

# Suvremene metode ispitivanja ispušnih plinova na motornim vozilima

---

**Greif, Stjepan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:638697>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-14**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -  
Institutional Repository](#)



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

## **ZAVRŠNI RAD**

**SUVREMENE METODE ISPITIVANJA ISPUŠNIH PLINOVA NA  
MOTORNIM VOZILIMA  
MODERN METHODS OF TESTING EXHAUST GASES ON MOTOR  
VEHICLES**

Mentor: Izv.prof.dr.sc.Željko Šarić

Student: Stjepan Greif, 0135260363

Zagreb, rujan 2024.

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**  
**ODBOR ZA ZAVRŠNI RAD**

Zagreb, 11. lipnja 2024.

Zavod: **Zavod za cestovni promet**  
Predmet: **Cestovna prijevozna sredstva**

## **ZAVRŠNI ZADATAK br. 7572**

Pristupnik: **Stjepan Greif (0135260363)**  
Studij: **Promet**  
Smjer: **Cestovni promet**

Zadatak: **Suvremene metode ispitivanja ispušnih plinova na motornim vozilima**

**Opis zadatka:**

U radu je potrebno opisati način ispitivanja ispušnih plinova na motornim vozilima. Objasniti izgaranje i produkte izgaranja kod benzinskih i dizel motora te navesti njihove značajke. Analizirati metode za ispitivanje ispušnih plinova na motornim vozilima i objasniti važnost ispitivanja ispušnih plinova u cestovnom prometu.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

---

izv. prof. dr. sc. Željko Šarić

## Sažetak

Ovaj rad istražuje suvremene metode ispitivanja ispušnih plinova na motornim vozilima, s ciljem smanjenja zagađenja zraka i zaštite javnog zdravlja. Rad pruža pregled povijesnog razvoja ispitivanja emisija, zakonskog okvira kao što su Euro 6 norme i američki EPA standardi, te tehničkih zahtjeva za ispitivanje različitih vrsta vozila, motora i goriva. Detaljno su opisani procesi izgaranja i produkti izgaranja u benzinskim i dizelskim motorima, kao i njihov utjecaj na okoliš i zdravlje. Metode ispitivanja, uključujući laboratorijske metode i metode u stvarnim uvjetima, te napredne tehnologije za smanjenje emisija, također su obrađene. Zaključci naglašavaju važnost kontinuiranog razvoja tehnologija i regulativa za smanjenje emisija ispušnih plinova, čime se poboljšava kvaliteta zraka i štiti zdravlje ljudi.

Ključne riječi: ispitivanje ispušnih plinova, motorna vozila, emisije, benzinski motori, dizelski motori

## **Summary**

This paper investigates modern methods of testing exhaust gases on motor vehicles, with the aim of reducing air pollution and protecting public health. The paper provides an overview of the historical development of emissions testing, the legal framework such as Euro 6 norms and US EPA standards, and the technical requirements for testing different types of vehicles, engines and fuels. Combustion processes and combustion products in gasoline and diesel engines are described in detail, as well as their impact on the environment and health. Test methods, including laboratory and real-world methods, and advanced emission reduction technologies are also covered. The conclusions emphasize the importance of continuous development of technologies and regulations to reduce exhaust gas emissions, thereby improving air quality and protecting human health.

**Keywords:** Exhaust Gas Testing, Motor Vehicles, Emissions, Gasoline Engines, Diesel Engines

## Sadržaj

1.Uvod.....	1
2. Ispitivanje ispušnih plinova na motornim vozilima .....	3
3. Izgaranje i produkti izgaranja u benzinskim motorima.....	11
4. Izgaranje i produkti izgaranja u dizelskim motorima.....	17
5. Metode ispitivanja ispušnih plinova na motornim vozilima .....	23
5.1. Proces mjerenja emisija ispušnih plinova .....	26
5.1.1.Dinamometrička ispitivanja .....	27
5.1.2.Prijenosni sustavi za mjerenje emisija (PEMS) .....	27
5.1.3.Analiza rezultata i kalibracija.....	28
5.2. On-Board Diagnostic.....	28
5.2.1.Funkcija OBD sustava.....	29
5.2.2. Dijagnostika i popravak .....	29
5.2.3. Evolucija OBD sustava .....	29
6.Zaključak .....	32
7.Literatura .....	33

# 1. Uvod

Automobili i druga motorna vozila čine neizostavan dio modernog života, ali su istovremeno jedan od glavnih izvora zagađenja zraka. Emisije ispušnih plinova iz motornih vozila sadrže brojne štetne tvari, uključujući ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>), ugljik monoksid (CO), dušikove okside (NO<sub>x</sub>), ugljikovodike (HC) i čestice (PM). Ove tvari imaju značajan utjecaj na okoliš i ljudsko zdravlje. Njihovi učinci uključuju doprinos globalnom zagrijavanju, smogu, kiselim kišama te pojavi respiratornih i kardiovaskularnih bolesti kod ljudi. Stoga je regulacija emisija ispušnih plinova ključna za održavanje javnog zdravlja i zaštitu okoliša.

