Postupak mjerenja emisije štetnih produkata izgaranja iz motora s unutarnjim izgaranjem

Mandić, Marko

Undergraduate thesis / Završni rad

2014

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:235:849552

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-27**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marko Mandić

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Postupak mjerenja emisije štetnih produkata izgaranja iz motora s unutarnjim izgaranjem

Student:

Marko Mandić

Zagreb, 2014.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu. Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Zoranu Luliću i asistentu dr.sc. Goranu Šagiju na ukazanoj pomoći i savjetima.

Marko Mandić

Slika završnog rada

Sadržaj

1. Uvod 1
2. Homologacija motornih vozila 3
2.1. Provjera homologacijske podobnosti vozila 3
2.2. Zakonske osnove homologacije motornih vozila u RH 3
2.3. Homologacija i ispitivanje ispušnih plinova 4
3. Štetne tvari u ispušnim plinovima 6
4. Tehnologije za smanjivanje emisije 15
4.1. Ottov motor 15
4.2. Dieselov motor 19
5. Analiza direktiva 25
5.1. Ottov motor 29
5.2. Dieselov motor 31
6. Mjerna oprema 37
6.1. Stacionarni analizatori 38
6.2. Prijenosni analizatori 47
6.3. Vage za mjerenje potrošnje goriva i mjerači temperature 50
6.4. Kočnice za mjerenje snage i momenta 54
7. Smjernice pravilnika R-83 za mjernu opremu 57
7.1. Oprema za mjerenje ispušnih plinova 57
7.2. Oprema za mjerenje mase čestica 59
7.3. Oprema za mjerenje broja čestica 60
8. Ispitni ciklusi 62
8.1. NEDC 63
8.2. Kritika NEDC ciklusa 65
8.3. WLTC ciklus 67
8.4. Artemis ispitni ciklus 71
9. Proračun emisija 74
9.1. Proračun volumena 74

9.2. Ukupna masa emitiranih zagađivača 75
9.3. Određivanje emisije čestica 78
9.3.1. Masena emisija čestica 78
9.3.2. Određivanje broja čestica 80
9.4. Dijagram toka proračuna emisije 81
10. Zaključak 82
11. Prilog 83
12. Literatura 85

Popis slika

Slika 2.1 Grafički prikaz homologacije i Direktiva [26] 4
Slika 3.1 CO_2 standardi 7
Slika 3.2 Usporedba država u emisiji CO_2 iz osobnih vozila [14] 9
Slika 3.3 Usporedba emisije CO2 po proizvođačima [17] 9
Slika 4.1 Tipovi ubrizgavanja kroz povijest 16
Slika 4.2 Trokomponentni katalizator[5] 17
Slika 4.3 Pretvorba ispušnih plinova u trokomponentnom katalizatoru kao funkcija faktora zraka [10] 18
Slika 4.4 Prikaz rada lambda sonde [10] 18
Slika 4.5 Prikaz troškova sustava za kontrolu emisije [9] 19
Slika 4.6 Common rail sustav [32] 20
Slika 4.7 EGR sustav[3] 21
Slika 4.8 SCR sustav 23
Slika 4.9 DPF filter čestica 24
Slika 5.1 Prikaz dopuštenih emisija prema EURO normama [5] 25
Slika 5.2 Nepročišćeni sastav ispušnih plinova kod Ottovog motora [3] 29
Slika 5.3 Kratki prikaz poboljšanja kroz norme-Otto 30
Slika 5.4 Nepročišćeni sastav ispušnih plinova kod Dieselovog motora [3] 31
Slika 5.5 Kratki prikaz poboljšanja kroz norme - Diesel 33
Slika 5.6 Dopuštena emisija kod Dieselovog motora kroz norme [5] 35
Slika 6.1 Pojednostavljena shema uređaja za mjerenje štetnih emisija [5] 37
Slika 6.2 Horiba uređaji kroz povijest [30] 39
Slika 6.3 Mjerenje dušikovih spojeva izvan motora [30] 40
Slika 6.4 EGR mjerenje [30] 40
Slika 6.5 EGR mjerenje u više točaka [30] 41
Slika 6.6 FID sustav 42
Slika 6.7 CLD sustav (izvor: cambustion.com) 42
Slika 6.8 AVL AMA i60 [29] 43
Slika 6.9 Tehnički podaci AVL AMA i60 [29] 44
Slika 6.10 FEV EmissionRate FEVER [31] 45
Slika 6.11 Prikaz modula FEV FEVER [31] 46
Slika 6.12 Tehnički podaci za FEV FEVER [31] 46
Slika 6.13 Horiba MEXA 584L [30] 47
Slika 6.14 Izvadak iz Horiba uputstva za 584L [30] 48
Slika 6.15 AVL SORE GEM EOL sustav [29] 49
Slika 6.16 Horiba FFM-1100 [30] 50
Slika 6.17 AVL Fuel mass flow meter and Fuel temperature control [29] 52
Slika 6.18 Shema spajanja kočnice 54
Slika 6.19 Kočnica na FSB-u 55
Slika 6.20 Prikaz kompletnog ispitnog laboratorija sa svom mjernom opremom [9] 56

Slika 8.1 Prikaz NEDC ispitnog ciklusa [33] 64
Slika 8.2 Prikaz realnih uvjeta vožnje [11] 64
Slika 8.3 Prikaz kako proizvođači optimiziraju vozilo za test [18] 66
Slika 8.4 Prikaz usporedbe potrošnje NEDC ciklus - realni uvjeti (Golf, 90 kW, 2010.) [13]. 67
Slika 8.5 WLTC ciklus - Klasa 1[33] 68
Slika 8.6 WLTC ciklus - Klasa 2[33] 69
Slika 8.7 WLTC ciklus - Klasa 3[33] 70
Slika 8.8 Tri segmenta Artemis ciklusa [33] 72

Popis tablica

Tablica 3.1 Prikaz djelovanja ispušnih plinova na čovjeka *13*
Tablica 3.2 Prikaz djelovanja ispušnih plinova na biljke *14*
Tablica 5.1 Kategorije vozila [2] *26*
Tablica 5.2 Popis normi i direktiva *27*
Tablica 6.1 Tehnički podaci za FFM-1100 [30] *51*
Tablica 6.2 Tehnički podaci za AVL Fuel Mass Flow Meter and Fuel Temperature Control [29] *53*
Tablica 8.1 Karakteristike ispitnih ciklusa *62*
Tablica 8.2 Karakteristike WLTC ciklusa - Klasa 1 ..... *69*
Tablica 8.3 Karakteristike WLTC ciklusa - Klasa 2 ..... *70*
Tablica 8.4 Karakteristike WLTC ciklusa - Klasa 3 ..... *71*
Tablica 8.5 Karakteristike Artemis ciklusa *73*

Popis kratica

EZ	Europska Zajednica
EU	Europska Unija
UNECE	*United Nations Economic Commission for Europe*
NEDC	*New European Driving Cycle*
ECE	*Economic comission for Europe*
EC	*European comission*
RH	Republika Hrvatska
EOBD	*European on-board diagnostics*
MPFI	*Multi point fuel injection*
GDI	*Gasoline direct injection*
EGR	*Exhaust gas recieculation*
ECU	*Electronic control unit*
PM	*Particulate matter*
LNT	*Lean NOx trap*
SCR	*Selective catalytic reduction*
DPF	*Diesel particulate filter*
DC	*Direct current*
FID	*Flame ionisation detector*
CLD	*Chemiluminescence detector*
PMD	*Particulate matter detector*
SORE	*Small off road engines*
CFV	*Clean fuel vehicle*
CFO	*Critical flow orifice*
VPR	*Volatile particle remover*
MVEG-A	*Motor vehicle emission group*
ICCT	*The international council on clean transportation*
ADAC	*Allgemeiner Deutscher automobil club*
WLTC	*Worldwide harmonized light vehicle test cycle*

Popis oznaka

Oznaka	**Jedinica**
P_B	kPa
P_1	kPa
T_P	K
M_i	g/km
V_{mix}	l/test
Q_i	g/l
kh	
C_i	ppm
d	km
C_e	ppm
C_d	ppm
DF	
H	g_{H2O}/kg_{zrak}
R_a	%
P_d	kPa
PB	kPa
V_{ep}	l/test
P_e	g
M_p	g/km
V_{ap}	l/test
P_a	g
N	
k	
C_s	ppm
f_r	ppm
T	s
f	Hz

Sažetak

Trend porasta potražnje za automobilima i cestovnim načinom prijevoza razumljiv je ako uzmemo u obzir porast populacije i pojavu urbanizacije u svim dijelovima svijeta. Unatoč stagnaciji proizvodnje osobnih vozila posljednjih godina, njihov broj se ipak iz godine u godinu značajno povećava. Takvo kretanje tržišta cestovnih vozila utjecalo je i na donošenje raznih regulativa i pravilnika kako bi se smanjio negativan utjecaj na okoliš. Osim što regulative prvenstveno postoje kao zakonski okvir za smanjenje emisije CO_2 i štetnih ispušnih plinova, njihova sekundarna zadaća je svakako poticanje automobilske industrije na daljnja istraživanja i ulaganja u područjima razvoja motornih pogona i agregata.

U ovom radu je stavljen naglasak na analizu normi vezanih za ispušne plinove osobnih vozila. Dan je pregled tehnologija koje se koriste kod Ottovih i Dieselovih motora kako bi zadovoljili propise. Također, glavni fokus je stavljen na mjernu opremu za ispitivanje emisije ispušnih plinova. Spomenuti su zahtjevi za mjernu opremu propisani pravilnicima te je opisan postupak izračuna potreban da bi se izmjereni podaci prikazali u jedinicama određenim propisom. Napravljen je osvrt i kritika na postojeće cikluse ispitivanja vozila te je dan pregled budućih najavljivanih ciklusa i alternativa.

1. Uvod

Količina onečišćujućih tvari koje se emitiraju u zrak znatno je smanjena otkad je Europska unija (EU) 1970-ih uvela politike i mjere koje se odnose na kvalitetu zraka. Emisije tvari koje onečišćuju zrak iz mnogih značajnih izvora, poput prometa, industrije i proizvodnje struje, sad su regulirane i općenito su u opadanju, iako ne uvijek do predviđenih okvira. Jedan od načina pomoću kojih je EU postigla to poboljšanje jest postavljanje pravno obvezujućih i neobvezujućih ograničenja za određene onečišćujuće tvari koje se raspršuju zrakom i to na razini cijele Europske unije. EU je postavila standarde za lebdeće čestice određenih veličina, ozon, sumporni dioksid, dušikove okside, olovo i druge onečišćujuće tvari koje mogu imati štetan učinak na ljudsko zdravlje ili ekosustave. Način na koji EU donosi odluke jest da u skladu s Ugovorom o Europskoj zajednici, kroz aparate kao što su Europski parlament i Vijeće Europe, donese na snagu direktive, uredbe i odluke ili se koristi neobvezujućim pravnim aktima kao što su preporuke i mišljenja.

Direktiva je, uz uredbu, najvažniji pravni akt Europske unije. Direktiva je zakonodavni akt kojim se utvrđuje cilj koji sve države članice EU-a moraju ostvariti. Međutim, svaka država samostalno odlučuje o načinu. Za razliku od uredbe, Direktiva služi približavanju, a ne potpunom ujednačavanju prava država članica. Zato se Direktivom zadaje cilj koji se mora postići, dok su države članice obvezne prenijeti Direktivu u svoj nacionalni sustav, birajući pritom formu (zakon, podzakonski akt i sl.). Bitno je da akt kojim se ona prenosi ima pravno obvezujuću snagu, te da država za pojedince (fizičke i pravne osobe) nad kojima je nadležna, stvori ona prava i obveze koja su im Direktive namijenile. Iako direktive u pravilu obvezuju temeljem nacionalnih mjera implementacije, Europski je sud smatrao da i u slučaju propusta države da ispravno uvrsti direktivu u interno pravo i one mogu biti izravno primjenjene pred nacionalnim institucijama, posebice sudovima i upravnim tijelima, ako su njima predviđena prava za pojedince - pravne i fizičke osobe. Ukoliko država članica ne poduzme potrebne mjere kako bi nacionalno zakonodavstvo ostvarivalo ciljeve direktive, Komisija protiv nje može pokrenuti postupak pred Sudom pravde kako bi je obvezala da uskladi nacionalne propise s direktivom. Isti postupak bit će pokrenut i protiv države koja, iako je izmijenila nacionalno zakonodavstvo, nije ostvarila ciljeve određene direktivom.

Trenutačno zakonodavstvo EU koje se odnosi na zrak počiva na načelu da države članice EU dijele svoje teritorije na nekoliko zona upravljanja u sklopu kojih se od zemalja zahtijeva da procijene kvalitetu zraka pomoću mjerenja ili modela. Većina se velikih gradova smatra

takvim zonama. Ako se unutar jedne zone prekorače standardi kvalitete, zemlja članica mora o tome obavijestiti Europsku komisiju. Od zemalja se zatim zahtijeva da donesu lokalne ili regionalne planove u kojima definira kako namjeravaju poboljšati kvalitetu zraka. Na primjer, mogli bi uspostaviti tzv. zone niskih emisija s ograničenim pristupom vozilima koja više onečišćuju zrak. Gradovi mogu potaknuti i pomak u načinima prijevoza, potičući hodanje, vožnju bicikla i javni prijevoz koji manje onečišćuju zrak. Također, mogu se pobrinuti da izvori industrijskog i komercijalnog izgaranja budu opremljeni sustavima za naknadnu obradu ispušnih plinova najnovije dostupne tehnologije. Upravo iz tih zahtjeva za uređajima može se ustanoviti kako su vrlo bitni za cijelokupno funkcioniranje kako zaštite okoliša i smanjenja emisija, tako i samog zakonodavstva. Točnost i zahtjevi za mjerne uređaje i ispitne stanice su također dani Direktivama, kako bi se izbjegla nekonzistentnost mjerenja među državama članicama te kao rezultat toga izbjegavanja neujednačenosti zakonodavnih okvira.

2. Homologacija motornih vozila

Tehnički uvjeti za proizvodnju i uvoz motornih vozila i njihovih dijelova propisani su u Zakonu o sigurnosti prometa na cestama. Prema tom zakonu, vozila na motorni pogon i priključna vozila, odnosno njihovi dijelovi i oprema, moraju se podvrgnuti postupku homologacije radi utvrđivanja kompatibilnosti s propisanim uvjetima homologacije. Za homologirana vozila, odnosno njihove dijelove ili opremu, izdaje se potvrda sukladnosti. Nadležna državna ustanova za izdavanje certifikata sukladnosti odnosno homologacijskog lista je Državni zavod RH za normizaciju i mjeriteljstvo. Način na koji se obavlja homologacija objavljen je u Pravilniku o homologaciji vozila. Svi europski propisi za homologaciju vozila temelje se na EU Direktivama. Okvirna Direktiva navodi niz zasebnih tehničkih smjernica koje vozilo mora ispunjavati kako bi se homologiralo. Okvirna direktiva ujedno sadrži ECE Pravilnike koji se smatraju prihvatljivom alternativom određenih EU Direktiva. Sustav homologacije je uveden prvi puta 1970. godine kroz Direktivu 70/156 i postao je obavezan za M1 kategoriju vozila u 1998. godini.

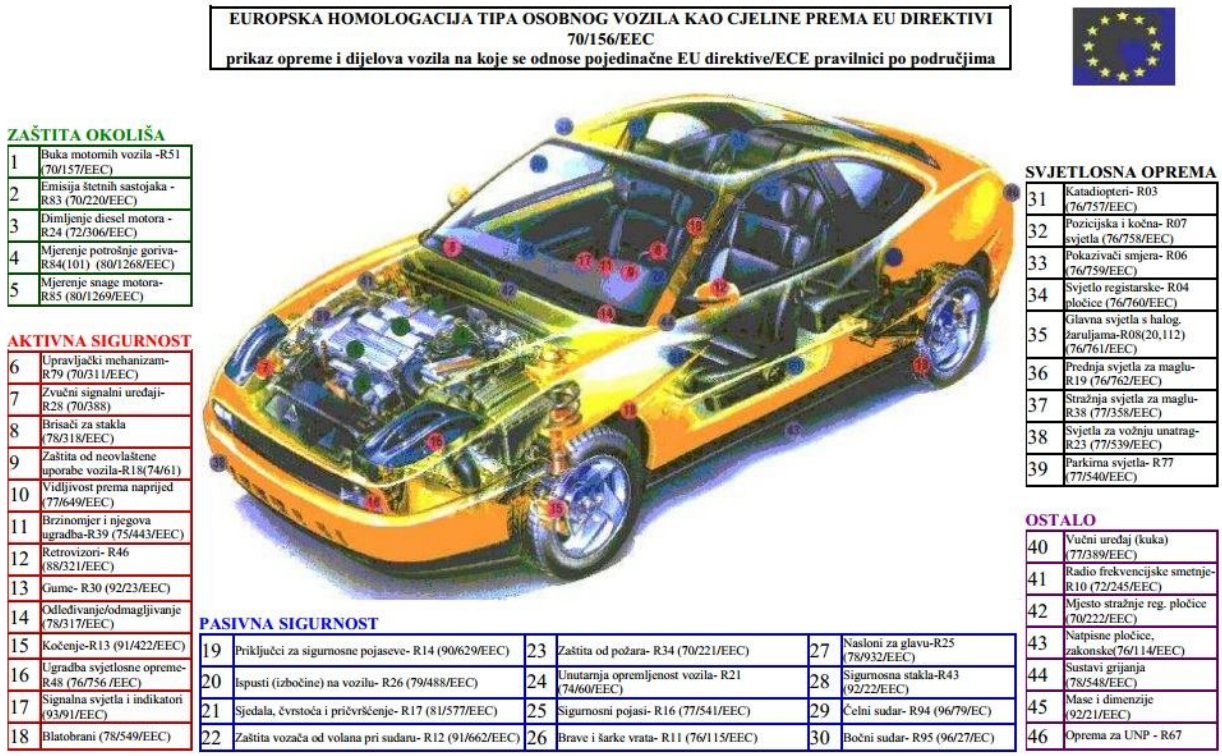
2.1. Provjera homologacijske podobnosti vozila

Postupak je koji se obavlja prije uvoznog carinjenja (samo za vozila koja se ne proizvode u državi uvoza) i kojim se dokazuje da su dijelovi vozila ispitani u skladu s aktualnim europskim pravilnicima ili smjernicama koje su na snazi u državi u koju se vozilo uvozi. Ova provjera ima zadatak spriječiti uvoz sigurnosno i ekološki nepodobnih vozila koja, u trenutku uvoza i prve registracije, ne odgovaraju homologacijskim propisima u zemlji uvoza. Provjerom homologacijske podobnosti vozila se dokazuje da li je vozilo uistinu ispitano u skladu sa europskim homologacijskim pravilnicima ili smjernicama, tj. svim zahtjevima bitnim za sigurnost prometa i zaštitu okoliša. Riječ je prvenstveno o administrativnom postupku tj. uvidom u homologacijsku dokumentaciju i homologacijske oznake na vozilu utvrduje se da li je vozilo homologacijski podobno ili nije.

2.2. Zakonske osnove homologacije motornih vozila u RH

Homologacija motornih vozila u Republici Hrvatskoj zakonsku osnovu ima u Zakonu o sigurnosti prometa na cestama (NN 67/08). Trenutno je u Republici Hrvatskoj na snazi više od 50 homologacijskih pravilnika, a riječ je o ECE pravilnicima Ekonomske komisije i

Ujedinjenih naroda za Europu. Takoder, Republika Hrvatska priznaje homologaciju dijelova vozila obavljenu prema EEC smjernicama Europske unije ukoliko je smjernica sukladna odgovarajućem ECE pravilniku na snazi u RH. Republika Hrvatska je jedna od onih država koja je do sada usvojila najmanje ECE pravilnika, ali to istodobno ne znači da su homologacijski zahtjevi hrvatske države mali. Homologacijski zahtjevi se ne određuju samo brojem usvojenih ECE pravilnika nego i brojem usvojenih amandmana uz svaki pojedini pravilnik.



Slika 2.1 Grafički prikaz homologacije i Direktiva [26]

2.3. ***Homologacija i ispitivanje ispušnih plinova***

Pitanje kvalitete ispušnih plinova se prvi put pojavilo 70-tih godina prošlog stoljeća kad su doneseni prvi pravilnici o ispušnim plinovima za nova vozila. Trend je nastavljen do danas te periodički svakih nekoliko godina na snagu stupaju nove norme određene novim direktivama ili dopunama starijih. Od tada se zahtjev za smanjenje štetnih tvari postrožio za 99% što nas navodi na zaključak da bi se iduće norme mogle fokusirati više na ekonomičnost pri radu motora, a manje na forsiranje uvođenja tehnologija za redukciju emisije. U pravilniku R83, koji ima istovjetan tekst kao 70/220/EEC, definirano je na koji način se provodi

homologacijsko ispitivanje za ispušne plinove. U R83 pravilniku je navedeno 7 tipova ispitivanja koji se razlikuju po vrsti vozila, motora i pogonskog goriva [1].

Tip 1 - Provodi se za M1 i N1 kategoriju vozila s Ottovim i Dieselovim motorom (osobna i laka komercijalna vozila). Pri hladnom pogonu motora ispitivanje se vrši na valjcima po prethodno utvrđenoj krivulji vožnje vozila i rezultat je prosječna emisija ispušnih plinova.
Tip 2 - Samo za vozila s Ottovim motorom M1 i N1 kategorije. Ispituje se emisija ugljik monoksida (CO) pri uvjetima rada motora na brzini vrtnje praznog hoda. Ovakva vrsta ispitivanja slična je EKO testu s glavnom razlikom u tome što se ovo ispitivanje vrši pri kontroliranim uvjetima.
Tip 3 - Samo za vozila s Ottovim motorom M1 i N1 kategorije. Ispitivanje se vrši u tri radne točke, jednom pri praznom hodu i dva puta pri 50 km/h u trećem stupnju prijenosa. Podatak koji se želi dobiti je emisija isparenih plinova iz kućišta motora.
Tip 4 - Provodi se za M1 i N1 kategoriju vozila s Ottovim i Dieselovim motorom. Utvrđuje se emisija ugljikovodikovih para iz vozila u posebnim kondicioniranim komorama koje mogu kontrolirano mijenjati i održavati temperaturu (20 - 34,6 °C u 24h).
Tip 5 - Provodi se za M1 i N1 kategoriju vozila s Ottovim i Dieselovim motorom. Utvrđivanje izdržljivosti sustava za pročišćivanje ispušnih plinova nakon vožnje od 80.000 km. Ispitivanje se može obaviti na probnoj stazi ili na valjcima. Vožnja se odvija po točno utvrđenom postupku, a plinovi se mjere svakih 10.000 km.
Tip 6 - Samo za vozila s Ottovim motorom M1 i N1 kategorije. Odvija se prema gradskom ciklusu utvrđenom u testiranju Tip 1. Utvrđuje se količina neizgorenog ugljik monoksida i ugljikovodika nakon hladnog starta pri temperaturu okoline -7°C.
Tip 7 - EOBD ispitivanje (engl. *European on-board diagnostics*)

3. Štetne tvari u ispušnim plinovima

Kako bi se nekom vozilu omogućio stavljanje na tržište, ono mora zadovoljiti homologacijske propise, između svih ostalih, i za ispušne plinove. Za neke je tipove ispušnih moguće jasno odrediti emisijske faktore, za neke je moguće odrediti samo red veličine, a za ostale toliko malo podataka da se emisijski faktor ne može ni približno odrediti. Iz tog su razloga ispušni plinovi podijeljeni u tri skupine s obzirom na dostupnost pouzdanih podataka vezanih za određivanje emisijskog faktora:

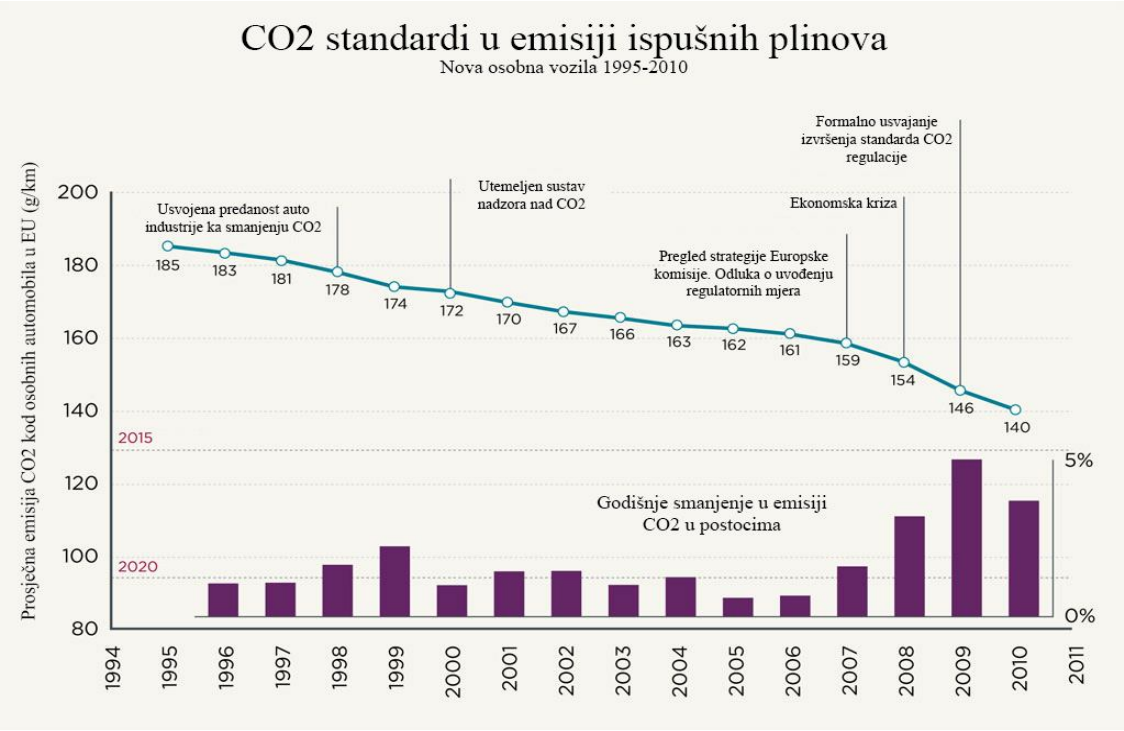
• 1. skupina: uključuje ispušne plinove za koje je moguće odrediti emisijske faktore s visokom sigurnošću
• 2. skupina: uključuje ispušne plinove za koje emisijske faktore ne možemo smatrati reprezentativnima (emisijski faktori dani za ove ispušne plinove moramo uzeti samo kao red veličine)
• 3. skupina: uključuje ispušne plinove za koje postoji vrlo malo dostupnih podataka te nije moguće odrediti emisijske faktore.

Onečišćeni zrak je u suštini smjesa dušika, kisika, plemenitih plinova, ugljik dioksida, metana, dušikovih oksida, vodika, vodene pare i raznih ugljikovodika. Onečišćenje zraka mjeri se kao vrijeme koje je potrebno da polovica količine onečišćivača koji je emitiran u zrak izađe iz atmosfere. To se vrijeme može mjeriti u danima, mjesecima ili čak godinama, ovisno o vrsti zagađivača. Ako su zagađivači nastali iz prirodnih izvora, onda se nazivaju primarnima, a ako je došlo do reakcija sastojaka zraka, to su onda sekundarni onečišćivači. Motorna vozila su primarni onečišćivači zraka, a od svih vrsta prometa, cestovni prednjači u onečišćenju okoliša, i to do 80 % ukupnog onečišćenja okoliša štetnim sastojcima. Najviše kontroverzi izaziva CO_2 i iako nije otrovan za ljude zasigurno je najpoznatija komponenta ispušnih plinova.

