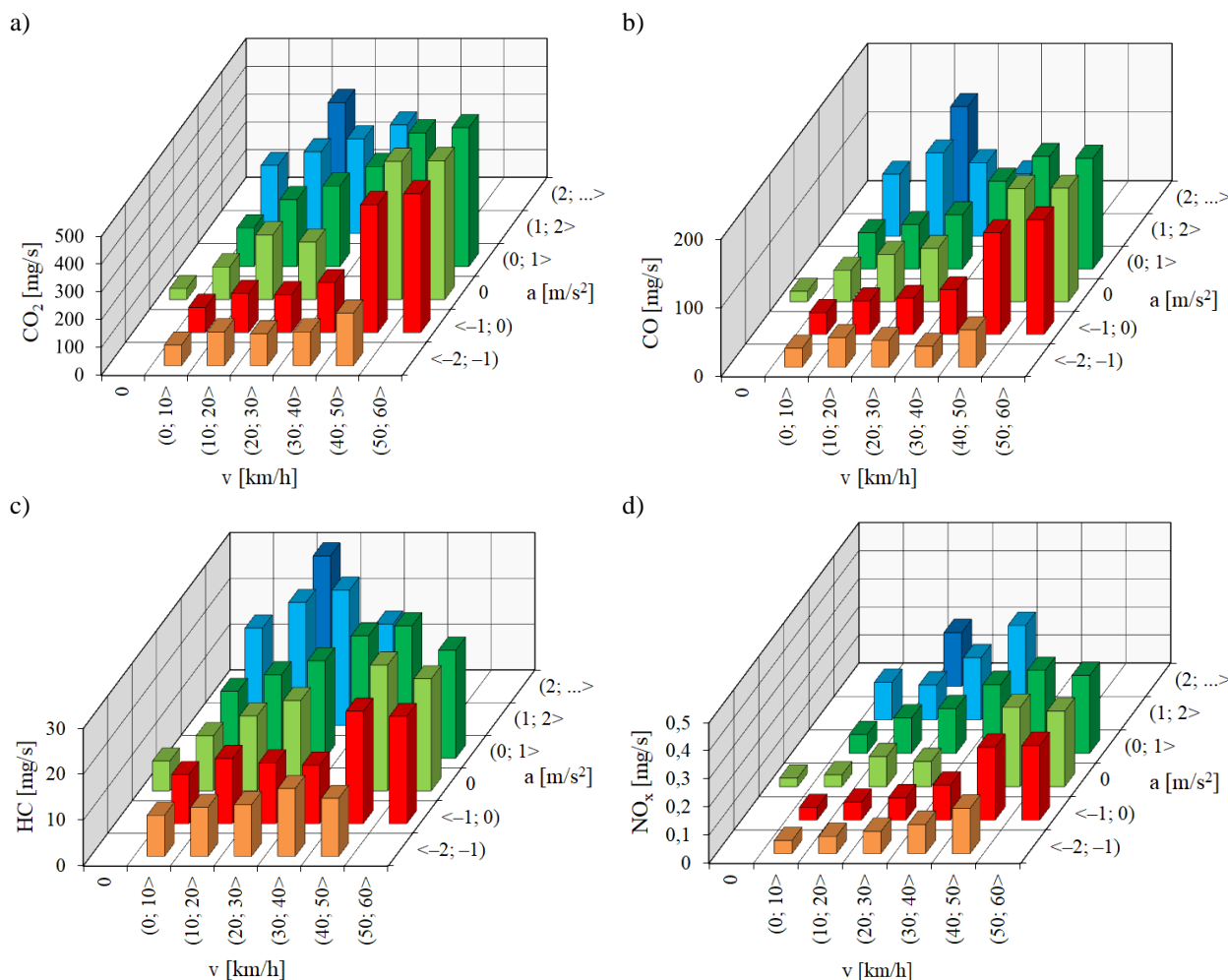
Analizując rozkład natężenia emisji CO odnotowano, że obszar występowania jej znaczących wartości stanowi zakres dużych prędkości pojazdu (40 km/h; 60 km/h) przy przyspieszeniach z zakresu $\langle -1 \text{ m/s}^2; 1 \text{ m/s}^2 \rangle$. Największa wartość wystąpiła zatem w polu eksploatacji opisanego przedziałami (40 km/h; 60 km/h) oraz $\langle -1 \text{ m/s}^2; 0 \text{ m/s}^2 \rangle$ odpowiednio dla prędkości oraz przyspieszenia pojazdu i wyniosła ona 166,80 mg/s (rys. 6.28b). Dostarcza to zatem informację, że największy wpływ na formowanie się emisji CO ma prędkość pojazdu. Pojazd 2 emitował średnio 105,30 mg/s CO w całym teście dla omawianego przypadku trasy pomiarowej.

Rozkład natężenia emisji HC wykazuje najbardziej równomierny charakter. Wartość średnia ze wszystkich okien pomiarowych wyniosła 18,83 mg/s dla wartości z zakresu od 8,95 mg/s do 29,90 mg/s (rys. 6.28 c). Największa wartość odnotowano w przedziałach średnich prędkości pojazdu (10 km/h; 20 km/h) i dodatnich przyspieszeń ($2 \text{ m/s}^2; \dots \text{ m/s}^2$). Zauważalny, pod względem znaczących wartości natężenia emisji HC, jest również obszar dużych prędkości z przedziałów (40 km/h; 60 km/h) i (50 km/h; 60 km/h) oraz przyspieszania z zakresu $\langle -1 \text{ m/s}^2; 1 \text{ m/s}^2 \rangle$. Wartość średnia natężenia emisji spalin dla tego obszaru wyniosła 25,41 mg/s. Natomiast wartość średnia emisji HC dla całego testu osiągnęła wynik 20,29 mg/s.

Podobnie jak w przypadku przejazdu trasą B przez pojazd 1, dla drugiego obiektu badawczego odnotowano znaczący obszar, pod względem wartości natężenia emisji NO_x, przede wszystkim w zakresie dużych prędkości pojazdu (30 km/h; 60 km/h) podczas dodatnich przyspieszeń (rys. 6.28d). Największą wartość zarejestrowano przy prędkościach opisanych przedziałem (30 km/h; 60 km/h) oraz przy przyspieszeniu pojazdu z przedziału ($1 \text{ m/s}^2; 2 \text{ m/s}^2$) i wyniosła ona 0,336 mg/s. Pojazd 2 emitował średnio 0,18 mg/s NO_x w całym teście realizowanym na trasie pomiarowej B.

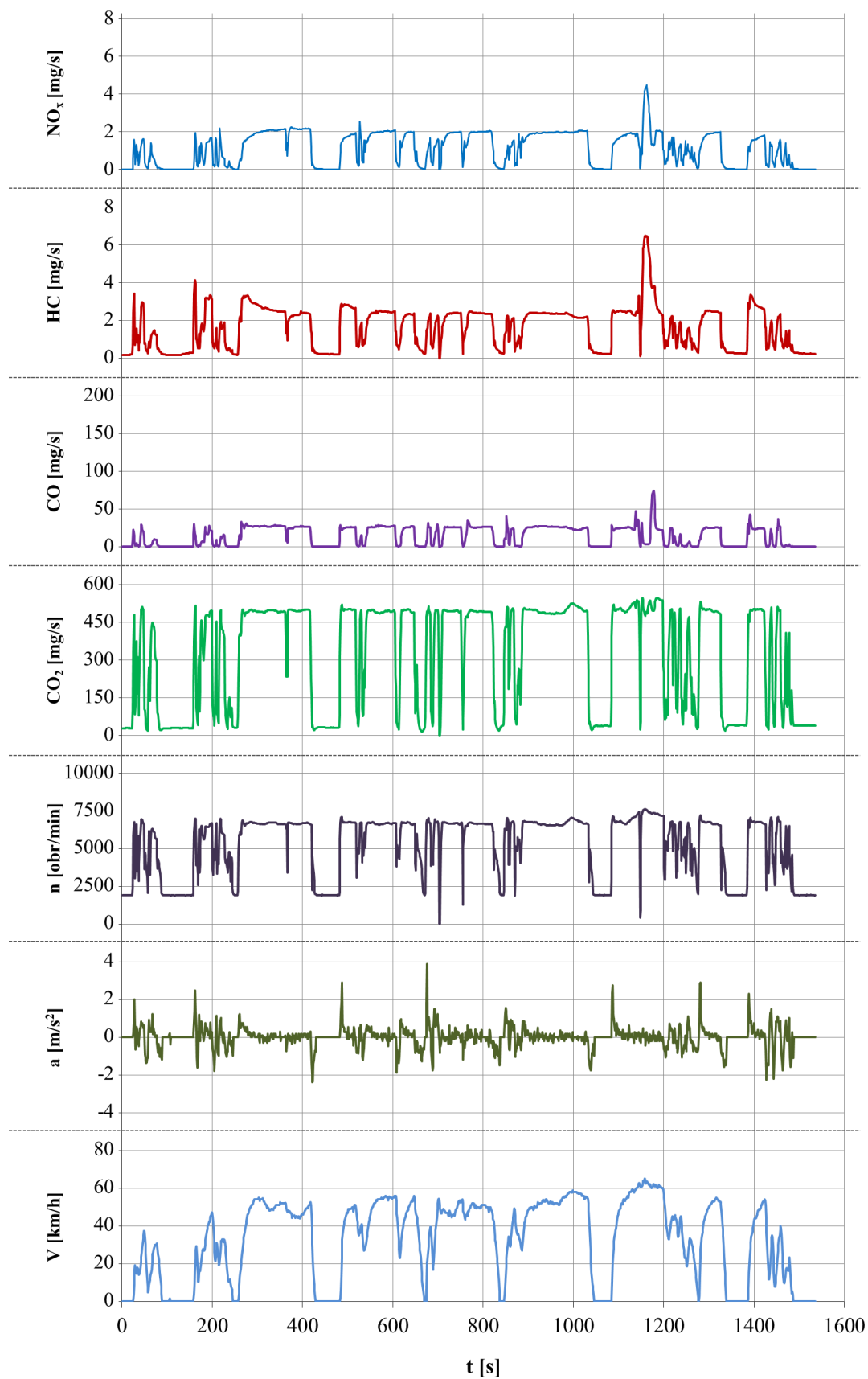
Analiza przebiegów prędkości pojazdów, prędkości wału korbowego oraz natężenia sekundowej emisji związków toksycznych, wykonanych w rzeczywistych warunkach eksploatacji wykazała, że dla pierwszego przejazdu największą zarejestrowaną prędkością jest jej wartość wynosząca nieco ponad 60 km/h, co prawdopodobnie wynikało z chwilowej zmiany ukształtowania terenu, a więc „jazdy wybiegiem”. Ponadto panowały sprzyjające ku temu warunki atmosferyczne tj. odpowiedni kierunek i prędkość wiatru. Na tej samej trasie pojazd 2 osiągnął maksymalną prędkość równą 52,7 km/h. W obu przypadkach widoczny jest wpływ rozpędzania pojazdu na kształtowanie się emisji związków toksycznych (rys. 6.29, 6.30). Pomimo podobnych przebiegów i wartości parametrów ruchu obiektów badawczych, homologowanych dla tego samego standardu emisji spalin, zauważalne są znaczące różnice w wartościach emisji CO

i HC. Jest to niewątpliwie związane z odmienną konstrukcją silników badanych pojazdów. Podobne tendencje odnotowano dla pojazdów 1 i 2 na trasie pomiarowej A, gdzie odnotowano podobne różnice w zarejestrowanych wartościach. Jedynie w przypadku emisji NO_x sytuacja jest odwrotna, dla których HC stanowią funkcję skutecznego reduktora.

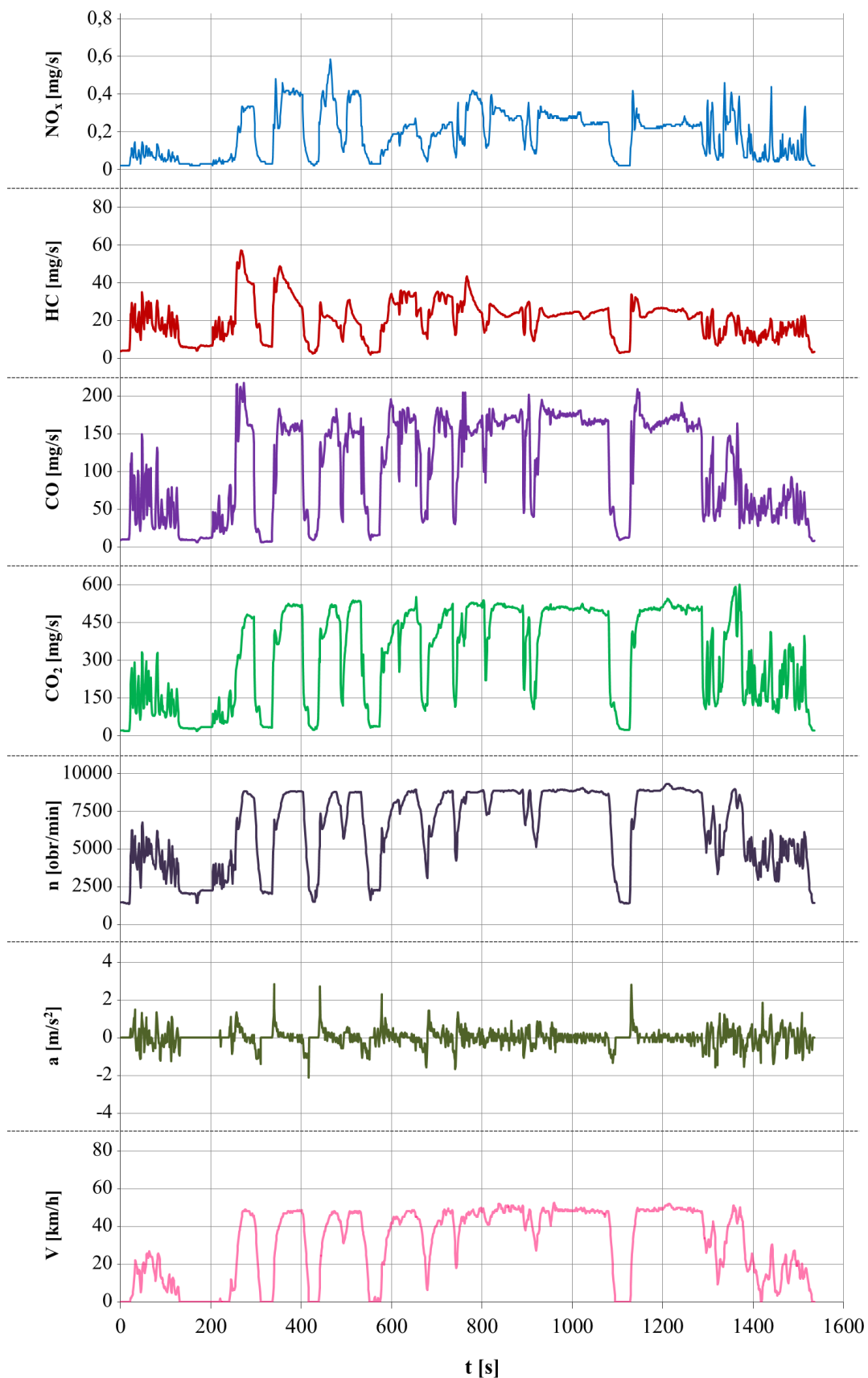


Rys. 6.28. Natężenie emisji a) CO_2 , b) CO, c) HC, d) NO_x w przedziałach prędkości i przyspieszenia pojazdu 2 podczas badań na trasie badawczej B

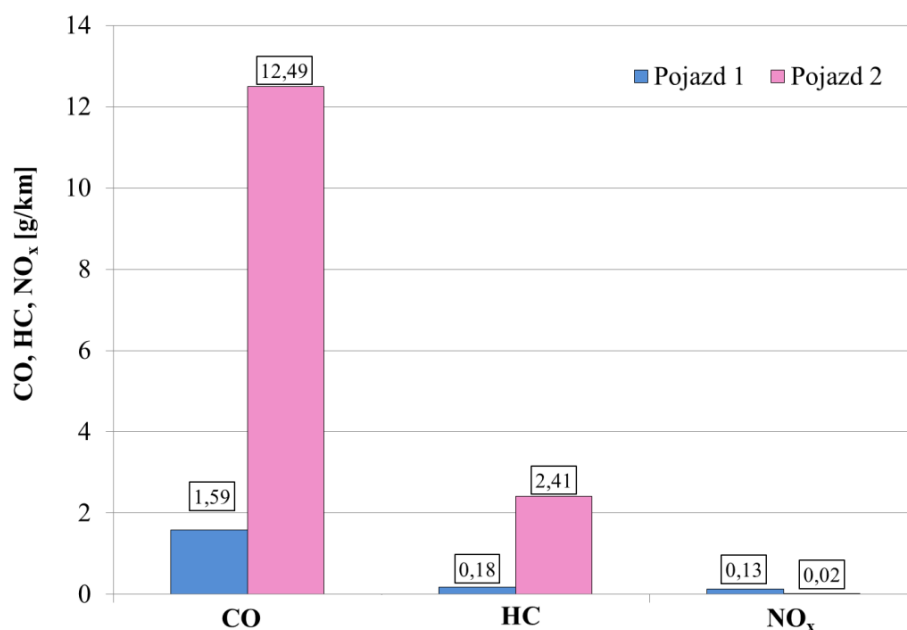
Podobnie jak w przypadku trasy pomiarowej A, przeprowadzono ocenę porównawczą wartości emisji drogowej składników toksycznych spalin dla wyników badań uzyskanych na trasie pomiarowej B dla pojazdów 1 i 2 (rys. 6.31). Ponownie dla związków HC i CO znacząco większe wartości emisji drogowej odnotowano dla pojazdu 2. Wartość emisji drogowej CO dla tego pojazdu wyniosła 12,49 g/km, różnica w stosunku do pojazdu 1 wyniosła 775%. Dla omawianej wcześniej trasy badawczej A, odnotowano 765% różnicę, zauważalna jest zatem utrzymana proporcja wyników uzyskanych podczas różnych testów. W przypadku HC wartość emisji drogowej dla pojazdu 2 jest ponad 13-krotnie większa w odniesieniu do wartości uzyskanej przez pojazd 1 (1,59 g/km). Odwrotna sytuacja wystąpiła dla emisji drogowej NO_x , jej wartość dla pojazdu 2 była mniejsza o 650% w stosunku do pojazdu 1.



Rys. 6.29. Przebieg prędkości i przyspieszeń pojazdu, prędkości obrotowej wału korbowego oraz natężenia emisji: CO, HC, NO_x, i CO₂ zarejestrowane podczas badań pojazdu 1 na trasie pomiarowej B



Rys. 6.30. Przebieg prędkości i przyspieszeń pojazdu, prędkości obrotowej wału korbowego oraz natężenia emisji: CO, HC, NO_x, i CO₂ zarejestrowane podczas badań pojazdu 2 na trasie pomiarowej B

Rys. 6.31. Emisja drogowa CO, HC oraz NO_x wyznaczona na podstawie badań na trasie B

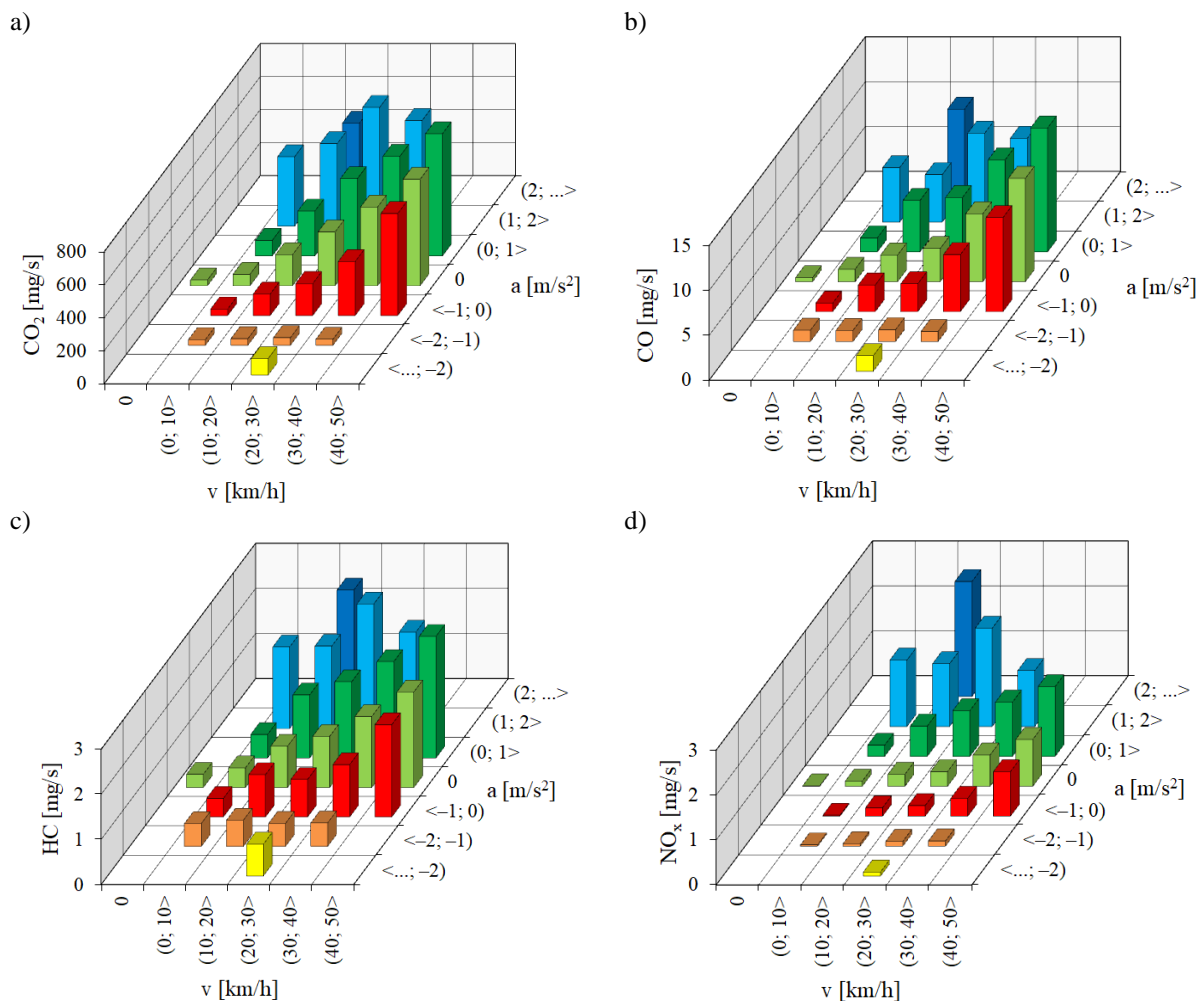
W tabeli 6.1 przedstawiono zestawienie parametrów jezdnych, w przedziałach których osiągnięto wartości maksymalne poszczególnych związków gazowych. Zestawiono ze sobą wyniki uzyskane dla pojazdu 1 i 2 na wszystkich trasach pomiarowych. Dla poszczególnych pól eksploatacji pojazdu przypisano również ich udział czasowy. Wartości maksymalne dla prawie 70% wszystkich przypadków odnotowano w zakresie dużych prędkości pojazdu (40 km/h; 70 km/h) podczas przyspieszeń z szerokiego zakresu (-1 m/s^2 ; 2 m/s^2). Wartości udziału czasu eksploatacji w tych polach wyniosły od 0,07 do 4,59%. W przypadku pojazdu 1 na wszystkich trasach pomiarowych zarejestrowano 1 znaczący obszar, w których natężenia emisji osiągnęły swoje wartości maksymalne. Jest to przedział dużych prędkości (50 km/h; 70 km/h) oraz zakres przyspieszeń (0 m/s^2 ; ... m/s^2), gdzie uzyskano przede wszystkim maksymalne wartości natężenia emisji HC, NO_x. W tym samym obszarze odnotowano maksymalne wartości natężenia emisji CO i CO₂ podczas przejazdu trasą A. W przypadku trasy B największa wartość natężenia emisji CO₂ wystąpiła podczas średniej prędkości pojazdu z przedziału (20 km/h; 30 km/h) przy maksymalnych przyspieszeniach. Pole eksploatacji opisane przedziałami (40 km/h; 50 km/h) oraz (2 m/s^2 ; ... m/s^2) odpowiednio dla prędkości oraz przyspieszenia pojazdu 1 stanowi obszar wystąpienia wartości maksymalnej CO na trasie B. Dla pojazdu 2 zarejestrowano dwa znaczące obszary tj. przedziały prędkości (40 km/h; 50 km/h) i (40 km/h; 50 km/h) oraz zakres (10 km/h; 40 km/h) podczas dodatnich przyspieszeń. Dla pierwszego z nich odnotowano maksymalne natężenia emisji CO₂ i CO. Udziały czasu eksploatacji dla tego obszaru wyniosły od 1,04 do 4,59%. Natomiast wartości największych wartości natężenia HC i NO_x odnotowano dla drugiego wymienionego obszaru. W tym przypadku udział czasu eksploatacji mieści się w zakresie wartości $<0,20\%$; $0,34\%$.

Tabela. 6.1 Zestawienie parametrów jezdnych, w przedziałach których osiągnięte zostały wartości maksymalne poszczególnych związków gazowych

Pojazd 1		
Związek szkodliwy	Trasa A	Trasa B
CO ₂	v = (50 km/h; 60 km/h) a = (1 m/s ² ; 2 m/s ²) u _t = 0,08%	v = (20 km/h; 30 km/h) a = (2 m/s ² ; ... m/s ²) u _t = 0,26%
CO	v = (50 km/h; 60 km/h) a = (0 m/s ² ; 1 m/s ²) u _t = 0,39%	v = (40 km/h; 50 km/h) a = (1 m/s ² ; 2 m/s ²) u _t = 0,07%
HC	v = (50 km/h; 60 km/h) a = (0 m/s ²) u _t = 0,70%	v = (60 km/h; 70 km/h) a = (0 m/s ² ; 1 m/s ²) u _t = 1,51%
NO _x	v = (50 km/h; 60 km/h) a = (1 m/s ² ; 2 m/s ²) u _t = 0,08%	v = (60 km/h; 70 km/h) a = (-1 m/s ² ; 0 m/s ²) u _t = 1,57%
Pojazd 2		
Związek szkodliwy	Trasa A	Trasa B
CO ₂	v = (40 km/h; 50 km/h) a = (0 m/s ²) u _t = 1,16%	v = (50 km/h; 60 km/h) a = (0 m/s ²) u _t = 1,63%
CO	v = (40 km/h; 50 km/h) a = (0 m/s ² ; 1 m/s ²) u _t = 4,59%	v = (50 km/h; 60 km/h) a = (-1 m/s ² ; 0 m/s ²) u _t = 1,04%
HC	v = (20 km/h; 30 km/h) a = (2 m/s ² ; ... m/s ²) u _t = 0,21%	v = (10 km/h; 20 km/h) a = (2 m/s ² ; ... m/s ²) u _t = 0,26%
NO _x	v = (10 km/h; 20 km/h) a = (2 m/s ² ; ... m/s ²) u _t = 0,34%	v = (30 km/h; 40 km/h) a = (1 m/s ² ; 2 m/s ²) u _t = 0,20%

Analizy ekologiczne przeprowadzone dla pojazdów nr 3 i 4, różniących się od dwóch pierwszych objętością skokową silnika, która wynosiła 125 cm³, dokonano w podobny sposób. To umożliwiło poznanie wpływu parametrów jezdnych na zawartość związków toksycznych i szkodliwych w gazach wylotowych z obiektów badawczych. Na podstawie wyznaczonej charakterystyki natężenia emisji CO₂ dla przypadku relacji pojazd 3 – trasa A widoczna jest wyraźna zależność od prędkości i przyspieszenia pojazdu (rys. 6.32a). Przykładowo, analizując natężenie emisji w kierunku zwiększających się prędkości pojazdu z przedziału (30 km/h; 40 km/h) do (40 km/h; 50 km/h) odnotowano odpowiednio wartości 603,62 mg/s oraz 740,32 mg/s dla tego samego przedziału przyspieszeń opisanego przedziałem (1 m/s²; 2 m/s²). Analogiczna sytuacja występuje ze zwiększaniem przyspieszenia pojazdu np. dla wartości przyspieszeń z przedziałów (0 m/s²; 1 m/s²) i (1 m/s²; 2 m/s²) zarejestrowano kolejno natężenia emisji CO₂ równe 603,62 mg/s oraz 640,61 mg/s, przy prędkości pojazdu opisanego przedziałem (30 km/h;

40 km/h). Wartość maksymalna wystąpiła w zakresie dodatnich przyspieszeń (1 m/s^2 ; 2 m/s^2) oraz średnich prędkości (20 km/h; 30 km/h) i wyniosła $719,75 \text{ mg/s}$.