Regulacija emisija ispušnih plinova provodi se putem različitih zakonskih okvira i standarda. U Europi, Euro 6 norme postavljaju stroge granice za emisije NO<sub>x</sub>, HC, CO i PM za putnička vozila, čime se nastoji smanjiti razina štetnih emisija i potaknuti upotreba čišćih tehnologija u automobilskoj industriji. U Sjedinjenim Američkim Državama, Agencija za zaštitu okoliša (EPA) postavlja standarde koji su usklađeni s ciljevima smanjenja zagađenja zraka. Ovi standardi obuhvaćaju različite faze, poput Tier 1, Tier 2 i najnovije Tier 3 standarde, koji postavljaju sve strože zahtjeve za emisije.

Cilj ovog rada je detaljno istražiti suvremene metode ispitivanja ispušnih plinova na motornim vozilima, uključujući laboratorijske metode i metode ispitivanja u stvarnim uvjetima. Rad će također istražiti razlike u procesima izgaranja i produkata izgaranja u benzinskim i dizelskim motorima te analizirati prednosti i nedostatke različitih metoda ispitivanja. Na kraju, rad će pružiti pregled najnovijih tehnologija i inovacija u području ispitivanja ispušnih plinova.

Ovaj rad je podijeljen na šest glavnih poglavlja: Uvod, Ispitivanje ispušnih plinova na motornim vozilima, Izgaranje i produkti izgaranja u benzinskim motorima, Izgaranje i produkti izgaranja u dizelskim motorima, Metode ispitivanja ispušnih plinova na motornim vozilima, te zaključak.

Uvod razmatra pozadinu problema, zakonski okvir i ciljeve rada. Poglavlje o ispitivanju ispušnih plinova na motornim vozilima pruža povijesni pregled razvoja metoda ispitivanja, pregled zakonskog okvira i tehničkih zahtjeva za ispitivanje ispušnih plinova. Poglavlje o izgaranju i produktima izgaranja u benzinskim motorima detaljno opisuje proces izgaranja u benzinskim motorima, glavne produkte izgaranja i njihov utjecaj na okoliš i zdravlje. Slično tome, poglavlje o izgaranju i produktima izgaranja u dizelskim motorima opisuje proces izgaranja u dizelskim

motorima, glavne produkte izgaranja i njihov utjecaj na okoliš i zdravlje. Poglavlje o metodama ispitivanja ispušnih plinova na motornim vozilima opisuje standardne laboratorijske metode, metode ispitivanja u stvarnim uvjetima, napredne tehnologije i inovacije te uspoređuje različite metode. Zaključak sumira ključne nalaze rada, daje preporuke za buduća istraživanja i razmatra praktične implikacije nalaza.

Suvremene metode ispitivanja ispušnih plinova igraju ključnu ulogu u osiguravanju da vozila zadovoljavaju stroge ekološke standarde. Precizno mjerenje emisija omogućuje identificiranje i smanjenje izvora zagađenja, čime se doprinosi boljoj kvaliteti zraka i zaštiti zdravlja ljudi. Razvoj novih tehnologija i inovacija u ovom području otvara mogućnosti za još učinkovitije smanjenje emisija u budućnosti. U zaključku, ovaj rad pruža sveobuhvatan pregled suvremenih metoda ispitivanja ispušnih plinova na motornim vozilima, s posebnim naglaskom na laboratorijske metode i metode ispitivanja u stvarnim uvjetima, te istražuje kako ove metode doprinose smanjenju zagađenja i poboljšanju okolišnih standarda.