Ugljik dioksid CO_2

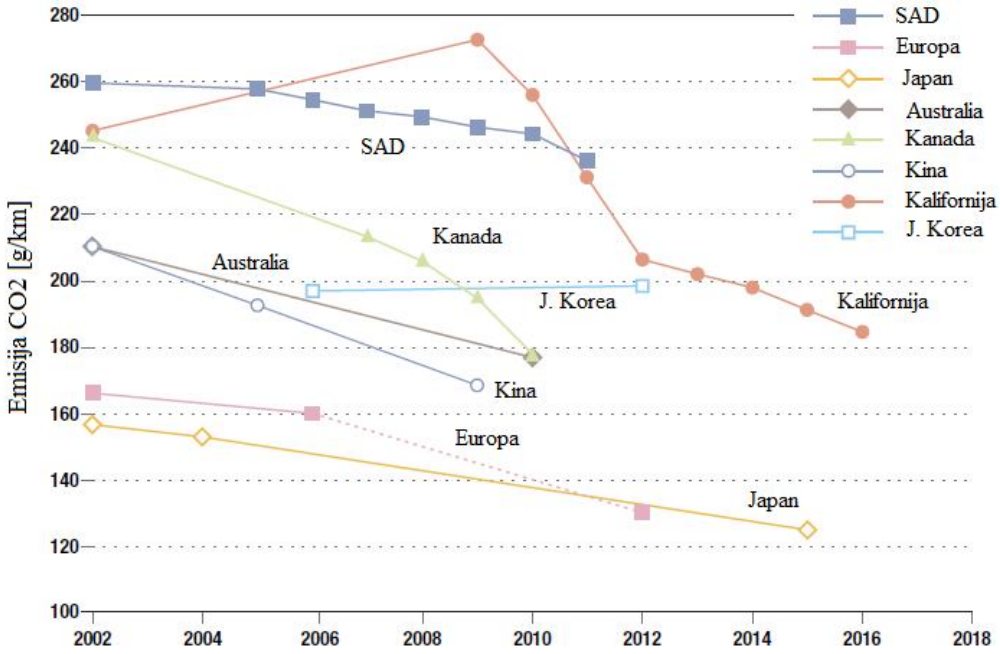
Iako ugljik dioksid nije toksičan plin, njegov negativni utjecaj na okoliš manifestira se kroz nakupljanje u atmosferi, što je pojava poznatija pod nazivom efekt staklenika. Svake godine preko 30 milijardi tona ugljik dioksida se ispušta u atmosferu zbog ljudskih aktivnosti. U Europskoj uniji 12 % cjelokupne emisije ugljik dioksida dolazi od automobila. Upravo radi

tako značajnog udjela samih automobila u emisiji ugljik dioksida, borba za što manju koncentraciju u ispušnim plinovima postala je svojevrstan standard u automobilskoj industriji. Zakon donesen 2009. godine u Europskoj uniji predstavlja temelj strategije za postizanje što manje emisije CO_2 kroz nadolazeće godine. Propisano je da svi novi automobili moraju postići granicu emisije od barem 130 g/km CO_2 do 2015. godine, a daljnji cilj je 95 g/km do 2020. godine. Ciljevi za 2015. i 2020. godinu predstavljaju smanjenje emisije CO_2 u odnosu na 2007. godinu (prosječno 158.7 g/km) za 18 i 40 %. U okvirima potrošnje goriva, cilj je do 2015. postići prosječnu potrošnju od 5,6 l/100 km za vozila s Ottovim motorom i 4,9 l/100km za vozila s Dieselovim motorom. Nadalje, do 2020. je cilj postići potrošnju od 4,1 l/100km za vozila s Ottovim motorom i 3,6 l/100 km za vozila s Dieselovim motorom. Iako je cilj postići granicu emisije od 130 g/km to ne znači da proizvođači neće moći proizvoditi automobile koji imaju emisiju veću od tog broja. Naime, radi se o tome da flota vozila koju proizvođač stavi na tržište mora ukupno postići prosječnu vrijednost emisije CO_2 130 g/km, što znači da veća vozila mogu imati emisiju iznad te granice, a manja vozila imaju emisiju ispod te granice kako bi se postigla kompenzacija. Sam propis neće stupiti na snagu odmah po donošenju, nego je proizvođačima dozvoljena faza prilagodbe koja je počela 2012. kada je samo 65 % proizvedenih vozila u floti trebalo zadovoljiti prosjek emisije. U 2013. je zahtjev narasao na 75%, u 2014. na 80 % i do konačnih 100 % će doći u 2015.

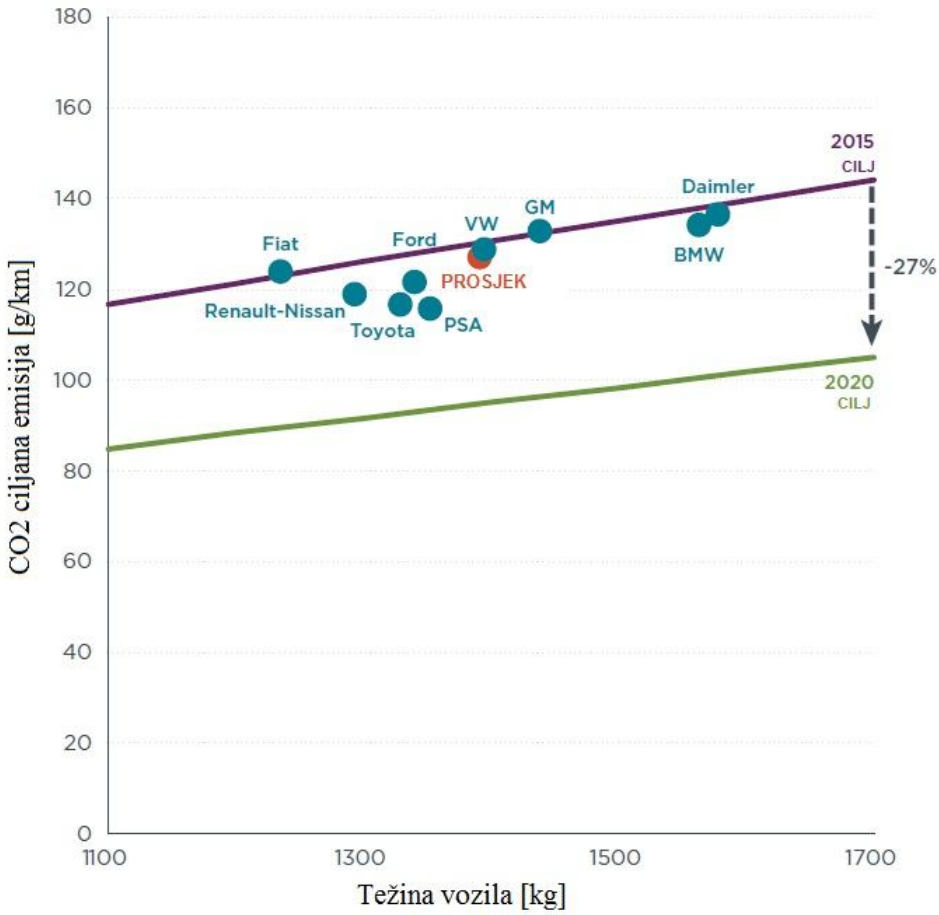


Slika 3.1 CO_2 standardi

Ako se proizvođači ne prilagode novim odredbama Europske unije tada će morati platiti penale za svaki registrirani automobil. Penali su u iznosu od 5€ za g/km prijestupa, zatim za sljedeće prijestupe g/km plaća se 15, 25 te na kraju 95€ za svaki prijeđeni g/km. Od 2019. penali će iznositi 95€ od početnog prijeđenog g/km pa dalje. Osim što postoje penali isto tako postoje i poticaji za proizvodnju automobila s vrlo malom emisijom CO_2 (<50 g/km). Naime, za svaki se automobil, koji zadovoljava te uvjete i proizveden je protekle 2012. i 2013. godine, računa kao da vrijedi za 3,5 automobila. Oni proizvedeni 2014. se vrednuju kao 2,5, a proizvedeni u 2015. kao 1,5 automobil. Od 2016. pa dalje svaki automobil koji zadovoljava uvjete vrednuje se kao još 1 dodatni automobil. Ova mjera bi trebala osigurati proizvođačima automobila olakšanje pri postizanju zadanog prosjeka emisije u njihovoj floti. Proizvođačima je također dozvoljeno udruživanje u svrhu zajedničkog postizanja traženih vrijednosti, ali pritom moraju poštivati pravila tržišnog natjecanja i povjerljivosti izmijenjenih informacija. Mali proizvođači koji godišnje prodaju manje od 10000 vozila mogu predložiti vlastite mjere koje tada idu na razmatranje u Komisiju i mogu se odobriti. Komisija odlučuje ovisno o određenim kriterijima koji također uključuju potencijal proizvođača da smanji emisiju CO_2. Oni koji prodaju između 10000 i 300000 vozila godišnje mogu se prijaviti za fiksno smanjenje emisije za 25% u odnosu na njihove prosječne vrijednosti u 2007. godini. Vozila za posebne namjene, kao što su vozila za pomoć invalidima, se ne smatraju podložni ovim propisima.[27] Propisi Europske unije za regulaciju CO_2 su rigorozni i nameću standard ostalim državama u svijetu, kao što je vidljivo iz grafičkog prikaza.



Slika 3.2 Usporedba država u emisiji CO_2 iz osobnih vozila [14]



Slika 3.3 Usporedba emisije CO2 po proizvođačima [17]

Ugljik monoksid

Ugljik (II) oksid, kao produkt nepotpunog izgaranja, u najvećoj količini prisutan je u području bogate smjese, tj. što je smjesa bogatija to je njegova koncentracija viša. Minimalne vrijednosti CO postižu se za faktor zraka $\lambda=1$, kada je usisana masa zraka jednaka teoretskoj. Ista količina propisana je i zakonom. Ovaj plin je jako štetan po ljudsko zdravlje, stoga se na njega obraća posebna pozornost pri određivanju propisa. Tijekom disanja veže se na hemoglobin i tako onemogućuje kisiku da se absorbira u tijelo te zbog toga ima ulogu u povećavanju stope respiratornih i srčanih bolesti. Zbog njegove velike otrovnosti, ne smije se dopustiti rad motora, odnosno emisija ispušnih plinova u zatvorenim prostorima. Nadalje, pridonosi i globalnom zagrijavanju na način da kemijski reagira u atmosferi i postaje ugljik dioksid.

Ugljikovodici

Ugljikovodici su, također, produkt nepotpunog izgaranja. Sastojci su goriva, koje bi u potpunosti trebalo izgorjeti, ali se u realnim uvjetima izgaranja to nikada ne dogodi, pa se mogu u većoj ili manjoj količini naći u ispušnom plinu motornih vozila. Najmanja koncentracija HC postiže se u području blago siromašne smjese, a što je smjesa bogatija, to je njihova koncentracija (kao i kod CO) veća. Također, i u području naglašeno siromašne smjese njihova se koncentracija u ispušnim plinovima povećava. Pare ugljikovodika djeluju na središnji živčani sustav i imaju narkotičko djelovanje. Niskomolekularni ugljikovodici, koji se nalaze u ispušnim plinovima vozila s Ottovim motorom, djeluju nadražujuće, dok su visokomolekularni ugljikovodici, koje nalazimo kod vozila s Dieselovim motorom, toksični. Ako se HC pri izgaranju ne oksidiraju, mogu nastati različiti aromatski spojevi, koji su toksični, a posebno treba izdvojiti najtoksičniji, benzen. On kod čovjeka može uzrokovati rak krvi i kostiju te razne tumore.

Dušikovi oksidi (NOx)

Kao posljedica pojave visokih temperatura uslijed izgaranja u motoru s unutrašnjim izgaranjem dušik se veže s kisikom iz zraka pritom tvoreći dušikove okside. Osim dušikova(I) oksida (N_2O), svi dušikovi oksidi, prisutni u atmosferi, u manjoj su ili većoj mjeri otrovni i nadražuju ljudske dišne organe. Oni su glavna komponenta zagađenja atmosfere, uključeni u

stvaranje kiselih kiša i fotokemijskoga smoga te stvaranje i razgradnju ozonskoga sloja u stratosferi. U prirodnom ciklusu dušika, dušikovi oksidi su bitna sastavnica nitrifikacije.
Dušikovi oksidi, koji nastaju izgaranjem goriva pri visokim temperaturama, su dušikov oksid (NO) i otrovan dušikov dioksid (NO_2). Kao i prije navedeni plinovi, ovisni su o faktoru zraka. Najveća je koncentracija u području blago siromašne, dok opada u području bogate ili siromašne smjese. Prvi se stvara NO, a zatim NO_2, koji brzo prodire u pluća gdje se spaja s hemoglobinom i proizvodi spojeve koji blokiraju njegovu normalnu funkciju. Posljedice su smanjenje funkcije dišnog sustava i smanjenje otpornosti na infekcije, a u prisutnosti CO ovaj plin izaziva i smrtna trovanja.

Sumpor (IV) oksid

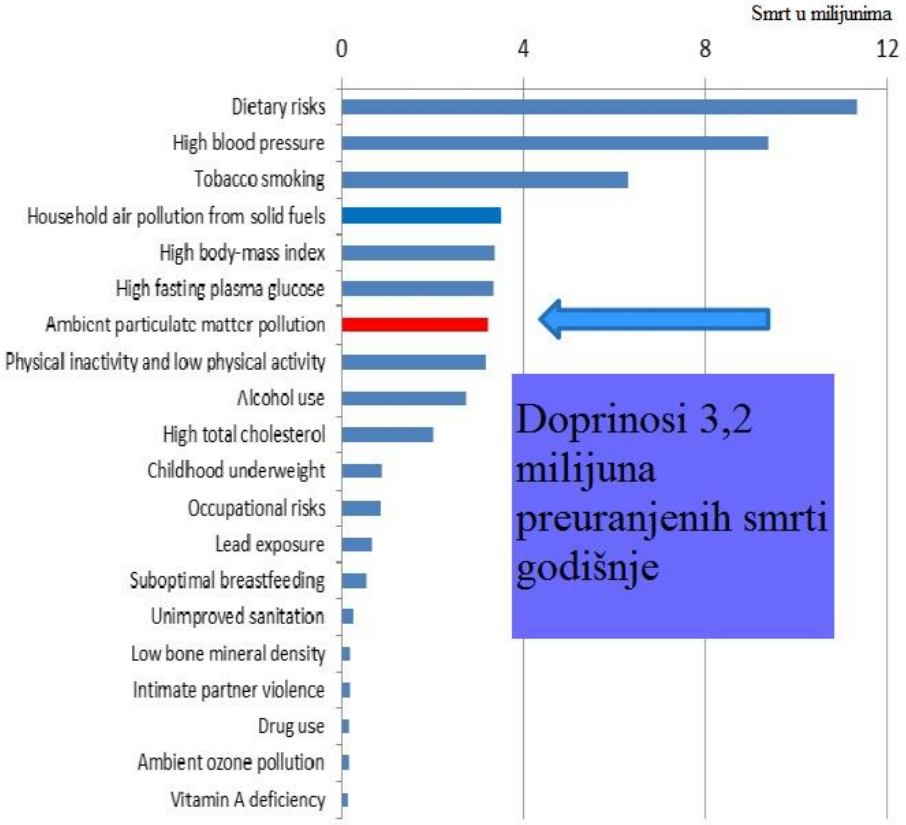
Sumpor (IV) oksid nalazi se u deset puta većoj koncentraciji kod dizelskih u odnosu na benzinske motore, zbog povećane količine sumpora u dizelskom gorivu. Ovaj plin nepovoljno djeluje na čovjeka i biljke te uzrokuje koroziju. Nataloženi sulfati štetno djeluju na ljude, pošto ih čovjek udiše u obliku vrlo sitnih čestica koje pluća ne mogu iskašljati. Uz dim i maglu, SO_2 je glavni uzrok nastajanja "smoga", za biljke i ljude štetne atmosfere koja djeluje korozivno na konstrukcijske materijale, kamen, beton, željezo i druge. Šteti ljudskom organizmu jer oštećuje dišne organe. Posebno je otrovan za niže organizme. S dušikovim oksidima i ozonom stvara smog, a glavni je uzročnik kiselih kiša.

Olovo i njegovi spojevi

Olovo i spojevi olova dodaju se benzinu radi poboljšanja otpornosti na detonacije. Radom motora oslobađaju se oksidi olova, koji se tako mogu naći u prizemnim slojevima zraka te onečistiti okoliš. Olovo, kao i njegovi spojevi, je toksično, a posebno su osjetljivi fetusi, mala djeca i anemične osobe. Da bi se smanjila njegova koncentracija u ispušnim plinovima benzinskih motora i omogućio rad trokomponentnog katalizatora, 2000. godine u EU uvedeni su bezolovni benzini te alternativna goriva.

Čađa i dim

Čađa i dim javljaju se kao problem kod ispušnih plinova vozila s Dieselovim motorom. Čađa je filtrat ispušnih plinova, koji se sastoji od čestica ugljika, a nastaje uz manjak kisika i visoku temperaturu, zbog nepotpunog miješanja goriva i zraka. Ugljikovi spojevi u česticama čađe nisu sami po sebi štetni, ali na sebe vežu različite toksične tvari. Dim je bitno spomenuti zbog ometanja vidljivosti na prometnicama, čime se smanjuje sigurnost u prometu. Veća izloženost čađi u urbanim okruženjima uzrokuje povećani rizik od kardiovaskularnih oboljenja. Također, istraživanja pokazuju da je pojava astme kod djece usko povezana s koncentracijom čađe u zraku. Iz ovih podataka može se zaključiti kako je stroga kontrola emisija čestica potpuno opravdana te da ne čudi osnivanje raznih komisija za kontrolu istih.



Slika 3.4. Utjecaj emisije čestica na smrtnost [6]

Tablica 3.1 Prikaz djelovanja ispušnih plinova na čovjeka

Štetna tvar	Djelovanje
SO_2	nadražuje dišne putove i otapa se u sluznicama očiju, usta, nosa i bronhija
SO_2 + fina prašina	povećava štetno djelovanje SO_2, prodire do unutarnjih dišnih organa gdje se stvara sulfatna kiselina; veća je mogućnost kroničnog bronhitisa i povećan je rizik akutnih oboljenja dišnih putova
NO_2	nadražuje dišne putove i otapa se u sluznicama
NO	otrovan, stvara metahemoglobin u krvi
CO	ima 200 do 300 puta veću sklonost vezanja za hemoglobin u krvi od O_2, nastaje karboksihemoglobin te se sprječava prenošenje O_2 u krvi i opskrba kisikom; napada središnji živčani sustav i sustav krvotoka, uzrokuje glavobolje, umor, gubitak snage i smetnje kod spavanja
Štetna tvar	Djelovanje
O_3	nadražujući plin za dišne putove, prodire u pluća i utječe na njihovu funkciju kroz oksidaciju enzima, bjelančevina, aminokiselina, lipida itd.; povećava osjetljivost na infekcije i stvara nadražaj kašlja
Pb	djeluje na aktivnost izmjene tvari, utječe na mozak (osobito u male djece), taloži se u kostima
čađa	na sebe veže toksične tvari (NOx, SO_2 i kancerogene ugljikovodike)
aromatski ugljikovodici	dio ih je kancerogen

Tablica 3.2 Prikaz djelovanja ispušnih plinova na biljke

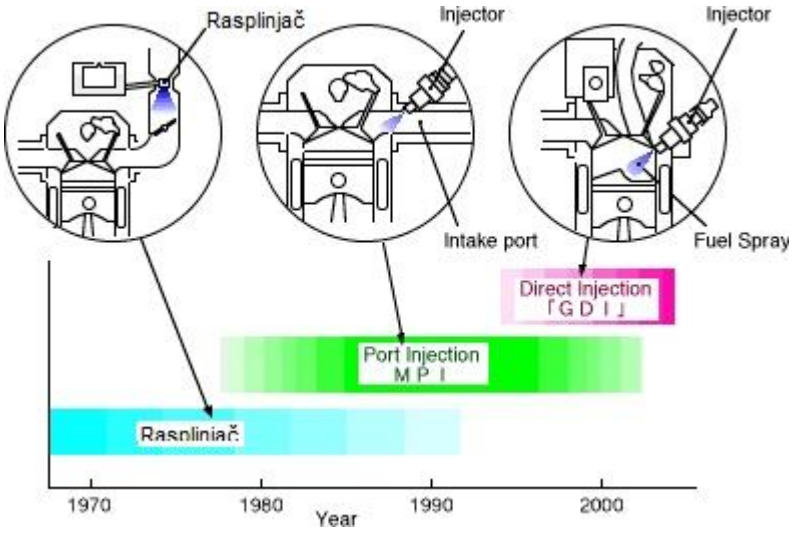
Štetna tvar	Oštećenja biljaka
SO_2	teške smetnje asimilacijskom procesu biljaka, pogotovo igličastom drveću; javljaju se nekrotične pjege s obje strane lišća
NO_2	javljaju se slični simptomi kao i kod oštećenja SO_2-om, ali potrebne su veće koncentracije; znak trovanja NO_2-om je i pojava lišća usred zime
etilen	zastoj u rastu, smetnje u cvatu, pupanju i listanju - opadanje lišća i mlađih cvjetova, nemogućnost otvaranja cvjetova, slabljenje rasta trave, pojačano prizemno grananje
prašina	začepljenje pora, izolacija topline i svjetla - negativin učinci na rast

4. Tehnologije za smanjivanje emisije

Tehnologije koje su potrebne za kontrolu i regulaciju ispušnih plinova i zagađivača u njima su navedene u ovom poglavlju. Načini za kontrolu emisija ispušnih plinova mogu se podijeliti u dvije kategorije: kontrolu u motoru i kontrolu izvan motora. Svaka od njih ima svoje značajke i u pojedinim situacijama se uvelike razlikuju ovisno o tipu motora, bilo da se radi o motoru na benzin ili dizelsko gorivo.

4.1. *Ottov motor*

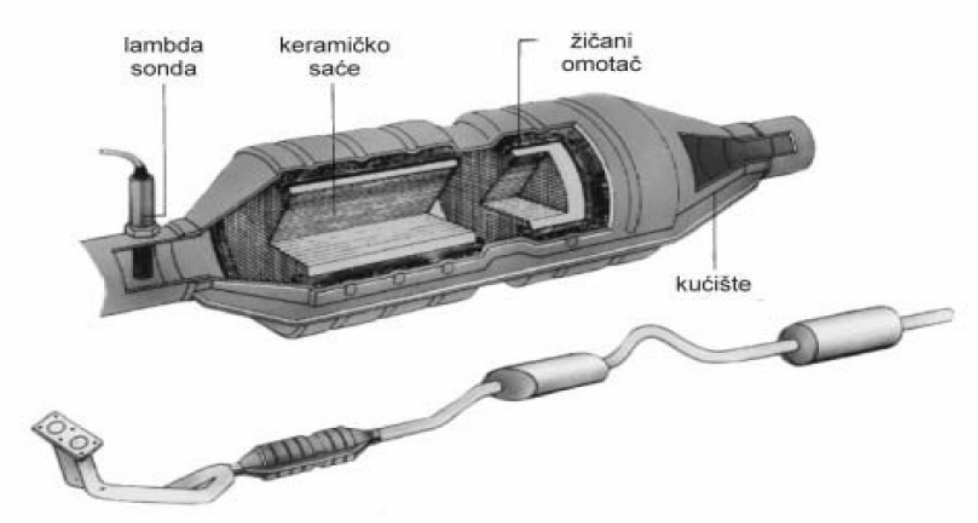
Gotovo svi Ottovi motori (motori u kojima se smjesa zapaljuje stranim izvorom) rade pri stehiometrijskim uvjetima. To označava uvjete u kojima se kisik, koji je dostupan iz usisanog zraka, u potpunosti iskoristi oksidirajući gorivo ubačeno u cilindar. Dobava goriva u Ottovim motorima evoluirala je od rasplinjača, preko *throttle body injection-a, multi point fuel injection-a* (ubrizgavanje u više točaka) do sekvencijalnog ubrizgavanja u više točaka (engl. *sequential multi-point fuel injection MPFI*). Posljednji trend u evoluciji sustava za ubrizgavanje goriva su sustavi za direktno ubrizgavanje GDI (engl. *gasoline direct injection*). Jedna od bitnijih razlika između MPFI i GDI sustava je u tome što se kod GDI-a gorivo ubrizgava direktno u cilindar za razliku od MPFI-a gdje je se mješanje smjese odvija malo prije usisnog ventila. Za motore kojima se goriva smjesa pali stranim tijelom (svjećicom) ova tehnologija (GDI) u kombinaciji s prednabijanjem i tzv. *downsizingom* (smanjenjem radnog obujma cilindra) čini posljednji trend u razvoju automobilskih motora. Kombinacija tih tehnologija čini moderne Ottove motore gotovo ravnopravne Dieselovim u domeni potrošnje goriva, ekonomičnosti i performansi.



Slika 4.1 Tipovi ubrizgavanja kroz povijest

Upravljanje smjesom goriva i zraka ima velik utjecaj na formiranje ugljikovodika ili ne izgorenog goriva te ugljikovog monoksida (CO), koji je zapravo djelomično oksidizirano gorivo. S druge strane, dušikovi oksidi (NO_x) su nusprodukt izgaranja. Nastaju kad se dušik i kisik iz zraka vežu prilikom procesa izgaranja u cilindru. Što je veća temperatura više se dušikovih oksida formira. Iz toga proizlazi da je jedna od strategija za smanjenje pojave duškovih oksida jednostavno smanjenje temperature izgaranja u cilindru. To se pokušava postići prilagođavanjem geometrije cilindra za brže izgaranje i korištenjem recirkulacije ispušnih plinova (EGR).

Kontrola izvan motora kod Ottovih motora koji rade sa stehiometrijskom smjesom se provodi pomoću trokomponentnog katalizatora. Takav katalizator radi na način da reducira NOx na N_2 i O_2 te koristi taj kisik za dogorijevanje HC i CO. Uvjeti za rad trokomponentnog katalizatora su da u gorivu nema olova, a omjer goriva i zraka treba odgovarati stehiometrijskom i to s vrlo velikom točnošću ($\lambda = 1{,}0 \pm < 2\%$).



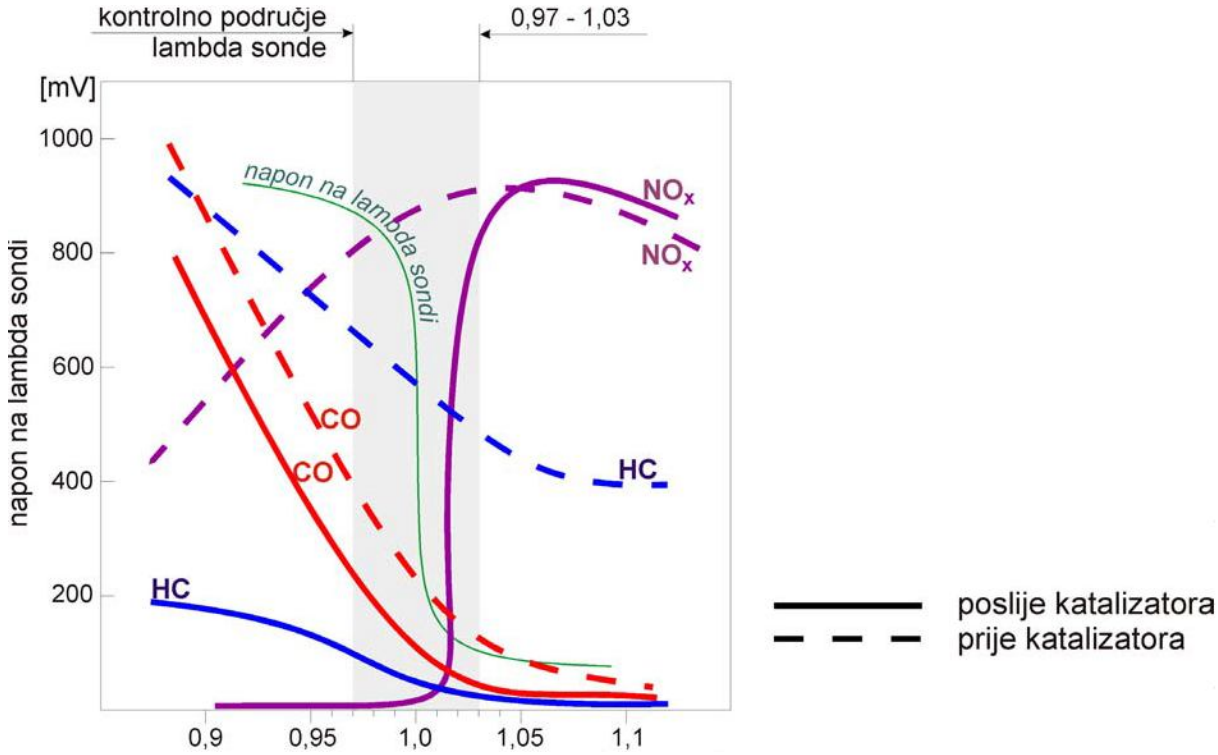
Slika 4.2 Trokomponentni katalizator[5]

Kod Ottovih motora daljnja poboljšanja u smanjenju negativne emisije ispušnih plinova se pokušavaju postići postizanjem vrlo visoke preciznosti u miješanju zraka i goriva, tj. održavanje stehiometrijskih uvjeta cijelo vrijeme i naposlijetku u unaprijeđenju tehnologije samih trokomponentnih katalizatora. Posljednji sustavi uspijevaju smanjiti sva tri zagađivača za više od 99% nakon što katalizator dostigne radnu temperaturu. Poboljšanja u kvaliteti katalizatora se kreću u smjeru što bržeg dosezanja njegove radne temperature i smanjenje emisije motora prilikom hladnog pokretanja, dok se u isto vrijeme pokušava smanjiti upotreba skupih materijala koji su potrebni za izradu takvih sustava. Prethodna tehnologija upravljanja emisijom se bazirala na namjernoj rotaciji bogatih i siromašnih ciklusa kako bi iskoristili pohranjeni kisik u katalizatoru za HC i CO oksidaciju.

