

Utjecaj ispitne rute na emisije štetnih tvari osobnih vozila u stvarnim uvjetima vožnje

Konosić, Dunja

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:677649>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-31**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Dunja Konosić

Zagreb, 2023. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Petar Ilinčić, dipl. ing.

Student:

Dunja Konosić

Zagreb, 2023. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Petru Ilinčiću na ukazanom povjerenju, pomoći i savjetima tijekom izrade rada.

Također se zahvaljujem svojoj obitelji, posebice majci, dečku i prijateljima na podršci i strpljenju iskazanom tijekom studiranja.

Dunja Konosić



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 23 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Dunja Konosić** JMBAG: 0130294910

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj ispitne rute na emisije štetnih tvari osobnih vozila u stvarnim uvjetima vožnje**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of the test route on passenger cars real driving emissions**

Opis zadatka:

Ispitivanja emisija u stvarnim uvjetima vožnje (engl. *Real Driving Emissions*) propisana su za sva nova osobna vozila koja se stavljaju na tržište Europske unije. Ispitne procedure i zahtjevi vezani na ispitivanje vozila propisani su Uredbom 2017/1151 te njenim dopunama. U navedenim zahtjevima propisani su i uvjeti ispitne rute koji moraju biti zadovoljeni da bi se ispitivanje smatralo valjanim. U sklopu diplomskog rada potrebno je odrediti utjecaj ispitne rute na rezultate ispitivanja odnosno na emisije štetnih tvari osobnih vozila.

U okviru rada potrebno je:

- Napraviti pregled Uredbi kojima je propisano ispitivanje emisija u stvarnim uvjetima vožnje osobnih vozila te navesti zahtjeve koji se postavljaju na ispitivanja.
- Opisati metode i mjernu opremu koja se primjenjuju u ispitivanjima.
- Opisati i objasniti metodu izračuna emisija štetnih tvari u ispušnim plinovima.
- Provesti određen broj ispitivanja emisija u stvarnim uvjetima vožnje pri čemu treba koristiti različite ispitne rute (primarno različite u smislu duljine puta). Broj mjerenja i ispitne rute dogovoriti s mentorom i voditeljem Laboratorija za motore i vozila.
- Napraviti analizu izmjerenih podataka i procijeniti udio pojedine faze mjerenja na ukupne emisije.
- Dati kratak osvrt na mjernu nesigurnost iskazanih rezultata.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

2. ožujka 2023.

Datum predaje rada:

4. svibnja 2023.

Predviđeni datumi obrane:

8. – 12. svibnja 2023.

Zadatak zadao:

Doc.dr.sc. Petar Ilinčić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
1.1. Ispitivanje emisija vozila	2
1.1.1. NEDC i WLTP.....	4
1.1.2. Ispitivanje stvarnih emisija tijekom vožnje	6
2. UREDBE EUROPSKOG PARLAMENTA O HOMOLOGACIJI TIP A MOTORNIM VOZILIMA U ODNOSU NA EMISIJE IZ LAKIH I GOSPODARSKIH VOZILA	8
2.1. Uredba Komisije (EU) 2016/427	8
2.2. Uredba Komisije (EU) 2016/646	10
2.3. Uredba Komisije (EU) 2017/1151 (2017/1154)	10
2.4. Uredba Komisije (EU) 2018/1832	11
2.5. Procedura RDE ispitivanja.....	18
3. MJERNA OPREMA ZA ISPITIVANJE EMISIJA U STVARNIM UVJETIMA VOŽNJE (RDE).....	20
3.1. PRIJENOSNI SUSTAV ZA MJERENJE EMISIJA	20
3.1.1. Vrste prijenosnih sustava za mjerenje emisija	20
3.1.2. Analizatori i mjerni uređaji	22
3.1.2.1. Analizator za određivanje koncentracije onečišćujućih tvari u ispušnim plinovima – NO _x , CO, CO ₂	22
3.1.2.2. Analizator za mjerenje broja krutih čestica – PN	24
3.1.2.3. Analizator za određivanje koncentracije onečišćujućih tvari u ispušnim plinovima – ukupni ugljikovodici (THC), metan (CH ₄).....	26
3.1.2.4. Instrument za mjerenje ili određivanje masenog protoka ispušnih plinova - EFM	27
3.1.2.5. Globalni navigacijski sustav	28
3.1.2.6. Senzori i drugi uređaji koji nisu dio vozila.....	28
3.1.2.7. Izvor energije	29
3.1.3. Mjerna nesigurnost PEMS-a	31
3.2. POSTUPAK ISPITIVANJA	34
4. IZRAČUN EMISIJA ŠTETNIH TVARI	36
4.1. UTVRĐIVANJE EMISIJA.....	36
4.1.1. Koncentracija nemetanskih ugljikovodika (NMHC) i metana (CH ₄).....	38
4.1.2. Izračun masenog protoka ispušnih plinova.....	38
4.1.2.1. Metoda izračuna pomoću masenog protoka zraka i goriva	38
4.1.2.2. Metoda izračuna pomoću masenog protoka zraka i omjera zraka i goriva..	38
4.1.2.3. Metoda izračuna pomoću masenog protoka goriva i omjera zraka i goriva	39

4.1.3. Izračun masenog protoka plinovitih komponenti	39
4.1.4. Izračun broja krutih čestica	41
4.2. PROVJERA UKUPNE DINAMIČNOSTI VOŽNJE METODOM POMIČNOG PROZORA ZA IZRAČUN SREDNJE VRIJEDNOSTI	41
4.2.1. Verifikacija normalnosti dinamičnih uvjeta.....	45
4.3. IZRAČUN KONAČNIH REZULTATA RDE-a.....	47
5. UTJECAJ KOMPONENATA RDE ISPITNE RUTE NA EMISIJE ŠTETNIH TVARI. 50	
5.1. ISPITIVANJE EMISIJA ŠTETNIH TVARI U STVARNIM UVJETIMA VOŽNJE....	56
5.1.1. Rezultati ispitivanja emisija štetnih tvari u stvarnim uvjetima vožnje s postavkama upravljanja pogonskim sustavom ECO PRO – Test 1	58
5.1.2. Rezultati ispitivanja emisija štetnih tvari u stvarnim uvjetima vožnje s postavkama upravljanja pogonskim sustavom COMFORT – Test 2	60
5.1.3. Rezultati ispitivanja emisija štetnih tvari u stvarnim uvjetima vožnje s postavkama upravljanja pogonskim sustavom SPORT – Test 3	62
5.1.4. Utjecaj duljine ispitne rute na emisije štetnih tvari izmjenjenih u stvarnim uvjetima vožnje	64
5.1.4.1. Utjecaj duljine ispitne rute na emisije CO ₂ za ukupno prijeđeni put.....	64
5.1.4.2. Utjecaj duljine ispitne rute na emisije NO _x za ukupno prijeđeni put.....	66
5.1.4.3. Utjecaj duljine ispitne rute na emisije CO za ukupno prijeđeni put	68
6. ZAKLJUČAK.....	70
LITERATURA.....	71
PRILOZI.....	73

POPIS SLIKA

Slika 1.	Prva pokretna traka za proizvodnju automobila tvrtke Ford Motor Company [2]..	1
Slika 2.	Granične vrijednosti broja čestica (PN)	3
Slika 3.	Granične vrijednosti emisija za vozila s Diesellovim motorom.....	3
Slika 4.	Granične vrijednosti emisija za vozila s Ottovim motorom.....	4
Slika 5.	NEDC i WLTC ciklus za vozila Klase 3.....	5
Slika 6.	Ilustracija tijeka RDE (<i>eng. Real-Driving Emissions</i>) ispitivanja [8].....	7
Slika 7.	Granične vrijednosti emisije Euro 6 [6]	9
Slika 8.	Postupak izlaganja filtra starenju u ispitnim uvjetima [6].....	12
Slika 9.	Ciklus temperaturnog kondicioniranja [6]	12
Slika 10.	Određivanje faktora propusnosti [6].....	14
Slika 11.	Dijagram toka ispitnog postupka mjerenja gubitaka [6]	15
Slika 12.	Prikaz postupka o sukladnosti o uporabi (ISC) (GTAA se odnosi na dodjelitelja homologacije, a OEM na proizvođača) [6]	17
Slika 13.	Shema analizatora i mjernih uređaja prijenosnog sustava za mjerenje emisija [10]	20
Slika 14.	Konfiguracije prijenosnih sustava tvrtke AVL, Horiba i Sensors [11][12][13]... 21	21
Slika 15.	Ilustracija analizatora nedisperzivnog infracrvenog apsorpcijskog (NDIR) tipa [14]	23
Slika 16.	Primjer kemiluminiscentnog NO analizatora [15]	23
Slika 17.	Princip rada NDUV analizatora [16].....	24
Slika 18.	Primjer postavljenog analizatora PN-a [6]	25
Slika 19.	Plameno-ionizacijski detektor (FID)[13]	27
Slika 20.	Mjerilo masenog protoka ispušnih plinova tvrtke AVL [17].....	28
Slika 21.	Emisije štetnih tvari vozila izmjerene laboratorijskom opremom (plavi stupac) i prijenosnim sustavom za mjerenje emisija štetnih tvari (narančasti stupac) kroz dvije uzastopne godine [18]	32
Slika 22.	Odstupanja mjerenja obavljenih PEMS-om i laboratorijskom opremom. Crne linije označavaju min. i max. vrijednosti, a crvenima su određena dopuštena odstupanja. [18]	32
Slika 23.	Prikaz validacije ispitivanja za CO ₂ (gore lijevo), NO _x (gore desno), CO (dolje lijevo) i PN (dolje desno) [19].....	33
Slika 24.	Tijek početka ispitivanja [3].....	34
Slika 25.	Tijek kraja ispitivanja [6]	35
Slika 26.	Brzina vozila u odnosu na vrijeme – prosječne emisije vozila u odnosu na vrijeme, počevši od prvog prozora za izračun srednje vrijednosti [21].....	42
Slika 27.	Definicija mase CO ₂ na temelju prozora za izračun srednje vrijednosti [21]	42
Slika 28.	Karakteristična krivulja CO ₂ i dopuštena odstupanja vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem i NOVC-HEV-ova [21].....	44
Slika 29.	Karakteristična krivulja CO ₂ vozila: definicije vožnje u gradu, izvan grada i na autocesti (primjeri navedeni za vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem i NOVC-HEV-ove) [21]	44
Slika 30.	Grafički prikaz funkcija za izračun faktora za evaluaciju rezultata [21]	48
Slika 31.	Ciklusi (od gore prema dolje): WLTC, kratka RDE ruta, RDE-1 ispitivanje, RDE-2 ispitivanje [22].....	51
Slika 32.	Utjecaj prijedene udaljenosti gradske vožnje na emisije CO [22]	52
Slika 33.	Utjecaj prijedene udaljenosti gradske vožnje na emisije NO _x [22].....	53
Slika 34.	Broj čestica po svakom ciklusu (ispitnoj ruti) [23]	53
Slika 35.	Emisije čestica (PN) u kratkoj RDE ruti [23].....	54

Slika 36.	Bezdimenzijske normalizirane vrijednosti emisija štetnih tvari u sva 4 ispitivanja [24]	55
Slika 37.	BMW M340i xDrive (2020.) [25]	56
Slika 38.	Prikaz ispitne rute korištene prilikom ispitivanja emisija	57
Slika 39.	Mjerna oprema ugrađena u/na vozilo	57
Slika 40.	Provjera ukupne dinamičnosti vožnje metodom pomičnog prozora za Test 1.....	59
Slika 41.	Profil brzine vozila za Test 1	59
Slika 42.	Provjera ukupne dinamičnosti vožnje metodom pomičnog prozora za Test 2.....	61
Slika 43.	Profil brzine vozila za Test 2.....	61
Slika 44.	Provjera ukupne dinamičnosti vožnje metodom pomičnog prozora za Test 3.....	63
Slika 45.	Profil brzine vozila za Test 3	63
Slika 46.	Utjecaj duljine rute na emisije CO ₂	65
Slika 47.	Promjena emisije CO ₂ s duljinom rute	65
Slika 48.	Utjecaj duljine rute na emisije NO _x	67
Slika 49.	Promjena emisije NO _x s duljinom rute	67
Slika 50.	Utjecaj duljine rute na emisije CO	69
Slika 51.	Promjena emisije CO s duljinom rute	69

POPIS TABLICA

Tablica 1. Klase WLTP ispitnih ciklusa [6]	5
Tablica 2. Razlike između NEDC i WLTP ispitnog ciklusa [7]	6
Tablica 3. Komponente valjane ispitne rute RDE ispitivanja [9].....	18
Tablica 4. Granični uvjeti valjanog RDE ispitivanja [9].....	19
Tablica 5. Tipovi analizatora i njihovih mjernih raspona prijenosnih sustava različitih proizvođača [11][12][13]	22
Tablica 6. Zahtjevi za učinkovitost sustava analizatora PN-a (uključujući vod za uzorkovanje) [6]	26
Tablica 7. Ispitni parametri [6].....	30
Tablica 8. Dopuštena odstupanja [6].....	35
Tablica 9. Vrijednost nerazrijeđenog ispušnog plina u koje odražavaju omjer gustoća komponente ispuha ili onečišćujuće tvari i $[\text{kg}/\text{m}^3]$ i gustoće ispušnog plina $[\text{kg}/\text{m}^3]^{(6)}$ [21]	40
Tablica 10. Matematičke formule za izračun faktora za evaluaciju rezultata [21]	48
Tablica 11. Glavne karakteristike ciklusa i ispitnih ruta [22]	50
Tablica 12. Granične vrijednosti emisija štetnih tvari i izmjerene emisije za ispitivano vozilo [22]	52
Tablica 13. Karakteristike četiri ispitivanja iste RDE ispitne rute [24]	54
Tablica 14. Rezultati testa 1	58
Tablica 15. Rezultati testa 2	60
Tablica 16. Rezultati testa 3	62
Tablica 17. Utjecaj duljine rute na emisije CO_2 izražene u g/km	64
Tablica 18. Promjena emisije CO_2 u odnosu na emisiju izmjerenu za cjelokupnu vožnju.....	64
Tablica 19. Utjecaj duljine rute na emisije NO_x izražene u mg/km	66
Tablica 20. Promjena emisije NO_x u odnosu na emisiju izmjerenu za cjelokupnu vožnju.....	66
Tablica 21. Utjecaj duljine rute na emisije CO izražene u mg/km	68
Tablica 22. Promjena emisije CO u odnosu na emisiju izmjerenu za cjelokupnu vožnju	68

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
α	-	Molarni omjer vodika
β	-	Molarni omjer ugljika
γ	-	Molarni omjer sumpora
δ	-	Molarni omjer dušika
ε	-	Molarni omjer kisika
λ_i	-	Trenutačan omjer viška zraka
$\Delta t_{t,i}$	s	Vrijeme transformacije t analizatora kojim se mjeri komponenta i
$\Delta t_{t,m}$	s	Vrijeme pretvorbe t mjerača masenog protoka ispušnih plinova
A/F_{st}	kg/kg	Stehiometrijski omjer zrak/gorivo
a_i	m/s ²	Ubrzanje u vremenskom koraku i
c_{CO}	%	Suha koncentracija CO
c_{CO_2}	%	Suha koncentracija CO ₂
c_{dry}	ppm	Suha koncentracija onečišćujuće tvari
$CF_{pollutant}$	-	Faktor usklađenosti za odgovarajuću onečišćujuću tvar
$c_{gas,i}$	ppm	Izmjerena koncentracija plinovite komponente u ispušnom plinu
c_{HC}	ppm	Izmjerena koncentracija ugljikovodika u komori
$c_{HC(w/NMC)}$	ppmC ₁	Koncentracija HC-a
$c_{HC(w/oNMC)}$	ppmC ₁	Koncentracija HC-a
c_{HCw}	ppm	Vlažna koncentracija HC-a
$c_{i,c}$	ppm	Koncentracija komponente i , ispravljena po vremenu kao funkcija vremena t
$c_{i,r}$	ppm	Nerazrijeđena koncentracija komponente i kao funkcija vremena t
$c_{PN,i}$	#/m ³	Izmjerena brojčana koncentracija čestica normalizirana na 0 °C
c_{wet}	ppm	Vlažna koncentracija onečišćujuće tvari
E_E	-	Učinkovitost etana
E_M	-	Učinkovitost metana
EURO-6	g/km ili #/km	Primjenjiva granična vrijednost emisije
H/C	-	Omjer vodika i ugljika
H_a	g/kg	Vlažnost ulaznog zraka
k_w	-	Korekcijski faktor suho-vlažno
$M_{CO_2}(t_{i,j})$	g	Masa CO ₂ izmjerena između početka ispitivanja i vremena $t_{i,j}$
$M_{CO_2,ref}$	g	Prva polovina mase CO ₂ koju ispusti vozilo tijekom ispitivanja WLTP-om
$m_{gas,i}$	g/s	Masa plinovite komponente u ispušnom plinu
M_{HC}	g	Masa ugljikovodika
$M_{HC,in}$	g	Masa ugljikovodika koji ulaze u komoru, u slučaju komore sa stalnim obujmom za ispitivanja cjelodnevnih emisija
$M_{HC,out}$	g	Masa ugljikovodika koji izlaze iz komore, u slučaju komore sa stalnim obujmom za ispitivanja cjelodnevnih emisija

M_k	-	Broj uzoraka dijelova gradske i izvan gradske vožnje i vožnje autocestom s pozitivnim ubrzanjem
$M_{RDE,k}$	mg/km ili #/km	Konačni rezultati RDE-a specifičnih emisija po prijedenu putu za masu plinovitih onečišćujućih tvari ili broj čestica
$m_{RDE,k}$	mg/km ili #/km	Masa plinovitih onečišćujućih tvari specifična za prijedenu udaljenost ili broj čestica specifičan za prijedenu udaljenost, ispuštenih tijekom cijele vožnje za utvrđivanje RDE-a
N_k	-	Ukupni broj uzoraka dijelova vožnje u gradu, izvan grada i na autocesti
N_t	-	Ukupan broj uzoraka
$NTE_{pollutant}$	g/km ili #/km	Granična vrijednost komponente ispušnih plinova
P	kPa	Barometarski tlak
PN,i		Broj čestica u protoku
$q_{m,c}$	kg/s	Maseni protok ispušnih plinova, ispravljen po vremenu, kao funkcija vremena t
$q_{m,r}$	kg/s	Nerazrijeđeni maseni protok ispušnih plinova kao funkcija vremena t
$q_{maw,i}$	kg/s	Trenutačni maseni protok ulaznog zraka
$q_{mew,i}$	kg/s	Trenutačni maseni protok ispušnih plinova
$q_{mf,i}$	kg/s	Trenutačni maseni protok goriva
RF_k	-	Faktor za evaluaciju rezultata izračunan za vožnju za utvrđivanje RDE-a
r_h	-	Odzivni faktor ugljikovodika,
r_k	-	Omjer emisija CO ₂ specifičnih za prijedenu udaljenost izmjerenih tijekom RDE ispitivanja i emisija CO ₂ specifičnih za prijedenu udaljenost koje vozilo ispusti tijekom WLTP ispitivanja
RPA_k	m/s ² ili kW/(kg*km)	Relativno pozitivno ubrzanje tijekom dijelova gradske i izvan gradske vožnje i vožnje autocestom
T	K	Temperatura okoline u komori
u_{gas}	-	Omjer gustoće plinovite komponente u ispušnom plinu i ukupne gustoće ispušnog plina
V	m ³	Neto volumen komore korigiran za obujam vozila s otvorenim prozorima i prtljažnikom
$(v \cdot a)_i$	m ² /s ³ ili W/kg	Umnožak stvarne brzine vozila i ubrzanja u vremenskom koraku i
$(v \cdot a_{pos})_{j,k}$	m ² /s ³ ili W/kg	Umnožak stvarne brzine vozila i pozitivnog ubrzanja višeg od 0,1 m/s ² u vremenskom koraku j uzimajući u obzir dijelove gradske i izvan gradske vožnje te vožnje autocestom
$(v \cdot a_{pos})_{k_{[95]}}$	m ² /s ³ ili W/kg	95% umnoška brzine vozila i pozitivnog ubrzanja višeg od 0,1 m/s ² za dijelove gradske i izvan gradske vožnje i vožnje autocestom
v_i	km/h	Stvarna brzina vozila u vremenskom koraku i

SAŽETAK

Smanjenje emisija štetnih tvari proizvedenih u prometu fokus je Europske Unije zadnjih desetak godina kako bi se smanjilo onečišćenje zraka, efekt staklenika, odnosno svi aspekti koji štetno utječu na ljudsko zdravlje i kvalitetu života. Razvoj tehnologije i prijenosnih sustava za mjerenje emisija štetnih tvari osigurao je točniji uvid u stvarne emisije prilikom vožnje, što posljedično omogućuje unaprjeđenje postojećih graničnih vrijednosti emisija, odnosno adekvatno smanjenje istih razvojem tehnologije.

Kako bi podaci o emisijama štetnih tvari bili primjenjivi u daljnjim istraživanjima potrebno je što bolje definirati postupak ispitivanja u stvarnim uvjetima vožnje (*eng. Real Driving Emissions*, skraćeno *RDE*). To se postiže kontinuiranim razvojem prijenosnih sustava za mjerenje emisija (*eng. Portable Emission Measuring Systems*, skraćeno *PEMS*) kao i kontinuiranim razvojem mjernih metoda. U laboratorijskim ispitivanjima emisija štetnih tvari vozila rezultati ispitivanja ne mogu u potpunosti reproducirati stvarne uvjete, ali zbog izvođenja u standardiziranim uvjetima osigurana je ponovljivost mjerenja i usporedba samih rezultata. U slučaju ispitivanja u stvarnim uvjetima vožnje, zbog velikog broja nepredvidivih vanjskih utjecaja na ispitivanje teško se postiže ponovljivost mjerenja. U radu se nastojalo odrediti koji i u kolikoj mjeri vanjski faktori utječu na rezultate emisija štetnih tvari i može li se njihov utjecaj smanjiti.

Kroz analizu istraživanja Europske komisije, istraživanja neovisnih tijela i vlastitih istraživanja provedenih dostupnom opremom Laboratorija za motore i vozila zaključeno je kako je uz današnje uvjete i granične vrijednosti ispitne rute ispitivanja u stvarnim uvjetima vožnje gotovo nemoguće postići ponovljivost ispitnih rezultata zbog relativno velikog utjecaja vanjskih faktora, poput udaljenosti ispitne rute, tipa vožnje i ponašanja vozača.

Ključne riječi: emisije štetnih tvari, utjecaj ispitne rute, mjerna nesigurnost, PEMS, WLTC, RDE

SUMMARY

The reduction of vehicle emissions produced by transportation has been the focus of the European Union for the past decade in order to reduce air pollution, greenhouse gas emissions and all aspects that adversely affect human health and quality of life. The development of technology and portable emission measuring systems has provided a more accurate insight into actual emissions during driving, which consequently allows for the improvement of existing emission limits and their adequate reduction through technology development.

In order for data on vehicle emissions to be applicable in further research, it is necessary to better define the testing procedure under real driving conditions (RDE). This is achieved through continuous development of portable emission measuring systems (PEMS) and continuous development of measurement methods. In laboratory tests of vehicle emissions, the test results cannot fully reproduce real-world conditions, but due to their performance in standardized conditions, measurement repeatability is ensured, as well as comparison of the results. In the case of testing under real driving conditions, due to the large number of unpredictable external influences on testing, measurement repeatability is difficult to achieve. The thesis aimed to determine which external factors and to what extent they affect the results of harmful emissions and whether their impact can be reduced.

Through the analysis of European Commission research, independent bodies, and our own research conducted with available Laboratory for Engines and Vehicles equipment, it was concluded that with today's conditions and emission limit values, it is almost impossible to achieve measurement repeatability under real driving conditions testing route due to the relatively large impact of external factors, such as the distance of the testing route, type of driving, and driver behavior.

Key words: vehicle emissions, influence of test route, measurement uncertainty, PEMS, WLTC, RDE.

1. UVOD

Promet je jedna od važnijih stavki modernog društva, bilo da se radilo o prijevozu ljudi, životinja ili dobara. Osim što današnji oblici transporta različitim medijima (cesta, željeznica, zrak, voda) povezuju sve kutke na planetu, oni su osnova kojom se provodi trgovina, ključna za razvoj i postojanje civilizacija. Kako se razvijaju društva i civilizacije, usporedno se razvijaju i sve vrste transporta.

Cestovni promet, unazad 100-tinjak godina, odnosno od 1913. godine i pojave pokretne trake revolucionirala se proizvodnja vozila [1]. Ovaj izum omogućio je veliku brzinu proizvodnje, ali i smanjio cijenu samih vozila. Time je došlo do ubrzanog razvoja automobilske industrije i samim time broja vozila na cestama.



Slika 1. Prva pokretna traka za proizvodnju automobila tvrtke Ford Motor Company [2]

Kroz godine broj vozila se kontinuirano povećavao, a prema Hedges & Company [2] u 2022. godini brojka je došla čak do 1.45 milijardi vozila na svijetu, od čega je 1.1 milijardi osobnih automobila.

Vozila s motorima s unutarnjim izgaranjem svojim radom proizvode i emisije štetnih tvari tijekom vožnje. Emisije dušikovih oksida, krutih čestica i drugih prepoznate su kao jedni od glavnih uzročnika zagađenja zraka, koje posljedično ima utjecaj na zdravlje ljudi, životinja i okoliša dok povećana koncentracija ugljikovog dioksida kao jednog od prirodnih stakleničkih plinova uzrokuje prekomjerno zagrijavanje Zemlje, odnosno efekt staklenika [3].

S ciljem smanjenja štetnog utjecaja na okoliš i zdravlje danas se na globalnoj razini poduzimaju određene mjere kako bi se ograničile navedene, ali i druge emisije štetnih tvari. U ovom radu pažnja je posvećena postupcima Europske Unije ka čistijem zraku i smanjenju emisija štetnih tvari koja su rezultat korištenja cestovnih vozila. Kroz različite Uredbe i njihove dodatke donesen je niz strogih mjera kojima se smanjuju dopuštene emisije određenih tvari (CO₂, NO_x, THC, krute čestice, itd.) i potiče se razvoj čistih tehnologija.

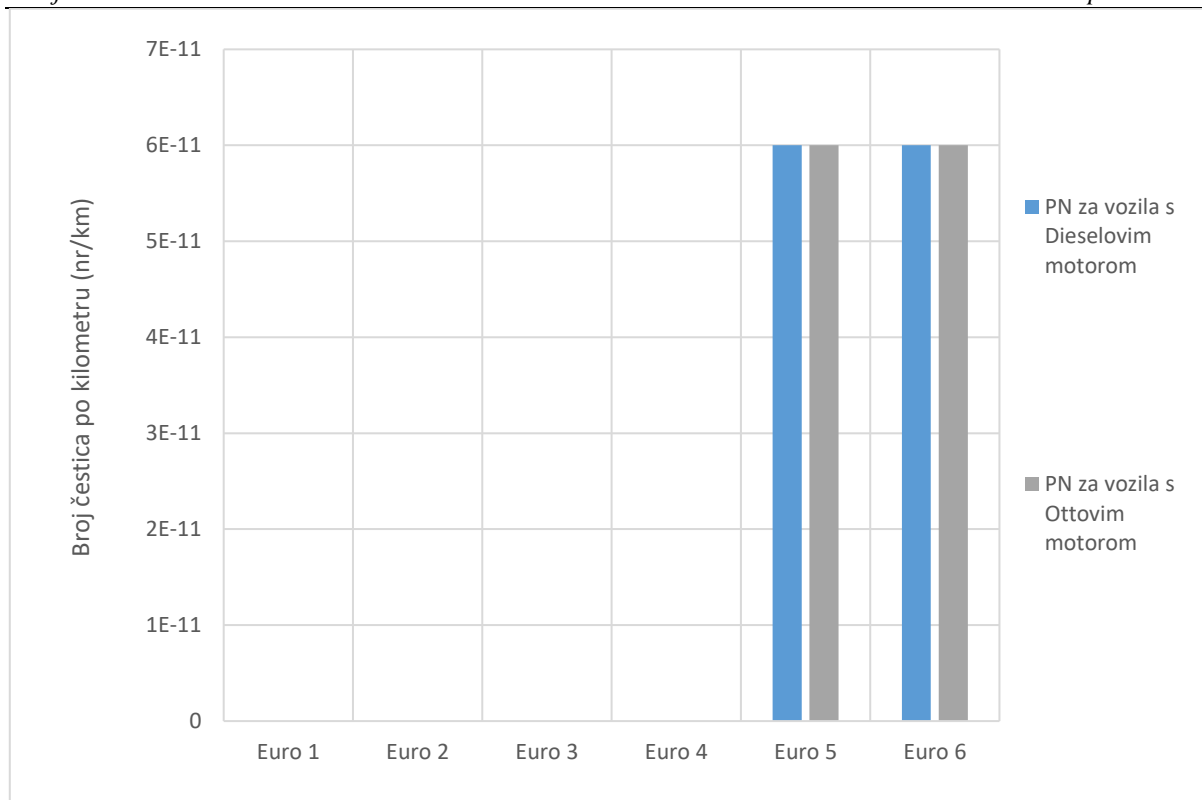
1.1. Ispitivanje emisija vozila

U Europskoj Uniji propisane su količine emisija štetnih tvari ispušnih plinova, a za svaki tip vozila (laka osobna i gospodarska) vrijede drugačije vrijednosti. To se pokazalo nužnim jer su daljnja smanjenja emisija u transportu, ali i ostalim sektorima, potrebna za dostizanje ciljeva Europske Unije u pogledu kakvoće zraka. Jedne od takvih mjera jesu Euro standardi s ciljem smanjenja emisija čestica i prekursora ozona, poput dušikovih oksida i ugljikovodika [6].