## 2. Ispitivanje ispušnih plinova na motornim vozilima

Ispitivanje ispušnih plinova na motornim vozilima prošlo je kroz značajan razvoj tijekom povijesti, prelazeći iz jednostavnih i rudimentarnih metoda u sofisticirane i visoko precizne tehnike koje se danas koriste [3]. Početak regulacije i ispitivanja emisija može se pratiti unatrag do sredine 20. stoljeća, kada su zagađenje zraka i njegovi učinci na zdravlje postali prepoznati kao ozbiljan problem u urbanim sredinama. Tijekom 1950-ih i 1960-ih godina, s rapidnom motorizacijom društva, posebno u Sjedinjenim Američkim Državama, došlo je do prvih ozbiljnih istraživanja o utjecaju automobilskih emisija na kvalitetu zraka. Kalifornija, kao država s najgušćim prometom i najvećim problemima zagađenja, postala je pionir u uspostavljanju regulativa za emisije ispušnih plinova. Kalifornijski Air Resources Board (CARB) osnovan je 1967. godine i postavio je temelje za regulaciju automobilskih emisija, uključujući prve standarde za emisije ugljičnog monoksida (CO) i ugljikovodika (HC). Tijekom 1970-ih, Sjedinjene Američke Države usvojile su Zakon o čistom zraku (Clean Air Act), koji je uspostavio nacionalne standarde za emisije iz motornih vozila i industrijskih izvora. Ovaj zakon zahtijevao je od proizvođača automobila da razviju tehnologije za smanjenje emisija, kao što su katalizatori, koji su postali standardna oprema na vozilima sredinom 1970-ih [4]. Katalizatori su omogućili značajno smanjenje emisija CO, HC i NO<sub>x</sub>, pretvarajući ih u manje štetne tvari poput CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O i N<sub>2</sub>. U Europi su slične inicijative započele kasnije, ali s jednakom važnosti. Prvi Europski standardi za emisije, poznati kao Euro norme, uvedeni su 1992. godine. Euro 1 standardi postavili su granice za emisije NO<sub>x</sub>, HC i CO, i zahtijevali su upotrebu katalizatora. Svaka nova iteracija Euro normi, od Euro 2 do Euro 6, donosila je sve strože granice i zahtijevala napredniju tehnologiju za kontrolu emisija. Euro 6, koji je stupio na snagu 2014. godine, postavio je izuzetno stroge granice za NO<sub>x</sub> i čestice (PM), posebice za dizelska vozila [5]. Razvoj tehnologije za ispitivanje emisija išao je ruku pod ruku s razvojem regulative. Početne metode bile su relativno jednostavne, uključujući osnovne kemijske analize i korištenje laboratorijskih peći za simulaciju motora. S vremenom su ove metode postale sofisticiranije, s razvojem dinamometričkih testiranja koja omogućuju ispitivanje vozila u simuliranim voznim uvjetima. Dinamometričke ispitne stanice koriste se za precizno mjerenje emisija pri različitim opterećenjima i radnim režimima motora, pružajući detaljan uvid u performanse vozila i njegove emisije. Uvođenje računala i napredne elektronike u 1980-ima omogućilo je razvoj sve preciznijih metoda ispitivanja. Računalno kontrolirani sustavi omogućili

su točno podešavanje uvjeta testiranja i automatsko bilježenje podataka, čime su se smanjile pogreške i povećala reproducibilnost testova. U istom razdoblju, analitički instrumenti, poput spektrometara i plinskih kromatografa, postali su standardna oprema u laboratorijima za ispitivanje emisija, omogućujući detaljnu analizu sastava ispušnih plinova. Početkom 21. stoljeća, s razvojem tehnologije prijenosnih sustava za mjerenje emisija (PEMS), omogućeno je ispitivanje emisija u stvarnim uvjetima vožnje. PEMS sustavi omogućuju mjerenje emisija tijekom normalne upotrebe vozila na cesti, pružajući točniju sliku stvarnih emisija u usporedbi s laboratorijskim testovima. Ova tehnologija postala je značajna u otkrivanju nesukladnosti između laboratorijskih rezultata i stvarnih emisija, što je bilo posebno važno tijekom Dieseldgate skandala, kada su otkriveni proizvođači automobila koji su varali na testovima emisija [6]. U posljednjem desetljeću, naglasak je stavljen na daljnji razvoj naprednih senzorskih tehnologija i integraciju umjetne inteligencije u analizu podataka o emisijama. Napredni senzori omogućuju kontinuirano praćenje emisija u stvarnom vremenu, dok AI i strojno učenje pomažu u analizi velikih količina podataka, identificiranju obrazaca i predviđanju potencijalnih problema s emisijama. Danas, metode ispitivanja ispušnih plinova uključuju kombinaciju laboratorijskih testova, ispitivanja u stvarnim uvjetima i kontinuiranog praćenja emisija. Ove metode zajedno pružaju sveobuhvatan pristup kontroli i smanjenju emisija, osiguravajući da vozila zadovoljavaju stroge ekološke standarde i doprinose smanjenju zagađenja zraka. Razvoj tehnologije i regulativa u ovom području nastavit će se i u budućnosti, s ciljem daljnjeg smanjenja negativnog utjecaja motornih vozila na okoliš i zdravlje ljudi [7].