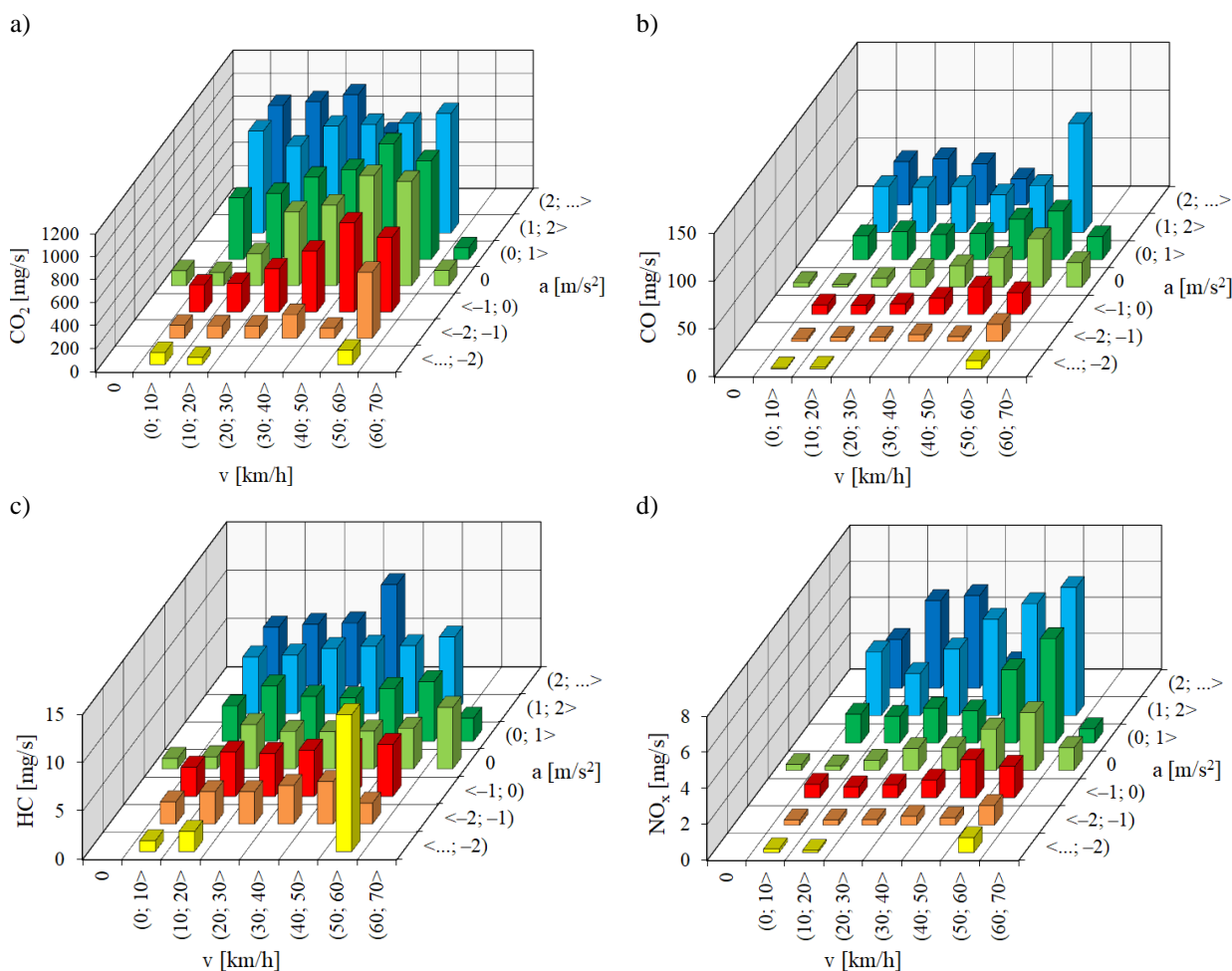
Rys. 6.32. Natężenie emisji a) CO_2 , b) CO, c) HC, d) NO_x w przedziałach prędkości i przyspieszenia pojazdu 3 podczas badań na trasie badawczej A

Takie same zależności oraz podobne rozkłady otrzymano dla charakterystyk natężenia emisji CO oraz HC (rys. 6.32b,c). Dla natężenia emisji CO wartość maksymalną, która wyniosła $13,82 \text{ mg/s}$, odnotowano podczas dodatnich przyspieszeń z przedziału (0 m/s^2 ; 1 m/s^2) i prędkości pojazdu opisaną przedziałem (40 km/h; 50 km/h). Wartość średnia dla tego związku w całym teście na trasie pomiarowej A jest równa $5,42 \text{ mg/s}$. W przypadku charakterystyki natężenia emisji HC, porównując do wcześniej analizowanych związków, zauważalny jest bardziej równomierny rozkład jej wartości. Maksimum zarejestrowano w obszarze opisanym parametrami (1 m/s^2 ; 2 m/s^2) oraz (20 km/h; 30 km/h), a wartość wyniosła $2,42 \text{ mg/s}$. W tym samym polu parametrów jezdnych odnotowano wartość maksymalną natężenia emisji CO_2 . W silnikach ZI większa dawka paliwa dostarczana do tej samej ilości powietrza powoduje globalny i lokalny niedobór tlenu, które są warunkami sprzyjającymi powstawaniu emisji HC. Wartość średnia sekundowego natężenia emisji HC w całym teście jest równa $1,26 \text{ mg/s}$.

Znaczące wartości natężenia emisji NO_x obserwuje się przede wszystkim w zakresie maksymalnych przyspieszeń pojazdu (rys. 6.32d). Dla omawianego przypadku największa emisja

NO_x , wynosząca 2,56 mg/s wyznaczona została w obszarze prędkości pojazdu (10 km/h; 20 km/h) i przyspieszeń w przedziale (2 m/s²; ... m/s²). Minimalne wartości analizowanego związku toksycznego uzyskano w obszarze eksploatacji na postoju i podczas małych prędkości pojazdu w przedziałach ujemnych wartości przyspieszeń.

Podczas badań w rzeczywistych warunkach eksploatacji dla relacji pojazd 4 – trasa A zarejestrowano wartości natężenia emisji CO_2 w całym zakresie prędkości obiektu badawczego. Emisja CO_2 jest bezpośrednio związana z parametrami eksploatacji obiektu (rys. 6.33a). W miarę zwiększania się wartości obu zmiennych wielkości, zwiększeniu ulega także wartość natężenia emisji CO_2 w zakresie 60,30–1039,05 mg/s. Dla analizowanego przypadku największą wartość zarejestrowano zatem podczas dodatnich przyspieszeń z przedziału (1 m/s²; 2 m/s²) oraz dużych prędkości pojazdu z zakresu (50 km/h; 60 km/h), jednakże obiekt badawczy pracował na tym polu jedynie przez 0,17% całkowitego czasu trwania testu. Wartość natężenia emisji CO_2 dla parametrów opisujących postój pojazdu wyniosła 129,96 mg/s, natomiast wartość średnia emisji tego związku w całym teście 484,27 mg/s.



Rys. 6.33. Natężenie emisji a) CO_2 , b) CO, c) HC, d) NO_x w przedziałach prędkości i przyspieszenia pojazdu 4 podczas badań na trasie badawczej A

Analizując charakterystykę natężenia emisji CO można zauważyć, że jej wartości zarejestrowano dla całego zakresu prędkości obrotowych, jednakże ich rozkład nie jest tak równo-

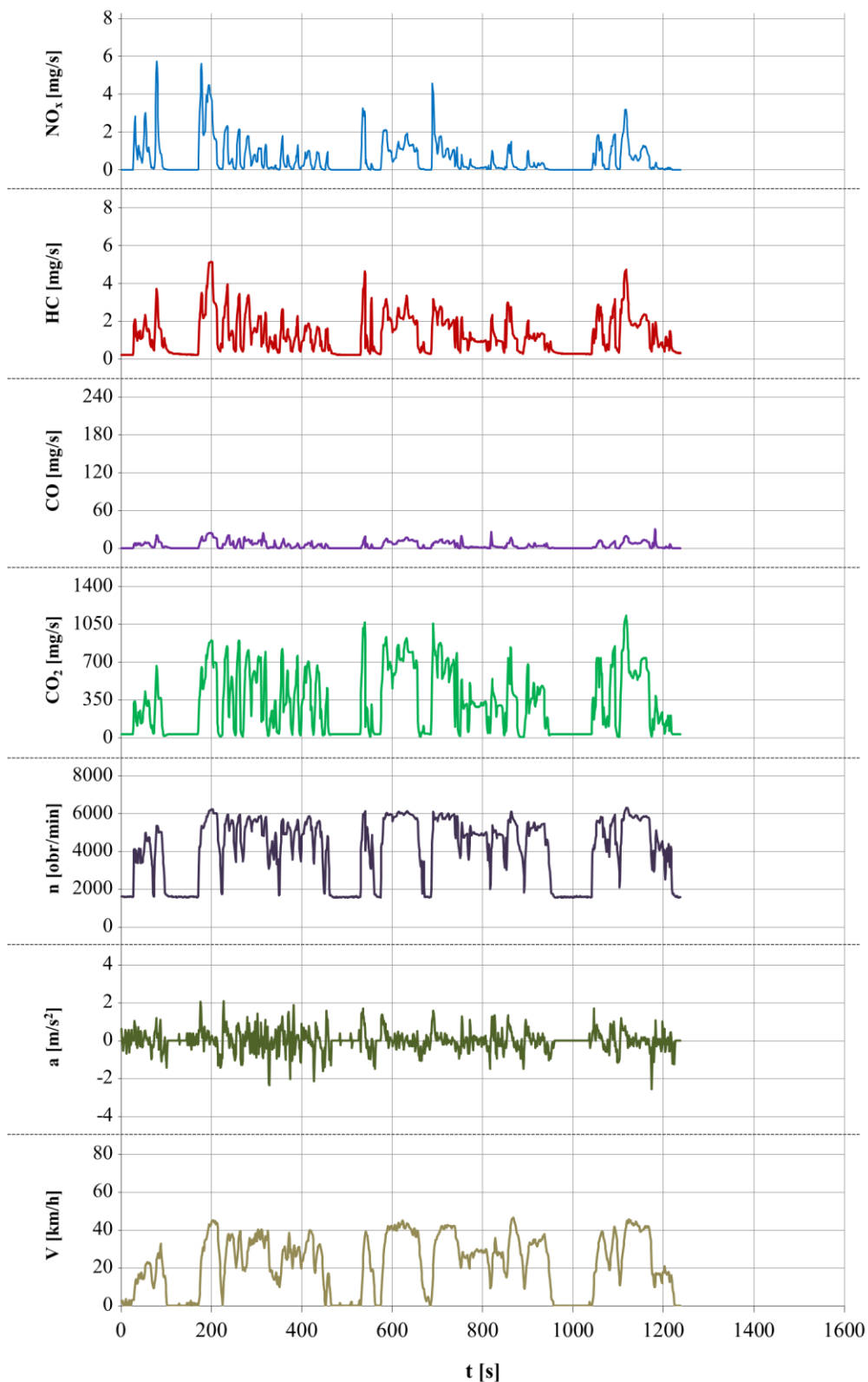
mierny jak w przypadku charakterystyki CO₂ (rys. 6.33b). Największą wartość, wynoszącą 113,93 mg/s, zarejestrowano w polu charakterystyki opisanym przedziałami (1 m/s²; 2 m/s²) oraz (50 km/h; 60 km/h) odpowiednio dla przyspieszeń i prędkości pojazdu, tak jak w przypadku emisji CO₂. Duże prędkości pojazdu oraz duże dawki dostarczanego paliwa stanowią warunki sprzyjające formowaniu się tego związku, którego przyczyną są lokalne i globalne niedobory tlenu. Na ich powstawanie mogła wpłynąć również lokalnie występująca wysoka temperatura w komorze spalania, która stanowi warunki sprzyjające dysocjacji termicznej CO₂. Wartość średnia emisji CO dla całego testu wyniosła 18,31 mg/s.

Wartości natężenia emisji HC, tak jak w przypadku poprzednich związków szkodliwych, są również zależne od parametrów eksploatacyjnych pojazdu (rys. 6.33c). Największe wartości tego związku zarejestrowano dla dużych przyspieszeń opisanymi przedziałami (1 m/s²; 2 m/s²) oraz (2 m/s²; ... m/s²) w prawie całym zakresie prędkości pojazdu (0 km/h; 60 km/h). Wartość maksymalną (14,18 mg/s) odnotowano natomiast dla przedziału ujemnych przyspieszeń (... m/s²; -2 m/s²) oraz dużej prędkości opisanym przedziałem (50 km/h; 60 km/h). Do zwiększenia natężenia emisji HC przyczynia się niewystarczający czas na dokładne wymieszanie wtryskiwanej dawki paliwa, podczas dużych prędkości pojazdu i w konsekwencji dużych prędkości obrotowych wału korbowego. Otrzymana wartość średnia emisji HC w teście pojazdu 4 na trasie pomiarowej A wyniosła 3,67 mg/s.

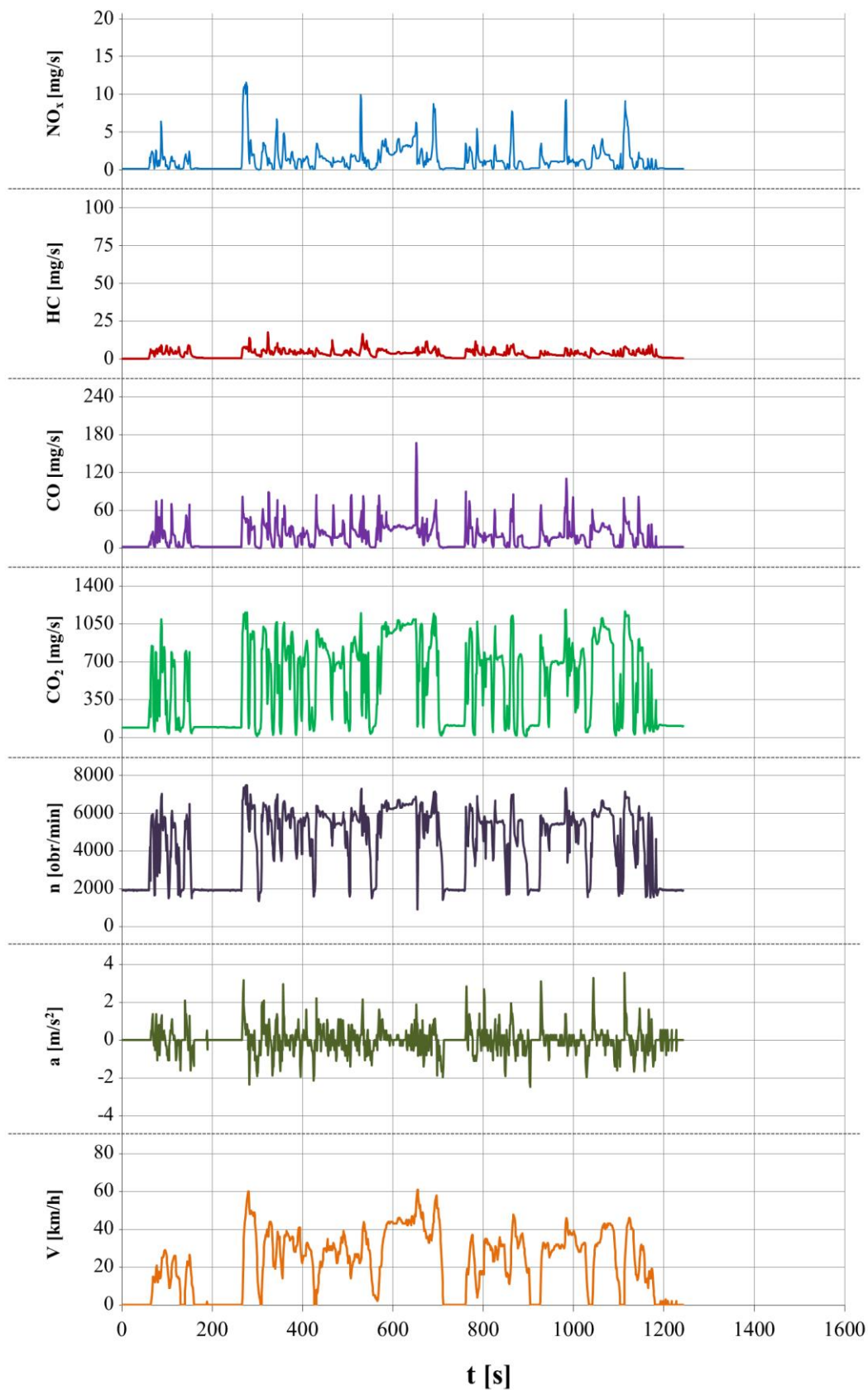
Ostatnim analizowanym związkiem toksycznym w przedziałach prędkości pojazdu i jego przyspieszeń są NO_x (rys. 6.33d). Natężenie jego emisji jest zależne przede wszystkim od przyspieszenia pojazdu. Znaczący obszar stanowi zakres dużych przyspieszeń z przedziału (0 m/s²; ... m/s²), dla którego zarejestrowano wartość maksymalną. W związku z tym, w polu opisanym przedziałami (1 m/s²; 2 m/s²); (50 km/h; 60 km/h) przyspieszenia i prędkości pojazdu, zarejestrowano największą wartość i wyniosła ona 7,13 mg/s. Duże przyspieszenia pojazdu generują wyższą temperaturę i ciśnienie w cylindrze, co bezpośrednio sprzyja formowaniu emisji NO_x.

Na podstawie wartości natężenia emisji związków szkodliwych oraz parametrów jezdnych pojazdów 3 i 4 oraz prędkości obrotowej wału korbowego ich silników zarejestrowanych na trasie pomiarowej A można stwierdzić, że natężenia emisji CO i HC osiągają największe wartości podczas rozpędzania pojazdu (rys. 6.34 i 6.35). Dla pojazdu 4 odnotowano znacznie większe wartości natężenia emisji obu związków. Wynika to przede wszystkim z większego obszaru zmienności parametrów jezdnych pojazdu 4 na trasie pomiarowej, dla którego odnotowano dwa dodatkowe przedziały dużych prędkości pojazdu z zakresu (50 km/h; 70 km/h). W związku z tym, średnie prędkości w całym teście wyniosły 21,8 km/h oraz 31,4 km/h odpowiednio dla pojazdu 3 i 4, dla których różnica wynosi 44%.

Analizując przebiegi natężenia emisji NO_x dla obu pojazdów, odnotowano zauważalny wpływ parametrów ruchu (przyspieszania) pojazdów oraz związane z nimi zmiany obciążenia. Ponownie większe chwilowe wartości natężenia emisji NO_x podczas przejazdu trasą pomiarową A zarejestrowano dla pojazdu 4, jednakże różnice te nie są tak zauważalne jak w przypadku emisji HC i CO. Poza składnikami toksycznymi spalin, analizie poddano również natężenia emisji szkodliwego CO₂. Na podstawie ich przebiegów oraz krzywej prędkości obrotowej wału korbowego zauważalna jest ścisła zależność między tymi wielkościami.

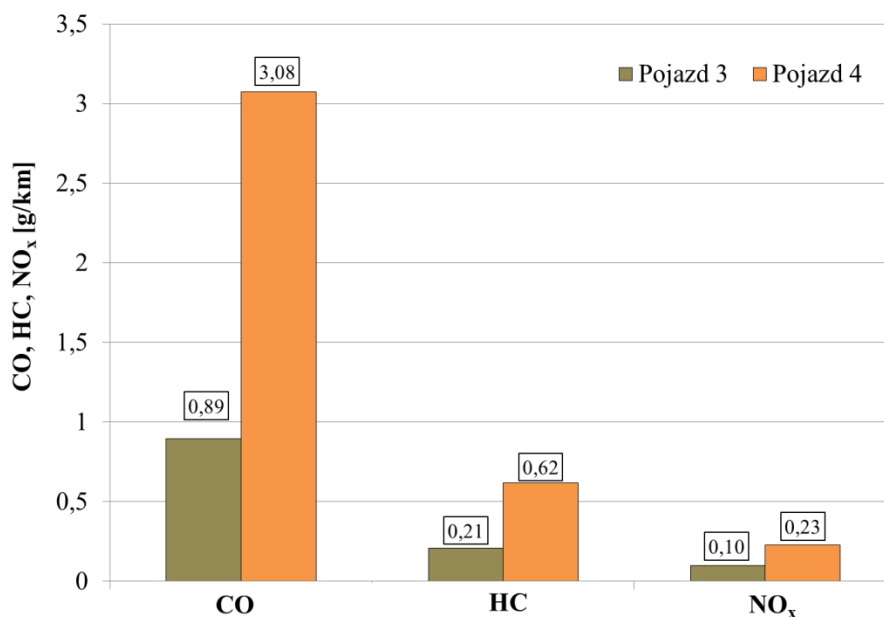


Rys. 6.34. Przebieg prędkości i przyspieszeń pojazdu, prędkości obrotowej wału korbowego oraz natężenia emisji: CO, HC, NO_x, i CO₂ zarejestrowane podczas badań pojazdu 3 na trasie pomiarowej A



Rys. 6.35. Przebieg prędkości i przyspieszeń pojazdu, prędkości obrotowej wału korbowego oraz natężenia emisji: CO, HC, NO_x, i CO₂ zarejestrowane podczas badań pojazdu 4 na trasie pomiarowej A

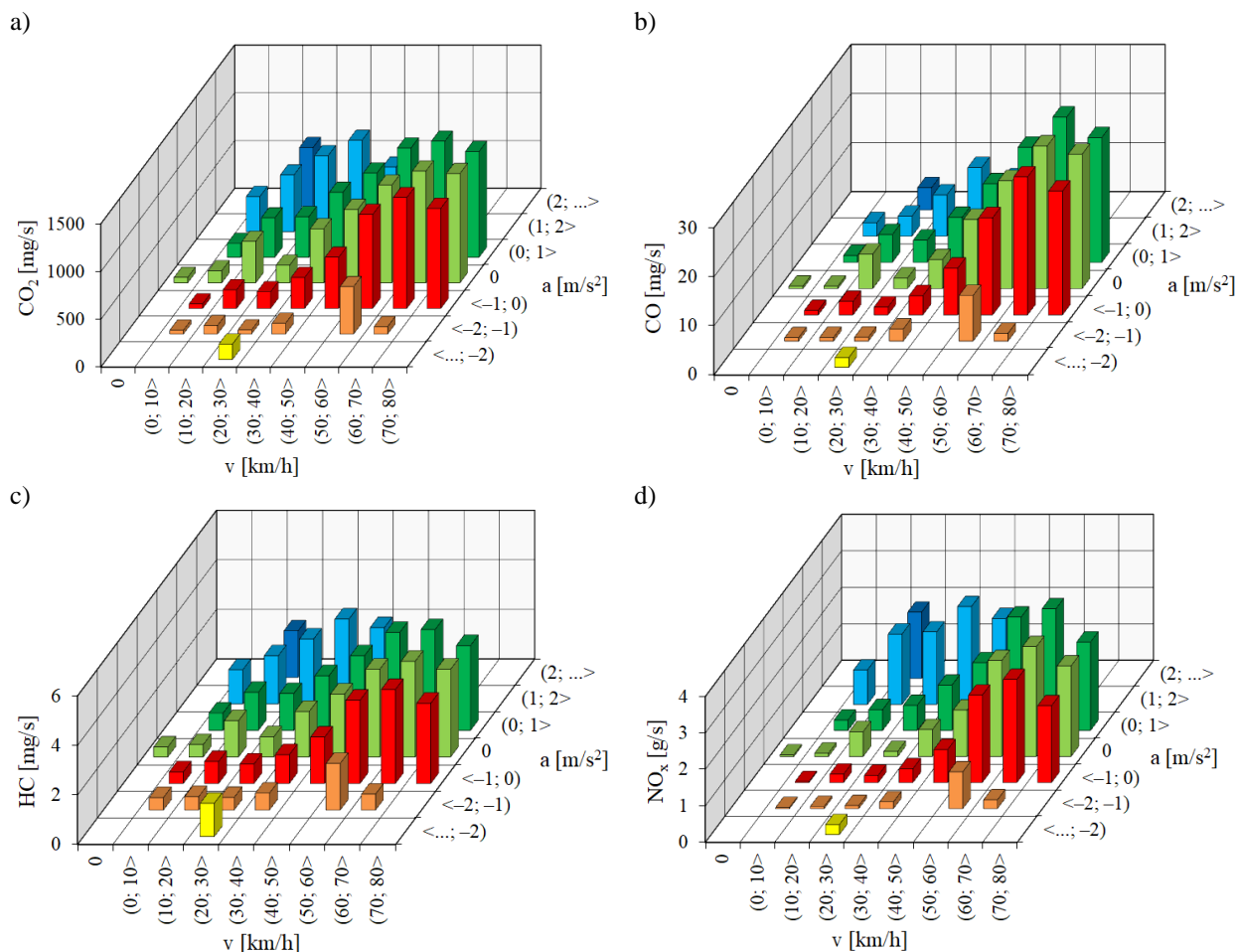
W celu dokonania oceny porównawczej zarejestrowanych wyników badań uzyskanych na trasie pomiarowej A, zestawiono otrzymane dla pojazdów 3 i 4 wartości emisji drogowej składników toksycznych spalin (rys. 6.36). We wszystkich przypadkach większe wartości emisji drogowej odnotowano dla pojazdu 4. Końcowa wartość emisji CO dla pojazdu 4 wyniosła 3,08 g/km, różnica w stosunku do pojazdu 3 ukształtowała się na poziomie 246%. Dla HC wartość emisji drogowej, ze 195% różnicą w odniesieniu do pojazdu 3, wyniosła 0,62 g/km. Najmniejsza różnica wystąpiła w przypadku NO_x, dla którego wartość emisji drogowej dla pojazdu 3 była około dwukrotnie mniejsza w stosunku do pojazdu 4.



Rys. 6.36. Emisja drogowa CO, HC oraz NO_x wyznaczona na podstawie badań na trasie A

Do zarejestrowanych warunków eksploatacji na trasie pomiarowej B przez pojazd 3 odniesiono wartości natężenia emisji związków gazowych. Na podstawie otrzymanych zależności można stwierdzić, że natężenie emisji CO₂ zależało ściśle, podobnie jak we wcześniej omawianych przypadkach, od prędkości i przyspieszenia (rys. 6.37a). Wartość maksymalną (1216,39 mg/s) odnotowano podczas dużych prędkości pojazdu z przedziału (60 km/h; 70 km/h) dla dodatnich przyspieszeń (1 m/s²; 2 m/s²). Natężenie emisji CO₂ dla ostatniego przedziału prędkości tj. (70 km/h; 80 km/h) również jest znaczące. Ich wartości zwiększały się od 1084,14 mg/s do 1108,00 mg/s ze zwiększającymi się wartościami przyspieszania, jednakże udział czasu eksploatacji w tym obszarze wyniósł 1%. Średnia wartość emisji sekundowej w całym teście wyniosła 576,20 mg/s.

Podobne zależności odnotowano dla natężenia emisji CO, jednak ich znaczące wartości koncentrują się w obszarze dużych prędkości pojazdu z zakresu (40 km/h; 80 km/h), które zwiększają się dla coraz to większych przedziałów przyspieszenia pojazdu (rys. 6.37b). W związku z tym największe natężenie emisji zarejestrowano dla prędkości opisanego przedziałem (60 km/h; 70 km/h) i przyspieszenia z przedziału (0 m/s²; 1 m/s²), a jej wartość wyniosła 29,67 mg/s. Średnia dla omawianego związku w całym teście na trasie pomiarowej B stanowi 10,91 mg/s.



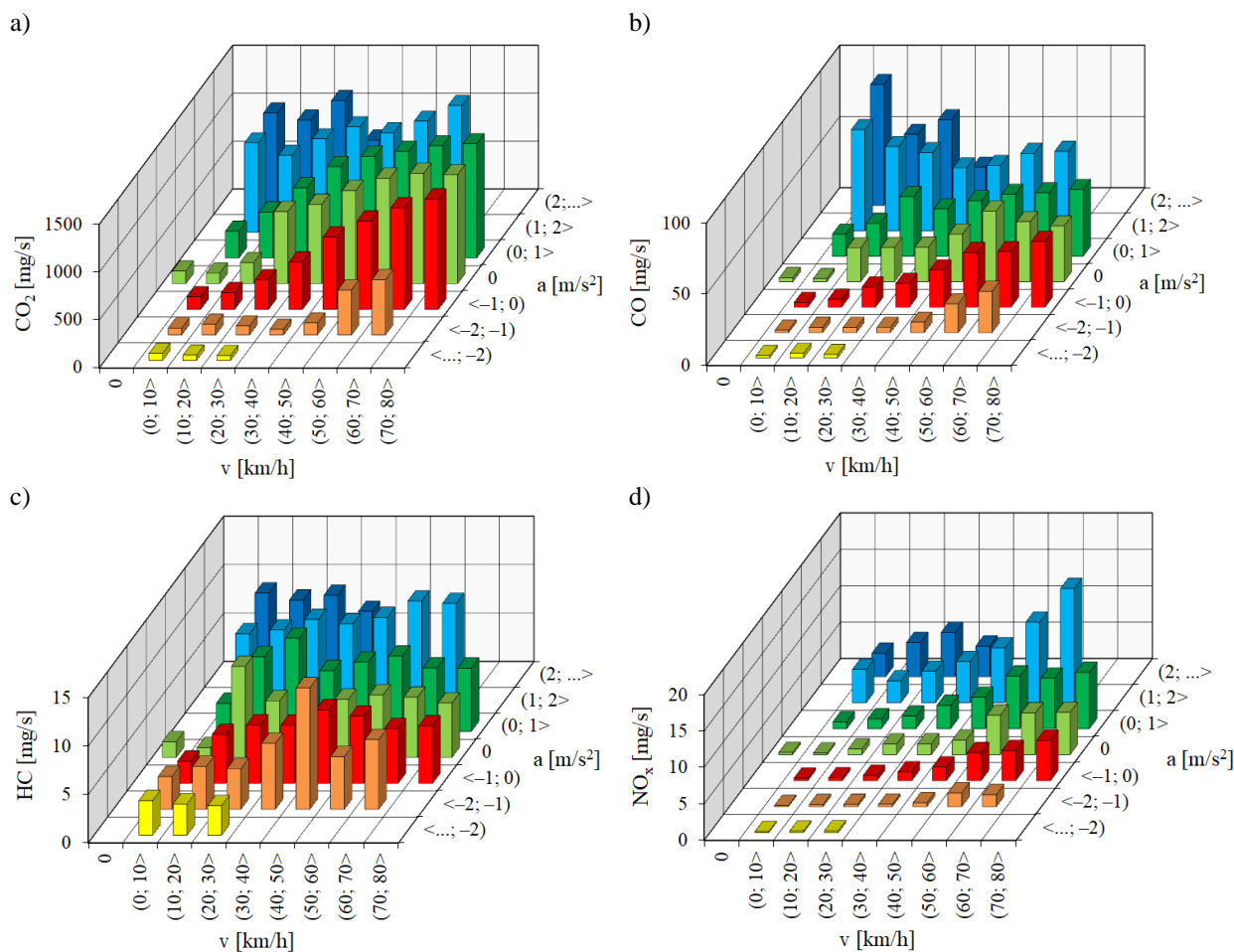
Rys. 6.37. Natężenie emisji a) CO₂, b) CO, c) HC, d) NO_x w przedziałach prędkości i przyspieszenia pojazdu 3 podczas badań na trasie badawczej B

Charakterystyka natężenia emisji HC cechuje się bardziej równomiernym rozkładem wartości, w porównaniu do omawianej powyżej charakterystyki emisji CO (rys. 6.37c). Maksymalną wartość (4,07 mg/s) odnotowano w pojedynczym oknie pomiarowym (60 km/h; 70 km/h) i (0 m/s^2 ; 1 m/s^2) odpowiednio dla prędkości i przyspieszenia pojazdu. Średnia wartość natężenia węglowodorów w całym przejeździe wyniosła 2,02 mg/s. Większość czynników, sprzyjających powstawaniu nadmiernej ilości CO w spalinach powodują również zwiększoną emisję HC, stąd maksima lokalne obu związków zarejestrowano w dokładnie tych samych obszarach parametrów jezdnych.