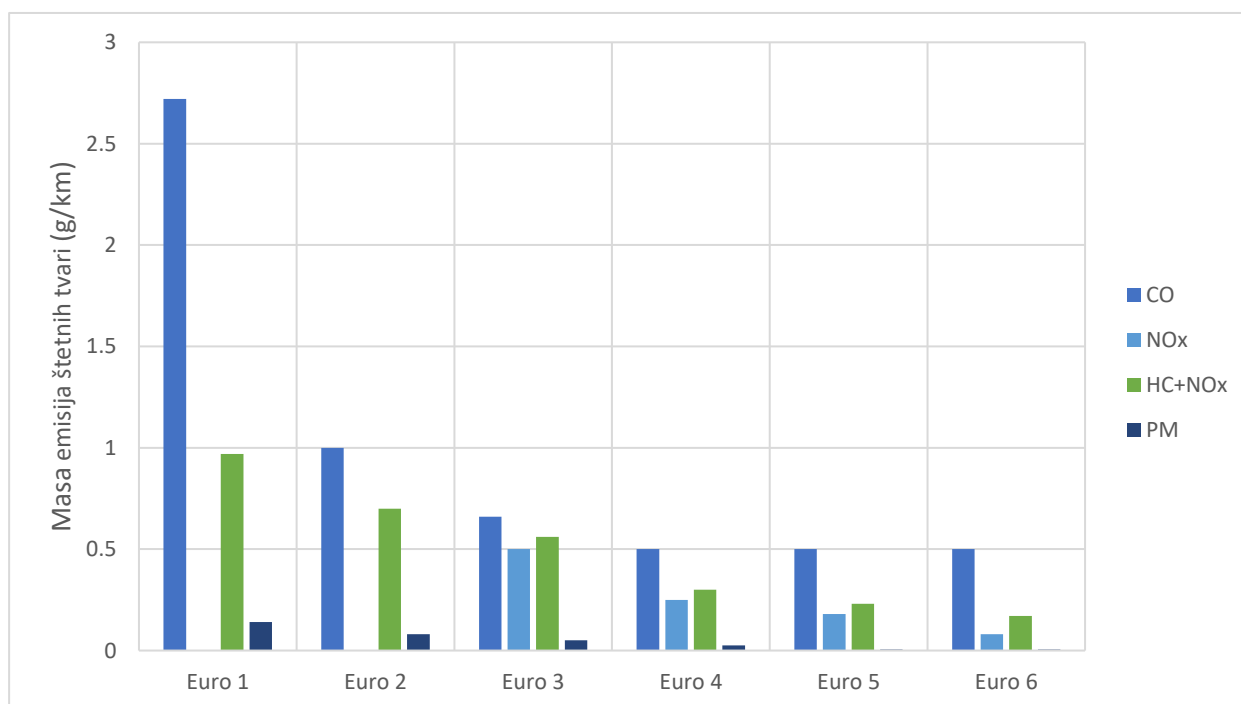
Regulativom 91/441/EEC 1992. godine na snagu je stupio Euro 1 emisijska razina kojim su se po prvi put ograničile emisije ugljikovog monoksida, krutih čestica te kombinirane emisije ugljikovodika i dušikovih oksida [5]. Nakon njega, uslijedili su Euro 2 (1996.), Euro 3 (2000.), Euro 4 (2005.), Euro 5 (2009.) i trenutno na snazi Euro 6 (2014.) standardi kojima su se sve više pooštravali zahtjevi na proizvođače vozila odnosno granične vrijednosti emisija postupno su smanjivane.

Kroz godine uvedeni su i zahtjevi za ugradnjom ugrađenog dijagnostičkog sustava (OBD) kojim se ostvaruje kontinuirani nadzor nad radom vozila kroz cijeli radni vijek pa samim time i osigurava da vozilo radi u skladu s dopuštenim vrijednostima emisija štetnih tvari. Ovi standardi imaju i imali su veliki utjecaj na smanjenje onečišćenja zraka nastalog zbog transporta, a daljnjim pooštavanjem mjera i poticanjem korištenja ekološki prihvatljivijih tehnologija u transportu nastavlja se ovaj trend.

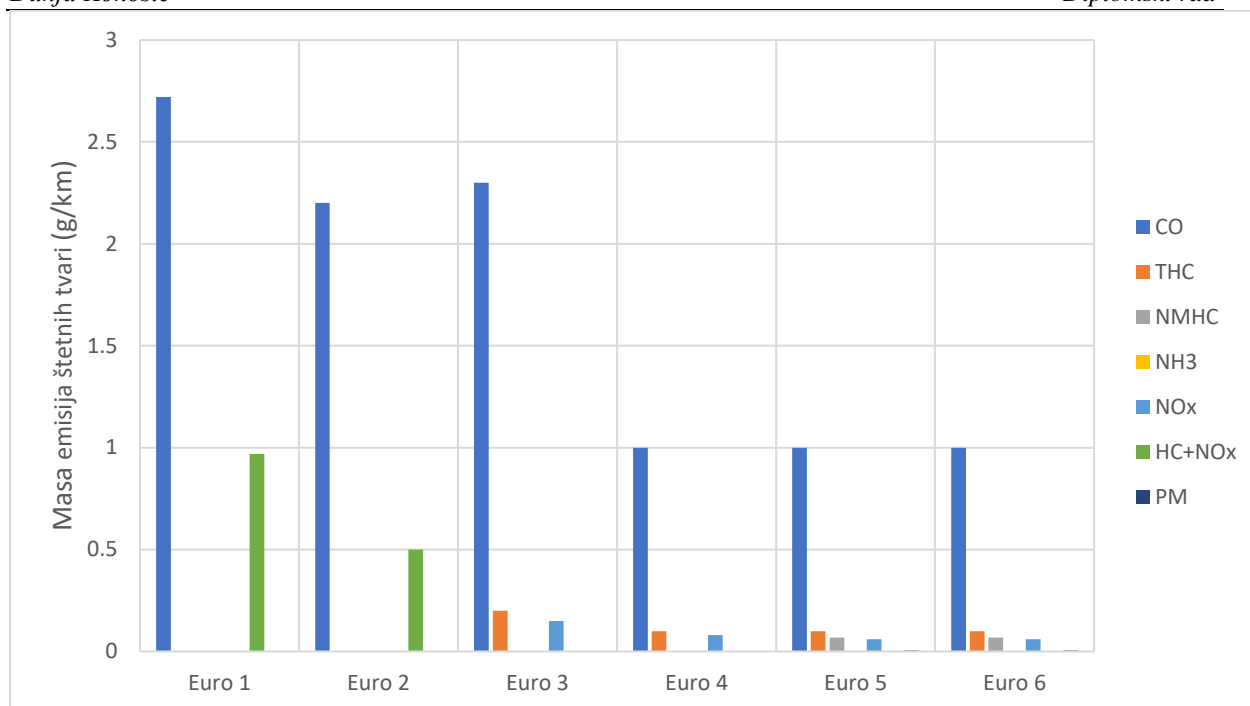
U nastavku je dan prikaz već spomenutih graničnih vrijednosti za svaki pojedinu emisijsku razinu (Euro 1 – Euro 6) za vozila s Dieselovim ili Ottovim motorom [6].



Slika 2. Granične vrijednosti broja čestica (PN)



Slika 3. Granične vrijednosti emisija za vozila s Dieselovim motorom



Slika 4. Granične vrijednosti emisija za vozila s Ottovim motorom

Sukladnost s propisanim vrijednostima dokazuje se ispitivanjem vozila standardiziranom ispitnom procedurom. Prvi na snazi bio je Novi europski vozni ciklus (*eng. New European Driving Cycle*, skraćeno *NEDC*) ispitni ciklus od 1992. godine, a 2017. godine zamjenjuju ga Globalno usklađeni ispitni postupak za laka vozila (*eng. Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure*, skraćeno *WLTP*) te Ispitivanje stvarnih emisija tijekom vožnje (*eng. Real Driving Emissions*, skraćeno *RDE*).

1.1.1. NEDC i WLTP

NEDC ispitni ciklus sastoji se od dva dijela, ECE/UDC (*eng. Urban Driving Cycle*) i EUDC (*eng. Extra Urban Driving Cycle*). UDC ciklus predstavlja gradske uvjete vožnje i u ispitivanju se ponavlja četiri puta nakon čega se odrađuje EUDC ciklus koji predstavlja „agresivniju“ vožnju (npr. vožnja autocestom). NEDC ispitivanje provodi se isključivo u laboratoriju na standardiziranoj ruti pa teško može u obzir uzeti sve aspekte vožnje u stvarnom svijetu pa tako ni predstavljati rad vozila u stvarnim uvjetima, bilo da se radilo o podacima o potrošnji goriva ili količini emisija štetnih tvari (kako zbog, sada već, blagih graničnih vrijednosti potrošnje i emisija, tako i zbog novih tehnologija poput „start-stop“ sustava ili hibridizacije pogonskog sustava koje nisu uzete u obzir prilikom utvrđivanja ispitnog ciklusa). Dodatno, ispitni ciklus sadržava previše faza stajanja, nedovoljno je

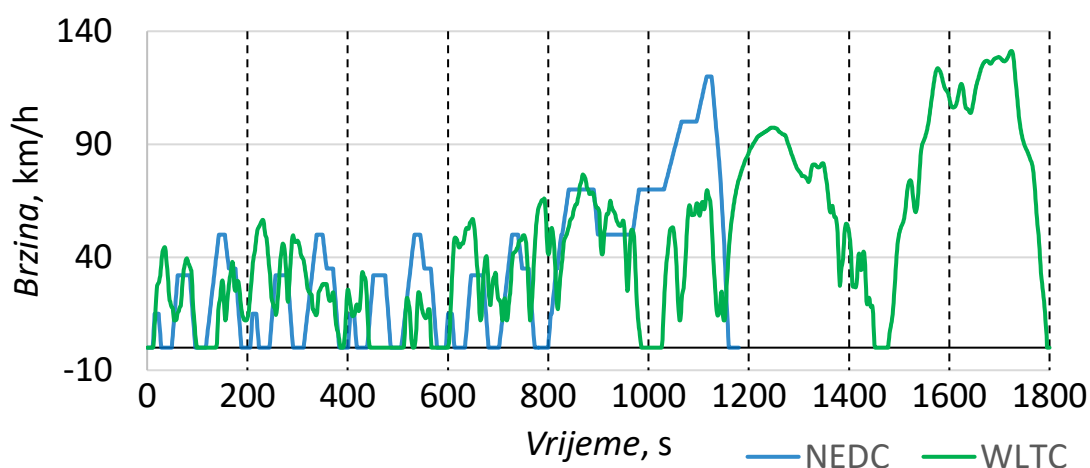
ubrzanje i najveće brzine su preniske. Prethodno navedene karakteristike ciklusa dovele su do zastarijevanja same procedure.

Upravo je to navelo nadležna tijela Europske Unije na uvođenje novog ispitnog protokola koji bi realnije opisao uvjete stvarne vožnje, ali i uzeo u obzir sve strože standarde po pitanju potrošnje goriva i emisija štetnih tvari. WLTP procedura, odnosno Globalno usklađeni ispitni ciklus za laka vozila (eng. *Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle*, skraćeno *WLTC*) ciklus zamijenio je zastarjeli NEDC ispitni ciklus 2017. godine. Razvijena su tri ispitna ciklusa za različite tipove vozila temeljem omjera snage (W) i mase (kg) vozila.

Kategorija	Omjer snage i mase vozila W/kg	Najveća brzina [km/h]	Faze ciklusa
Klasa 3	$W/kg > 34$	≥ 120 ili < 120 , zavisno od podkategorije	Niska, Srednja, Visoka, Ekstra visoka
Klasa 2	$34 \geq W/kg > 22$	-	Niska, Srednja, Visoka
Klasa 1	$W/kg \leq 22$	-	Niska, Srednja

Tablica 1. Klase WLTP ispitnih ciklusa [6]

Klasa 3 predstavlja tipove vozila kakva se najčešće nalaze u Europi i Japanu pa je za njega i dan prikaz jednog takvog ciklusa na Slici 5. Nedostatak jednog ovakvog ispitivanja je dužina trajanja ispitivanja (utječe na brzinu puštanja novih vozila na tržište), a pogotovo sve stroži zahtjevi za određene aspekte ispitivanja što zahtjeva dodatne napore i troškove od samih proizvođača vozila.



Slika 5. NEDC i WLTC ciklus za vozila Klase 3

Usporede li se ova dva ispitna ciklusa, može se vidjeti da WLTP procedura propisuje dinamičniju vožnju i veća ubrzanja, manje je faza stajanja, a dulji je ciklus i prijedena udaljenost.

Karakteristike	NEDC	WLTP
Ispitni ciklus	Jednostavan ispitni ciklus	Dinamični ciklus sličniji stvarnim uvjetima vožnje
Udaljenost	11 km	23,25 km
Trajanje	20 minuta	30 minuta
Prosječna brzina	34 km/h	46,5 m/h
Najveća brzina	120 km/h	131 km/h
Faze vožnje	2 faze, 66 % gradske i 34 % prigradske vožnje	4 dinamične faze, 52 % gradske i 48 % prigradske vožnje
Utjecaj dodatne opreme	Ne uzima se u obzir utjecaj dodatne opreme na mjerenje.	Uzima se u obzir utjecaj dodatne opreme na mjerenje
Mijenjanje stupnjeva prijenosa	Fiksne točke mijenjanja stupnja prijenosa	Različite točke mijenjanja stupnja prijenosa za svako vozilo
Temperatura ispitivanja	20-30°C	23°C; vrijednosti za CO ₂ ispravljaju se za 14°C

Tablica 2. Razlike između NEDC i WLTP ispitnog ciklusa [7]

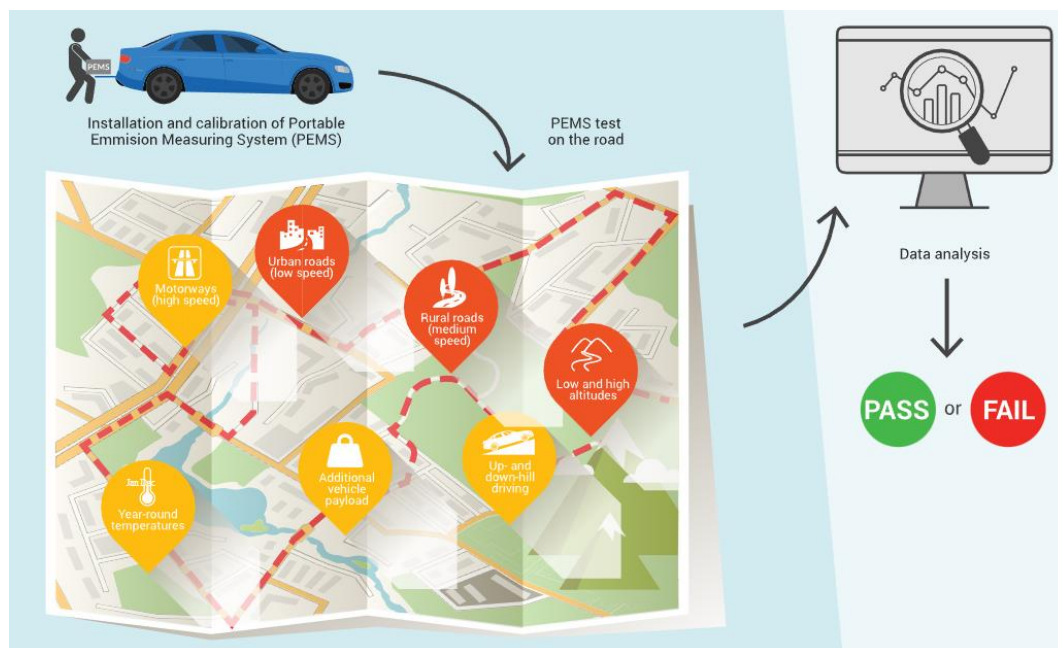
1.1.2. Ispitivanje stvarnih emisija tijekom vožnje

Iako WLTP ispitna procedura bolje i realnije simulira stvarne uvjete vožnje od NEDC postupka i dalje se radi laboratorijskom ispitivanju u kontroliranim uvjetima i standardiziranim postupkom. Prednost ovakve procedure jesu jednaki uvjeti ispitivanja i omogućavanje lakog uspoređivanja vozila na globalnoj razini. Unatoč tome, i dalje postoji problem stvaranja realnim uvjeta na cestama u laboratorijskim uvjetima.

Od 2017. godine, Uredbom 2016/427, ispitivanje emisija u stvarnim uvjetima vožnje Ispitivanje stvarnih emisija tijekom vožnje (*eng. Real-Driving Emissions*, skraćeno *RDE*) postaje dio procedure i obavezno za sva nova vozila. RDE je ispitni ciklus koji se provodi na cestama i služi kako bi upotpunio laboratorijska ispitivanja, a istovremeno i kontrolirao da ne postoje prevelika odstupanja između emisija štetnih tvari proizvedenih tijekom laboratorijskog ispitivanja i stvarnih uvjeta vožnje na cestama. RDE ispitivanje uvedeno je u proceduru u 4 paketa uredbi od 2016. do 2018. godine.

RDE ispitivanje provodi se pomoću Prijenosnog sustava za mjerenje emisija (*eng. Portable Emission Measuring Systems*, skraćeno *PEMS*), sustava koji prikuplja informacije tijekom ispitne rute koja izlaže vozilo različitim uvjetima vožnje (promjena nadmorske visine,

različite temperature ispitivanja, vožnja uzbrdo i nizbrdo te izmjenjivanje gradskih, izvangradskih i faze vožnje autocestom).



Slika 6. Ilustracija tijekom RDE (eng. *Real-Driving Emissions*) ispitivanja [8]

2. UREDBE EUROPSKOG PARLAMENTA O HOMOLOGACIJI TIPA MOTORNIH VOZILA U ODNOSU NA EMISIJE IZ LAKIH I GOSPODARSKIH VOZILA

Kao što je ranije spomenuto, RDE je predstavljen kroz 4 paketa uredbi u periodu od 2016. do 2018. godine, a kroz njih su definirane ispitna procedura, mjerni uređaji i metode izračunavanja emisija štetnih tvari a.

Svaki sljedeći paket uredbi i dodataka sa sobom nosi pooštavanje faktora sukladnosti, a kroz neke se uvode i novi protokoli za mjerenje dodatnih emisija štetnih tvari.

2.1. Uredba Komisije (EU) 2016/427

Ovom uredbom po prvi put dani su osnovni zahtjevi na ispitivanje emisija u stvarnim uvjetima vožnje. U Prilogu III.A opisan je postupak za provjeru stvarnih emisija tijekom vožnje (RDE) lakih osobnih i gospodarskih vozila. Predviđeno je i određivanje vrijednosti emisija koje se ne smiju prekoračiti (*eng. „not-to-exceed“*, skraćeno *NTE*), a ispuštene su tijekom RDE ispitivanja. U sljedećem izrazu definirana je spomenuta vrijednost:

$$NTE_{pollutant} = CF_{pollutant} \times EURO-6 \quad (1)$$

gdje je:

$CF_{pollutant}$ – faktor usklađenosti za odgovarajuću onečišćujuću tvar (*eng. Conformity Factor*, skraćeno *CF*)

EURO-6 – primjenjiva granična vrijednost emisije.

Kroz kasnije pakete vrijednost faktora usklađenosti biti će definirana za glavne onečišćujuće tvari, a postupno i smanjivana njegova vrijednost kako bi se uskladila s mjernom metodom, ali i vremenom povećala točnost rezultata.

Granična vrijednost emisija EURO-6 definirana je u Tablici 2. Uredbe (EZ) br. 715/2007 iz 2007. godine gdje su one definirane za kategorije vozila M, N₁ te N₂ bilo da se radi o motoru s vanjskim izvorom paljenja ili kompresijskim paljenjem. Već je onda planirano uvođenje Programa za mjerenje čestica (*eng. Particulate Measurement Programme*, skraćeno *PMP*) u svrhu nadzora nad emisijama u obliku krutih čestica veličine 0,1 μm i manje.

Kategorija	Klasa	Referentna masa (MR) (kg)	Granične vrijednosti													
			Masa ugljičnog monoksida (CO)		Masa ukupnih ugljikovodika (THC)		Masa ugljikovodika bez metana (NMHC)		Masa dušikovih oksida (NO _x)		Kombinirana masa ukupnih ugljikovodika i dušikovih oksida (THC + NO _x)		Masa čestica (PM)		Broj čestica (1)	
			L ₁ (mg/km)	L ₂ (mg/km)	L ₃ (mg/km)	L ₄ (mg/km)	L ₂ + L ₄ (mg/km)	L ₅ (mg/km)	L ₆ (nr./km)	PI	CI	PI	CI	PI	CI	PI
M	-	Ukupno	1 000	500	100	-	68	-	60	80	-	170	5.0	5.0		
N ₁	I	MR ≤ 1 305	1 000	500	100	-	68	-	60	80	-	170	5.0	5.0		
	II	1 305 < MR ≤ 1 760	1 810	630	130	-	90	-	75	105	-	195	5.0	5.0		
	III	1 760 < MR	2 270	740	160	-	108	-	82	125	-	215	5.0	5.0		
N ₂			2 270	740	160	-	108	-	82	125	-	215	5.0	5.0		

Tumač: PI=Vanjski izvor paljenja, CI=Kompresijsko paljenje
 (1) Normirani broj bit će određen za ovaj stupanj.
 (2) Norme za masu čestica za vanjski izvor paljenja primjenjuju se jedino za vozila opremljena motorima s izravnim ubrizgavanjem.

Slika 7. Granične vrijednosti emisije Euro 6 [6]

2.2. Uredba Komisije (EU) 2016/646

U drugom paketu uredbi iz 2016. godine utvrđena su odstupanja (na temelju istraživanja i vanjskih informacija) između stvarnih emisija u cestovnom prometu vozila Euro 5/6 i onih izmjerenih u novom regulatornom europskom ciklusu vožnje (NEDC), osobito što se tiče emisija NO_x iz vozila s Dieselovim motorom. To je dodatno doprinijelo želji za uvođenjem novog i aktualnijeg ispitnog ciklusa u laboratorijskim uvjetima (WLTP), ali i ispitnoj proceduri u stvarnim uvjetima vožnje (RDE). Kombinacija ova dva ciklusa omogućila bi kontinuiran nadzor da nikada ne dođe do velikih odstupanja između stvarnih emisija u prometu i onih izmjerenih prilikom ispitivanja.

Nastavno na prethodnu Uredbu, definirana su dodatna ograničenja za ispitivanje stvarnih emisija tijekom vožnje (RDE), a predviđaju se i godišnje revizije razine konačnog faktora sukladnosti uzimajući u obzir tehnički napredak, odnosno metode za ocjenjivanje podataka o emisijama dobivenih PEMS-om.

Utvrđena je vrijednost konačnog faktora sukladnosti CF za masu dušikovih oksida (NO_x) i ona iznosi $1 + \text{tolerancija}$ pri čemu je $\text{tolerancija}=0,5$. „Tolerancija“ je parametar koji u obzir uzima različite nesigurnosti pri mjerenju s prenosivim sustavima za mjerenje emisija (PEMS) i on se u svrhu poboljšanja kvalitete mjerenja revidira na godišnjoj razini. Također, definirani su dinamični uvjeti i metode provjere normalnosti tih uvjeta u dva koraka. Sami dinamični uvjeti koriste se kao mjera procjene je li ispitna ruta vožena preagresivno ili prelagano u bilo kojem trenutku, a procjenjuju se na temelju podataka o brzini i ubrzanju vozila.

2.3. Uredba Komisije (EU) 2017/1151 (2017/1154)

Osim definiranja nove ispitne procedure (WLTP), jedna od važnijih stavki donesenih ovom uredbom (2017/1151) i njenom dopunom (2017/1154) je zahtjev za opremanjem svih novih vozila Sustav ugrađene dijagnostike (eng. *On-Board Diagnostics*, skraćeno *OBD*). Ovaj sustav ugrađuje se u vozila kako bi se omogućilo utvrđivanje vrste pogoršanja ili neispravnosti tijekom cijelog radnog vijeka vozila.

Dopunom 2017/1154, opisana je metoda za mjerenje broja emisijskih čestica koja je sada na zadovoljavajućoj razini (oprema je pouzdana i dobro radi u različitim uvjetima), a usporedno se radi na razvoju emisijskih profila ultrasitnih čestica manjih od sadašnje granice od 23 nm. U skladu s time, definiran je iznos konačnog i privremenog faktora sukladnosti CF za broj čestica (PN) i on iznosi $1 + \text{tolerancija}$ pri čemu je $\text{tolerancija}=0,5$. Dani su temelji za

početak razvoja metodologije za ocjenjivanje emisija štetnih tvari kod hibridnih električnih vozila gdje je naglašena važnost da su odredbe o RDE-u praktično izvedive i pouzdane.

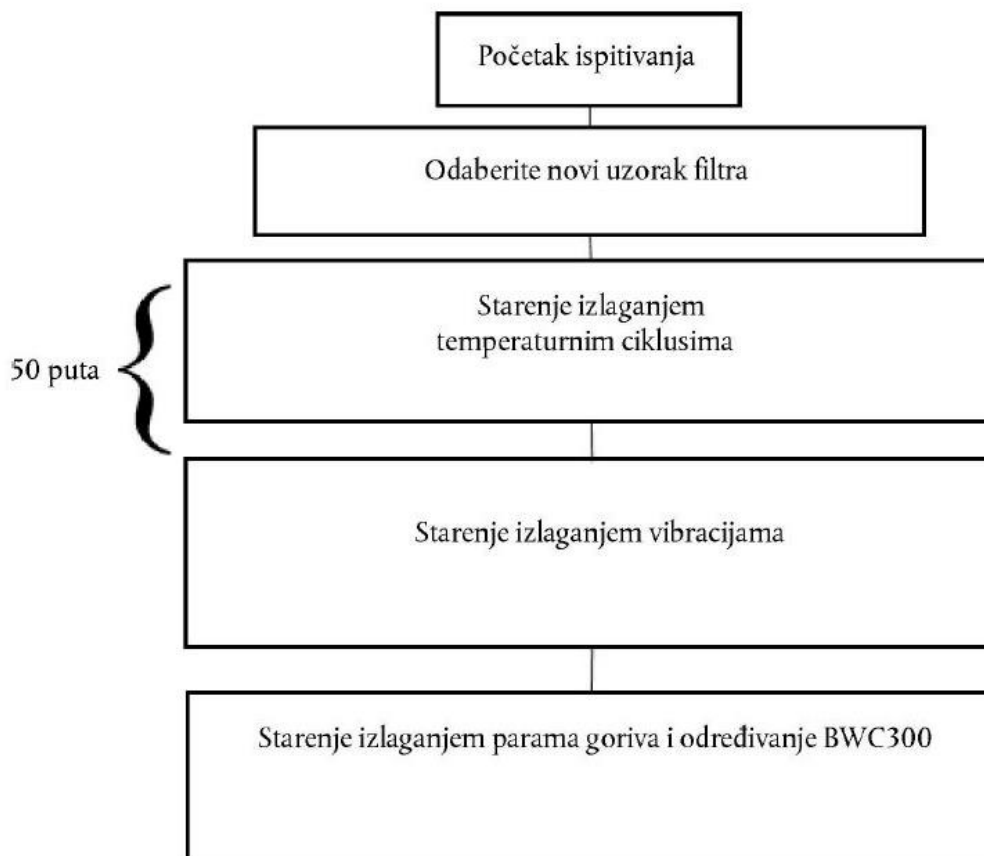
Također, regeneracija je uvrštena u ocjenjivanje vozila na temelju postupka za RDE uz naglasak da je u metodologiji potrebno uključiti faktor K_i u slučaju prekomjernih emisija tijekom regeneracije. Uslijed promjena u specifikacijama vozila i tehničkog napretka, postoji mogućnost ažuriranja K_i u svrhu praćenja stvarne situacije na cestama po pitanju regeneracijskih događaja. Na kraju je bitno napomenuti da je propisano i kondicioniranje vozila za ispitivanje s hladnim pokretanjem motora na sljedeći način. Nakon vožnje koja traje najmanje 30 minuta, ono se parkira (sa zatvorenim vratima i poklopcem motora) te se ostavlja isključenog motora između 6 i 56 sati. Pritom bi trebalo izbjegavati ekstremne atmosferske uvjete (obilan snijeg, oluja, tuča) i velike količine prašine.

2.4. Uredba Komisije (EU) 2018/1832

Treći po redu paket uredbi o RDE ispitivanju, odnosno drugi vezan za WLTP proceduru, ističe potrebu za daljnjim poboljšanjem i preispitivanjem metodologije za evaluaciju emisija onečišćujućih tvari RDE ispitivanja.

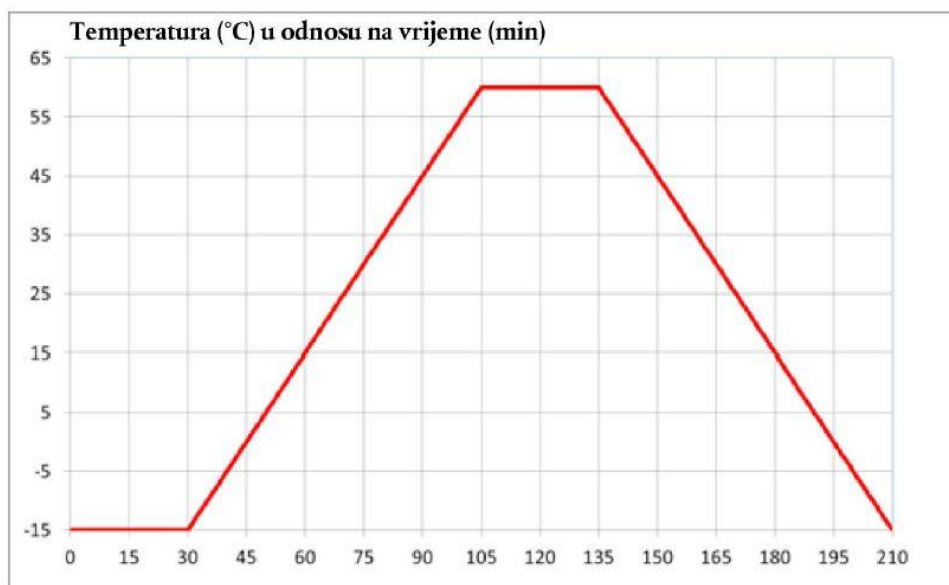
Povodom toga, zamjenjuje se *tolerancija* u izrazu za faktor sukladnosti CF za masu dušikovih oksida (NO_x) i sada iznosi $1 + \text{tolerancija}$ pri čemu je $\text{tolerancija}=0,43$.