Zakonski okvir za regulaciju emisija ispušnih plinova iz motornih vozila razvijao se kroz desetljeća kako bi se smanjio negativan utjecaj na okoliš i javno zdravlje. Ključni zakoni i regulative uspostavljeni su u različitim dijelovima svijeta, uključujući Europske norme (Euro 6), američke EPA standarde te druge regionalne i nacionalne regulative. Ovaj dio rada pruža pregled najvažnijih zakonskih okvira koji reguliraju emisije ispušnih plinova [8].

### *Europske norme*

Europske norme za emisije, poznate kao Euro norme, uvedene su kako bi se smanjile emisije štetnih plinova iz vozila. Prva norma, Euro 1, uvedena je 1992. godine, a od tada su uvedene sve strože norme, do najnovije Euro 6 norme .

- Euro 1 (1992): uvodi prva ograničenja za emisije ugljikovodika (HC) i dušikovih oksida (NOx) iz benzinskih i dizelskih vozila, te zahtjeva korištenje katalizatora.
- Euro 2 (1996): postrožuje limite emisija CO, HC i NOx te uvodi prve granice za emisije čestica iz dizelskih vozila.
- Euro 3 (2000): uvodi odvojene limite za emisije NOx i HC iz benzinskih vozila te dodatno smanjuje dopuštene emisije čestica iz dizelskih vozila.
- Euro 4 (2005): postavlja strože granice za NOx, HC i čestice, čime se značajno smanjuje utjecaj vozila na zagađenje zraka.
- Euro 5 (2009): dodatno smanjuje emisije NOx i čestica te uvodi obvezno ispitivanje emisija čestica za benzinske motore s direktnim ubrizgavanjem.
- Euro 6 (2014): najnovija norma koja postavlja izuzetno stroge granice za emisije NOx (80 mg/km za dizelska vozila) i čestica (4.5 mg/km za dizelska vozila), čime se značajno smanjuje razina zagađenja zraka .

Norma Euro 6 također zahtjeva korištenje tehnologija kao što su selektivna katalitička redukcija (SCR) i dizelski partikularni filteri (DPF) kako bi se zadovoljili postavljeni standardi. Ove tehnologije omogućuju smanjenje emisija NOx i čestica, čime se poboljšava kvaliteta zraka [9].

#### *Američki EPA standardi*

U Sjedinjenim Američkim Državama, Agencija za zaštitu okoliša (EPA) postavlja standarde za emisije iz motornih vozila kroz nekoliko faza poznatih kao Tier standardi.

- Tier 1 (1994): prvi nacionalni standardi za emisije vozila, koji postavljaju limite za emisije CO, NOx i HC. Ovi standardi zahtijevaju korištenje katalizatora i drugih tehnologija za smanjenje emisija.
- Tier 2 (2004-2009): postroženi standardi koji uvode kategorije za vozila (Binovi) s različitim limitima za emisije. Ovi standardi značajno smanjuju dopuštene emisije NOx i uvode ograničenja za emisije čestica iz dizelskih vozila.
- Tier 3 (2017-2025): najnoviji standardi koji postavljaju još strože limite za emisije NOx, HC i čestica. Tier 3 standardi također usklađuju federalne emisijske standarde s kalifornijskim LEV III standardima, čime se postiže veća uniformnost regulative širom SAD-a .

Tier 3 standardi posebno su usmjereni na smanjenje emisija u urbanim sredinama, gdje je problem zagađenja zraka najizraženiji. Ovi standardi zahtijevaju korištenje naprednih tehnologija za kontrolu emisija, uključujući SCR, DPF, i tehnologije za kontrolu isparljivih emisija [9].

#### *Drugi regionalni i nacionalni standardi*

Osim Europskih i američkih standarda, mnoge druge zemlje i regije usvojile su vlastite regulative za kontrolu emisija iz motornih vozila. Na primjer:

- Kina: uvodi kineske faze za emisije, koje su usklađene s Euro normama. Trenutno je na snazi China 6 standard, koji je usporediv s Euro 6 normom.
- Japan: Japanski standardi za emisije, poznati kao Post New Long-Term (PNLT) standardi, postavljaju stroge limite za emisije NO<sub>x</sub>, HC i čestica.
- Indija: Bharat Stage (BS) standardi, trenutno na snazi BS VI, usklađeni su s Euro 6 normama i postavljaju stroge limite za emisije NO<sub>x</sub>, HC i čestica .