Przedstawiona charakterystyka natężenia emisji NO_x wskazuje, iż największa wartość (3,33 mg/s) wystąpiła, podobnie jak w przypadku emisji CO i HC, w przedziale dużych prędkości (60 km/h; 70 km/h) i dodatnich przyspieszeń z przedziału (0 m/s^2 ; 1 m/s^2). Udział czasu eksploatacji pojazdu w tym pojedynczym oknie pomiarowym wyniósł 3,52%. Analizując jednak charakter rozkładu wartości natężenia emisji NO_x jest on najbardziej zbliżony do rozkładu otrzymanego na charakterystyce emisji CO₂ (rys. 6.37d). Pojazd 3 na trasie pomiarowej B emitował średnio 1,24 mg/s NO_x.

Na podstawie wyznaczonej charakterystyki natężenia emisji CO₂ dla przypadku relacji pojazd 4 – trasa B widoczna jest wyraźna zależność jej wartości od prędkości i przyspieszenia pojazdu (rys. 6.38a). Przykładowo, analizując natężenie emisji w kierunku zwiększających się

prędkości pojazdu z sąsiadujących przedziałów (40 km/h; 50 km/h) i (50 km/h; 60 km/h) odnotowano odpowiednio wartości 755,25 mg/s oraz 920,63 mg/s dla tego samego przedziału przyspieszeń opisanego przedziałem $\langle -1 \text{ m/s}^2; 0 \text{ m/s}^2 \rangle$. Analogicznie taka sama sytuacja występuje w miarę zwiększania przyspieszenia pojazdu np. dla wartości przyspieszeń z przedziałów $\langle 0 \text{ m/s}^2; 1 \text{ m/s}^2 \rangle$ i $\langle 1 \text{ m/s}^2; 2 \text{ m/s}^2 \rangle$ zarejestrowano natężenia emisji CO₂ równe 1115,02 mg/s oraz 1161,65 mg/s, przy prędkości pojazdu opisanego przedziałem (50 km/h; 60 km/h). Wartość maksymalna wystąpiła w zakresie dodatnich przyspieszeń $\langle 1 \text{ m/s}^2; 2 \text{ m/s}^2 \rangle$ oraz dużych prędkości (60 km/h; 70 km/h) i wyniosła 1325,90 mg/s.



Rys. 6.38. Natężenie emisji a) CO₂, b) CO, c) HC, d) NO_x w przedziałach prędkości i przyspieszenia pojazdu 4 podczas badań na trasie badawczej B

W przypadku charakterystyki natężenia emisji CO dla pojazdu 4 odnotowano obszar znaczących wartości dla dodatnich przyspieszeń pojazdu, a więc i znacznego obciążenia silnika, co wiąże się ze zwiększoną dawką paliwa. Maksima odnotowano zatem w przedziale dodatnich przyspieszeń $\langle 1 \text{ m/s}^2; 2 \text{ m/s}^2 \rangle$ i prędkości pojazdu opisanego przedziałem (50 km/h; 60 km/h), gdzie wyniosła 10,80 mg/s (rys. 6.38b). Analizując charakterystykę natężenia emisji HC można zauważyć, że jej wartości zarejestrowano w całym zakresie prędkości i przyspieszenia pojazdu, a jej rozkład jest bardziej równomierny w porównaniu do charakterystyki uzyskanej dla pojazdu 3 (rys. 6.38c). Mimo, iż większe wartości emisji HC zarejestrowano w obszarze dodatnich przyspieszeń, jej maksimum (12,54 mg/s) wyznaczono w przedziale dużych prędkości

(40 km/h; 50 km/h) oraz ujemnych przyspieszeń (-2 m/s^2 ; -1 m/s^2). Pojazd emitował średnio 5,72 mg/s omawianego związku toksycznego.

Ostatnim analizowanym związkiem toksycznym w przedziałach prędkości pojazdu i jego przyspieszeń jest NO_x (rys. 6.38d). W tej charakterystyce zauważalne są wyraźne piki wartości natężenia emisji NO_x , które wystąpiły w pojedynczych oknach pomiarowych w przedziale przyspieszeń z przedziału (1 m/s^2 ; 2 m/s^2) i dużych prędkości z zakresu (40 km/h; 70 km/h). Ich wartości, wraz z zarejestrowaną wartością maksymalną, wyniosły 7,53 mg/s, 11,04 mg/s i 15,67 mg/s odpowiednio dla przedziałów prędkości (40 km/h; 50 km/h), (50 km/h; 60 km/h) oraz (60 km/h; 70 km/h). Wartość średnia w całym teście na trasie pomiarowej B wyniosła 3,02 mg/s.

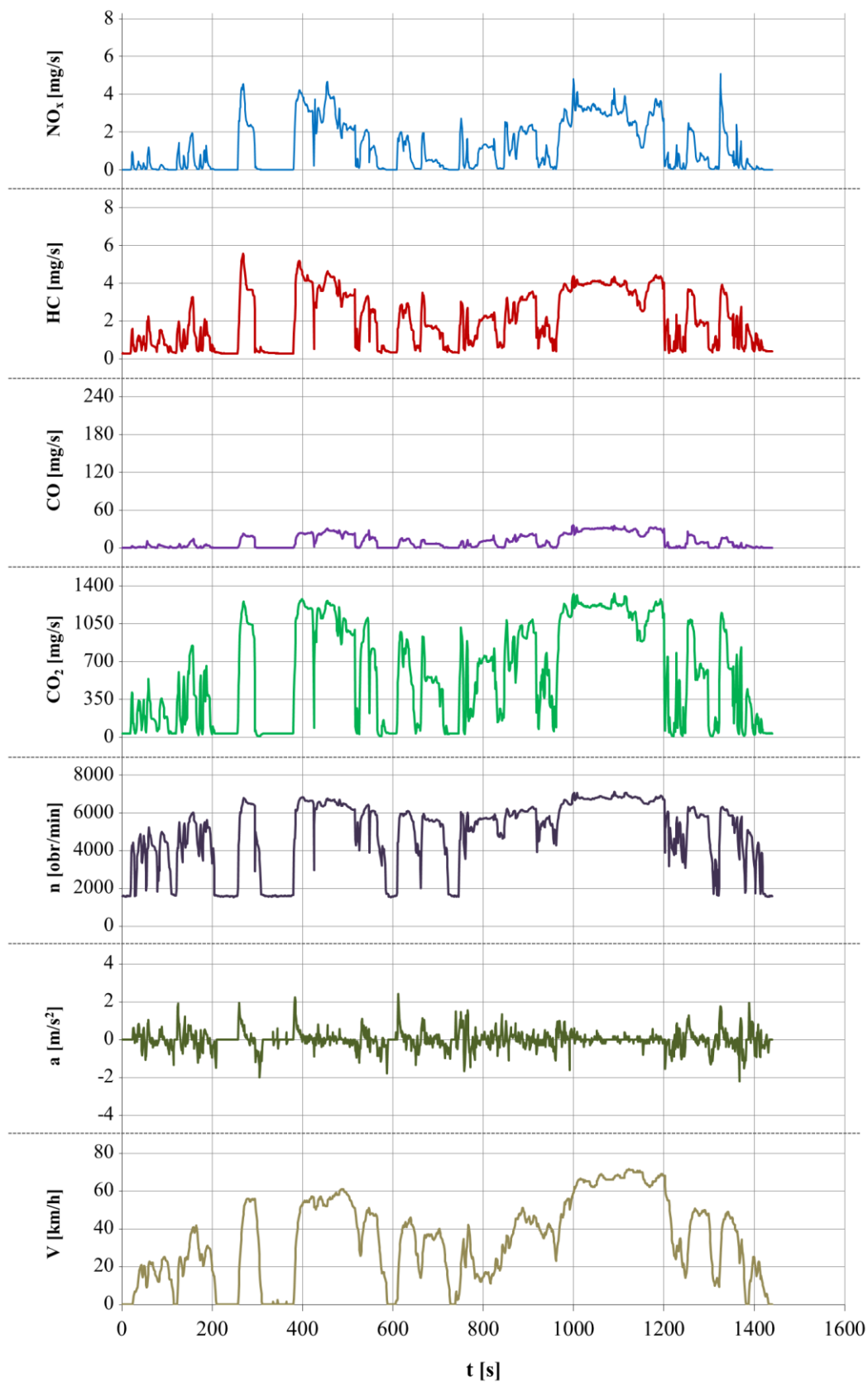
Na podstawie wartości natężenia emisji związków szkodliwych oraz parametrów jezdnych pojazdów 3 i 4 na trasie pomiarowej B można stwierdzić, że natężenia emisji CO i HC osiągają największe wartości podczas zwiększania prędkości pojazdu (rys. 6.39, 6.40). Ich średnie wartości w testach wyniosły odpowiednio 33,4 km/h i 36 km/h. Dla pojazdu 4 odnotowano natomiast, podobnie jak w przypadku trasy A, znacznie większe wartości natężenia emisji obu związków. Wynika to z bardziej dynamicznego przebiegu krzywej przyspieszenia pojazdu dla obiektu badawczego nr 4.

Zebrane w rzeczywistych warunkach dane pomiarowe na trasie badawczej B pozwoliły na wyznaczenie wartości emisji drogowej dla związków toksycznych tj. CO, HC i NO_x (rys. 6.41). Wartość emisji drogowej CO dla pojazdu 4 wyniosła 2,74 g/km, natomiast dla pojazdu 3 1,16 g/km. Pojazd 4 charakteryzuje się zatem ponad dwukrotnie większą emisją tego związku względem pojazdu 3. Te same tendencje odnotowano dla pozostałych związków toksycznych. W przypadku HC wartości emisji drogowej wyniosły 0,22 g/km oraz 0,57 g/km odpowiednio dla pojazdu 3 i 4. Dla wartości NO_x zarejestrowano 230% różnicę emisji drogowej pomiędzy analizowanymi pojazdami, przy czym większą wartością ponownie charakteryzuje się pojazd 4 (0,30 g/km). Na trasie B otrzymano zatem porównywalne różnice w wartościach emisji drogowej w odniesieniu do wyników uzyskanych na trasie A dla tych samych obiektów badawczych.

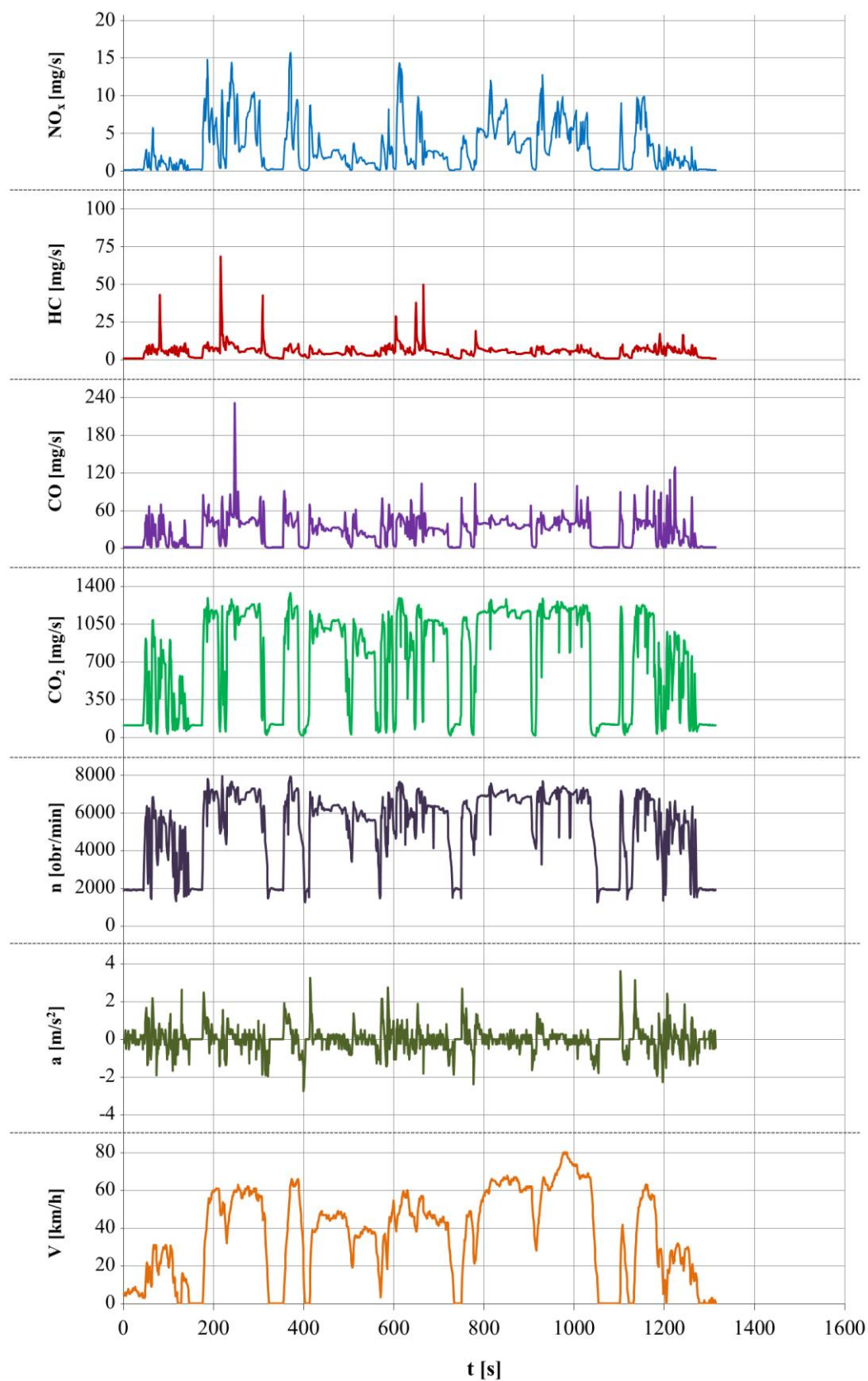
Charakterystyki emisyjne uzyskane na podstawie badań pojazdu 3 na trasie pomiarowej C przedstawiono na rysunku 6.42. Analizując związek CO_2 można stwierdzić, że obszar znaczących wartości zarejestrowano głównie dla dodatnich przyspieszeń. Wartość maksymalną (1298,70 mg/s) zarejestrowano w przedziale przyspieszenia (1 m/s^2 ; 2 m/s^2) dla dużych prędkości opisanych przedziałem (60 km/h; 70 km/h). Wartości natężenia emisji CO_2 dla ruchu jednostajnego w całym zakresie prędkości wyniosły od 70,00 mg/s do 1128,10 mg/s i zwiększały się wraz z przyrostem prędkości pojazdu. Wartość emisji CO_2 podczas postoju wyniosła 49,40 mg/s, przy średniej wartości w całym teście 412,16 mg/s.

Rozkład wartości natężenia emisji CO dla omawianego obiektu badawczego na trasie pomiarowej C jest zdecydowanie mniej równomierny, w porównaniu do dwóch pozostałych tras. Odnotowano wyraźne pojedyncze piki w obszarze dużych prędkości pojazdu z zakresu (40 km/h; 80 km/h) w przedział dodatnich przyspieszeń. Największą wartość, która wyniosła 231,41 mg/s, zarejestrowano w przedziale prędkości (40 km/h; 50 km/h) oraz podczas największych przyspieszeń z przedziału (2 m/s^2 ; ... m/s^2). Wartość średnia emisji CO w całym teście wyniosła 9,64 mg/s.

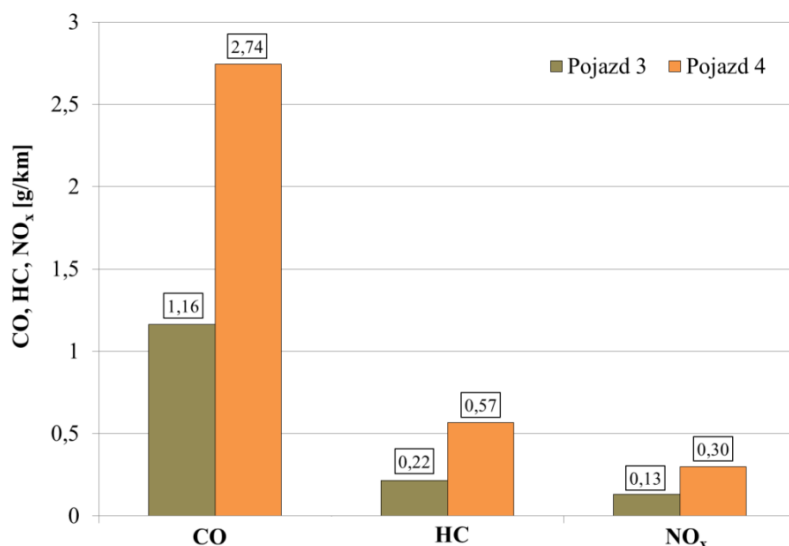
Rozkład wartości na charakterystyce natężenia emisji HC jest zdecydowanie bardziej równomierny niż dla charakterystyki CO. Emisja HC jest zależna zarówno od prędkości pojazdu



Rys. 6.39. Przebieg prędkości i przyspieszeń pojazdu, prędkości obrotowej wału korbowego oraz natężenia emisji: CO, HC, NO_x, i CO₂ zarejestrowane podczas badań pojazdu 3 na trasie pomiarowej B

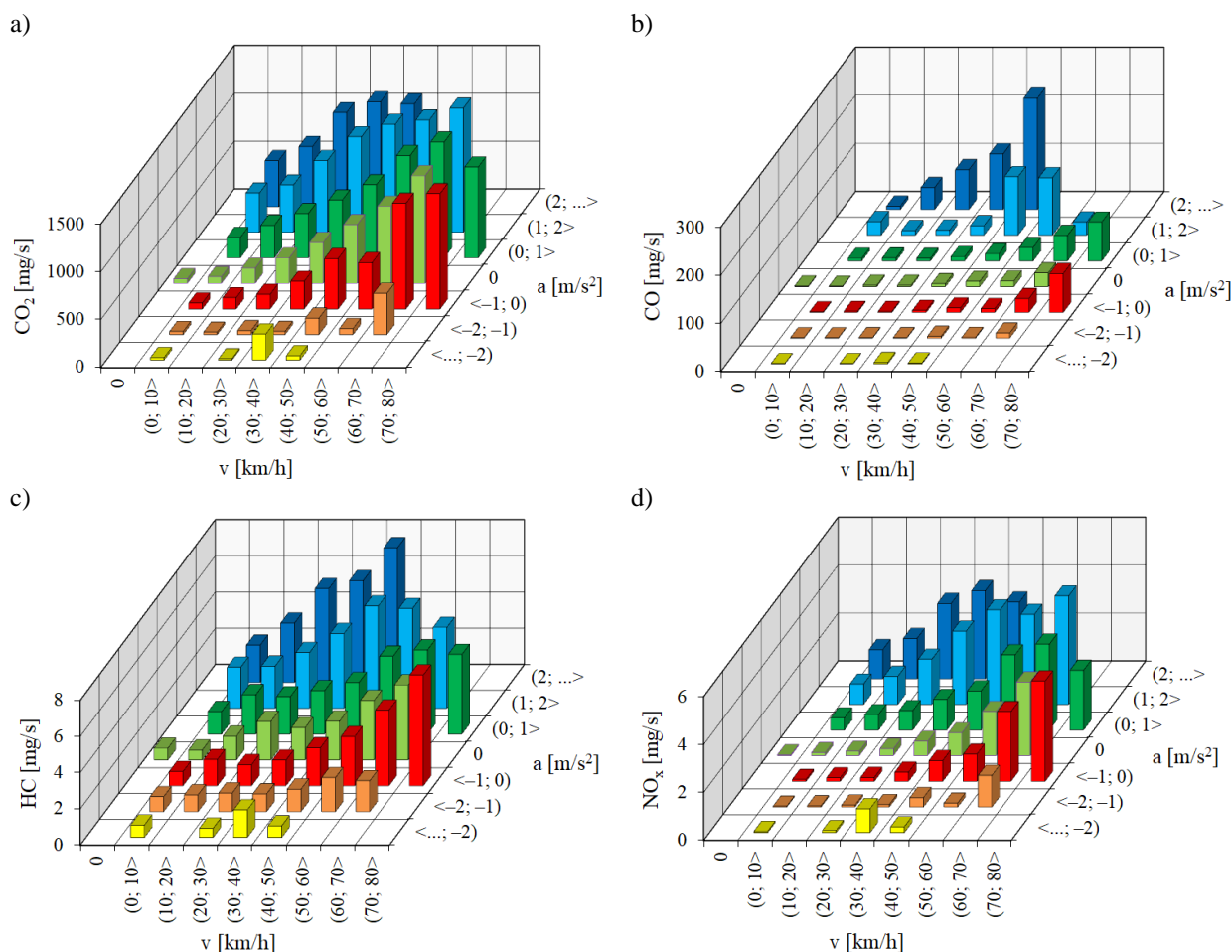


Rys. 6.40. Przebieg prędkości i przyspieszeń pojazdu, prędkości obrotowej wału korbowego oraz natężenia emisji: CO, HC, NO_x, i CO₂ zarejestrowane podczas badań pojazdu 4 na trasie pomiarowej B



Rys. 6.41. Emisja drogowa CO, HC oraz NO_x wyznaczona na podstawie badań na trasie B

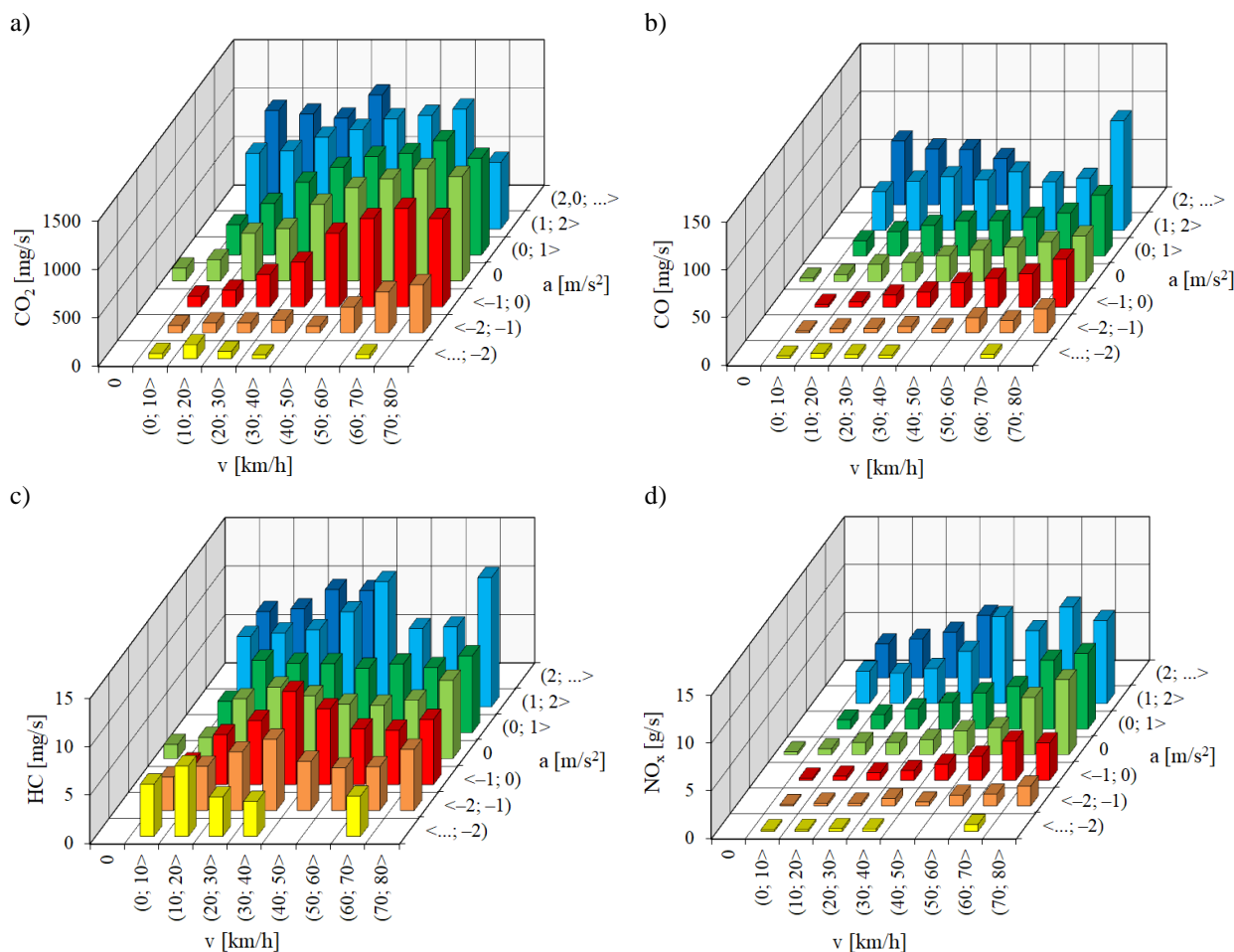
jak i jego przyspieszenia, a jej wartości odnotowano w całym obszarze eksploatacji obiektu badawczego. Maksimum wynoszące 7,44 mg/s zarejestrowano w przedziale prędkości (40 km/h; 50 km/h) przy przyspieszeniach opisanych przedziałem (2 m/s²; ... m/s²), a więc w tym samym polu eksploatacji, w którym odnotowano największą wartość emisji CO.



Rys. 6.42. Natężenie emisji a) CO₂, b) CO, c) HC, d) NO_x w przedziałach prędkości i przyspieszenia pojazdu 3 podczas badań na trasie badawczej C

Znaczące wartości natężenia emisji NO_x obserwuje się przede wszystkim w zakresie maksymalnych przyspieszeń pojazdu. Dla omawianego przypadku największa emisja NO_x , wynosząca 4,52 mg/s uzyskana została w obszarze prędkości pojazdu (60 km/h; 70 km/h) i przyspieszeń w przedziale (1 m/s²; 2 m/s²). Minimalne wartości analizowanego związku toksycznego uzyskano natomiast w obszarze eksploatacji na postoju i podczas małych prędkości pojazdu w przedziałach ujemnych wartości przyspieszeń.