Kemijske pretvorbe u katalizatoru

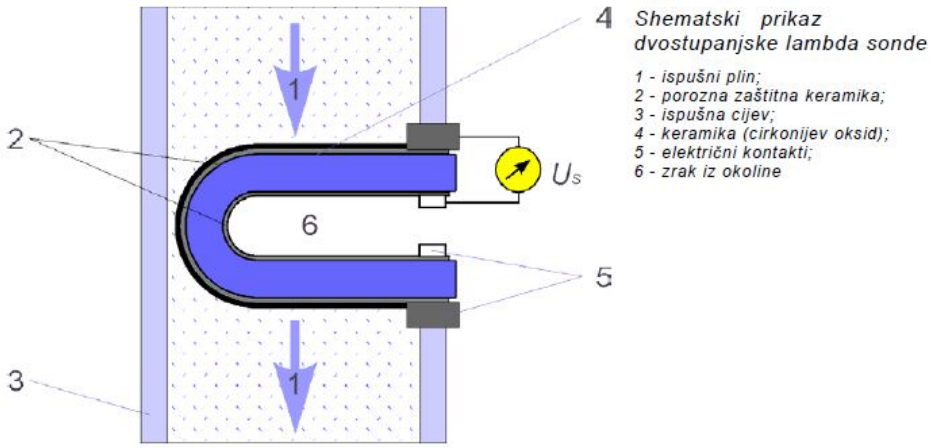
$$HC + O_2 \Rightarrow H_2O + CO_2 \quad \text{- oksidacija}$$
$$CO + O_2 \Rightarrow CO_2 \quad \text{- oksidacija}$$
$$2NO_X + 2 \times CO \Rightarrow 2 \times CO_2 + N_2 \quad \text{- redukcija}$$

Međutim, bilo kakva faza siromašnog ciklusa trenutno zaustavlja redukciju NOx u katalizatoru, stoga se moderne tehnologije baziraju u neprestanom održavanju stehiometrijskih uvjeta. Način na koji se održava stehiometrijska smjesa jest upotrebom lambda sonde čija očitanja se šalju elektronski upravljanoj jedinici (ECU) koja potom prilagođava doziranje zraka i goriva.



Slika 4.3 Pretvorba ispušnih plinova u trokomponentnom katalizatoru kao funkcija faktora zraka [10]

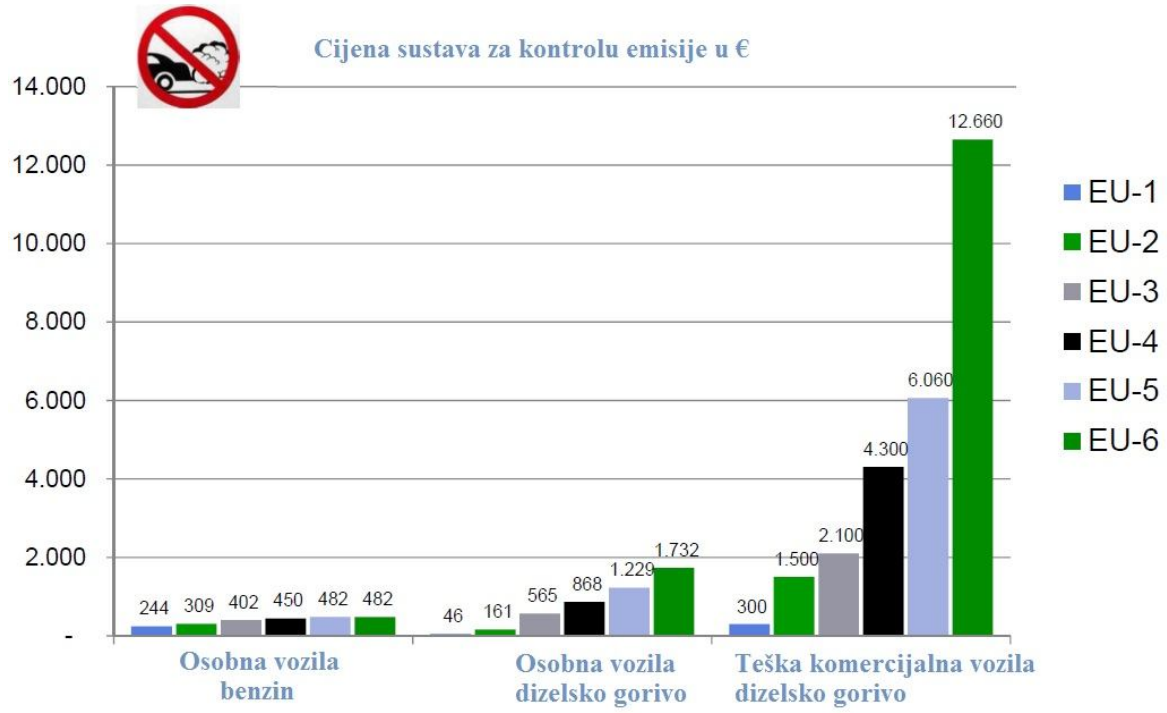
Lambda sonda je danas, uz katalizator trostrukog djelovanja, najučinkovitiji dodatak Otto motoru koji rezultira pročišćavanjem ispušnih plinova. Napravljena je od keramičkog osjetnika u obliku cijevi koja je na kraju koji se nalazi u ispušnom plinu zatvorena. Unutarnja strana osjetnika izložena je okolnom zraku, a vanjska strana struji ispušnog plina. Koristi se za mjerenje sadržaja kisika u ispušnom plinu i točno reguliranje faktora zraka (na vrijednost $\lambda = 1$). Lambda sonda šalje električni signal u upravljački sklop sustava za ubrizgavanje i onda se na osnovi informacije koju dobije po potrebi mijenja količina ubrizganog goriva.



Slika 4.4 Prikaz rada lambda sonde [10]

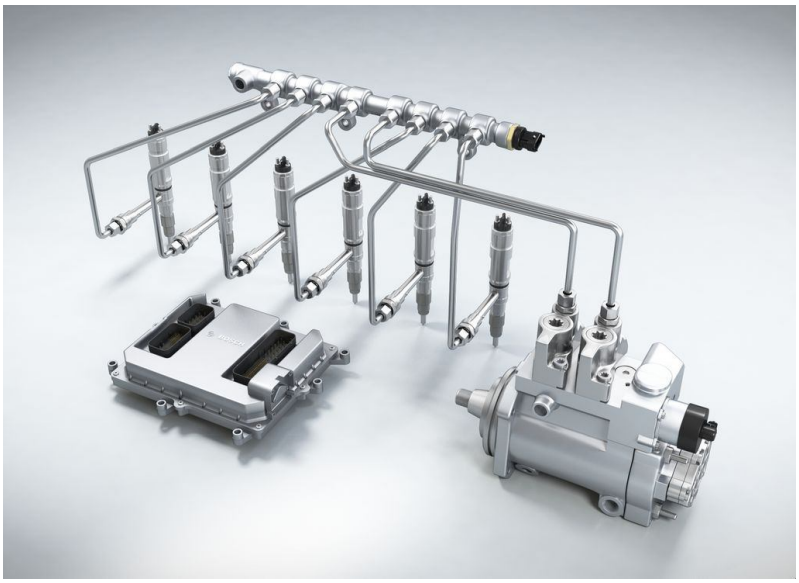
4.2. *Dieselov motor*

Za razliku od Otto motora, koji mogu kontrolirati količinu i goriva i zraka sve do pred zapaljenje, Dieselov motor uvijek radi s viškom zraka. Zbog faktora zraka koji je znatno veći od 1 nije moguće primijeniti trokomponentni katalizator kao kod Ottovih motora. Kod Dieselovog motora HC i CO ne predstavljaju problem zbog viška zraka što običnom oksidacijskom katalizatoru omogućuje efikasan rad i suzbijanje tih zagađivača. Kontrola emisije NO_x i čestica (PM) je mnogo zahtjevnija kod ovih motora i upravo to predstavlja snažnu okosnicu istraživanja smanjivanja štetnih emisija kao i glavni uzrok velikih troškova tih tehnologija. Emisija čestica je znatno veća kod Dieselovih motora zbog direktnog ubrizgavanja goriva u cilindar. Gorivo se zapaljuje gotovo u istom trenutku kad je ubrizgano u cilindar, taj mali dio vremena se koristi za miješanje kapljica goriva sa zrakom i tako tvori zapaljivu smjesu. Višak zraka u motoru je potreban kako bi teoretski svaka kapljica goriva uspjela naći molekulu kisika. Tokom zapaljenja čestice koje sadrže ugljik rastu spajajući se s drugim organskim i anorganskim česticama, zbog toga broj i veličina čestica znatno porastu i teže ih je kontrolirati nego kod Ottovih motora. Kontrola emisije u motoru povezuje se s tri sustava: ubrizgavanjem goriva, usisom zraka i EGR ventilom.



Slika 4.5 Prikaz troškova sustava za kontrolu emisije [9]

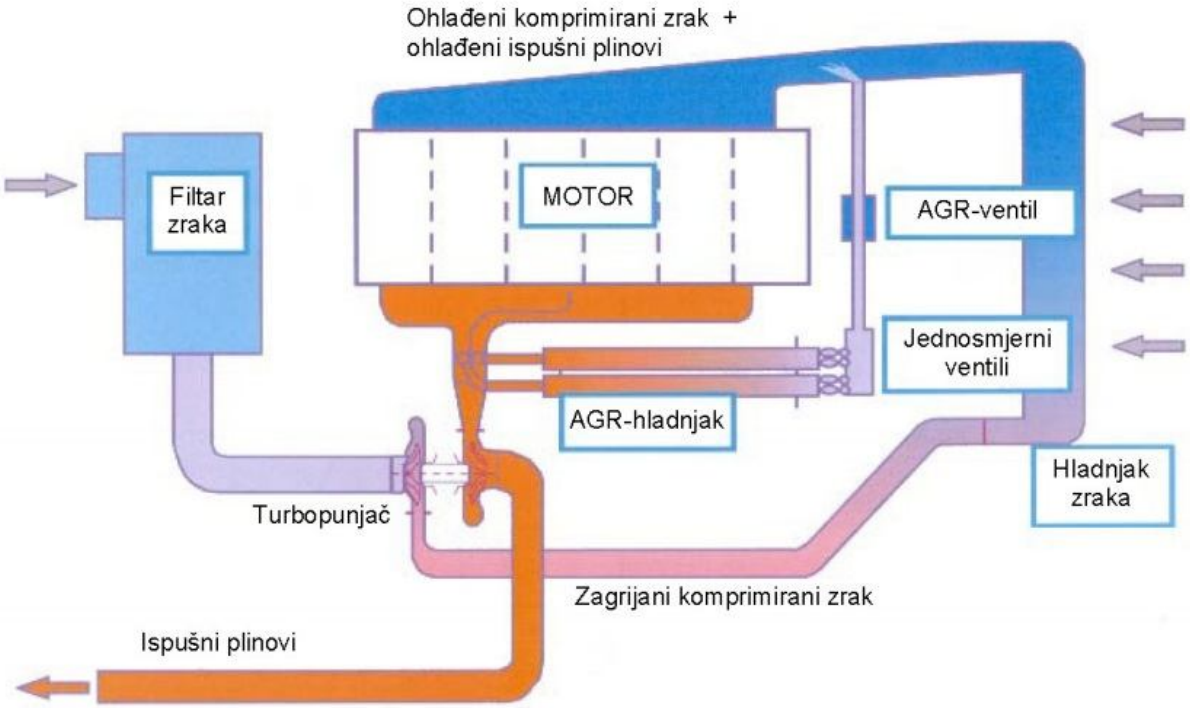
Poboljšanje efikasnosti ubrizgavanja goriva sa stajališta smanjenja emisije čestica uključuje upotrebu visokotlačnih brizgaljki s promjenjivim vremenom i preciznošću brizganja. Isto tako, uključuje i odgovarajući dizajn klipa i samih brizgaljki. Promjene tlaka i brzine ubrizgavanja goriva u cilindar se koriste za smanjenje emisija dušikovih oksida i čestica. Upotreba visokog tlaka omogućuje gorivu da se bolje raspršiti, pomiješa sa zrakom te zatim zapali na taj način ostavljajući što manje neiskorištenog goriva. Posljedica napredne regulacije vremena ubrizgavanja je veća efikasnost procesa izgaranja, smanjenje potrošnje goriva i smanjenje emisije čestica. Početak ubrizgavanja trenutak je kad se gorivo počinje ubrizgavati u prostor za izgaranje, tj. cilindre. Sa stajališta ispušnih plinova, veoma je bitan trenutak kada započeti s ubrizgavanjem goriva. Ako je početak ubrizgavanja izveden znatno prije gornje mrtve točke, motor će raditi prilično bučno, uz povećanu potrošnju goriva i temperaturu ispušnog plina, zbog čega dolazi do povećane emisije NO_x. Ako je početak ubrizgavanja izveden poslije gornje mrtve točke, postoji mogućnost da proces izgaranja neće završiti na vrijeme, tj. prije otvaranja ispušnih ventila. Posljedica toga je povećana koncentracija HC i čađe u ispušnim plinovima. Optimalan je slučaj kada se početak dobave namjesti tako da ubrizgavanje započne neposredno prije gornje mrtve točke, a samozapaljenje u njoj. Kod novih konstrukcija motora, redovito se prije glavnog ubrizgavanja izvodi jedno ili više predubrizgavanja. Tako se izgaranje odvija uz manje vibracije i buke, a smanjuje se emisija HC i NO_x. Ubrizgavanje goriva u više stadija smanjuje razliku u emisiji čestica i NO_x. Takvo ubrizgavanje je moguće izvesti samo koristeći se visokotlačnim injektorima ili *common-rail* sustavom.



Slika 4.6 Common rail sustav [32]

Regulacija usisa zraka se sve više fokusira na korištenje promjenjive geometrije usisnog kanala, prednabijanja i hlađenja prije ubacivanja u cilindar kako bi se motoru dovela točno zahtijevana količina zraka prilagođena specifičnim trenutnim radnim uvjetima, time smanjujući stvaranje čestica i povećavajući izlaznu snagu motora. Kod prednabijanja temperatura stlačenog zraka uvijek se povećava. Taj se zrak stoga nakon turbine hladi, čime se smanjuje toplinsko opterećenje motora i temperatura ispušnih plinova, što sprječava stvaranje prevelike koncentracije naročito NO_x, ali i čestica i HC.

EGR (engl. *exhaust gas recirculation*) je jedna od najznačajnijih tehnologija u smanjivanju pojave NO_x unutar cilindra za vrijeme izgaranja. Ova vrsta ventila koristi se u automobilima na benzin i na dizelsko gorivo. Radi na način da dio ispušnih plinova iz motora preusmjerava natrag na cilindre u motoru. Ovisno o tipu automobila i motora udio povrata može biti i do 60 %. Smanjuje emisiju dušikovih oksida, a ovim se postiže to da temperatura prilikom sagorijevanja ne prelazi 1800°C koji su optimalni za izgaranje. Da bi se spriječila korozija u kanalu potrebno je da količina sumpora u gorivu ne prelazi preko 500 ppm-a.

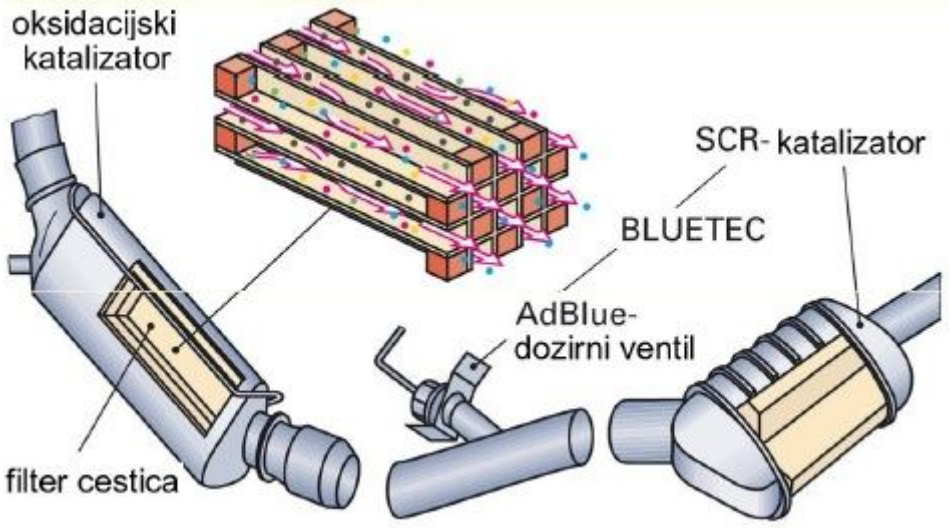


Slika 4.7 EGR sustav[3]

Kontrola dušikovih oksida izvan motora može se odvijati kroz više sustava. LNT-om (lean NO_x) i selektivnim katalitičkim reduktorom (SCR). Filtracija čestica se može postići i filterom za čestice (DPF) , dok se redukcija CO i HC postiže oksidacijskim katalizatorom (DOC).

LNT se bazira na materijalima koji mogu absorbirati NO_x već pri temperaturi od 150-200°C i potrebna im je regeneracija koju odrađuje elektronski upravljana jedinica regulirajući protok zraka i goriva. Uspijevaju smanjiti NOx 70-90 %, ali im je potrebna vrlo mala količina sumpora u gorivu za optimalan rad, čak manje od 15 ppm-a. NO_x absorber je konstruiran da izbjegne probleme na koje su nailazili EGR i SCR. LNT (zeolit) se ponaša poput spužve koja upija NO_x molekule. Jednom kad se napuni potrebna mu je regeneracija kako bi mogao dalje nastaviti efikasno raditi. Postoji mnogo načina za regeneraciju, poput ubrizgavanja dizelskog goriva prije filtera, gdje se koristi nestabilnost NO_2 koji se spoji s ugljikovodicima te nastaje dušik i voda. Može se korisiti i vodik s istom efektivnošću, no njega je problem uskladištiti. Za sada je LNT komercijalno upotrebljavan od strane Volkswagen grupe koja ga i dalje razvija i pokušava komercijalizirati.

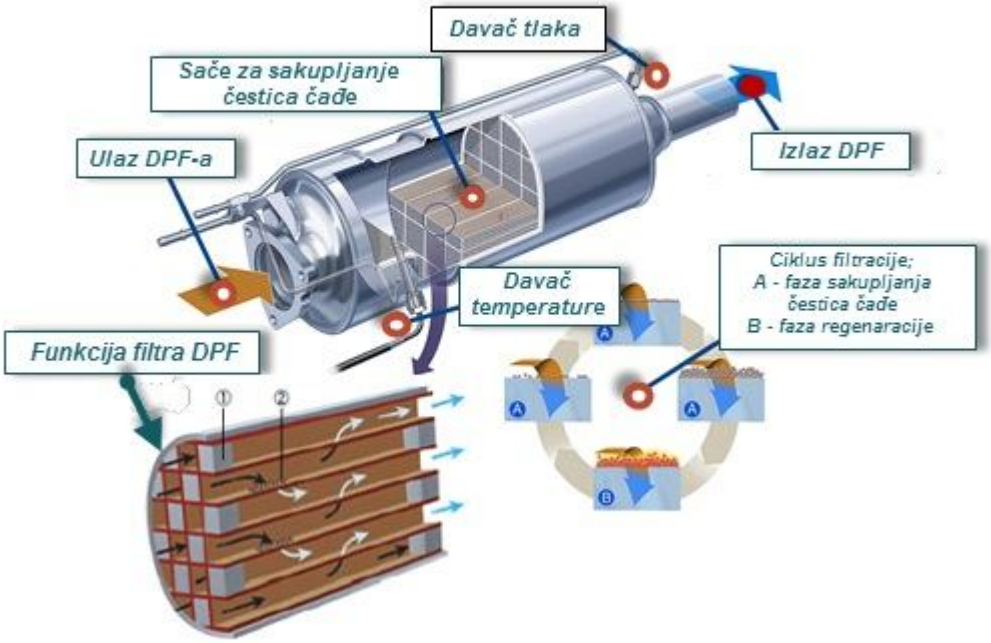
SCR je tehnologija koja obećava i ima puno prostora za napredak. Jezgra čitavog sustava je keramički katalizator saćaste strukture u kojem se odvija kemijska reakcija NO_x-a s amonijakom NH_3. SCR katalizatori su najčešće bazirani na metalnim oksidima V_2O_5, TiO_2 i WO_3. Optimalna temperatura rada je između 250°C – 500°C. Kako je amonijak štetan, umjesto NH_3 u struju vrućih ispušnih plinova se ubrizgava urea u tekućem obliku pri tlaku od 15 – 20 bara. U auto industriji se javlja pod komercijalnim nazivom AdBlue (32 % vodena otopina uree). Količina ubrizgane uree mjeri se senzorom a ovisi o količini dušikovih oksida u ispuhu. Nakon ubrizgavanja uree dolazi do redukcije dušikovih oksida. U kontaktu s vrućim ispušnim plinovima voda isparava, a urea se razlaže. Tako nastala smjesa amonijaka NH_3 i ispušnih plinova prolazi kroz katalizator gdje dolazi do reakcije amonijaka i dušičnih oksida na stijenkama katalizatora.



Slika 4.8 SCR sustav

Oksidacijski (dvostazni) katalizatori vrše oksidaciju ugljik monoksida čime se dobiva ugljik dioksid te oksidaciju ugljikovodika CH (neizgoreno i/ili djelomično izgoreno gorivo) čime nastaju ugljik dioksid i voda. Dvostazni katalizatori su se koristili u ranijim Ottovim motorima dok su kod Dieselovih motora još uvijek ostali u upotrebi.

DPF (engl. *diesel particle filter*) Filtar čestica čađe zaustavlja većinu čađe koja bi inače prošla ispušni sustav i izašla u atmosferu. Stariji filteri ove vrste se se trebali mijenjati nakon što bi se napunili čađom, dok današnji filteri posjeduju sustav samočiščenja, obično koristeći neki od načina povišenja temperature u samom filteru što dovodi do izgaranja čestica čađe (npr. ubrizgavanje male količine goriva koja izgara u ispušnom sustavu kako bi se podigla temperatura u filteru). Prve filtere ispušnih čestica za Dieselove motore uvela je francuska grupacija PSA početkom 2000-tih.



Slika 4.9 DPF filter čestica

Iz nabrojenih tehnologija i sustava koji pomažu smanjenje emisije štetnih tvari možemo zaključiti da se kroz posljednjih 30 godina značajna sredstva i napor ulažu u tom segmentu. Tehnološki napredak u tom polju motiviran je direktivama i normama koje proizvođači moraju zadovoljiti kako bi plasirali svoje automobile na tržište i ujedno po mogućnosti bili ispred konkurencije. U idućem poglavlju će se obraditi tema direktiva i normi te koja su tehnološka poboljšanja bila zahtijevana za Ottove i Dieselove motore stupanjem svake norme na snagu.

5. Analiza direktiva

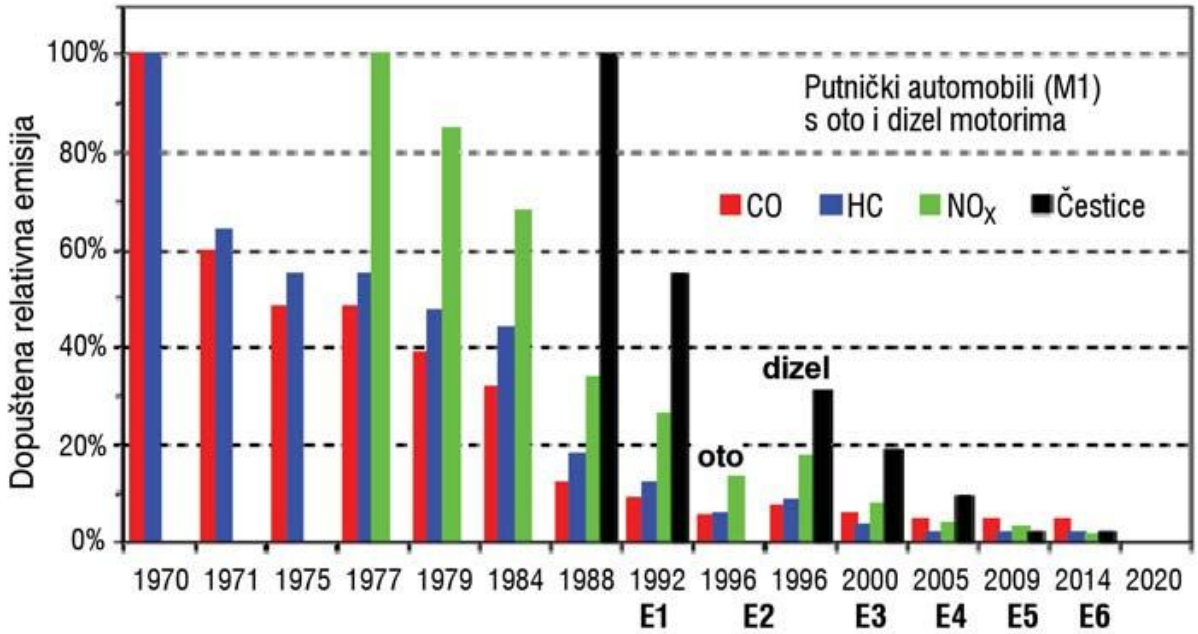
Zakonodavni okvir reguliranja emisija u EU predstavljaju Direktive. Direktiva je zakonodavni akt EU koji zahtijeva od zemalja članica postizanje određenog rezultata bez uvjetovanja sredstava za postizanje toga rezultata ili cilja.

Provođenje odredbi direktiva neposredno utječe na sustav *vozilo – emisije – gorivo*:

-Automobilska industrija u vozila ugrađuje sve sofisticiranije i djelotvornije sustave za smanjenje emisije.

- Djelotvornost sustava za pročišćavanje ispušnih plinova iz automobilskih motora povećava se smanjenjem odredenih spojeva i/ili grupa spojeva u gorivu – poglavito sumpora.

- Sve stroža ograničenja emisija definirana EURO zahtjevima prisiljavaju rafinerije na uvodenje novih tehnologija – poglavito za hidro obradu goriva.



Slika 5.1 Prikaz dopuštenih emisija prema EURO normama [5]

Direktivama Europske unije reguliraju se i emisije iz vozila i temeljni parametri kvalitete goriva. Iako postoje norme propisane za sve kategorije vozila propisane pravilnikom o tehničkim uvjetima vozila u prometu na cestama (tablica dolje), u ovom radu je obrađena tematika vezana uz kategoriju osobnih i lakih komercijalnih vozila (M1 i N1).

Tablica 5.1 Kategorije vozila [2]

Oznaka kategorije	Opis kategorije
L	MOPEDI, MOTOCIKLI, LAKI ČETVEROCIKLI I ČETVEROCIKLI
L1	Motorna vozila s 2 kotača (mopedi), radnog obujma motora ≤ 50 cm^3, ili kod elektromotora najveće trajne nazivne snage ≤4kW i brzine ≤ 50 km/h
L2	Motorna vozila s 3 kotača (mopedi), radnog obujma motora ≤ 50 cm3, ili kod elektromotora najveće trajne nazivne snage ≤4kW i brzine ≤ 50 km/h
L3	Motorna vozila s 2 kotača (motocikli), radnog obujma motora > 50 cm^3 ili brzine > 50 km/h
L4	Motorna vozila s 2 kotača i bočnom prikolicom (motocikli s bočnom prikolicom), radnog obujma motora > 50 cm^3 ili brzine > 50 km/h
L5	Motorna vozila s 3 kotača, simetrično postavljena s obzirom na uzdužnu os vozila (motorni tricikli), radnog obujma motora > 50 cm^3 ili brzine > 50 km/h
L6	Motorna vozila s 4 kotača (laki četverocikli), čija je masa praznog vozila ≤od 350 kg što ne uključuje masu baterija kod električnih vozila čija je najveća konstrukcijska brzina ≤45 km/h
L7	Motorna vozila s 4 kotača osim lakih četverocikla (četverocikli), čija je masa praznog vozila ≤od 400 kg (550 kg za vozila za prijevoz tereta), što ne uključuje masu baterija kod električnih vozila i čija najveća neto snaga motora je ≤15 kW.
M	OSOBNI AUTOMOBILI I AUTOBUSI Motorna vozila za prijevoz osoba s najmanje 4 kotača
M1	Motorna vozila za prijevoz osoba koja osim sjedala za vozača imaju još najviše 8 sjedala
M2	Motorna vozila za prijevoz osoba koja osim sjedala za vozača imaju više od 8 sjedala i najveće dopuštene mase ≤ 5000 kg
M3	Motorna vozila za prijevoz osoba koja osim sjedala za vozača imaju više od 8 sjedala i najveće dopuštene mase > 5000 kg
N	TERETNI AUTOMOBILI Motorna vozila za prijevoz tereta s najmanje 4 kotača
N1	Motorna vozila za prijevoz tereta najveće dopuštene mase ≤ 3500 kg
N2	Motorna vozila za prijevoz tereta najveće dopuštene mase > 3500 kg ali ≤ 12000 kg
N3	Motorna vozila za prijevoz tereta najveće dopuštene mase >12000 kg
O	PRIKLJUČNA VOZILA Prikolice uključujući i poluprikolice
O1	Priključna vozila najveće dopuštene mase ≤ 750 kg
O2	Priključna vozila najveće dopuštene mase>750kg ali ≤ 3500 kg
O3	Priključna vozila kojima je najveća dopuštena masa > 3500 kg ali ≤ 10000 kg
O4	Priključna vozila kojima je najveća dopuštena masa > 10000 kg
T	TRAKTOR Motorna vozila opremljena kotačima, s najmanje dvije osovine, koji ima konstrukcijsku brzinu veću od 6 km/h i čija je glavna funkcija da vuče, gura, nosi ili pokreće određena oruđa, strojeve ili prikolice namijenjene poljoprivredi odnosno radu u šumi.

U tablici 5.2 prikazane su norme od Euro 1 do Euro 6, godine uvođenja i direktive koje čine zakonsku potporu provođenju tih normi. Europske norme se donekle razlikuju od onih u

ostalim dijelovima svijeta, vrlo su rigorozne i nameću standard u regulaciji koncentracije štetnih tvari u ispušnim plinovima.