Svaka od ovih regulativa ima za cilj smanjenje zagađenja zraka i poboljšanje javnog zdravlja kroz strogu kontrolu emisija iz motornih vozila. Implementacija ovih standarda zahtijeva kontinuirani razvoj i primjenu naprednih tehnologija za kontrolu emisija te rigorozno ispitivanje kako bi se osigurala usklađenost s propisima [10].

#### *Značaj zakonskog okvira*

Zakonski okvir za regulaciju emisija ispušnih plinova ključan je za postizanje globalnih ciljeva u borbi protiv zagađenja zraka i klimatskih promjena. Standardi poput Euro 6 i Tier 3 postavljaju temelje za razvoj čišćih vozila i tehnologija te osiguravaju da proizvođači automobila kontinuirano unapređuju svoje proizvode kako bi zadovoljili sve strože ekološke zahtjeve. Ovi zakoni i regulative također pružaju poticaj za inovacije u automobilskoj industriji, potičući razvoj novih tehnologija koje smanjuju emisije i poboljšavaju učinkovitost vozila [11].

Zakonski okvir za regulaciju emisija ispušnih plinova iz motornih vozila ima ulogu u zaštiti okoliša i javnog zdravlja. Kroz stalno postrožavanje standarda i primjenu naprednih tehnologija moguće je značajno smanjiti štetne emisije i osigurati čišći i zdraviji zrak za buduće generacije .

Ispitivanje ispušnih plinova na motornim vozilima zahtjeva pridržavanje brojnih tehničkih zahtjeva kako bi se osigurala točnost i pouzdanost rezultata. Ovi zahtjevi obuhvaćaju različite aspekte ispitivanja, uključujući vrste vozila, motora, goriva te metode i opremu korištenu u procesu ispitivanja. Važno je razumjeti kako različiti čimbenici utječu na emisije ispušnih plinova te kako se mjerenja provode u skladu s međunarodnim standardima [12].

Tehnički zahtjevi za ispitivanje ispušnih plinova razlikuju se ovisno o vrsti vozila. Uobičajene kategorije vozila uključuju putnička vozila, laka teretna vozila, teška teretna vozila te motocikle i mopede. Putnička vozila namijenjena su prijevozu putnika, obično s kapacitetom do osam putnika plus vozač. Ova kategorija uključuje osobne automobile i male terence (SUV-ove). Laka teretna vozila koriste se za prijevoz tereta i imaju ukupnu masu vozila do 3.5 tone, uključujući dostavna vozila i kamionete. Teška teretna vozila, koja imaju ukupnu masu veću od 3.5 tone, uključuju kamione i autobuse te zahtijevaju specifične metode ispitivanja zbog svoje veličine i opterećenja. Motocikli i mopedi, vozila na dva ili tri kotača popularna u urbanim sredinama, također se ispituju prema specifičnim standardima. Svaka od ovih kategorija vozila podliježe različitim ispitnim metodama i standardima emisija, prilagođenim njihovoj specifičnoj upotrebi i tehničkim karakteristikama [12].

Tehnički zahtjevi za ispitivanje putničkih vozila, na primjer, uključuju simulacije različitih vozačkih ciklusa kako bi se dobila reprezentativna mjerenja emisija u stvarnim uvjetima vožnje. S druge strane, ispitivanje teških teretnih vozila može uključivati posebne dinamometričke testove kako bi se simulirale različite vrste opterećenja i radnih uvjeta.

Motori koji se koriste u motornim vozilima mogu se podijeliti u nekoliko osnovnih tipova, svaki sa specifičnim tehničkim zahtjevima za ispitivanje emisija. Benzinski motori koriste benzinsko gorivo, a karakterizira ih proces unutarnjeg izgaranja pomoću svjećica. Benzinski motori obično emitiraju veće količine ugljičnog monoksida (CO) i ugljikovodika (HC). Dizelski motori koriste dizelsko gorivo i kompresijsko paljenje, što rezultira većom efikasnošću, ali i većim emisijama dušikovih oksida (NO<sub>x</sub>) i čestica (PM). Dizelski motori zahtijevaju posebne sustave za kontrolu emisija, poput selektivne katalitičke redukcije (SCR) i dizelskih partikularnih filtera (DPF) [12].