Razvijen je novi ispitni postupak za emisije nastale isparavanjem (osobito za vozila s Ottovim motorom) kako bi se u obzir uzeo tehnički napredak u kontroli tih emisija i prilagodio postupak WLTP-u. Ovo ispitivanje bitno je zbog problema emisija hlapljivih organskih spojeva (aldehidi, alkoholi, ketoni, aromatski i parafinski ugljikovodici i esteri [4]) nastalih uslijed isparavanja goriva. Lakše komponente, poput metana, čimbenici su zbog kojih dolazi do efekta staklenika, a teže (propan i butan) sudjeluju u nastajanju prizemnog ozona. Oboje su neželjene posljedice koje onečišćuju zrak i upravo stoga su uvrštene u sastavni dio procedure ispitivanja. Metoda za određivanje osmišljena je tako da odgovara radu vozila u stvarnim uvjetima, a sama se izvodi na ponovljiv i obnovljiv način. Samim postupkom ispituju se emisije ugljikovodika nastalih isparavanjem kao posljedica cjelodnevnih kolebanja temperatura i toplog kondicioniranja nakon isključivanja motora, a uključena su i dva dodatna ispitivanja, za starenje filtera s aktivnim ugljenom i za propusnost sustava spremnika za gorivo. Postupak izlaganja filtra starenju u ispitnim uvjetima i određivanje faktora propusnosti (PF) izvodi se prije izvođenja postupaka toplog kondicioniranja i cjelodnevnih gubitaka. Na Slici 8. prikazan je jedan takav proces.



Slika 8. Postupak izlaganja filtra starenju u ispitnim uvjetima [6]

Prvo se filtar u namjenskoj temperaturnoj komori izlaže temperaturama od $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ uz periode stabilizacije u trajanju od 30 minuta pri istim temperaturama. Svaki ciklus traje 210 minuta (Slika 9). Temperaturni gradijent trebao bi biti što bliži $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ i ne bi smjelo biti

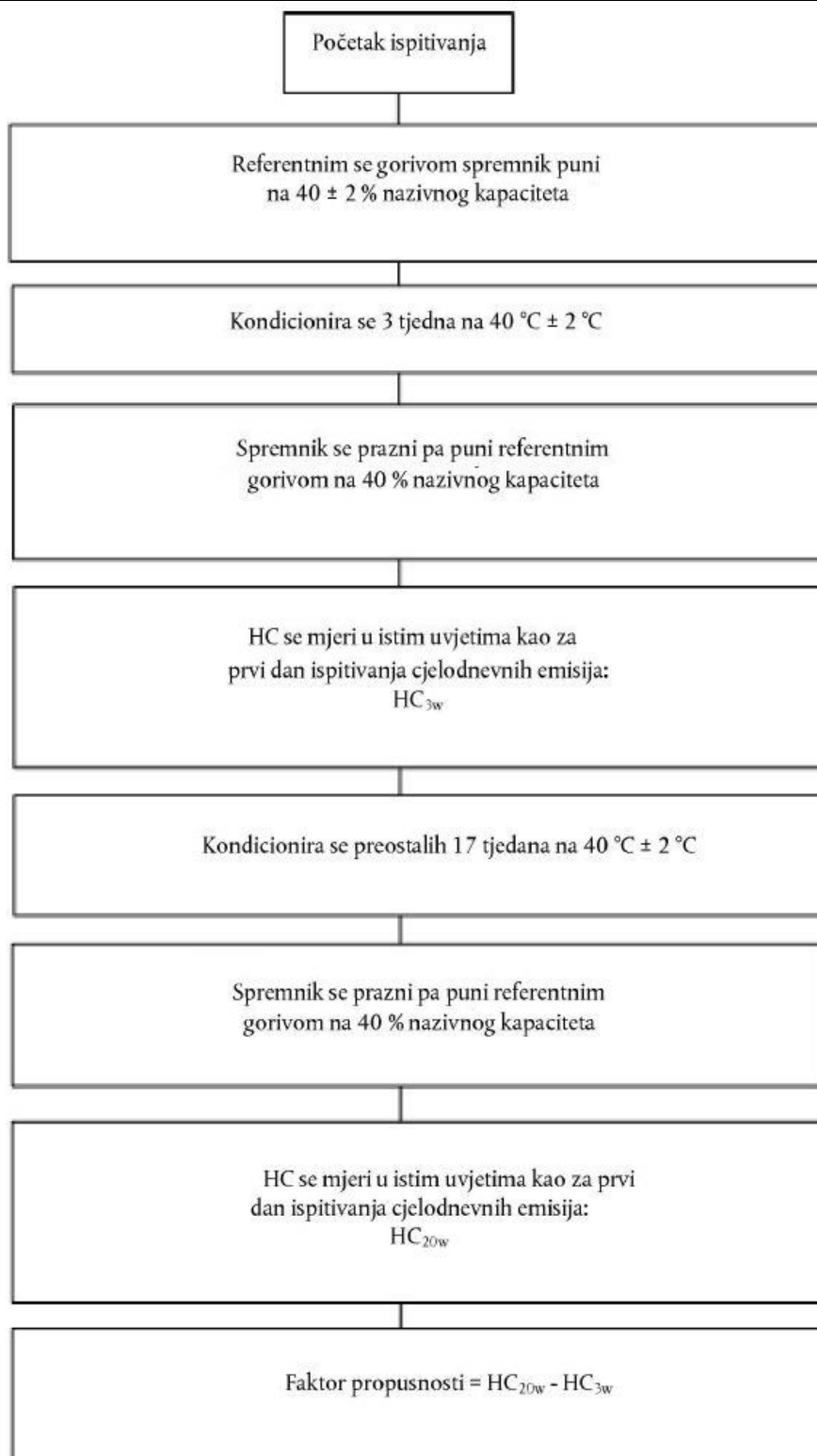


Slika 9. Ciklus temperaturnog kondicioniranja [6]

prisilnog protoka zraka kroz filter. Ovakav ciklus ponavlja se 50 puta i to traje 175 sati. Nakon toga slijedi starenje filtra izlaganjem vibracijama gdje se filter trese po vertikalnoj osi (pritom je okrenut na isti način kao u vozilu) gdje ukupni Grms mora biti veći od $1,5 \text{ m/s}^2$ i učestalost mora biti u granicama $30 \pm 10 \text{ Hz}$. Grms je metrika efektivne vrijednosti (*rms*) signala vibracija koja se izračunava kvadriranjem veličine signala na svakoj točki pronalaženjem prosječne vrijednosti kvadrata veličine, a onda se vadi kvadratni korijen srednje vrijednosti. Ovo ispitivanje traje 12 sati.

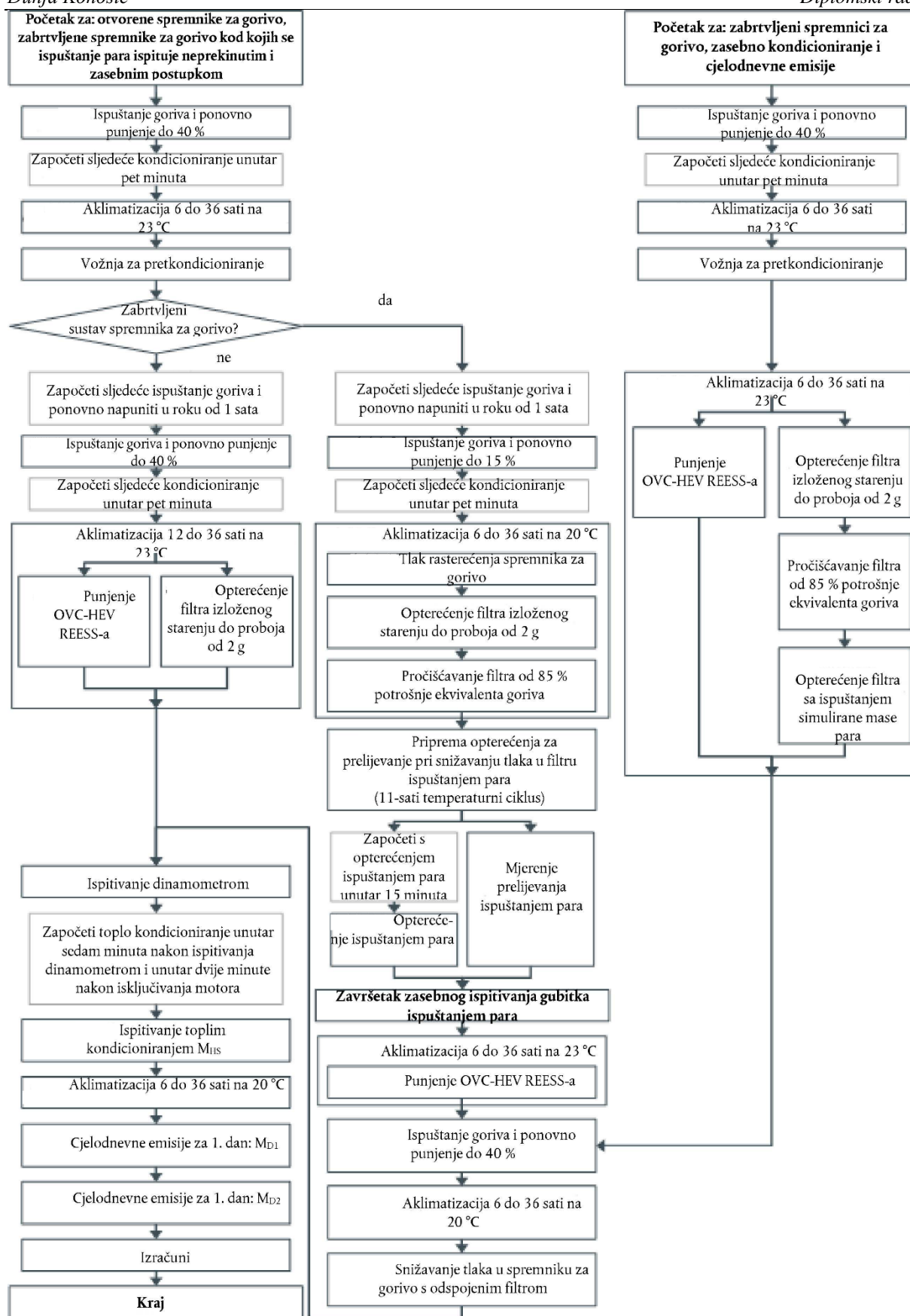
Starenje izlaganjem parama goriva i određivanje BWC300 sastoji se od dodatnog izlaganja starenju pomoću mješavine komercijalnog goriva i dušika ili zraka s volumenom para goriva od $50 \pm 15 \%$. Stopa punjenja parom goriva mora biti $60 \pm 20 \text{ g/h}$. Komercijalno gorivo mora imati jednake karakteristike kao referentno gorivo obzirom na gustoću pri $15 \text{ }^\circ\text{C}$, tlak pare, destilaciju, analizu ugljikovodika, udio kisika te udio etanola. Filter se pročišćava između 5 i 60 minuta nakon opterećivanja s 25 ± 5 litara u minuti laboratorijskog zraka sve dok se ne postigne 300 izmjena zraka dimenzija obujma filtra. Ovi postupci ponavljaju se 300 puta nakon čega se filter smatra stabiliziranim. Određivanje BWC300 odnosi se na postupak mjerenja radnog kapaciteta butana (BWC) s obzirom na porodicu po emisijama nastalim isparavanjem. Stabilizirani filter opterećuje (mješavinom butana i dušika brzinom $40 \text{ g butana na sat}$) se do proboja od 2 grama i nakon toga pročišćava najmanje pet puta. BWC300 je vrijednost dobivena presjekom posljednjih 5 BWC-a. Ukoliko se ustanovi da je dobavljač dao filter izložen starenju, proizvođač prije postupka starenja o tome obavještava homologacijsko tijelo i omogućuje nadzor nad svakim dijelom postupka.

Određivanje faktora propusnosti spremnika goriva prikazano je na Slici 10. Njegova vrijednost definirana je kao razlika između vrijednosti HC-a izmjerenog u 3. tjednu (HC_{3w}) onog izmjerenog u 20. tjednu (HC_{20w}).



Slika 10. Određivanje faktora propusnosti [6]

Nakon prethodnih ispitivanja, slijedi ispitni postupak za mjerenje gubitaka u fazi toplog kondicioniranja i cjelodnevnih gubitaka za sustave nezabrtvljenih i zabrtvljenih spremnika za gorivo prikazan shemom na Slici 11.



Slika 11. Dijagram toka ispitnog postupka mjerenja gubitaka [6]

Ispitivanje emisija nastalih isparavanjem omogućuje izračun emisija ugljikovodika nastalih tijekom ispitivanja prelijevanja pri ispuštanju para, cjelodnevnih emisija i toplog kondicioniranja. Gubici nastali isparavanjem u svakom od tih ispitivanja izračunavaju se pomoću početnih i završnih koncentracija ugljikovodika, temperatura i tlakova u komori, uz neto obujam komore. Za izračun se primjenjuje sljedeća jednadžba:

$$M_{HC} = k \times V \times \left(\frac{C_{HCf} \times P_f}{T_f} - \frac{C_{HCi} \times P_i}{T_i} \right) + M_{HC,out} - M_{HC,in} \quad (2)$$

gdje je:

i – početno očitavanje,

f – završno očitavanje,

M_{HC} - masa ugljikovodika [g],

$M_{HC,out}$ - masa ugljikovodika koji izlaze iz komore, u slučaju komore sa stalnim obujmom za ispitivanja cjelodnevnih emisija [g],

$M_{HC,in}$ - masa ugljikovodika koji ulaze u komoru, u slučaju komore sa stalnim obujmom za ispitivanja cjelodnevnih emisija [g],

C_{HC} - izmjerena koncentracija ugljikovodika u komori [ppm]

V - neto volumen komore korigiran za obujam vozila s otvorenim prozorima i prtljažnikom [m³]. U slučaju da obujam vozila nije poznat, oduzima se obujam od 1,42 m³,

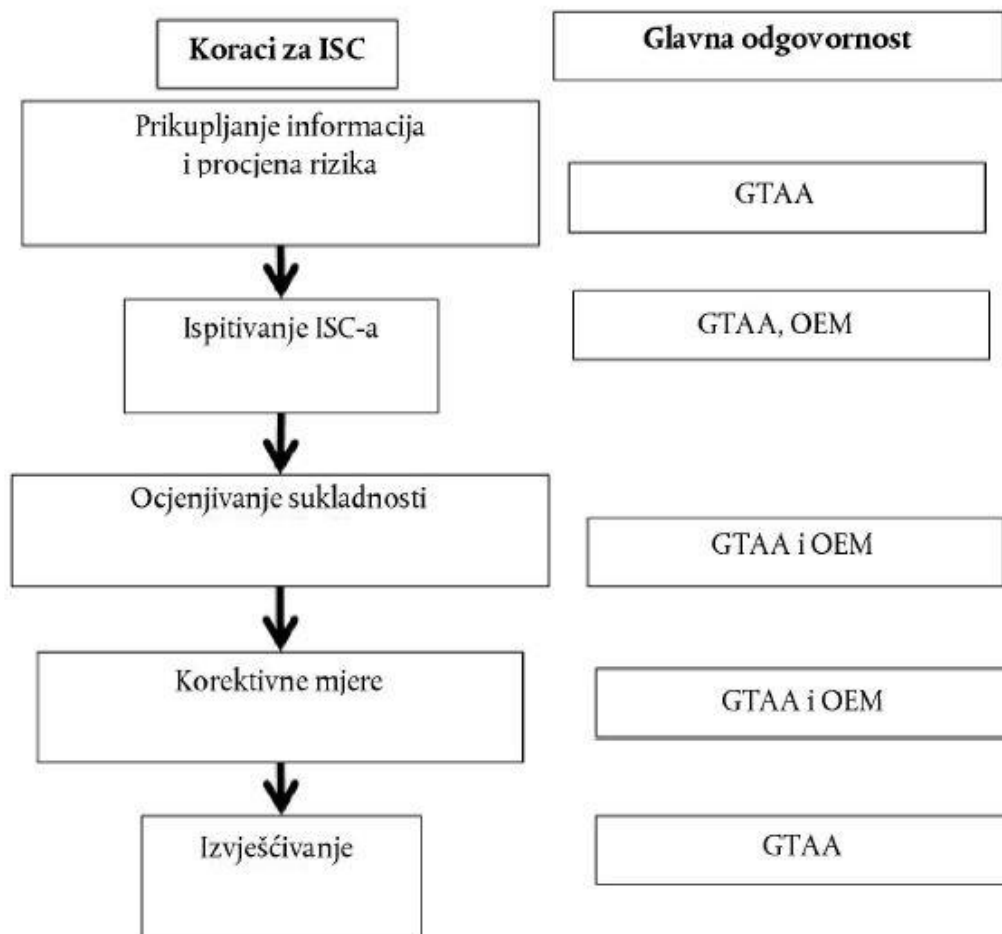
k - $1,2 \times 10^{-4} \times (12 + H/C)$, [g × K/(m³ × kPa)],

H/C - omjer vodika i ugljika,

T - temperatura okoline u komori [K],

P - barometarski tlak [kPa].

Bitna nadopuna procedure jest i uvođenje nove metodologije za provjeru sukladnosti u uporabi (ISC). Ona je namijenjena provjeravanju sukladnosti s graničnim vrijednostima za ispušne emisije i emisije nastale isparavanjem tijekom radnog vijeka vozila (najviše pet godina ili 100 000 km, što god se prvo ispuni). Samom postupku izložen je reprezentativni uzorak porodice vozila s tržišta po ISC-u (porodica u smislu ispušnih emisija prema PEMS-u odnosno po emisijama nastalima isparavanjem). Proces se odvija kroz nekoliko koraka kako je prikazano na Slici 12.



Slika 12. Prikaz postupka o sukladnosti o uporabi (ISC) (GTAA se odnosi na dodjelitelja homologacije, a OEM na proizvođača) [6]

Na početku se prikupljaju informacije bitne za donošenje odluke o porodici po ISC-u kako bi se odredilo koje porodice se ispituju u određenoj godini. One se dobivaju putem ispitivanja PEMS-om, različitim sustavima za mjerenje emisija ili daljinskim senzorskim očitavanjima, a dio se zaprima direktno od proizvođača (informacije o učestalosti i prirodi kvarova sustava i dijelova povezanih s emisijama po porodici). Na temelju tih podataka dodjelitelj homologacije određuje početnu procjenu rizika o nesukladnosti porodice po ISC-u s propisima. Zatim slijedi ispitivanje ISC-a za ispušne emisije koje vrše inspeksijska tijela i akreditirani laboratoriji, a kontroliraju se i provjere ISC-a koje provodi proizvođač. U određenom roku od kraja ispitivanja kreće se u ocjenjivanje sukladnosti, donosi se odluka o istoj odnosno o potrebi korektivnih mjera. Na kraju slijedi objavljivanje godišnjeg izvještaja od strane dodjelitelja homologacije s rezultatima svih ispitivanja po ISC-u iz prethodne godine.

2.5. Procedura RDE ispitivanja

Kroz navedene uredbe Europska Komisija definirala je u potpunosti ispitivanje emisija u stvarnim uvjetima vožnje i ono se sastoji od tri faze: gradske, izvangradske i vožnje autocestom u točno određenim uvjetima po pitanju prijeđene udaljenosti, trajanja i prosječne brzine vozila [9]. U Tablici 3. prikazane su komponente koje određuju valjanu ispitnu rutu.

Trajanje vožnje	Između 90 i 120 minuta (5400 – 7200 sekundi)	
Udaljenost	Gradska vožnja	>16 km
	Izvangradska vožnja	>16 km
	Vožnja autocestom	>16 km
Dijelovi ispitne rute	Gradska vožnja	29% do 44% prijeđene udaljenosti
	Prigradska vožnja	23% do 43% prijeđene udaljenosti
	Vožnja autocestom	23% do 43% prijeđene udaljenosti
Prosječna brzina	Gradska vožnja	15 do 40 km/h
	Izvangradska vožnja	Između 60 km/h i 90 km/h
	Vožnja autocestom	>90 km/h (>100 km/h u trajanju od najmanje 5 minuta)

Tablica 3. Komponente valjane ispitne rute RDE ispitivanja [9]

Za valjano ispitivanje nije dovoljno da se sastoji samo od gore spomenutih pravila ispitne rute već je nužno da su i granične vrijednosti pomoću kojih se karakterizira valjano ispitivanje zadovoljene. U sljedećoj tablici dane su granične vrijednosti za umjerene i proširene uvjete okoline. Umjereni uvjeti okoline definirani su kao normalni uvjeti prihvatljivog RDE ispitivanja. Prošireni uvjeti okoline opisani su kao uvjeti koji i dalje rezultiraju prihvatljivim ispitivanjem, ali sve izračunate emisije štetnih tvari moraju biti podijeljene s vrijednošću 1,6 prije nego je procijenjena njihova sukladnost s graničnim vrijednostima emisija [6].

Korisni teret	$\leq 90\%$ ukupne najveće mase vozila	
Nadmorska visina	Umjereni uvjeti	0 do 700 m
	Prošireni uvjeti	Između 700 i 1300 m
Razlika nadmorske visine		Razlika između nadmorske visine početne i krajnje točke iznosi najviše 100 metara
Razmjerni kumulativni uspon		1200 m na 100 km
Temperatura okoliša	Umjereni uvjeti	0°C to 30°C
	Prošireni uvjeti	Od -7°C do 0°C i 30°C do 35°C
Vrijeme zaustavljanja		Najmanje 6 do 30 % trajanja gradske vožnje
Najveća brzina		145 km/h (160 km/h najviše 3% trajanja vožnje autocestom)
Dinamičke granične vrijednosti	Najveća metrička	95th percentil umnoška $v \cdot a$ (brzina * pozitivno ubrzanje)
	Najmanja metrička	RPA (relativno pozitivno ubrzanje)
Korištenje pomoćnih sustava		Treba koristiti kao i kada se ne vrši ispitivanje

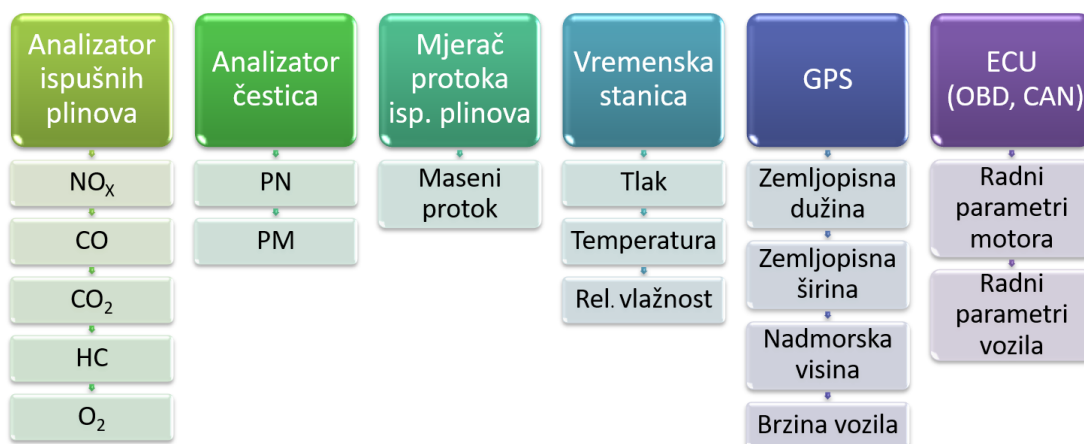
Tablica 4. Granični uvjeti valjanog RDE ispitivanja [9]

3. MJERNA OPREMA ZA ISPITIVANJE EMISIJA U STVARNIM UVJETIMA VOŽNJE (RDE)

3.1. PRIJENOSNI SUSTAV ZA MJERENJE EMISIJA

Prijenosni sustav za mjerenje emisija, odnosno PEMS, pruža mogućnost mjerenja emisija štetnih tvari na cestama, u realnim uvjetima. Kroz Uredbe od 2016. godine pa do danas definirali su se zahtjevi na PEMS po pitanju komponenata od kojih se sastoji, ispitnih parametara, ugradnje na vozilo, uzorkovanja emisija, umjeravanja samog uređaja, postupka ispitivanja PEMS-om te mnogi drugi čimbenici važni za ispravan rad uređaja. Sam uređaj postavlja se na ispitivano vozilo u skladu s preporukama proizvođača te sigurnosnim propisima s ciljem smanjenja izloženosti udarcima, vibracijama, prašini i promjenjivim temperaturama. Gubitak topline mora biti smanjen što je više moguće, a hermetička zatvorenost osigurana. Vrlo je bitno da samo postavljanje PEMS-a ne utječe na prirodu ispušnih plinova.

Pritisak na ispušnoj cijevi ne smije biti nepotrebno povećan uslijed ispitivanja PEMS-om kako ne bi došlo do utjecaja na mjerenja. U tu svrhu preporuča se da poprečni presjek svakog produljenja (npr. povezivanje s mjeračem masenog protoka ispušnih plinova) bude jednak ili veći poprečnom presjeku ispušne cijevi.

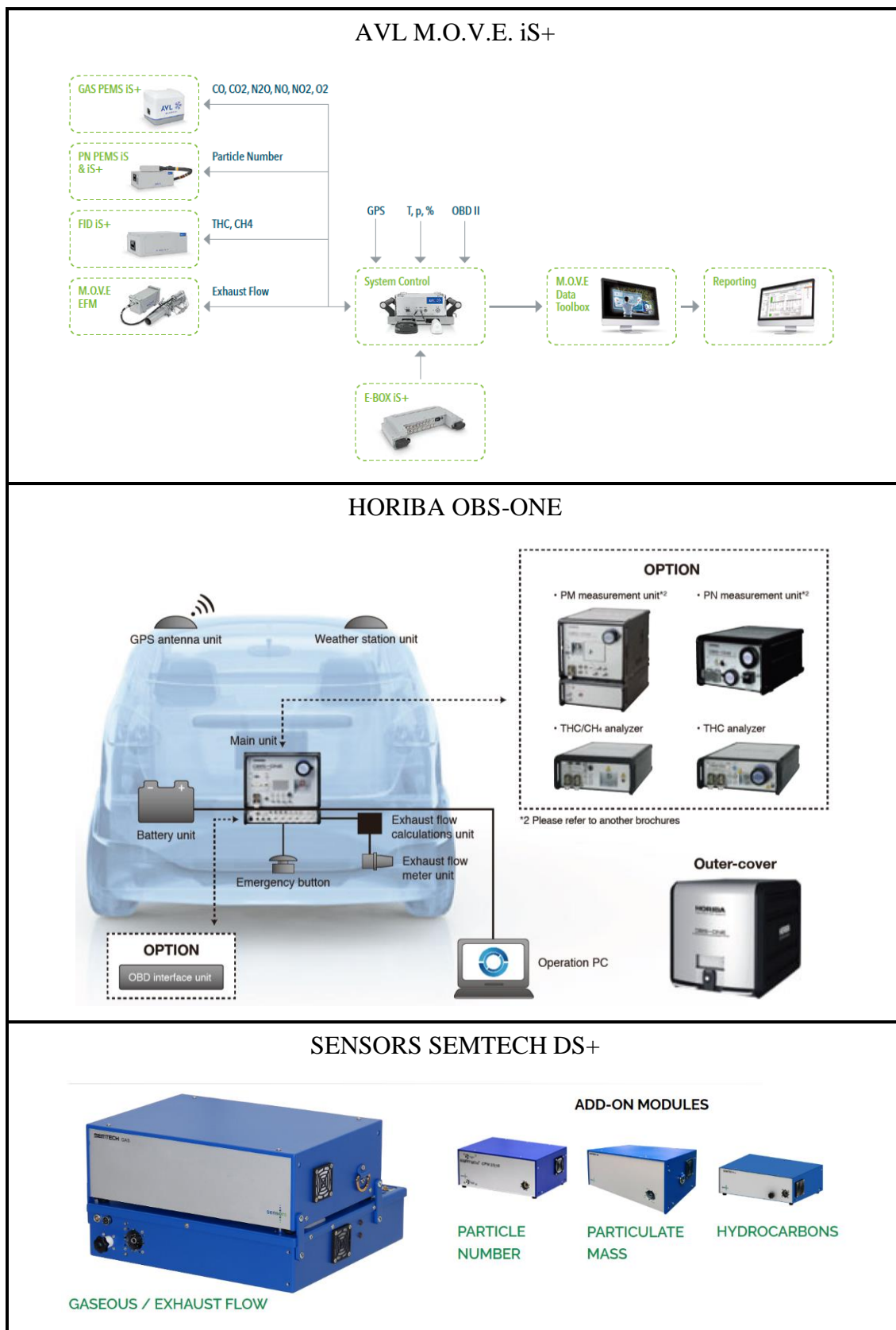


Slika 13. Shema analizatora i mjernih uređaja prijenosnog sustava za mjerenje emisija [10]

3.1.1. Vrste prijenosnih sustava za mjerenje emisija

Najčešće korišteni prijenosni sustavi za mjerenje emisija su oni tvrtke AVL, Horiba i Sensors. Konstrukcija sustava je vrlo slična kod sva tri proizvođača. Postoji bazna (glavna) platforma za mjerenje emisija štetnih tvari na koju se onda mogu nadodati moduli za mjerenje dodatnih parametara kao što su broj krutih čestica (PN), masa krutih čestica (PM), koncentracije ugljikovodika (THC) i metana (CH₄) i sl. Ispod su prikazane

konfiguracije aktualnih prijenosnih sustava navedenih proizvođača te usporedbe analizatora i mjernog raspona za svaki različiti prijenosni sustav.



Slika 14. Konfiguracije prijenosnih sustava tvrtke AVL, Horiba i Sensors [11][12][13]

Tablica 5. Tipovi analizatora i njihovih mjernih raspona prijenosnih sustava različitih proizvođača [11][12][13]

	AVL M.O.V.E. iS+		HORIBA OBS-ONE		SENSORS SEMTECH DS+	
	Tip analizatora	Mjerni raspon	Tip analizatora	Mjerni raspon	Tip analizatora	Mjerni raspon
CO	NDIR	0~5 % vol.	NDIR	0-0.5~10 % vol.	NDIR	0~8 % vol.
CO ₂	NDIR	0~20 % vol.	NDIR	0-5~20 % vol.	NDIR	0~18 % vol.
NO	NDUV	0~5000 ppm	NDUV	0-100~3000 ppm	CLA	0~3000 ppm
NO ₂	NDUV	0~2500 ppm	NDUV	0-100~3000 ppm	CLA	0~1000 ppm
THC	FID	0~30000 ppmC1	FID	0-100~10 000 ppmC	FID	0~30000 ppmC1
CH ₄	FID	0~10000 ppmC1	FID	0-100~10 000 ppmC	FID	0~10000 ppmC1 0~1000 ppmC1 0~100 ppmC1

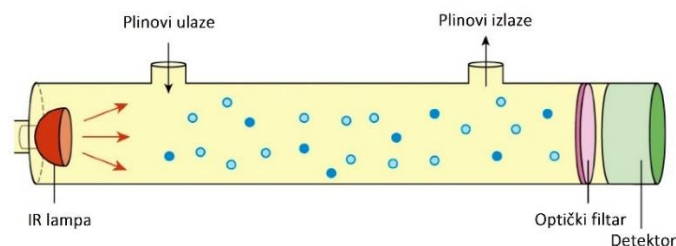
3.1.2. Analizatori i mjerni uređaji

Kako bi prijenosni sustav za mjerenje emisija mogao mjeriti sve komponente koje su zahtijevane od strane Europske Komisije u sklopu samog sustava ili uz pomoć ECU vozila moraju postojati određeni analizatori, senzori te navigacijski sustav. U nastavku su navedene obavezne komponente PEMS-a.