Ostatnie rozważania dotyczące wskaźników ekologicznych przeprowadzono dla przypadku relacji pojazd 4 – trasa C. Analizując charakterystykę natężenia emisji CO_2 zauważono dokładnie takie same zależności jak we wcześniej omawianych przypadkach (rys. 6.43a). Wartość maksymalna wyniosła 1238,00 mg/s i odnotowano ją w przedziale dużych prędkości pojazdu (60 km/h; 70 km/h) oraz dodatnich przyspieszeń opisanym przedziałem (1 m/s²; 2 m/s²). Analizując charakterystykę natężenia emisji CO można zauważyć, że jej wartości zarejestrowano dla całego zakresu prędkości pojazdu, jednakże ich rozkład nie jest tak równomierny jak w przypadku charakterystyki dla CO_2 (rys. 6.43b). Największą wartość, wynoszącą 114,83 mg/s, zarejestrowano w polu charakterystyki opisanym przedziałami (1 m/s²; 2 m/s²) oraz (70 km/h; 80 km/h) odpowiednio dla przyspieszeń i prędkości pojazdu. Pojazd 4 na trasie C emitował średnio w całym teście 25,00 mg/s



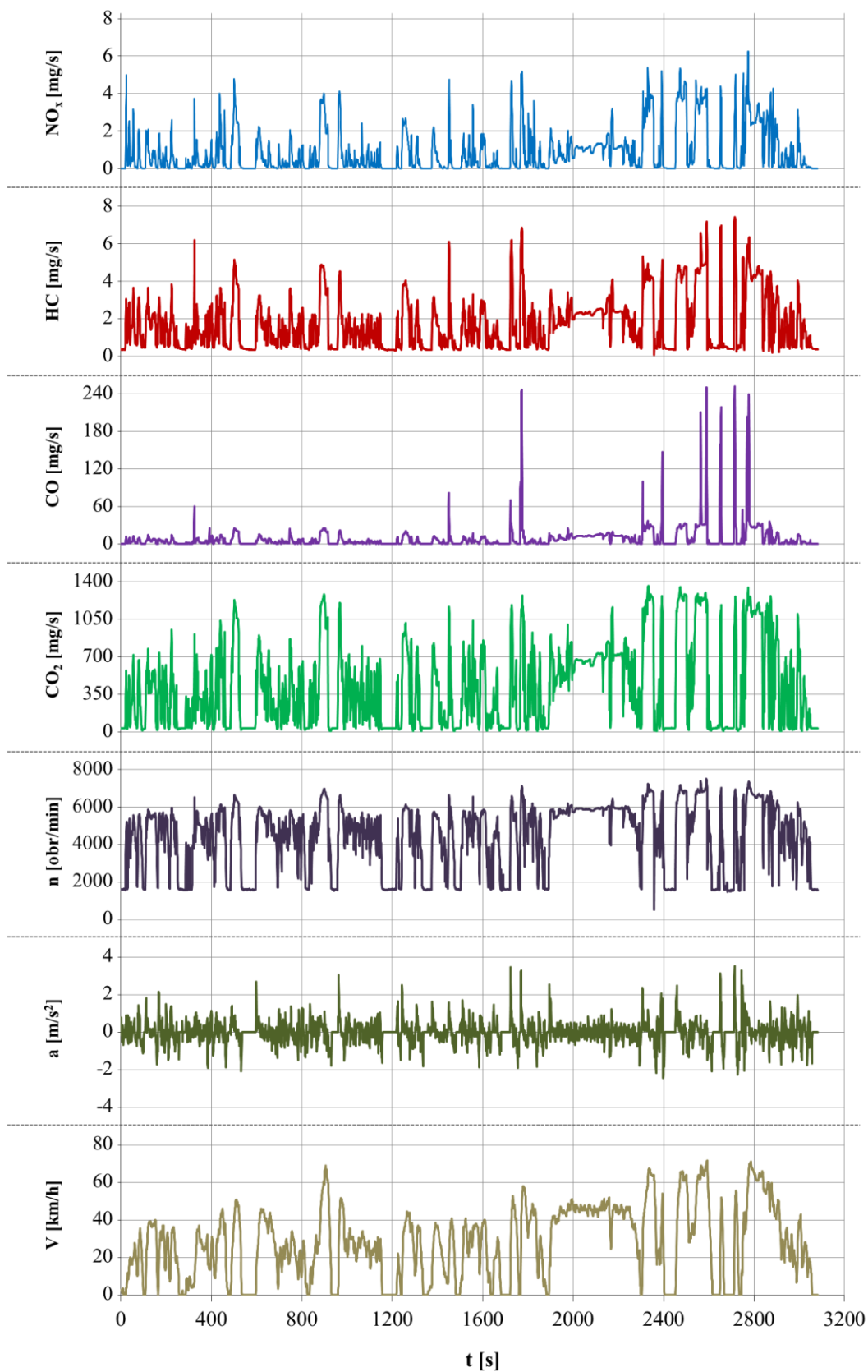
Rys. 6.43. Natężenie emisji a) CO_2 , b) CO, c) HC, d) NO_x w przedziałach prędkości i przyspieszenia pojazdu 4 podczas badań na trasie badawczej C

Charakterystyka natężenia emisji HC cechuje się bardziej równomiernym rozkładem wartości w porównaniu do omawianej powyżej charakterystyki emisji CO (rys. 6.43c). Maksymalną wartość (13,36 mg/s) odnotowano w pojedynczym oknie pomiarowym (70 km/h; 80 km/h) i (1 m/s²; 2 m/s²) odpowiednio dla prędkości i przyspieszenia pojazdu. Średnia wartość natężenia HC w całym przejeździe wyniosła 5,78 mg/s. Znaczące wartości natężenia emisji NO_x odnotowano w obszarze dodatnich przyspieszeń, przede wszystkim przy towarzyszących im dużych prędkościach pojazdu. Największą wartość (10,08 mg/s) zarejestrowano w polu eksploatacji opisanym przedziałami (60 km/h; 70 km/h) i (1 m/s²; 2 m/s²) odpowiednio dla prędkości i przyspieszenia pojazdu (rys. 6.43d).

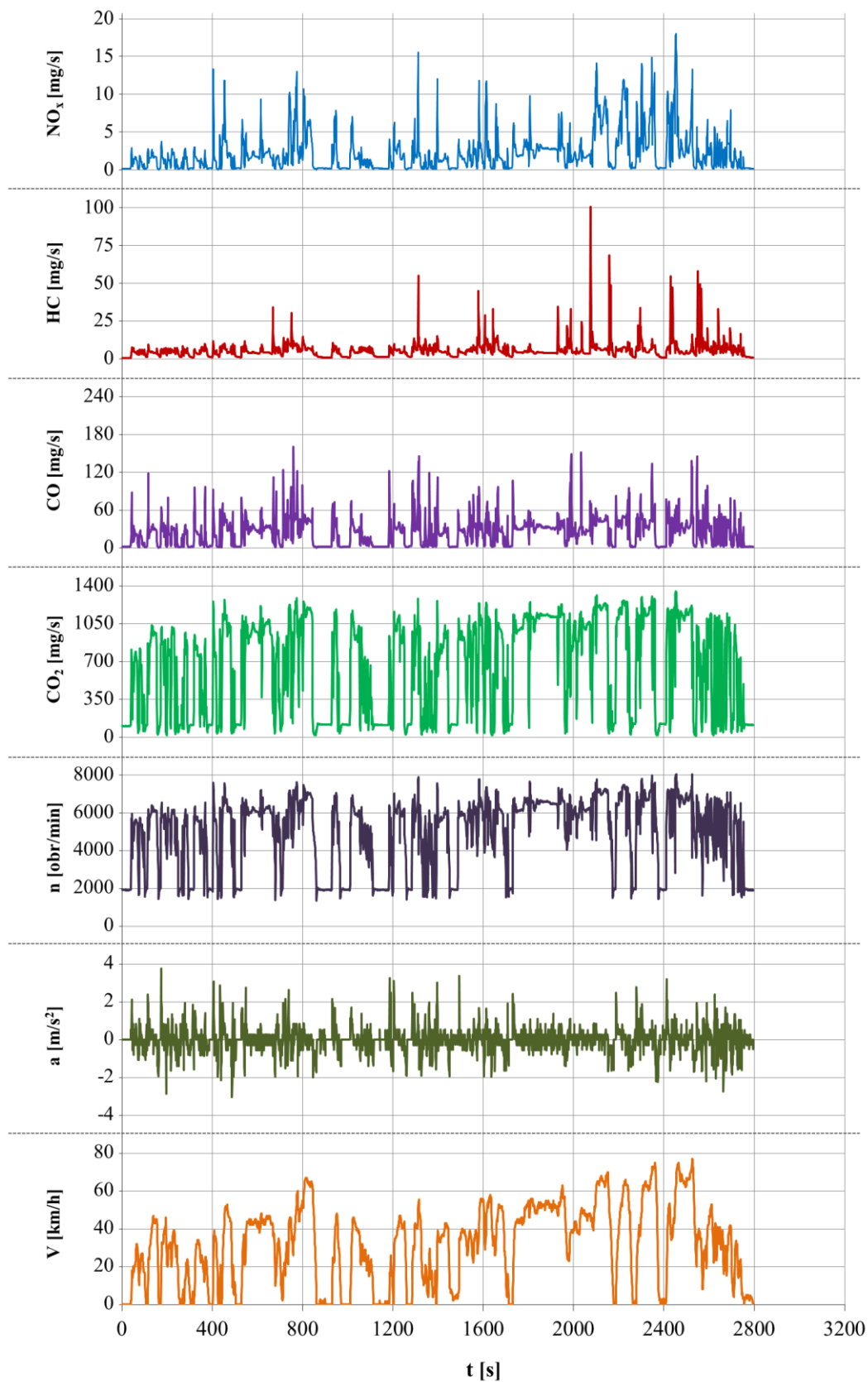
Na podstawie wartości natężenia emisji związków szkodliwych oraz parametrów jezdnych pojazdów 3 i 4 można stwierdzić, że natężenie emisji CO i HC, tak jak we wcześniej omawianych przypadkach, osiąga największe wartości podczas zwiększania prędkości pojazdu (rys. 6.44 i 6.45). Średnie prędkości w testach wyniosły odpowiednio 33,4 km/h i 27,63 km/h. Dla pojazdu 4 odnotowano znacznie większe wartości natężenia emisji HC oraz wyraźne pojedyncze piki, natomiast przebieg krzywej HC dla pojazdu 3 ma charakter bardziej równomierny. Odwrotna sytuacja występuje w przypadku natężenia emisji CO. Mimo, iż pojazd 4 osiągnął większą wartość średnią emisji CO (90% różnica w odniesieniu do pojazdu 3) to jej krzywa charakteryzuje się bardziej równomiernym przebiegiem. Pojazd 3 cechuje się natomiast większymi chwilowymi wartościami maksymalnymi, które odpowiadają na charakterystyce wyraźnymi pikami.

W celu dokonania oceny porównawczej zarejestrowanych wyników badań uzyskanych na trasie pomiarowej C, zestawiono otrzymane dla pojazdów 3 i 4 wartości emisji drogowej składników toksycznych spalin (rys. 6.46). Analizy wykazały, że tak jak we wcześniej omawianych przypadkach, większymi wartościami emisji drogowej wszystkich analizowanych związków charakteryzował się pojazd 4. Wartości emisji CO wyniosły 1,26 g/km oraz 2,87 g/km odpowiednio dla pojazdu 3 i 4, różnica wynosi zatem 128%. W przypadku HC wartość emisji drogowej, dla pojazdu 4 była ponad 2,5-krotnie większa w odniesieniu do pojazdu 3 i wyniosła 0,66 g/km. Podobną tendencję odnotowano dla związku NO_x, wartość jego emisji drogowej dla trzeciego obiektu badawczego (0,12 g/km) była ponad dwukrotnie mniejsza w stosunku do pojazdu 4.

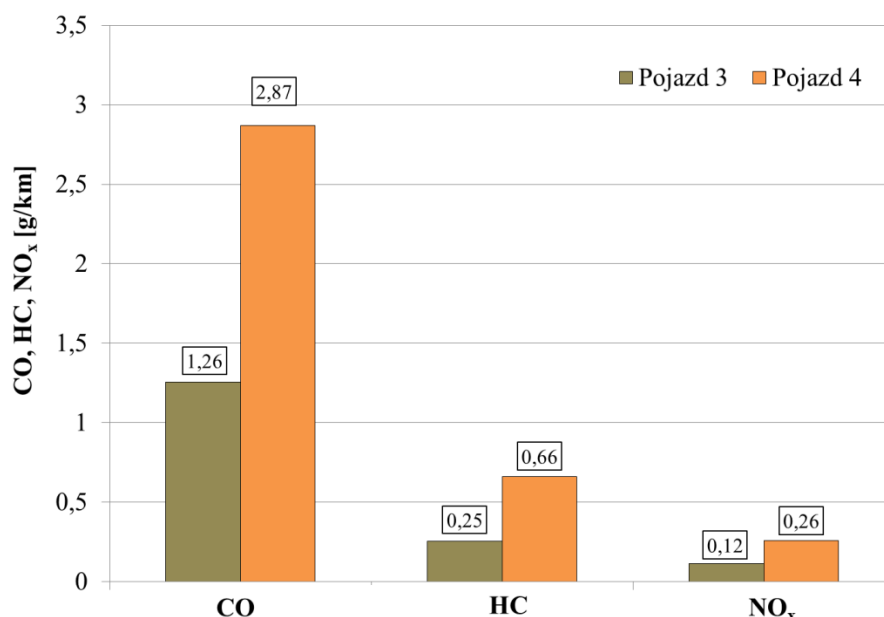
W tabeli 6.2 przedstawiono zestawienie parametrów jezdnych, w przedziałach których osiągnięto wartości maksymalne poszczególnych związków gazowych. Zestawiono ze sobą wyniki uzyskane dla pojazdu 3 i 4 na wszystkich trasach pomiarowych. Dla poszczególnych pól parametrów ruchu przypisano również ich udział czasowy. Dla 80% wszystkich przypadków wartości maksymalne odnotowano w zakresie dużych prędkości pojazdu (40 km/h; 70 km/h) podczas dodatnich przyspieszeń. Udział czasu eksploatacji w tych polach wynosił od 0,03 do 6,11%. Pojazd 3 podczas badań we wszystkich trasach pomiarowych uzyskał 2 znaczące obszary, w których natężenia emisji HC, NO_x, CO₂ oraz CO osiągnęły swoje maksima lokalne. Pierwszy znaczący obszar stanowi przedział prędkości (60 km/h; 70 km/h) oraz zakres przyspieszeń (0 m/s²; 2 m/s²), gdzie zarejestrowano głównie maksymalne wartości natężenia emisji CO₂ oraz NO_x. Dla drugiego istotnego obszaru tj. przedziału prędkości (40 km/h; 50 km/h) w całym zakresie dodatnich przyspieszeń, uzyskano maksima natężenia emisji CO i HC. Podobną tendencję odnotowano dla pojazdu 4.



Rys. 6.44. Przebieg prędkości i przyspieszeń pojazdu, prędkości obrotowej wału korbowego oraz natężenia emisji: CO, HC, NO_x, i CO₂ zarejestrowane podczas badań pojazdu 3 na trasie pomiarowej C



Rys. 6.45. Przebieg prędkości i przyspieszeń pojazdu, prędkości obrotowej wału korbowego oraz natężenia emisji: CO, HC, NO_x, i CO₂ zarejestrowane podczas badań pojazdu 4 na trasie pomiarowej C



Rys. 6.46. Emisja drogowa CO, HC oraz NO_x wyznaczona na podstawie badań na trasie C

Tabela. 6.2. Zestawienie parametrów jezdnych, w przedziałach których osiągnięte zostały wartości maksymalne poszczególnych związków gazowych

Związek	Pojazd 3		
	Trasa A	Trasa B	Trasa C
CO ₂	v = (40 km/h; 50 km/h) a = (0 m/s ² ; 1 m/s ²) u _t = 6,11%	v = (60 km/h; 70 km/h) a = (0 m/s ² ; 1 m/s ²) u _t = 3,52%	v = (60 km/h; 70 km/h) a = (1 m/s ² ; 2 m/s ²) u _t = 0,10%
CO	v = (40 km/h; 50 km/h) a = (0 m/s ² ; 1 m/s ²) u _t = 6,11%	v = (60 km/h; 70 km/h) a = (0 m/s ² ; 1 m/s ²) u _t = 3,52%	v = (40 km/h; 50 km/h) a = (2 m/s ² ; ... m/s ²) u _t = 0,03%
HC	v = (20 km/h; 30 km/h) a = (1 m/s ² ; 2 m/s ²) u _t = 1,32%	v = (60 km/h; 70 km/h) a = (0 m/s ² ; 1 m/s ²) u _t = 3,52%	v = (40 km/h; 50 km/h) a = (2 m/s ² ; ... m/s ²) u _t = 0,03%
NO _x	v = (10 km/h; 20 km/h) a = (2 m/s ² ; ... m/s ²) u _t = 0,17%	v = (60 km/h; 70 km/h) a = (0 m/s ² ; 1 m/s ²) u _t = 3,52%	v = (60 km/h; 70 km/h) a = (1 m/s ² ; 2 m/s ²) u _t = 0,10%
Związek	Pojazd 4		
	Trasa A	Trasa B	Trasa C
CO ₂	v = (50 km/h; 60 km/h) a = (1 m/s ² ; 2 m/s ²) u _t = 0,17%	v = (60 km/h; 70 km/h) a = (1 m/s ² ; 2 m/s ²) u _t = 0,08%	v = (60 km/h; 70 km/h) a = (1 m/s ² ; 2 m/s ²) u _t = 0,07%
CO	v = (50 km/h; 60 km/h) a = (... m/s ² ; -2 m/s ²) u _t = 0,08%	v = (10 km/h; 20 km/h) a = (2 m/s ² ; ... m/s ²) u _t = 0,53%	v = (0 km/h; 10 km/h) a = (2 m/s ² ; ... m/s ²) u _t = 0,15%
HC	v = (30 km/h; 40 km/h) a = (2 m/s ² ; ... m/s ²) u _t = 0,17%	v = (50 km/h; 60 km/h) a = (1 m/s ² ; 2 m/s ²) u _t = 0,46%	v = (60 km/h; 70 km/h) a = (1 m/s ² ; 2 m/s ²) u _t = 0,07%
NO _x	v = (50 km/h; 60 km/h) a = (1 m/s ² ; 2 m/s ²) u _t = 0,17%	v = (60 km/h; 70 km/h) a = (1 m/s ² ; 2 m/s ²) u _t = 0,08%	v = (60 km/h; 70 km/h) a = (1 m/s ² ; 2 m/s ²) u _t = 0,07%

Analizując wszystkie przejazdy zdefiniowano pewne zależności:

- Wartości maksymalne natężenia emisji związków toksycznych dla 75% wszystkich przypadków uzyskano w zakresie dużych prędkości pojazdu (40 km/h; 70 km/h) podczas przyspieszeń z szerokiego zakresu (-1 m/s^2 ; 2 m/s^2).
- Warunki ruchu mają istotny wpływ na emisję związków toksycznych: rozpędzanie pojazdu, liczne zatrzymania oraz częstotliwość występowania tych warunków niekorzystnie wpływają na uzyskiwane wartości emisji wszystkich analizowanych związków.
- Wyniki emisji drogowej związków toksycznych wykazały, iż największymi jej wartościami charakteryzował się pojazd 2, który wyposażony jest w silnik dwusuwowy.

6.5. Analiza porównawcza współczynników emisji drogowej

Na podstawie wyznaczonych w poprzednim podrozdziale wartości emisji drogowej związków toksycznych dla poszczególnych pojazdów i tras pomiarowych oraz wartości dopuszczalnych odpowiednich norm Euro, zgodnie z którymi homologowane były omawiane pojazdy (Euro 2–4), możliwe jest określenie ich współczynników emisji. Współczynnik emisji k_j oznacza krotność zwiększenia lub zmniejszenia emisji zanieczyszczeń w rzeczywistych warunkach eksploatacji w odniesieniu do testu homologacyjnego i definiowany jest następującym ilorazem:

$$k_j = \frac{e_{\text{rzecz},j}}{e_{\text{dop},j}} \quad (6.11)$$

gdzie: j – związek toksyczny, dla którego wyznaczono współczynnik emisji,

$e_{\text{rzecz},j}$ – emisja drogowa związku toksycznego uzyskana w teście, g/km,

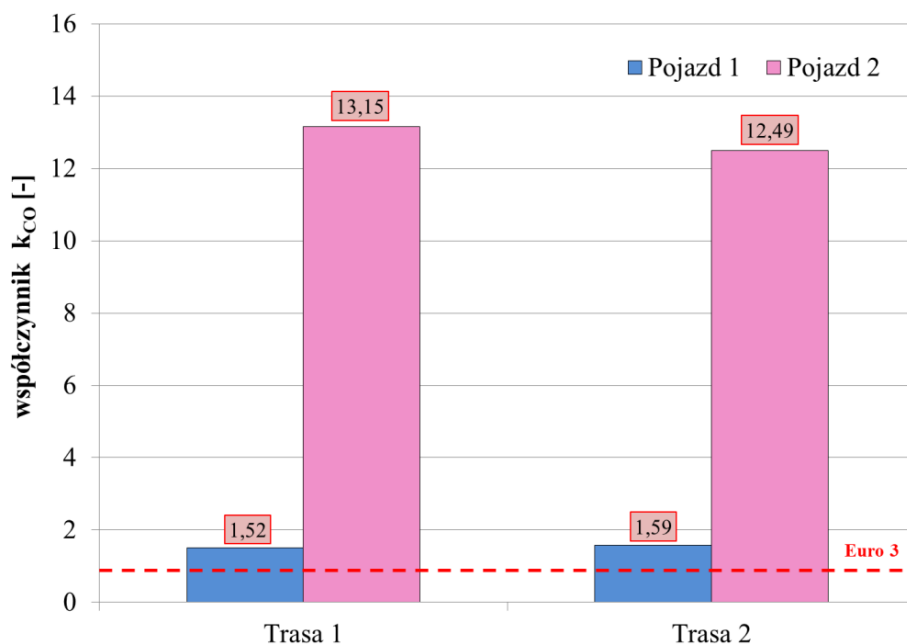
$e_{\text{dop},j}$ – dopuszczalna emisja drogowa związku zgodnie z normą Euro, g/km.

Współczynnik emisji drogowej k_j może mieścić się w przedziale wartości $\langle 0; \infty \rangle$, przy czym wartości współczynnika oznaczają:

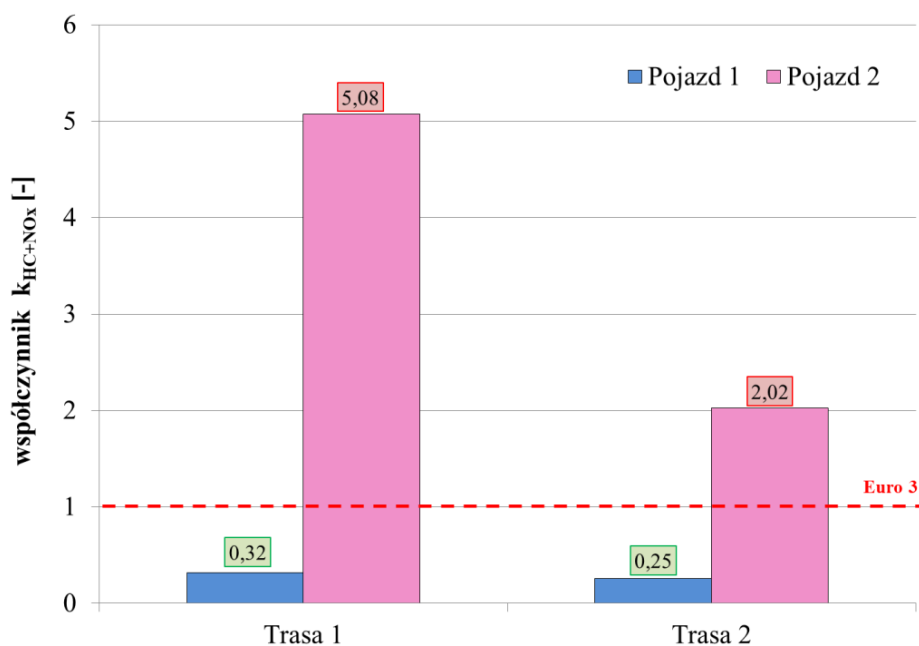
- „ < 1 ” – emisja drogowa z pojazdu nie przekracza wartości dopuszczalnej,
- „ > 1 ” – emisja drogowa z pojazdu przekracza wartość dopuszczalną,
- „ $= 1$ ” – emisja drogowa jest równa wartości dopuszczalnej [83].

Przedstawione wyniki dla pojazdów 1 i 2 wykazały, że najbardziej problematyczna w rzeczywistych warunkach eksploatacji jest emisja CO (rys 6.47). We wszystkich przypadkach pojazd – trasa pomiarowa odnotowano przekroczenia jej wartości dopuszczalnych. Pojazd 1 uzyskał wartości współczynnika k_{CO} równe 1,52 i 1,59 odpowiednio dla tras A oraz B. Znaczne wartości odnotowano dla pojazdu 2, które wyniosły 13,15 (trasa A) oraz 12,49 (trasa B).

Norma Euro 3, dla pojazdów kategorii L1-e, określa wartość dopuszczalną sumy emisji drogowej HC oraz NO_x . W związku z tym na rysunku 6.48 przedstawiono wartości współczynnika $k_{\text{HC}+\text{NO}_x}$. W tym przypadku pojazd 1 na wszystkich trasach pomiarowych uzyskał wartości współczynnika emisji mniejsze od jedności, dla których średnia wyniosła 0,29. Ponownie niepokojące dane odnotowano dla pojazdu 2. Wartości współczynnika $k_{\text{HC}+\text{NO}_x}$ wyniosły odpowiednio 5,08 oraz 2,02 dla trasy A i trasy B, pojazd przekroczył zatem wartości dopuszczalne. Świadczy to o dużej skali problemu i słuszności kierunku wycofywania pojazdów dwusuwowych z produkcji, niemniej jednak pojazdy tego typu nadal są eksploatowane na całym świecie.



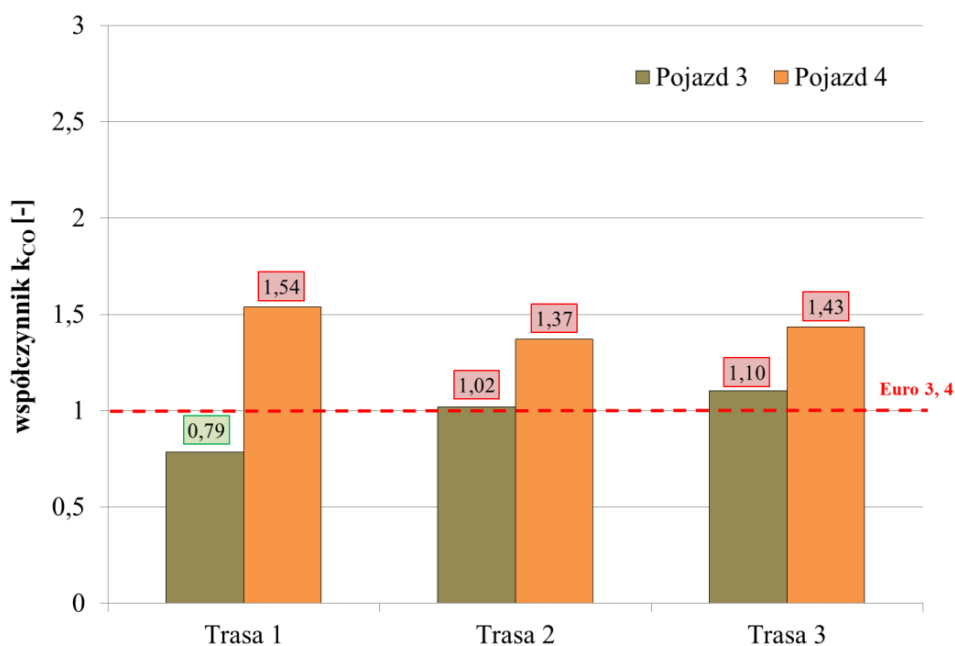
Rys. 6.47. Wartości współczynnika k_{CO} wyznaczone na podstawie pomiarów w warunkach drogowych i wartości dopuszczalnych emisji spalin Euro 3



Rys. 6.48. Wartości współczynnika k_{HC+NOx} wyznaczone na podstawie pomiarów w warunkach drogowych i wartości dopuszczalnych emisji spalin Euro 3

Współczynniki emisji k_{CO} , uzyskane podczas badań drogowych pojazdów 3 i 4 wykazały, że obiekt reprezentujący normę Euro 4 uzyskał wartości bardziej zbliżone do wartości dopuszczalnej (rys. 6.49). W przypadku trasy pomiarowej A pojazd uzyskał wartość współczynnika mniejszą od jedności, natomiast na trasach B i C są one nieznacznie większe od 1 tj. 1,02 dla trasy B oraz 1,1 dla trasy C. Większymi wartościami współczynników emisji charakteryzował się pojazd 4, dla którego odnotowano przekroczenia wartości dopuszczalnych CO na wszystkich trasach pomiarowych i wyniosły one od 1,37 do 1,54.

Najkorzystniejsze współczynniki pod względem emisyjnym uzyskały pojazdy 3 i 4 w aspekcie HC, wszystkie wyniki k_{HC} były bowiem mniejsze od jedności (rys. 6.50). Jednakże mniejszymi, średnio o 0,17 g/km, wartościami charakteryzuje się pojazd 3, dla którego wyznaczone wartości współczynnika emisji HC wyniosły od 0,55 do 0,67. Jest to pozytywne zjawisko w aspekcie długotrwałej eksploatacji silnika, gdyż z biegiem czasu jego zużycie będzie niekorzystnie wpływać na wskaźniki ekologiczne. Pojazd 3 dla poszczególnych tras pomiarowych osiągnął wartości współczynnika k_{HC} : 0,77 (trasa A), 0,71 (trasa B) oraz 0,83 (trasa C).