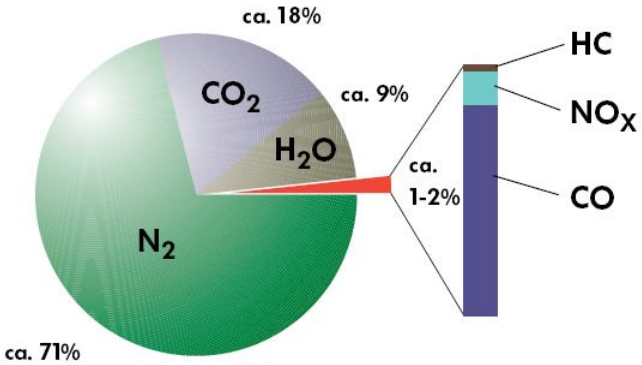
Tablica 5.2 Popis normi i direktiva

Standard	**Datum uvođenja (za nova vozila)**	**Datum uvođenja (za sva vozila)**	**Direktive**	**Napomena**
pre-Euro	Početak 1970		70/220/EEC	Revidirana i obnavljana više puta
Euro 1	Srpanj 1992	Siječanj 1993	91/441/EEC (samo za osobna vozila)	Poznata i kao EC 93, sadržaj iz ECE-R-83/01
	Kolovoz 1993	Kolovoz 1994	93/59/EEC (osobna i laka teretna vozila)	Sadržaj iz ECE-R-83/02
Euro 2	Siječanj 1996	Siječanj 1997	94/12/EC 96/44/EC 96/69/EC	Poznata kao EC 96; sadržaj iz ECE-R-83/03 i ECE-R-83/04
Euro 3	Siječanj 2000	Siječanj 2001	98/69/EC 98/77/EC 1999/102/EC 2001/1/EC 2001/100/EC 2000/80/EC 2002/80/EC	Dodane specifične granice za Nox u dodatku na HC+NOx ograničenja; poznata kao EC 2000; sadržaj iz ECE-R-83/05

Euro 4	Siječanj 2005	Siječanj 2006	2003/76/EC 2006/96/EC	Poznata kao EC 2005
Euro 5	a: Rujan 2009 b: Rujan 2011	a: Siječanj 2011 b: Siječanj 2013	Regulativa 715/2007 Regulativa 692/2008	Euro 5b propis uključen, po prvi put uvedeno ograničenje broja čestica (PN) za motore s kompresijskim paljenjem. Sadržaj iz ECE-R-83/06.
Euro 6	Rujan 2014	Rujan 2015		
* Izmjene i dopune direktive 70/220/EEC				

PRE ECE i ECE standardi – između 1970. i 1985. godine, prema UNECE Uredbi koja se odnosi na emisije onečišćujućih tvari vozila lakših od 3,5 tone. U razdoblju od 1985. do 1990. pojavila su se suvremena tehnološka rješenja kao što su poboljšani konvencionalni motori te primjena oksidacijskih i trostaznih katalizatora (otvorene i zatvorene petlje, ali bez lambda sonde).

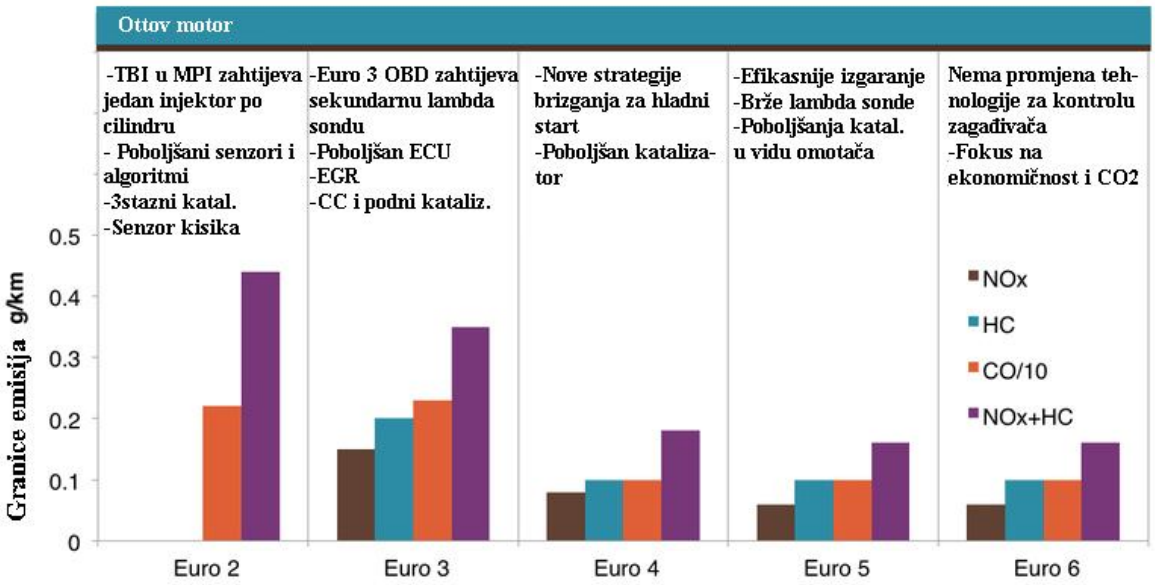
5.1. *Ottov motor*



Slika 5.2 Nepročišćeni sastav ispušnih plinova kod Ottovog motora [3]

Euro 1 tehnologija predstavljena je u lipnju 1992. godine, Direktivom 91/441/EEC te je kasnije dopunjena sadržajem koji uključuje i laka komercijalna vozila (93/59/EEC). Da bi se ispušni plinovi zadržali u granicama propisanim u direktivama bilo je potrebno uvesti trokomponentne katalizatore zatvorene petlje u sva vozila. Međutim, bila je i obavezna upotreba senzora kisika, tzv. lambda sonde, koja značajno podiže efikasnost katalizatora. Održavanjem stehiometrijske smjese (14,7:1) pomoću sonde, osigurava se minimalna pojava kisika u katalizatoru i time smanjuje mogućnost pojave dušikovih oksida. Osim što je obavezna upotreba lambda sonde, također je i obavezna upotreba bezolovnog benzina u svrhu optimalnog rada katalizatora.

Euro 2 vozila su predstavljena 1996. godine, Direktivom 94/12/EC. Vozila imaju poboljšane trostazne katalizatore zatvorene petlje te niže granice emisija u usporedbi s Euro 1 standardom: 30 % smanjenje CO i 55 % smanjenje HC i NOx. Usvajanjem Euro 2 norme, Ottovim motorima se uvodi ubrizgavanje u više točaka (*multi point fuel injection-MPFI*) jer se pokazalo da se tim načinom ubrizgavanja smanjuje emisija CO i HC te povećava ekonomičnost vozila. Po prvi puta je za smanjenje emisije NO_x uveden EGR u lakšim komercijalnim i u većim vozilima.



Slika 5.3 Kratki prikaz poboljšanja kroz norme-Otto

Euro 3 emisijski standard je predstavljao značajan napredak u odnosu na prethodnu Euro 2 normu. Euro 3 je uveden Direktivom 98/69/EC (Korak I) u siječnju 2000. godine. U sklopu Euro 3 standarda u primjenu je ušao i novi test za homologaciju koji u odnosu na prethodni test eliminira period zagrijavanja motora (40 sekundi). Iz tog razloga emisija štetnih tvari pri hladnom startu postaje fokus za razvoj tehnologije koja će zadovoljiti Euro 3 normu. Vozila spomenute norme su opremljena parom lambda senzora za zadovoljavanje granica emisija, a u usporedbi s Euro 2 standardima iznose za vozila s Ottovim motorom: 30 % manje za CO, 40 % za HC i 40 % za NO_x. Uvođenjem strožijih pravila, EGR i napredna regulacija smjese gorivo-zrak, postali su standard u novijim automobilima. Kontrola emisije van motora se i dalje oslanja na upotrebu trokomponentnog katalizatora i lambda sonde. Zbog zahtjeva za eliminacijom perioda zagrijavanja katalizatora u testiranju, bilo je potrebno napraviti izmjene u vidu dodatka katalizatora za hladni start u kojem se koristi više paladija nego u običnom katalizatoru. Lambda sonde su postale preciznije i osjetljivije te su omogućile još preciznije pogađanje smjese goriva i zraka. OBD uređaji su također postali standard u Euro 3 vozilima, isto kao i dodatna lambda sonda nakon katalizatora kako bi se pratila njegova efikasnost.

Euro 4 standard, predstavljen je Direktivom 98/69/EC (Korak 2) u siječnju 2005. godine. Prema Euro 4 standardu potrebno je dodatno smanjiti emisije za vozila s Ottovim motorom u iznosu od 57 % za CO, 47 % za HC i NOx. Proizvođači zadovoljavaju Euro 4 normu

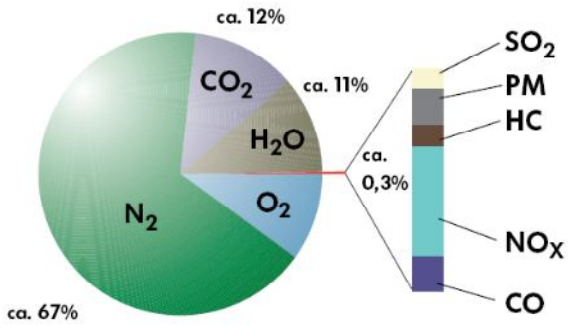
poboljšanjem trokomponentnog katalizatora, još naprednijom regulacijom ubrizgavanja goriva i paljenja smjese te novim upravljačkim strategijama za EGR. Paljenje smjese i količina ubrizganog goriva prilagođeni su *cold start testu* kako bi što prije zagrijali katalizator na radnu temperaturu.

Euro 5 i 6 standardi – predloženi u svibnju 2007. godine. Euro 5 standard je u primjeni od siječnja 2010. godine, a smanjuje emisije NOx za dodatnih 25% u odnosu na Euro 4 normu. Za HC i CO nisu zahtijevana smanjenja emisije. Smanjenje za NOx je postignuto daljnjom optimizacijom procesa izgaranja u vidu smanjenja temperature izgaranja i konstantnom unaprijeđenju dizajna dijelova motora.

U Euro 6 normi nisu razmatrana dodatna smanjenja emisija. Iako nisu tražena smanjenja emisija, trendovi rasta cijena goriva prisiljavaju proizvođače da se orijentiraju ka konstruiranju malih štedljivih motora, koji ujedno imaju i manje emisije.

5.2. *Dieselov motor*

Dieselovi motori su, što se tiče direktiva, obuhvaćeni istima kao i Ottovi motori, no zbog drugačijih zahtjeva i same razlike u konstrukciji motora tehnologije kojima se proizvođači koriste da bi zadovoljili norme su ponešto drugačije, ili se na drugačiji način koriste od onih u otto motora.

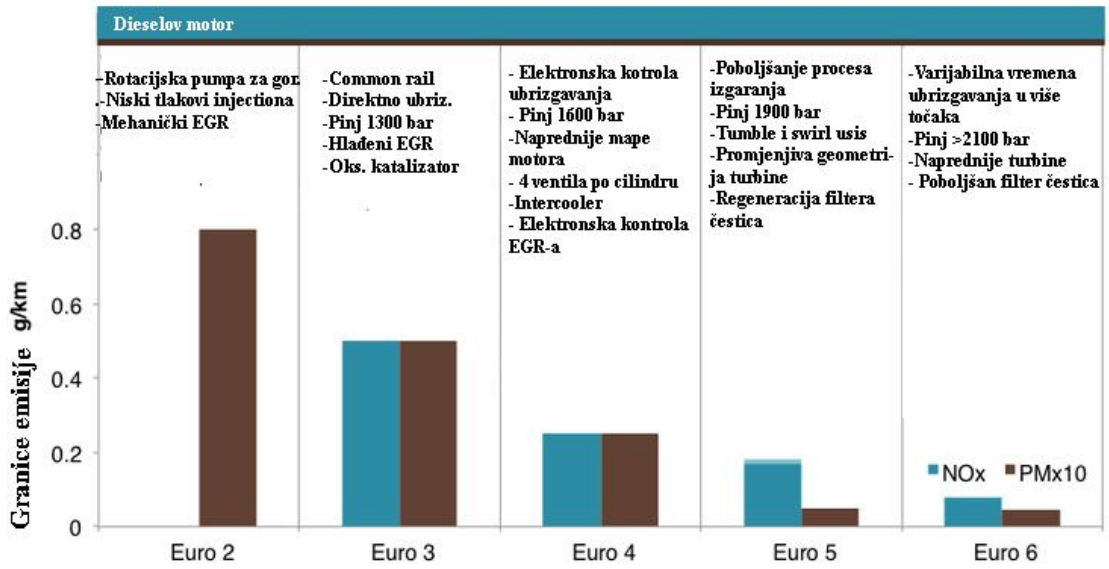


Slika 5.4 Nepročišćeni sastav ispušnih plinova kod Dieselovog motora [3]

Zadovoljavanje Euro 1 standarda kod dizel motora je omogućeno upotrebom mehaničke rotacijske pumpe goriva, indirektnim ubrizgavanjem i recirkulacijom ispušnih plinova (EGR). Većina Euro 1 motora nije bila s prednabijanjem i EGR je bio mehanički upravljan.

Za vrijeme uvođenja Euro 2 standarda proizvođači su počeli prelaziti s mehaničkih na elektromagnetski upravljane brizgaljke što je na kraju rezultiralo potpunim izbacivanjem mehaničkih brizgaljki da bi se u budućnosti zadovoljili Euro 3 standardi. Elektronsko upravljanje paljenjem i ubrizgavanjem postalo je dominantna tehnologija i pravac razvoja Dieselovih motora. Prednabijanje se počelo upotrebljavati kod većih komercijalnih vozila. Euro 2 standard je u odnosu na Euro 1 kod Dieselovih motora zahtijevao – 68 % smanjenje za CO, 38 % za HC i NO_x te 55 % za PM. Smanjenje emisija van motora je zbrinjavano oksidacijskim katalizatorom kao komercijalnim rješenjem. Međutim, vozila koja su kasnije došla na tržište su napretkom sustava za ubrizgavanje eliminirala potrebu za oksidacijskim katalizatorom kako bi zadovoljila Euro 2 standard.

Euro 3 standard je u odnosu na prethodni postavio za cilj kod Dieselovih motora: 40 % manje za CO, 60 % NOx, 14 % HC 37,5 % PM. Eliminacija perioda zagrijavanja motora u NEDC testu (engl. *european driving cycle*) je, kao i kod Ottovih motora, postavila trend razvoja tehnologije za smanjenje emisije štetnih tvari. Euro 3 Dieselovi motori zahtijevaju elektronski upravljano ubrizgavanje goriva što je značajan napredak u odnosu na injektore pokretane bregastom osovinom, što je dio rotacijskog sustava ubrizgavanja goriva. Glavna karakteristika sustava ubrizgavanja u Euro 3 motorima, bilo da se radi o *common railu* ili o običnoj brizgaljki, je da tlak ubrizgavanja iznosi preko 1300 bar. Posljedica visokog tlaka je poboljšano miješanje zraka i goriva te u konačnici manja emisija čestica. Na taj način riješen je problem emisije čestica (iz perspektive Euro 3 norme), dok je emisija NO_x stavljena pod kontrolu korištenjem hlađenog i elektronski upravljanog EGR sustava.

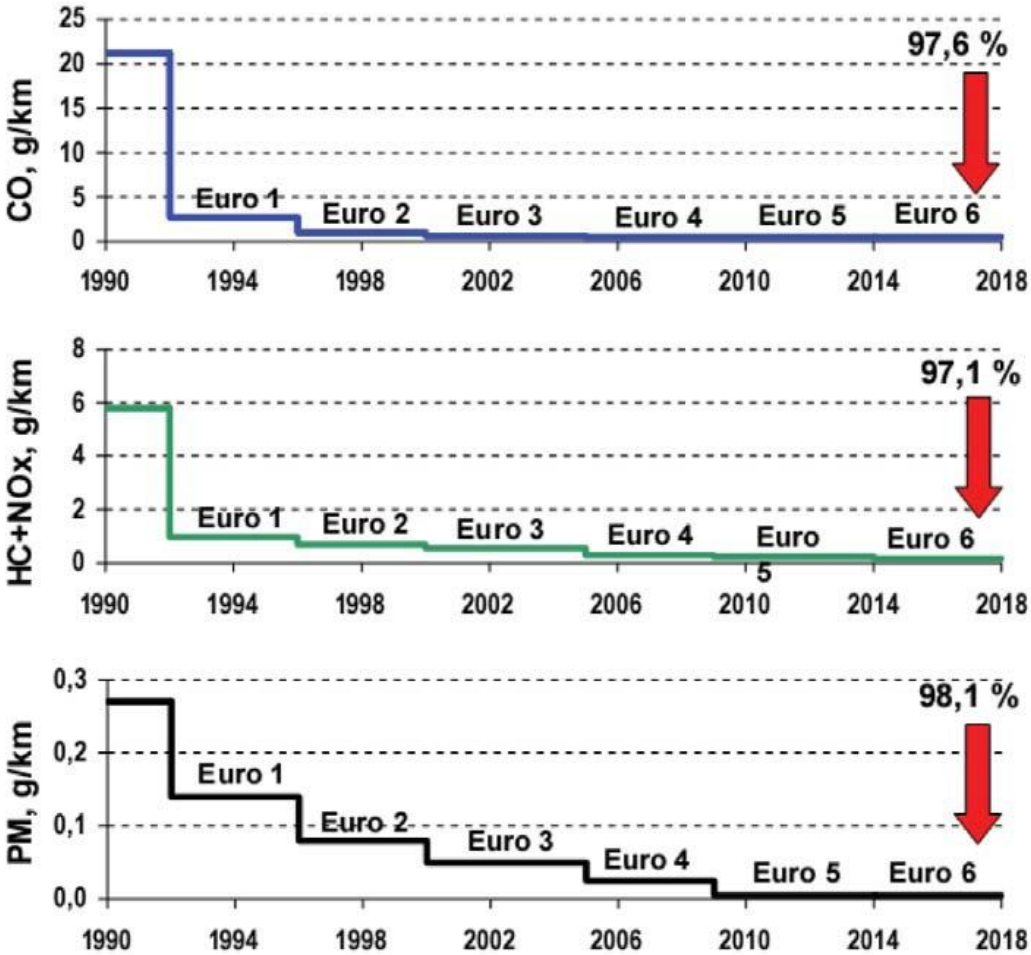


Slika 5.5 Kratki prikaz poboljšanja kroz norme - Diesel

Euro 4 norma je pred Dieselove motore postavila zahtjev za smanjenje emisije u iznosu od 22 % za CO i 50 % za HC, NO_x i PM. Odgovor proizvođača na nove uvjete leži u poboljšanjima kod ubrizgavanja goriva uz dodatak sustava za kontrolu dobave zraka kako bi još bolje i efikasnije unaprijedili stvaranje smjese za izgaranje u motoru. Razlog zašto proizvođači toliko napora ulažu u suzbijanje štetnih emisija prilikom samog izgaranja je taj što su zadržali oksidacijski katalizator kao jedinu strategiju kontrole emisije izvan motora. Većina Euro 4 motora ima *common rail* sustave koji koriste tlakove ubrizgavanja 1300-1600 bara. Česta pojava je korištenje prednabijanja s *intercoolerom* (hlađenje zraka koji motor dobiva za sagorijevanje). Intercooler se koristi za smanjenje temperature zraka koji izlazi iz kompresora i ulazi u cilindar, time povećavajući performanse motora i zbog niže temperature manjeg formiranja NOx. NOx se također smanjuje upotrebom EGR-a koji je unaprijeđen još zahtjevima Euro 3 norme. Koristi se malim DC motorom koji regulira otvorenost ventila na taj način ga prilagođavajuči trenutnim parametrima rada motora. Oksidacijski katalizator se ,uz poduzete mjere napretka u procesu izgaranja, pokazao kao dovoljan zahvat za kontrolu emisije čestica. Euro 4 standard ne traži korištenje filtera za čestice (*DPF*), no neki proizvođači su svoja vozila opremili njime i tako pokazali pozitivnu inicijativu prema još efikasnijoj kontroli ispušnih plinova. Radilo se o pozitivnoj inicijativi ili samo o iskorištenju marketinške prednosti, rezultat je bio da je većina proizvođača nudila DPF prije pojave Euro 5 zahtjeva.

Euro 5 je donio pravi izazov za proizvođače Dieselovih motora postavivši kao uvjet 80 % smanjenje mase čestica u odnosu na Euro 4. Nije više dovoljno raspolagati sustavima za kontrolu emisije u motoru i izvan njega već je potreban rad na sinergiji te dvije cjeline i postizanje međusobne optimizacije koja će u konačnici rezultirati zadovoljavanjem najnovijih propisa. Iz prethodno spomenutih tehnoloških inovacija za zadovoljenje novih normi, može se vidjeti redovito spominjanje napretka na području ubrizgavanja goriva i upravljanja dovodom zraka u cilindar. Upravo zbog toga proizvođačima postaje sve zahtjevnije postizati daljnje smanjenje emisija kroz ta ista područja. Kontrola emisije unutar motora je tehnički vrlo zahtjevna jer vremena za manipulaciju smjesom nema mnogo budući da se ciklusi odvijaju ekstremno velikim brzinama. Unatoč tomu, potrebno je na što više štetnih emisija utjecati upravo u procesu izgaranja kako bi sustavi koji se nalaze izvan motora radili što bolje i na kraju postigli zadovoljavajuće razine zagađivača. Kako bi smanjili razinu čestica tamo gdje one nastaju, u procesu izgaranja, koriste se još viši tlakovi u *common rail* sustavu ubrizgavanja i to od 1600 do 1900 bara. Povišenje tlakova ubrizgavanja iziskuje nova konstrukcijska rješenja poput upotrebe piezo-električnih brizgaljki koje gorivo ubrizgavaju u tri faze (predubrizgavanje, glavno ubrizgavanje, naknadno ubrizgavanje), u ukupno sedam do devet odvojenih impulsa. Precizno ubrizgavanje osigurava kvalitetno i potpuno izgaranje, uz visoku učinkovitost motora te malu potrošnju goriva i emisiju štetnih plinova. Fleksibilnost takvog *common raila* se koristi pri regeneraciji sustava za smanjenje emisije izvan motora (filteri i katalizatori) pomoću periodički kasnog ubrizgavanja goriva. Za još efikasnije smanjenje emisija *common rail* se uparuje s turbopunjačima promjenjive geometrije kod velikih vozila. Zahtjev za emisiju dušikovih oksida je 28 % smanjenje u odnosu na protekli standard. U tom polju se već godinama koristi EGR koji je svakom generacijom efikasniji. Pojačano je hlađenje povratnih plinova i ugrađena je premosnica za kontrolu temperature. Smanjenje emisija izvan motora se oslanja na upotrebu oksidacijskog katalizatora i filtera za čestice s aktivnom regeneracijom. Aktivna regeneracija podrazumijeva da se filter ne mora fizički mijenjati, već se koristi napredna regulacija brizganja goriva i ranije spomenuto namjerno kašnjenje u dobavi goriva koje se zapali i na taj način ga regenerira.

Euro 6 nije donio značajne promjene u odnosu na Euro 5. Radi se o 10 % smanjenju emisije čestica. Iako se ne čini mnogo, ovaj uvjet svakako stvara dodatni pritisak na proizvođače automobila i nameće im daljnje napore u istraživanju i razvoju sustava regulacije ubrizgavanja goriva i dobave zraka. Svakako se težnja stavlja na ubrizgavanje u više točaka pri još višim tlakovima (1900-2200 bara) [22]. Takvo ubrizgavanje dolazi u kombinaciji s prednabijanjem i turbopunjačima promjenjive geometrije koji osiguravaju točno određenu količinu zraka prilagođenu trenutnim uvjetima vožnje. U ovoj fazi kotrola emisije u motoru i izvan njega, pomoću DPF-a i DOC-a, iziskuje integraciju svih sustava od samog početka faze dizajna, preko testiranja do fine kalibracije za postizanje savršene ravnoteže između performansi, ekonomičnosti i štetnih emisija.



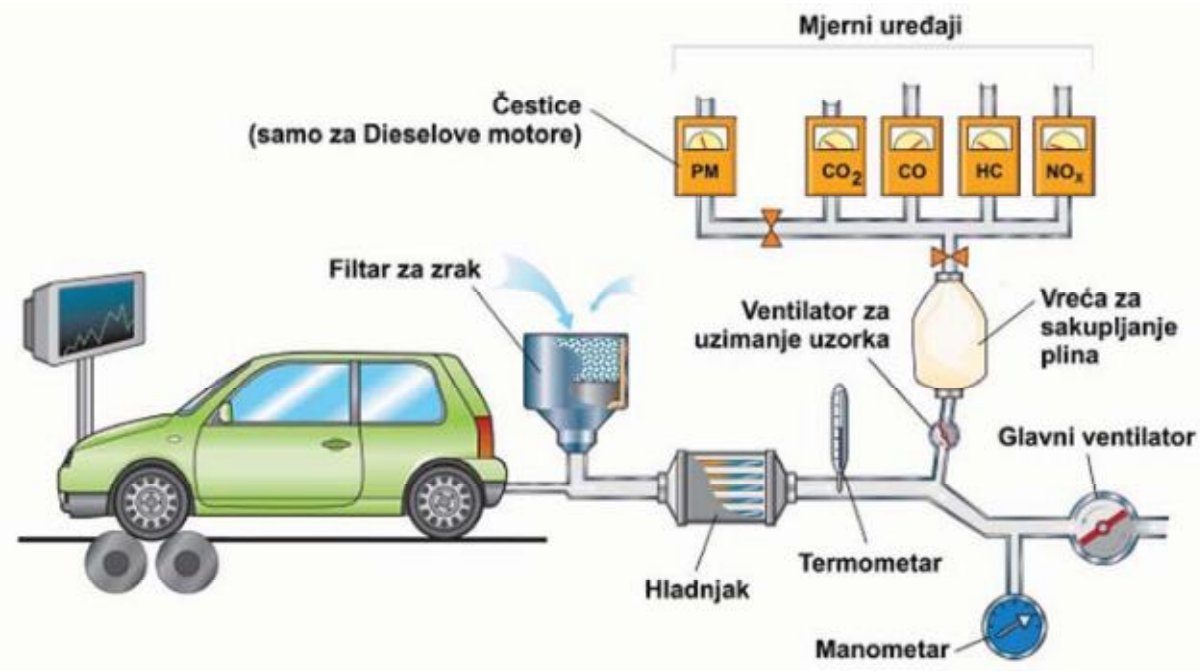
Slika 5.6 Dopuštena emisija kod Dieselovog motora kroz norme [5]

Tamo gdje je Euro 6 kod Dieselovih motora postavio pravi izazov jest redukcija dušikovih oksida za 66 % u odnosu na Euro 5. Budući da bolja kontrola emisija u motoru već nailazi na potrebe za većim konstrukcijskim zahvatima, proizvođači se baziraju na istraživanje mogućnosti smanjenja emisije izvan motora. U kombinaciji s EGR-om će se najvjerojatnije koristiti SCR (engl. *Selective Catalytic Reduction)* ili LNT (engl. *Lean NOx Trap*). LNT se trenutno koristi u nekim Dieselovim motorima u SAD-u gdje je pokazao dobre performanse što se tiče smanjenja NOx i isto tako pokazuje dobru izdržljivost, ne lošiju od SCR sustava. LNT je specifičan po tome što koncentracija sumpora u gorivu mora biti ispod 15ppma kako bi optimalno radio. Prednost LNT-a prema SCR-u je što se pokazao ekonomičniji za motore zapremnine ispod 2.5-3.0 litara i vjerojatno je prihvatljiviji krajnjem korisniku zato što ne zahtijeva povremeno punjenje uree. Proizvođači će odabrati tehnologiju koja odgovara trenutnim standardima i koja bude najviše doprinijela na području ekonomičnosti, izdržljivosti te generalnoj prihvaćenosti od strane kupaca.

Za sada je moguće zadovoljiti Euro 5/6 norme sa stajališta emisije NOx pomoću kontrole u motoru. To se postiže agresivnim strategijama upotrebe EGR-a koje uključuju i smanjenje kompresijskog omjera u motoru. Nastajanje NO_x je direktno povezano s temperaturom izgaranja, stoga, kombinacija EGR-a i niske kompresije (oko 13) ju održava dovoljno niskom. Ovakvu tehnologiju trenutno koristi Mazda, a polako ju usvajaju i drugi proizvođači. Međutim, treba napomenuti kako emisije NO_x izvan motora rapidno rastu pri visokim opterećenjima motora. Iz tog razloga strategija kontrole emisije dušikovih oksida bez dodatnih sustava izvan motora može dovesti do njihovog povećanog formiranja pri vožnji. Povećanu emisiju NO_x prilikom visokog opterećenja motora je vrlo teško registrirati prilikom NEDC testnog ciklusa.