3.1.2.1. Analizator za određivanje koncentracije onečišćujućih tvari u ispušnim plinovima – NO_x, CO, CO₂

Uredbom je propisano da analizatori za CO i CO₂ moraju biti nedisperzivnog infracrvenog apsorpcijskog tipa (NDIR). NDIR je analizator koji je vrlo osjetljiv na vanjske utjecaje poput vibracija i vremenskih uvjeta, ali je u mjerenju točan i pouzdan (mogućnost mjerenja plinova u vrlo malim koncentracijama). Određivanje CO₂ se zasniva na apsorpciji plinova zračenja na poznatoj valnoj duljini. Tako će intenzitet svjetlosti koji analizator dobiva biti proporcionalan broju CO i CO₂ molekula u komori analizatora [14]. Kako je prikazano na idućoj slici, plinovi ulaze u komoru analizatora i kreću se prema optičkom filteru koji se nalazi ispred detektora infracrvene svjetlosti te on mjeri koliko infracrvene svjetlosti prolazi kroz filter. Kako infracrvena svjetlost prolazi kroz plinove molekule CO₂ apsorbiraju infracrvenu svjetlost na određenoj valnoj duljini, a svu ostalu propuštaju. Preostalu svjetlost apsorbira optički filter. Na kraju detektor očitava preostalu količinu svjetlosti koja nije apsorbirana ni filtrom ni molekulama CO₂. Koncentracija CO₂ proporcionalna je razlici između količine svjetlosti koju projicira infracrvena lampa

i količine svjetlosti koja dolazi na detektor, odnosno količini svjetlosti koju apsorbiraju molekule CO₂ u komori analizatora.

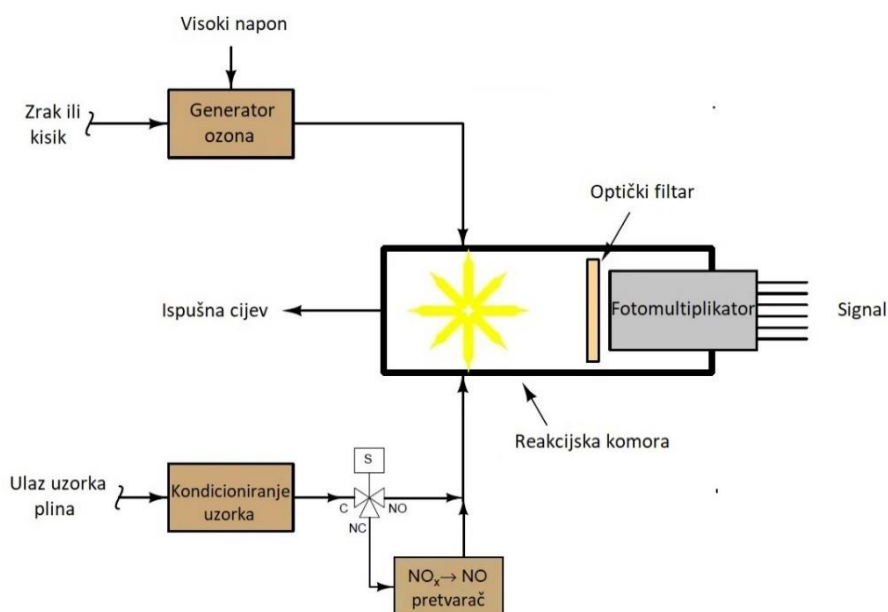


Slika 15. Ilustracija analizatora nedisperzivnog infracrvenog apsorpcijskog (NDIR) tipa [14]

Za analizu dušikovog oksida analizator mora imati kemiluminiscentnu (CLA) ili ne-disperzivnu UV apsorpciju rezonancije (UV). Kemiluminiscentne reakcije koriste se u svrhu mjerenja koncentracija kao što je NO. Naime, kontakt NO-a i ozona rezultira sa spontanom kemijskom reakcijom koja proizvodi kemiluminiscenciju. Jednadžba jedne ovakve reakcije prikazana je niže:



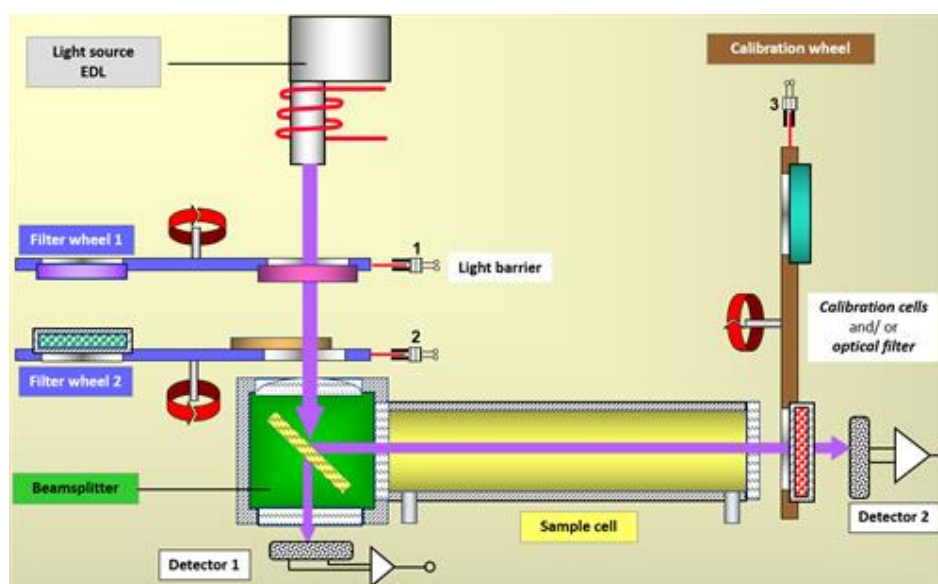
Iako samo mali dio molekula NO₂ emitira svjetlost, proces je dovoljno predvidljiv za korištenje prilikom mjerenja koncentracija NO-a. Također, ozon se vrlo lako dobiva izlaganjem zraka ili kisika visokonaponskom električnom pražnjenju. Primjer jednog takvog analizatora prikazan je na Slici 16.



Slika 16. Primjer kemiluminiscentnog NO analizatora [15]

Fotomultiplikator služi kao senzor svjetlosti koji proizvodi električni signal proporcionalan količini svjetla u reakcijskoj komori (što je veća koncentracija molekula NO u uzorku plina to se više svjetlosti emitira u komori, a time je i jači signal). Ovakav analizator dobar je u slučaju NO-a, no ne daje dobre rezultate prilikom mjerenja ostalih NO_x molekula pa se u analizator dodaje modul (pretvarač) koji pretvara sve ostale vrste NO_x-a (npr. NO₂, NO₃) u NO. To se izvodi podizanjem temperature uzorka plina na oko 700 °C pri kojoj se oslobađa kisik iz NO₂ i NO₃ molekula i nastaje NO.

Analizator dušikovih oksida koji radi na principu ne-disperzivne UV apsorpcije rezonancije (NDUV) koristi se za analizu NO i NO₂. Postupak se izvodi tako da se plin vodi kroz kivetu u kojoj se optički filtar i izvor UV svjetlosti nalaze na jednom kraju a detektor na drugom. Izvor UV svjetlosti šalje svjetlost valne duljine određene preko optičkog filtra ugrađenog između izvora i kivete, a ona opet ovisi o vrsti plina koji se mjeri. Količina apsorbirane svjetlosti ukazuje na koncentraciju molekula mjerene tvari. Količina svjetlosti koja prolazi kroz plin mjeri se detektorom.



Slika 17. Princip rada NDUV analizatora [16]

3.1.2.2. Analizator za mjerenje broja krutih čestica – PN

Analizator broja krutih čestica sastoji se od jedinice za pretkondicioniranje i detektora čestica s učinkovitošću broja od 50% za veličine čestica od 23 μm. Jedinica za pretkondicioniranje služi za osiguravanje da u uzorku koji ulazi u analizator nema vlage i čestica koje mogu ometi proces mjerenja broja emisijskih čestica i utjecati na točnost rezultata. Također, ova jedinica pomaže u stabilizaciji brzine i

Tablica 6. Zahtjevi za učinkovitost sustava analizatora PN-a (uključujući vod za uzorkovanje) [6]

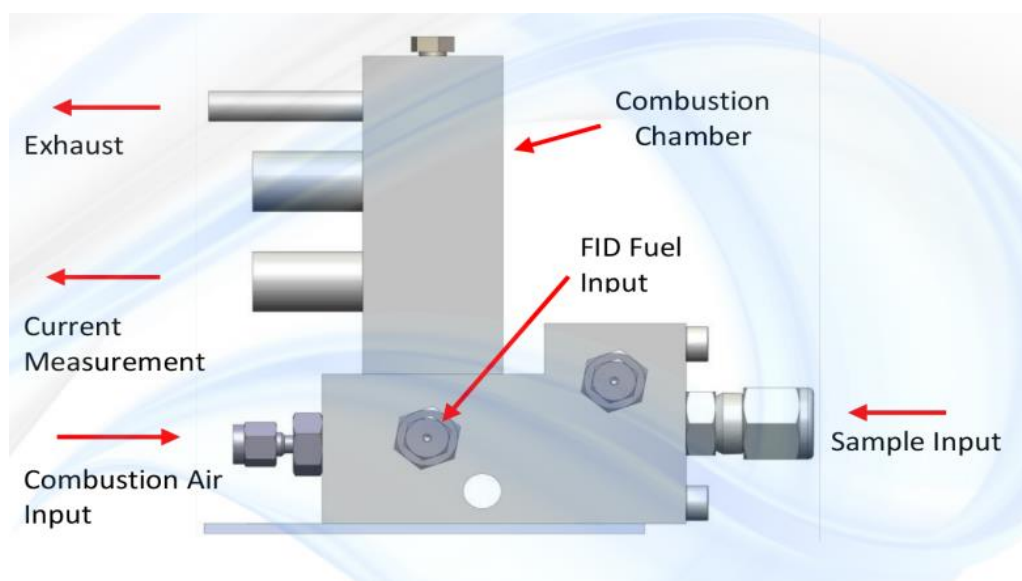
d_p (nm)	manje od 23	23	30	50	70	100	200
$E(d_p)$ analizatora PN-a	potrebno je utvrditi	0,2-0,6	0,3-1,2	0,6-1,3	0,7-1,3	0,7-1,3	0,5-2,0

3.1.2.3. *Analizator za određivanje koncentracije onečišćujućih tvari u ispušnim plinovima – ukupni ugljikovodici (THC), metan (CH_4)*

Analiza ugljikovodika (HC), ukoliko se radi o dizelskom gorivu, provodi se pomoću grijanog plameno-ionizacijskog detektora s ventilima i cjevovodima na temperaturi od $190^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ kako bi se izbjegla kondenzacija. Kada je u pitanju bilo koja druga vrsta goriva, zahtijevani analizator je plameno-ionizacijski detektor (FID). Oba analizatora moraju biti kalibrirana propan plinom izraženim kao ekvivalent atoma ugljika (C_1).

Ako se radi o analizi metana (CH_4), radi se o plameno-ionizacijskom detektoru u kombinaciji ili s plinskim kromatografom ili s odvajačem nemetana (NMC-FID). Pravila kalibracije za analizu ugljikovodika vrijedi i za metan.

Postupak mjerenja započinje zagrijavanjem komore analizatora na 191°C i pri toj temperaturi se plamen automatski zapali. Tada se otvara ventil koji omogućuje ulaz goriva i zraka u komoru koji se onda pomoću startera (upaljača) zapaljuju. Gorivo, zrak i uzorak ispušnih plinova, koji ulazi preko priključka za uzorak u komoru, miješaju se prije plamena i izgaraju na njegovom vrhu. Kako ugljikovodici gore, formiraju se pozitivno nabijeni ioni koje odbija pozitivno nabijena elektroda blizu mlaznice mješavine ispušnih plinova, goriva i zraka, a privlači ih negativno nabijena elektroda (kolektorska pločica) koja se nalazi na vrhu plamena što stvara struju koja se onda mjeri [13]. Količina proizvedene struje mjeri se elektrometrom, a signal od njega preko pojačivača signala onda odlazi u upravljački uređaj.



Slika 19. Plameno-ionizacijski detektor (FID)[13]

3.1.2.4. Instrument za mjerenje ili određivanje masenog protoka ispušnih plinova - EFM

Ovaj senzor mora biti izdržljiv i osigurati točnost mjerenja u vrlo dinamičnim i promjenjivim uvjetima RDE ispitivanja. Sama instalacija na ispušnu cijev vozila mora biti jednostavna, sigurna i brza. Jedna od metoda jest da se izravno mjeri maseni protok ispušnih plinova metodom razlike tlakova kojom se mjeri pad tlaka zbog prolaska fluida kroz suženje mjerila. Ova metoda ne zahtjeva dodatne pokretne dijelove koji su podložni trošenju te se isto mjerilo može koristiti za mjerenje masenog protoka različitih fluida pa je upravo zbog toga i najčešće korištena metoda. Jedini nedostatak vidljiv je prilikom prolaska krutih čestica kroz filter jer može doći do začepjenja mjerila ukoliko se radi o česticama promjera većeg od 20-30 μm .

Na konkretnom primjeru mjerila masenog protoka tvrtke AVL prikazani su dijelovi ovog podsustava. On se sastoji od cijevi mjerila masenog protoka ispušnih plinova koja se spaja na ispušnu cijev vozila i upravljačke kutije mjerila masenog protoka u kojoj se nalazi elektronika i pretvarač tlaka (uređaj koji pretvara mjerenje tlaka u signal). Rad upravljačkog sustava je temperaturno uvjetovan kako bi se postigla što veća točnost prilikom mjerenja u promjenjivim uvjetima okoline.



Slika 20. Mjerilo masenog protoka ispušnih plinova tvrtke AVL [17]

3.1.2.5. Globalni navigacijski sustav

Sustav, odnosno antena, mora biti ugrađen na najviši mogući položaj zbog prijema dobrog signala te najmanje moguće utjecati na upravljanje vozilom. Njime se utvrđuje, između ostalog, brzina vozila tijekom ispitivanja, zemljopisna dužina i širina te nadmorska visina. Urednom 2017/1151 propisano je kako se brzina vozila određuje jednim ili na više načina. Ukoliko se brzina vozila utvrđuje GPS-om, ukupna prijeđena udaljenost provjerava se u odnosu na referentna mjerenja dobivena iz senzora, validiranog ECU-a ili iz digitalne cestovne mreže. Ukoliko ispravljani podaci ne prelaze neprekinuto vremensko razdoblje od 120 sekundi ili sveukupno 300 sekundi i ukupna prijeđena udaljenost prema izračunu iz ispravljenih podataka GPS-a ne odstupa više od 4 % od referentne vrijednosti, rezultati ispitivanja se prihvaćaju. Upotrebom ECU-a za utvrđivanje brzine vozila valjanost ukupne prijeđene udaljenosti validira se pomoću vrijednosti u Tablici 8. (Alternativno se ukupna prijeđena udaljenost vožnje uspoređuje s referentnom udaljenošću dobivenom iz digitalne cestovne mreže). Ni u slučaju ECU. a ukupna prijeđena udaljenost ne smijem odstupati više od 4 % od referentne vrijednosti.

3.1.2.6. Senzori i drugi uređaji koji nisu dio vozila

Različiti pomoćni senzori i uređaji poput senzora za brzinu vozila, temperaturu, termoparova rashladnog sredstva i drugi moraju biti ugrađeni na reprezentativan, pouzdan i točan način, a da pritom ne ometaju rad vozila ili druge senzore ili uređaje u vozilu.

3.1.2.7. Izvor energije

Izvor energije za napajanje PEMS-a mora biti neovisan o vozilu. Iznimno je dopušteno da se iz akumulatora vozila napajaju sigurnosna osvjetljenja sklopova i ugradbenih komponenata PEMS-a izvan kabine vozila [6].

Ispitni parametri, odnosno koncentracije plinova koje se mjere, mjere se s učestalošću od najmanje 1,0 Hz ili više (čak i ako se mjerenja dobivaju s ECU vozila). Preporučene mjerne jedinica ispitnih parametara te izvori pomoću kojih se dobivaju prikazani su u sljedećoj tablici.

Tablica 7. Ispitni parametri [6]

Parametar	Preporučena mjerna jedinica	Izvor
Koncentracija THC-a	ppm	analizator
Koncentracija CH ₄	ppm	analizator
Koncentracija NMHC-a	ppm	analizator
Koncentracija CO	ppm	analizator
Koncentracija CO ₂	ppm	analizator
Koncentracija NO _x	ppm	analizator
Koncentracija krutih čestica	#/m ³	analizator
Maseni protok ispušnih plinova	kg/s	EFM, metode opisane u točki 7. Dodatka 2.
Vlažnost zraka	%	senzor
Temperatura okoline	K	senzor
Tlak okoline	kPa	senzor
Brzina vozila	km/h	senzor, GPS iii ECU
Zemljopisna širina položaj vozila	stupanj	GPS
Zemljopisna dužina položaja vozila	stupanj	GPS
Nadmorska visina položaja vozila	M	GPS ili senzor
Temperatura ispušnih plinova	K	senzor
Temperatura rashladne tekućine motora	K	senzor iii ECU
Brzina motora	o/min	senzor ili ECU
Zakretni moment motora	Nm	senzor ili ECU
Zakretni moment na pogonskoj osovini	Nm	mjerilo zakretnog momenta naplatka
Položaj papučice	%	senzor iii ECU
Protok goriva motora	g/s	senzor ili ECU
Protok ulaznog zraka motora	g/s	senzor ili ECU
Status pogreške	-	ECU
Temperatura toka ulaznog zraka	K	senzor iii ECU
Status regeneracije	-	ECU
Temperatura ulja motora	K	senzor ili ECU
Stvarni stupanj prijenosa	#	ECU
Željeni stupanj prijenosa (npr. indikator stupnja prijenosa)	#	ECU
Ostali podaci o vozilu	neodređeno	ECU

Kao što je i navedeno u Tablici 7., ispitni parametri vozila i motora mogu se dobivati pomoću naprave za bilježenje podataka povezane na ECU, u skladu s propisanim normama.

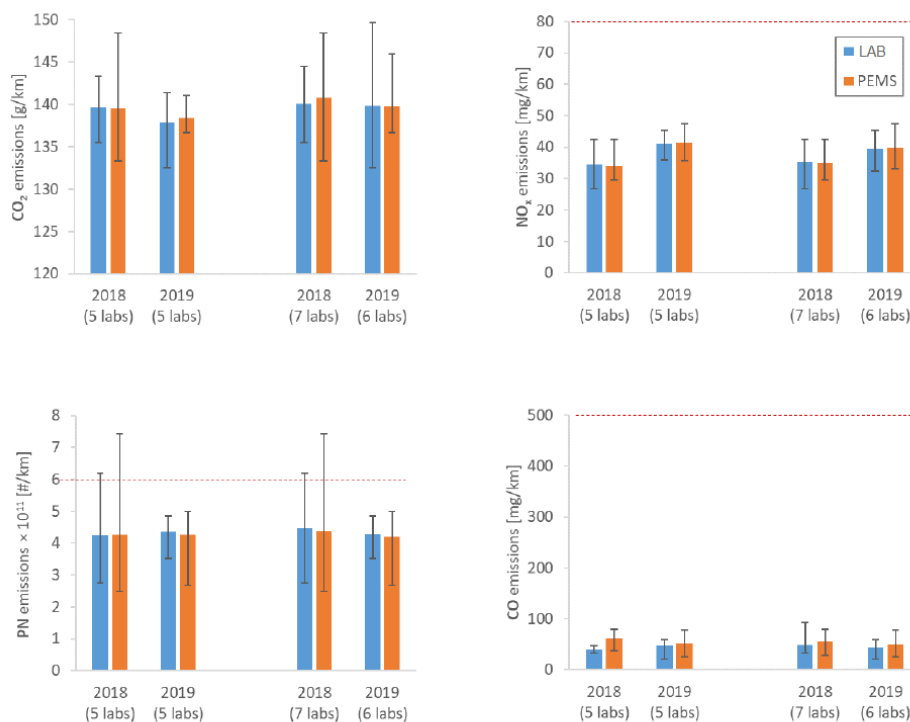
Samo uzorkovanje emisija mora se provoditi na mjestima dobro izmiješanih ispušnih plinova gdje je utjecaj zraka iz okoline najmanji moguć. Preporuka je uzorkovati emisije ispod mjerača masenog protoka ispušnih plinova, udaljeno 150 mm od samog senzora protoka. Sonde za uzorkovanje postavljaju se na određenoj udaljenosti iznad točke na kojoj ispuh napušta opremu za uzorkovanje PEMS i odlazi u okoliš. Ukoliko je motor opremljen sustavom za naknadnu obradu ispušnih plinova, uzorak se uzima nakon analizatora. U slučaju mjerenja čestica, ispuh je uzrokovan iz središta struje samih ispušnih plinova.

3.1.3. Mjerna nesigurnost PEMS-a

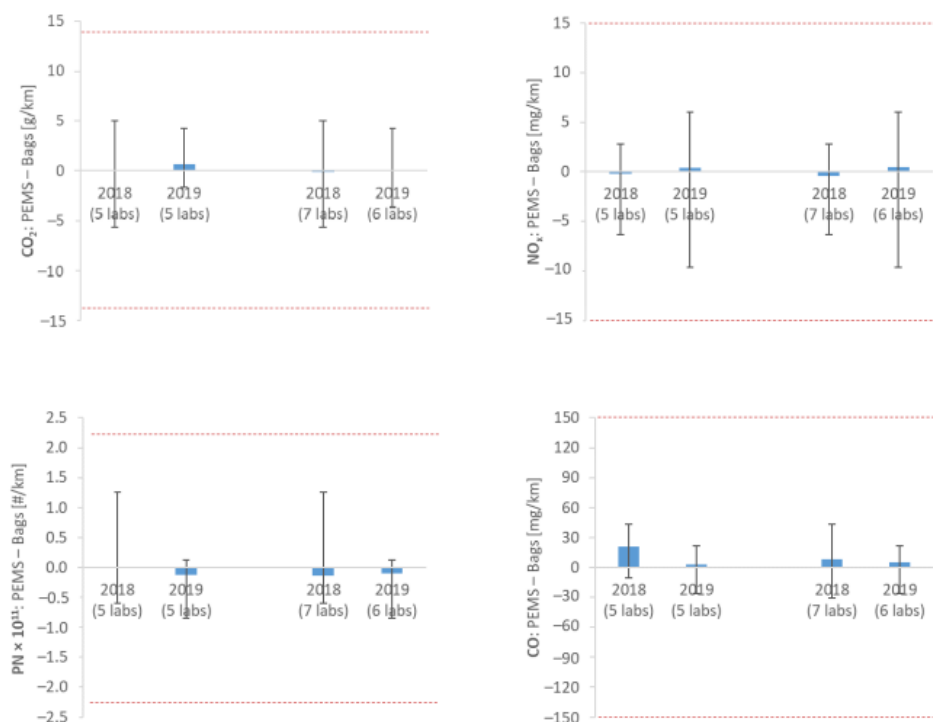
Obzirom da je PEMS relativno novi sustav kojim se utvrđuju emisije štetnih tvari u stvarnim uvjetima vožnje kroz uredbe se nastojalo što bolje definirati faktor sukladnosti kojim se regulira nedostatak mjerne nesigurnosti. On je kroz godine smanjivan u skladu s poboljšanjem tehnologija i točnosti mjerenja ovakve prijenosne tehnologije. Tome su pridonijela i različita istraživanja točnosti samog sustava, a jedno od novijih potvrđuje iznimnu točnost mjerenja PEMS-om u usporedbi s laboratorijskim ispitivanjima emisija štetnih tvari [18].

Naime, na referentnom vozilu uspoređena su mjerenja emisija štetnih tvari u više laboratorija koji su ispitivanje izvršili i laboratorijskom opremom (emisije štetnih tvari utvrđene iz vreće u kojoj se prikupljaju razrijeđeni ispušni plinovi iz tunela za razrjeđivanje) i prijenosnim uređajem za mjerenje emisija štetnih tvari. Ispitivanja su rađena 2018. i 2019. godine u 7 laboratorija, s tim da je 5 laboratorija bilo isto obje godine što je i naznačeno u grafičkom prikazu. Na Slici 21. su prikazani dobiveni rezultati mjerenja, a u skladu s tadašnjim faktorima sukladnosti i dopuštenim apsolutnim odstupanjima analizirana su odstupanja iz mjerenja objema metodama na Slici 22.

Istraživanje provedeno od strane Europske komisije 2020. godine razmatralo je mjernu nesigurnost na više prijenosnih sustava za mjerenje emisija štetnih tvari od tri najzastupljenija proizvođača – AVL, Horiba i Sensors [19]. Prvo su provedeni postupci validacije instrumenata u svrhu razmatranja smanjivanja graničnih vrijednosti dopuštenih odstupanja. Ovime je utvrđeno da su pomaci instrumenata (senzori za emisije NO_x i CO) s nulte točke unutar već definiranih uskih granica (5 ppm za NO_x i 75 ppm za CO), ili gotovo bez odstupanja (NO_x mjerenja). Postupak validacije ukazao je na poboljšanje u održavanju i/ili procedurama laboratorija u usporedbi s početnim periodom korištenja PEMS-a. Provjerom netočnosti mjerenja instrumenta za mjerenje masenog protoka ispušnih plinova zaključeno je da je očekivana pogreška u mjerenju uz današnje tehničke zahtjeve 3-8 % za



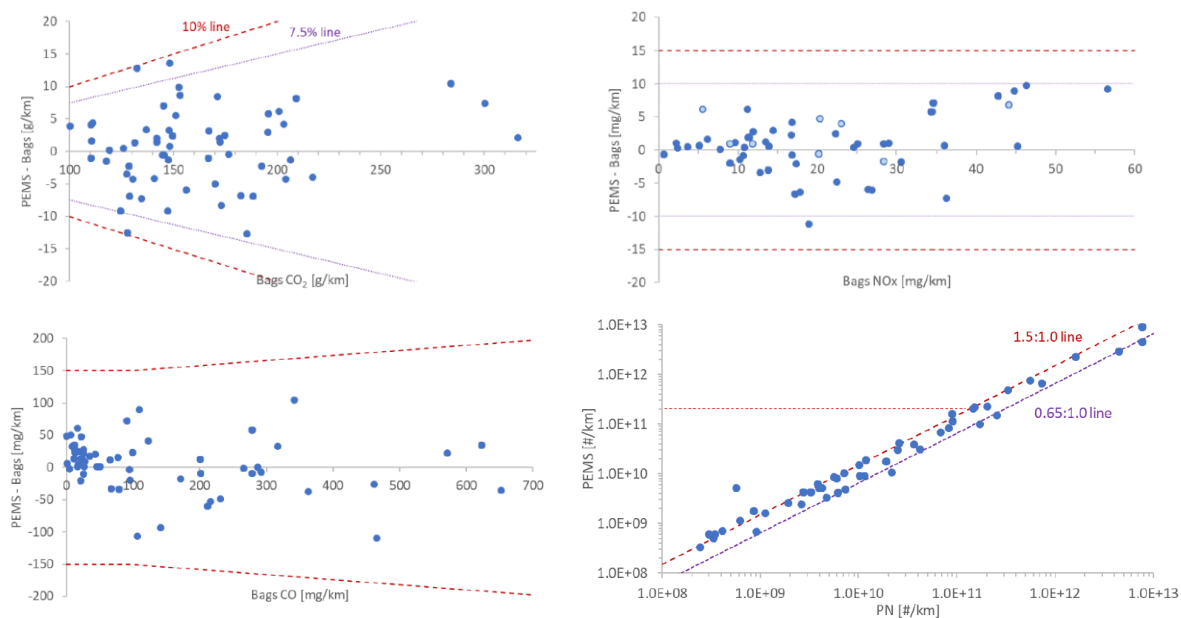
Slika 21. Emisije štetnih tvari vozila izmjerene laboratorijskom opremom (plavi stupac) i prijenosnim sustavom za mjerenje emisija štetnih tvari (narančasti stupac) kroz dvije uzastopne godine [18]



Slika 22. Odstupanja mjerenja obavljenih PEMS-om i laboratorijskom opremom. Crne linije označavaju min. i max. vrijednosti, a crvenima su određena dopuštena odstupanja. [18]

RDE ispitivanje. Također, predviđeno je da će se, s poboljšanjem tehničkih specifikacija samog instrumenta, mjerna nesigurnost smanjiti na 2-5 %. U slučaju mjerenja CO₂ mjerna

odstupanja između mjerenja PEMS-om i laboratorijskom opremom nisu premašivala 5 % za vrijednosti iznad 155 g/km. Kod manjih vrijednosti, u većini slučajeva radilo se o odstupanju rezultata do 7,5 % (današnja dopuštena vrijednost je 10 % [6]). Na idućoj slici prikazani su rezultati validacijskog ispitivanja gdje su crvenom linijom označena dopuštena apsolutna odstupanja svakog ispitnog parametra.



Slika 23. Prikaz validacije ispitivanja za CO₂ (gore lijevo), NO_x (gore desno), CO (dolje lijevo) i PN (dolje desno) [19]

Iz priloženog se zaključuje kako je dosadašnje dopušteno odstupanje od 15 mg/km za NO_x moguće smanjiti na 10 mg/km što je i preporuka istraživanja kao i graničnu vrijednost validacijskog ispitivanja CO₂ s 10 % ili 10 g/km, ovisno što je veće, na 7,5 % ili 10 g/km, ovisno što je veće [6][19].