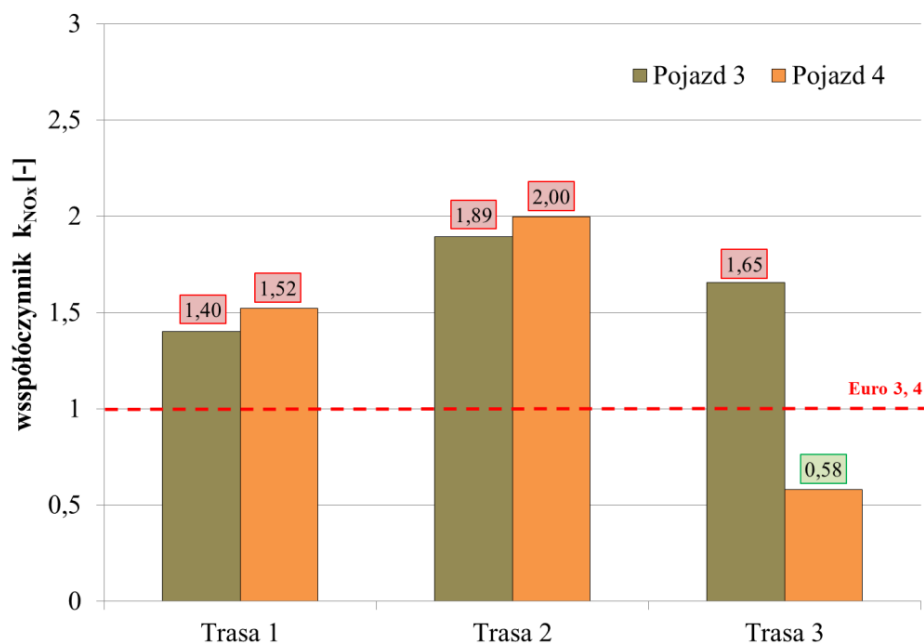


Rys. 6.49. Wartości współczynnika k_{CO} wyznaczone na podstawie pomiarów w warunkach drogowych i wartości dopuszczalnych emisji spalin Euro 3, 4



Rys. 6.50. Wartości współczynnika k_{HC} wyznaczone na podstawie pomiarów w warunkach drogowych i wartości dopuszczalnych emisji spalin Euro 3,4

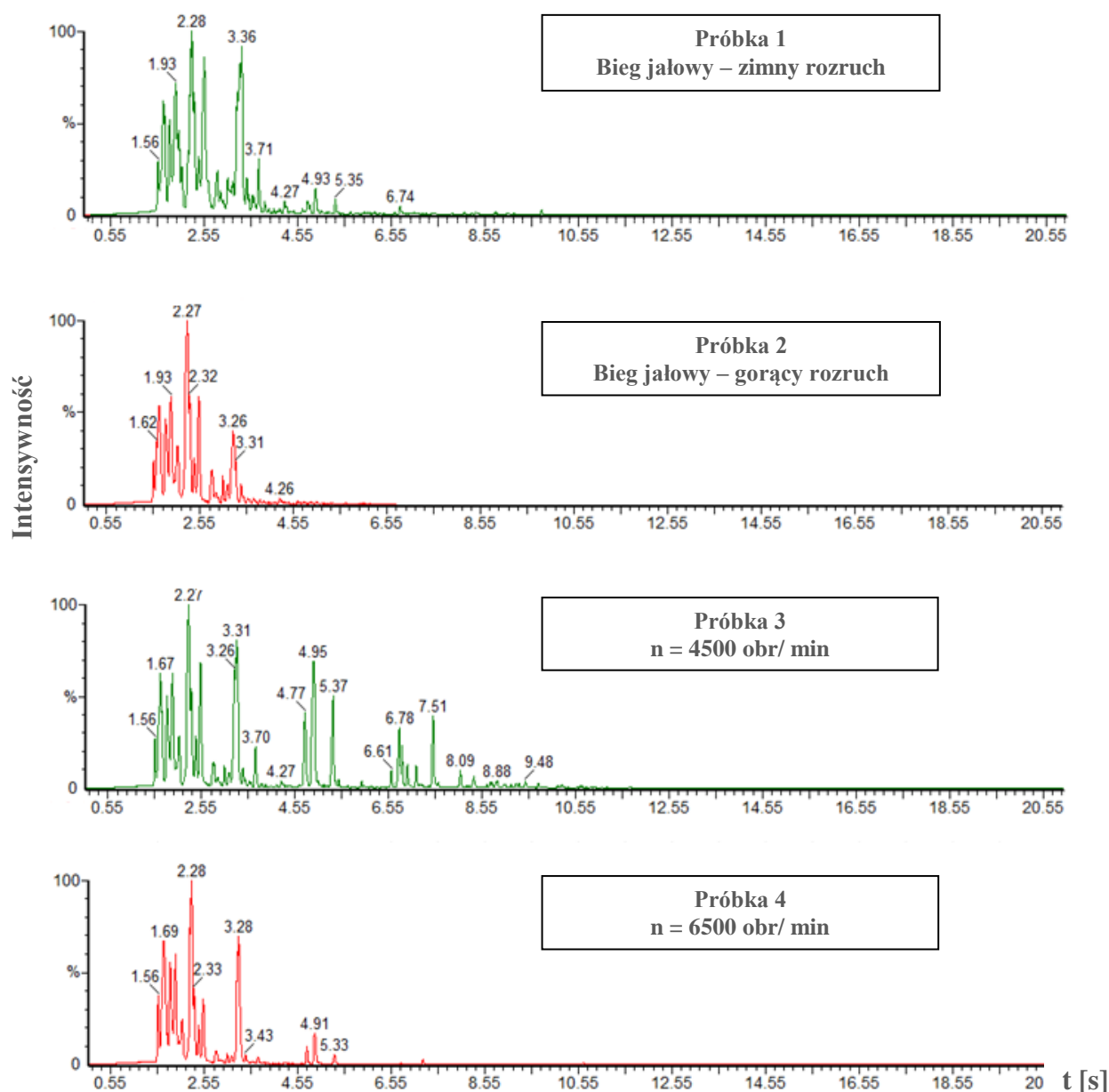
Uzyskane wyniki badań dla pojazdów 3 i 4 wykazały, że najbardziej problematyczna w ich przypadku jest emisja NO_x (rys 6.51). Dla prawie wszystkich relacji pojazd – trasa pomiarowa odnotowano przekroczenia jej wartości dopuszczalnych. Wyjątkiem jest przypadek pojazd 4 – trasa C, gdzie odnotowano wartość $k_{\text{NO}_x} = 0,58$. Pojazd 3 uzyskał wartości współczynnika emisji NO_x równe 1,40; 1,89 i 1,65 kolejno dla tras A–C. Podobne różnice odnotowano dla pojazdu 4, dla którego wartości wskaźnika k_{NO_x} wyniosły 1,52 (trasa A) oraz 2 (trasa B).



Rys. 6.51. Wartości współczynnika k_{NO_x} wyznaczone na podstawie pomiarów w warunkach drogowych i wartości dopuszczalnych emisji spalin Euro 3,4

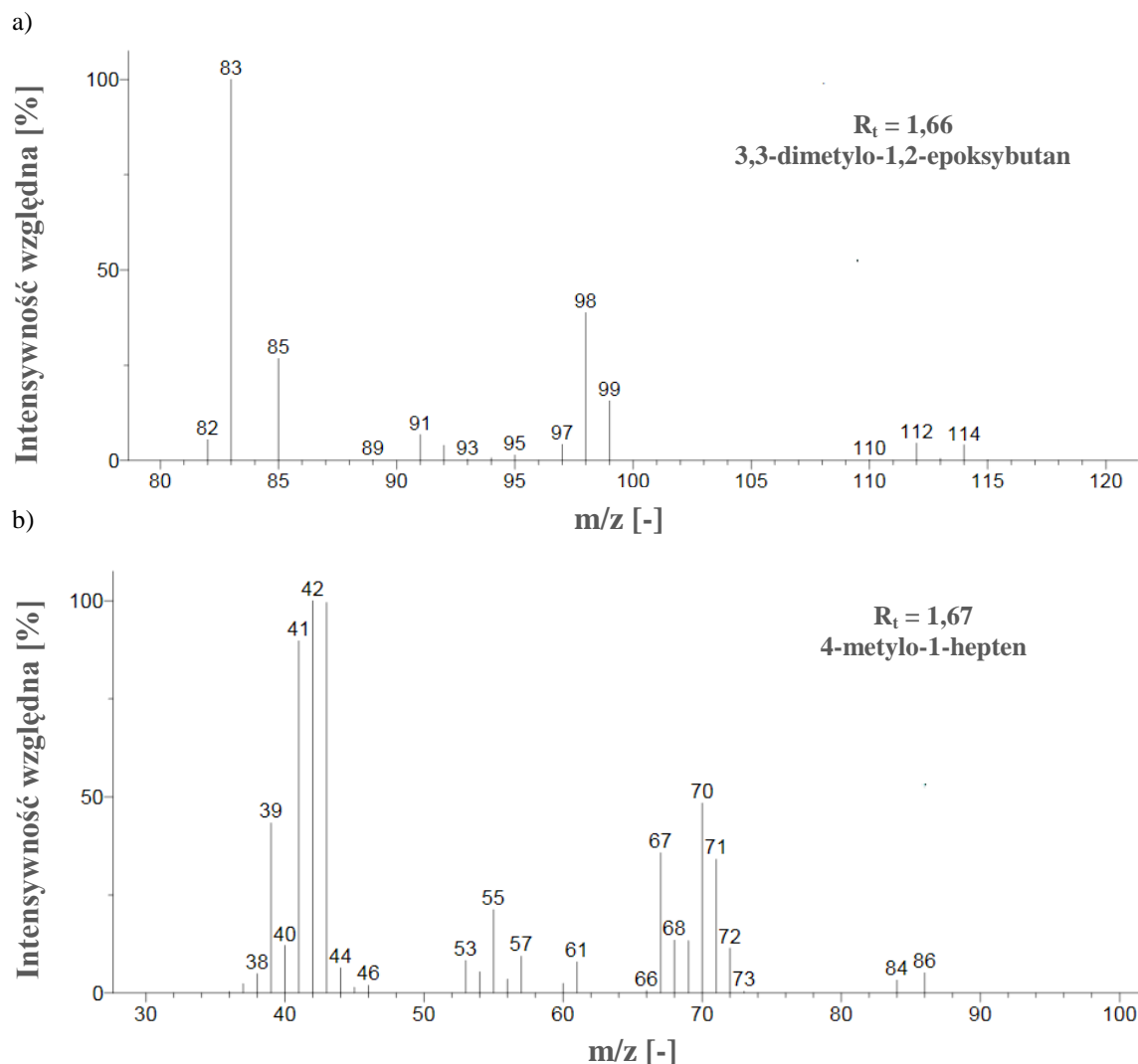
6.6. Analiza chromatograficzna składu chemicznego próbek spalin

Zastosowanie metody spektrometrii mas z chromatografią gazową i desorpcją termiczną dostarcza cennych informacji, przede wszystkim o lotnych substancjach wytwarzanych w poszczególnych punktach pracy silnika zasilanego benzyną. Identyfikację związków (analizę jakościową) przeprowadzono za pośrednictwem lokalizacji pików chromatograficznych poszczególnych substancji i określenie czasów ich retencji R_t (*Retention time*). Na rysunku 6.52 przedstawiono uzyskane chromatogramy dla każdej analizowanej próbki. Dodatkowe potwierdzenie dostarczyła metoda analizy widm masowych (MS), które porównano z komercyjną biblioteką NIST (*Nationale Institute of Standards and Technology*). Umożliwiło to ostateczną identyfikację związków na podstawie stosunków masy do ładunku (m/z) oraz względnych ilości jonów cząsteczkowych i fragmentacyjnych, wynikających z jonizacji elektronowej. Spektroskopia masowa jest metodą pozwalającą na wyznaczenie masy cząsteczkowej badanego związku oraz masy fragmentów, powstających w wyniku jego rozpadu w trakcie jonizacji w spektrometrze masowym. W związku z tym dla wykrytych związków o przybliżonym czasie retencji ($R_t = 1,66$ i $1,67$) zestawione zostały ich widma masowe.



Rys. 6.52. Chromatogramy z próbek spalin z miejskiego pojazdu jednośladowego w różnych punktach pracy silnika spalinowego pojazdu 1

W widmie masowym 3,3-dimetylo-1,2-epoksybutanu najbardziej widoczny jest jon molekularny o stosunku masy do ładunku ($m/z = 83$), natomiast w przypadku substancji 4-metylo-1-hepten jon ze stosunkiem $m/z = 42$ (rys. 6.53 a, b). Intensywność względna jest liczona w stosunku do jonu o największym natężeniu, który przyjmuje się za jon główny i przypisuje mu intensywność 100%. Intensywność pozostałych pików jest przedstawiana w procentach względem pików głównego. W tabeli 6.3 zawarto informacje o intensywnościach względnych, pojawiających się w detektorze wybranych jonów o określonym stosunku masy do ładunku dla związków: 3,3-dimetylo-1,2-epoksybutan oraz 4-metylo-1-hepten.



Rys. 6.53. Widma masowe substancji eluowanych dla czasów retencji a) 1,66 min b) 1,67 min

Tabela 6.3. Intensywność względna wybranych jonów widm masowych

m/z [-]	Intensywność [%]
3,3-dimetylo-1,2-epoksybutan	
82	7,2
83	100
85	26
98	40
99	17,6
4-metylo-1-hepten	
39	42,5
41	85,5
42	100
55	21,3
67	36
70	49,5
71	34,8

W tabeli 6.4 przedstawiono zidentyfikowane związki chemiczne dla wszystkich próbek, które wykryto przy użyciu opisanej w rozdziale 5 metody pomiarowej. Tabela zestawienia składników chemicznych zawartych w próbkach gazowych z miejskiego pojazdu jednośladowego zostało dodatkowo uzupełniono o przegląd literaturowy. Przenalizowane zostały opracowania oraz artykuły naukowe, które przyporządkowane zostały konkretnym substancjom. Ich obecność odnotowano w badaniach chemicznych próbek zanieczyszczeń z pojazdów silnikowych, które opisane zostały w przywołanych pracach. Analiza wykazała, iż przeważającą większość związków chemicznych odnotowano w innych badaniach tego typu, są to bowiem związki znamienne dla spalin, potwierdza to poprawność wykonanych przez autorkę badań. W analizowanych próbkach pojawiają się również substancje, wzmianki na temat, których pojawiły się w pojedynczych publikacjach lub brak jest opracowań na ich temat.

Tabela 6.4. Wyniki analizy chromatograficznej gazowych próbek spalin


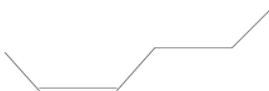

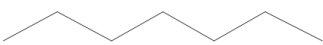


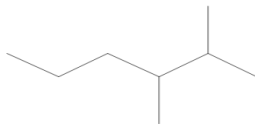
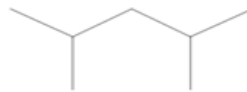
Związek chemiczny	Wzór sumaryczny	Wzór strukturalny	Masa cząsteczkowa [g/mol]	[Ref.]
Alkeny				
2-buten	C ₄ H ₈		56,1	22, 17, 22, 93, 115, 125
2-heksen	C ₆ H ₁₂		84,16	5, 22, 55, 59, 115
Alkany				
Oktan	C ₈ H ₁₈		114,23	5, 55, 59, 68, 75, 93, 99, 115
Heptan	C ₇ H ₁₆		100,21	5, 55, 115
Alkiny				
1,5-Heksadien	C ₆ H ₆		82,14	100
1,5-Heptadien-3-in	C ₇ H ₈		92,14	134
Rozgałęzione Alkany				
2,3-dimetyloheksan	C ₈ H ₁₈		114,23	9, 22, 59, 75, 115
2,4-dimetylopentan	C ₇ H ₁₆		100,62	73, 75, 115

Tabela 6.4. cd. Wyniki analizy chromatograficznej gazowych próbek spalin


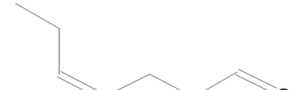

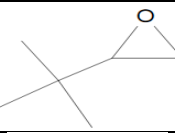

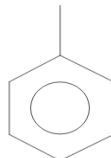
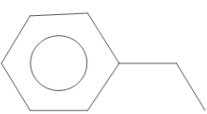
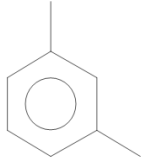
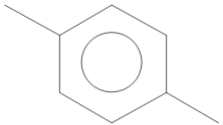
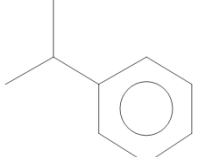
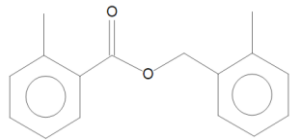
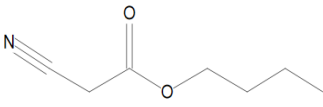
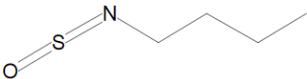
Rozgałęzione Alkeny				
4-metylo-1-hepten	C_8H_{16}		112,2126	59, 93, 115
Aldehydy alifatyczne				
4-heptanal	$C_7H_{12}O$		112,1696	115
Etery i cykloetery				
Eter heptylhek-syowy	$C_{13}H_{28}O$		200,36	119
3,3-dimetyl-1,2-epoksybutan	$C_6H_{12}O$		100,161 g/mol	9, 59, 115
1,4-epoksy cyclo-heksan	$C_6H_{10}O$		98,14 g/mol	75, 115
Węglowodory aromatyczne				
Toluen	C_7H_8		92,14	5, 17, 22, 34, 55, 59, 68, 71, 75, 93, 99, 115, 125
Etylobenzen	C_8H_{10}		106,167	5, 17, 22, 59, 68, 71, 93, 99, 115, 125
m-Ksylen	C_8H_{10}		106,16	17, 34, 55, 59, 68, 75, 93, 115, 125
p-Ksylen	C_8H_{10}		106,16	5, 17, 22, 34, 59, 68, 75, 93, 99, 115, 125
Kumen	C_9H_{12}		120,1916	5, 17, 59, 99, 115

Tabela 6.4. cd. Wyniki analizy chromatograficznej gazowych próbek spalin

Estry				
kwask benzoesowy	$C_{16}H_{16}O_2$		240,30	115
Cyjanooctan butylu	$C_7H_{11}NO_2$		141,17	brak danych
Inne				
1- sulfinylobutyloamina	C_4H_9NOS		119,19	brak danych

Uzyskane wyniki wskazują na obecność w badanych próbkach lotnych związków organicznych, w tym wiele węglowodorów aromatycznych czy pierścieniowych (cykloalkany). Analiza jakościowa nie wykazała znaczących różnic w czterech otrzymanych próbkach (tab. 6.5). Benzyna jest paliwem, które nie występuje w środowisku naturalnym lecz powstaje w procesach rafinacji zasadniczej lub destrukcyjnej, co sprawia że składa się ona nawet z kilkuset substancji o różnych właściwościach fizycznych i chemicznych. Jednak do głównych składników benzyny zaliczyć należy węglowodory alifatyczne o liczbie atomów węgla od 5 do 12 oraz śladowe ilości węglowodorów nienasyconych i aromatycznych. W związku z tym we wszystkich próbkach niezależnie, od punktu pracy silnika zaobserwowano alkeny i alkany będące głównymi składnikami gazów naftowych tj. buten, oktan, heptan, heksen oraz powstałe w wyniku ich utleniania 3,3-dimetyl-1,2-epoksybutan, 4-heptanal oraz 2,3-dimetyloheksan. Są to przede wszystkim rozgałęzione alkany o długich łańcuchach węglowych i czasach retencji 1,66–1,95.

Składniki benzyny będące produktem destylacji ropy naftowej – 4-metylo-1-hepten, 2,4-dimetylopentan oraz 1,4-epoksycykloheksan – również zarejestrowano w każdej z analizowanych próbek. Co więcej odnotowano, istotne pod względem toksykologicznym w składzie benzyny, związki definiowane jako węglowodory aromatyczne z grupy BTX (benzen, toluen, ksylene) oraz ich pochodne (kumen, fenyloetan, dimetylobenzen) czy kwas benzoesowy, będący skutkiem utleniania toluenu. Obecność tych składników w spalinach może świadczyć o procesie spalania niecałkowitego oraz złożonych reakcjach w komorze spalania silnika. Ocena jakościowa próbek spalin wykazała, że pojazd jednośladowy cechował się większą różnorodnością jakościową w zależności od punktu pracy silnika właśnie w przypadku pochodnych węglowodorów aromatycznych grupy BTX.

Etylobenzenu (fenyloetanu) z czasem retencji 4,77 nie odnotowano w próbce nr 4 – prędkość obrotowa wału korbowego z zakresu (6500–6750 obr/min). Osiągnięta w tym punkcie pracy wysoka temperatura spowodowała najprawdopodobniej całkowite i zupełne spalanie tego związku. Zwiększenie prędkości i w konsekwencji efektywniejszy proces spalania spowodował także brak obecności kumenu (należącego do grupy węglowodorów aromatycznych) w dwóch ostatnich analizowanych próbkach. Efektywniejszy proces spalania powoduje utlenianie

węglowodorów aromatycznych lub ich całkowite spalanie. Związek – 1,5-Heptadien-3-in – również pojawił się jedynie w próbce nr 1. Zbyt mała temperatura w komorze spalania oraz zimne ścianki i denko tłoka są przyczyną formowania się tego związku. Jest to tak zwany efekt przyścienny – następuje przygaszanie płomienia w pobliżu zimnych ścianek komory spalania.

Tabela 6.5. Wyniki analizy chromatograficznej w zależności od punktu pracy silnika miejskiego pojazdu jednośladowego

Związek chemiczny	R _t	Numer próbki			
		1	2	3	4
2-buten	1,56	×	×	×	×
3,3-dimetylo-1,2-epoksybutan	1,66	×	×	×	×
2-heksen	1,67	×	×	×	×
4-metylo-1-hepten	1,80	×	×	×	×
2,3-dimetyloheksan	1,82	×	×	×	×
2,4-dimetylopentan	1,93	×	×	×	×
4-heptanal	1,95	×	×	×	×
Cyanoocetan butylu	2,07		×	×	×
1,5-Heksadien	2,28	×	×	×	×
Sulfinylobutyloamina	2,32	×	×	×	×
Heptan	2,54	×	×	×	×
1,4-epoksycykloheksan	2,80	×	×	×	×
Eter heptylheksylowy	2,83	×	-	-	-
Toluen	3,26	×	×	×	×
1,5-heptadien-3-in	3,36	×	-	-	-
Oktan	3,70	×	×	×	×
Etylobenzen	4,77	×	×	×	-
m-Ksylen	4,98	-	×	×	-
p-Ksylen	5,37	×	×	×	×
Kumen	6,78	×	×	-	-
Ester (2-metylofenylo)metylowy kwasu benzoowego	7,51	×	-	-	×

W celu potwierdzenia słuszności powyższych rozważań dotyczących składu chemicznego gazowej próbki z miejskiego pojazdu jednośladowego analizie poddano także próbkę benzyny, celem określenia jej szczegółowego składu. W tym przypadku także posłużyła metoda chromatografii gazowej ze spektrometrią mas. Technika ta wykorzystuje trzy podstawowe elementy: moc rozdzielania kapilarnej chromatografii gazowej o wysokiej rozdzielczości, spektrometr mas z kontrolowanym źródłem jonów i współczynnikami fragmentacji jonów oraz unikalne oprogramowanie do przetwarzania danych i przygotowywania raportów. Metoda obejmuje zakres węglowodorów od C₄ do C₁₂ w benzynie.

W literaturze występuje szereg pozycji dotyczących analizy metodą chromatografii gazowej benzyny i powiązanych produktów naftowych. Bazy danych indeksów retencji oraz oprogramowanie komputerowe do szczegółowej analizy benzyny są dostępne w źródłach [15, 26, 54, 78, 88, 97, 122]. Klasyfikacja za pomocą chromatografii gazowej ciekłych produktów naftowych jest dobrze ugruntowaną techniką. Podstawowe parametry stosowane do rozróżnienia

różnych klas produktów obejmują zakres temperatury wrzenia, zawartość węglowodorów alifatycznych i aromatycznych, względne stężenie głównych i drugorzędnych składników.

Analiza wykazała, że skład benzyny to przede wszystkim lekkie węglowodory alifatyczne (butan, pentan, metylopentan, heksan, metyloheksan, heptan) oraz związków aromatyczne (toluen, ksyleny, trimetylobenzeny), z mniejszą ilością węglowodorów olefinowych (pentany, hekseny, hepteny, okteny, noneny, tab. 6.6). Warto zaznaczyć, że w konwencjonalnych rozwiązaniach silników spalinowych stosuje się benzynę i olej napędowy, które są pochodnymi ropy

Tabela 6.6. Wyniki analizy chromatograficznej ciekłej próbki benzyny

Lp.	R _t	Nazwa związku	Lp.	R _t	Nazwa związku
1	3,24	izobutan	36	11,50	1,2-dimetylocyklopentan
2	3,35	2-buten	37	11,56	metylocykloheksan
3	3,41	n-butan	38	12,19	2,5-dimetyloheksan
4	3,834	3-metylo-1-buten	39	13,39	3-etylocyklopenten
5	4,02	izopentan	40	13,56	toluen
6	4,18	1-penten	41	13,94	2,3-dimetyloheksan
7	4,27	2-metylo-1-buten	42	14,04	2-etylo-3-metylo-1-penten
8	4,33	n-pentan	43	14,21	1-metylocykloheksan
9	4,63	2-metylo-2-buten	44	14,29	2-metyloheptan
10	4,91	2,2-dimetylobutan	45	14,39	4- metyloheptan
11	5,26	Cyklopenten	46	14,78	3- metyloheptan
12	5,30	4-metylo-1-penten	47	15,68	1-etylo-3-metylcyklopentan
13	5,35	3-metylo-1-penten	48	15,84	1-etylo-3-metylccyklopentan
14	5,50	cyklopentan	49	16,43	4-okten
15	5,52	2,3-dimetylobutan	50	16,56	n-oktan
16	5,59	2-metylopentan	51	19,24	2,5-dimetyloheptan
17	5,95	3-metylopentan	52	20,08	Etylobenzen
18	6,07	2-metyl-1-penten	53	21,38	4-metyloktan
19	6,10	1-heksen	54	21,45	2-metyloktan
20	6,41	n-heksan	55	21,97	3- metyloktan
21	6,60	2-metylo-2-penten	56	22,49	ksylen
22	7,19	2,2-dimetylopentan	57	24,13	n-nonan
23	7,30	Metylocyklopentan	58	27,39	n-propylobenzen
24	7,39	2,4-dimetylopentan	59	28,64	1,3,5-trimetylobenzen
25	7,62	2,2,3-metylobutan	60	29,89	3-metylnonan
26	7,99	2,4-dimetylo-1-penten	61	30,62	1,2,4-trimetylobenzen
27	8,11	1-metylocyklopentan	62	32,17	n-dekan
28	8,16	benzen	63	32,77	1,2,3-trimetylobenzen
29	8,56	Cykloheksan	64	33,64	indan
30	8,86	2-metyloheksan	65	35,02	1,3-dietylobenzen
31	9,13	cykloheksen	66	35,24	1-metylo-3-propylobenzen
32	9,26	3-metyloheksan	67	37,03	Metylodekan
33	10,41	n-heptan	68	37,38	1,2-dimetylo-4-etylobenzen
34	10,53	2-metylo-2-heksen	69	44,79	Naftalen
35	10,75	3-etylo-2-penten			

naftowej. Przybliżona struktura pierwiastkowa przeciętnej ropy naftowej składa się z 84% węgla, 14% wodoru, 1–3% siarki i mniej niż 1% azotu, atomów tlenu, metali i soli. W ropie naftowej występuje szeroka gama związków węglowodorowych składających się z alkanów, alkenów, naftenów i aromatów. Są to bardzo małe struktury cząsteczkowe, takie jak propan (C_3H_8) i butan (C_4H_{10}), ale mogą również składać się z mieszanin różnych struktur o bardzo dużych cząsteczkach, takich jak oleje ciężkie i asfalt. W związku z tym surowa ropa naftowa musi być destylowana, aby mogła zostać wykorzystana do zastosowań motoryzacyjnych.

W wyniku termicznej destylacji ropy naftowej otrzymuje się produkty ropopochodne, takie jak gazy naftowe, paliwo lotnicze, nafta, benzyna, olej napędowy, paliwa ciężkie, oleje maszynowe, asfalt. Generalnie w wyniku destylacji ropy naftowej otrzymuje się średnio 30% benzyny, 20–40% oleju napędowego i 20% ciężkiego oleju opałowego, a oleje ciężkie od 10 do 20% [90]. Brak pochodnych wielu związków w badanych próbkach z miejskiego pojazdu jednośladowego wynika z reakcji spalania zachodzącej w silniku i najprawdopodobniej granicy wykrywalności stężenia niektórych substancji. Dodatkowo istotny wpływ mógł także mieć czas analizy, który różnił się między analizą substancji ciekłej (benzyny) oraz gazowej.

Ze zidentyfikowanych lotnych związków toksycznych, występujących w próbce z miejskiego pojazdu jednośladowego, prawie połowa to niebezpieczne dla zdrowia związki aromatyczne, m. in. benzen, toluen, ksyleny, etylobenzen. Ponadto większość z nich bierze udział w procesie tworzenia się smogu fotochemicznego. LZO mogą spowodować poważne skutki zdrowotne takie jak: senność, bóle i zawroty głowy, podrażnienie błon śluzowych, trwałe uszkodzenie wątroby czy układu nerwowego. Niektóre z nich charakteryzują się właściwościami silnie toksycznymi, kancerogennymi, neurotoksycznymi czy mutagennymi. Do organizmu przedostają się przez skórę, układ oddechowy oraz pokarmowy. Za najbardziej toksyczny związek, wykryty w próbkach spalin z miejskiego pojazdu jednośladowego, uznaje się benzen oraz jego pochodne. Jest to prosty węglowodór aromatyczny, powodujący zarówno ostre jak i przewlekłe zatrucia. Dochodzi do niego zazwyczaj poprzez wdychanie par przez układ oddechowy, jednak możliwa jest również absorpcja przez skórę i wchłanianie wraz z pokarmem. Może on również powodować wady genetyczne [104].

Toluen, mimo znacznie mniejszej toksyczności od benzenu, uważany jest za związek szkodliwy dla układu oddechowego, krwionośnego, rozrodczego, nerwowego i immunologicznego oraz nerek i wątroby. W przypadku toluenu szczególnie narażony jest układ nerwowy, toluen wykazuje bowiem duże powinowactwo do tkanek bogatych w lipidy, w których jest rozpuszczalny. Ksyleny są związkami z grupy BTX, które ze względu na najmniejszą lotność oraz większą temperaturę wrzenia uważane są za bezpieczniejsze od benzenu oraz toluenu. Jednakże jego opary o nieprzyjemnym zapachu są wyjątkowo łatwo wchłaniane przez drogi oddechowe, błony śluzowe oraz skórę. W tabeli 6.7 Przedstawiono rodzaje zagrożeń i przyporządkowane im związki chemiczne, które odnotowano w próbkach spalin z pojazdu jednośladowego [104].

Większość z wykrytych w spalinach substancji, w zależności od sposobu narażenia na ich ekspozycję może powodować mniej lub bardziej poważne skutki zdrowotne. Dla przykładu kontakt z heptanem w stanie ciekłym powoduje zaczerwienienie, wysypkę i suchość skóry a jego działanie jest drażniące dla oczu, jednak krótkotrwała ekspozycja na opary heptanu może wywołać zawroty głowy, ból głowy, wymioty, uczucie odurzenia, problemy z koordynacją ruchową i utratę przytomności. Ponadto heptan po przedostaniu się do wody osiada na ciałach stałych znajdujących się w wodzie, również na zwierzętach. Z tego względu definiowany jest

jako związek o działaniu wysoce toksycznym dla organizmów wodnych i wywołującym negatywne i długotrwałe efekty w środowisku wodnym. Podobnymi właściwościami wykazują się również wykryte w spalinach heksen, heptanal, 1,5-Heksadien czy oktan. Główną drogę dostawiania się oktanu do organizmów stanowi wdychanie jego oparów [104]. Ten węglowodór alifatyczny oddziałuje głównie na ośrodkowy układ nerwowy, jednakże w przypadku aspiracji występują także objawy związane z układem oddechowym, tj. kaszel, podrażnienie górnych dróg oddechowych, a w skrajnych przypadkach może doprowadzić do krwotocznego zapalenia płuc i opłucnej [50, 92].