Električna vozila (EV) i hibridna vozila (HEV) imaju različite emisijske profile. Dok EV vozila nemaju izravne emisije ispušnih plinova, hibridna vozila kombiniraju motor s unutarnjim izgaranjem i električni motor, zahtijevajući specifične metode ispitivanja za oba sustava. Hibridni motori zahtijevaju posebno praćenje kako bi se osigurala usklađenost sa standardima emisija kada

rade u različitim modovima, uključujući samo električni mod, samo motor s unutarnjim izgaranjem i kombinirani mod [13].

Vrsta goriva korištena u motorima također utječe na emisije ispušnih plinova i tehničke zahtjeve za ispitivanje. Benzin je standardno gorivo za mnoge putničke automobile, a generira emisije CO, HC i NO<sub>x</sub>. Dizel je gorivo koje se koristi u mnogim lakim i teškim teretnim vozilima. Dizelsko gorivo ima visoku energetska gustoću, ali i veće emisije NO<sub>x</sub> i čestica. Prirodni plin (CNG/LNG) koristi se kao alternativno gorivo u nekim vozilima. Prirodni plin proizvodi manje CO<sub>2</sub> i NO<sub>x</sub>, ali zahtjeva specifične sustave ispitivanja. Biogoriva, uključujući biodizel i bioetanol, često se miješaju s tradicionalnim gorivima. Biogoriva mogu smanjiti ukupne emisije stakleničkih plinova, ali zahtijevaju prilagodbe ispitnih metoda. Električna energija, koja se koristi u električnim vozilima, zahtjeva procjenu emisija koje se odnose na proizvodnju električne energije, kao i utjecaja na okoliš kroz cijeli životni ciklus vozila.

Svaka vrsta goriva ima svoje specifične karakteristike koje utječu na ispitivanje emisija. Na primjer, ispitivanje emisija dizelskih vozila često uključuje mjerenje čestica i NO<sub>x</sub>, dok ispitivanje benzinskih vozila fokusira se na CO i HC. Korištenje biogoriva zahtjeva praćenje specifičnih komponenti ispušnih plinova koje se mogu razlikovati od onih kod fosilnih goriva .

Tehnički zahtjevi za ispitivanje ispušnih plinova uključuju specifične metode i opremu koja se koristi za mjerenje emisija. Dinamometričke ispitne stanice omogućuju simulaciju vožnje pod kontroliranim uvjetima, mjerenje emisija u različitim voznim ciklusima, kao što su Novi Europski ciklus vožnje (NEDC) i Svjetski usklađeni testni postupak za laka vozila (WLTP). Ove ispitne stanice ključne su za osiguranje konzistentnosti i reproducibilnosti mjerenja emisija, omogućujući testiranje vozila u uvjetima koji simuliraju stvarne vozačke scenarije [13].

Prijenosni sustavi za mjerenje emisija (PEMS) koriste se za mjerenje emisija u stvarnim uvjetima vožnje. Ovi sustavi omogućuju prikupljanje podataka o emisijama tijekom normalne upotrebe vozila na cesti, pružajući točniju sliku stvarnih emisija u usporedbi s laboratorijskim testovima. PEMS sustavi opremljeni su naprednim sensorima i uređajima za prikupljanje podataka, što omogućuje precizno praćenje emisija u različitim voznim uvjetima, uključujući gradske, prigradske i autoceste režime vožnje [14].

Analitički instrumenti, uključujući plinske kromatografe, masene spektrometre i FTIR (Fourier Transform Infrared) spektrometre, omogućuju detaljnu analizu sastava ispušnih plinova. Ovi instrumenti koriste se za mjerenje koncentracija različitih komponenti ispušnih plinova, uključujući

CO, HC, NO<sub>x</sub> i čestice. Napredni senzori i detektori koriste se za kontinuirano praćenje emisija u stvarnom vremenu, omogućujući stalno praćenje i analizu podataka o emisijama. Svaka od ovih metoda i oprema mora biti kalibrirana i certificirana prema međunarodnim standardima kako bi se osigurala točnost i pouzdanost mjerenja. Tehnički zahtjevi također uključuju uvjete testiranja, kao što su temperatura, vlažnost i atmosferski tlak, koji moraju biti kontrolirani kako bi se osigurala konzistentnost rezultata. Kalibracija opreme i kontrola uvjeta testiranja ključni su za dobivanje točnih i pouzdanih rezultata koji odražavaju stvarne emisije vozila [14].