Nadalje, istraživanje je pokazalo kako je moguće i smanjenje dopuštene tolerancije u izrazu za faktor sukladnosti *CF* za broj čestica (PN) sa dosadašnjih 0,5 na 0,34. Ovo je rezultat točnijeg izračuna samog broja čestica te uzimanja u obzir nesigurnosti kalibracije PEMS-a, nesigurnosti uzrokovane veličinom (odnosno smanjenje efikasnosti pri vrlo malim veličinama i povećanja efikasnosti na većima) te nesigurnosti ograničenja (vanjski uvjeti, npr. temperatura, tlak, vlažnost, vibracije) koje mogu imati utjecaj na sami senzor. Ovo se odnosi na čestice veličine do 23 nm. Problematika mjerenja manjih čestica od spomenutih, do veličine od 10 nm također je predmet istraživanja [20]. Kako se radi o česticama veličine 10 -23 nm, veće su nesigurnosti sustava pri mjerenju takvih čestica (2-8 %). Gubici čestica su nešto veći u ovom slučaju, a i nesigurnost po pitanju veličine čestica. U manjem udjelu povećanju ukupne

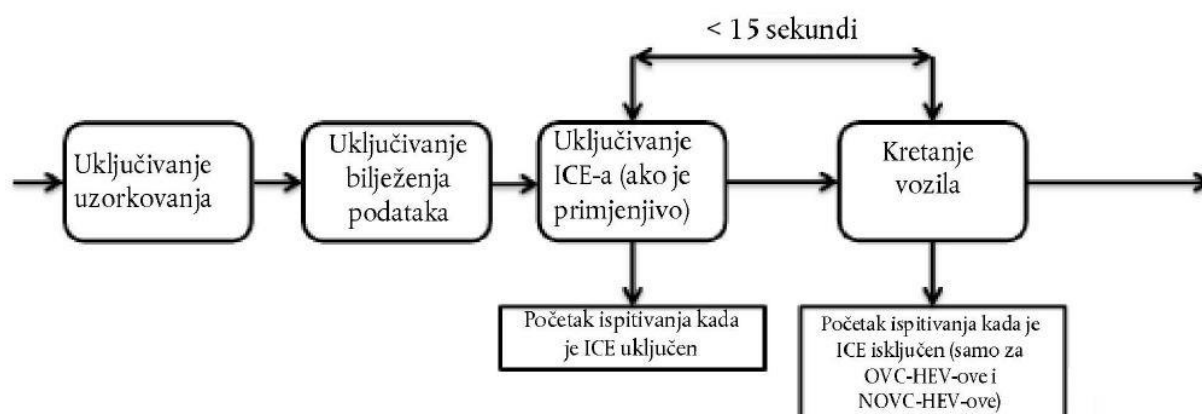
nesigurnosti kod čestica veličine do 10 nm pridonose i stroži tehnički zahtjevi na ovakve sustave.

Kako bi se vremenom smanjile mjerne nesigurnosti prijenosnih sustava za mjerenje emisija štetnih tvari važan je konstantan rad na procedurama i kontinuirano revidiranje postojećih graničnih vrijednosti u skladu s napretkom tehnologije i metoda.

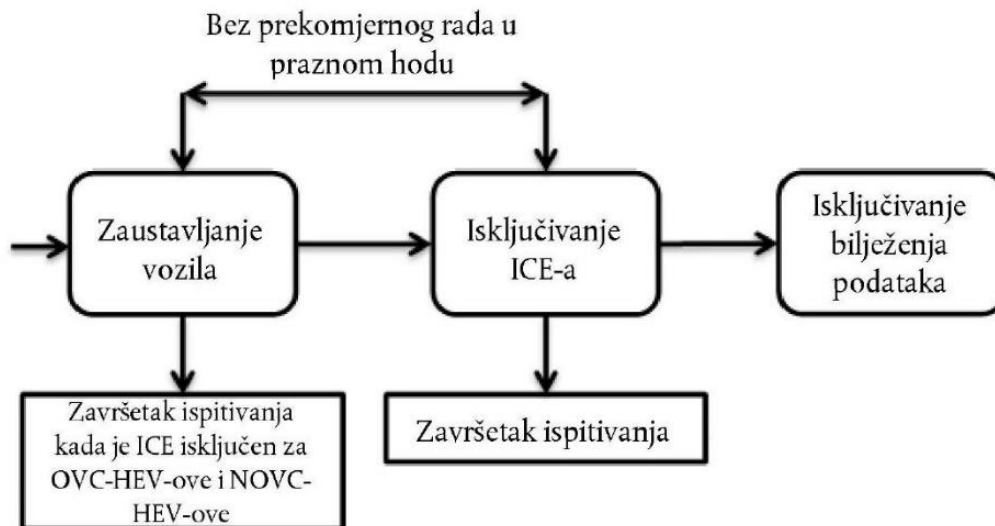
3.2. POSTUPAK ISPITIVANJA

Prije ispitivanja obavezna je provjera nepropusnosti PEMS-a, a zatim se on pokreće i stabilizira sve dok ne dostigne radni tlak, temperaturu i protok. Sustav za uzorkovanje koji se sastoji od sonde za uzorkovanje, linije uzorkovanja i analizatora također se provjerava na čistoću i odsutstvo vlage. Na sličan ili isti način provjeravaju se i ostali analizatori i mjerači sustava.

Neposredno prije pokretanja motora utvrđuje se zapisuje li naprava za bilježenje podataka sve zadane ispitne parametre. Tijekom samog ispitivanja ne smije doći do većih prekida u mjerenju i bilježenju podataka (najviše 1% ukupnog trajanja vožnje, ali u intervalu ne duljem od 30 sekundi). Zaustavljanjem i isključivanjem motora označava se kraj ispitivanja, uz napomenu da je pretjeran rad u praznom hodu motora nepoželjan. Na idućim slikama prikazani su shematski prikazi tjeka početka i kraja ispitivanja gdje su oni definirani za MSUI vozila i hibridna električna vozila s/bez punjenja iz vanjskog izvora. Oznaka NOVC-HEV odnosi se na hibridna električna vozila bez punjenja iz vanjskog izvora, a oznaka OVC-HEV na hibridna električna vozila s punjenjem iz vanjskog izvora.



Slika 24. Tijek početka ispitivanja [3]



Slika 25. Tijek kraja ispitivanja [6]

Također, prije ili poslije ispitivanja potrebno je izvršiti postupak validacije funkcionalnosti PEMS-a. On se vrši na dinamometru s valjcima u skladu s uvjetima homologacije, a validacijsko ispitivanje vrši se prema ispitnom ciklusu za laka vozila (WLTC). Nakon validacije analiziraju se ukupne emisije onečišćujućih tvari dobivene laboratorijskom opremom u gramima po kilometru [g/km] i one dobivene PEMS-om (zbraja se ukupna masa emisija štetnih tvari [g] i dijeli s prijednom udaljenosti [km] prema podacima s dinamometra). Ove vrijednosti se tada uspoređuju s definiranim vrijednostima dopuštenih odstupanja (Tablica 8.). Ukoliko jedna vrijednost dopuštenog odstupanja nije zadovoljena propisuju se korektivne mjere, a postupak validacije izvodi se ponovno.

Parametar (jedinica)	Dopušteno apsolutno odstupanje
Udaljenost (km)	250 m u odnosu na referentnu laboratorijsku vrijednost
THC (mg/km)	15 mg/km ili 15 % u odnosu na referentnu laboratorijsku vrijednost, ovisno što je veće
CH ₄ (mg/km)	15 mg/km ili 15 % u odnosu na referentnu laboratorijsku vrijednost, ovisno što je veće
NMHC (mg/km)	20 mg/km ili 20 % u odnosu na referentnu laboratorijsku vrijednost, ovisno što je veće
PN (#/km)	$1 \cdot 10^{11}$ p/km ili 50 % u odnosu na referentnu laboratorijsku vrijednost, ovisno što je veće
CO (mg/km)	150 mg/km ili 15 % u odnosu na referentnu laboratorijsku vrijednost, ovisno što je veće
CO ₂ (g/km)	10 g/km ili 10 % u odnosu na referentnu laboratorijsku vrijednost, ovisno što je veće
NO _x (mg/km)	15 mg/km ili 15 % u odnosu na referentnu laboratorijsku vrijednost, ovisno što je veće

Tablica 8. Dopuštena odstupanja [6]

4. IZRAČUN EMISIJA ŠTETNIH TVARI

4.1. UTVRĐIVANJE EMISIJA

Nakon provedenog mjerenja ukupnih emisija potrebno je utvrditi trenutačne emisije štetnih tvari koje se tek onda koriste u formulama za izračun emisija.

Svi podaci prikupljeni prilikom mjerenja o vozilu, maseni protok i koncentracija ispušnih plinova i čestica ispravljaju se po vremenu. Ovo je potrebno zbog osnovnih karakteristika PEMS-a gdje su moguća odstupanja signala analizatora ili kašnjenja signala koji utječu na točnost mjerenja i njegovu ispravnost. Pomaci odziva analizatora rezultiraju netočnim podacima i zato je potrebno umjeravanje analizatora. Kašnjenja su rezultat vremena potrebnog da se od uzorkovanja plina dođe do odziva koji iznosi 10% konačnog očitavanja (vrijeme koje je potrebno da mjerenje bude zabilježeno PEMS-om). Za ispravljanje po vremenu određeni su korekcijski faktori za dodatno laboratorijsko ispitivanje PEMS-om.

Za korekciju koncentracija komponentni po vremenu koristi se sljedeći izraz:

$$c_{i,c}(t - \Delta t_{t,i}) = c_{i,r}(t) \quad (4)$$

gdje je:

$c_{i,c}$ - koncentracija komponente i , ispravljena po vremenu kao funkcija vremena t ,

$c_{i,r}$ - nerazrijeđena koncentracija komponente i kao funkcija vremena t ,

$\Delta t_{t,i}$ - vrijeme transformacije t analizatora kojim se mjeri komponenta i .

Korekcija masenog protoka ispušnih plinova po vremenu provodi se sličnom metodom:

$$q_{m,c}(t - \Delta t_{t,m}) = q_{m,r}(t) \quad (5)$$

gdje je:

$q_{m,c}$ - maseni protok ispušnih plinova, ispravljen po vremenu, kao funkcija vremena t ,

$q_{m,r}$ - nerazrijeđeni maseni protok ispušnih plinova kao funkcija vremena t ,

$\Delta t_{t,m}$ - vrijeme pretvorbe t mjerača masenog protoka ispušnih plinova.

Svi ostali izmjereni podaci, kao i podaci o brzini te usklađivanje brzine s masenim protokom ispušnih plinova, dobiveni iz senzora ili ECU-a usklađuju se unakrsnim koreliranjem ili s podacima o emisijama ili međusobno s istim podacima iz više izvora.

U posebnim slučajevima mjerenja emisija, kao što su hladni start i zaustavljanje motora, određena su pravila mjerenja:

- 1) Hladni start definiran je kao prvih 5 minuta nakon prvog pokretanja MSUI-a, odnosno to je period u kojem rashladno sredstvo dostigne temperaturu od 70°C (najviše do 5 minuta nakon pokretanja motora). Emisije tijekom ovog perioda također se analiziraju.
- 2) Analiziraju se i sve emisije, odnosno mjeri protok, dok je MSUI deaktiviran, a zabilježene vrijednosti se prilikom obrade podataka postavljaju na nulu. Deaktiviran motor mora zadovoljiti barem dva od navedenih uvjeta:
 - a. Brzina motora je manja od 50 o/min
 - b. Maseni protok ispušnih plinova iznosi manje od 3 kg/h
 - c. Maseni protok ispušnih plinova manji je od 15% stacionarnog masenog protoka istih u praznom hodu.

Korekcija iz suhih u vlažne uvjete provodi se zbog ispravljanja utjecaja vlage u ispušnoj cijevi koja utječe na mjerenja, pogotovo u slučaju dušikovih oksida i emisijskih čestica. Koncentracije se iz suhih u one na vlažnoj osnovi pretvaraju pomoću formule:

$$c_{wet} = k_w \times c_{dry} \quad (6)$$

gdje je:

c_{wet} - vlažna koncentracija onečišćujuće tvari u ppm ili postotku volumena,

c_{dry} - suha koncentracija onečišćujuće tvari u ppm ili postotku volumena,

k_w - korekcijski faktor suho-vlažno.

Korekcijski faktor k_w izračunava se na sljedeći način:

$$k_w = \left(\frac{1}{1 + \alpha \times 0,005 \times (c_{CO_2} + c_{CO})} - k_{w1} \right) \times 1,008 \quad (7)$$

pri čemu je:

$$k_{w1} = \frac{1,608 \times H_a}{1000 + (1,608 \times H_a)} \quad (8)$$

gdje je:

H_a - vlažnost ulaznog zraka [g vode na kg suhog zraka],

c_{CO_2} - suha koncentracija CO₂ [%],

c_{CO} - suha koncentracija CO [%],

α - molarni omjer vodika.

4.1.1. Koncentracija nemetanskih ugljikovodika (NMHC) i metana (CH₄)

Zavisno od metode kojom se izračunavaju koncentracije razlikuju se izrazi, a preporučeno je umjeravanje metana FID-a metanom/zrakom kroz ne-metanski separator (NMC). U ovom slučaju koncentracije NMHC-a i CH₄ izražavaju se sljedećim formulama:

$$c_{CH_4} = \frac{c_{HC(w/NMC)} \times r_h \times (1 - E_M) - c_{HC(w/NMC)} \times (1 - E_E)}{r_h \times (E_E - E_M)} \quad (9)$$

$$c_{NMHC} = \frac{c_{HC(w/oNMC)} \times (1 - E_M) - c_{HC(w/NMC)} \times r_h \times (1 - E_M)}{(E_E - E_M)} \quad (10)$$

gdje je:

$c_{HC(w/oNMC)}$ - koncentracija HC-a, a CH₄ ili C₂H₆ zaobilazi NMC [ppmC₁],

$c_{HC(w/NMC)}$ - koncentracija HC-a, a CH₄ ili C₂H₆ prolazi kroz NMC [ppmC₁],

r_h - odzivni faktor ugljikovodika,

E_M - učinkovitost metana,

E_E - učinkovitost etana.

U slučaju umjeravanja metana FID-a metanom/zrakom kroz NMC učinkovitost pretvorbe metana E_M iznosi nula.

4.1.2. Izračun masenog protoka ispušnih plinova

Ukoliko se maseni protok ispušnih plinova ne određuje metodom navedenom u 3.1.1.4 ili nekom drugom dopuštenom metodom, on se može izračunati jednom od sljedećih metoda.

4.1.2.1. Metoda izračuna pomoću masenog protoka zraka i goriva

Ovom metodom protok se računa na sljedeći način:

$$q_{mew,i} = q_{maw,i} + q_{mf,i} \quad (11)$$

gdje je:

$q_{mew,i}$ - trenutačni maseni protok ispušnih plinova [kg/s],

$q_{maw,i}$ - trenutačni maseni protok ulaznog zraka [kg/s],

$q_{mf,i}$ - trenutačni maseni protok goriva [kg/s].

4.1.2.2. Metoda izračuna pomoću masenog protoka zraka i omjera zraka i goriva

Ovom metodom protok se računa na sljedeći način:

$$q_{mew,i} = q_{maw,i} + \left(1 + \frac{1}{A/F_{st} \cdot \lambda_i}\right) \quad (12)$$

Pri čemu je:

$$A/F_{st} = \frac{138 \times \left(1 + \frac{\alpha}{4} - \frac{\varepsilon}{2} + \gamma\right)}{12,011 + 1,008 \times \alpha + 15,9994 \times \varepsilon + 14,0067 \times \delta + 32,0675 \times \gamma} \quad (13)$$

$$\lambda_i = \frac{\left(100 - \frac{c_{CO} \times 10^{-4}}{2} - c_{HCW} \times 10^{-4}\right) + \left(\frac{\alpha}{4} \times \frac{1 - \frac{2 \times c_{CO} \times 10^{-4}}{3,5 \times c_{CO_2}}}{1 + \frac{c_{CO} \times 10^{-4}}{3,5 \times c_{CO_2}}} - \frac{\varepsilon}{2} - \frac{\delta}{2}\right) \times (c_{CO_2} + c_{CO} \times 10^{-4})}{4,764 \times \left(1 + \frac{\alpha}{4} - \frac{\varepsilon}{2} + \gamma\right) \times (c_{CO_2} + c_{CO} \times 10^{-4} + c_{HCW} \times 10^{-4})} \quad (14)$$

gdje je:

$q_{maw,i}$ - trenutačni maseni protok ulaznog zraka [kg/s],

A/F_{st} - stehiometrijski omjer zrak/gorivo [kg/kg],

λ_i - trenutačan omjer viška zraka,

c_{CO_2} - suha koncentracija CO₂ [%],

c_{CO} - suha koncentracija CO [ppm],

c_{HCW} - vlažna koncentracija HC-a [ppm],

α - molarni omjer ugljikovodika (H/C)

β - molarni omjer ugljika (C/C),

γ - molarni omjer sumpora (S/C),

δ - molarni omjer dušika (N/C),

ε - molarni omjer kisika (O/C).

Koeficijenti se odnose na gorivo C _{β} H _{α} O _{ε} N _{δ} S _{γ} uz $\beta = 1$ za goriva temeljena na ugljiku. Koncentracija emisija HC-a obično je niska i može se izostaviti pri izračunu λ .

4.1.2.3. Metoda izračuna pomoću masenog protoka goriva i omjera zraka i goriva

Za ovu metodu vrijede izrazi za A/F_{st} i λ_i iz poglavlja 4.1.2.2., a izraz za trenutačni maseni protok ispušnih plinova glasi:

$$q_{mew,i} = q_{mf,i} + (1 + A/F_{st} \times \lambda_i) \quad (15)$$

4.1.3. Izračun masenog protoka plinovitih komponenti

Trenutačne masene emisije [g/s] određene su umnoškom trenutačne koncentracije onečišćujuće tvari [ppm], trenutačnog masenog protoka ispušnih plinova [kg/s] (obje veličine pritom su prethodno ispravljene po vremenu) te vrijednošću u_{gas} koja je dana u Tablici 9.

Tablica 9. Vrijednost nerazrijeđenog ispušnog plina u koje odražavaju omjer gustoća komponente ispuha ili onečišćujuće tvari i [kg/m^3] i gustoće ispušnog plina [kg/m^3]⁽⁶⁾ [21]

Gorivo	ρ_e [kg/m^3]	Komponenta ili onečišćujuća tvar i					
		NO _x	CO	HC	CO ₂	O ₂	CH ₄
		ρ_{gas} [kg/m^3]					
		2,053	1,250	(¹)	1,9636	1,4277	0,716
u_{gas} ^{(2), (6)}							
Dizelsko gorivo (B7)	1,2943	0,001586	0,000966	0,000482	0,001517	0,001103	0,000553
Etanol (ED 95)	1,2768	0,001609	0,000980	0,000780	0,001539	0,001119	0,000561
Stlačeni prirodni plin (SPP) (³)	1,2661	0,001621	0,000987	0,000528 (⁴)	0,001551	0,001128	0,000565
Propan	1,2805	0,001603	0,000976	0,000512	0,001533	0,001115	0,000559
Butan	1,2832	0,001600	0,000974	0,000505	0,001530	0,001113	0,000558
Ukapljeni naftni plin (UNP) (⁵)	1,2811	0,001602	0,000976	0,000510	0,001533	0,001115	0,000559
Benzin (E10)	1,2931	0,001587	0,000966	0,000499	0,001518	0,001104	0,000553
Etanol (E85)	1,2797	0,001604	0,000977	0,000730	0,001534	0,001116	0,000559

(¹) ovisno o gorivu;

(²) Pri $\lambda = 2$, suhi zrak, 273 K, 101,3 kPa;

(³) u vrijednosti točne unutar 0,2 % za maseni sastav od: C = 66 - 76 %; H = 22 - 25 %; N = 0 - 12 %;

(⁴) NMHC na temelju CH_{2,93} (za THC upotrebljava se koeficijent u_{gas} od CH₄)

(⁵) u točno unutar 0,2 % za maseni sastav od: C₃ = 70 - 90 %; C₄ = 10 - 30 %;

(⁶) u_{gas} je parametar bez mjerne jedinice; vrijednosti u_{gas} obuhvaćaju pretvorbe mjerne jedinice kako bi se osiguralo dobivanje trenutačnih emisija u navedenoj fizičkoj jedinici, odnosno g/s.

Izraz u koji se onda uvrštavaju spomenute vrijednosti glasi:

$$m_{gas,i} = u_{gas} \cdot c_{gas,i} \cdot q_{mew,i} \quad (16)$$

gdje je:

$m_{gas,i}$ - masa plinovite komponente u ispušnom plinu [g/s],

u_{gas} - omjer gustoće plinovite komponente u ispušnom plinu i ukupne gustoće ispušnog plina koja je navedena u Tablici 9.,

$c_{gas,i}$ - izmjerena koncentracija plinovite komponente u ispušnom plinu [ppm],

$q_{mew,i}$ - izmjereni maseni protok ispušnih plinova [kg/s],

gas - odgovarajuća komponenta,

i - broj mjerenja.

4.1.4. Izračun broja krutih čestica

Trenutačni broj krutih čestica (čestica/s) određen je umnoškom trenutačne koncentracije onečišćujuće tvari (čestica/cm³) s trenutačnim masenim protokom ispušnih plinova (kg/s), (obje veličine pritom su prethodno korigiraju prema vremenu transformacije i usklađuju s njim).

Izraz u koji se onda uvrštavaju glasi:

$$PN, i = c_{PN, i} \cdot q_{mew, i} / \rho_e \quad (17)$$

gdje je:

PN, i - broj čestica u protoku (čestica/s)

$c_{PN, i}$ - izmjerena brojčana koncentracija čestica (#/m³) normalizirana na 0 °C,

$q_{mew, i}$ - izmjereni maseni protok ispušnih plinova (kg/s),

ρ_e - gustoća ispušnog plina (kg/m³) na 0 °C.

4.2. PROVJERA UKUPNE DINAMIČNOSTI VOŽNJE METODOM POMIČNOG PROZORA ZA IZRAČUN SREDNJE VRIJEDNOSTI

Provjera ukupne dinamičnosti vožnje provodi se radi provjere je li ispitivanje valjano za potrebe ispitivanja RDE-a. Valjanost se određuje usporedbom emisija CO₂ specifičnih za prijedenu udaljenost s krivuljom koja je dobivena iz analize emisija CO₂ izmjerenih WLTP-om.

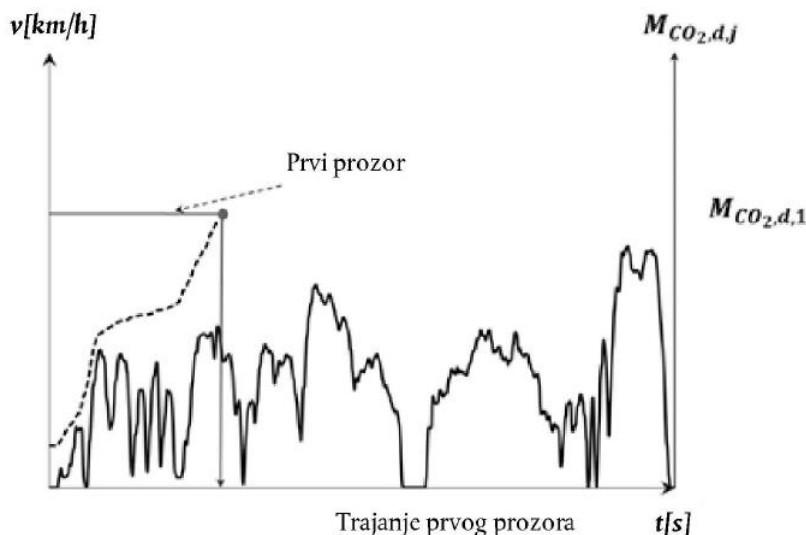
Vrijednosti trenutačnih emisija dobivenih prema izrazima iz prethodnog poglavlja integriraju se metodom pomičnog prozora kako bi se dobile srednje vrijednosti na temelju referentne mase CO₂. Masene emisije CO₂ specifične za prijedenu udaljenost iz RDE ispitivanja izračunavaju se za podskupove cijelog paketa podataka, a duljina podskupova („prozora za izračun srednje vrijednosti“) određuje se tako da odgovara istom dijelu mase CO₂ koje vozilo ispušta tijekom WLTC-a. Također, u izračunu pomičnog prozora u obzir je uzet vremenski prirast Δt koji označava učestalost uzorkovanja podataka.

Jedini podaci koji se ne uzimaju u obzir prilikom izračuna mase CO₂, udaljenosti i prosječne brzine jesu periodične verifikacije instrumenata i/ili nakon verifikacije pomaka s nulte točke te brzina vozila na tlu manja od 1 km/h. Masene emisije $M_{CO_2, j}$ izračunate su, dakle, integriranjem trenutnih emisija u g/s.

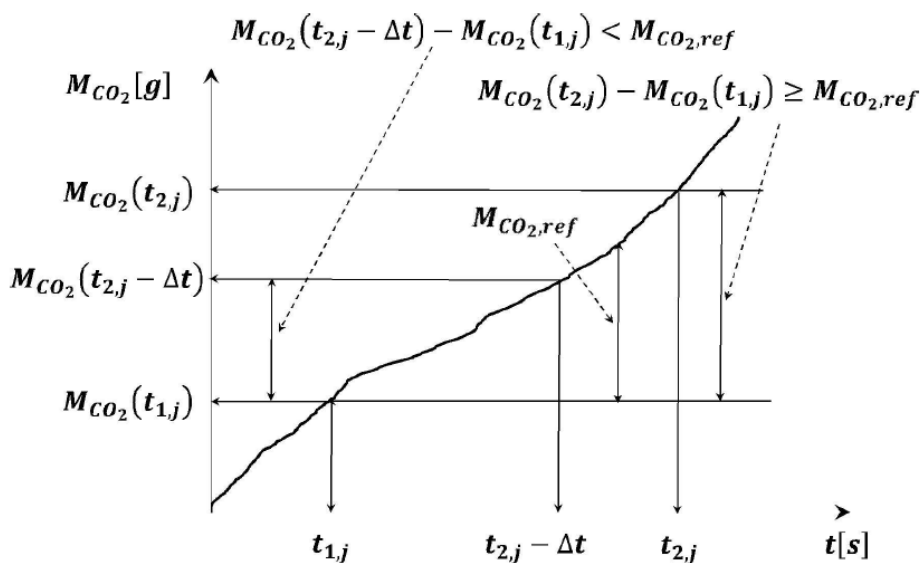
Indeksi na Slikama 26. i 27. definiraju sljedeće:

- indeks (i) označava vremenski korak,

- indeks (j) označava prozor,
- indeks (k) označava kategoriju (t = ukupno, u = gradska vožnja, r = izvangradska vožnja, m = vožnja autocestom) ili karakterističnu krivulju CO₂ (cc).



Slika 26. Brzina vozila u odnosu na vrijeme – prosječne emisije vozila u odnosu na vrijeme, počevši od prvog prozora za izračun srednje vrijednosti [21]



Slika 27. Definicija mase CO₂ na temelju prozora za izračun srednje vrijednosti [21]

Trajanje pojedinog prozora koje se označava kao $t_{2,j} - t_{1,j}$ određuje se kako slijedi:

$$M_{CO_2}(t_{2,j}) - M_{CO_2}(t_{1,j}) \geq M_{CO_2,ref} \quad (18)$$

gdje je:

$M_{CO_2}(t_{i,j})$ – masa CO₂ izmjerena između početka ispitivanja i vremena $t_{i,j}$ [g],

$M_{CO_2,ref}$ - prva polovina mase CO₂ koju ispusti vozilo tijekom ispitivanja WLTP-om.

Vrijednosti za OVC-HEV vozila preuzimaju se iz ispitivanja WLTP-om pri pogonu s dopunjavanjem baterije, a $t_{2,j}$ se odabire na sljedeći način:

$$M_{CO_2}(t_{2,j} - \Delta t) - M_{CO_2}(t_{1,j}) < M_{CO_2,ref} \leq M_{CO_2}(t_{2,j}) - M_{CO_2}(t_{1,j}) \quad (19)$$

gdje je Δt razdoblje uzorkovanja podataka.

Za svaki od prozora izračunavaju se emisije CO₂ specifične za prijeđenu udaljenost $M_{CO_2,d,j}$ te prosječna brzina vozila \bar{v}_j .

Karakteristična krivulja CO₂ određuje se pomoću referentnih točaka P₁, P₂ i P₃. One su definirane na sljedeći način:

- Točka P₁
 - $\bar{v}_{P_1} = 18.882$ km/h (prosječna brzina faze niske brzine ciklusa WLTP-a)
 - M_{CO_2,d,P_1} - emisije CO₂ vozila tijekom faze niske brzine ciklusa WLTP-a [g/km]
- Točka P₂
 - $\bar{v}_{P_2} = 56.664$ km/h (prosječna brzina faze visoke brzine ciklusa WLTP-a)
 - M_{CO_2,d,P_2} - emisije CO₂ vozila tijekom faze visoke brzine ciklusa WLTP-a [g/km]
- Točka P₃
 - $\bar{v}_{P_3} = 91.997$ km/h (prosječna brzina faze iznimno visoke brzine ciklusa WLTP-a)
 - M_{CO_2,d,P_3} - emisije CO₂ vozila tijekom faze iznimno visoke brzine ciklusa WLTP-a [g/km].