Tabela 6.7. Rodzaje zagrożeń dla wykrytych w gazach spalinowych związków [104, 145]

Związki chemiczne	Rodzaj zagrożenia
3,3-dimetylo-1,2-epoksybutan	Może powodować mniej poważne skutki zdrowotne
2-heksen	
4-heptanal	
Cyjanooctan butylu	
1,5-Heksadien	
Heptan	
Toluen	
Oktan	
Etylobenzen	
m-Ksylen	
Kumen	
4-metylo-1-hepten	
2,4-dimetylopentan	
2,3-dimetyloheksan	
1,5-Heksadien	
Heptan	
Toluen	
Oktan	
Etylobenzen	
Kumen	
p-Ksylen	
m-Ksylen	
2,4-dimetylopentan	
kwas benzoesowy	Może powodować szkody w środowisku
2,3-dimetyloheksan	
1,5-Heksadien	
Etylobenzen	
Heptan	
Oktan	
p-Ksylen	
Kumen	
2,4-dimetylopentan	Może powodować śmierć lub toksyczność przy krótkim narażeniu na niewielkie ilości
Etylobenzen	
p-Ksylen	
m-Ksylen	
1,4-epoksycykloheksan	

7. Opracowanie autorskiego testu dla miejskich pojazdów jednośladowych w warunkach rzeczywistej eksploatacji

7.1. Wymagania testu RDE dla pojazdów osobowych

W pracy wielokrotnie podkreślano wagę badań przeprowadzanych w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Komisja Europejska dla najpopularniejszej grupy pojazdów tj. lekkich pojazdów pasażerskich i użytkowych, badania tego typu wprowadziła do procedury homologacyjnej we wrześniu 2017 roku wraz z normą Euro 5. Prace te określane są mianem procedury RDE i mają charakter obligatoryjny oraz prowadzone są równoległe z testem homologacyjnym WLTP (*Worldwide Harmonized Light Vehicles Test*). Jej wytyczne opisane zostały w Rozporządzeniu Komisji (UE) 2017/1154 z dnia 7 czerwca 2017 r. [33] i zawierają wymagania dotyczące aparatury pomiarowej, warunków eksploatacyjnych, dynamiki przejazdu oraz wartości dopuszczalne emisji związków spalin.

Ogólne wymagania dotyczące aparatury pomiarowej zostały określone w punkcie 3 Dodatku 1 przywołanego rozporządzenia. Badania należy przeprowadzić za pośrednictwem systemu PEMS, który musi składać się z następujących elementów:

- analizatory do oznaczania stężenia związków toksycznych w spalinach,
- czujnik do pomiaru przepływu masowego spalin lub kilku takich czujników,
- globalny system pozycjonowania do określania położenia, prędkości pojazdu i wysokości bezwzględnej.
- czujniki lub inne urządzenia, które nie stanowią części pojazdu np. do pomiaru temperatury otoczenia, względnej wilgotności, ciśnienia atmosferycznego oraz prędkości pojazdu,
- niezależne od pojazdu źródło energii do zasilania aparatury PEMS.

Rozporządzenie określa i opisuje także procedurę instalacji systemu PEMS, sposób poboru próbek emisji oraz procedurę przygotowawczą aparatury pomiarowej przed badaniem. Dopuszczalne typy analizatorów do pomiaru związków gazowych określone zostały w pkt 1.3.1–1.3.5 dodatku 3 do załącznika 4A do regulaminu nr 83 EKG ONZ [28]. Pomiar stężeń poszczególnych związków powinien odbywać się za pośrednictwem analizatorów, opartych na następujących metodach działania:

- metoda niedyspersyjna na podczerwień – pomiar CO i CO₂,
- metoda płomieniowo-jonizacyjna – pomiar HC, CH₄, NMHC,
- metoda niedyspersyjna na ultrafiolet lub metoda chemiluminescencyjna – pomiar NO_x, metoda elektrochemiczna – pomiar O₂,

przy czym powinny się one odbywać z częstotliwością mniejszą niż 1 Hz.

Zgodnie z wymaganiami eksploatacyjnymi, badania RDE przeprowadza się w dni robocze na utwardzonych drogach i ulicach. Dobór trasy powinien opierać się na wymaganiu dotyczącym minimalnego czasu trwania badania (60 minut). Co więcej istotne jest, aby badanie odbywało się bez przerw a rejestracja danych następowała w sposób ciągły. Instalację sprzętu PEMS przeprowadza się w sposób minimalizujący jego wpływ na emisję zanieczyszczeń z pojazdu oraz jego działanie. Zasilanie systemu PEMS umożliwia zewnętrzną źródło energii.

Szczególnie istotne są wymagania dotyczące przejazdu. Procedura RDE jest uważana za spełnioną, jeśli m.in. przejazd obejmuje kolejno jazdę w terenie miejskim, pozamiejskim

oraz autostradowym. Ich udziały w teście (w odniesieniu do całkowitego przebytego dystansu) klasyfikowane są na podstawie wartości prędkości chwilowej, które wynoszą odpowiednio:

≤ 60 km/h dla części miejskiej,

> 60 km/h oraz ≤ 90 km/h dla części pozamiejskiej,

> 90 km/h dla autostrady, przy czym prędkość pojazdu zwykle nie przekracza 145 km/h.

Ich udział powinien wynosić w przybliżeniu 34% użytkowania w cyklu miejskim, 33% użytkowania w cyklu pozamiejskim i 33% użytkowania na autostradzie, przy czym udział w części miejskiej musi wynosić nie mniej niż 29% całkowitego przebytego dystansu. Czas trwania testu musi mieścić się w zakresie 60–90 minut. Szczegółowe wymagania dotyczące przejazdu zostały przedstawione w tabeli 7.1.

Tabela 7.1. Wymagania dotyczące przejazdu

Jazda w trasie miejskiej	
Udział użytkowania w całkowitym przebytych dystansie [%]	~ 34 (±10)
Udział użytkowania w całkowitym czasie trwania testu [%]	29–44%
Minimalny dystans [km]	16
Prędkość pojazdu [km/h]	0–60
Prędkość średnia (łącznie z zatrzymaniami) [km/h]	15–40
Udział postoju czasu trwania części miejskiej [%]	6–30
Jazda w trasie pozamiejskiej	
Udział użytkowania w całkowitym przebytych dystansie [%]	~ 33 (±10)
Udział użytkowania w całkowitym czasie trwania testu [%]	23–43
Minimalny dystans [km]	16
Prędkość pojazdu [km/h]	60–90
Jazda w trasie autostradowej	
Udział użytkowania w całkowitym przebytych dystansie [%]	~ 33 (±10)
Udział użytkowania w całkowitym czasie trwania testu [%]	23–43
Minimalny dystans [km]	16
Prędkość pojazdu [km/h]	> 90 > 100 przez min. 5 minut > 145 przez maks. 3% czasu

Badania należy przeprowadzić dla zakresów wartości temperatury zewnętrznej oraz wysokości topograficznej, wynoszących odpowiednio 0–30°C oraz 0–700 m n.p.m., przy czym warunki otoczenia stają się „rozszerzone” w przypadku, gdy rozszerzony zostanie, co najmniej jeden z warunków (temperatura lub wysokość). Jeżeli część badania lub całe badanie przeprowadza się w warunkach wykraczających poza normalne lub rozszerzone warunki, badanie jest nieważne. Wartości wysokości oraz temperatury dla warunków rozszerzonych kształtują się następująco:

- temperatura: $-7\text{ °C} \leq T_z < 30\text{ °C}$ (zakres dolny); $30\text{ °C} < T_z \leq 35\text{ °C}$ (zakres górny),
- wysokość: $700 < h \leq 1300\text{ m n.p.m.}$

W wytycznych procedury RDE widnieje również zapis o maksymalnej różnicy wysokości drogi nad poziomem morza, która pomiędzy startem a zatrzymaniem nie może przekraczać 100 m.

Ostatni wymóg decydujący o poprawności przeprowadzonego testu RDE stanowi ogólna dynamika przejazdu, której główną miarą jest względne przyspieszenie dodatnie RPA. Wytyczne dotyczące jej wyznaczania oraz jej wartości dla wszystkich obiektów badawczych przedstawiono w kolejnym podrozdziale pracy.

7.2. Weryfikacja ogólnej dynamiki przejazdów miejskich pojazdów jednośladowych w rzeczywistych warunkach eksploatacji

Wytyczne określające wartości parametrów dynamicznych przejazdu zawarte zostały w dodatku 7 przywołanego rozporządzenia dotyczącego badań lekkich pojazdów pasażerskich i użytkowych. Dodatek ten opisuje procedury obliczeń w celu sprawdzenia dynamiki przejazdu poprzez ustalenie ogólnej nadwyżki lub braku dynamiki podczas jazdy w poszczególnych częściach: miejskiej, pozamiejskiej oraz autostradowej. Głównymi miarami weryfikacyjnymi poprawność przejazdu są: wartość 95. centyla iloczynu prędkości pojazdu i względnego przyspieszenia przejazdu $(v \cdot a_+)_{k_{[95]}}$ większego niż $0,1 \text{ m/s}^2$ oraz wartość względnego przyspieszenia dodatniego RPA_k .

Parametry dynamiczne takie jak przyspieszenie $(v \cdot a_+)$ lub RPA określa się, stosując sygnał prędkości o dokładności $0,1 \%$ dla wszystkich wartości prędkości powyżej 3 km/h i częstotliwości próbkowania wynoszącej 1 Hz . Wymóg ten w zakresie dokładności spełniają zwykle skalibrowane na odległość sygnały czujnika prędkości obrotowej kół. W przeciwnym razie przyspieszenie określa się z dokładnością $0,01 \text{ m/s}^2$ i częstotliwością próbkowania wynoszącą 1 Hz . W takim przypadku oddzielny sygnał prędkości, w $(v \cdot a_+)$, musi mieć dokładność, co najmniej $0,1 \text{ km/h}$.

Pierwszy z parametrów tj. $(v \cdot a_+)_{k_{[95]}}$ oblicza się w następujący sposób:

1. Uszeregowanie wartości $(v \cdot a_+)_{i,k}$ w każdym przedziale prędkości w porządku rosnącym dla wszystkich zbiorów danych o $a_{i,k} \geq 0,1 \text{ m/s}^2$ i określenie łącznej liczby tych próbek M_k .
2. Przypisanie wartości percentyla do wartości $(v \cdot a_+)_{i,k}$ dla $a_{i,k} \geq 0,1 \text{ m/s}^2$: najniższa wartość $(v \cdot a_+)$ otrzymuje percentyl $1/M_k$, druga najniższa $2/M_k$, trzecia najniższa $3/M_k$, a wartość najwyższa $M_k/M_k=100\%$.
3. 95. percentyl wartości $(v \cdot a_+)_{k_{[95]}}$ to wartość $(v \cdot a_+)_{j,k}$ z $j=M_k/95\%$. Jeżeli nie można osiągnąć $j=M_k/95\%$, $(v \cdot a_+)_{k_{[95]}}$ oblicza się za pomocą interpolacji liniowej kolejnych próbek j i $j+1$ dla $j/M_k < 95\%$ oraz $(j+1)/M_k > 95\%$.

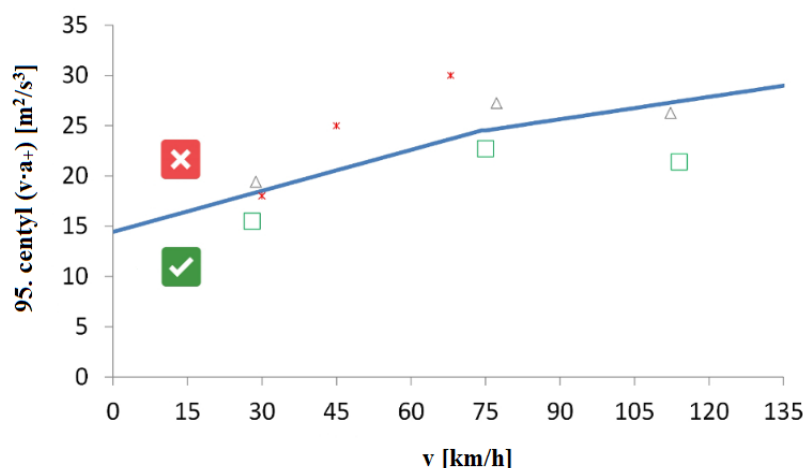
Jeżeli wartość $(v \cdot a_+)_{k_{[95]}}$ spełnia równanie dla każdej części testu:

$$(v \cdot a_+)_{k_{[95]}} < 0,136 \cdot v_{\text{sr},k} + 14,4 \quad (7.1)$$

dla $v_{\text{sr},k} \leq 74,6 \text{ km/h}$ oraz

$$(v \cdot a_+)_{k_{[95]}} < 0,0742 \cdot v_{\text{sr},k} + 18,966 \quad (7.2)$$

dla $v_{\text{sr},k} > 74,6 \text{ km/h}$ to przejazd uważa się za ważny. Graficzna weryfikacja ważności przykładowego przejazdu na podstawie parametru $(v \cdot a_+)_{k_{[95]}}$ została przedstawiona na rysunku 7.1.



Rys.7.1. Weryfikacja parametru dynamicznego $(v \cdot a_+)_{k[95]}$

Względne przyspieszenie dodatnie na przedział prędkości oblicza się zgodnie ze wzorem:

$$RPA_k = \frac{\sum_{j=1}^{N_k} \Delta_t \cdot (v \cdot a_+)_{j,k}}{\sum_{i=1}^{M_k} d_{i,k}} \quad (7.3)$$

gdzie:

RPA_k – to względne przyspieszenie dodatnie dla części miejskiej, pozamiejskiej, autostradowej przejazdu, wyrażone w m/s^2 ,

Δ_t – to różnica czasu równa 1 s,

N_k – to liczba próbek dla części przejazdu w terenie miejskim, pozamiejskim oraz autostradowym z przyspieszeniem dodatnim,

M_k – to łączna liczba próbek dla części przejazdu w terenie miejskim, pozamiejskim i autostradowym.

Jeżeli wartość RPA_k spełnia równanie dla każdej części testu:

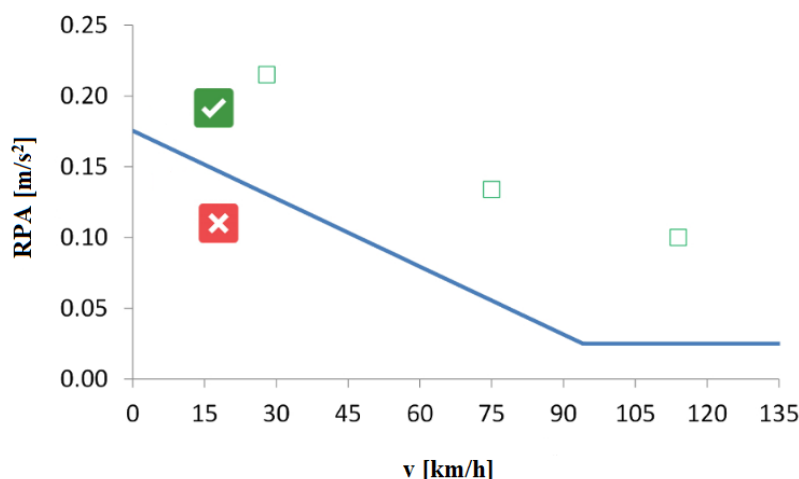
$$RPA > -0,0016 \cdot v_{sr,k} + 0,1755 \quad (7.4)$$

dla $v_{sr,k} \leq 94,05$ km/h oraz

$$RPA > 0,025 \quad (7.5)$$

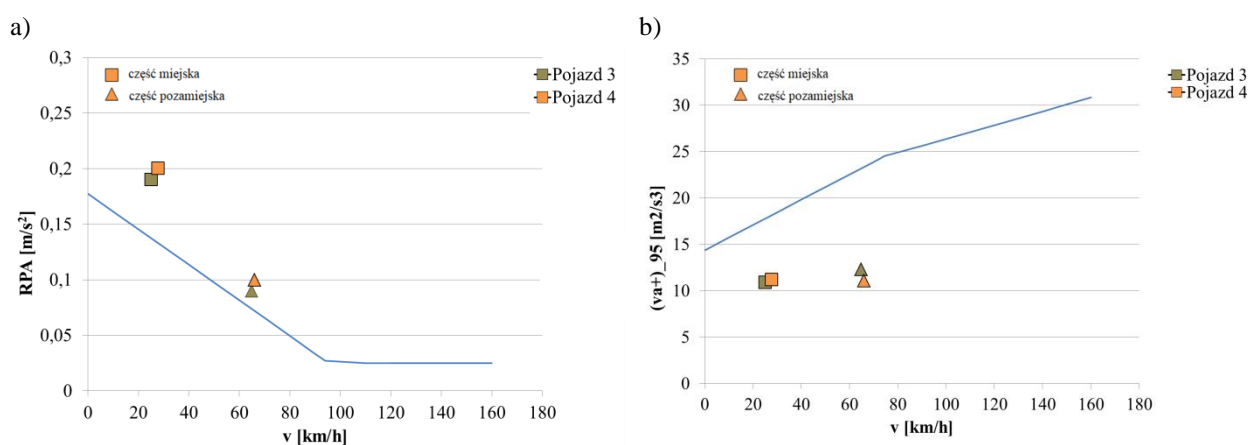
dla $v_{sr,k} > 94,05$ km/h to przejazd uważa się za ważny. Graficzna weryfikacja ważności przejazdu na postawie parametru RPA została przedstawiona na rysunku 7.2.

Rozważania dotyczące ogólnej dynamiki przejazdu przeprowadzono dla każdego przypadku relacji pojazd – trasa pomiarowa. Analiza parametru RPA wykazała, że na trasie A największą wartość uzyskał pojazd 1 ($0,24 m/s^2$). Ze względu na 100% udział wartości prędkości pojazdu < 60 km/h wyznaczenie parametru RPA możliwe był wyłącznie dla części miejskiej. Dla pojazdu 2 odnotowano wartość $0,22 m/s^2$, natomiast pojazdy wyposażone w silniki o objętości skokowej $125 cm^3$ (pojazd 3 i 4) uzyskały tę samą wartość ($0,21 m/s^2$) względnego przyspieszenia dodatniego. Wszystkie obiekty badawcze osiągnęły wartości większe od dopuszczalnej, a więc zgodnie z procedurą RDE dla lekkich pojazdów pasażerskich i użytkowych (rys. 7.3a).



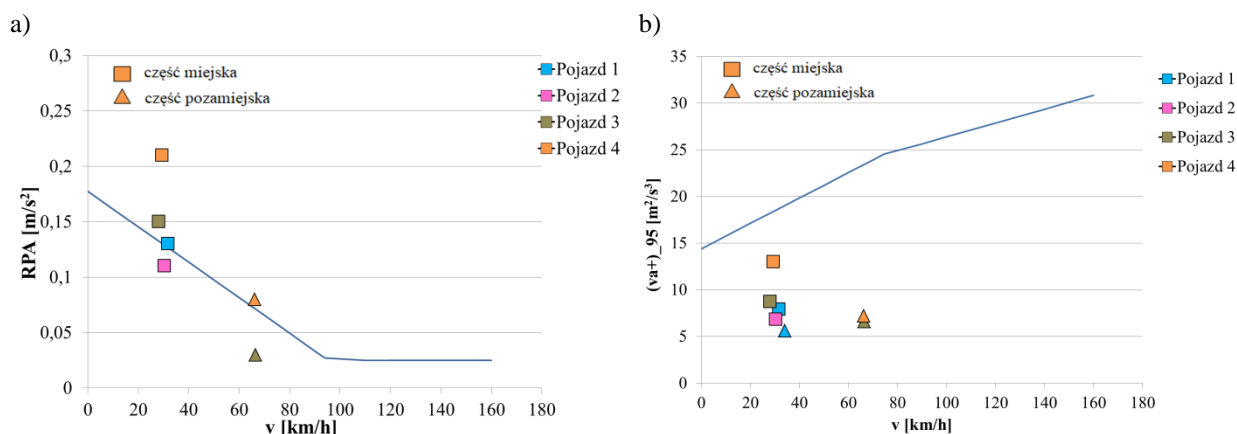
Rys.7.2. Weryfikacja parametru dynamicznego RPA

Analiza 95. percentyla ($v \cdot a_+$) (rys. 7.3b) dla części miejskiej wykazała, że największą wartość uzyskano dla pojazdu 4 ($12,2 \text{ m}^2/\text{s}^3$), a dla pozostałych pojazdów była ona znacząco mniejsza i wyniosła od $5,7 - 8,2 \text{ m}^2/\text{s}^3$. Wartości parametru dynamiki dla wszystkich obiektów badawczych mieściły się w dopuszczalnym zakresie, tj. były mniejsze od maksimum wyznaczonego na podstawie średnich prędkości w części miejskiej, a więc w tym przypadku średniej prędkości w całym teście badawczym.



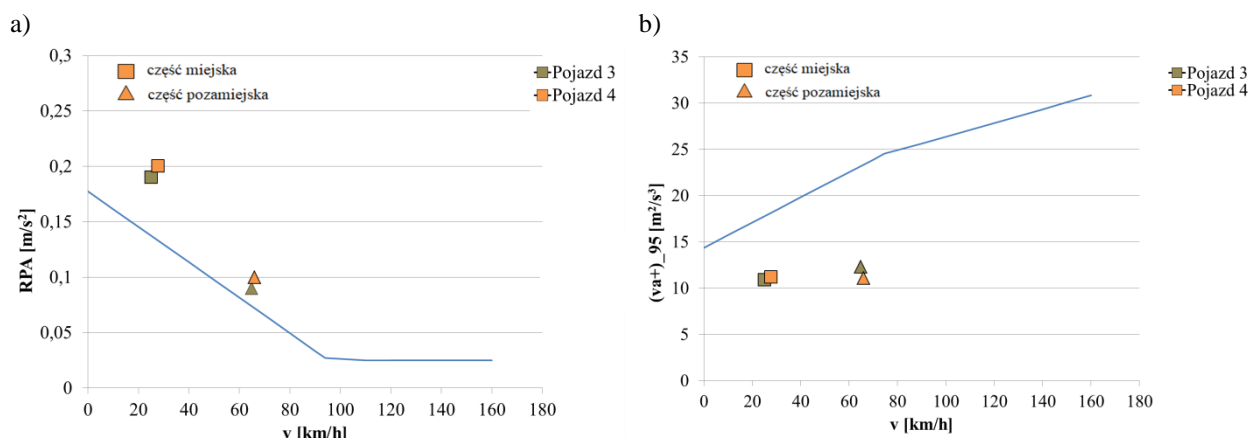
Rys. 7.3. Weryfikacja parametrów dynamicznych a) RPA b) $(v \cdot a_+)_{k[95]}$ na trasie pomiarowej A

Dla trasy pomiarowej B, dla pojazdów 3 i 4, oprócz udziału w teście trasy miejskiej odnotowano także udział części pozamiejskiej, a proporcja udziałów tych części wyniosła odpowiednio dla wymienionych pojazdów 71%/29% oraz 66%/34%. W związku z tym parametry określające dynamikę przejazdu wyznaczono, również dla części pozamiejskiej. Największe wartości RPA zarówno w części miejskiej, jak i pozamiejskiej na trasie B odnotowano dla pojazdu 4 i wyniosły odpowiednio $0,21 \text{ m/s}^2$ oraz $0,08 \text{ m/s}^2$ (rys. 7.4a). W przypadku parametru – 95. percentyl ($v \cdot a_+$) uzyskane wartości dla wszystkich analizowanych przypadków, zarówno w części miejskiej jak i pozamiejskiej, mieściły się w dopuszczalnym zakresie (rys. 7.4b). Największą wartość ($13 \text{ m}^2/\text{s}^3$), zarejestrowano w części miejskiej przejazdu obiektu nr 4.



Rys. 7.4. Weryfikacja parametrów dynamicznych a) RPA b) $(v \cdot a_+)_{k_{95}}$ na trasie pomiarowej B

Na trasie pomiarowej C wykonano testy dla pojazdów 3 i 4. Trasa została skonstruowana tak by obejmowała drogi o różnych maksymalnych prędkościach, a udział cyklu miejskiego oraz pozamiejskiego wynosił po 50%. Analiza przejazdu wykazała jednak, iż pojazdy poruszały się z prędkościami, które zostały przyporządkowanego do konkretnej części z udziałami wynoszącymi 86% i 14% (pojazd 3) oraz 80% i 20% (pojazd 4) odpowiednio w terenie miejskim i pozamiejskim. Pomimo tego, parametry określające dynamikę przejazdu wyznaczono również dla części pozamiejskiej (rys. 7.5).



Rys. 7.5. Weryfikacja parametrów dynamicznych a) RPA b) $(v \cdot a_+)_{k_{95}}$ na trasie pomiarowej C

W przypadku pierwszego z nich tj. względnego przyspieszenia dodatniego uzyskane wartości dla obu pojazdów są większe od minimum (wyznaczona krzywa) zarówno w części miejskiej, jak i pozamiejskiej, przy czym większymi wartościami ($0,2 \text{ m/s}^2$; $0,1 \text{ m/s}^2$) charakteryzuje się pojazd 4. Pojazd 3 osiągnął nieco mniejsze wartości RPA równe $0,19 \text{ m/s}^2$ i $0,09 \text{ m/s}^2$ odpowiednio w terenie miejskim i pozamiejskim (rys. 7.5a).

Analiza $(v \cdot a_+)_{k_{95}}$ w części miejskiej i pozamiejskiej wykazała, iż jego wartości we wszystkich przypadkach znalazły się w obszarze opisanego krzywą wartości maksymalnych, a więc zostały spełnione wytyczne procedury RDE, przy czym większą wartością w części miejskiej ($11,2 \text{ m}^2/\text{s}^3$) charakteryzuje się pojazd 4 (rys 7.5b). Wartość 95 percentyl $(v \cdot a_+)$ dla pojazdu 3 na trasie pomiarowej C wyniosła $10,9 \text{ m}^2/\text{s}^3$. Odwrotna sytuacja ma miejsce w przypadku części pozamiejskiej, gdzie większą wartość ($12,3 \text{ m}^2/\text{s}^3$) odnotowano dla pojazdu 3. W tabe-

lach 7.2–7.4 zestawiono najważniejsze wyniki dotyczące warunków przejazdów dla wszystkich przypadków pojazd – trasa pomiarowa.

Tabela 7.2. Zestawienie wyników dotyczących warunków przejazdu na trasie A

Parametr testu	Wynik			
	Trasa A			
	Pojazd 1	Pojazd 2	Pojazd 3	Pojazd 4
Trasa miejska [km]	7,5	7,5	7,5	7,4
Trasa pozamiejska [km]	0	0	0	0
Łączna trasa [km]	7,5	7,5	7,5	7,4
Udział trasy miejskiej [%]	100	100	100	99,5
Udział trasy pozamiejskiej [%]	0	0	0	0,5
Średnia prędkość w trasie miejskiej [km/h]	20,9	17,7	21,8	21,4
Średnia prędkość w trasie pozamiejskiej [km/h]	0	0	0	61
Udział postoju w trasie miejskiej [%]	28	26	18	26
Maksymalna prędkość jazdy [km/h]	52	48,7	46,7	61
Czas trwania przejazdu [min]	21,6	25,6	20,6	20,7
Miasto: 95. centyl $v \cdot a_+$ [m^2/s^3]	8,2	5,7	7,5	12,2
Pozam: 95. centyl $v \cdot a_+$ [m^2/s^3]	0	0	0	7,3
Miasto: RPA [m/s^2]	0,24	0,21	0,17	0,21
Pozam: RPA [m/s^2]	0	0	0	0,22

Tabela 7.3. Zestawienie wyników dotyczących warunków przejazdu na trasie B

Parametr testu	Wynik			
	Trasa B			
	Pojazd 1	Pojazd 2	Pojazd 3	Pojazd 4
Trasa miejska [km]	13,1	13	9,6	8,7
Trasa pozamiejska [km]	0,9	0	3,9	4,5
Łączna trasa [km]	14	13	13,5	13,2
Udział trasy miejskiej [%]	94	100	71	66
Udział trasy pozamiejskiej [%]	6	0	29	34
Średnia prędkość w trasie miejskiej [km/h]	31,8	30,4	28,2	29,4
Średnia prędkość w trasie pozamiejskiej [km/h]	61,8	0	66,4	66,2
Udział postoju w trasie miejskiej [%]	20	15	13	13,5
Maksymalna prędkość jazdy [km/h]	65	52,7	71,7	80
Czas trwania przejazdu [min]	25,6	25,7	24	21,9
Miasto: 95. centyl $v \cdot a_+$ [m^2/s^3]	7,9	6,8	8,7	13
Pozam: 95. centyl $v \cdot a_+$ [m^2/s^3]	5,6	0	6,6	7,2
Miasto.: RPA [m/s^2]	0,13	0,11	0,15	0,21
Pozam.: RPA [m/s^2]	0,04	0	0,03	0,08

Tabela 7.4. Zestawienie wyników dotyczących warunków przejazdu na trasie C

Parametr testu	Wynik	
	Trasa C	
	Pojazd 3	Pojazd 4
Trasa miejska [km]	20,2	19,6
Trasa pozamiejska [km]	3,4	4,8
Łączna trasa [km]	23,6	24,4
Udział trasy miejskiej [%]	86	80
Udział trasy pozamiejskiej [%]	14	20
Średnia prędkość w trasie miejskiej [km/h]	25,2	27,8
Średnia prędkość w trasie pozamiejskiej [km/h]	64,8	66
Udział postoju w trasie miejskiej [%]	16	13
Maksymalna prędkość jazdy [km/h]	71,8	77
Czas trwania przejazdu [min]	51,3	46,6
Miasto: 95. centyl $v \cdot a_+$ [m^2/s^3]	10,9	11,2
Pozam.: 95. centyl $v \cdot a_+$ [m^2/s^3]	12,3	11,1
Miasto: RPA [m/s^2]	0,19	0,2
Pozam.: RPA [m/s^2]	0,09	0,1

7.3. Propozycja autorskiej procedury badawczej dla miejskich pojazdów jednośladowych w rzeczywistych warunkach eksploatacji

Przegląd literaturowy, analiza przepisów w aspekcie procedur badawczych innych kategorii pojazdów oraz badania własne pozwoliły na sformułowanie propozycji wytycznych do autorskiej procedury badań miejskich pojazdów jednośladowych w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Dla testu zaproponowano nazwę **RUMET – Real Urban Motorcycle Emission Test** i określono wymagania dotyczące aparatury pomiarowej, warunków eksploatacyjnych, dynamiki przejazdu oraz warunków otoczenia. Najważniejsze wymagania zaproponowanej procedury RUMET zostały podsumowane w tabeli 7.5.