6. Mjerna oprema

Mjerna oprema za ispitivanje emisije ispušnih plinova je većinom skup kompleksnih testnih modula od kojih svaki odrađuje svoj zadatak u analizi te naposlijetku šalje centralnoj jedinici koja pruža cjelovite rezultate. Zahtjevi za mjernu opremu su vrlo specifični i strogi iz razloga što se analizatori koriste kako za certificiranje automobila, tako i za istraživanje i razvoj. Zahtjevi su propisani pravilnicima i spomenuti su u poglavlju 7. Ispitivanje motora se vrši propisanim testnim ciklusima uz pomoć mjerne opreme. Analizatori ispušnih plinova mogu se podijeliti na stacionarne i prijenosne. U većini slučajeva za ispitivanje motora koriste se stacionarni analizatori smješteni u ispitne prostorije standardizirane atmosfere. Za ispitivanje vozila u vožnji koriste se prijenosni analizatori s kojima je potrebno izvršiti dobru pripremu za ispitivanje kako vanjski uvjeti ne bi narušili ispravnost rezultata. Neki od najvažnijih proizvođača u tom polju su Horiba, AVL, FEV i ABB. Kako bi se motor mogao testirati i kako bi se izmjerili svi potrebni parametri potrebno je imati i kočnicu (engl. *dynamometer*). Od mnogobrojnih vrsta kočnica u primjeni su najčešće elektromagnetske.



Slika 6.1 Pojednostavljena shema uređaja za mjerenje štetnih emisija [5]

6.1. *Stacionarni analizatori*

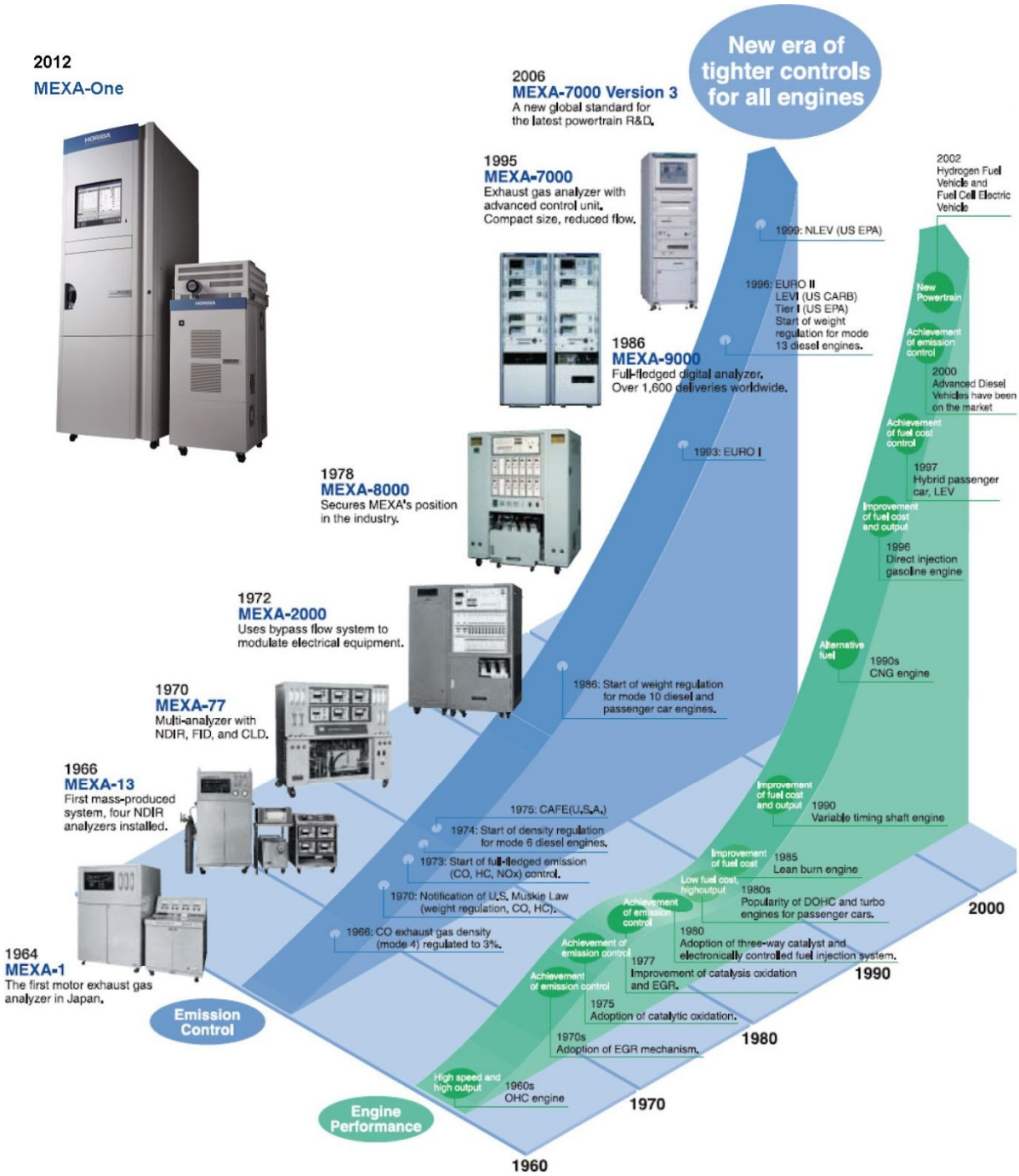
HORIBA MEXA-One

Posljednja inačica analizatora iz MEXA serije, nasljednik MEXA-7000 Version 4 inačice koja je izašla u prodaju 2011. godine. U odnosu na prethodne modele sadrži poboljšanu preciznost modula, upravljanje uzorcima i povećan broj kontrola za krajnjeg korisnika. Fokus je stavljen na jednostavnost uporabe i olakšavanje snalaženja među modulima. Mogu se testirati sve vrste motora na unutarnje izgaranje koji su pogonjeni gotovo svim vrstama goriva (benzin, dizelsko gorivo, alternativna goriva). Ova stanica se koristi za certificiranje, istraživanje i razvoj, test izdržljivosti i test kvalitete. Horibini uređaji nameću standarde u pogledu testnih ispitnih stanica zbog inovacija i brze prilagodbe zahtjevima emisijskih standarda. Horiba je za ovaj uređaj 2012. dobila nagradu na „Automotive testing technology international“ dodjeli nagrada, i to u kategoriji „2012 hardware innovation of the year“.

Poput uređaja iz serije prije ova verzija uključuje do 10 analizatora koji mogu mjeriti: HC, CO, CO_2, NO_x, N_2O, SO_2, CH_4 i EGR-CO_2. Smanjenje potrebnog protoka tvari da bi se dobili rezultati označava pozitivan pomak prema fleksibilnosti ispitivanja i mogućnost ispitivanja motora s malim protokom ispušnih plinova. Neke od značajki MEXA-One uređaja su (u odnosu na prethodnike):

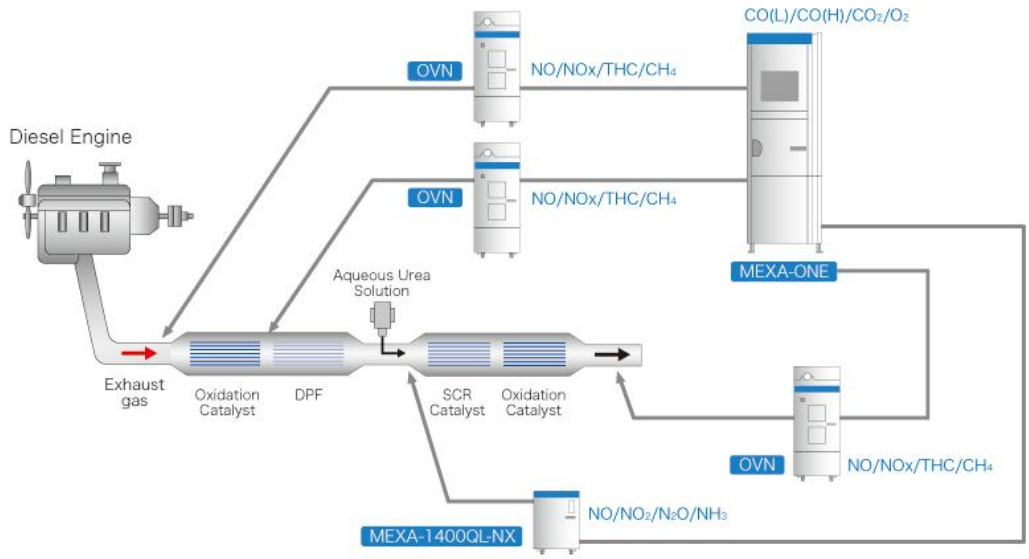
- 50 % brže vrijeme analize,
- 30 % kraće vrijeme kalibracije analizatora,
- Optimizacija pročišćavanja analizatora,
- 10 % uštede u električnoj energiji,
- Eliminirana potreba za zamjenom filtera - funkcija automatskog čišćenja,
- 30 % smanjena potreba za plinom pri kalibraciji.

Na slikama je moguće vidjeti shematske primjere za korištenje MEXA-One uređaja pri ispitivanju različitih komponenti i razvoj Horibinih uređaja kroz povijest.



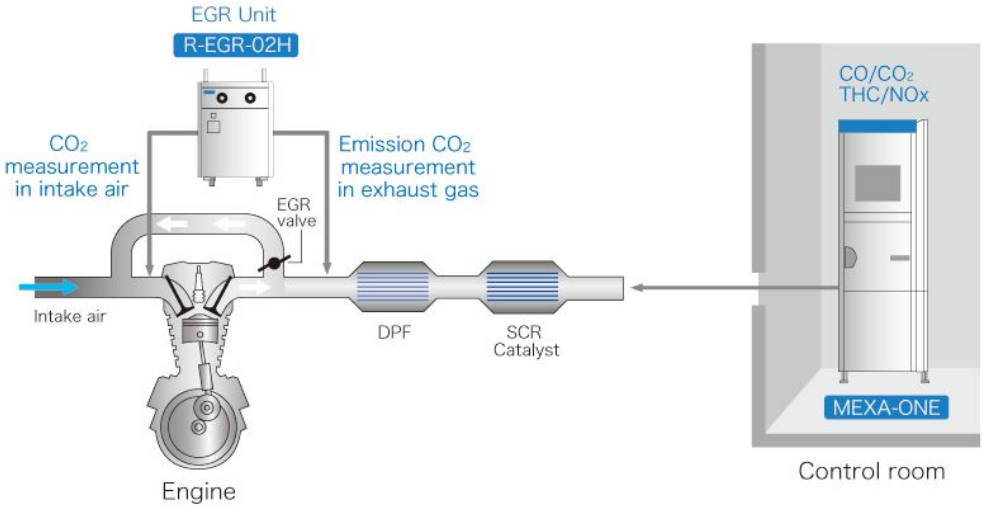
Slika 6.2 Horiba uređaji kroz povijest [30]

Mjerenje dušikovih komponenti (NO, NO_2, N_2O, NH_3) je ključno za evaluaciju sustava za tretiranje NO_X izvan motora (engl. *aftertreatment*). MEXA-One se može jednostavno konfigurirati i prilagoditi testne mogućnosti ovisno o zadatku.



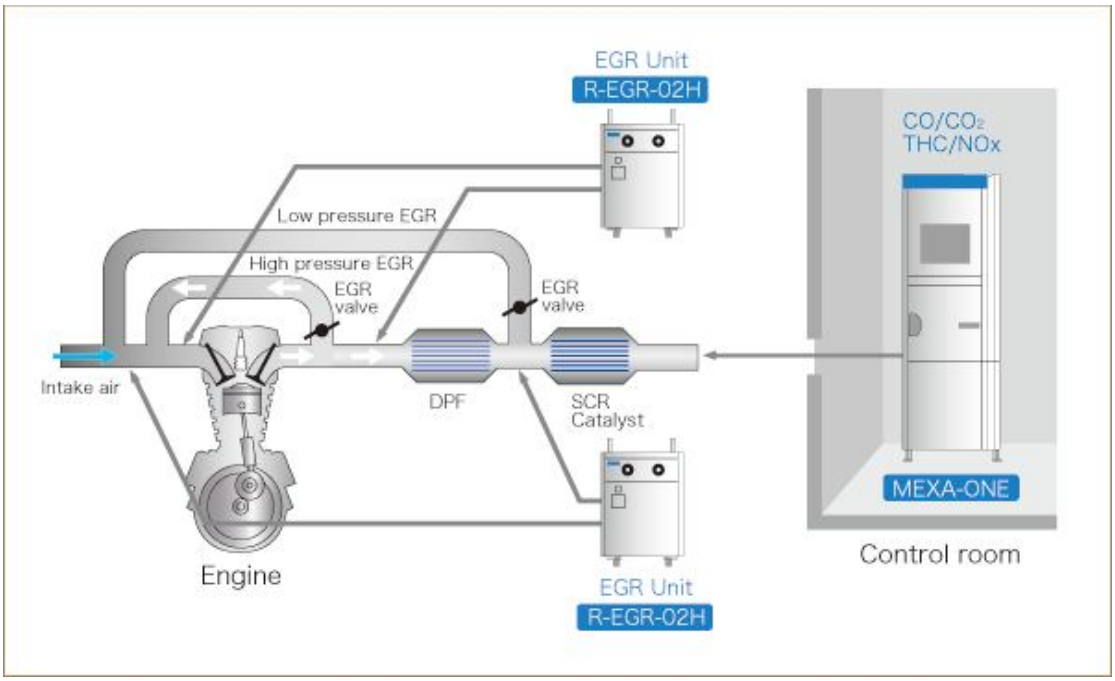
Slika 6.3 Mjerenje dušikovih spojeva izvan motora [30]

Kako bi se skratilo vrijeme odazivo i omogućilo još točnije dobivanje rezultata, MEXA-One koristi posebnu jedinicu za rukovanje EGR uzorkom.



Slika 6.4 EGR mjerenje [30]

Od sada je moguće pomoću MEXA-One analizatora očitavati mjerenja na EGR sustavu u više točaka, zahvaljujući modularnoj konstrukciji.

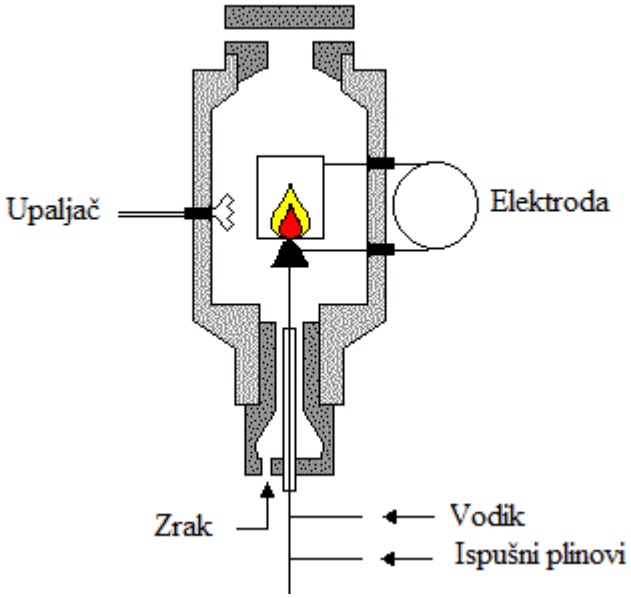


Slika 6.5 EGR mjerenje u više točaka [30]

AVL AMA i60

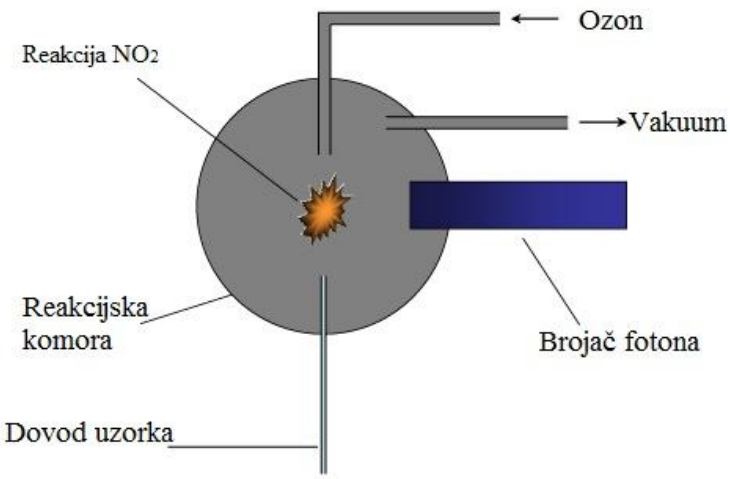
AMA i60 stanica predstavlja vrh AVL-ove ponude u stacionarnom ispitivanju ispušnih plinova. Ovaj uređaj radi na principu da usisava uzorak koji može biti smješten i do 20 metara od njega te potom vrši analizu pomoću standardnih analizatora za HC, CO, CO_2, NOx, N_2O, CH_4, O_2. Koristi se za certificiranje te istraživanje i razvoj za motore pogonjene svim vrstama goriva. Idealan je za razvoj i certifikaciju prema EPA/CARB/ECE/JPN i ostalim pravilima. Za mjerenje pojedinih tvari koriste se različiti moduli i principi mjerenja od kojih većinu na sličan način koriste i drugi stacionarni analizatori:

- FID - (engl. *flame ionizator detector)* - koristi se za mjerenje apsolutne količine ugljikovodika (HC) u ispušnom sustavu. Princip rada je da se organske molekule ugljika ioniziraju u vodikovom plamenu koji gori u električnom polju. Plamen u analizatoru razgradi i ionizira ugljikovodike u uzorku do veoma malih dijelova. Ioni uzrokuju razliku u naponu električnog polja koja je proporcionalna broju ugljikovih atoma u uzorku. Korištenjem parametra sadržaja ugljikovodika bez metana (eng. *non methane hydrocarbon*) može se odrediti čak i koncentracija CH_4.



Slika 6.6 FID sustav

- CLD - (engl. *chemiluminescence detector*) - je dizajniran za mjerenje koncentracije dušikovih oksida. NO_x je definiran kao suma koncentracije NO i NO_2. Način na koji radi ovaj modul jest korištenjem foto diode i popratne elektronike koja broji emisiju fotona nakon što se pobuđeni NO_2 vrati u niže energetsko stanje. Broj fotona je proporcionalan broju NO u uzorku. NO_2 nastaje vezivanjem NO sa ozonom (O_3) koji se proizvede pomoću struje čistog kisika u CLD modulu. Da bi dobili konačan broj NOx, NO_2 se mora pretvoriti u NO pomoću katalizatora unutar modula.



Slika 6.7 CLD sustav (izvor: cambustion.com)

- PMD - (engl. *paramagnetic detector*) - služi za mjerenje koncentracije kisika u uzorku. Princip iza ovog mjerenja leži u paramagnetskom svojstvu molekula kisika u magnetskom polju. Pojednostavljeno, molekule kisika su u senzoru privučene u magnetsko polje i trenutno stvore parcijalni pritisak na senzor koji se uslijed dobivenog momenta zarotira. Veličina dobivenog momenta je proporcionalna količini kisika, signal se pretvara u digitalni i dobiva očitanje. Mjerenje se odvija u temperaturno stabilnoj atmosferi da se izbjegnu greške u mjerenju uslijed promjene temperature.
- LDD - (engl. *laser diode detector*) - je dizajniran za mjerenje koncentracije amonijaka i vode u ispušnim plinovima. AVL LDD je prva laserska dioda za analizator te vrste na tržištu, napravljena posebno za mjerenja koncentracije amonijaka u ispuhu. Princip se temelji na Beer-Lambertovom zakonu koji tvrdi da je posljedica međudjelovanja fotona i čestica koje ih absorbiraju jest smanjenje snage ulaznog i izlaznog snopa. U ovoj metodi se laserski snop emitira kroz zagrijani uzorak prema detektoru, foto diodi. Metoda je vrlo precizna i laseru se mogu podešavati valne duljine (najčešće infracrveni spektar) ovisno o tvari koja se promatra.

Slika 6.8 AVL AMA i60 [29]

	Single Stream Cabinet / AMA i60 R1C	**Single / Dual Stream Cabinet***
General		
Dimensions (WxHxD)	660 x 1550 x 900 mm	660 x 1970 x 900 mm
Weight	150 kg	250 – 450 kg (depending on configuration)
Operation	External desktop / notebook	Optionally integrated PC with touch screen / keyboard and trackball or external desktop / notebook
Max. Configuration	1 stream + EGR / Tracer	2 streams + EGR / Tracer
Host Communication	RS 232, LAN (TCP/IP), ASAM GDI	
Voltage Supply	3~ 400 VAC (3/N/PE) ± 10%, 50/60 Hz ± 2%, max. 11 kVA 2x 120 VAC (N/PE) ± 10%, 50/60 Hz ± 2%, max. 7.2 kVA	
Ambient Conditions		
Temperature	5 – 40 °C (41 – 104 °F)	
Relative Humidity	Max. 80 %, non-condensing	
Ambient Pressure	800 – 1050 hPa	
Sample Gases and Test Gases		
Sample Inlet Pressure	± 300 hPa rel.	
Sample Flow Rate	10 l/min (per stream)	
Condensate disposal	Peristaltic pumps	
Supply Gases		
Inlet Pressure	1000 – 3000 hPa rel.	
Zero Gas	Nitrogen / N_2 / Synthetic Air	
Test Gases		
Inlet Pressure	1000 – 3000 hPa rel.	
FID Fuel	40 % / 60 % H_2 / He	
FID Burner Air	Synthetic Air	
Control Air (HFID)	Compressed Air	
CLD Ozone Generator	100 % oxygen (O_2)	
CLD Nox Converter Efficiency	≥ 95 %	

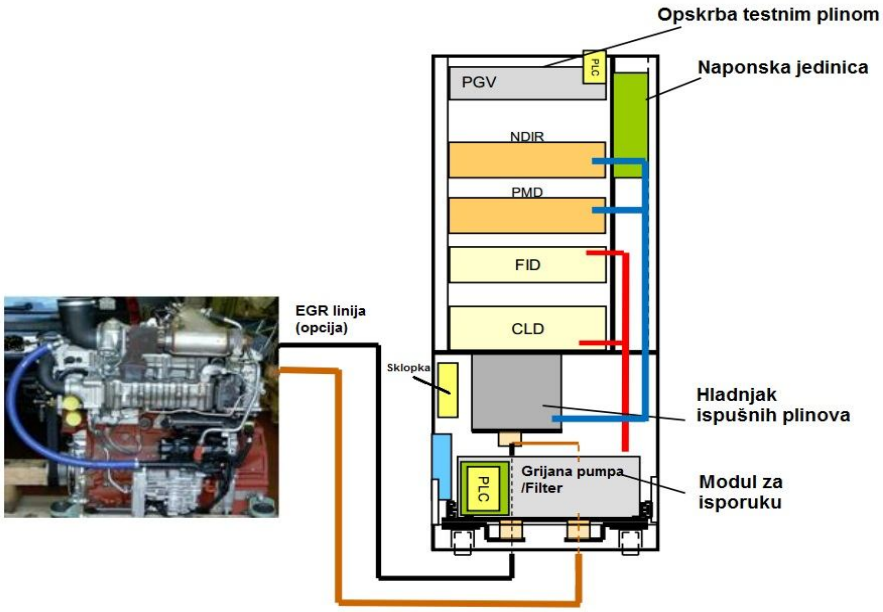
*also available as double cabinet version for three or four sample streams plus EGR / Tracer

Slika 6.9 Tehnički podaci AVL AMA i60 [29]

FEV EmissionRate FEVER

Sustav je dizajniran da se može lako održavati i da bude fleksibilan, kako bi olakšao proces ispitivanja. Kao i prethodna dva uređaja, može se koristiti za certificiranje i u razvoju novih motora i sustava. Karakterizira ga najbrže vrijeme odaziva pri dinamička mjerenja. Ventilacijski sustav omogućava kondicioniranje pojedinih modula kako ne bi došlo do fluktuacije u temperaturi što omogućava visoku točnost mjerenja i reprezentativne rezultate. Osim što može obrađivati standardne komponente ispušnih plinova kao što su: HC, CH_4, NOx, CO, CO_2, O_2; također se mogu ugraditi dodatni analizatori na zahtjev. Funkcije uređaja nadzire integrirani PCI sustav koji radi na operativnom sustavu Windows 7. Svim funkcijama se može pristupiti putem korisničkog sučelja na ekranu putem glavnog izbornika. Neke od značajki uređaja su mogućnost obrade podataka za 4 ispitna postolja, različite vrste grijanih filtera, analogni ispis očitanja i izračunatih vrijednosti te hladni i topli EGR za ugljik dioksid i kisik.

Slika 6.10 FEV EmissionRate FEVER [31]



Slika 6.11 Prikaz modula FEV FEVER [31]

Measurement of	CO, CO_2, THC, CH_4, NOX, NO, NO_2, O_2 in undiluted exhaust gas emissions of gasoline and diesel engines	
Analyzer		
CO CO_2 THC CH_4 NO/NOX O_2	NDIR NDIR FID wet FID cutter CLD PMD	0 ... 0,5; 0 ... 10 Vol % 0 … 1; 0 …16 Vol% 10; 100; 1,000; 10,000 ppm C3 10; 3000 ppm C1 0 … 10; 0 ... 10000 ppm 0 ... 0.5; 0 … 25 Vol %
Media Supply		
Compressed air Burner air span gases zero gases	6 bar H_2 (option He/H_2 on request) depending on configuration N_2 and synthetic air	
Sampling rate	10 Hz	
Operation	Touch screen PC operating on Windows 7	
Interface	AK via LAN (TCP/IP) or RS232 (optional)	
Power supply	400 V / 50 Hz /16 A	
Power consumption (when fully equipped)	During warm-up: 9 kVA Operation: 2 kVA	
Cabinet design	19" technology; fitted with casters for mobility	
Dimensions (w x h x d)	700 x 2000 x 800 mm	
Weight	max. 400 kg (fully equipped with two lines)	
Color	RAL 7035 (light gray)	

Slika 6.12 Tehnički podaci za FEV FEVER [31]

6.2. *Prijenosni analizatori*

Horiba MEXA-584L

Radi se o prijenosnom analizatoru pet komponenti ispušnih plinova: CO, CO_2, HC, O_2 i NO. Također, ima mogućnost mjerenja lambda faktora te kao dodatne opcije mjerenje broja okretaja motora i temperaturu ulja u motoru. Težina od 4 kilograma i velik LCD ekran čine ovaj uređaj lako prenosivim i jednostavnim za korištenje. Uređaj također ima analogne outpute što omogućava njegovo spajanje na razne komercijalne software za obradu podataka. Točnost u mjerenju i obradi podataka se može vidjeti u tablici niže.

Tablica 6.1. Prikaz točnosti u mjerenju za 584L [30]

Komponenta	Raspon	Točnost
HC	0-60,000 ppm	Do 60 ppm ili 5% očitanja
CO	0-10%	Do 0.03% vol ili 3% očitanja
CO_2	0-20%	Do 0.03% vol ili 5% očitanja (0-8%) Do 0.04% vol (8-15%) Do 0.06% vol (15-20%)
O_2	0-25%	Do 0.1% vol ili 3% očitanja (whichever is larger)
NO	0-5000 ppm	Do 25 ppm ili 4% očitanja (0-4000 ppm) Do 8% očitanja (4000-5000 ppm)

Slika 6.13 Horiba MEXA 584L [30]

Easier to use than ever!