Emisije se računaju kao funkcija prosječne brzine pomoću linearnih odjeljaka (P₁, P₂) i (P₂, P₃). Odjeljak (P₁, P₂) definiran je na sljedeći način:

$$M_{CO_2,d,CC}(\bar{v}) = a_1 \cdot \bar{v} + b_1 \quad (20)$$

gdje je:

$$a_1 = (M_{CO_2,d,P_2} - M_{CO_2,d,P_1}) / (\bar{v}_{P_2} - \bar{v}_{P_1}) \quad (21)$$

$$b_1 = M_{CO_2,d,P_1} - a_1 \cdot \bar{v}_{P_1} \quad (22)$$

Analogno je definiran i drugi odjeljak (P_2, P_3):

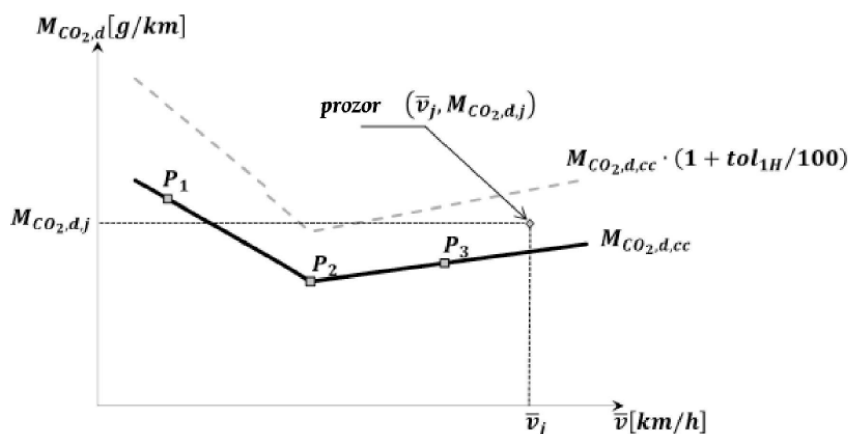
$$M_{CO_2,d,CC}(\bar{v}) = a_2 \cdot \bar{v} + b_2 \quad (23)$$

gdje je:

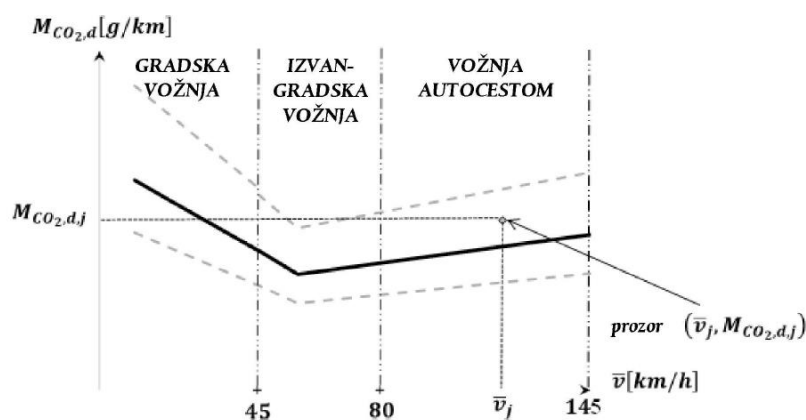
$$a_2 = (M_{CO_2,d,P_3} - M_{CO_2,d,P_2}) / (\bar{v}_{P_3} - \bar{v}_{P_2}) \quad (24)$$

$$b_2 = M_{CO_2,d,P_2} - a_2 \cdot \bar{v}_{P_2} \quad (25)$$

Na sljedećim slikama prikazana je karakteristična krivulja CO_2 , odnosno podjela na gradsku, izvan-gradsku i vožnju autocestom u istom dijagramu.



Slika 28. Karakteristična krivulja CO_2 i dopuštena odstupanja vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem i NOVC-HEV-ova [21]



Slika 29. Karakteristična krivulja CO_2 vozila: definicije vožnje u gradu, izvan grada i na autocesti (primjeri navedeni za vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem i NOVC-HEV-ove)

[21]

Valjanost ispitivanja potvrđuje se ako je najmanje 50% prozora vožnje u gradu, izvan grada i na autocesti unutar dopuštenih odstupanja određenih za karakterističnu krivulju CO₂. Vrijednosti za dopuštena odstupanja od karakteristične krivulje prikazane isprekidanom linijom na prethodnim slikama (Slika 28. i Slika 29.) određene su na sljedeći način:

- Gornje dopušteno odstupanje karakteristične krivulje CO₂ vozila iznosi $tol_{IH} = 40\%$ za vožnju izvan grada i na autocesti
- Donje dopušteno odstupanje karakteristične krivulje CO₂ vozila iznosi $tol_{IL} = 25\%$ za vozila s MSUI i NOVC-HEV-ove te $tol_{IL} = 100\%$ za OVC-HEV-ove.

4.2.1. Verifikacija normalnosti dinamičnih uvjeta

Normalnost dinamičnosti vožnje provjerava se utvrđivanjem pretjerane ili preniske dinamičnosti tijekom svih tipova vožnje u ispitnoj ruti (gradska, izvanogradska i vožnja autocestom).

Dinamički parametri kao što su ubrzanje, ($v \cdot a_{pos}$) i RPA određuju se signalom brzine točnosti 0,1 % za vrijednosti brzine iznad 3 km/h. Učestalost uzorkovanja je 1 Hz. Izračun istih parametara izvodi se na cijelom vremenskom zapisu brzine od prve do posljednje sekunde ispitivanja. Postupak izračuna dinamičkih parametara prikazan je u nastavku, a ubrzanje se izračunava prema sljedećem izrazu:

$$a_i = \frac{v_{i+1} - v_{i-1}}{2 \cdot 3,6}, \quad i = 1 \text{ do } N_t \quad (26)$$

gdje je:

a_i - ubrzanje u vremenskom koraku i [m/s^2],

v_i - stvarna brzina vozila u vremenskom koraku i [km/h],

N_t - ukupan broj uzoraka.

Izraz za umnožak brzine vozila i ubrzanja glasi:

$$(v \cdot a)_i = \frac{v_i \cdot a_i}{3,6}, \quad i = 1 \text{ do } N_t \quad (27)$$

gdje je:

$(v \cdot a)_i$ - umnožak stvarne brzine vozila i ubrzanja u vremenskom koraku i [m^2/s^3 ili W/kg].

Nakon izračunavanja ubrzanja a_i i umnoška brzine vozila i ubrzanja $(v \cdot a)_i$ njihove vrijednosti poredaju se od najmanje do najveće prema brzini vozila. Podaci u kojima je $v_i \leq 60$ km/h svrstavaju se u „gradsku“ skupinu, za $60 \text{ km/h} < v_i \leq 90 \text{ km/h}$ spadaju u „izvangradsku“ skupinu, a preostali s $v_i > 90 \text{ km/h}$ u „autocestovnu“ skupinu. U svakoj od navedene tri skupine mora postojati barem 100 skupova podataka s ubrzanjem $a_i > 0,1 \text{ m/s}^2$. Za svaku skupinu potom se izračunava prosječna brzina vozila \bar{v}_k na idući način:

$$\bar{v}_k = \frac{(\sum_i \bar{v}_{i,k})}{N_k}, \quad i = 1 \text{ do } N_k, k = u, r, m \quad (28)$$

gdje je:

N_k - ukupni broj uzoraka dijelova vožnje u gradu, izvan grada i na autocesti.

U svrhu utvrđivanja valjanosti rute potrebno je izračunati 95. percentil vrijednosti $v \cdot a_{pos}$. Vrijednosti $(v \cdot a)_{i,k}$ u svakoj skupini podataka poredaju se uzlazno ukoliko u skupini podataka vrijedi $a_{i,k} \geq 0,1 \text{ m/s}^2$ te se određuje ukupni broj uzoraka M_k . Vrijednosti percentila dodjeljuju se vrijednostima $(v \cdot a_{pos})_{i,k}$ u kojima vrijedi prethodni uvjet na nain:

- najnižoj vrijednosti $v \cdot a_{pos}$ dodjeljen je percentil $1/M_k$, drugoj najnižoj $2/M_k$, a najvišoj $M_k/M_k = 100 \%$.

$(v \cdot a_{pos})_{k-[95]}$ je vrijednost $(v \cdot a_{pos})_{j,k}$ gdje je $j/M_k = 95 \%$. Ako $j/M_k = 95 \%$ nije moguće ispuniti $(v \cdot a_{pos})_{k-[95]}$ izračunava se linearnom interpolacijom između uzastopnih uzoraka j i $j+1$ u kojima je $j/M_k < 95 \%$ i $(j+1)/M_k > 95 \%$.

Relativno pozitivno ubrzanje RPA_k po skupini podataka o brzini izračunava se na sljedeći način:

$$RPA_k = \sum_j (\Delta t \cdot (v \cdot a_{pos})_{j,k}) / \sum_i d_{i,k}, \quad j = 1 \text{ do } M_k, i = 1 \text{ do } N_k, k = u, r, m \quad (29)$$

gdje je:

RPA_k - relativno pozitivno ubrzanje tijekom dijelova gradske i izvangradske vožnje i vožnje autocestom u $[\text{m/s}^2 \text{ ili } \text{kWs}/(\text{kg} \cdot \text{km})]$,

Δt - vremenska razlika od 1 sekunde,

M_k - broj uzoraka dijelova gradske i izvangradske vožnje i vožnje autocestom s pozitivnim ubrzanjem,

N_k - ukupni broj uzoraka dijelova vožnje u gradu, izvan grada i na autocesti.

Nakon izračuna svih potrebnih dinamičkih parametara verificira se valjanost vožnje gdje za valjanu vožnju ne smiju vrijediti sljedeće vrijednosti:

- verifikacija $(v \cdot a_{pos})_{k-}$ [95]

$$\bar{v}_k \leq 74,6 \text{ km/h} \text{ i } (v \cdot a_{pos})_{k-}[95] > (0,136 \cdot \bar{v}_k + 14,44) \quad (30)$$

$$\bar{v}_k > 74,6 \text{ km/h} \text{ i } (v \cdot a_{pos})_{k-}[95] > (0,0742 \cdot \bar{v}_k + 18,966) \quad (31)$$

- verifikacija RPA_k

$$\bar{v}_k \leq 94,05 \text{ km/h} \text{ i } RPA_k < (-0,0016 \cdot \bar{v}_k + 0,1755) \quad (32)$$

$$\bar{v}_k > 94,05 \text{ km/h} \text{ i } RPA_k < (-0,025) \quad (33)$$

Potrebno je zadovoljiti sve gore navedene uvjete za ispravnu RDE ispitnu rutu.

4.3. IZRAČUN KONAČNIH REZULTATA RDE-a

Konačni rezultat RDE ispitivanja dodatno se provjerava izračunavanjem konačnog rezultata RDE-a za MSUI vozila, NOVC HEV-ove i OVC HEV-ove. Izraz kojim se provodi utvrđivanje RDE-a za cijelu ispitnu vožnju i za gradski dio vožnje glasi:

$$M_{RDE,k} = m_{RDE,k} \cdot RF_k \quad (34)$$

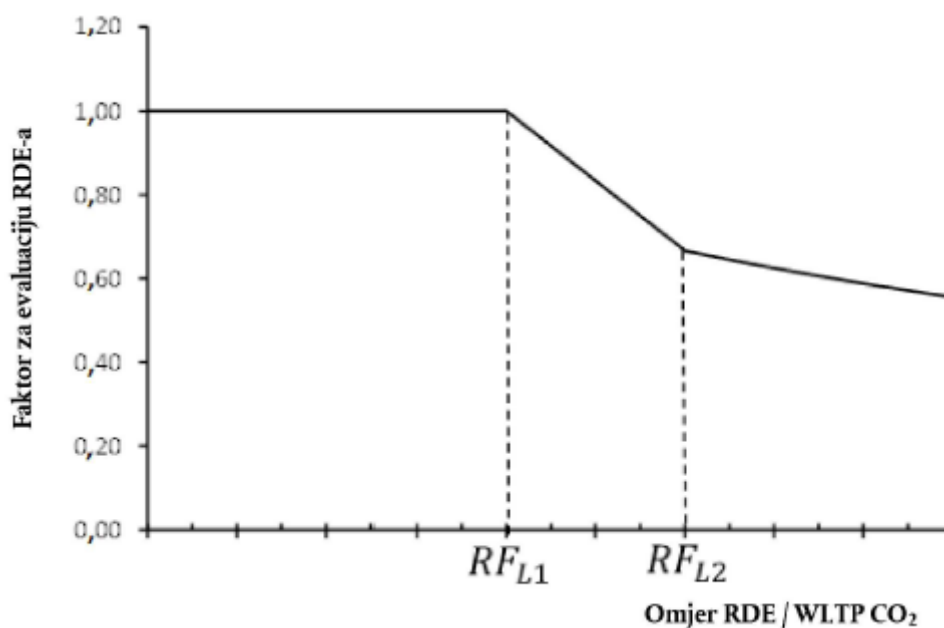
gdje je $k = t =$ ukupno i $k = u =$ gradska vožnja.

$M_{RDE,k}$ - konačni rezultati RDE-a specifičnih emisija po prijeđenom putu za masu plinovitih onečišćujućih tvari [mg/km] ili broj čestica [# /km],

$m_{RDE,k}$ - masa plinovitih onečišćujućih tvari [mg/km] specifična za prijeđenu udaljenost ili broj čestica [# /km] specifičan za prijeđenu udaljenost, ispuštenih tijekom cijele vožnje za utvrđivanje RDE-a,

RF_k - faktor za evaluaciju rezultata izračunan za vožnju za utvrđivanje RDE-a.

Faktor za evaluaciju rezultata RF_k dobiva su pomoću funkcija definiranih za MSUI vozila i NOVC HEV-ove odnosno za OVC HEV-ove. Ovaj faktor će kroz vrijeme biti revidiran kako se bude ustanovio tehnološki napredak.



Slika 30. Grafički prikaz funkcija za izračun faktora za evaluaciju rezultata [21]

Grafički prikaz metode prikazan je na Slici 30., a analitička u Tablici 10.

Tablica 10. Matematičke formule za izračun faktora za evaluaciju rezultata [21]

Ako je	Faktor za evaluaciju rezultata RF_k :	Pri čemu je
$r_k \leq RF_{L1}$	$RF_k = 1$	
$RF_{L1} < r_k \leq RF_{L2}$	$RF_k = a_1 r_k + b_1$	$a_1 = \frac{RF_{L2} - 1}{[RF_{L2}(RF_{L1} - RF_{L2})]}$ $b_1 = 1 - a_1 RF_{L1}$
$r_k > RF_{L2}$	$RF_k = \frac{1}{r_k}$	

Omjer r_k emisija CO₂ specifičnih za prijeđenu udaljenost izmjerenih tijekom RDE ispitivanja i emisija CO₂ specifičnih za prijeđenu udaljenost koje vozilo ispusti tijekom WLTP ispitivanja provedenog u skladu s Uredbama za emisije tijekom gradske vožnje, izračunava se na sljedeći način:

$$r_k = \frac{M_{CO_2, RDE, k}}{M_{CO_2, WLTP, k}} \quad (35)$$

Ovaj izraz odnosi se na relevantne faze voznog ciklusa WLTP-a, odnosno za MSUI vozila prve dvije faze WLTP-a (faza niske i srednje brzine) te za NOVC-HEV-ove cijeli vozni ciklus WLTP-a. Za OVC-HEV-ove vrijede druge formule i dodani koeficijenti, no u ovom radu nisu pobliže promatrani.

Vrijednosti prvog i drugog parametra RF_{L1} i RF_{L2} funkcija su upotrebljivanih u izračunu faktora za procjenjivanje rezultata iznose:

- $RF_{L1} = 1,20$ i $RF_{L2} = 1,25$ (na zahtjev proizvođača i homologacije dodijeljene prije 1.siječnja 2020.)
- $RF_{L1} = 1,30$ i $RF_{L2} = 1,50$ (u svim ostalim slučajevima).

Ukoliko vrijednost emisije CO₂ izmjerene prilikom ispitivanja u stvarnim uvjetima vožnje ne prelazi vrijednost emisije CO₂ izmjerene tijekom WLTP-a više od 20 % (odnosno 30 % nakon siječnja 2020. godine) vrijednosti emisija štetnih tvari RDE ispitivanja izvještavaju su kako su i dobivene prilikom mjerenja. U suprotnom, te vrijednosti podlažu se korekciji.

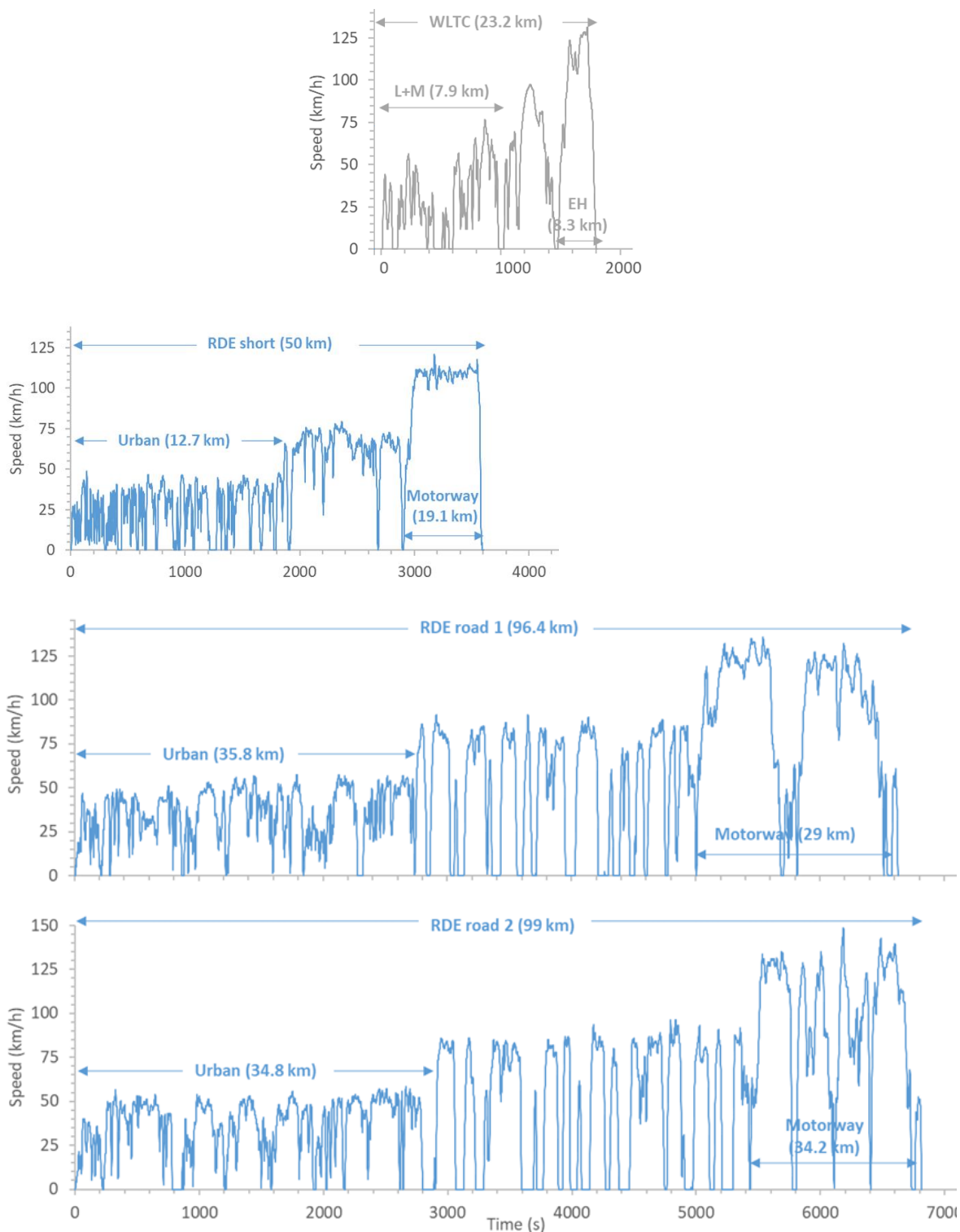
5. UTJECAJ KOMPONENATA RDE ISPITNE RUTE NA EMISIJE ŠTETNIH TVARI

RDE ispitivanja daju uvid u količinu emisija štetnih tvari koje vozila proizvode u stvarnim uvjetima, a time je omogućeno realno sagledavanje što i kako utječe na, odnosno onečišćenja zraka. Iako su određeni uvjeti i granične vrijednosti parametara ispitne rute, svaka ispitna ruta razlikuje se jedna od druge bilo to po prijedenoj udaljenosti, trajanju ispitivanja, tipu vožnje, prosječnoj brzini i dr. Upravo zbog heterogenosti RDE ispitivanja nema smisla međusobno uspoređivati prosječne vrijednosti rezultata (na koje utječu ranije navedeni faktori). S druge strane, razlike u ispitivanjima mogu ukazati na određene uzroke većih (i manjih) emisija štetnih tvari u stvarnim uvjetima vožnje. U ovom dijelu pažnja se obratila na utjecaj duljine i trajanja ispitne rute te tip vožnje (gradska, prigradska ili vožnja autocestom).

Razna istraživanja promatraju utjecaj različitih faktora na emisije štetnih tvari. U sklopu svakog pojedinog istraživanja pažnja se može obratiti na više utjecajnih faktora, a u ovom fokus će biti na utjecaju duljine [km] i tipa vožnje u samoj ispitnoj ruti na emisije. Tako je u [22] na vozilu s Ottovim motorom (Euro 6d) provedeno ispitivanje utjecaja temperature, ali i ostalih faktora vožnje tokom RDE ispitivanja. Provedeno je više ispitnih ciklusa, između ostaloga laboratorijski WLTC, dva RDE ispitivanja koja su u skladu s graničnim uvjetima i imaju sve komponente valjane RDE ispitne rute te niz kraćih RDE ispitivanja (trajanja 3600 s) koja zbog svog trajanja i nekih drugih aspekata (većina kraćih RDE ispitivanja rađena su pri ekstremnim temperaturama od -30 °C, -10 °C i 50 °C; u radu je uzeto u obzir samo ispitivanja pri 23 °C) ne zadovoljavaju uvjete valjane ispitne rute, no svakako su korisni u svrhu samog istraživanja. Glavne karakteristike ovih ruta prikazane su u sljedećoj tablici (Tablica 11).

Tablica 11. Glavne karakteristike ciklusa i ispitnih ruta [22]

	WLTC	RDE Short	RDE Road 1	RDE Road 2
Trajanje (s)	1800	3600	6812	6630
Prijedena udaljenost (km)	23,2	50	96	99
Srednja brzina (km/h)	46,5	49,5	50,9	53,7
Najveća brzina (km/h)	131	120	149	135
Masa vozila (kg)	1817	1817	1930	1930
Nosivost tereta	(35%)	(35%)	(50%)	(50%)
Raspon nagiba (%)	Ne	-9,6 do 9,2 %	-7,3 do 9,2 %	-9,8 do 10,6 %



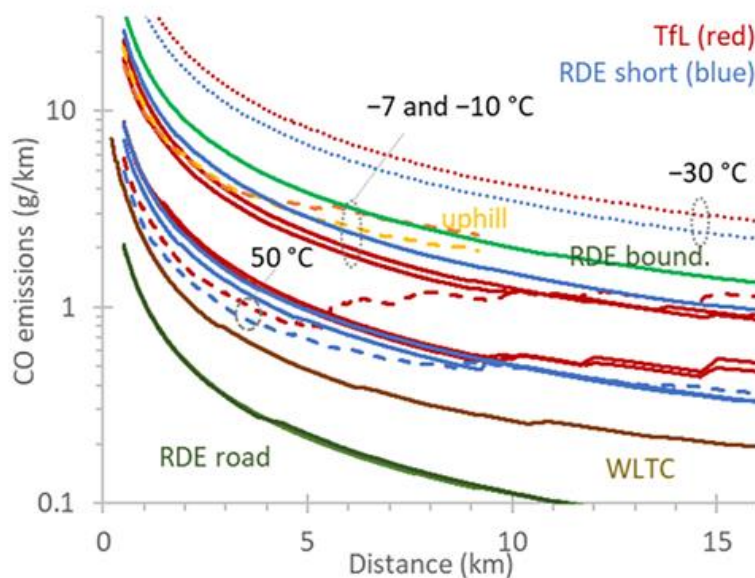
Slika 31. Ciklusi (od gore prema dolje): WLTC, kratka RDE ruta, RDE-1 ispitivanje, RDE-2 ispitivanje [22]

Kao što se vidi, značajna je razlika u trajanju i prijeđenoj udaljenosti RDE ispitivanja pa će u nastavku biti prikazan i kakav utjecaj ova odstupanja imaju na plinovite emisije štetnih tvari.

Tablica 12. Granične vrijednosti emisija štetnih tvari i izmjerene emisije za ispitivano vozilo [22]

Cycle	Tem p. (°C)	CO ₂ (g/k m)	NO _x (mg/k m)	THC (mg/k m)	NMHC (mg/k m)	CO (mg/k m)	NH ₃ (mg/k m)	N ₂ O (mg/k m)
Limit WLTC (Euro 6)	23	-	60	100	68	1000	-	-
WLTC	23	164	10	18	15	187	-	-
RDE road 1	20	183	7	-	-	172	-	-
RDE road 2	17	181	6	-	-	114	-	-
RDE short	23	187	9	17	15	331	9	1

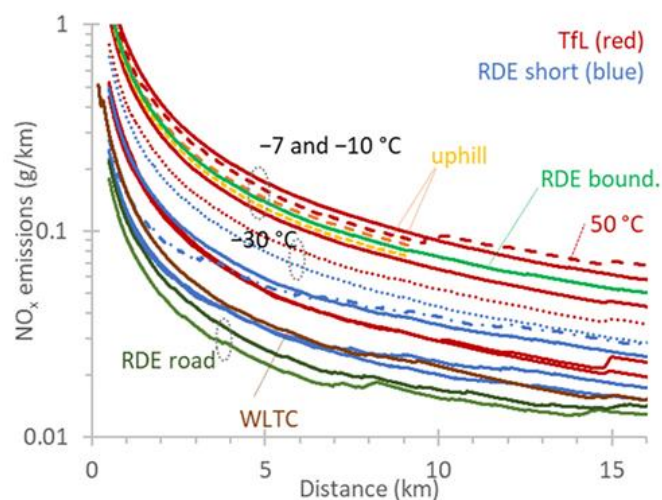
Rezultati iz Tablice 12. uz informacije sa Slike 31. upućuju nekoliko stvari. Vidljiv je utjecaj koji trajanje gradske vožnje ima obzirom na trajanje cjelokupnog ispitivanja. Naime, što je trajanje gradske vožnje dulje, odnosno što više ukupne prijeđene udaljenosti odlazi na gradsku vožnju to su emisije CO niže. U prilog ovome govori i graf na Slici 32. gdje se jasno može vidjeti pad emisija i u slučaju kraćih i u slučaju RDE ruta normalne (valjane) duljine. Kako je postotak prijeđene udaljenosti u gradskoj vožnji (25,4 %) za kratku RDE rutu manji od prijeđenih udaljenosti u gradskoj vožnji RDE-1 i RDE-2 ruta (37,1 % i 35,2 %) za očekivati je kako će u kraćoj ispitnoj ruti emisije CO biti veće (u ovom slučaju i skoro tri puta veće).



Slika 32. Utjecaj prijeđene udaljenosti gradske vožnje na emisije CO [22]

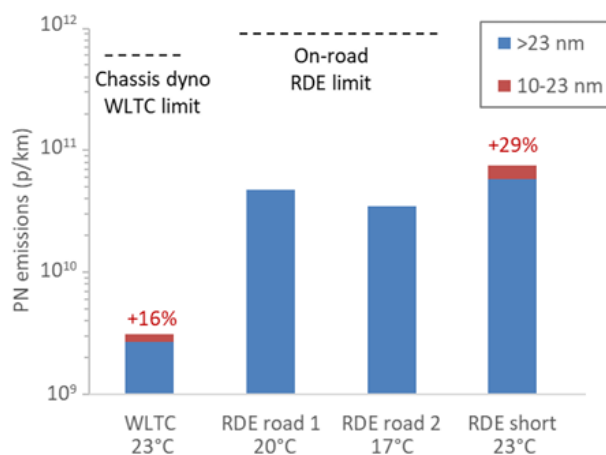
Razlog ovog smanjenja jest što, u slučaju CO emisija, hladni start ima veliki utjecaj na konačni iznos tih emisija.

U slučaju NO_x također se može primijetiti sličan padajući trend emisija obzirom na udio gradske vožnje u ukupnoj udaljenosti rute. Ovo je također posljedica utjecaja hladnog starta gdje on ima veći značaj u slučaju manje prijeđene udaljenosti u gradskoj vožnji. Emisije NO_x za kraću rutu su 9 mg/km dok su za dulje RDE ispitne rute vrijednosti 7 i 6 mg/km.



Slika 33. Utjecaj prijeđene udaljenosti gradske vožnje na emisije NO_x [22]

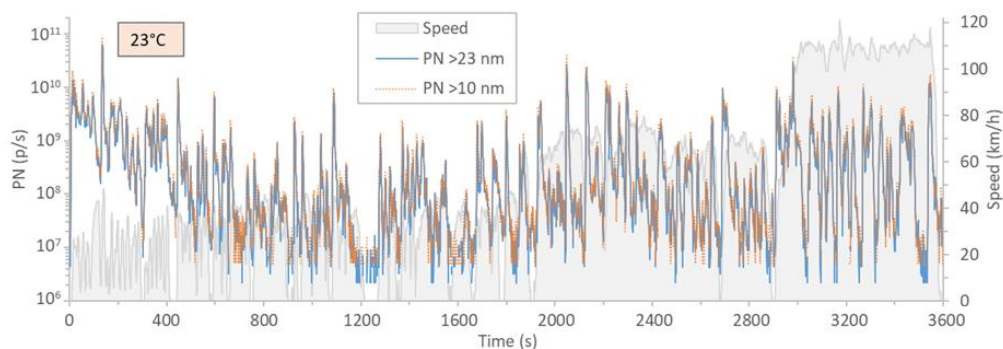
U povezanom radu [23] isto vozilo podvrgnulo se ispitivanju utjecaja prijeđene udaljenosti i tipa vožnje na broj čestica (PN). Dodatno, pažnja se obratila i na razliku između čestica do 23 nm te veličine 10-23 nm.



Slika 34. Broj čestica po svakom ciklusu (ispitnoj ruti) [23]

Prilikom ispitivanja na kratkoj RDE ruti primijećene su veće emisije čestica tijekom hladnog starta, koje su nakon toga pale na niže vrijednosti, osim prilikom ubrzanja. Kao neki od uzroka tome navedeni su otežano isparavanje goriva u okolini hladnih dijelova motora (stjenke cilindra, čelo klipa, itd.), manja curenja zbog zračnosti između uloška i spremnika goriva koja zagrijavanjem nestaje, pukotine u zakorjeloj čađi koje nastaju prilikom hlađenja, čestice čađe koje se ispuhuju prilikom pokretanja ispuha i dr. Utjecaj također ima manja učinkovitost

filtriranja čestica u uvjetima gradske vožnje zbog manjeg protoka ispušnih plinova. Uglavnom emisije krutih čestica prate profil brzine ispitne rute (Slika 35.). Pri većim brzina (i većem opterećenju) kao što je slučaj kod vožnje autocestom, započinje proces obogaćivanja zrakom/gorivom u svrhu toplinske zaštite izloženih dijelova motora. Time se snižavaju temperature izgaranja i temperature u komori. Kao posljedicu ovaj proces ima manjak kisika i visoke temperature što uzorkuje povećane koncentracije čestica pa se i na priloženoj slici može primijetiti porast emisija tijekom vožnje autocestom.



Slika 35. Emisije čestica (PN) u kratkoj RDE ruti [23]

Može se zaključiti kako već spomenuti veći udio gradske vožnje i vožnje autocestom u ukupnoj prijeđenoj udaljenosti može rezultirati i većim emisijama čestica (PN).