Wymagania dotyczące aparatury pomiarowej:

1. Badania należy przeprowadzić przy użyciu systemu PEMS, który musi składać się z następujących elementów:
 - analizatory do oznaczania stężenia zanieczyszczeń: CO, HC, NO_x oraz CO₂ w spalinach oraz zawartości O₂,
 - globalny system pozycjonowania do określania położenia, prędkości pojazdu i wysokości bezwzględnej.
 - czujniki lub inne urządzenia, które nie stanowią części pojazdu np. do pomiaru temperatury otoczenia, względnej wilgotności, ciśnienia atmosferycznego oraz prędkości pojazdu,
 - moduł do pomiaru temperatury i ciśnienia w kolektorze dolotowym oraz prędkości obrotowej wału korbowego,

- ustandaryzowany tester diagnostyczny OBD,
 - własne, wewnętrzne źródło zasilania aparatury, niezależnego od badanego pojazdu.
2. Wszystkie badane parametry powinny być mierzone i rejestrowane przy stałej częstotliwości 1 Hz lub większej.
 3. Instalacja systemu PEMS nie może wpływać na emisję zanieczyszczeń oraz na działanie badanego pojazdu – w tym przypadku do wszelkich prac przygotowawczych (zerowanie, kalibracja, wygrzewanie, instalacja) powinno wykorzystywać się niezależne źródło zasilania.
 4. Podczas instalacji przyrządów pomiarowych na badanym pojeździe należy zachować ostrożność, aby zminimalizować ich wpływ na rozkład obciążenia między kołami oraz dodatkową stratę aerodynamiczną.
 5. Czas ciągłej pracy aparatury powinien wynosić minimum 60 minut, opcjonalnie z możliwością automatycznego zerowania.
 6. Masa aparatury nie powinna przekraczać 20 kg.
 7. Oznaczanie stężeń zanieczyszczeń powinno odbywać się przy użyciu analizatorów, opartych na następujących metodach działania:
 - pomiar CO – metoda niedyspersyjna na podczerwień,
 - pomiar CO₂ – metoda niedyspersyjna na podczerwień,
 - pomiar HC, CH₄, NMHC – metoda niedyspersyjna na podczerwień lub płomienio-jonizacyjna,
 - pomiar NO_x – metoda niedyspersyjna na ultrafiolet, chemiluminescencyjna lub elektrochemiczna,
 - pomiar O₂ – metoda elektrochemiczna.

Wymagania dotyczące warunków otoczenia:

1. Maksymalna prędkość wiatru powinna wynosić 3 m/s, a w porywach 5 m/s.
2. Maksymalna wilgotność względna powinna wynosić 95%.
3. Badania należy wykonać przy temperaturze z zakresu 0–30°C.

Wymagania dotyczące warunków eksploatacyjnych:

1. Badania należy przeprowadzać w dni robocze na utwardzonych drogach i ulicach.
2. Dobór trasy powinien opierać się na wymaganiu dotyczącym minimalnego czasu trwania badania (czas testu został określony w wymaganiach dotyczących przejazdu).
3. Wysokość topograficzna powinna mieścić się w zakresie 0–700 m n.p.m, a maksymalna różnica wysokości pomiędzy startem a zatrzymaniem nie może przekraczać 50 m.
4. Kierowca powinien nosić dobrze dopasowany (jednoczęściowy) ubiór lub podobny, kask ochronny, buty z cholewkami i rękawice.
5. Masa kierowcy ubranego i wyposażonego powinna stanowić 80 kg ± 5 kg.
6. Pojazd musi być sprawny technicznie (przed badaniem należy przeprowadzić czynności kontrolne zgodnie ze specyfikacją producenta np. dla przewidzianego użytkownika: kół, hamulców czy zawieszenia) oraz wyregulowany po przejechaniu minimum 300 km.

7. W warunkach laboratoryjnych, przed przystąpieniem do badań drogowych, należy pobrać próbki spalin podczas pracy silnika na biegu jałowym w stanie zimnym i gorącym do dalszej analizy chromatograficznej.

Wymagania dotyczące warunków przejazdu:

1. Czas trwania przejazdu powinien mieścić się w zakresie 20–30 minut dla miejskich pojazdów jednośladowych, wyposażonych w silniki o objętości skokowej $\leq 50 \text{ cm}^3$.
2. Czas trwania przejazdu powinien mieścić się w zakresie 20–45 minut dla miejskich pojazdów jednośladowych, wyposażonych w silniki o objętości skokowej $\leq 125 \text{ cm}^3$ (bez ograniczonej prędkości).
3. Udział jazdy w terenie miejskim ($v \leq 60 \text{ km/h}$) powinien wynosić 100% ($\pm 10\%$) w przypadku badania miejskich pojazdów jednośladowych, wyposażonych w silniki o objętości skokowej $\leq 50 \text{ cm}^3$ oraz 70% ($\pm 10\%$) w przypadku badania wyposażonych w silniki o objętości skokowej $\leq 125 \text{ cm}^3$ (bez ograniczonej prędkości).
4. Udział jazdy w terenie miejskim ($60 \text{ km/h} > v \leq 90 \text{ km/h}$) powinien wynosić 30% ($\pm 10\%$) w przypadku badania pojazdów wyposażonych w silniki o objętości skokowej $\leq 125 \text{ cm}^3$ (bez ograniczonej prędkości).
5. Łączny dystans trasy pomiarowej powinien mieścić się w zakresie 7–10 kilometrów dla miejskich pojazdów jednośladowych, wyposażonych w silniki o objętości skokowej $\leq 50 \text{ cm}^3$.
6. Łączny dystans trasy pomiarowej powinien mieścić się w zakresie 9–13 kilometrów dla miejskich pojazdów jednośladowych, wyposażonych w silniki o objętości skokowej $\leq 125 \text{ cm}^3$ (bez ograniczonej prędkości).
7. Średnia prędkość w trasie miejskiej powinna mieścić się w zakresie 15–30 km/h
8. W przypadku badań miejskich pojazdów jednośladowych, wyposażonych w silniki o objętości skokowej $\leq 125 \text{ cm}^3$ (bez ograniczonej prędkości) maksymalna prędkość jazdy w całym teście nie powinna przekraczać 75% osiągów pojazdu.
9. Udział postoju w trasie miejskiej powinien się mieścić w zakresie 10–30%.
10. Parametry dynamiczne zgodne z wymaganiami procedury RDE określonych w Dodatku 7 Rozporządzenia Komisji (UE) 2017/1154 z dnia 7 czerwca 2017 r.

W aspekcie wytycznych testu RUMET dotyczących aparatury pomiarowej, w części lub w całości z istniejącej procedury RDE pochodzą punkty 1, 2, 3, 5 oraz 7. W tym przypadku szczególnie istotne jest ograniczenie masy urządzenia pomiarowego, co zostało określone w pkt. 6 omawianych wymagań. Co więcej, aparatura powinna mieć własne, wewnętrzne źródło zasilania, inaczej niż to zostało opisane w procedurze RDE. W przypadku wymagań dla pojazdów jednośladowych zrezygnowano z przepływomierza strumienia spalin jako niezbędnej składowej systemu PEMS. Nie zawsze jest on możliwy do zamontowania na obiektach badawczych rozważanej kategorii. Ponadto miejskie pojazdy jednośladowe w nielicznych przypadkach wyposażone są systemy diagnostyczne OBD. Biorąc powyższe pod uwagę, dla procedury RUMET w składzie systemu PEMS obligatoryjnie powinien znajdować się moduł do pomiaru temperatury i ciśnienia w kolektorze dolotowym oraz prędkości obrotowej wału korbowego.

Tabela 7.5. Wymagania dotyczące procedury RUMET

RUMET – Real Urban Motorcycle Emission Test	
Parameter testu	Wymóg
Aparatura badawcza, masa aparatury [kg]	rodzina systemów PEMS, ≤ 20
Tempertura zewnętrzna [°C]	0–30
Wysokość topograficzna [m n.p.m]	0–700
Masa kierowcy [kg]	80 ± 5
Dystans [km]: $V \leq 50 \text{ cm}^3$ $V \leq 125 \text{ cm}^3$ (bez ograniczonej prędkości)	7–10 9–13
Udział trasy miejskiej [%]: $V \leq 50 \text{ cm}^3$ $V \leq 125 \text{ cm}^3$ (bez ograniczonej prędkości)	100 (± 10) 70 (± 10)
Udział trasy miejskiej [%]: $V \leq 50 \text{ cm}^3$ $V \leq 125 \text{ cm}^3$ (bez ograniczonej prędkości)	0 (± 10) 30 (± 10)
Czas trwania testu [min]: $V \leq 50 \text{ cm}^3$ $V \leq 125 \text{ cm}^3$ (bez ograniczonej prędkości)	20–30 20–45
Średnia prędkość w trasie miejskiej [km/h]	15–30
Udział postoju w trasie miejskiej [%]	10–30
Maksymalna prędkość jazdy [km] $V \leq 125 \text{ cm}^3$ (bez ograniczonej prędkości)	$0,75v_{\max}$
RPA [m/s^2]	$> \text{RPA}_{\min}$ (dla każdego warunków jazdy)
$v \cdot a_+$ [m^2/s^3]	$< v \cdot a_{+\min}$ (dla każdego warunków jazdy)

W aspekcie wymagań warunków eksploatacyjnych punkty 1–3 procedury RUMET zostały bezpośrednio zapożyczone z procedury obowiązującej dla pasażerskich i użytkowych lekkich pojazdów drogowych. W zakresie wymagań dotyczących warunków przejazdu, pojazdy z silnikami o objętości skokowej $\leq 50 \text{ cm}^3$ i $\leq 125 \text{ cm}^3$ (bez ograniczonej prędkości) należy potraktować w sposób indywidualny, co zostało określone w punktach 1–8 zaproponowanej procedury badawczej. W zakresie wytycznych dotyczących przejazdu jedynie wymagania dotyczące jego dynamiki mogą zostać zaadaptowane na potrzeby badań pojazdów jednośladowych bezpośrednio z procedury RDE (pkt. 10), co zostało udowodnione w niniejszej pracy.

Na podstawie przeprowadzonych badań zaproponowano współczynniki zgodności CF (*Conformity Factor*) stosowany do oceny zgodności pojazdu z wartościami dopuszczalnymi emisji związków toksycznych przy wykonywaniu pomiarów w rzeczywistych warunkach jazdy, zgodnie z procedurą RUMET. Współczynnik ten oznacza krotność zwiększenia (bądź zmniejszenia) wartości drogowej emisji związków toksycznych w rzeczywistych warunkach ruchu w teście RUMET w stosunku do testu homologacyjnego i zdefiniowany jest następująco:

$$CF_j = \frac{b_{RUMET,j}}{b_{test,j}} \quad (7.6)$$

gdzie:

j – związek toksyczny, dla którego określono współczynnik CF ,

$b_{RUMET,j}$ – emisja drogowa związku toksycznego uzyskana w teście procedury RUMET, g/km,

$b_{test,j}$ – emisja drogowa związku toksycznego uzyskana w teście homologacyjnym, g/km.

Wartości współczynników CF dla poszczególnych związków toksycznych dla procedury RUMET wynoszą:

- „1,5” dla emisji drogowej CO oraz NO_x ,
- „1,0” dla emisji drogowej HC.

8. Wnioski

Ze względu na różnorodny charakter otrzymanych rezultatów w ramach realizacji zaplanowanych prac, opisanych w niniejszej dysertacji, wyodrębniono kolejno wnioski ogólne, szczegółowe, utylitarne, metodyczne oraz prognostyczne (kierunki dalszych prac).

Wnioski ogólne

1. Na podstawie opracowanej metodyki badawczej, wykonanych prac i zaprezentowanych analiz należy stwierdzić, że osiągnięto założone cele rozprawy doktorskiej.
2. Pierwszym z celów dysertacji było określenie emisji związków toksycznych spalin z silników miejskich pojazdów jednośladowych i parametrów jezdnych oraz wskazanie zależności między tymi wielkościami. Weryfikacji poddane zostały obecne metody badań tej grupy pojazdów – testy homologacyjne. Wykonane zostały wszystkie niezbędne prace w ramach opracowanej metodyki i wyznaczona została rzeczywista emisja jaka występuje podczas eksploatacji pojazdów kategorii L. Na tej podstawie autorka pracy wykazała, że emisja w rzeczywistych warunkach eksploatacji znacznie różni się od wartości uzyskiwanych w badaniach laboratoryjnych. Jest to bezpośrednio związane z niereprezentatywnością w aspekcie parametrów ruchu, obecnie obowiązujących testów homologacyjnych.
3. Badania własne pozwoliły na realizację drugiego celu rozprawy doktorskiej tj. sformułowanie proponowanych wytycznych do autorskiej procedury badań miejskich pojazdów jednośladowych w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Określone zostały wymagania dotyczące aparatury pomiarowej, warunków eksploatacyjnych, dynamiki przejazdu oraz warunków otoczenia.
4. Osiągnięcie celów pracy jest równoznaczne z udzieleniem odpowiedzi na postawione pytanie badawcze: *jaka jest emisja związków toksycznych spalin w rzeczywistych warunkach eksploatacji i jaka jest jej zależność od warunków eksploatacji pojazdów jednośladowych, jak mierzyć emisję, jakie powinny być wytyczne dotyczących testów drogowych dla tej grupy pojazdów?* W ramach realizacji poszczególnych etapów założonych prac określono wpływ parametrów jezdnych na emisję związków szkodliwych z miejskich pojazdów jednośladowych w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Analizy wykazały konieczność sformułowania wytycznych do autorskiej procedury badawczej dla tej grupy pojazdów, co uczyniono w ramach niniejszej dysertacji.
5. Uzyskane w ten sposób wyniki badań są unikatowe zarówno w skali lokalnej, jak i globalnej; syntetyczny przegląd literaturowy wykazał bowiem brak istniejących opracowań i publikacji zawierających kompleksowy opis problemu emisji związków toksycznych spalin z silników miejskich pojazdów jednośladowych w rzeczywistych warunkach drogowych.

Wnioski szczegółowe:

1. Charakterystyki udziału czasu eksploatacji obiektów badawczych w rzeczywistej eksploatacji, wyposażonych w silniki o objętości skokowej $\leq 50 \text{ cm}^3$ wykazały, że największy udział w ruchu tych pojazdów stanowi postój, którego wartości wyniosły

- od 14,91% do 19,86% przy wartości 14,20% dla skróconego testu homologacyjnego WMTC. Średnia różnica wynosi 5,11%, konieczna jest zatem modyfikacja obowiązującego testu laboratoryjnego dla pojazdów kategorii L1e-B, ze szczególnym uwzględnieniem charakterystyki ruchu miejskiego (liczne postoje).
2. Charakterystyki udziału czasu eksploatacji obiektów badawczych w rzeczywistej eksploatacji, wyposażonych w silniki o objętości skokowej 125 cm³ wykazały, że największy udział w ruchu tych pojazdów stanowi postój, którego wartości wyniosły od 12,40% do 25,86% przy wartości 8,99% dla testu homologacyjnego WMTC. Średnia różnica wynosi 7,10%, niezbędne są zatem kroki prowadzące do modyfikacji obowiązującego testu laboratoryjnego dla pojazdów tej kategorii, ze szczególnym uwzględnieniem charakterystyki ruchu w części miejskiej (liczne postoje).
 3. Analizując wszystkie przejazdy obiektów wyposażonych w silniki zarówno o objętości skokowej 50 cm³, jak i 125 cm³, można stwierdzić że drugi znaczący obszar pracy stanowiły przedziały dodatnich wartości przyspieszeń w całych zakresach analizowanych prędkości, a wartości udziału czasu eksploatacji w tym obszarze mieściły się w przedziale 27–38%, z wartością średnią 32%. Dla pojazdów 1 i 2, osiągnięto zbliżony obszar zamienności parametrów ruchu w odniesieniu do testu WMTC. Mimo to, udziały czasu eksploatacji dla drugiego obszaru znaczącego różniły się średnio o 39% między badanymi pojazdami w rzeczywistych warunkach eksploatacji a testem laboratoryjnym ($u_t = 70\%$). Świadczy to o uproszczeniu testu WMTC, w którym umniejsza się udział czasu eksploatacji pojazdów podczas ujemnych wartości przyspieszeń (hamowania). Dla pojazdów 3 i 4 także osiągnięto duże różnice dla drugiego obszaru znaczącego, jednakże w tym przypadku odnotowano istotne rozbieżności już dla samego obszaru zmienności parametrów ruchu. Konieczne jest indywidualne podejście do tej kategorii pojazdów i ograniczenie wymagań testu WMTC o część autostradową.
 4. Analiza wyznaczonych różnic między wartościami udziału czasu eksploatacji dla warunków rzeczywistych i testów homologacyjnych wykazała, że maksima pojedynczych pól wyniosły 16,06% i 13,33% (dla pojazdów nr 1 i 2) odpowiednio dla trasy pomiarowej A i B. W przypadku pojazdów 3 i 4 osiągnęły one wartości 12,84% dla trasy A, 16,88% dla trasy B oraz 7,12% dla trasy pomiarowej C. Znaczące rozbieżności świadczą o niereprezentatywności obowiązujących testów homologacyjnych i konieczności ich modyfikacji dla omawianej grupy pojazdów lub legislacji badań w rzeczywistych warunkach eksploatacji.
 5. Analizując wszystkie przejazdy można zauważyć, że wartości maksymalne natężenia emisji związków toksycznych dla 75% wszystkich przypadków odnotowano w zakresie dużych prędkości pojazdu (40 km/h; 70 km/h) podczas przyspieszeń z szerokiego zakresu $\langle -1 \text{ m/s}^2; 2 \text{ m/s}^2 \rangle$. Wartości udziału czasu eksploatacji w tych polach wyniosły od 0,03 do 6,11%. Określony został w związku z tym wpływ rzeczywistych parametrów ruchu na emisję związków toksycznych, o czym świadczy powtarzalność otrzymanych wyników.
 6. Wyznaczone wyniki emisji drogowej zanieczyszczeń wykazały, iż największymi wartościami charakteryzował się pojazd 2, który wyposażony jest w silnik dwusuwowy.

Świadczy to o słuszności kierunku wycofywania pojazdów jednośladowych z tego typu napędami z produkcji.

7. Analiza porównawcza współczynników emisji drogowej wyznaczonych na podstawie badań w rzeczywistych warunkach eksploatacji z wartościami dopuszczalnymi testów homologacyjnych, wykazała znaczące przekroczenia limitów CO oraz NO_x. W przypadku pojazdów wyposażonych w silniki czterosuwowe przekroczenia CO odnotowano na większości tras pomiarowych, a ich wartości wynosiły od 2 do 59%, ze średnią 37%. Dla pojazdu z silnikiem dwusuwowym przekroczenia były znacząco większe i wyniosły 1215% dla trasy A i 1149% dla trasy B. Dla tego pojazdu odnotowano także przekroczenia wartości dopuszczalnej emisji drogowej NO_x + HC o 408% i 102% odpowiednio dla trasy A i B. W przypadku pojazdów 3 i 4 średnia wartość przekroczenia limitów NO_x wyniosła 69% dla zakresu wartości 40 – 100%.
8. Uzyskane wyniki analizy jakościowej składników chemicznych wskazują na obecność w badanych próbkach alkenów, alkanów, aldehydów alifatycznych, węglowodorów aromatycznych oraz pierścieniowych (cykloalkany). Większość z nich cechuje się negatywnym wpływem na środowisko oraz zdrowie człowieka. Nie jest jednak wiadome czy w próbkach znajdowały się ich znaczące czy śladowe ilości. W związku z tym konieczne są dalsze badania tj. analiza ilościowa spalin z omawianej grupy pojazdów, uwzględniająca specyfikę eksploatacji miejskich pojazdów jednośladowych. Przegląd literaturowy wykazał braki tego typu badań z tej kategorii pojazdów.
9. Ocena jakościowa próbek spalin wykazała, że pojazd jednośladowy wykazuje większą różnorodność jakościową w zależności od punktu pracy silnika (prędkość obrotowa wału korbowego) w przypadku pochodnych węglowodorów aromatycznych z grupy BTX, szczególnie istotnych pod względem toksykologicznym.

Wnioski metodyczne:

1. Badania drogowe obejmowały opracowane przez autorkę trzy trasy na terenie aglomeracji poznańskiej, reprezentujące typowe warunki użytkowania obranej grupy badawczej (motorowery i motocykle z silnikami o objętości skokowej nieprzekraczającej 125 cm³). Uzyskane wyniki odzwierciedlają zatem warunki lokalne, jednakże mogą one stanowić podstawę do skonstruowania ustandaryzowanej i globalnej procedury do pomiaru związków toksycznych z miejskich pojazdów jednośladowych w rzeczywistych warunkach eksploatacji.
2. Postępujący rozwój technologiczny i miniaturyzacja aparatury pomiarowej umożliwia obecnie wykonywanie badań w rzeczywistych warunkach eksploatacji dla pojazdów jednośladowych.
3. Uzyskane wyniki badań potwierdziły konieczność modyfikacji lub rozszerzenia obecnych metod badawczych. W związku z tym zaproponowano i opisano autorską procedurę badawczą pomiaru emisji związków gazowych z miejskich pojazdów jednośladowych o nazwie RUMET – Real Urban Motorcycle Emission Test.
4. W przypadku pojazdów jednośladowych, wyposażonych w silniki o objętości skokowej ≤ 50 cm³ pomiary wykonane na trasie A całkowicie spełniają zaproponowaną procedurę

RUMET. Dla wykonanych pomiarów na tej trasie odnotowano przekroczenia wartości dopuszczalnej emisji CO dla obu pojazdów oraz znaczącego przekroczenia sumy emisji HC+NO_x w przypadku obiektu 2.

5. Dla pojazdów jednośladowych, wyposażonych w silniki o objętości skokowej $\leq 125 \text{ cm}^3$ (bez ograniczonej prędkości) pomiary wykonane na trasie B całkowicie spełniają zaproponowaną procedurę RUMET. Dla wykonanych pomiarów na tej trasie odnotowano przekroczenia wartości dopuszczalnej emisji CO oraz NO_x dla obu pojazdów tej kategorii.

Wnioski utylitarne:

1. Najważniejszym aspektem utylitarnym dysertacji, stanowiący zarazem główny skutek społeczny jej realizacji, jest uświadomienie problemu nadmiernej emisji związków toksycznych spalin z pojazdów jednośladowych w ośrodkach miejskich.
2. Legislacja opracowanej metodyki badań w rzeczywistych warunkach eksploatacji, wymusiłaby na producentach pojazdów jednośladowych zastosowanie rozwiązań konstrukcyjnych mających na celu spełnienie określonych wytycznych procedury, w tym wartości dopuszczalnych emisji związków toksycznych. W konsekwencji poprawie uległaby jakość powietrza w ośrodkach miejskich.
3. Kolejnym przewidywanym pozytywnym skutkiem wprowadzenia w życie proponowanej procedury badawczej lub podobnej, będzie doskonalenie istniejących lub pojawienie się na rynku całkowicie nowych ofert urządzeń pomiarowych (w szczególności małogabarytowych) powstałych np. w wyniku naukowych projektów badawczo-rozwojowych

Wnioski prognostyczne (kierunki dalszych prac):

Przedstawione badania i uzyskane wyniki nie wyczerpują w pełni zagadnień podjętych w rozprawie doktorskiej. Konieczna jest realizacja dalszych prac badawczych obejmujących grupę miejskich pojazdów jednośladowych. W związku z tym sformułowano kierunki dalszych działań w tym aspekcie:

1. Weryfikacja zaproponowanej autorskiej procedury badania emisji związków toksycznych w rzeczywistych warunkach eksploatacji z miejskich pojazdów jednośladowych.
2. Propozycja zmodyfikowanego testu WMTC dla miejskich pojazdów jednośladowych oraz jego badania weryfikacyjne.
3. Badania parametrów eksploatacyjnych i emisji związków toksycznych w rzeczywistych warunkach eksploatacji dla pozostałych kategorii pojazdów jednośladowych.
4. Wyznaczenie zależności między parametrami pracy silników miejskich pojazdów jednośladowych (prędkość obrotowa wału korbowego oraz moment obrotowy) a emisją związków toksycznych.
5. Badania emisji cząstek stałych w rzeczywistych warunkach eksploatacji miejskich pojazdów jednośladowych, dotyczące zarówno ich masy, jak i liczby.
6. Analiza ilościowa składu chemicznego związków toksycznych z miejskich pojazdów jednośladowych.

Literatura

- [1] Abolhasani S, Frey HC, Kim K, Rasdorf W, Lewis P, Pang SH. Real-world in-use activity, fuel use, and emissions for nonroad construction vehicles: a case study for excavators. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2008 Aug 1;58(8):1033-46.
- [2] Adak P, Sahu R, Elumalai SP. Development of emission factors for motorcycles and shared auto-rickshaws using real-world driving cycle for a typical Indian city. *Science of the Total Environment*. 2016, 15;544:299-308.
- [3] Almén J. Swedish In-Service Testing Programme on Emissions from Heavy-Duty Vehicles. AVL Sweden Certification & Regulation Compliance. 2010.
- [4] Alvarez R, Weilenmann M, Favez JY. Assessing the real-world performance of modern pollutant abatement systems on motorcycles. *Atmospheric Environment*. 2009, 43(8):1503-9
- [5] Alves CA, Lopes DJ, Calvo AI, Evtugina M, Rocha S, Nunes T. Emissions from light-duty diesel and gasoline in-use vehicles measured on chassis dynamometer test cycles. *Aerosol and air quality research*. 2015, 15(1):99-116.
- [6] Andrzejewski M. Wpływ stylu jazdy kierowcy na zużycie paliwa i emisję substancji szkodliwych w spalinach. Politechnika Poznańska, 2013.
- [7] Anup S, Yang Z. New two-wheeler vehicle fleet in India for fiscal year 2017–18. *International Council for Clean Transport*. 2020.
- [8] Arun NH, Mahesh S, Ramadurai G, Nagendra SS. Development of driving cycles for passenger cars and motorcycles in Chennai, India. *Sustainable cities and society*. 2017, 1;32:508-12.
- [9] Awad OI, Ali OM, Hammid AT, Mamat R. Impact of fuel oil moisture reduction on the fuel properties and combustion characteristics of SI engine fueled with gasoline-fuel oil blends. *Renewable energy*. 2018, 1;123:79-91.
- [10] Bajerlein M. Studium emisji związków toksycznych spalin z systemów napędowych autobusów miejskich. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej; 2013.
- [11] Benjamin M. Toward Clean Air in 2050: Perspectives on Portable Emissions Measurement Systems (PEMS). PEMS Conference & Workshop University of California, Riverside 2013.
- [12] Birch BJ, Amann M. Electronic fuel system development for air-cooled motorcycles. *SAE transactions*. 2004, 1:1877-85.
- [13] Bonifer M, Kiemel R. Enhancing a Catalyst Formulation for a Big Displacement Motorcycle for Future Emission Regulations. SAE Technical Paper; 2014, 11.
- [14] Bonnel P., Kubelt J., Provenza A., Heavy-Duty Engines Conformity Testing Based on PEMS. Lessons Learned from the European Pilot Program. JRC Scientific and Technical Reports, Publications Office of the European Union, European Union, 2011.
- [15] Cain PM. Comparison of kerosenes using capillary column gas liquid chromatography. *Journal of the Forensic Science Society*. 1975, 1;15(4):301-8.
- [16] Chen KS, Wang WC, Chen HM, Lin CF, Hsu HC, Kao JH, Hu MT. Motorcycle emissions and fuel consumption in urban and rural driving conditions. *Science of the total Environment*. 2003, 1;312(1-3):113-22.

- [17] Chin JY, Batterman SA, Northrop WF, Bohac SV, Assanis DN. Gaseous and particulate emissions from diesel engines at idle and under load: comparison of biodiesel blend and ultralow sulfur diesel fuels. *Energy & fuels*. 2012 Nov 15;26(11):6737-48.
- [18] Costagliola MA, De Simio L, Iannaccone S, Prati MV. Combustion efficiency and engine out emissions of a SI engine fueled with alcohol/gasoline blends. *Applied energy*. 2013, 1;111:1162-71.
- [19] Costagliola MA, Murena F, Prati MV. Exhaust emissions of volatile organic compounds of powered two-wheelers: Effect of cold start and vehicle speed. Contribution to greenhouse effect and tropospheric ozone formation. *Science of The Total Environment*. 2014, 15;468:1043-9.
- [20] Costagliola MA, Prati MV, Florio S, Scorletti P, Terna D, Iodice P, Buono D, Senatore A. Performances and emissions of a 4-stroke motorcycle fuelled with ethanol/gasoline blends. *Fuel*. 2016, 1;183:470-7.
- [21] Czerwinski J, Comte P, Astorga C, Rey M, Reutimann F, Mayer A. EC/OC analysis of particles from 2-S scooters and potentials of improved aftertreatment. *Silniki Spalinowe*. 2007, 46(SC3):165-79.
- [22] Dhital NB, Yang HH, Wang LC, Hsu YT, Zhang HY, Young LH, Lu JH. VOCs emission characteristics in motorcycle exhaust with different emission control devices. *Atmospheric Pollution Research*. 2019, 1;10(5):1498-506.
- [23] Di Francesco F, Loccioni C, Fioravanti M, Russo A, Pioggia G, Ferro M, Roehrer I, Tabucchi S, Onor M. Implementation of Fowler's method for end-tidal air sampling. *Journal of Breath Research*. 2008, 8;2(3):037009.
- [24] Dobrzyński M. Wpływ zastosowania gazu ziemnego na parametry ekologiczne wybranych środków transportu. *Politechnika Poznańska*, 2015.
- [25] Dubisz D. *Uniwersalny słownik języka polskiego*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN. 2003.
- [26] Durand JP, Boscher Y, Petroff N, Berthelin M. Automatic gas chromatographic determination of gasoline components: Application to octane number determination. *Journal of Chromatography A*. 1987 Jun 12;395:229-40.
- [27] Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, Dyrektywa 2002/51/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 19 lipca 2002 r. w sprawie zmniejszenia poziomu emisji substancji zanieczyszczających środowisko z silnikowych pojazdów dwu i trzykołowych oraz zmieniająca dyrektywę 97/24/WE.
- [28] Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, Regulamin nr 83 Europejskiej Komisji Gospodarczej Organizacji Narodów Zjednoczonych (EKG ONZ) – Jednolite przepisy dotyczące homologacji pojazdów w zakresie emisji zanieczyszczeń w zależności od paliwa zasilającego silnik [2019/253].
- [29] Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, Rozporządzenie Komisji (UE) nr 582/2011 z dnia 25 maja 2011 r. wykonujące i zmieniające rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 595/2009 w odniesieniu do emisji zanieczyszczeń pochodzących z pojazdów ciężarowych o dużej ładowności (Euro VI) oraz zmieniające załączniki I i III do dyrektywy 2007/46/WE Parlamentu Europejskiego i Rady.