- **Remote control and data acquisition available from PC by optional kit.**
- **Light, durable sampling tube is easy to handle and worry free.**

Motorcycle probe (option) **allows measurement of motorcycle exhaust gas.**

Drain separator (option) **improves the ability to remove water from the sample, and protects the detector from water damage.**

Specifications

- **Model:** MEXA-584L
- **Conformed standards :** • OIML Class 0 • CE • FCC
- **Application:** Exhaust gases in idling status from gasoline vehicle (two-wheel or four-wheel vehicle), LPG vehicle (four-wheel vehicle)
- **Principle:**
  - CO, HC, CO_2: non-dispersive infrared (NDIR)
  - Air-to-fuel ratio (AFR), Excess air ratio (λ, lambda): carbon balance method, or Brettshneider method (with O_2 measurement) *1
- **Measured/displayed components:**
  Measured components (standard):
  - CO: 0.00 % vol to 10.00 % vol
  - HC: 0 ppm vol to 10,000 ppm vol, or 0 ppm vol to 20,000 ppm vol *2 (as hexane equivalent value)
  - CO_2: 0.00 % vol to 20.00 % vol
  - AFR: 10.0 to 30.0
  - LAMBDA: 0.000 to 9.999

  External input components (optional):
  - O_2: 0.00 % vol to 25.00 % vol
  - NO: 0 ppm vol to 5,000 ppm vol
  - Engine speed (RPM): 0 rpm to 9999 rpm (Guaranteed range for linearity is 200 rpm to 6000 rpm)
  - Oil temperature (TEMP): 0 ℃ to 150 ℃
- **Monitor display:** LCD (black and white, 320 x 240 dot)
- **Input/outputs:**
  - Digital input/output: RS-232C (standard), RS-485 (option) *3
  - Printer: RS-232C
- **Calibration gas:**
  Dedicated cylinder
  - Mixed gas of CO, C_3H_8 and CO_2,
  - NO (for the instrument with NO analyzer (optional))
- **Environment:**
  - Ambient temperature:
    0 ℃ to 45 ℃
    5 ℃ to 40 ℃ (for OIML conformity)
  - Humidity: below 90 % as relative humidity
  - Ambient pressure: 80 kPa to 106 kPa
- **Power supply** *4**:** 100 V to 240 V AC 50/60Hz, single phase
- **Power capacity:** Approx. 55 VA at stable state
- **Dimensions:**
  260(W) x 357(D) x 157(H) mm (without optional units)
- **Mass:** Approx. 4 kg (without optional units)
- **Response speed** *5, 6**:** Within 15 s, as Td + T95,
- **Repeatability** *5, 7**:**
  - CO: Within 0.01 % vol, or within 1.7 % of reading (whichever is larger)
  - HC: Within 3.3 ppm vol, or within 1.7 % of reading (whichever is larger)
  - CO_2: Within 0.17 % vol, or within 1.7 % of reading (whichever is larger)
- **Warm-up time:** 5 minutes

Options

- **O_2 sensor**
- **NO sensor**
- **Thermometer tachometer**
- **Tachometer**
- **Oil temperature sensor**
- **Serial printer**
- **Printer cable** (1.5 m)
- **Input/output cable** (RS-232C cable; 2.5 m, 5 m, 10 m)
- **Analog output board** (0 - 1 V)
- **Optional probe** (ϕ6/ϕ4 mm, copper pipe)
- **Drain separator** (Separately attached)
- **Motorcycle probe**

Printout example

***** VEHICLE INSPECTION REPORT *****		
CO	3.76	%vol
HC	635	ppmvol
CO2	7.96	%vol
AFR	17.5	
LAMBDA	1.190	
NO	103	ppmvol
O2	0.02	%vol
H/C	1.85	
O/C	0.00	

Slika 6.14 Izvadak iz Horiba uputstva za 584L [30]

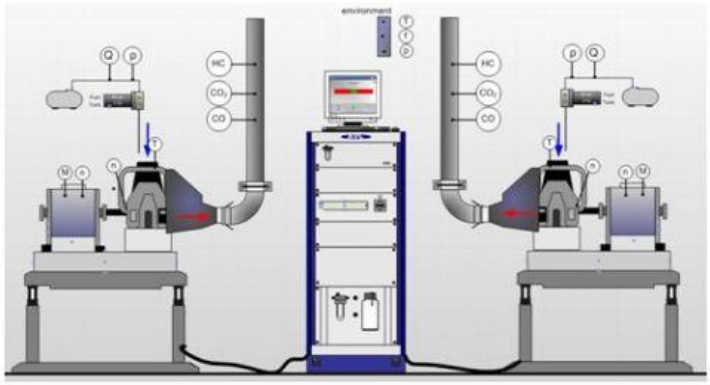
AVL SORE

SORE (eng. *Small off-road engine*) je skupina sustava rađena za testiranje motora snage ispod 19 kW. Njihova namjena je za certificiranje, istraživanje i razvoj, test kvalitete i test izdržljivosti motora. Budući da se radi o sustavu specijaliziranom za male motore to jamči točnost rezultata i pouzdanost u ponovljena mjerenja. Glavna komponenta za mjerenje emisije bazirana je na ne-disperzivnom infracrvenom analizatoru koji mjeri CO, CO_2 i HC. Analizatori su u potpunosti optimizirani i kompenziraju efekte temperature, tlaka i interferencije. NOx i O_2 senzori su dostupni kao opcija. Upravo zbog uske specijalizacije u ponudi je više sustava od kojih krajnji korisnik odabire njemu potrebne:

- SORE GEM EOL,
- SORE GEM Certification,
- SORE GEM DURABILITY,
- SORE GEM Data Acquisition.

Glavne komponente SORE sustava su:

- SORE AMA i60 Combi,
- SORE MB-CAA,
- SORE MB-SAA,
- SORE DYNOCON,
- SORE MSR-MB,
- SORE CAA TEST STAND.



Slika 6.15 AVL SORE GEM EOL sustav [29]

6.3. *Vage za mjerenje potrošnje goriva i mjerači temperature*

HORIBA FFM-1000

Mjerač protoka goriva (gornji na slici) - ovaj uređaj se sastoji od coriolisovog protokomjera, pumpe, izmjenjivača topline i svih potrebnih kontrola za mjerenje potrošnje goriva. Coriolisov protokomjer je jezgra samog sustava i koristi se niz godina kao standard u mjeračima protoka goriva. Ovaj mjerač mjeri masu tako da su pretpostavke o gustoći nepotrebne. Mjerač temperature goriva (donji na slici) - ova jedinica posjeduje električni grijač i vodeno hlađenje za kontrolu temperature goriva. Također, ima i pumpu koja je potrebna da održi određen protok goriva tijekom cijelog perioda mjerenja. Jedan kontroler upravlja s obje jedinice koristeći se JAVA softwareom i grafičkim korisničkim sučeljem po uzoru na MEXA liniju proizvoda. Uređaj se može spojiti na prijenosno računalo te se i na njemu mogu nadzirati sve kontrole i vršiti potpuna dijagnostika pri mjerenju. Tehnički podaci su dani u tablici ispod.

Slika 6.16 Horiba FFM-1100 [30]

Tablica 6.1 Tehnički podaci za FFM-1100 [30]

Limits of Flow Density	0-144 liters/hr (0-0.2 to 108 kg/hr) range: +/- 0.05% of point from 4-108 kg/hr
Limits of Uncertainty	+/- 0.03% of point at 0.7 g/cm^3 from 20 deg C to 60 deg C and pressure of 1 to 2 Bar (101to 202 kPa)
Measuring Range	0.2-108 kg/hr
Measuring Frequency	10 Hz
Measurement Uncertainty	+/- 0.05% of point 0.12%
Density Uncertainty	+/- 0.0002% g/cm^3
Temperature Control (steady state)	1.0 deg C Temperature: 10-80 deg C
Fuel Circulation Rate	Approx. 250 l/hr (fixed rate dependent on pressure)
Fuel Supply to FFMU	Flow Rate: 90 0 225 lph, Pressure: 0.5-5 psig (50 to 501 kPa)
Fuel Supply to Engine	Flow Rate: 0-144 lph, Pressure: 0.8-87 psig (6-757 kPa), Temperature: 10-80 deg C
Water Supply to FTCU	Flow Rate: 280-880 lph, Pressure: 8-87 psig (6-757 kPa), Temperature: 10-35 deg C
Heating Capacity	1.6 kW
Mechanical Data	FFMU: 28.0 in W, 24.0 in H, 12.0 in D (71.2W x 61H x 30.5 cm) Weight:135 pounds (62kg) FTCU: 28.0 in W, 24.0 in H, 12.0 in D (71.2W x 61H x 30.5 cm) Weight (FFM): 120 pounds (55 kg), Weight (Electrical Enclosure): 35 pounds
Power	Electrical Power Supply: 24 VDC, Power: 120 VAC, 3 kW max
Controller Interface	AK interface from laptop to FFMU
Analog Output	1-10 VDC
Fuel Type	Gasoline, up to 10% alcohol, Diesel

AVL Fuel mass flow meter and Fuel temperature control

AVL-ovo rješenje se bazira na patentiranom sustavu kontrole tlaka koji osigurava konstantne i promjenjive veličine tlaka i temperature goriva. To omogućava korištenje na motorima snage do 600 kW bez značajnih zahvata u sustavu. Princip mjerenja je isti kao i kod Horibinog sustava, korištenjem coriolisovog protokomjera. Upotrebom preciznog senzora masenog protoka potrošnja goriva se određuje konstantno u jedinici kg/h. Točnost mjerenja može biti do 0.12% na razini cijelog sustava. Kontrola temperature goriva se zahtijeva u slučajevima kad motor mora biti testiran duži period vremena, a to traži konzistentnost uvjeta pri testiranju. Temperatura goriva se može zadati u rasponu od 10 - 80°C, dok posebna verzija omogućava čak do -30°C. Temperatura koju uređaj može osigurati gorivu ovisi o temperaturi vode u hlađenju i temperaturi povrata goriva iz motora. Tehnički podaci dani su u tablici ispod.

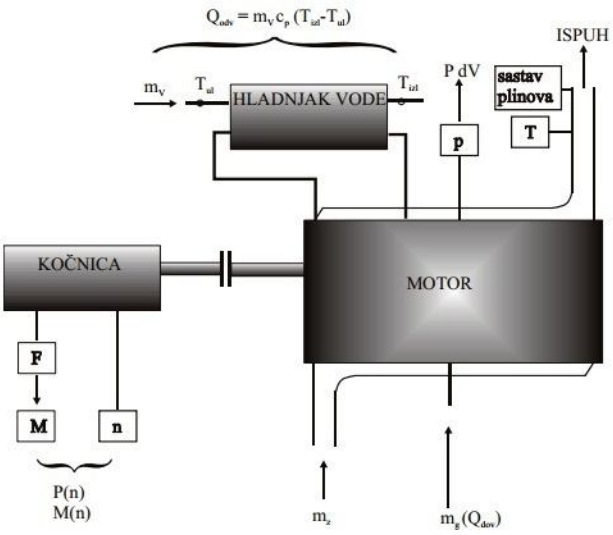
Slika 6.17 AVL Fuel mass flow meter and Fuel temperature control [29]

Tablica 6.2 Tehnički podaci za AVL Fuel Mass Flow Meter and Fuel Temperature Control [29]

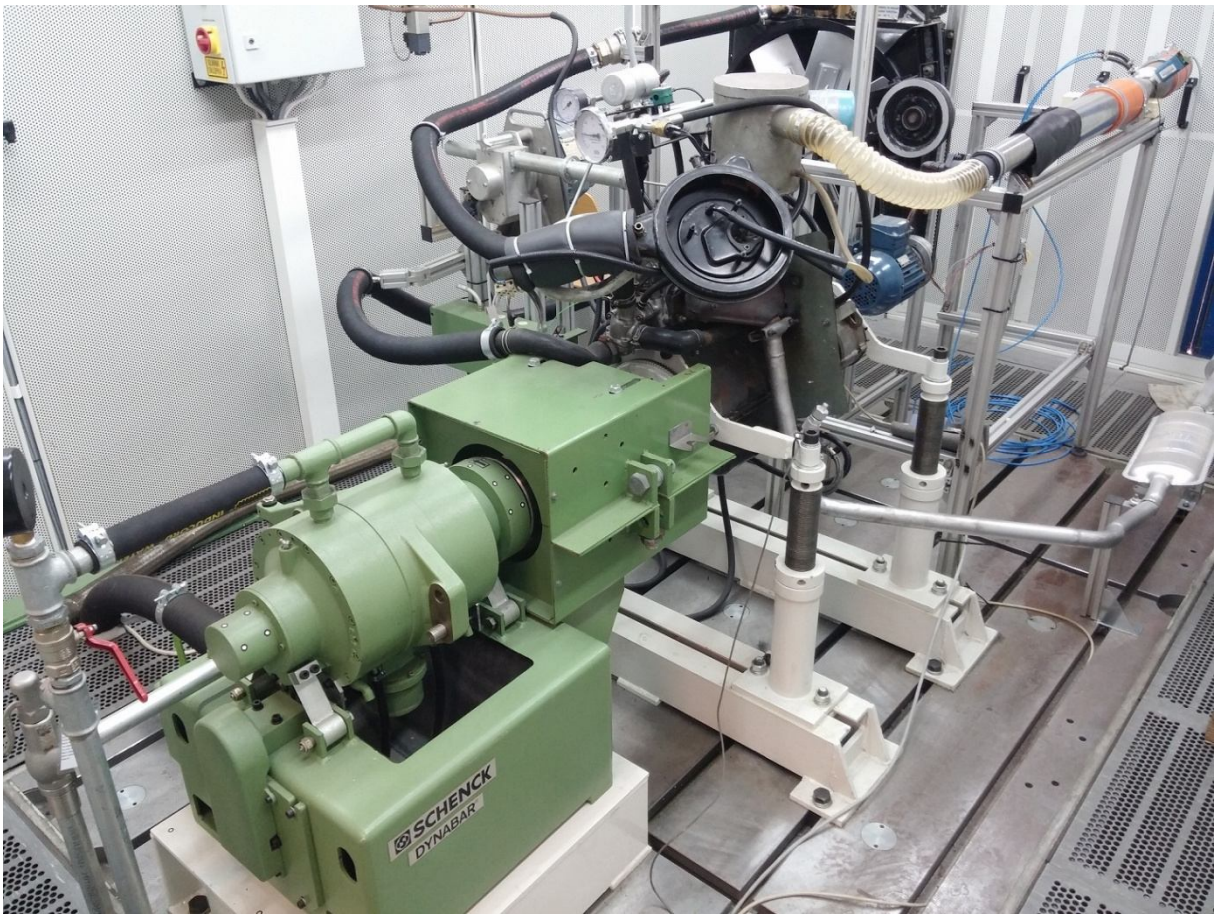
Technical Details AVL Fuel Mass Flow Meter and Fuel Temperature Control	
Type:	AVL 735S/753C
Measurement principle:	Mass flow
Measurement ranges: Mass	 0 … 125 kg/h
Measurement uncertainty: Mass	 ≤ 0.12% (acc. to DIN 1319)
Interfaces / output signal:	RS232, analog I/O, 0 … 10 V digital I/O
Measurement frequency:	20 Hz (analog)
Response time:	< 125 ms
Fuel types:	Standard*) and 100% bio fuels
Engine feed pressure:	< 0 … 600 kPa
Fuel circulation quantities:	Optionally 240/450/540 l/h
Control range:	10 … 80° C
Stability:	Better than 0.02° C
Heating / cooling:	1.6 kW / 1.6 kW
Power supply:	230 V, 50 Hz, 220 V, 60 Hz 100 V, 50–60 Hz, 115 V, 60 Hz
Power consumption:	0.4 kW (without heating)
Ambient temperature:	5 … 50° C
Dimensions (W x H x D):	770 x 1,630 x 345 mm

6.4. *Kočnice za mjerenje snage i momenta*

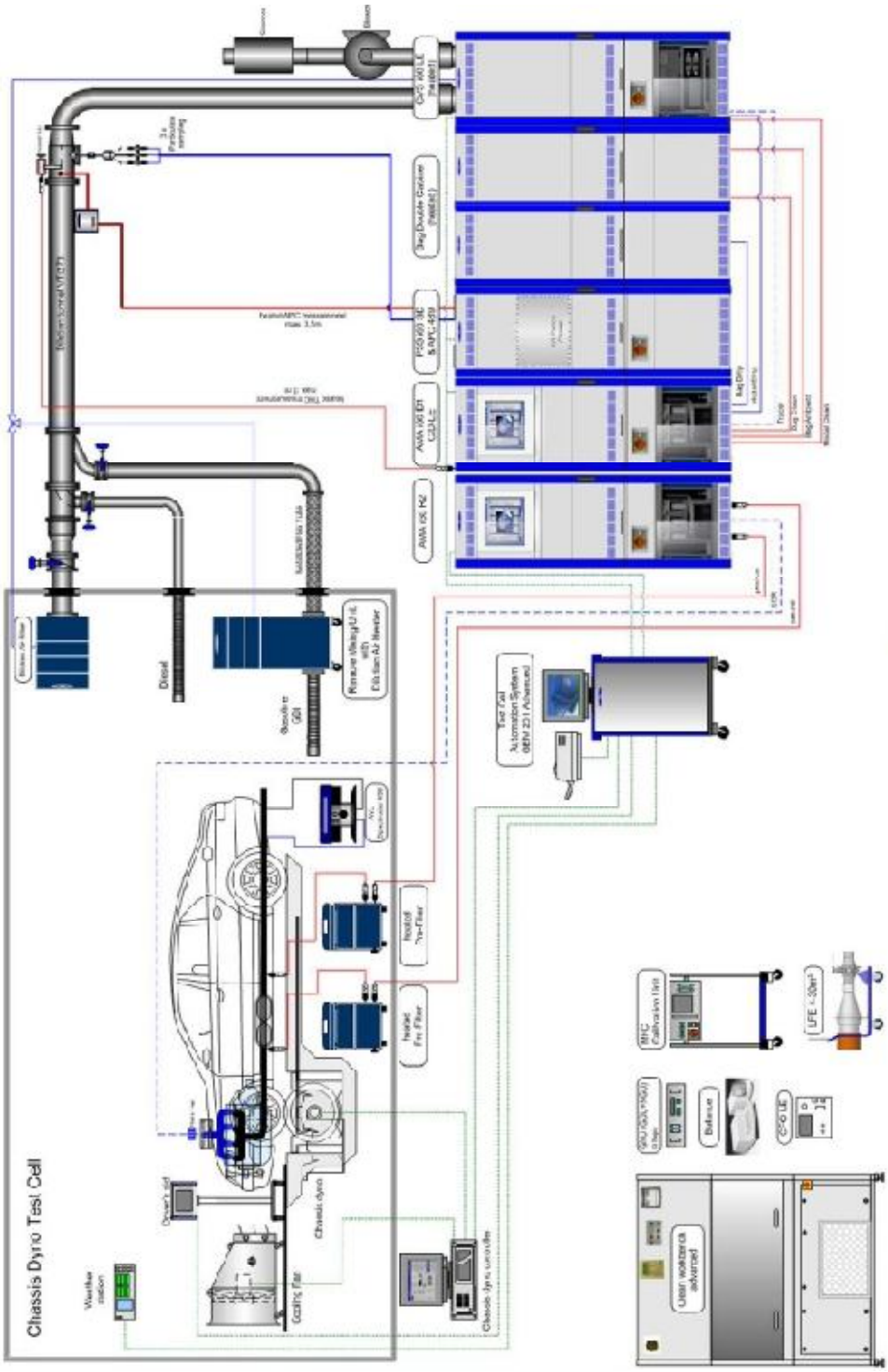
Osim analizatora ispušnih plinova u ispitnom laboratoriju je potrebno imati i uređaj koji omogućava mjerenje snage i momenta u datom trenutku i koji može preuzeti određeno opterećenje pri testiranju. Kočnica može motor dovesti u stanje opterećenja slično onome kakvo ima u eksploataciji. Metoda mjerenja snage kočnicom, osim za laboratorijska ispitivanja, koristi se za mjerenje karakteristika motora u istraživanju i razvoju, proizvodnji i završnoj kontroli. Vrste kočnica za ispitivanje motora su: mehaničke, hidrauličke, elektromagnetske i pneumatske. Danas se većinom u domeni ispitivanja ispušnih plinova koriste elektromagnetske kočnice. Kod statora motora nalazi se uzbudni namotaj kroz koji teče istosmjerna struja. Kako teče istosmjerna struja tako se stvara magnetsko polje koje obuhvaća polove rotora i stijenke kućišta. Zbog rotacije ozubljenog rotora nastaju nastaju na unutarnjoj strani statora vrtložne struje koje sa svoje strane stvaraju magnetsko polje suprotno rotaciji rotora. Na taj način se stvara kočioni moment koji se može regulirati jačinom struje uzbude. Kućište motora mora biti dobro uležišteno jer kočnica ima tendenciju ka rotaciji. Oslonac statora se najčešće oslanja polugom točno određene duljine. Iz duljine te poluge i mjerenjem sile na osloncu određujemo moment. Svi izmjereni parametri obrađuju se pomoću računala. Da bi to bilo moguće koriste se uređaju za akviziciju podataka (analogno digitalni konverteri) koji analogni signal pretvaraju u informaciju u digitalnom obliku. Oprema za mjerenje mora imati visoku točnost i rezoluciju kako bi mogla pratiti vrlo brze promjene u parametrima rada motora.



Slika 6.18 Shema spajanja kočnice



Slika 6.19 Kočnica na FSB-u



Slika 6.20 Prikaz kompletnog ispitnog laboratorija sa svom mjernom opremom [9]

7. Smjernice pravilnika R-83 za mjernu opremu

Zahtjevi za mjernu opremu, kojom se verificiraju razine štetnih tvari u ispušnim plinovima, dani su europskim propisima koji se koriste za izradu direktiva. Zahtjevi za opremu su vrlo specifični i precizni te zahtijevaju ispunjenje svih stavki kako bi testiranje bilo ispravno. Razlog takvoj rigoroznosti leži u činjenici da svim testiranim vozilima trebaju biti omogućeni isti uvjeti i standardizirana oprema kako bi se takvim testovima postigla legitimnost i ispravnost rezultata.

7.1. Oprema za mjerenje ispušnih plinova

Za analizu se koriste kontinuirano proporcionalni uzorci razrjeđenih ispušnih plinova. Kvantitet štetnih sastojaka ispušnih plinova se korigira s obzirom na već postojeći udio istih sastojaka u okolnom zraku.

Zahtjevi za mjernu opremu - prikupljanje uzoraka [1]:

- Uzorak plina se uzima uzlazno od usisnog uređaja,
- Protok ne smije odstupati od srednje vrijednosti više od ±2 %,
- Stopa prikupljanja uzorka ne smije biti manja od 5 L/min i ne smije biti preko 0,2 % ukupnog protoka ispušnih plinova,
- Uzorak razrijeđenog ispušnog plina treba biti prikupljen pri konstatnom protoku u blizini usisa okolnog zraka,
- Uzorak razrijeđenog zraka ne smije biti zagađen ispušnim plinovima iz dijela za mješanje,
- Stopa skupljanja uzorka razrijeđenog zraka mora biti usporediva s onom ispušnih plinova,
- Materijali korišteni pri uzimanju uzorka ne smiju utjecati na koncentraciju štetnih tvari u ispušnim plinovima,
- Filteri mogu biti korišteni za odstranjivanje krutih čestica iz uzorka,
- Ventili korišteni za usmjeravanje plinova trebaju biti brzo djelujući,

- Brzi nepropusni spojevi se mogu koristiti između troputnog ventila i vreća za prikupljanje uzorka. Spojevi se moraju brtviti sami na strani vreće za uzorke.
- Uzorci ispušnih plinova se prikupljaju u vreće za uzorke dovoljnog kapaciteta da ne utječu na količinu protoka. Materijal vreće treba biti takav da ne utječe na sam proces mjerenja niti na kemijski sastav prikupljenog uzorka preko ±2 % unutar 20 minuta (npr. lamelirani polietilen/poliamid filmovi ili fluorirani poli-ugljikovodici).

HC prikupljanje uzoraka - Dieselov motor:

- Sustav za prikupljanje HC uzoraka treba sadržavati grijanu sondu za prikupljanje, cijevi, filter i pumpu. Sonda za prikupljanje treba biti ugrađena na istoj udaljenosti od usisa ispušnih plinova kao i sonda za prikupljanje uzoraka čestica i to na način da međusobno ne interferiraju s uzorcima. Minimalan unutarnji promjer je 4 mm,
- Svi grijani dijelovi trebaju biti održavani na temperaturi od 463 K (190 °C) ±10 K, pomoću sustava za grijanje,
- Prosječna koncentracija HC određuje se metodom integracije,
- U grijanoj liniji za prikupljanje uzoraka treba se nalaziti grijani filter 99 % efikasnosti s česticama ≥ 0,3 μm, kako bi se odstranile sve čestice iz protoka plina za analizu,
- Vrijeme odaziva sustava za prikupljanje uzorka ne smije biti veće od 4 sekunde,
- HFID se koristi sa sustavom konstantnog protoka (izmjenjivač topline) kako bi se osigurao valjan uzorak, osim ako nisu urađene kompenzacije u protoku za CFV ili CFO,

Zahtjevi za analizu ispušnih plinova

1. CO i CO_2:

- Analizatori trebaju biti tipa NDIR, ne raspršujući infracrveni absorberi,
- Kod motora sa stranim paljenjem: analizatori trebaju biti tipa FID i kalibrirani propanom ekvivalentnim broju atoma ugljika,
- Kod motora s kompresijskim paljenjem: analizator treba biti tipa HFID. Dijelovi (detektor, ventili, cijevi) trebaju biti ugrijani na 463 K (190 °C) ±10 K. Kalibriran propanom ekvivalentnim broju atoma ugljika,

2. NO_x analiza:

- Analizator treba biti ili CLA (engl. *chemi-luminescent*) ili ne raspršujući UV rezonantni absorber (engl. *non-dispersive ultra violet resonance absorption*) NDUVR. Oba moraju imati NO_x-NO pretvarače.

3. CH_4 analiza:

- Analizator treba biti ili kromatograf kombiniran s FID-om. Kalibriran metanom ekvlivalentnim broju atoma ugljika.

4. Općenito:

- Analizatori moraju imati raspon mjerenja takav da se može izmjeriti koncentracija štetnih plinova u uzorku,
- Greška mjerenja ne smije prijeći ±2 %, bez obzira na vrijednost plinova za kalibriranje,
- Za koncentracije ispod 100 ppm, greška mjerenja ne smije prijeći ±2 ppm,
- Uzorak okolnog zraka se mjeri na istom analizatoru s potrebnim rasponom mjerenja,
- Ne smije se koristiti uređaj za sušenje ispušnih plinova prije analizatora, osim ako se ne pokaže da nema utjecaja na koncentraciju štetnih tvari.

7.2. *Oprema za mjerenje mase čestica*

Oprema za prikupljanje uzorka čestica se sastoji od sakupljačke sonde koja se nalazi u protočnoj cijevi, filtera, pumpe, regulatora protoka, mjernih uređaja i cijevi za prijenos čestica.

Općeniti zahtjevi:

- Sonda za prikupljanje uzoraka mora biti smještena tako da plin koji prolazi kroz nju bude homogena mješavina zraka/ispušnih plinova,
- Protok uzorka čestica mora biti proporcionalan protoku razrijeđenog ispušnog plina u cijevi za razrijeđivanje i to u točnosti od 5 %,

- Prikupljeni razrijeđeni ispušni plinovi se održavaju na temperaturi ispod 325 K (52 °C) kroz 20 cm od uzlazne ili silazne plohe filtera, osim u slučaju testa regeneracije kad temperatura mora biti ispod 192 °C,
- Uzorak čestica se skuplja u filteru smještenom na njegovom držaću unutar protoka uzorka ispušnih plinova.
- Svi dijelovi sustava za prikupljanje uzorka moraju biti konstruirani tako da minimalno utječu na ishod rezultata. Svi dijelovi su napravljeni od električno vodljivih materijala koji ne reagiraju s komponentama ispušnih plinova i uzemljeni su kako bi se izbjegli elektrostatički efekti,
- Ako nije moguće postići kompenzaciju u promjeni protoka potrebno je koristiti izmjenjivač topline i uređaj za kontrolu temperature kako bi se postigao konstantan željeni protok.

7.3. *Oprema za mjerenje broja čestica*

Oprema za mjerenje broja čestica sastoji se od cijevi za razrijeđivanje, sakupljačke sonde i odstranjivača hlapljivih čestica (VPR) smještenog iznad brojača čestica (PNC).

Općeniti zahtjevi:

- Sakupljačka sonda i cijev za transfer čestica zajedno obuhvaćaju sustav za prijenos čestica (PTS). PTS vodi uzorak iz cijevi za razrijeđivanje do odstranjivača hlapljivih čestica,
- Zahtjevi za PTS: mora biti ugrađen blizu centralne osi cijevi, 10 do 20 promjera cijevi niže od ulaza plina, orijentiran uzlazno i paralelno sa stijenkom cijevi. Unutarnji promjer mora biti $\geq$ 8 mm,
- Uzorak plina koji prolazi kroz PTS mora zadovoljiti sljedeće uvjete: strujanje takvo da Reynoldsov broj bude < 1700. Vrijeme zadržavanja u PTS-u $\leq$ 3 sekunde.
- Bilo kakva konfiguracija uzroka za PTS kojoj je ekvivalentna penetracija čestica na 30 nm biti će smatrana ispravnom,
- Cijev koja vodi uzorak od VPR-a do PNC-a mora zadovoljiti sljedeće uvjete: unutarnji promjer mora biti $\geq$ 4mm. Vrijeme zadržavanja u cijevi $\leq$ 0,8 sekundi,

- Svi dijelovi sustava za prikupljanje uzorka od ispušne cijevi do PNC-a moraju biti konstruirani tako da minimalno utječu na broj čestica. Svi dijelovi su napravljeni od električno vodljivih materijala koji ne reagiraju s komponentama ispušnih plinova i uzemljeni su kako bi se izbjegli elektrostatički efekti,
- VPR uključuje uređaj za razrijeđivanje uzorka i za odstranjivanje hlapljivih čestica. Sonda za prikupljanje uzoraka mora biti smještena tako da plin koji prolazi kroz nju bude homogena mješavina zraka/ispušnih plinova,

8. Ispitni ciklusi

Ispitni ciklusi

U Europskoj uniji su ispitni ciklusi za ispitivanje emisije ispušnih plinova propisani zakonom za sva osobna vozila. Kako emisija ispušnih plinova varira najbolji način da se test može ponavljati je uvođenje standardiziranih laboratorijskih testova i ispitnih ciklusa koji se provode u kontroliranim uvjetima. Uvjeti i način provođenja testova su strogo specificirani u pravilnicima. Osobna vozila se testiraju na valjcima koji mogu biti podešeni da simuliraju gubitke trenja i otpora zraka. Prikupljanje uzoraka ispušnih plinova odvija se kako vozilo prolazi kroz predefinirani ispitni ciklus koji je dizajniran tako da simulira realne uvjete vožnje. Poznato je preko 250 ciklusa koji simuliraju ponašanje vozila na cesti, no standardiziran je NEDC (engl. *new european driving cycle*)

ECE+EUDC testni ciklus, poznat i kao MVEG-A ciklus, je bio korišten u EU za ispitivanje emisije i potrošnje goriva osobnih i lakih komercijalnih vozila (EEC Direktiva 90/C81/01). Ispitni ciklus se izvodio na valjcima. Cijeli ECE ciklus se sastojao od 4 segmenta ponavljana bez prekida iza kojih je slijedio jedan EUDC (engl. *extra urban driving cycle*) segment. Prije testa vozila su držana najmanje 6 sati na temperaturi 20-30°C. Nakon održavanja na temperaturi vozilo bi se upalilo i držalo u praznom hodu 40 sekundi.