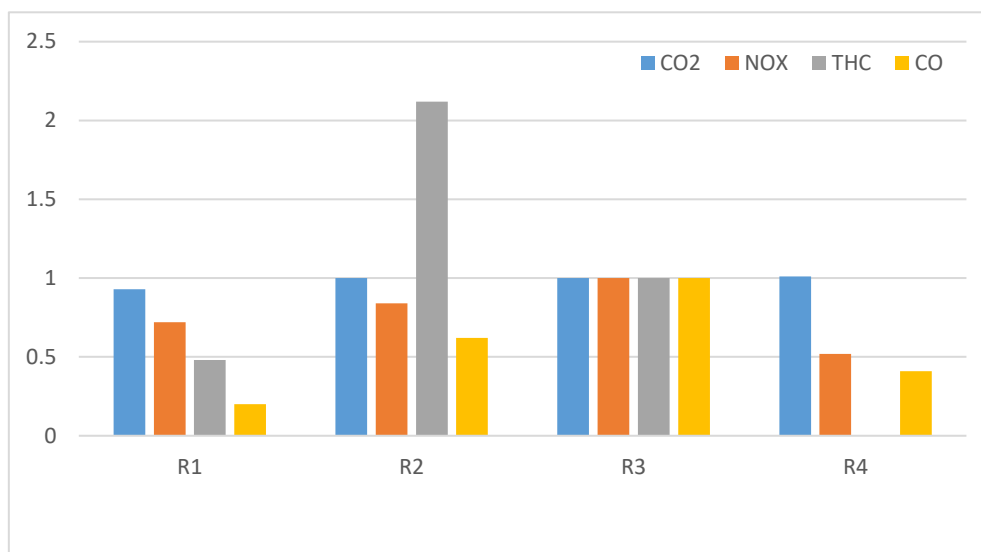
Prilikom istraživanja ponovljivosti RDE ispitivanja [24] provedena su četiri RDE ispitivanja na istoj ispitnoj ruti s malim odstupanjima u trajanju ispitne rute kao i razlikama u trajanju pojedinog tipa vožnje (gradska, prigradska, vožnja autocestom).

Tablica 13. Karakteristike četiri ispitivanja iste RDE ispitne rute [24]

Parametar	Mjerna jedinica	Tip vožnje	Test R1	Test R2	Test R3	Test R4
Prosječna brzina	km/h	Gradski	26.4	21.9	23.8	19
		Prigradski	72.2	74.4	75.4	75.2
		Autocesta	101.0	102.5	107.3	100.9
Vrijeme	Min	Gradski	58	67	62	76
		Prigradski	22	20	20	22
		Autocesta	13	12	12	10
		Total	93	99	94	108
Broj uzoraka s pozitivnim ubrzanjem N_k	#	Gradski	1258	1412	1302	1538
		Prigradski	370	320	357	365
		Autocesta	211	194	192	175
Zadovoljava uvjete valjane RDE ispitne rute			NE	DA	DA	DA

Kao što je vidljivo iz Tablice 13. sva ispitivanja osim R1 zadovoljavaju granične uvjete valjane ispitne rute. U tom ispitivanju vozilo nije prešlo brzinu od 110 km/h nijednom tijekom vožnje ispitne rute. Ostale razlike između četiri ispitivanja posljedica su drugačije upotrebe start &

stop sustava te automatskog mjenjača. Dobiveni rezultati izraženi su u bezdimenzijskim normaliziranim veličinama zbog ugovora u tajnosti. Uslijed kvara FID-a, u R4 ispitivanju nije bilo moguće izmjeriti vrijednosti THC-a.



	R1	R2	R3	R4
CO ₂	0,93	1	1	1,01
NO _x	0,72	0,84	1	0,52
THC	0,48	2,12	1	-
CO	0,2	0,62	1	0,41

Slika 36. Bezdimenzijske normalizirane vrijednosti emisija štetnih tvari u sva 4 ispitivanja [24]

Analizom prikazanih rezultata dolazi se do nekoliko zaključaka:

- CO₂ emisije: u R1 ispitivanju vrijednosti su nešto manje (8 %) zbog postignutih nižih brzina u ovoj ispitnoj ruti;
- CO i NO_x emisije: niže u R1 i R4 ispitivanju, moguće zbog manjih postignutih brzina (R1), odnosno duljeg trajanja gradske vožnje pa je time smanjen utjecaj hladnog starta na emisije štetnih tvari (R4).

5.1. ISPITIVANJE EMISIJA ŠTETNIH TVARI U STVARNIM UVJETIMA VOŽNJE

Ispitivanja emisija štetnih tvari u stvarnim uvjetima vožnje u sklopu ovog diplomskog rada provedena su na vozilu BMW M340i xDrive iz 2020. godine, sukladno važećim zakonskim odredbama utvrđenim u Uredbi Komisije (EU) 2017/1151 i Uredbi Komisije (EU) 2018/1832. Vozilo ima 6-cilindarski redni Ottov motor s direktnim ubrizgavanjem, snage 275 kW, s 4 ventila po cilindru. Pogon je na sve kotače, a masa vozila je 1800 kg. Maksimalna brzina vozila je 250 km/h, s kombiniranom potrošnjom goriva 7,8 – 8,5 l/100 km te prosječnom emisijom CO₂ 177-192 g/km [25].



Slika 37. BMW M340i xDrive (2020.) [25]

Ispitivanje emisija i utjecaj duljine ispitne rute na emisije provedeno je na tri pojedinačna PEMS testa od kojih je svaki proveden pri različitim tvorničkim postavkama upravljanja pogonskim sustavom: ECO PRO, COMFORT i SPORT. Svaki od testova obuhvatio je vožnju istom rutom u odgovarajućem trajanju, rasponu udjela pojedinih vožnji (gradska, prigradska, autocesta), predviđenom dinamikom i ostalim kriterijima propisanim Uredbom. Ispitna ruta prikazana je na Slici 38.

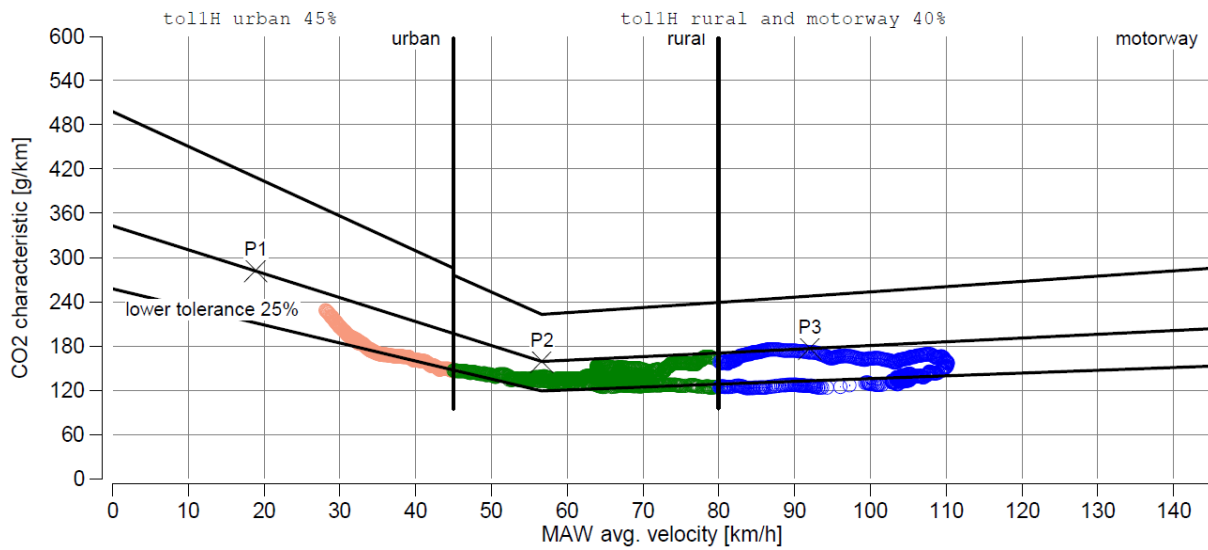
5.1.1. Rezultati ispitivanja emisija štetnih tvari u stvarnim uvjetima vožnje s postavkama upravljanja pogonskim sustavom ECO PRO – Test 1

Prvo ispitivanje emisija štetnih tvari provedeno je s postavkama upravljanja pogonskim sustavom ECO PRO, koje promjena parametara rada motora i automatskog mjenjača omogućuju smanjenje potrošnje goriva. U načinu rada ECO PRO također se optimira rad uređaja koja troše energiju kao što su klima uređaj ili grijanje sjedala za putnike [26]. Rezultati ispitivanja emisija navedeni su u Tablici 14

Tablica 14. Rezultati testa 1

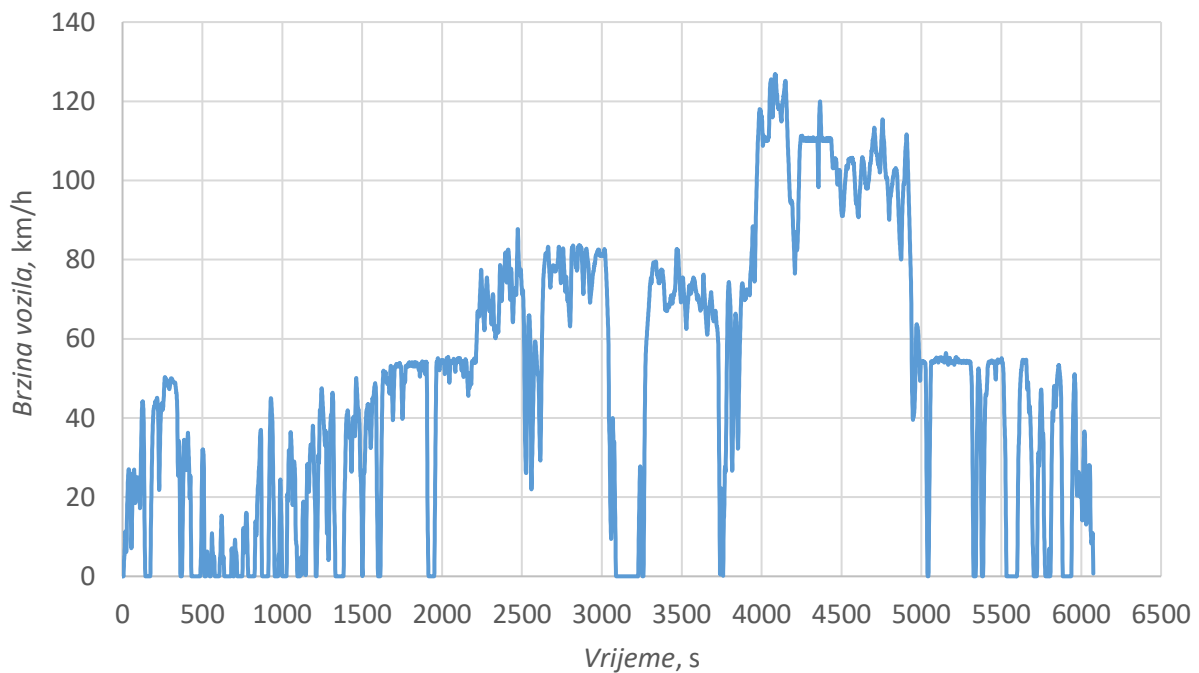
	Jedinica	Gradska vožnja (urban)	Prigradska vožnja (rural)	Vožnja autocestom (motorway)	Ukupna vožnja
Trajanje	s	3776	1392	909	6077
Udaljenost	km	30,04	28,52	26,95	85,51
Udio pojedinog tipa vožnje u testu	%	35,13	33,35	31,52	100
Prosječna brzina	km/h	28,64	73,77	106,72	50,65
Specifična emisija CO ₂	g/km	181,14	123,5	143,46	150,05
Specifična emisija CO	mg/km	193,00	179,95	289,84	219,17
Specifična emisija NO _x	mg/km	12,91	2,86	2,49	6,27

Provjera ukupne dinamičnosti vožnje metodom pomičnog prozora provedena je sukladno Uredbi, pri čemu za svaki tip vožnje, najmanje 50% prozora mora biti unutar tolerancija definiranih za CO₂ prikazanih na Slici 40. Provjerom ukupne dinamičnosti vožnje za Test 1 zaključeno je da navedeni kriterij za gradsku vožnju zadovoljava 62,3% prozora, za izvangradsku 97,1% i za vožnju autocestom 62,4% prozora. Navedene vrijednosti pokazuju da je dinamičnost vožnje za Test 1 na donjoj granici. Sve izmjerene vrijednosti kod kojih nije zadovoljen uvjet dinamičnosti vožnje se odbacuju odnosno nakon provedene analize u izračun emisija uključeni su samo prozori koji zadovoljavaju zahtjev kriterija dinamičnosti. Takvi rezultati dinamičnosti vožnje vrlo su vjerojatno posljedica načina rada ECO PRO, što je utjecalo i na ukupne emisije čemu u prilog ide i rezultat specifične emisije CO₂ od 150,05 g/km.



Slika 40. Provjera ukupne dinamičnosti vožnje metodom pomičnog prozora za Test 1

Profil brzine za test 1 prikazan je na Slici 41.



Slika 41. Profil brzine vozila za Test 1

5.1.2. Rezultati ispitivanja emisija štetnih tvari u stvarnim uvjetima vožnje s postavkama upravljanja pogonskim sustavom COMFORT – Test 2

Drugo ispitivanje emisija štetnih tvari provedeno je s postavkama upravljanja pogonskim sustavom COMFORT, što je standardna postavka rada pogonskog sustava namijenjena za svakodnevnu uporabu vozila [26]. Rezultati ispitivanja emisija štetnih tvari vozila sa postavkom COMFORT navedeni su u Tablici 15.

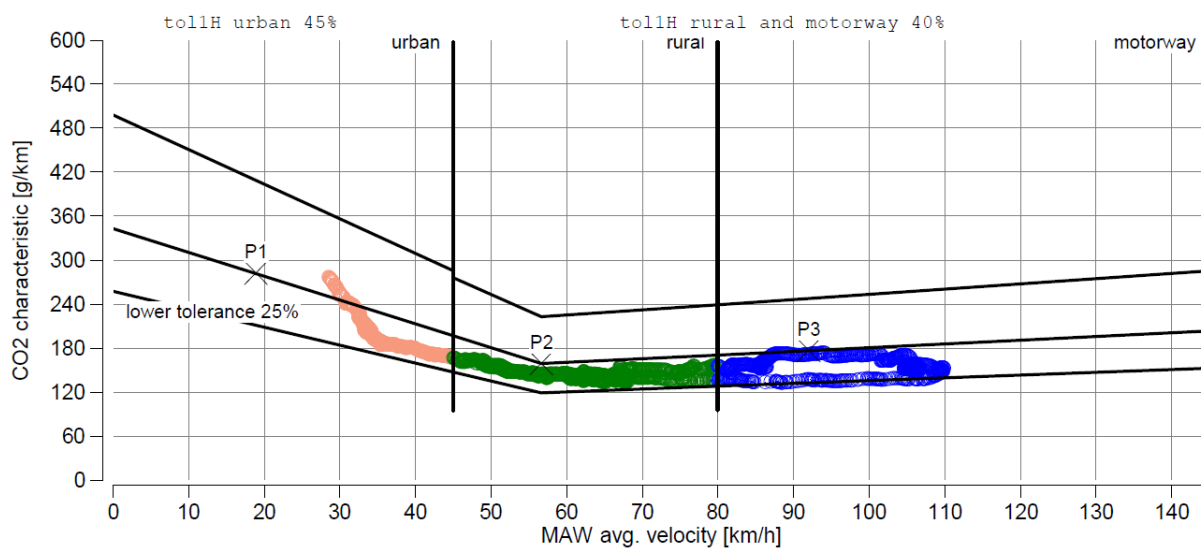
Tablica 15. Rezultati testa 2

	Jedinica	Gradska vožnja (urban)	Prigradska vožnja (rural)	Vožnja autocestom (motorway)	Ukupna vožnja
Trajanje	s	3751	1296	923	5970
Udaljenost	km	33,71	26,26	27,92	87,89
Udio pojedinog tipa vožnje u testu	%	38,35	29,88	31,77	100
Prosječna brzina	km/h	32,36	72,95	108,89	53,00
Specifična emisija CO ₂	g/km	203,27	135,11	149,15	165,71
Specifična emisija CO	mg/km	154,22	116,43	354,21	206,45
Specifična emisija NO _x	mg/km	20,65	6,93	6,30	11,83

Rezultati ispitivanja emisija u stvarnim uvjetima vožnje za Test 2 uspoređeni su s dostupnim podacima službenog RDE mjerenja i rezultatima WLTP ispitivanja. Specifična emisija CO₂ izmjerena prilikom WLTP ispitivanja iznosi 162 g/km, dok je RDE ispitivanjem za ukupnu vožnju izmjerena vrijednost 165,71 g/km što je oko 2.3 % veće od laboratorijski izmjerene vrijednosti. U gradskom dijelu RDE ciklusa izmjerena je emisija CO₂ 203,27 g/km, što je 4,12 % manje od vrijednosti izmjerene na WLTP ispitivanje (212 g/km za gradski dio ciklusa). U izvangradskoj vožnji izmjerena emisija CO₂ je oko 1,6 % u odnosu na WLTP vrijednost (133 g/km). Specifična emisija NO_x izmjerena tijekom Test 2 vožnje veća za 55,6% u odnosu na RDE vrijednost navedenu na stranici proizvođača (7,6 mg/km NO_x) [27].

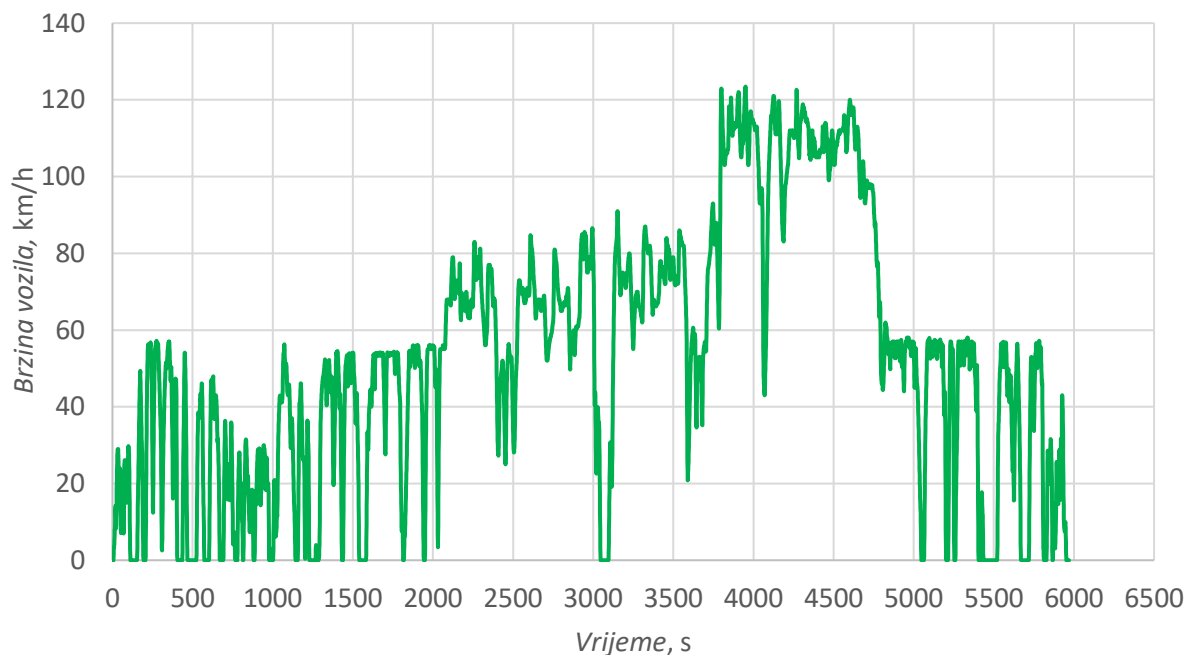
Za drugi test (Test 2) također je napravljena provjera ukupne dinamičnosti vožnje metodom pomičnog prozora. Za razliku od prvog testa gdje je utvrđen djelomičan nedostatak dinamičnosti u sve tri vrste vožnje, kod Testa 2 su svi prozori gradske i izvangradske vožnje unutar definiranih tolerancijskih granica (100 % prozora zadovoljava). Analizom vožnje autocestom,

za Test 2, zaključuje se da 99 % prozora zadovoljava kriterije dinamičnosti. Rezultati analize i kriteriji dinamičnosti prikazani su na Slici 42.



Slika 42. Provjera ukupne dinamičnosti vožnje metodom pomičnog prozora za Test 2

Profil brzine za test 2 prikazan je na Slici 43.



Slika 43. Profil brzine vozila za Test 2

5.1.3. Rezultati ispitivanja emisija štetnih tvari u stvarnim uvjetima vožnje s postavkama upravljanja pogonskim sustavom SPORT – Test 3

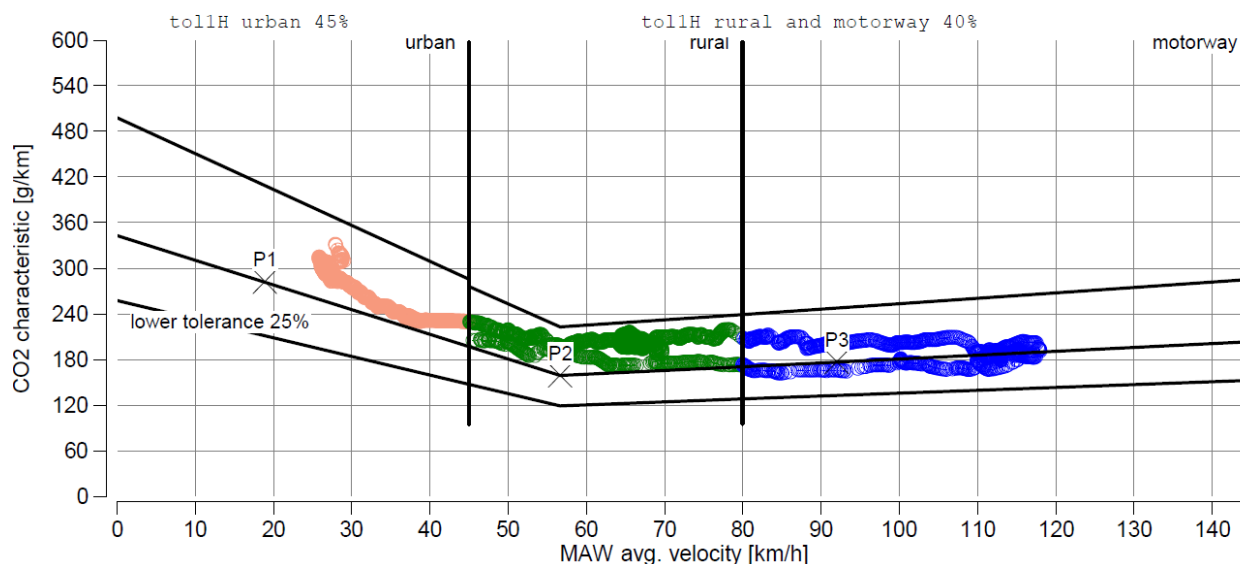
Posljednje ispitivanje emisija štetnih tvari provedeno je s postavkama upravljanja pogonskim sustavom SPORT, koje promjena parametara rada motora i automatskog mjenjača omogućuju brži odziv pogonskog sustava na zahtjeve vozača i dinamičniju vožnju [26]. Rezultati ispitivanja emisija štetnih tvari u stvarnim uvjetima vožnje vozila s postavkom SPORT navedeni su u Tablici 16.

Tablica 16. Rezultati testa 3

	Jedinica	Gradska vožnja (urban)	Prigradska vožnja (rural)	Vožnja autocestom (motorway)	Ukupna vožnja
Trajanje	s	3796	1285	861	5942
Udaljenost	km	31,49	27,15	26,70	85,35
Udio pojedinog tipa vožnje u testu	%	36,90	31,81	31,29	100
Prosječna brzina	km/h	29,87	76,07	111,63	51,71
Specifična emisija CO ₂	g/km	274,83	186,21	186,91	219,13
Specifična emisija CO	mg/km	270,54	282,11	996,42	501,29
Specifična emisija NO _x	mg/km	23,48	7,55	6,97	13,25

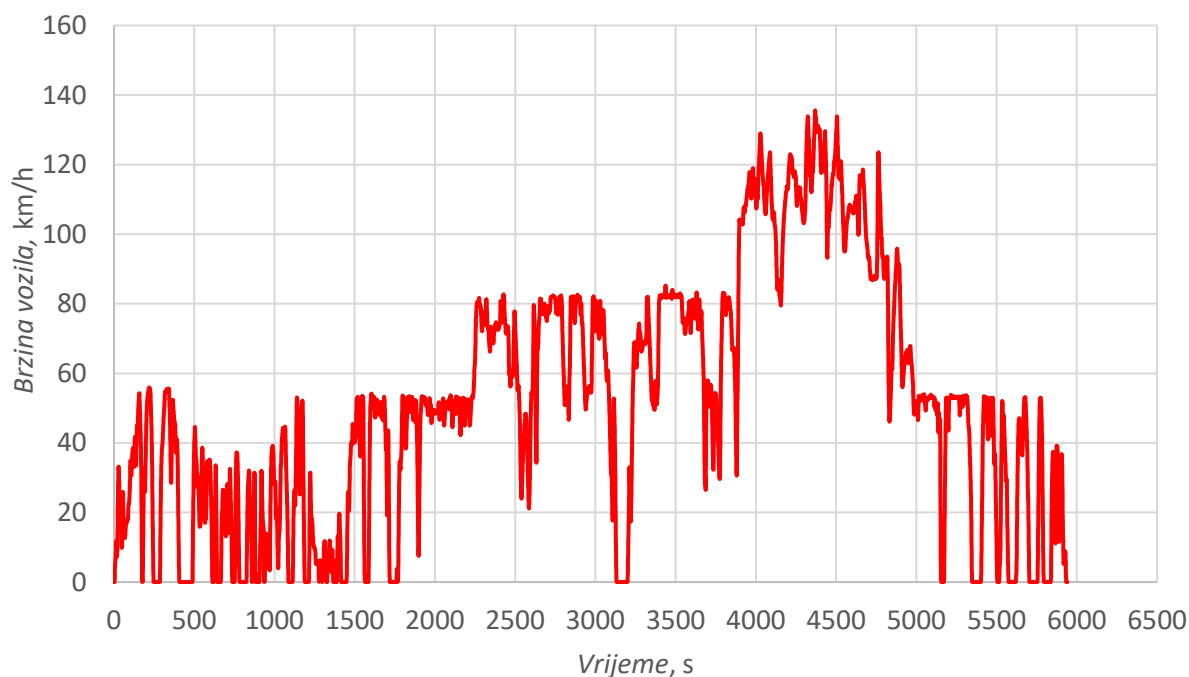
Rezultati ispitivanja emisija u stvarnim uvjetima vožnje za Test 3 isto tako su uspoređeni s dostupnim podacima službenog RDE mjerenja i rezultatima WLTP ispitivanja. Specifična emisija CO₂ izmjerena RDE ispitivanjem za ukupnu vožnju iznosi 219,13 g/km što je za oko 35 % veće od laboratorijski izmjerene vrijednosti (162 g/km), a posljedica je dinamičnije vožnje i postavki upravljanja pogonskim sustavom SPORT. U gradskom dijelu RDE ciklusa izmjerena emisija CO₂ je isto tako oko 29% veća od vrijednosti izmjerene na WLTP ispitivanju (212 g/km za gradski dio ciklusa). U izvangradskoj vožnji razlika emisije CO₂ u odnosu na WLTP vrijednost (133 g/km) iznosi oko 40%. Specifična emisija NO_x izmjerena za ukupnu vožnju tijekom Test 3 veća za 74,34 % u odnosu na RDE vrijednost navedenu na stranici proizvođača (7,6 mg/km NO_x) [27].

Provjera ukupne dinamičnosti vožnje metodom pomičnog prozora provedena je sukladno Uredbi, pri čemu za svaki tip vožnje, najmanje 50% prozora mora biti unutar tolerancija definiranih za CO₂ karakterističnu liniju. Provjerom ukupne dinamičnosti vožnje za Test 3 zaključeno je da vožnja zadovoljava u svim kriterijima dinamičnosti pri čemu za sva tri tipa vožnje, gradsku, izvangradsku i vožnju autocestom sve izmjerene vrijednosti zadovoljavaju odnosno svih 100% prozora je obrađeno u rezultatima emisija što je prikazano na Slici 44.



Slika 44. Provjera ukupne dinamičnosti vožnje metodom pomičnog prozora za Test 3

Profil brzine za test 3 prikazan je na Slici 45.



Slika 45. Profil brzine vozila za Test 3

5.1.4. Utjecaj duljine ispitne rute na emisije štetnih tvari izmjenjenih u stvarnim uvjetima vožnje

Utjecaj duljine ispitne rute na emisije štetnih tvari izmjenjenih u stvarnim uvjetima vožnje analiziran je za ukupno prijeđeni put i posebno za svaki od segmenata vožnje, gradsku, vangradsku i vožnju autocestom. Analiza je provedena za emisije ugljikovog dioksida, ugljikov monoksid te emisije dušikovih oksida.

5.1.4.1. Utjecaj duljine ispitne rute na emisije CO₂ za ukupno prijeđeni put

Udio duljine ispitne rute izražen je za svaki od testova u postotnom iznosu. Vrijednosti udjela se kreću od 30% do 100% pri čemu je 100% udaljenost prijeđena tijekom ispitivanja za svaki od testova. Za test 1 100% prijeđenog puta odgovara udaljenosti od 85,51 km, za test 2 100% prijeđenog puta jednako je 87,89 km, dok je za test 3 ukupno prijeđeni put 85,35 km. Rezultati utjecaja odnosno skraćanja ukupno prijeđenog putna na emisije CO₂ za sva tri testa kao i srednja vrijednost izračunata za sva tri testa navedeni su Tablici 17. i grafikonom na Slici 46.