Tehnički zahtjevi za ispitivanje ispušnih plinova na motornim vozilima ključni su za osiguranje točnosti i pouzdanosti rezultata. Različite vrste vozila, motora i goriva zahtijevaju specifične metode ispitivanja i opremu. Korištenje naprednih tehnologija, kao što su dinamometričke ispitne stanice i PEMS sustavi, omogućuje precizno mjerenje emisija i osigurava usklađenost s ekološkim standardima [15].

Tablica 2.1 prikazuje usporedbu emisija ispušnih plinova između benzinskih i dizelskih motora izraženih u gramima po kilometru (g/km). Prikazane su emisije CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, HC i PM za oba tipa motora. Ova tablica omogućuje razumijevanje razlika u emisijama između benzinskih i dizelskih motora te naglašava specifične izazove povezane s kontrolom emisija za svaku vrstu motora. Dizelski motori, iako efikasniji u potrošnji goriva, obično proizvode više NO<sub>x</sub> i PM u usporedbi s benzinskim motorima, dok benzinski motori emitiraju više CO i HC.

Tablica 1. Usporedba emisija između benzinskih i dizelskih motora

Kategorija	Benzinski motori (g/km)	Dizelski motori (g/km)
<b>CO<sub>2</sub></b>	120	130
<b>CO</b>	30	10
<b>NO<sub>x</sub></b>	20	60
<b>HC</b>	15	10
<b>PM</b>	5	25

Izvor: [15].

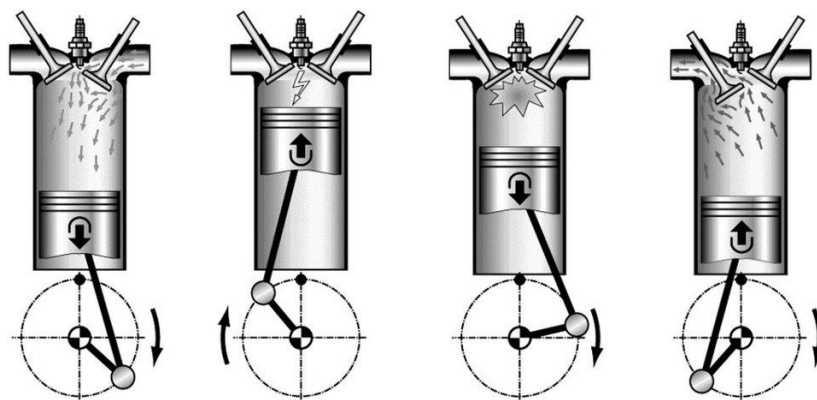
Kako je prikazano u Tablici 2.1, emisije ispušnih plinova značajno variraju između benzinskih i dizelskih motora. Benzinski motori emitiraju više CO i HC, dok dizelski motori proizvode veće količine NO<sub>x</sub> i PM. Ova usporedba naglašava važnost prilagodbe strategija za kontrolu emisija specifičnim karakteristikama svakog tipa motor