- [30] Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 168/2013 z dnia 15 stycznia 2013 r. w sprawie homologacji i nadzoru rynku pojazdów wu- lub trzykołowych oraz czterokołowców.
- [31] Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, Rozporządzenie Delegowane Komisji (UE) nr 134/2014 z dnia 16 grudnia 2013 r. uzupełniające rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 168/2013 w odniesieniu do wymogów w zakresie efektywności środowiskowej i osiągow jednostki napędowej oraz zmieniające jego załącznik V.
- [32] Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, 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.
- [33] Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, 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.
- [34] Eluri S, Cappa CD, Friedman B, Farmer DK, Jathar SH. Modeling the formation and composition of secondary organic aerosol from diesel exhaust using parameterized and semi-explicit chemistry and thermodynamic models. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2018, 1;18(19):13813-38.
- [35] European Association of Motorcycle Manufacturers, The Motorcycle Industry in Europe. ACEM statistical release. Motorcycles registrations in the European Union grew by 8% in 2019. <https://www.acem.eu/motorcycles-registrations-in-the-european-union-grew-by-8-in-2019> (dostęp 02.02.2021)
- [36] European Association of Motorcycle Manufacturers, The Motorcycle Industry in Europe. ACEM statistical release. Riding in a 21st century environment, The motorcycle industry's commitment to the environment.
- [37] European Environment Agency. European Union Emission Inventory Report 1990–2016.
- [38] European Environment Agency. Greenhouse gas emissions from transport in Europe. 2019.
- [39] Europejska Agencja Środowiska. W kierunku czystej i inteligentnej mobilności Transport a środowisko w Europie. 2016.
- [40] Favre C, May J, Bosteels D, Tromayer J, Neumann G, Kirchberger R, Eichlseder H. A Demonstration of the Emission Behaviour of 50 cm³ Mopeds in Europe Including Unregulated Components and Particulate Matter. *Small Engine Technology Conference & Exposition 2011*, 8:2011-32-0572.
- [41] Frey HC, Rasdorf WJ, Kim K, Pang SH, Lewis P, Abolhassani S. Real world duty cycles and utilization for construction equipment in North Carolina. North Carolina. Dept. of Transportation. Research and Analysis Group; 2008, 4.

- [42] Fulper C. A Look at EPA's "Real World" Test Programs: Pilot Nonroad Equipment & HDDV "Drayage". 2011 PEMS Conference & Workshop 3, College of Engineering, Center for Environmental Research & Technology, Riverside, 2011.
- [43] Fulper C. New Measurement techniques & procedures for measuring "real world" emissions with PEMS and PAMS. In 2013 PEMS Conference & Workshop University of California, Riverside 2013, 11.
- [44] Gawron B, Górniak A, Białecki T, Janicka A, Włostowski R, Włóka A, Molska J, Zawiślak M. Impact of a Synthetic Component on the Emission of Volatile Organic Compounds during the Combustion Process in a Miniature Turbine Engine. *Energies*. 2021, 14(24):8462.
- [45] Ge JC, Kim HY, Yoon SK, Choi NJ. Reducing volatile organic compound emissions from diesel engines using canola oil biodiesel fuel and blends. *Fuel*. 2018, 15;218:266-74.
- [46] Giechaskiel B, Zardini A, Martini G. Particle emission measurements from L-category vehicles. *SAE International Journal of Engines*. 2015, 8(5):2322-37.
- [47] Global MR. PEMS AXIONR/S+: 2017.
- [48] Główny Urząd Statystyczny: transport – wyniki działalności w 2021 roku. Zakład Wydawnictw Statystycznych, Warszawa 2021.
- [49] Grote C, Pawliszyn J. Solid-phase microextraction for the analysis of human breath. *Analytical chemistry*. 1997, 69(4):587-96.
- [50] Guard UC. Chemical Hazard Response Information System (CHRIS)-Hazardous Chemical Data. Commandant Instruction. 1999, 16465.
- [51] Hao H, Geng Y, Sarkis J. Carbon footprint of global passenger cars: Scenarios through 2050. *Energy*. 2016, 15;101:121-31.
- [52] Hassani A, Hosseini V. An assessment of gasoline motorcycle emissions performance and understanding their contribution to Tehran air pollution. *Transportation research part D: Transport and environment*. 2016, 1;47:1-2.
- [53] Hata H, Okada M, Funakubo C, Hoshi J. Tailpipe VOC emissions from late model gasoline passenger vehicles in the Japanese market. *Atmosphere*. 2019, 10(10):621.
- [54] Hayes Jr PC, Anderson SD. High resolution multidimensional chromatographic analysis of hydrocarbon distillate fuels: matrix simplification using off-line preparative HPLC/DCD with on-column GC/MSD and GC/FID. *Journal of chromatographic science*. 1988, 1;26(6):250-7.
- [55] He Z, Zhang L, Liu G, Qian Y, Lu X. Evaluating the effects of olefin components in gasoline on GDI engine combustion and emissions. *Fuel*. 2021, 1;291:120131.
- [56] Hiesmayr J, Schmidt S, Hausberger S, Kirchberger R, Zinner C, Filips P, Wanker R, Friedl H. Current Findings in Measurement Technology and Measurement Methodology for RDE and Fuel Consumption for Two-Wheeler-Applications. *SAE Technical Paper*. 2017, 5.
- [57] Hiesmayr J, Schmidt S, Hausberger S, Kirchberger R, Zinner C, Filips P, Wanker R, Friedl H. Results, assessment and legislative relevance of RDE and fuel consumption measurements of two-wheeler-applications. *SAE Technical Paper*. 2017, 5.

- [58] Hoek G, Brunekreef B, Goldbohm S, Fischer P, van den Brandt PA. Association between mortality and indicators of traffic-related air pollution in the Netherlands: a cohort study. *The Lancet*. 2002, 19;360(9341):1203-9.
- [59] Ho KF, Lee SC, Ho WK, Blake DR, Cheng Y, Li YS, Ho SS, Fung K, Louie PK, Park D. Vehicular emission of volatile organic compounds (VOCs) from a tunnel study in Hong Kong. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2009, 9(19):7491-504.
- [60] Houghton J. *Global warming: the complete briefing*. Cambridge university press; 2009.
- [61] Hu N, Tan J, Wang X, Zhang X, Yu P. Volatile organic compound emissions from an engine fueled with an ethanol-biodiesel-diesel blend. *Journal of the Energy Institute*. 2017, 90(1):101-9.
- [62] Iodice P, Senatore A. Exhaust emissions of new high-performance motorcycles in hot and cold conditions. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2015, 12(10):3133-44.
- [63] Janicka AB, Zawisłak M, Gawron B, Górnica A, Białecki T. Emission of volatile organic compounds during combustion process in a miniature turbojet engine. *Environment Protection Engineering*. 2018;44(4).
- [64] Janssen NA, Brunekreef B, van Vliet P, Aarts F, Meliefste K, Harssema H, Fischer P. The relationship between air pollution from heavy traffic and allergic sensitization, bronchial hyper responsiveness, and respiratory symptoms in Dutch schoolchildren. *Environmental health perspectives*. 2003, 111(12):1512-8.
- [65] Jin D, Choi K, Myung CL, Lim Y, Lee J, Park S. The impact of various ethanol-gasoline blends on particulates and unregulated gaseous emissions characteristics from a spark ignition direct injection (SIDI) passenger vehicle. *Fuel*. 2017, 1;209:702-12.
- [66] Kancelaria Sejmu, Ustawa z dnia 20 czerwca 1997 r. Prawo o ruchu drogowym.
- [67] Khan T, Frey HC. Comparison of real-world and certification emission rates for light duty gasoline vehicles. *Science of The Total Environment*. 2018, 1;622:790-800.
- [68] Kim HY, Choi NJ. Study on volatile organic compounds from diesel engine fueled with palm oil biodiesel blends at low idle speed. *Applied Sciences*. 2020, 10(14):4969.
- [69] Komisja Europejska. *Biała Księga. Plan utworzenia jednolitego europejskiego obszaru transportu—dążenie do osiągnięcia konkurencyjnego i zasobooszczędnego systemu transportu*. 2011.
- [70] Koossalapeerom T, Satiennam T, Satiennam W, Leelapatra W, Seedam A, Rakpukdee T. Comparative study of real-world driving cycles, energy consumption, and CO₂ emissions of electric and gasoline motorcycles driving in a congested urban corridor. *Sustainable cities and society*. 2019, 45:619-27.
- [71] Koul M, Shadangi KP, Mohanty K. Thermo-chemical conversion of Kusum seed: a possible route to produce alternate fuel and chemicals. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2014, 110:291-6.
- [72] Kumar R, Durai BK, Saleh W, Boswell C. Comparison and evaluation of emissions for different driving cycles of motorcycles: A note. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2011, 16(1):61-4.

- [73] Lai CH, Wu YL, Lin CH, Yeh SH. Measurements of the speciation of ozone precursor from Kaoping petrochemical/industrial area in Taiwan. In 103rd Air and Waste Management Association Annual Conference and Exhibition. 2010, 6290-6295.
- [74] Lijewski P.: Studium emisji związków toksycznych spalin z silników o zastosowaniach pozadrogowych. Rozprawa habilitacyjna nr 516, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2013.
- [75] Lough GC, Schauer JJ, Lonneman WA, Allen MK. Summer and winter nonmethane hydrocarbon emissions from on-road motor vehicles in the Midwestern United States. Journal of the Air & Waste Management Association. 2005, 55(5):629-46.
- [76] Mahesh S, Ramadura G, Nagendra SS. Real-world emissions of gaseous pollutants from motorcycles on Indian urban arterials. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2019, 1;76:72-84.
- [77] Mamalis AG, Spentzas KN, Mamali AA. The impact of automotive industry and its supply chain to climate change: Some techno-economic aspects. European Transport Research Review. 2013, 5(1):1-0.
- [78] Matisova E, Kovacicova E, Thi PH, Kolec E, Engewald W. Brazilian gasoline quality: Study of adulteration by statistical analysis and gas chromatography. Journal of Chromatographic Sciences. 1990, 498:381-000.
- [79] Mattrel P, Vasic AM, Gujer E, Haag R, Weilenmann M. VOC composition and ozone-forming potential of the exhaust gas of in-use motorcycles. International journal of environment and pollution. 2004, 22(3):301-11.
- [80] Merkisz J, Kozak M, Lijewski P, Fuc P. Exhaust Emissions from Heavy-Duty Vehicles Under Actual Traffic Conditions in the City of Poznań. SAE Technical Paper 2013.
- [81] Merkisz J, Lijewski P, Fuc P, Siedlecki M, Ziolkowski A. Development of the methodology of exhaust emissions measurement under RDE (Real Driving Emissions) conditions for non-road mobile machinery (NRMM) vehicles. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016, 148(1):012077).
- [82] Merkisz J, Lijewski P, Walasik S. The analysis of non-road vehicle engine operating conditions in terms of emission regulations. Eksploatacja i Niezawodność-Maintenance and Reliability. 2010, 1(1):42-8.
- [83] Merkisz J, Pielecha J, Bielaczyc P, Woodburn J. Analysis of emission factors in RDE tests as well as in NEDC and WLTC chassis dynamometer tests. SAE Technical Paper 2016.
- [84] Merkisz J, Pielecha J. The on-road exhaust emissions characteristics of SUV vehicles fitted with diesel engines. Silniki Spalinowe. 2011, 50:58-72.
- [85] Merkisz J, Pielecha J, Lijewski P, Merkisz-Guranowska A, Nowak M. Exhaust emissions from vehicles in real traffic conditions in the Poznan agglomeration. Air Pollution XXI. 2013, 174:27.
- [86] Merkisz J, Pielecha J, Molik P, Nowak M. Parametrisation of operating conditions in cars in the on-board type measurements of pollution emissions. 2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). 2014, 27:1-5.

- [87] Merkisz J, Pielecha J, Pielecha I. Road Test Emissions Using On-board Measuring Method for Light Duty Diesel Vehicles. *Journal of Mechanical & Industrial Engineering*. 2011, 5(1).
- [88] Miki Y, Sugimoto Y. GC/FID and GC/MS analysis on the compositions of coal-liquid naphtha and petroleum gasoline. *Journal of the National Institute of Materials and Chemical Research*. 1997, 5.
- [89] Mock P, German J, Bandivaderkar A, Riemersma I. ICCT (The International Council On Clean Transportation). 2017.
- [90] Mueller CJ, Cannella WJ, Kalghatgi GT. Fuels for engines and the impact of fuel composition on engine performance. *Encyclopedia of Automotive Engineering*. 2014, 17:1-27.
- [91] Murena F, Prati MV, Costagliola MA. Real driving emissions of a scooter and a passenger car in Naples city. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2019, 1,73:46-55.
- [92] Mutschler E, Malinowska B, Drożdżik M, Kocić I, Pawlak D, Geisslinger G, Kroemer HK, Menzel S, Ruth P, Grotthus B, Nowak B. Mutschler farmakologia i toksykologia: podręcznik. *MedPharm Polska*; 2016.
- [93] Nakashima Y, Kamei N, Kobayashi S, Kajii Y. Total OH reactivity and VOC analyses for gasoline vehicular exhaust with a chassis dynamometer. *Atmospheric Environment*. 2010, 44(4):468-75.
- [94] Nicolai T, Carr D, Weiland SK, Duhme H, Von Ehrenstein O, Wagner C, Von Mutius E. Urban traffic and pollutant exposure related to respiratory outcomes and atopy in a large sample of children. *European respiratory journal*. 2003, 21(6):956-63.
- [95] Nylund NO, Erkkilä K, Hartikka T. Fuel consumption and exhaust emissions of urban buses. *VTT Tiedotteita Research Notes*. 2007, 1;2373.
- [96] O'Driscoll R, Stettler ME, Molden N, Oxley T, ApSimon HM. Real world CO₂ and NO_x emissions from 149 Euro 5 and 6 diesel, gasoline and hybrid passenger cars. *Science of the total environment*. 2018, 15;621:282-90.
- [97] Olson KL, Sinkevitch RM, Sloane TM. Speciation and quantitation of hydrocarbons in gasoline engine exhaust. *Journal of chromatographic science*. 1992, 30(12):500-8.
- [98] Pathak SK, Sood V, Singh Y, Channiwalla SA. Real world vehicle emissions: Their correlation with driving parameters. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2016, 1;44:157-76.
- [99] Peng CY, Lan CH, Yang CY. Effects of biodiesel blend fuel on volatile organic compound (VOC) emissions from diesel engine exhaust. *Biomass and Bioenergy*. 2012, 1;36:96-106.
- [100] Pereira RC, Pasa VM. Effect of mono-olefins and diolefins on the stability of automotive gasoline. *Fuel*. 2006, 85(12-13):1860-5.
- [101] Petrović VS, Janković SS, Tomić MV, Jovanović ZS, Knežević D. The possibilities for measurement and characterization of diesel engine fine particles: A review. *Thermal Science*. 2011;15(4):915-38.
- [102] Pielecha J. Identyfikacja parametrów cząstek stałych z silników spalinowych. Rozprawa habilitacyjna nr 467, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej; 2012.

- [103] Pielecha J, Merkisz J, Markowski J, Jasiński R. Analysis of passenger car emission factors in RDE tests. *InE3S Web of Conferences*. 2016, 10(00073).
- [104] Powell CH, Bingham E, Cohrssen B. *Patty's Toxicology*. John Wiley; 2001.
- [105] Protić-Lovasić G, Jambrec N, Deur-Siftar D, Prostenik MV. Determination of catalytic reformed gasoline octane number by high resolution gas chromatography. *Fuel*. 1990, 69(4):525-8.
- [106] Räisänen J, Hansson U, Ullerstig A, Döscher R, Graham LP, Jones C, Meier HE, Samuelsson P, Willén U. European climate in the late twenty-first century: regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios. *Climate dynamics*. 2004, 22(1):13-31.
- [107] Rubino L, Bonnel P, Carriero M, Krasenbrink A. Portable emission measurement system (PEMS) for heavy duty diesel vehicle PM measurement: the European PM PEMS program. *SAE International Journal of Engines*. 2010, 2(2).
- [108] Rymaniak Ł, *Analiza wpływu rodzaju układu napędowego i parametrów ruchu autobusów miejskich na ekologiczne wskaźniki pracy*. Politechnika Poznańska, Poznań. 2016.
- [109] Rymaniak Ł, Merkisz J, Szymlet N, Kamińska M, Weymann S. Use of emission indicators related to CO₂ emissions in the ecological assessment of an agricultural tractor. *Eksploatacja i Niezawodność*. 2021;23(4).
- [110] Sahu SK, Beig G, Parkhi N. Critical emissions from the largest on-road transport network in South Asia. *Aerosol and Air Quality Research*. 2014, 14(1):135-44.
- [111] Saleh W, Kumar R, Kirby H, Kumar P. Real world driving cycle for motorcycles in Edinburgh. *Transportation research part D: transport and environment*. 2009, 14(5):326-33.
- [112] Salvo P, Ferrari C, Persia R, Ghimenti S, Lomonaco T, Bellagambi F, Di Francesco F. A dual mode breath sampler for the collection of the end-tidal and dead space fractions. *Medical engineering & physics*. 2015, 37(6):539-44.
- [113] Santino D, Picini P, Martino L. Particulate matter emissions from two-stroke mopeds. *SAE Technical Paper*. 2001.
- [114] Satiennam T, Seedam A, Radpukdee T, Satiennam W, Pasangtiyo W, Hashino Y. Development of on-road exhaust emission and fuel consumption models for motorcycles and application through traffic microsimulation. *Journal of Advanced Transportation*. 2017.
- [115] Schauer JJ, Kleeman MJ, Cass GR, Simoneit BR. Measurement of emissions from air pollution sources. 5. C1– C32 organic compounds from gasoline-powered motor vehicles. *Environmental science & technology*. 2002, 36(6):1169-80.
- [116] Schroeder F, Breuer B, Preiss H, Weidhaas G. Motorcycle noise and exhaust emissions- statutory testing methods versus real traffic situations. *SAE Technical Paper*. 1999, 28.
- [117] Seedam A, Satiennam T, Radpukdee T, Satiennam W. Development of an onboard system to measure the on-road driving pattern for developing motorcycle driving cycle in Khon Kaen city, Thailand. *IATSS research*. 2015, 39(1):79-85.
- [118] Seedam A, Satiennam T, Radpukdee T, Satiennam W, Ratanavaraha V. Motorcycle on-road driving parameters influencing fuel consumption and emissions on congested signalized urban corridor. *Journal of Advanced Transportation*. 2017.

- [119] Stupp D, Gass M, Leiteritz H, Pijls C, Thornton S, Smith J, Dunk M, Grosjean T, Den Haan K. Gasoline ether oxygenate occurrence in Europe, and a review of their fate and transport characteristics in the environment. 2013, 4(12).
- [120] Thomas D, Li H, Wang X, Song B, Ge Y, Yu W, Ropkins K. Comparison of tailpipe gaseous emissions for RDE and WLTC using SI passenger cars. Proceedings of the SAE Powertrain Fuels and Lubricants Meeting 2017.
- [121] Tong HY, Tung HD, Hung WT, Nguyen HV. Development of driving cycles for motorcycles and light-duty vehicles in Vietnam. *Atmospheric Environment*. 2011, 45(29):5191-9.
- [122] Toth T. Identification of C2& C4 alkylated benzenes in flash pyrolysates of kerogens, coals and asphaltenes. *Journal of Chromatographic Sciences*. 1987;279:157-6.
- [123] Transport and Environment. Tackling air pollution from vehicles. 2015.
- [124] Tsai JH, Chiang HL, Hsu YC, Peng BJ, Hung RF. Development of a local real world driving cycle for motorcycles for emission factor measurements. *Atmospheric Environment*. 2005, 39(35):6631-41
- [125] Tsai JH, Chiang HL, Hsu YC, Weng HC, Yang CY. The speciation of volatile organic compounds (VOCs) from motorcycle engine exhaust at different driving modes. *Atmospheric Environment*. 2003, 37(18):2485-96.
- [126] Tsai JH, Huang PH, Chiang HL. Air pollutants and toxic emissions of various mileage motorcycles for ECE driving cycles. *Atmospheric Environment*. 2017, 153:126-34.
- [127] Tsai JH, Huang PH, Chiang HL. Characteristics of volatile organic compounds from motorcycle exhaust emission during real-world driving. *Atmospheric Environment*. 2014, 99:215-26.
- [128] Tsai JH, Yao YC, Huang PH, Chiang HL. Criteria pollutants and volatile organic compounds emitted from motorcycle exhaust under various regulation phases. *Aerosol and Air Quality Research*. 2017, 17(5):1214-23.
- [129] Tsai JH, Yao YC, Huang PH, Chiang HL. Fuel economy and volatile organic compound exhaust emission for motorcycles with various running mileages. *Aerosol and Air Quality Research*. 2018, 18(12):3056-67.
- [130] Tung HD, Tong HY, Hung WT, Anh NT. Development of emission factors and emission inventories for motorcycles and light duty vehicles in the urban region in Vietnam. *Science of the Total Environment*. 2011, 409(14):2761-7.
- [131] Vessels IM. Environmental Protection Agency 40 CFR Parts 86, 90, 1045, 1051, 2002.
- [132] Volckens J, Olson DA, Hays MD. Carbonaceous species emitted from handheld two-stroke engines. *Atmospheric Environment*. 2008, 42(6):1239-48.
- [133] Wang X, Ge Y, Zhang C, Tan J, Hao L, Liu J, Gong H. Effects of engine misfire on regulated, unregulated emissions from a methanol-fueled vehicle and its ozone forming potential. *Applied Energy*. 2016, 177:187-95.
- [134] Wang L, Liu SY, Xu C, Tu X. Direct conversion of methanol to n-C₄H₁₀ and H₂ in a dielectric barrier discharge reactor. *Green Chemistry*. 2016, 18(20):5658-66.
- [135] World Energy Council. World Energy Resources. 2016.

- [136] World Health Organization. Health aspects of air pollution: answers to follow-up questions from CAFE: report on a WHO working group meeting, Bonn, Germany, 15-16 January 2004. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe 2004.
- [137] World Health Organization. Health, environment and climate change 24. 2019.
- [138] Worldwide Emissions Standards, Passenger cars and light duty vehicles Delphi Technologies 2019/2020.
- [139] Wu R, Bo Y, Li J, Li L, Li Y, Xie S. Method to establish the emission inventory of anthropogenic volatile organic compounds in China and its application in the period 2008–2012. *Atmospheric environment*. 2016, 127:244-54.
- [140] Xiao Q, Li M, Liu H, Fu M, Deng F, Lv Z, Man H, Jin X, Liu S, He K. Characteristics of marine shipping emissions at berth: profiles for particulate matter and volatile organic compounds. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2018, 6;18(13):9527-45.
- [141] Yao YC, Tsai JH, Chang AL, Jeng FT. Effects of sulfur and aromatic contents in gasoline on motorcycle emissions. *Atmospheric Environment*. 2008, 42(26):6560-4.
- [142] Zhao H, Ge Y, Zhang T, Zhang J, Tan J, Zhang H. Unregulated emissions from diesel engine with particulate filter using Fe-based fuel borne catalyst. *Journal of Environmental Sciences*. 2014, 26(10):2027-33.
- [143] <https://www.agilent.com> (dostęp: 16.12.2021).
- [144] <https://www.dynomitedyno.com> (dostęp: 13.01.2022).
- [145] <https://www.sigmaaldrich.com> (dostęp: 19.01.2022).

Abstract

Current emission tests of toxic exhaust components (CO, CO₂, HC and NO_x) as well as fuel consumption for two wheeled vehicles are conducted in laboratory conditions, mainly by using a chassis dynamometer. These tests are done in line with standardized drive test cycles, however, how well they represent reality is up for debate, as it was shown in this dissertation. This fact was used as basis for the need to develop exhaust emission tests in real operating conditions. This, however, requires the development of exhaust emission measuring equipment as well as the methods of evaluating emission test results for data obtained in real operating conditions representative of the typical conditions for two wheeled vehicles. Forming a legislative outline for these types of tests would allow to clearly list all of the causal relations present during two wheeled vehicles operation, and their engines, as well as the real values of exhaust emissions of toxic components.

Assessment of the current state of knowledge and gaps in understanding resulted in research being conducted that became part of this dissertation. The primary aims of this work includes the identification of exhaust emissions of toxic compounds, identification of operating parameters for two wheeled vehicles driving in real conditions, as well as a proposed original testing procedure for vehicles in this category, that corresponds to the local conditions on the road. The proposed method can also form a basis for a standardized global procedure for measuring exhaust emissions of two wheeled vehicles driving in urban conditions.

Achieving the aforementioned goals necessitated several steps that have been described in a number of chapters of this dissertation. First (chapter 1) the problem and the genesis of the subjects covered in the work was described. Considerations regarding the number of two wheeled vehicles in use in Poland and globally, as well as the environmental and health costs of their operation have been discussed.

The second chapter contains a review of two wheeled vehicles exhaust emission norms and legislation enforced at the time of writing. A categorization of vehicles based on polish law was presented, as well as on the criteria of European directives relevant to the proper interpretation of the exhaust emission standards. Individual exhaust emission norms and limits in Europe and around the globe have been discussed in the context of their implementation dates and limit values for each considered exhaust component. Finally the guidelines and requirements on environmental impact testing (including type approval test cycles) provided to the manufacturers of L category vehicles were considered.

A literature review was performed (chapter 3) as part of preparation to pursue the aims set in the dissertation. This review was focused on subjects pertaining to ecology, energy consumption, construction of modern combustion engine vehicles, including those belonging to the L category, as well as laboratory tests performed using a single roller chassis dynamometer. It was found that the currently enforced type approval tests (as of writing this was the WMTC) fail to truly represent the real operating parameters of vehicles and engines of two wheeled vehicles. It was noted that steps towards legislation that would include real driving exhaust emission tests for vehicles in this category are necessary. The next chapter contains the aims as well as a comprehensive description of the scope of the conducted research.

Before the tests were prepared a representative group of vehicles had to be selected for the testing. These were two wheeled vehicles equipped with combustion engines with an engine displacement not exceeding 125 cm³. The tests were conducted on either two or three test routes, that were composed of either an urban section, or an urban and rural sections and located within the Poznań agglomeration. PEMS equipment (*Portable Emissions Measurement System*) – AxionR/S+, was used to determine the movement and exhaust emission parameters, as this equipment was small in size and lightweight. These properties make the selected measuring equipment applicable for tests on two wheeled vehicles, and even other smaller vehicles and machines while in real operating conditions.

Chapter 6 starts with a discussion of the method, based on the assumptions made for this dissertation by the author, of determining the characteristics and time densities of operating parameters and exhaust emission intensity of the tested vehicle group. Based on the obtained test results a detailed assessment of the vehicle driving parameters was conducted within the scope of the type approval test procedures. This allowed to determine the relationship between the exhaust emission intensity and the corresponding vehicle operating parameters in motion, as well as to conclude the final road emission values for the measured exhaust components. Furthermore, this data was used to determine the emission coefficients of the tested vehicles by comparing the obtained road emission results with the limit values of the EURO exhaust emission tests. Comparative analysis indicated that the emission of both CO and NO_x significantly exceeded the limit values given by the emission standards. Considerations made were also expanded by the chemical analysis of the gasoline fuel and exhaust samples taken from an urban two wheeled vehicle. The engine operating points for which exhaust samples were taken for analysis were determined using empirical tests conducted in real operating conditions. Finally, toxicology analysis was performed on the separate chemical substances in the exhaust samples, separated by means of chromatography.

Chapter 7 discusses the verification process for the general dynamics of all the test drive cycles of urban two wheeled vehicles in real operating conditions. This verification is used to assess the viability of the conducted test drive of light passenger and service vehicles, based on the relative positive acceleration values as well as the 95th centile of the product of vehicle speed and relative acceleration. Such values determined for the tested two wheeled vehicles along with all the original tests described previously have all resulted in obtaining the key guidelines for a new testing procedure proposed by the author. This proposed test procedure was designated as RUMET – *Real Urban Motorcycle Emission Test*, and the requirements and boundary conditions for the necessary exhaust emission measuring equipment, operating conditions, drive dynamics and ambient conditions have been provided. The chapter 8 contains the overall results of the conducted research, specific conclusions and future research. The presented dissertation provides new knowledge in the scope of real operating parameters and exhaust emissions of two wheeled urban vehicles as well as the relations between them. Disparities between the operating parameters and exhaust emission values obtained in the proposed testing procedures in real operating conditions and those obtained in legally required type approval testing procedures indicates the validity of selected research goals and point to the need for research within the scope chosen in this dissertation.