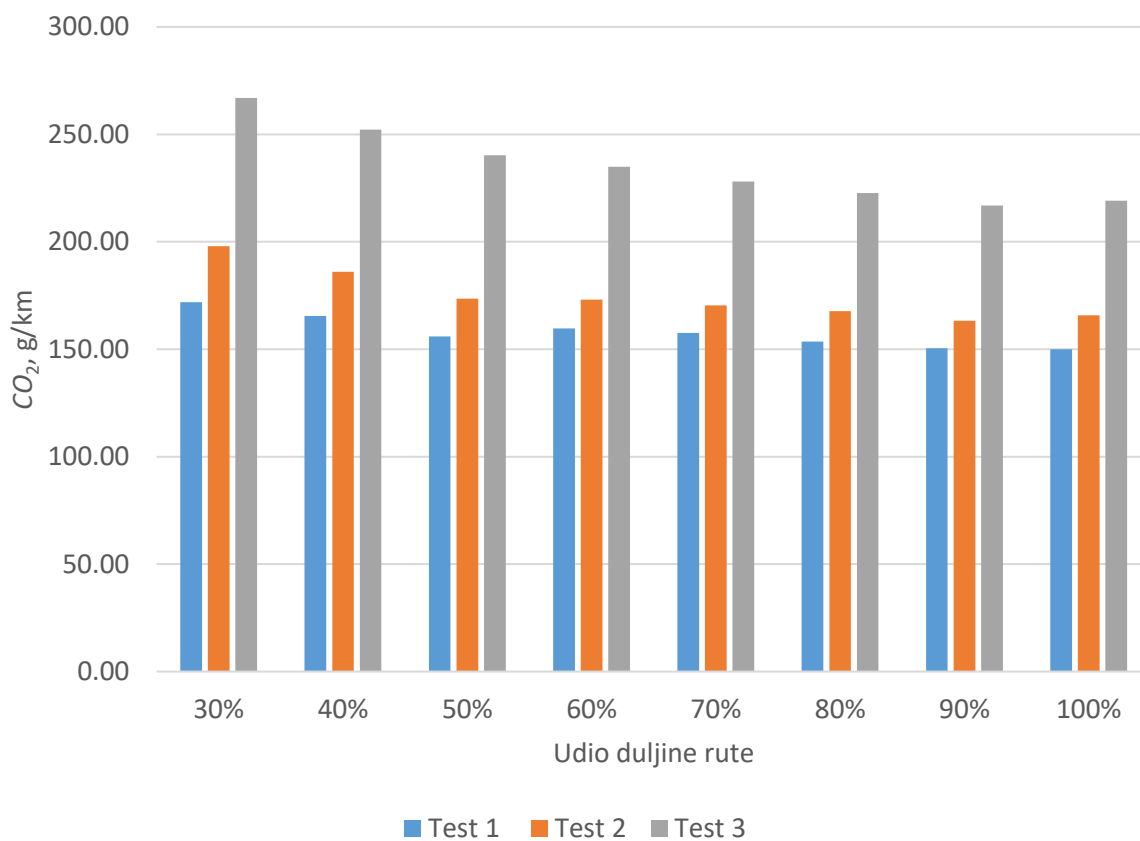
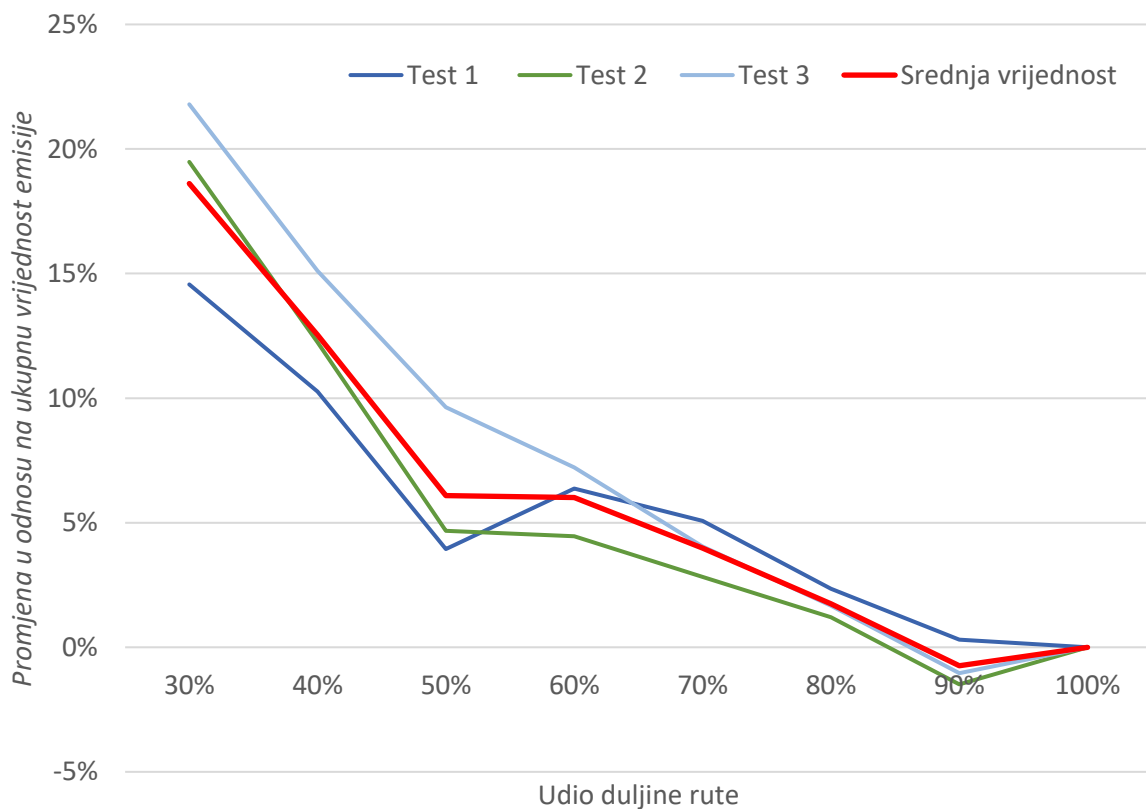
Tablica 17. Utjecaj duljine rute na emisije CO₂ izražene u g/km

Udio duljine rute, %	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Test 1	171.91	165.46	155.97	159.61	157.66	153.58	150.51	150.05
Test 2	198.02	186.03	173.49	173.13	170.43	167.74	163.27	165.74
Test 3	266.89	252.23	240.24	234.95	227.99	222.77	216.85	219.13
Srednja vrijednost	212.27	201.24	189.90	189.23	185.36	181.37	176.88	178.31

Promjena emisije CO₂ u odnosu na vrijednost cjelokupne vožnje za pojedini test navedeni su u Tablici 18. Najmanja odstupanja (do 0,3% za Test 1) dobivena su za 90% prijeđenog puta, dok su najveća (21,8% za Test 3) za najkraći put odnosno 30% ukupno prijeđenog puta. Skraćenje ispitne rute za 20% utječe do oko 2% na emisije CO₂, dok skraćanjem od 50% i više taj utjecaj raste prosječno na preko 6% u odnosu na vrijednost cjelokupnog testa.

Tablica 18. Promjena emisije CO₂ u odnosu na emisiju izmjerenu za cjelokupnu vožnju

Udio duljine rute, %	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Test 1	14.56%	10.27%	3.95%	6.37%	5.07%	2.35%	0.30%	0.00%
Test 2	19.48%	12.24%	4.68%	4.46%	2.83%	1.21%	-1.49%	0.00%
Test 3	21.79%	15.10%	9.63%	7.22%	4.04%	1.66%	-1.04%	0.00%
Srednja vrijednost	18.61%	12.54%	6.09%	6.02%	3.98%	1.74%	-0.74%	0.00%

Slika 46. Utjecaj duljine rute na emisije CO₂Slika 47. Promjena emisije CO₂ s duljinom rute

5.1.4.2. Utjecaj duljine ispitne rute na emisije NO_x za ukupno prijeđeni put

Udio duljine ispitne rute izražen je za svaki od testova u postotnom iznosu. Vrijednosti udjela se kreću od 30% do 100% pri čemu je 100% udaljenost prijeđena tijekom ispitivanja za svaki od testova. Za test 1 100% prijeđenog puta odgovara udaljenosti od 85,51 km, za test 2 100% prijeđenog puta jednako je 87,89 km, dok je za test 3 ukupno prijeđeni put 85,35 km. Rezultati utjecaja odnosno skraćanja ukupno prijeđenog putna na emisije NO_x za sva tri testa kao i srednja vrijednost izračunata za sva tri testa navedeni su u Tablici 19. i grafikonom na Slici 48.

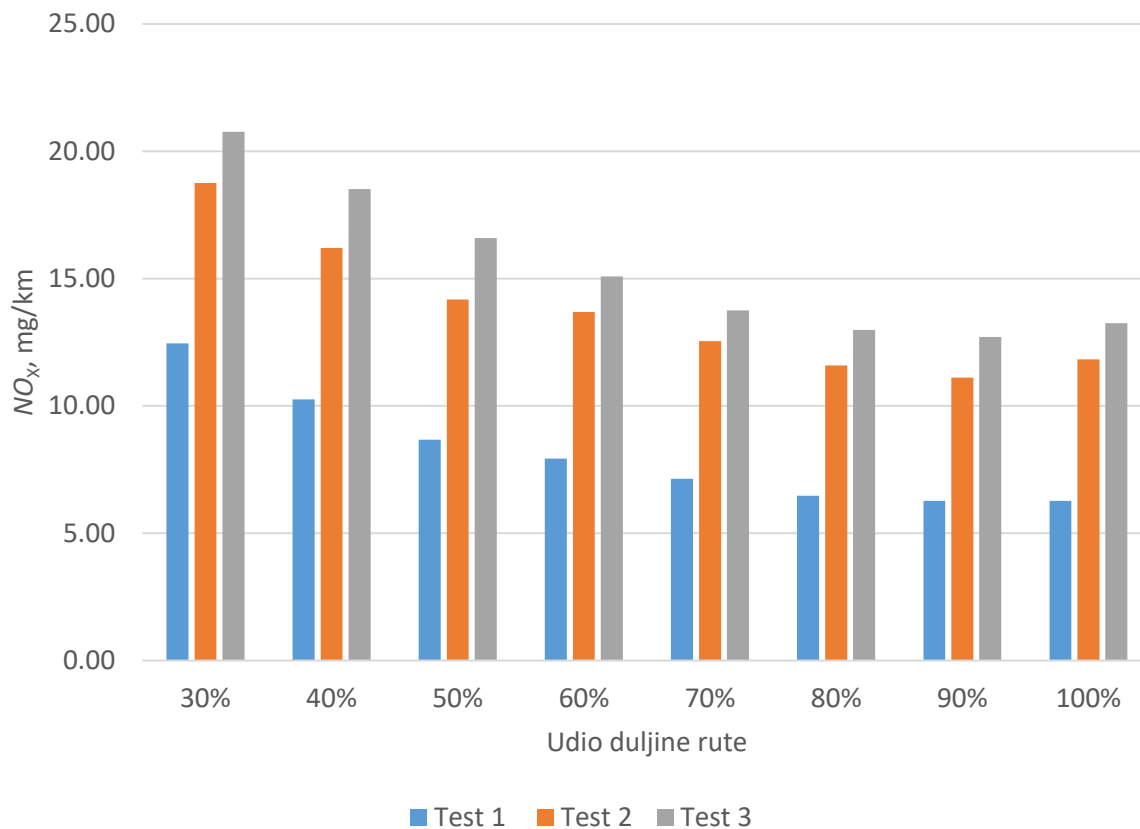
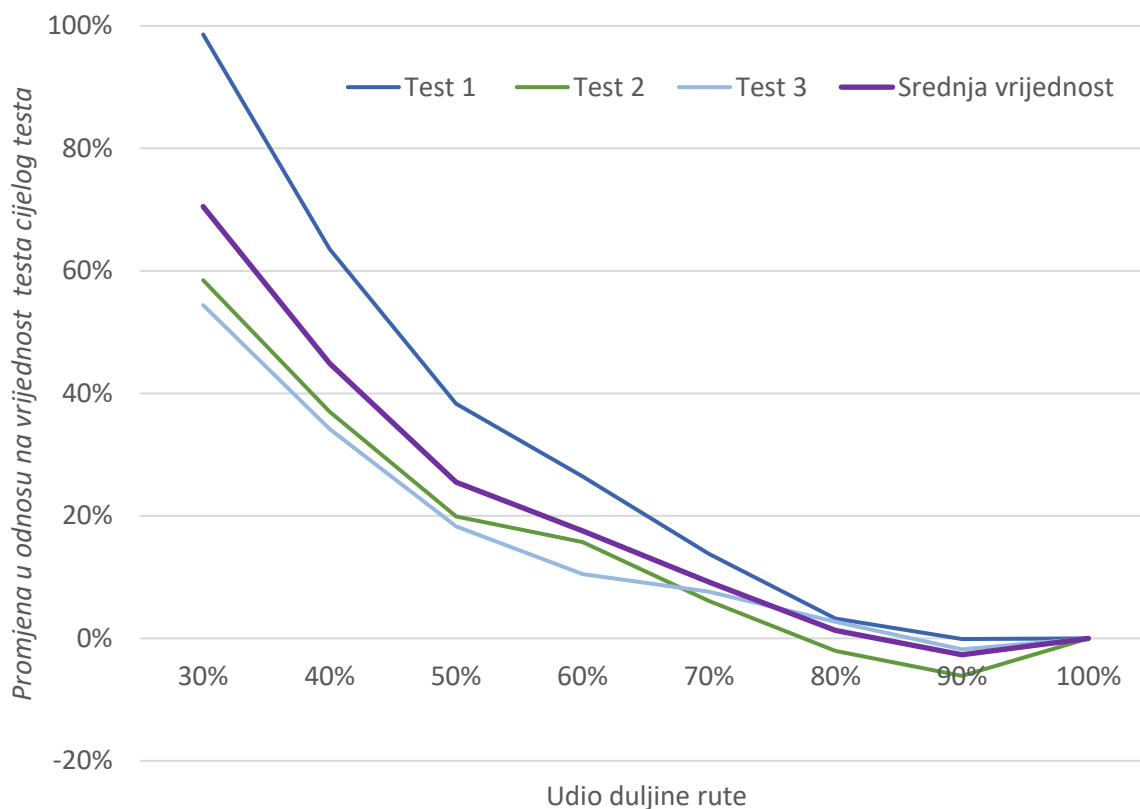
Tablica 19. Utjecaj duljine rute na emisije NO_x izražene u mg/km

Udio duljine rute, %	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Test 1	12.46	10.26	8.68	7.93	7.14	6.47	6.27	6.27
Test 2	18.75	16.20	14.18	13.69	12.55	11.59	11.11	11.83
Test 3	20.77	18.51	16.59	15.09	13.75	12.99	12.70	13.25
Srednja vrijednost	17.32	14.99	13.15	12.24	11.15	10.35	10.03	10.45

Promjene emisija NO_x u odnosu na vrijednost cjelokupne vožnje za pojedini test navedeni su u Tablici 20. Najmanje odstupanje (do 0,1% za Test 1) dobiveno je za 90% prijeđenog puta, dok je najveće (98,6% za Test 1) za najkraći put odnosno 30% ukupno prijeđenog puta. Može se zaključiti da je skraćanjem rute do 80% utjecaj na emisije praktički zanemariv, dok daljnje skraćivanje izaziva značajnu promjenu odnosno porast emisija NO_x.

Tablica 20. Promjena emisije NO_x u odnosu na emisiju izmjerenu za cjelokupnu vožnju

Udio duljine rute, %	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Test 1	98.60%	63.57%	38.32%	26.46%	13.81%	3.22%	-0.11%	0.00%
Test 2	58.48%	36.99%	19.88%	15.73%	6.08%	-2.04%	-6.12%	0.00%
Test 3	54.41%	34.18%	18.29%	10.48%	7.61%	2.70%	-1.79%	0.00%
Srednja vrijednost	70.50%	44.91%	25.50%	17.56%	9.17%	1.30%	-2.67%	0.00%

Slika 48. Utjecaj duljine rute na emisije NO_xSlika 49. Promjena emisije NO_x s duljinom rute

5.1.4.3. Utjecaj duljine ispitne rute na emisije CO za ukupno prijeđeni put

Udio duljine ispitne rute izražen je za svaki od testova u postotnom iznosu. Vrijednosti udjela se kreću od 30% do 100% pri čemu je 100% udaljenost prijeđena tijekom ispitivanja za svaki od testova. Za test 1 100% prijeđenog puta odgovara udaljenosti od 85,51 km, za test 2 100% prijeđenog puta jednako je 87,89 km, dok je za test 3 ukupno prijeđeni put 85,35 km. Rezultati utjecaja odnosno skraćanja ukupno prijeđenog putna na emisije CO za sva tri testa kao i srednja vrijednost izračunata za sva tri testa navedeni su u Tablici 21. i grafikonom na Slici 50.

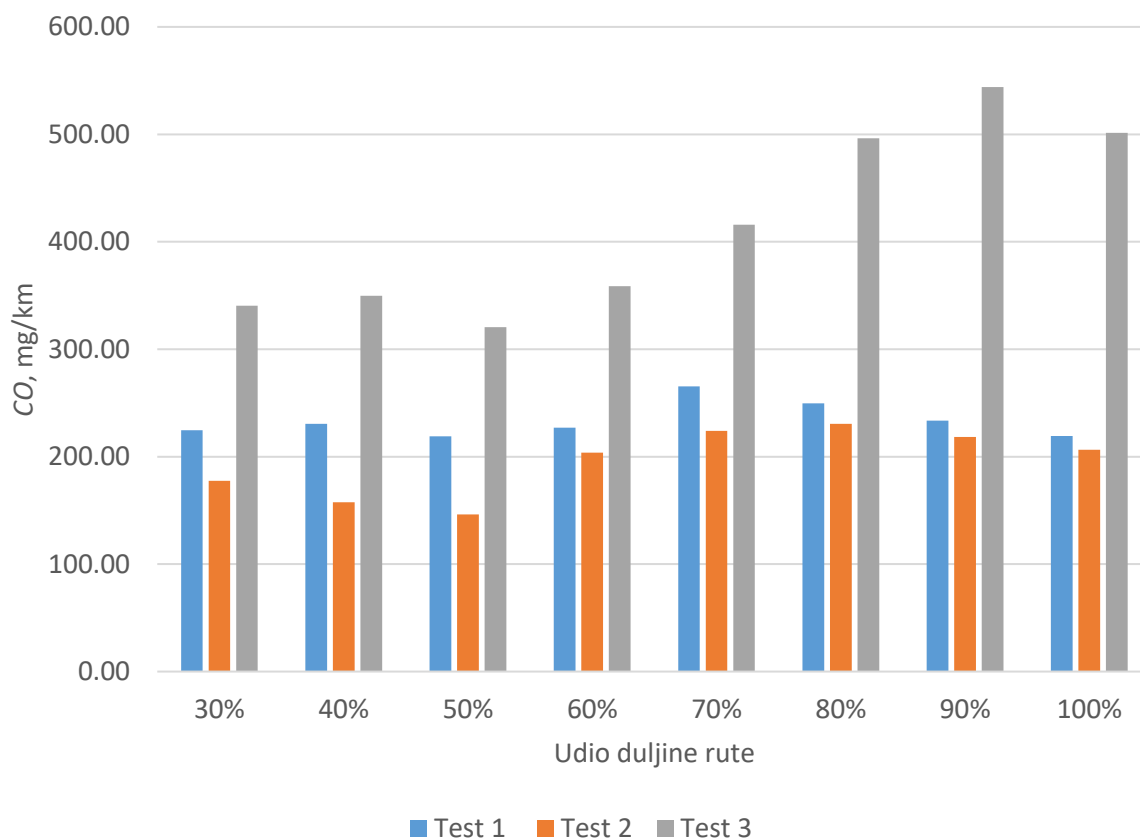
Tablica 21. Utjecaj duljine rute na emisije CO izražene u mg/km

Udio duljine rute, %	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Test 1	224.53	230.48	218.93	226.93	265.46	249.65	233.61	219.17
Test 2	177.67	157.50	146.22	203.69	223.92	230.70	218.26	206.48
Test 3	340.52	349.60	320.63	358.77	415.81	496.21	544.00	501.29
Srednja vrijednost	247.57	245.86	228.60	263.13	301.73	325.52	331.96	308.98

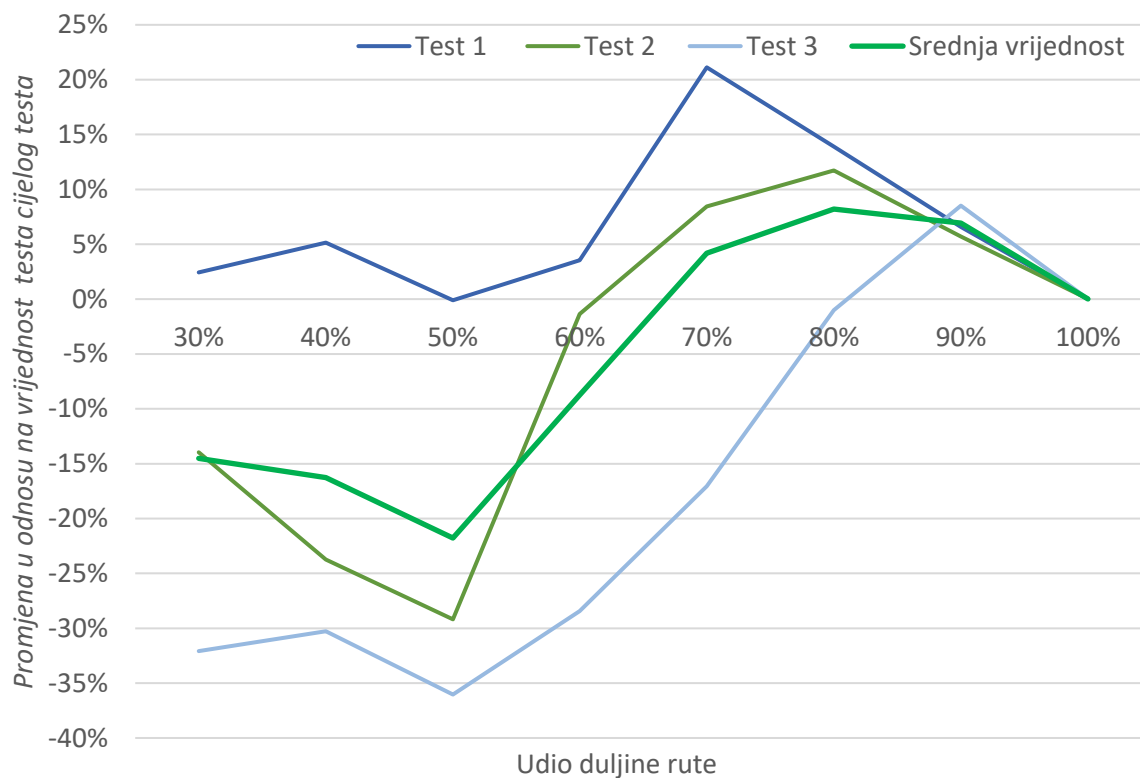
Promjene emisija CO u odnosu na vrijednost cjelokupne vožnje za pojedini test navedeni su u Tablici 22. Najmanje odstupanje (do 1,01% za Test 3) dobiveno je za 80% prijeđenog puta, dok je najveće (36,04% za Test 3) za 50% ukupno prijeđenog puta. Iz prikazanog se može zaključiti da bilo kakvo skraćanje testa utječe na emisije CO odnosno da s tog aspekta nije moguće skratiti ispitnu rutu.

Tablica 22. Promjena emisije CO u odnosu na emisiju izmjerenu za cjelokupnu vožnju

Udio duljine rute, %	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Test 1	2.45%	5.16%	-0.11%	3.54%	21.12%	13.91%	6.59%	0.00%
Test 2	-13.96%	-23.72%	-29.19%	-1.35%	8.45%	11.73%	5.71%	0.00%
Test 3	-32.07%	-30.26%	-36.04%	-28.43%	-17.05%	-1.01%	8.52%	0.00%
Srednja vrijednost	-14.53%	-16.27%	-21.78%	-8.75%	4.17%	8.21%	6.94%	0.00%



Slika 50. Utjecaj duljine rute na emisije CO



Slika 51. Promjena emisije CO s duljinom rute

6. ZAKLJUČAK

Uvođenjem ispitivanja emisija štetnih tvari u stvarnim uvjetima vožnje napravljen je veliki napredak u mjerenju emisija ispušnih plinova vozila u usporedbi s laboratorijskim ispitivanjima koja ne mogu adekvatno reproducirati uvjete u kojima se vozilo nalazi tijekom njegovog radnog vijeka. Postupnim definiranjem ispitnog ciklusa u stvarnim uvjetima vožnje razvijen je postupak koji, koliko to mogućnosti dopuštaju, odgovara stvarnoj eksploataciji vozila na cestama.

Obzirom da se radi o ispitivanju koje se provodi na cestama gdje različiti faktori imaju utjecaj na ispitne rezultate, nužno je definirati granične vrijednosti i uvjete koji ispitni ciklus proglašavaju valjanim, odnosno zadovoljavajućim. Razlozi tome su, osim pokušaja standardizacije samog procesa ispitivanja, sprječavanje mogućih pogrešnih i nepouzdanih rezultata ispitivanja. Kroz godine se uvjeti i granične vrijednosti ispitne rute mijenjaju kako se pronalaze bolje mjerne metode i postupci koji bi osigurali, u što većoj mjeri, ponovljivost ispitivanja.

Analizom današnjih mjernih uređaja i metoda mjerenja može se zaključiti kako Europska Komisija i Zajednički Istraživački Centar (JRC) kontinuirano rade na poboljšavanju istih i njihovom usklađivanju s tehnološkim napretkom u automobilskoj industriji. No, kako pokazuju istraživanja vezana uz ponovljivost i vanjske utjecaje na ispitivanje emisija štetnih tvari u stvarnim uvjetima vožnje, vrlo je teško postići ponovljivost ili bilo koju vrstu uniformnosti kod ovakvih ispitivanja. Uzrok tome jest preveliki broj vanjskih utjecaja koje je vrlo teško regulirati, a neke je i potpuno nemoguće, npr. stanje na cestama (kao i stanje cesti), vremenski uvjeti te ponašanje vozača koji provodi ispitivanje.

U sklopu rada proučena su istraživanja koja se bave utjecajem različitih aspekata (duljine ispitne rute, tipa vožnje i trajanja vožnje), ali su napravljena i vlastita ispitivanja utjecaja tipa vožnje i duljine ispitne rute na rezultate ispitivanja u stvarnim uvjetima vožnje. Navedena su pokazala kako je sa današnjim graničnim vrijednostima i uvjetima valjane ispitne rute nemoguće osigurati ponovljivost rezultata ispitivanja u stvarnim uvjetima vožnje. Bez obzira na to, ovakva ispitivanja imaju i imat će veliku ulogu u smanjenju emisija štetnih tvari iz vozila. Daljnja pooštrevanja graničnih vrijednosti ispitivanja ili uvođenja novih politika za promicanje nižih emisija, kao i bolja kontrola utjecaja pojedinog dijela ispitne rute (npr. hladni start) te definiranje ponašanja u vožnji samih vozača (standardizirane ispitne rute i obrasci vožnje) samo su neki od mogućih mjera koje bi mogle osigurati bolju kvalitetu i veću točnost dobivenih rezultata mjerenja.

LITERATURA

- [1] <https://www.britannica.com/technology/automobile/History-of-the-automobile>
- [2] hedgescompany.com/blog/2021/06/how-many-cars-are-there-in-the-world/
- [3] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=17109>
- [4] Keška, A., Janicka, A.: Determination of volatile organic compounds for combustion engines compliant with Euro 4 and Euro 6, Proceedings of ECOpole, 2017.
- [5] Uredba 91/441/EEC, Vijeće Europske Unije, 1991. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A31991L0441&qid=1680547377345>
- [6] <https://eur-lex.europa.eu/homepage.html>
- [7] <https://www.wltpfacts.eu/>
- [8] <https://www.caremissionstestingfacts.eu/>
- [9] <https://www.transportpolicy.net/standard/eu-light-duty-real-driving-emissions/>
- [10] Ilinčić, P.: Prijenosni sustav za mjerenje emisija – PEMS, FSB, 2018.
- [11] <https://www.avl.com/en/testing-solutions/all-testing-products-and-software/emission-analysis-and-measurement/avl-move>
- [12] <https://www.horiba.com/int/automotive/applications/emissions-performance-and-durability/exhaust-emissions/pems-testing/>
- [13] https://sensors-inc.com/Applications/Vehicle_Emissions/Light_Duty_PEMS
- [14] Mendes, L. B., Ogink, N. W., Edouard, N., Van Dooren, H. J. C., Tinôco, I. D. F.F., Mosquera, J.: NDIR gas sensor for spatial monitoring of carbon dioxide concentrations in naturally ventilated livestock buildings, Sensors, 2015.
- [15] <https://instrumentationtools.com/chemiluminescence/>
- [16] <https://airloq.flsmidth.com/shop/ultraviolet-light-uv-548c1.html>
- [17] <https://www.avl.com/en/testing-solutions/all-testing-products-and-software/emission-analysis-and-measurement/avl-move>
- [18] Giechaskiel, B.; Casadei, S.; Rossi, T.; Forloni, F.; Di Domenico, A., Measurements of the Emissions of a “Golden” Vehicle at Seven Laboratories with Portable Emission Measurement Systems (PEMS), Sustainability, 2021.
- [19] Giechaskiel B., Valverde V., Clairotte M., Real Driving Emissions (RDE): 2020 assessment of Portable Emissions Measurement Systems (PEMS) measurement uncertainty, EUR 30591 EN, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2021.

- [20] Giechaskiel B., Lähde T., Melas Anastasios D., Valverde V., Clairrotte M., Uncertainty of laboratory and portable solid particle number systems for regulatory measurements of vehicle emissions, *Environmental Research*, Volume 197, 2021.
- [21] Uredba Komisije (EU) 2018/1832, Europska Komisija 2018. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/GA/TXT/?uri=CELEX:32018R1832>
- [22] Giechaskiel, B.; Valverde, V.; Kontses, A.; Suarez-Bertoa, R.; Selli, T.; Melas, A.; Otura, M.; Ferrarese, C.; Martini, G.; Balazs, A.; Andersson, J.; Samaras, Z.; Dilara, P., Effect of Extreme Temperatures and Driving Conditions on Gaseous Pollutants of a Euro 6d-Temp Gasoline Vehicle., *Atmosphere*, 2021.
- [23] Giechaskiel, B.; Valverde, V.; Kontses, A.; Melas, A.; Martini, G.; Balazs, A.; Andersson, J.; Samaras, Z.; Dilara, P. Particle Number Emissions of a Euro 6d-Temp Gasoline Vehicle under Extreme Temperatures and Driving Conditions. *Catalysts*, 2021.
- [24] Donato, T. and Giovinazzi, M., "Some Repeatability and Reproducibility Issues in Real Driving Emission Tests," SAE Technical Paper, 2018.
- [25] <https://www.bmw.hr/hr/index.html>
- [26] <https://www.dubizzle.com/blog/cars/bmw-driving-modes>
- [27] <https://aos.bmwgroup.com/web/oss/service/real-driving-emissions>

PRILOZI

I. CD-R disc