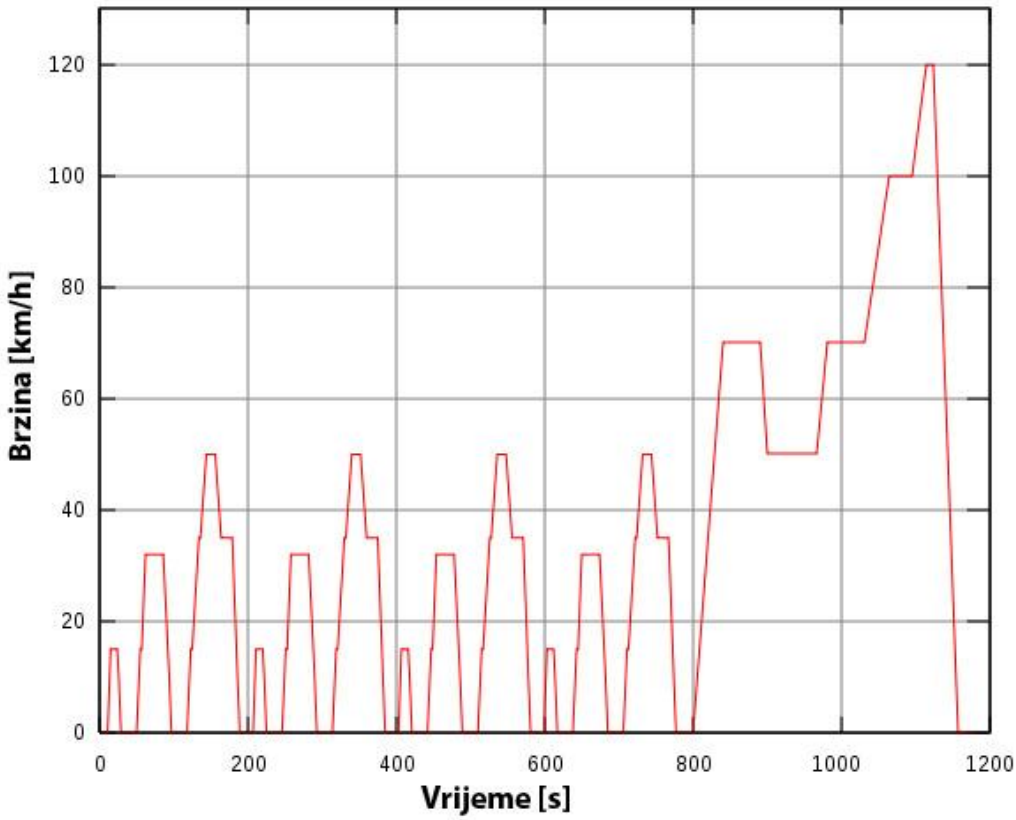
Tablica 8.1 Karakteristike ispitnih ciklusa

Karakteristike	**Jedinica**	**ECE 15**	**EUDC**	**NEDC**
Udaljenost	km	0.9941	6.9549	10.9314
Ukupno vrijeme	s	195	400	1180
Vrijeme stajanja	s	57	39	267

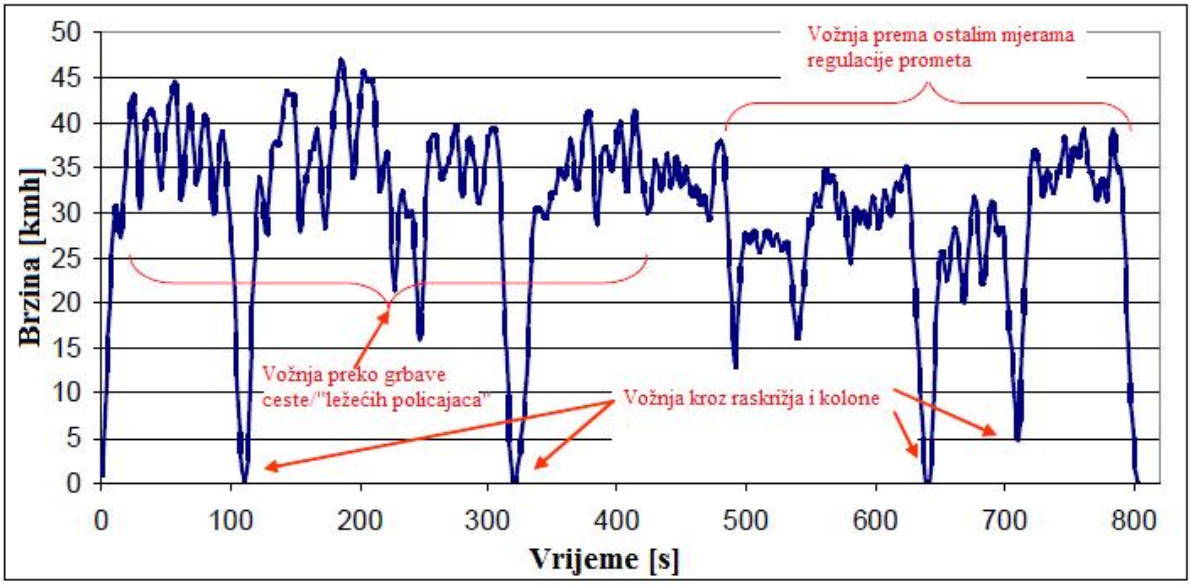
Prosječna brzina (sa stajanjem)	km/h	18.35	62.59	33.35
Prosječna brzina (bez stajanja)	km/h	25.93	69.36	43.10
Maksimalna brzina	km/h	50	120	120
Prosječno ubrzanje	m/s^2	0.599	0.354	0.506
Maksimalno ubrzanje	m/s^2	1.042	0.833	1.042

8.1. *NEDC*

NEDC testni ciklus je stupio na snagu 2000. godine. Jedina razlika u odnosu na MVEG-A je eliminiran period zagrijavanja motora u praznom hodu 40 sekundi. Kod NEDC testa se odmah po paljenju motora počinju prikupljati podaci. Zahtjev za eliminacijom perioda ugrijavanja je potaknuo proizvođače na pojačano kontroliranje emisije prilikom hladnog starta, pogotovo poboljšanje tehnologije katalizatora koji zahtijevaju postizanje radne temperature prije dostizanja maksimalne efikasnosti. Test započinje s 4 segmenta ECE ciklusa poznatog kao i UDC (engl. *urban driving cycle*) koji je razvijen kako bi simulirao vožnju u gradskim uvjetima. Karakterizira ga niska brzina vozila, smanjeno opterećenje i niska temperetura ispuha. EUDC ciklus je dodan kako bi se simulirao agresivniji način vožnje s maksimalnom brzinom od 120 km/h. Postoji i alternativni EUDC ciklus za slabija vozila s limitiranom maksimalnom brzinom na 90 km/h.



Slika 8.1 Prikaz NEDC ispitnog ciklusa [33]



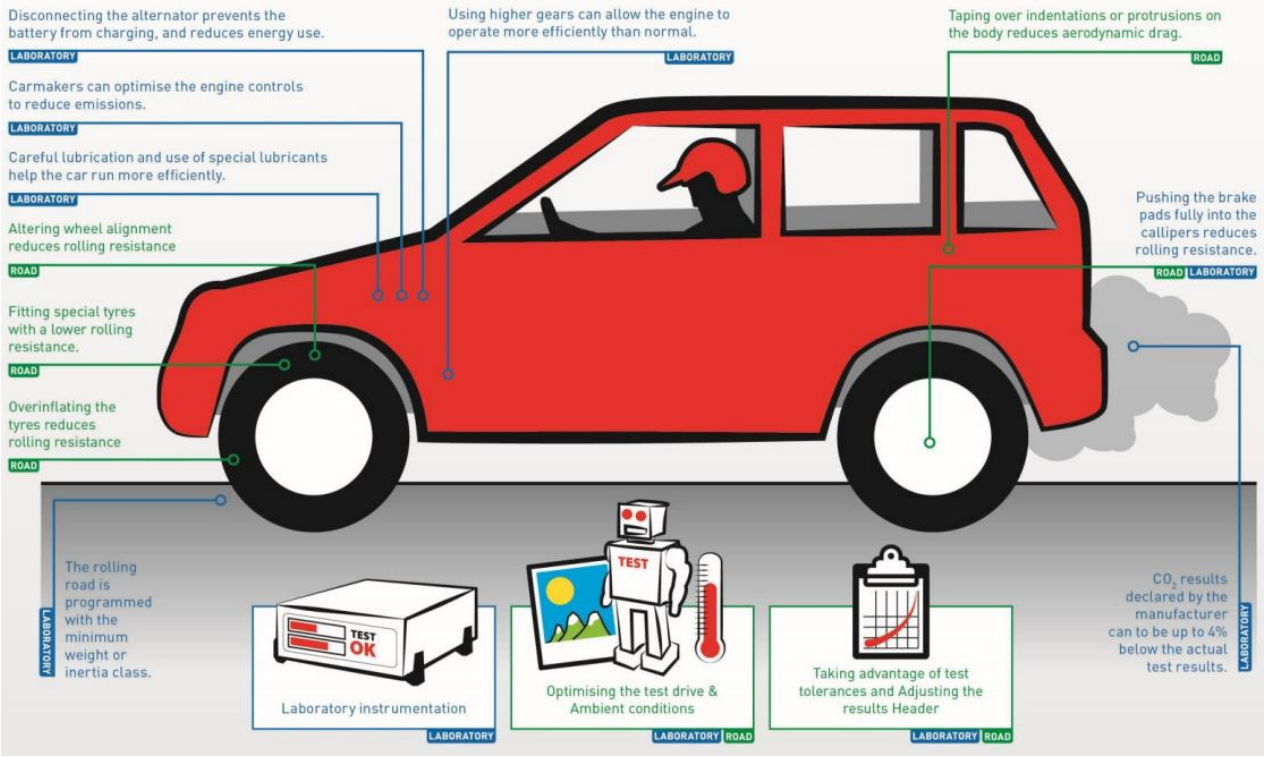
Slika 8.2 Prikaz realnih uvjeta vožnje [11]

8.2. *Kritika NEDC ciklusa*

NEDC ispitni ciklus je predmet mnogih rasprava i pitanja o mogućnosti predstavljanja realnih uvjeta vožnje. Ovaj ciklus je ujednačen i stiliziran na način da se sastoji od obrasca ujednačene akceleracije, konstantnih brzina vožnje i čak 267 sekundi rada u praznom hodu prilikom stajanja. U realnosti je vožnja puno dinamičnija i sastoji se od mnogo neujednačenih ubrzanja i usporavanja, a to je ono što uvelike utječe na portošnju vozila i ispuštanje ispušnih plinova. NEDC je bio bliži opisu stanja vozila u prošlosti zbog manje konjskih snaga i sporijih ubrzanja. Zbog strogo propisane upotrebe pojedinih stupnjeva prijenosa i točnih vremenskih točaka za prebacivanje stupnja, NEDC nudi veliki manevarski prostor proizvođačima za korigiranje i optimiziranje mape vozila samo za svrhe testa, tj. kako bi rezultat bio što manja potrošnja goriva i emisija. Neka istraživanja su pokazala kako su proizvođači u realnim uvjetima imali emisiju NO_x istu gotovo 13 godina, dok su testiranja NEDC ciklusom pokazivala smanjenje [15]. Manevarski prostor se dozvoljava i u manipulaciji temperaturama tijekom testa. NEDC propisuje obavezno održavanje vozila na 20-30°C što je dovoljno velik raspon da napravi razliku u dobivenim rezultatima. Prema posljednjim istraživanjima pokazano je da temperatura okoline, ukoliko iznosi 22°C umjesto 28°C, može rezultirati razlikom od 4-8 g/km CO_2 [13]. Problem se javlja i kod upotrebe hibridnih vozila, pogotovo kod najnovije generacije sportskih vozila koji na testovima pokazuju nerealno male potrošnje i emisije dok se u realnim uvjetima vožnje mogu očekivati i do 5 puta veće vrijednosti.

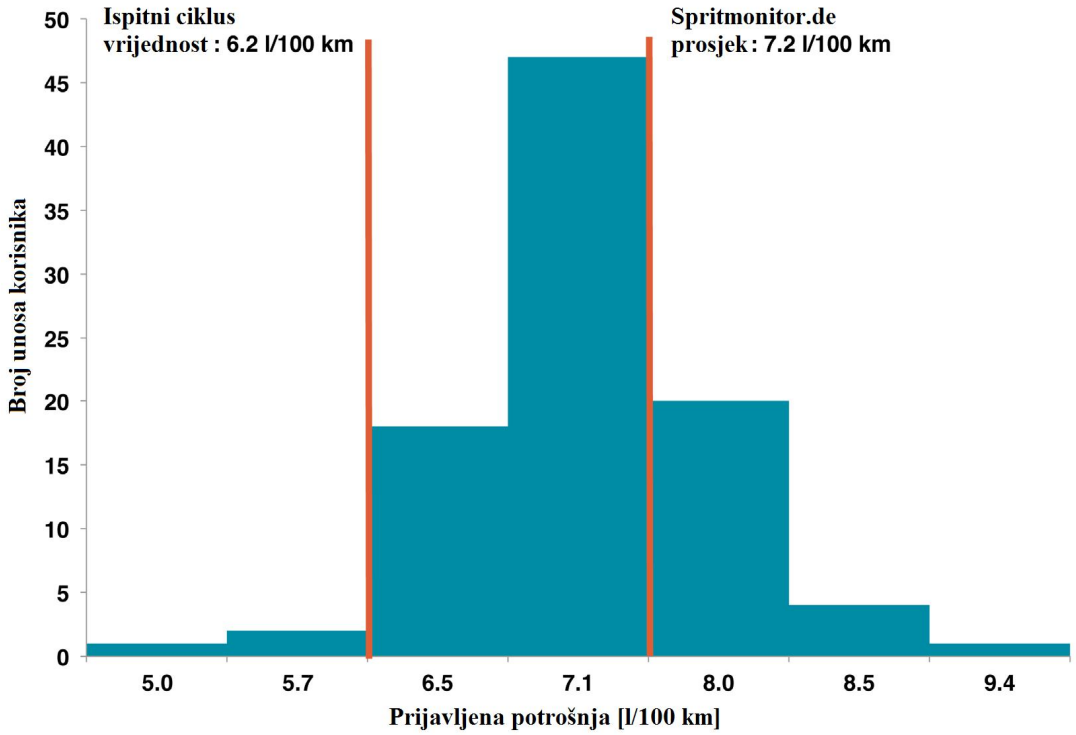
Koliko proizvođači uspiju manipulirati testovima postalo je jedno od važnijih pitanja na koje je Europska komisija pokušala naći odgovor unajmivši konzultante specijalizirane u tom polju. Donesen je zaključak da 30 % smanjenje emisije CO_2 od 2002. do 2010. nije u potpunosti rezultat napretka tehnologije i da je upotreba najnovijih sustava za smanjenje emisije zaslužna tek 40 % - 50 % [18]. Nadalje, prema izvještaju, razlika u ne podudarnosti realnih i ispitnih emisija leži u:

- 25 % zbog fleksibilnosti laboratorijskih uvjeta
- 25 - 35 % zbog fleksibilnosti u klasi težine vozila
- 10 - 20 % zbog propusta u testu
- 10 - 20 % zbog nemogućnosti NEDC ciklusa da prikaže realne uvjete



Slika 8.3 Prikaz kako proizvođači optimiziraju vozilo za test [18]

ICCT (engl. *international council on clean transportation*) je proveo analizu koristeći se podacima korisnika najveće njemačke baze podataka za potrošnju goriva spritmonitor.de i usporedivši ih s podacima najvećeg automobilskog kluba u europi ADAC (njem. *Allgemeiner Deutscher Automobil-Club*) za više od 1200 vozila. U ICCT-u je donesen zaključak da se razlika u ispitnim veličinama potrošnje goriva i emisije CO_2, u odnosu na unos korisnika stranice spritmonitor.de, povećala s 8 % na 21 % u razdoblju od 2001. do 2011. godine [13]. Potencijalni razlozi za ovakav trend rasta mogu biti poboljšanje optimizacije rada vozila za ispitne cikluse od strane proizvođača, nemogućnost NEDC ciklusa da prikaže realne uvjete vožnje i povećanje udjela vozila na tržištu opremljenih klima uređajem. Analiza je provedena korištenjem tri različita izvora podataka za usporedbu. Korišteni su podaci proizvođača u laboratorijskim uvjetima provođenja NEDC testa, podaci eko testa provedenog od ADAC auto kluba i podaci sa spritmonitor.de korisničke baze podataka.



Slika 8.4 Prikaz usporedbe potrošnje NEDC ciklus - realni uvjeti (Golf, 90 kW, 2010.) [13]

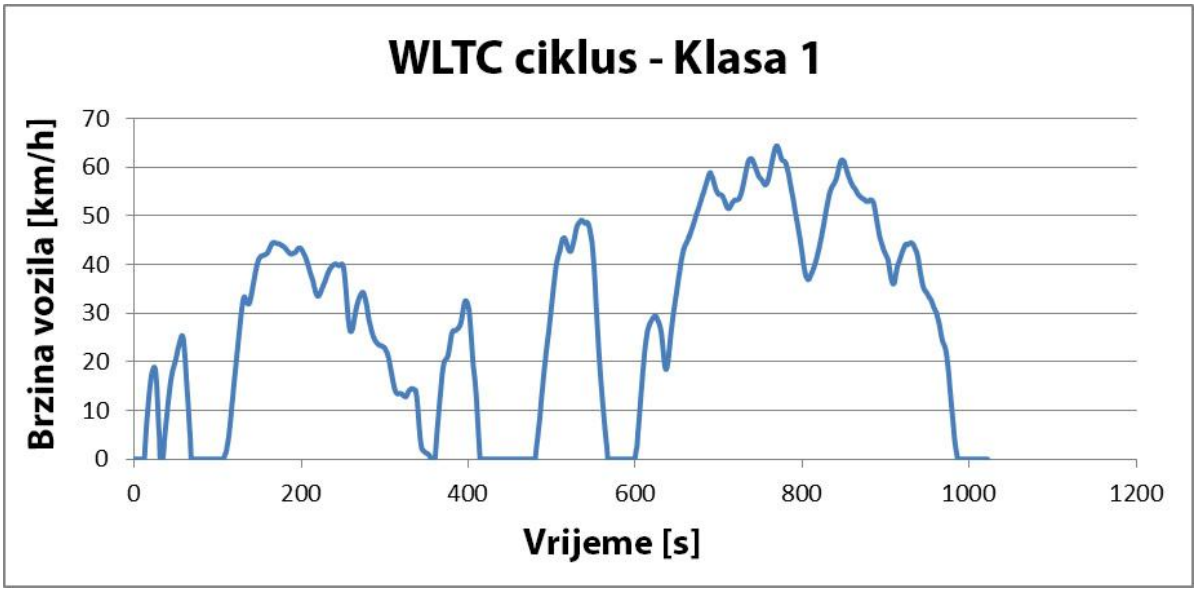
8.3. ***WLTC ciklus***

WLTP (engl. *worldwide harmonized light vehicles test procedures*) predstavlja standard za ispitivanje potrošnje goriva i emisije ispušnih plinova kod osobnih i lakih komercijalnih vozila. Razvijan je od strane stručnjaka iz Europske unije, Japana i Indije pod smjernicama UNECE Svjetskog foruma za usklađivanje propisa za vozila i trebao bi se dovršiti u listopadu 2015. godine. Očekuje se da će WLTC (engl. *worldwide harmonized light vehicles test cycle*) zamijeniti do sada standardni NEDC ispitni ciklus i to 2017. godine uvođenjem Euro 6c norme [23]. Ispitna procedura se provodi pod strogim propisima u kategorijama testiranja na valjcima, promjena stupnjeva prijenosa, težine i otpora vozila, kvalitete goriva, temperature okoline i vrste guma. Postoje tri vrste ispitnog ciklusa ovisno o tome u koju klasu vozilo spada prema omjeru snage i težine (engl. *power-weight ratio PWr*).

- Klasa 1 - vozila male snage PWr <= 22;
- Klasa 2 - vozila srednje snage 22 < PWr <= 34;
- Klasa 3 - vozila velike snage PWr > 34.

U svakoj kategoriji provodi se nekoliko ciklusa kako bi se simulirali uvjeti realne vožnje na urbanim i ekstra urbanim cestama, autocestama i prigradskim cestama. Trajanje cijelog ciklusa je isto među klasama, ali akceleracija i raspodijela brzina su drugačije. Umjesto propisanog stupnja prijenosa kao u NEDC ciklusu, ovdje se idealan stupanj prijenosa dobiva algoritmom koji uzima u obzir težinu vozila i raspodijelu snage prema okretajima. Nadalje, da bi se simulirala praktična i ekonomična vožnja te tehnike štednje, izbačene su česte promjene stupnjeva prijenosa unutar perioda od 5 sekundi. Posljedica tih mjera je da će podaci dobiveni korištenjem WLTC biti 10-20% precizniji od onih koje je davala postojeća metoda. Države koje su prihvatile novi ciklus, među kojima i EU, imaju rok od godinu dana da je sprovedu u nacionalne regulative. Osim toga, WLTC test daje preciznije mjere emisija CO_2 u prometu, olakšavajući pravnim tijelima provođenje klimatskih kontrola i provođenje politike smanjenje štetnih emisija.

Klasa 1 - ispitni ciklus se sastoji od dijelova s niskom i srednjom brzinom < 70 km/h. Tipičan je za vozila male snage kojima primjerice obiluje Indija.

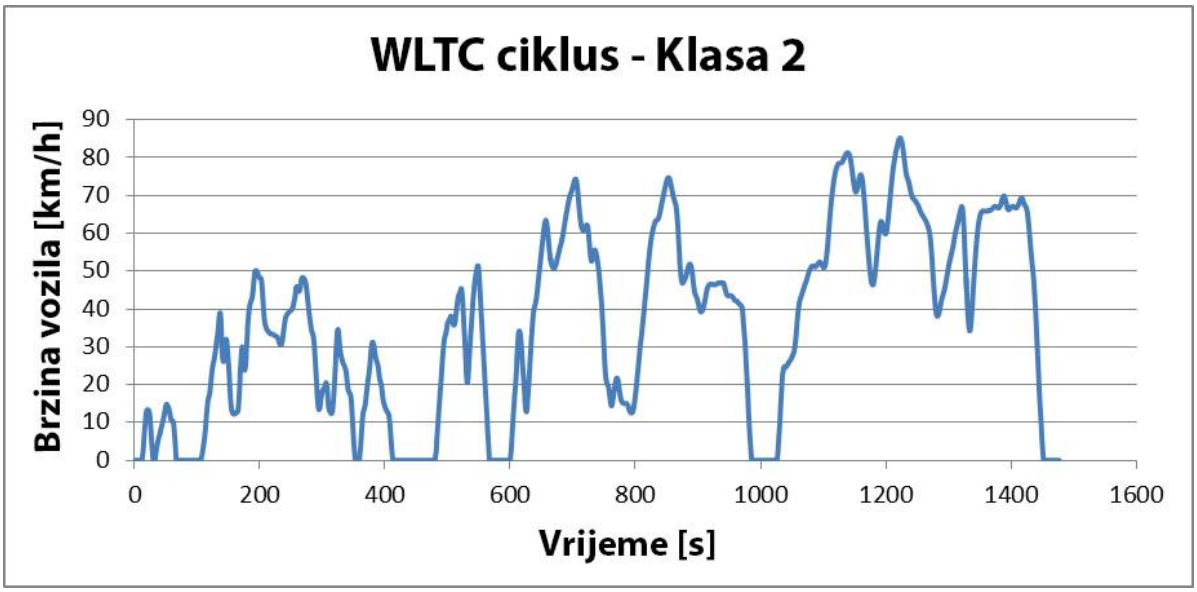


Slika 8.5 WLTC ciklus - Klasa 1[33]

Tablica 8.2 Karakteristike WLTC ciklusa - Klasa 1

	Niska	Srednja	Ukupno
Trajanje [s]	589	433	1022
Vrijeme stajanja [s]	155	48	203
Udaljenost [m]	3324	4767	8091
% stajanja	26,3 %	11,1 %	19,9 %
Maksimalna brzina [km/h]	49,1	64,4	
Prosječna *v* bez stajanja [km/h]	27,6	44,6	35,6
Prosječna *v* sa stajanjima [km/h]	20,3	39,6	28,5
Minimalna akceleracija [m/s^2]	-1,0	-0,6	
Maksimalna akceleracija [m/s^2]	0,8	0,6	

Klasa 2 - Ispitni ciklus se sastoji od dijela s niskom, srednjom i visokom brzinom. Ako je maksimalna brzina vozila manja od 90 km/h tada se segment visoke brzine zamijeni segmentom niske brzine. Reprezentativan je za većinu vozila iz Indije te za vozila male snage iz Europe i Japana.

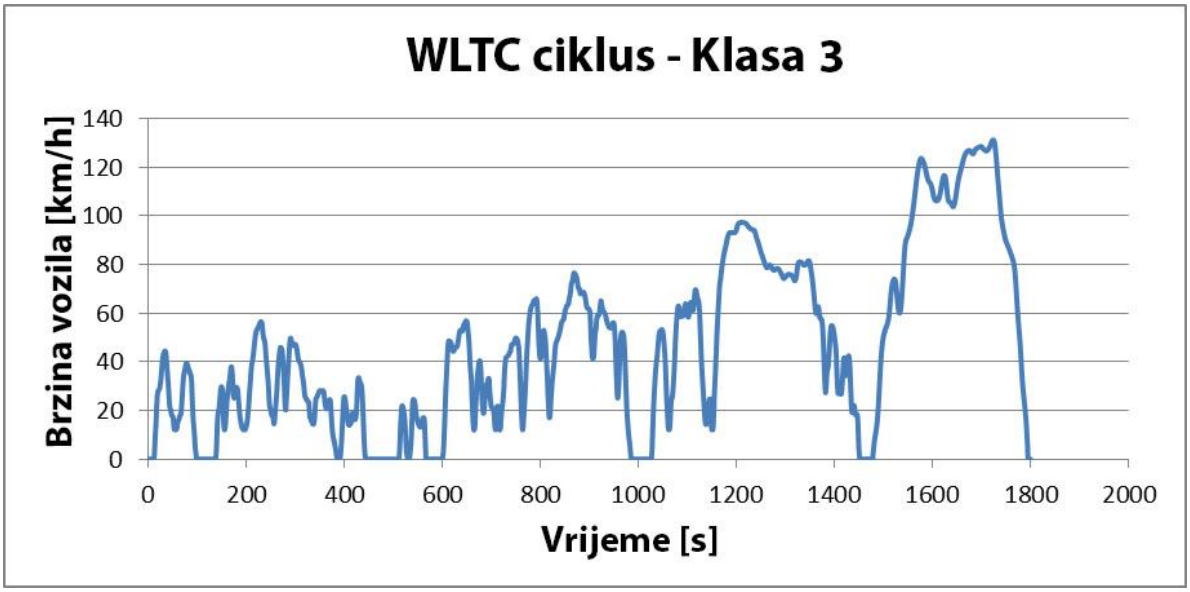


Slika 8.6 WLTC ciklus - Klasa 2[33]

Tablica 8.3 Karakteristike WLTC ciklusa - Klasa 2

	Niska	Srednja	Visoka	Ukupno
Trajanje [s]	589	433	455	1477
Vrijeme stajanja [s]	155	48	30	233
Udaljenost [m]	3132	4712	6820	14664
% stajanja	26,3 %	11,1 %	6,6 %	15,8 %
Maksimalna brzina [km/h]	51,4	74,7	85,2	
Prosječna *v* bez stajanja [km/h]	26,0	44,1	57,8	42,4
Prosječna *v* sa stajanjima [km/h]	19,1	39,2	54,0	35,7
Minimalna akceleracija [m/s^2]	-1,1	-1,0	-1,1	
Maksimalna akceleracija [m/s^2]	0,9	1,0	0,8	

Klasa 3 - Ispitni ciklus se sastoji od četiri dijela. Niske brzine, srednje, visoke i ekstra visoke. Ako je maksimalna brzina vozila ispod 135 km/h tada se segment ekstra visoke brzine mijenja segmentom niske brzine. Ti segmenti pokrivaju tipove vožnje u urbanim sredinama, predgrađima, ekstra urbanim sredinama i autocestama.



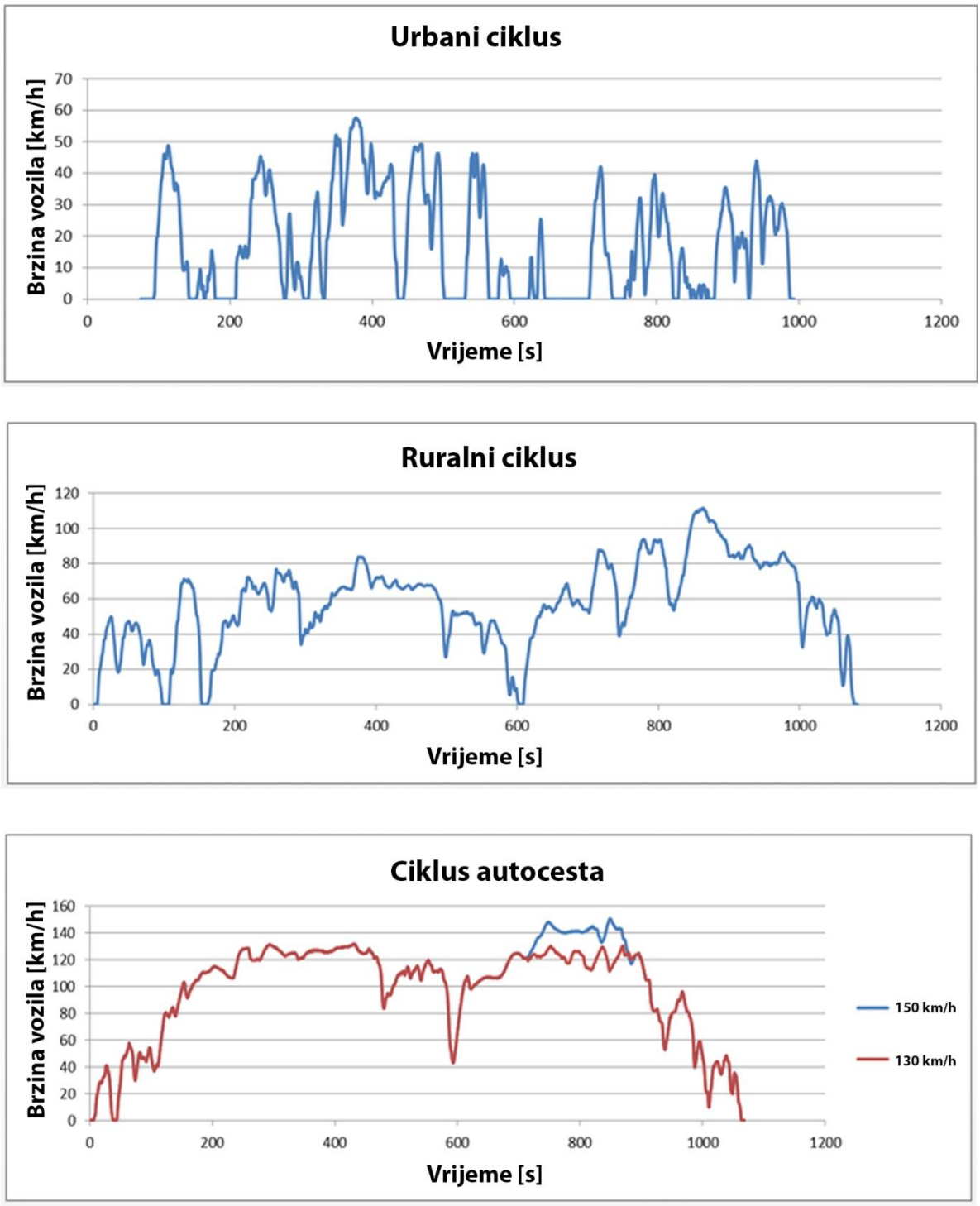
Slika 8.7 WLTC ciklus - Klasa 3[33]

Tablica 8.4 Karakteristike WLTC ciklusa - Klasa 3

	Niska	Srednja	Visoka	E. visoka	Ukupno
Trajanje [s]	589	433	455	323	1800
Vrijeme stajanja [s]	156	48	31	7	242
Udaljenost [m]	3095	4756	7158	8254	23262
% stajanja	26,5 %	11,1 %	6,8 %	2,2 %	13,4 %
Maksimalna brzina [km/h]	56,5	76,6	97,4	131,3	
Prosječna *v* bez stajanja [km/h]	25,7	44,5	60,8	94,0	53,8
Prosječna *v* sa stajanjima [km/h]	18,9	39,5	56,6	92,0	46,5
Minimalna akceleracija [m/s^2]	-1,5	-1,5	-1,5	-1,2	
Maksimalna akceleracija [m/s^2]	1,5	1,6	0,8	1,0	

8.4. *Artemis ispitni ciklus*

Artemis je ispitni ciklus razvijen unutar ARTEMIS projekta (engl. *Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems*). Bazira se na statističkoj analizi velike baze podataka europskih realnih obrazaca vožnje. Ciklus uključuje tri segmenta: urbani, ruralni i autocesta. Segment autoceste ima dvije varijante s maksimalnim brzinama 130 km/h i 150 km/h. Ova tri segmenta razvijena su istraživanjem i baziranjem na glavnim karakteristikama dinamike vožnje, prosječnom brzinom, frekvenciji stajanja i trajanju pojednih dijelova. Za različite kategorije vozila postoje i različite strategije mijenjanja stupnjeva prijenosa te svaki segment ima inačice ovisno o 12 mogućih uvjeta na cesti. Korištenjem Artemis ispitnog ciklusa moguće je uvesti faktor korekcije u rezultate dobivene NEDC ciklusom i tako ih približiti realnim uvjetima vožnje [16].



Slika 8.8 Tri segmenta Artemis ciklusa [33]

Tablica 8.5 Karakteristike Artemis ciklusa

Karakteristika	Urbani	Ruralni	Autocesta 130	Autocesta 150
Trajanje [s]	920	1081	1067	1067
Udaljenost [m]	4,47	17,27	28,74	29,55
Prosječna brzina [km/h]	17,5	57,5	97,0	99,7
Maksimalna brzina [km/h]	58	112	132	150
Distribucija brzine, %				
Mirovanje (0 km/h)	29	3	2	2
Niska ($0 < v \leq 50$)	69	31	15	15
Srednja ($50 < v \leq 90$)	2	59	13	13
Visoka ($v > 90$)	0	7	70	70

9. Proračun emisija

9.1. Proračun volumena

Radi se o proračunu kad se koristi varijabilni razrjeđivač s kontrolom konstantnog protoka pomoću venturijeve cijevi ili otvora. Kontinuirano se bilježe parametri koji prikazuju volumenski protok i računa se ukupan volumen ispušnog plina nastalog tijekom testa.

Proračun volumena kod korištenja potisne pumpe

Volumen razrjeđenog ispušnog plina izmjerenog u sustavima potisne pumpe izračunava se pomoću prve formule u dijagramu toka, gdje jedinice predstavljaju:

V = volumen razrjeđenog plina izražen u litrama po testu (prije korekcije).

Vo = volumen plina dostavljenog potisnom pumpom u testnim uvjetima u litrama po okretaju.

N = broj okretaja u testu.

Korekcija volumena prema standardnim uvjetima

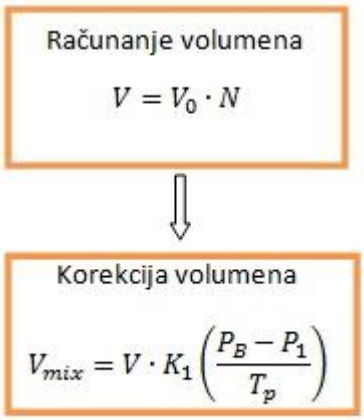
Volumen razrjeđenog ispušnog plina se korigira pomoću druge formule u dijagramu toka, gdje jedinice predstavljaju:

$$K_1 = \frac{273{,}2\ (K)}{101{,}33(kPa)} = 2{,}6961$$

P_B = barometarski tlak u ispitnoj sobi (kPa)

P_1 = vakuum na ulazu u potisnu pumpu, relativno prema tlaku okoline (kPa)

T_p = prosječna temperatura razrjeđenog plina na ulazu u potisnu pumpu tijekom testa (K)



Masa svakog pojedinog zagađivača emitiranog tijekom testa se određuje dobivanjem produkta volumetrijske koncentracije i volumena plina u pitanju, s obzirom na pojedine gustoće pri zadanim standardnim uvjetima:

u slučaju ugljik monoksida CO: d = 1,25 g/l

u slučaju ugljikovodika HC:

za benzin (E5) (C1H1.89O0.016): d = 0,631 g/l

za dizel (B5) (C1H1.86O0.005): d = 0,622 g/l

za LPG (CH2.525): d = 0,649 g/l

za NG/biometan (C1H4): d = 0,714 g/l

za etanol (E85) (C1H2, 74O0.385): d = 0,932 g/l

u slučaju NO_x: d = 2,05 g/l

9.2. *Ukupna masa emitiranih zagađivača*

Masa plinovitih zagađivača se izračunava pomoću sljedeće formule:

$$M_i = \frac{V_{mix} \cdot Q_i \cdot k_h \cdot C_i \cdot 10^{-6}}{d}$$

gdje je:

M_i = masena emisija zagađivača u g/km,

V_{mix} = volumen razrjeđenog plina u l/test i korigiran na standardne uvjete (273.2 K, 101.33 kPa),

Q_i = gustoća zagađivača u g/l pri standardnom tlaku i temperaturi (273.2 K and 101.33 kPa),

k_h = faktor korekcije vlažnosti koji se koristi za izračunavanje masene emisije dušikovih oksida. Ne postoji korekcija vlažnosti za HC i CO,

C_i = koncentracija zagađivača u razrjeđenom ispušnom plinu izražena u ppm i korigirana prema količini zagađivača već sadržanoj u zraku za razrjeđivanje,

d = odgovarajuća udaljenost u testnom ciklusu izražena u km.

Korekcija za koncentraciju zraka za razrjeđivanje

Koncentracija zagađivača u razrjeđenom ispušnom plinu se korigira za količinu zagađivača u zraku kojim se razrjeđuje prema sljedećem izrazu:

$$C_i = C_e \cdot C_d \left(1 - \frac{1}{DF}\right)$$

gdje je:

C_i = koncentracija zagađivača u razrjeđenom ispušnom plinu izražena u ppm i korigirana prema količini zagađivača već sadržanoj u zraku za razrjeđivanje,

Ce = izmjerena koncentracija zagađivača u razrjeđenom ispušnom plinu, izražena u ppm,

Cd = koncentracija zagađivača u zraku korištenom za razrjeđivanje, izražena u ppm,

DF = faktor razrjeđivanja.

Faktor razrjeđivanja DF se računa prema sljedećim izrazima:

$$DF = \frac{13.4}{C_{CO2} + (C_{HC} + C_{CO}) \cdot 10^{-4}} \quad \text{za benzin (E5)}$$

$$DF = \frac{13.5}{C_{CO2} + (C_{HC} + C_{CO}) \cdot 10^{-4}} \quad \text{za dizel (B5)}$$

$$DF = \frac{11.9}{C_{CO2} + (C_{HC} + C_{CO}) \cdot 10^{-4}} \quad \text{za LPG}$$

$$DF = \frac{9.5}{C_{CO2} + (C_{HC} + C_{CO}) \cdot 10^{-4}} \quad \text{za NG/biometan}$$

$$DF = \frac{12.5}{C_{CO2} + (C_{HC} + C_{CO}) \cdot 10^{-4}} \quad \text{za etanol (E85)}$$

gdje je:

C_{CO2} = koncentracija CO2 u razrjeđenom ispušnom plinu sadržana u vreći s uzorkom, izražena u postotku volumena,

C_{HC} = koncentracija HC u razrjeđenom ispušnom plinu sadržana u vreći s uzorkom, izražena ppm ugljikovom ekvivalentu,

C_{CO} = koncentracija CO u razrjeđenom ispušnom plinu sadržana u vreći s uzorkom, izražena u ppm.

Koncentracija nemetanskih ugljikovodika se izračunava kako slijedi:

$$C_{NMHC} = C_{THC} - (Rf_{CH4} \cdot C_{CH4})$$

gdje je:

C_{NMHC} = korigirana koncentracija NMHC u razrjeđenom ispušnom plinu, izražena ppm ugljikovom ekvivalentu,

C_{THC} = koncentracija THC u razrjeđenom ispušnom plinu, izražena ppm ugljikovom ekvivalentu i korigirana prema količini THC u zraku za razrjeđivanje,

C_{CH4} = koncentracija CH_4 u razrjeđenom ispušnom plinu, izražena ppm ugljikovom ekvivalentu i korigirana prema količini CH_4 u zraku za razrjeđivanje,

Rf_{CH4} = FID faktor odaziva za metan.

Izračun faktora za korekciju vlažnosti NO

Kako bi se umanjio utjecaj vlažnosti na rezultate koncentracije dušikovih oksida, koristi se sljedeći izraz:

$$k_h = \frac{1}{1 - 0.0329 \cdot (H - 10.71)}$$

u kojem je:

$$H = \frac{6.211 \cdot R_a \cdot P_d}{P_B - P_d \cdot R_a \cdot 10^{-2}}$$

gdje je:

H = apsolutna vlažnost izražena u gramima vode po kilogramu suhog zraka,

Ra = relativna vlažnost okolnog zraka izražena u postotku,

Pd = tlak zasićenja pare pri okolišnoj temperaturi izražen u kPa,

PB = atmosferski tlak u prostoriji, izražen u kPa.

Određivanje HC za motore s kompresijskim paljenjem

Za izračun masene emisije HC za motore s kompresijskim paljenjem, prosječna koncentracija HC se računa:

$$C_e = \frac{\int_{t_1}^{t_2} C_{HC} \cdot dt}{t_2 - t_1}$$

gdje je:

$\int_{t1}^{t2} C_{HC} \cdot dt$ = integral bilježenja zagrijanog FID-a tijekom testnog perioda (t2-t1)

C_e = koncentracija HC mjerena u razrjeđenom ispušnom plinu u ppm (C_{HC})

9.3. *Određivanje emisije čestica*

9.3.1. Masena emisija čestica

Emisija čestica Mp u g/km se računa prema sljedećem izrazu:

$$M_p = \frac{(V_{mix} + V_{ep}) \cdot P_e}{V_{ep} \cdot d}$$

ako su ispušni plinovi odvedeni izvan cijevi,

$$M_p = \frac{V_{mix} \cdot P_e}{V_{ep} \cdot d}$$

ako su ispušni plinovi vraćeni u cijev.

Članovi izraza su:

V_{mix} = volumen razrjeđenog ispušnog plina pri standardnim uvjetima,

V_{ep} = volumen ispušnog plina koji prolazi filterom čestica pri standardnim uvjetima,

P_e = masa čestica sakupljena filterom(ima),

d = odgovarajuća udaljenost u testnom ciklusu izražena u km,

M_p = emisija čestica u g/km.

Ukoliko je potrebna korekcija za broj čestica koje su se nalazile u zraku za razrjeđivanje i koje su pristigle u konačnu smjesu, izrazi su sljedeći:

$$M_p = \left[\frac{P_e}{V_{ep}} - \left(\frac{P_a}{V_{ap}} \cdot \left(1 - \frac{1}{DF} \right) \right) \right] \cdot \frac{(V_{mix} + V_{ep})}{d}$$

ako su ispušni plinovi odvedeni izvan cijevi,

$$M_p = \left[\frac{P_e}{V_{ep}} - \left(\frac{P_a}{V_{ap}} \cdot \left(1 - \frac{1}{DF} \right) \right) \right] \cdot \frac{V_{mix}}{d}$$

ako su ispušni plinovi vraćeni u cijev.

Članovi izraza su:

V_{ap} = volumen zraka u cijevi koji struji kroz pozadinski filter čestica pri standardnim uvjetima,

P_a = masa čestica sakupljena pozadinskim filterom,

DF = faktor razrjeđivanja.

Kada primjena pozadinske korekcije rezultira u negativnoj masi čestica (g/km) rezultat će biti smatran kao da je riječ o 0 g/km mase čestica.

9.3.2. Određivanje broja čestica

Određivanje broja čestica se izračunava pomoću sljedećeg izraza:

$$N = \frac{V.k.\overline{C}_s.\overline{f}_r.10^3}{d}$$

Gdje su:

N = broj čestica izražen u česticama po kilometru,

V = volumen razrjeđenog plina u l/test i korigiran na standardne uvjete (273.2 K, 101.33 kPa),

k = faktor kalibracije za ispravak mjerenja brojača čestica na razinu referentnog instrumenta (tamo gdje nije već uključen faktor u mjerač). Ako je faktor kalibracije već uključen u mjerač tada se njegova vrijednost u izrazu uzima jednaka 1,

$\overline{C}_s$= korigirana koncentracija čestica iz razrjeđenih ispušnih plinova izražena kao prosjek čestica po kubnom centimetru (iz cijelog trajanja testnog ciklusa). Ako se srednje volumenske vrijednosti ($\bar{C}$) dobiju pri atmosferi različitoj od standardne (273.2 K, 101.33 kPa) tada se koncentracija korigira na te uvjete.

$\overline{f}_r$= srednja vrijednost koncentracije čestica na filteru za hlapljive čestice postavljenom na sustavu za razrjeđivanje pri testiranju,

d = odgovarajuća udaljenost u testnom ciklusu izražena u km,

$\bar{C}$ = se izračunava prema sljedećem izrazu:

$$\overline{C} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} C_i}{n}$$

gdje su:

C_i = diskretna mjera koncentracije čestica u razrjeđenom ispušnom plinu iz brojača čestica, izražena u česticama po kubnom centimetru,

n = ukupni broj ciklusa diskretnog mjerenja broja čestica tijekom ispitnog ciklusa,

n se izračunava prema sljedećem izrazu:

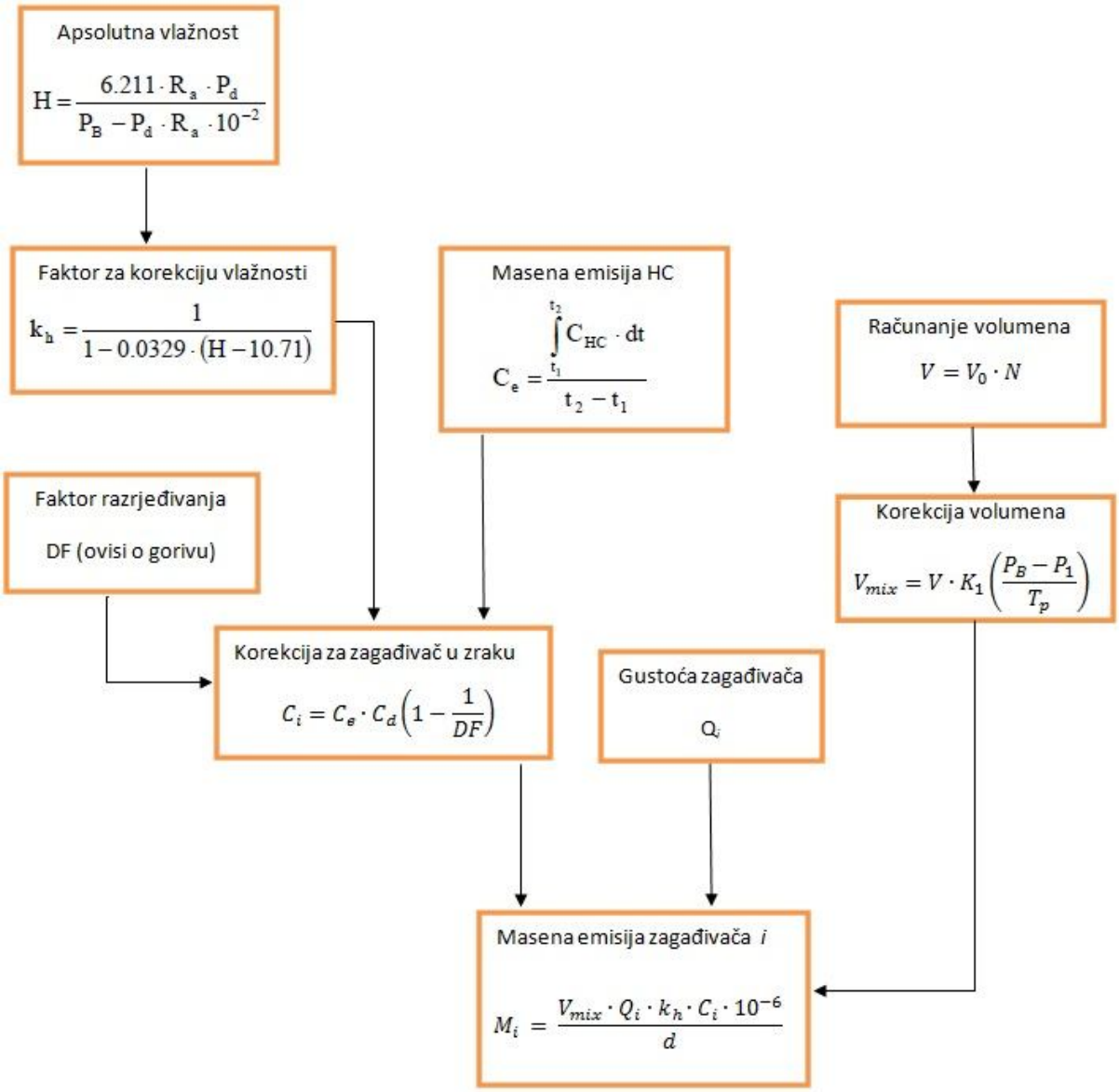
$$n = \mathrm{T} \cdot \mathrm{f}$$

gdje su:

T = vrijeme trajanja ciklusa izraženo u sekundama

f = frekvencija spremanja podataka brojača čestica izražena u Hz.

9.4. ***Dijagram toka proračuna emisije***



10. Zaključak

Da bi proizvođači stavili svoja vozila na tržište ona moraju proći homologacijske testove i zadovoljiti sve suvremene zakonodavne i pravilnicima propisane uvjete. Svakim novim propisom, a time i odgovarajućom normom, vrhovna zakonodavna tijela postrožuju zahtjeve za smanjenjem emisije štetnih ispušnih plinova i čestica. Uzevši u obzir perspektivu razvoja automobilske industrije te konstantan porast potražnje za osobnim i drugim vozilima, doneseni propisi imaju čvrst temelj i argumentaciju za zahtijevanje strožih uvjeta. Proizvođači osobnih vozila konstatno ulažu napore i sredstva za otkrivanje novih tehnologija ili nadogradnju starih kako bi njihova vozila postigla zadovoljavajuće uvjete na testnim ispitnim ciklusima. Iako su pravila ispitivanja emisije i potrošnje goriva strogo propisana, proizvođači ih ponekad uspijevaju zaobići i prikazati vozila efikasnijima nego što to doista jesu. Međutim, upravo zbog tih razloga radi se na uvođenju strožih testova koji mogu simulirati uvjete realne vožnje i imaju još strože propisana pravila o karakteristikama pojedinih parametara u ispitivanju. Mjerna oprema korištena na ispitnim ciklusima koristi većinom iste principe i fizikalne zakonitosti za prikazivanje rezultata, bez obzira o kojem se proizvođaču radi. Proizvođači mjerne opreme imaju vrlo malo prostora za poboljšanje samih analizatora, zato što su usko vezani uz zahtjeve propisane pravlinicima. Iako, ono u čemu mogu poboljšati efikasnost, je modernizacija sučelja opreme, mogućnost spajanja i međusobnog povezivanja te ponuda dodatnih modula. Mjerna oprema očitava specifične rezultate i vrijednosti koji se koriste u proračunu, koji je propisan pravilnikom, kako bi se dobile vrijednosti koje se mogu uspoređivati s onima propisanim normama koje su trenutno na snazi. Proizvođači ne mogu utjecati na proces obrade rezultata i na sam proračun, zato se iskorištavaju mane ispitnih ciklusa. Premda se testovi pokušavaju zavarati neosporan je konstantan napredak tehnologije za smanjenje emisije, upravo iz razloga što su norme za ispušne plinove jako zahtjevne, no postavljanje visokog praga je nužno za sveopći napredak industrije i poticanje ekonomije na globalnom polju.

11. Prilog

Formule su pisane u Matlabu kao skripta. Potrebno je unijeti podatke dobivene mjerenjem i dobije se izračun mase zagađivača po kilometru i masena emisija čestica.

```
%Proračun emisija ispušnih plinova

%Proračun volumena kod potisne pumpe
%V - volumen razrjeđenog plina l/test
%V0 - volumen plina dostavljenog pumpom [l/okr]
%N - broj okretaja u testu [okr]
V0 =
N =
V = V0*N;


%Korekcija volumena prema standardnim uvjetima

%Pb - barometarski tlak u ispitnoj sobi [kPa]
%P1 - podtlak na ulazu u pumpu [kPa]
%Tp - prosječna temperatura razrjeđenog plina na ulazu u pumpu [K]
K1 = 2.6961;
Pb =
P1 =
Tp =
Vmix = V*K1*((Pb-P1)/Tp)
str = ['Volumen ispušnih plinova, Vmix:',num2str(Vmix),' [l/test]'];


%Ukupna masa emitiranih zagađivača

%H - apsolutna vlažnost [g(h20)/kg(zrak)]
%Ra - relativna vlažnost okolnog zraka izražena u postotku
%Pd - tlak zasićenja pare pri okolišnoj temperaturi [kPa]
%PB - atmosferski tlak u prostoriji [kPa]
Ra =
Pd =
PB =
H = (6.211*Ra*Pd/(PB-Pd*Ra*10^-2))

%Izračun faktora za korekciju vlažnosti NO, kh
kh = 1/(1-0.0329*(H-10.71))

%Korekcija za koncentraciju zraka za razrjeđivanje, Ci
%Koncentracija zagađivača u razrjeđenom ispušnom plinu se
%korigira za količinu zagađivača u zraku kojim se razrjeđuje
%Ce - izmjerena koncentracija zagađivača u razrjeđenom ispušnom plinu [ppm]
%Cd - koncentracija zagađivača u zraku korištenom za razrjeđivanje [ppm]
%DF - faktor razrjeđivanja (ovisi o pogonskom gorivu)
Ce =
Cd =
DF =
Ci = Ce*Cd*(1-(1/DF))

%Gustoća zagađivača Qi u g/l pri standardnom tlaku i temperaturi
%(273.2 K and 101.33 kPa)
Qi =
%Odgovarajuća udaljenost d, u testnom ciklusu [km]
d =
%Masa plinovitih zagađivača u g/km se izračunava pomoću sljedeće formule:
Mi = (Vmix*Qi*kh*Ci*10^-6)/d
```

```
str = ['Masena emisija zagađivača, Mi:',num2str(Mi),' [g/km]'];


%Određivanje emisije čestica

%Masena emisija čestica Mp [g/km]
%Vep - volumen ispušnog plina koji prolazi filterom čestica pri stan. uvj.
%Pe - masa čestica sakupljena filterom(ima)
Vep =
Pe =
Mp = ((Vmix+Vep)*Pe)/Vep*d

%Ukoliko je potrebna korekcija za broj čestica koje su se nalazile u zraku
%za razrjeđivanje i koje su pristigle u konačnu smjesu, izrazi su sljedeći:
%Vap - volumen zraka u cijevi koji struji kroz pozadinski filter čestica
%pri standardnim uvjetima
%Pa - masa čestica sakupljena pozadinskim filterom
Vap =
Pa =
Mpkor = ((Pe/Vep)-((Pa/Vap)*(1-1/DF)))*(Vmix+Vep)/d

str = ['Masena emisija čestica, Mpkor:',num2str(Mi),' [g/km]'];
```

12. Literatura

[1] Pravilnik ECE R83

[2] Pravilnik o tehničkim uvjetima vozila u prometu na cestama

[3] Mahalec, I., Lulić, Z., Kozarac, D., *Motori s unutarnjim izgaranjem*, FSB, Zagreb 2010.,

[4] Šagi, G., Tomić, R., Ilinčić, P., Razvoj propisa o dopuštenim emisijama štetnih tvari iz motora s unutarnjim izgaranjem, Zagreb, 2009.

[5] Šilić, Đ., Ispitivanje motornih vozila, Veleučilište Velika Gorica, 2010.

[6] Walsh, M. P., Global Trends in Motor Vehicle Pollution Control 2013 Update, 2013.

[7] Godson, W., Draft Regulation Impact Statement for Review of Euro 5/6 Light Vehicle Emissions, Department of Infrastructure, Transport Regional Development and Local Government, Australia, 2009. (dizel emisija)

[8] CVH, Novosti u tehnologiji tehničkih pregleda kao posljedica direktiva EU, Stručni bilten broj 135, Zagreb, 2011.

[9] Janda M., AVL emission legislation and testing, 2012.

[10] CVH, Samokontrola sustava na vozilu bitnih za kvalitetu ispušnih plinova, Stručni bilten broj 103, Zagreb, 2003.

[11] Barlow, T.J., Latham, S., McCrae, I. S., Boulter, P.G., A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions, Version 3, TRL limited, 2009.

[12] EEA, CO_2 emissions performance of car manufacturers in 2012, Danska, 2013.

[13] Mock, P., German, J., Bandivadekar, A., Rimersma, I., Discrepancies between type-approval and "real-world" fuel consumption and CO_2 values, ICCT, 2012.

[14] ICCT, Passenger vehicle greenhouse gas and fuel economy standards: A global update, 2013.

[15] Bulletin No 146, WHO adds pressure for stricter Euro 5 standards, European Federation for Transport and Environment, 2006.

[16] Andre, M., Real-world driving cycles for measuring cars pollutant emissions-Part A: The ARTEMIS European driving cycles, INRETS, 2004.

[17] ICCT, CO_2 emissions from new passenger cars in the EU: Car manufacturers performance in 2013, EEA, 2014.

[18] Dings, J., Mind the gap! Why official car fuel economy figures don't match up to reality, Transport and environment, 2013.

[19] www.unep.org/transport/

[20] www.theicct.org/

[21] www.eea.europa.eu/

[22] www.transportpolicy.net/

[23] www.dieselnet.com

[24] www.fiafoundation.org/

[25] www.delphi.com

[26] www.dzm.hr/

[27] ec.europa.eu/enterprise/sectors/automotive/environment

[28] http://eur-lex.europa.eu/

[29] www.avl.com

[30] www.horiba.com

[31] www.fev.com

[32] www.bosch.com

[33] www.unece.org/trans/