### 3. Izgaranje i produkti izgaranja u benzinskim motorima

Proces izgaranja u benzinskim motorima ključan je za pretvaranje kemijske energije goriva u mehaničku energiju koja pokreće vozilo. Benzinski motor je motor s unutarnjim izgaranjem koji koristi mješavinu benzina i zraka koja se zapali pomoću svjećica. Taj proces se može podijeliti u nekoliko faza: usis, kompresija, izgaranje i ispuštanje. U prvoj fazi, usisu, mješavina zraka i goriva ulazi u cilindar motora kroz otvoreni usisni ventil dok se klip spušta prema dolje, stvarajući vakuum koji povlači mješavinu unutra [16]. Ova mješavina je obično u omjeru 14.7 dijelova zraka na 1 dio goriva, što se naziva stehiometrijskim omjerom i smatra se optimalnim za potpuno izgaranje. Kada klip dosegne donju mrtvu točku, usisni ventil se zatvara i započinje druga faza - kompresija. Klip se pomiče prema gore, komprimirajući mješavinu goriva i zraka u maleni prostor u gornjem dijelu cilindra. Ovaj proces povećava tlak i temperaturu mješavine, čineći je spremnom za izgaranje. Treća faza je sama faza izgaranja, koja započinje kada svjećica proizvede iskra koja zapali komprimiranu mješavinu goriva i zraka. Iskra svjećice uzrokuje eksploziju mješavine, što rezultira brzim povećanjem tlaka i temperature unutar cilindra. Ova eksplozija tjera klip prema dolje s velikom snagom, pretvarajući kemijsku energiju goriva u mehanički rad koji se prenosi na radilicu i dalje na kotače vozila. Posljednja faza je ispuštanje, gdje se klip ponovno pomiče prema gore, otvarajući ispušni ventil i izbacujući izgorjene plinove iz cilindra kroz ispušni sustav. Ispušni plinovi tada prolaze kroz različite sustave za kontrolu emisija, kao što su katalizatori, kako bi se smanjila količina štetnih tvari koje se ispuštaju u atmosferu. Proces izgaranja u benzinskim motorima nije uvijek savršen i često dolazi do nepotpunog izgaranja zbog različitih faktora kao što su varijacije u omjeru zraka i goriva, neadekvatna miješanja, temperaturni uvjeti i brzina motora. Nepotpuno izgaranje može dovesti do stvaranja štetnih produkata izgaranja kao što su ugljični monoksid (CO), ugljikovodici (HC) i dušikovi oksidi (NO<sub>x</sub>). Benzinski motori koriste različite tehnologije kako bi se poboljšala učinkovitost izgaranja i smanjile emisije. Jedna od ključnih tehnologija je elektronički sustav ubrizgavanja goriva (EFI), koji precizno kontrolira količinu goriva ubrizganog u cilindar, osiguravajući optimalan omjer zraka i goriva za različite radne uvjete. EFI sustavi koriste senzore za praćenje različitih parametara motora, kao što su temperatura, tlak i brzina, te prilagođavaju ubrizgavanje goriva kako bi se postiglo što potpunije izgaranje [17]. Još jedna važna tehnologija je sustav recirkulacije ispušnih plinova (EGR), koji smanjuje stvaranje

NOx emisija. EGR sustav vraća dio ispušnih plinova natrag u cilindar, gdje se miješaju s novom mješavinom goriva i zraka. Ova recirkulacija snižava vršne temperature izgaranja, što smanjuje formiranje NOx, ali također može utjecati na učinkovitost izgaranja. Katalizatori su ključni elementi ispušnog sustava koji pomažu u smanjenju emisija CO, HC i NOx. Katalizatori koriste plemenite metale kao što su platina, paladij i rodij kako bi potaknuli kemijske reakcije koje pretvaraju štetne plinove u manje štetne tvari kao što su ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>), dušik (N<sub>2</sub>) i vodena para (H<sub>2</sub>O). Moderni trostupanjski katalizatori mogu istovremeno smanjiti emisije svih triju glavnih zagađivača. Faktori kao što su dizajn motora, kvaliteta goriva, radni uvjeti i održavanje imaju ulogu u učinkovitosti izgaranja. Na primjer, motori s višim kompresijskim omjerom mogu postići veću učinkovitost izgaranja, ali također zahtijevaju visokokvalitetno gorivo s većom otpornošću na detonaciju. Loše održavan motor s istrošenim dijelovima, neispravnim svjećicama ili prljavim injektorima može imati lošije performanse izgaranja i povećane emisije. Kvaliteta goriva također značajno utječe na proces izgaranja [17]. Goriva s visokim oktanskim brojem omogućuju potpunije izgaranje i manje emisije štetnih plinova. Dodaci gorivu, kao što su deterdženti i stabilizatori, mogu pomoći u održavanju čistoće sustava za gorivo i sprječavanju stvaranja naslaga koje mogu ometati izgaranje. Različiti radni uvjeti, uključujući temperaturu okoline, nadmorsku visinu i opterećenje vozila, također utječu na proces izgaranja. Na primjer, hladni uvjeti mogu dovesti do lošijeg isparavanja goriva i nepotpunog izgaranja, dok visoke nadmorske visine snižavaju gustoću zraka, što može zahtijevati prilagodbu omjera zraka i goriva kako bi se održala učinkovitost izgaranja. Proces izgaranja u benzinskim motorima složen je i multifaktorski, uključujući pažljivo balansiranje omjera zraka i goriva, kontrolu uvjeta izgaranja i korištenje naprednih tehnologija za smanjenje emisija. Razumijevanje svih aspekata ovog procesa ključno je za razvoj učinkovitih i ekološki prihvatljivih motora koji zadovoljavaju suvremene standarde emisija [18].



Slika 1. Proces klipa, Izvor: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/motor-s-unutarnjim-izgaranjem>

Izgaranje u benzinskim motorima proizvodi nekoliko ključnih produkata koji imaju značajan utjecaj na okoliš i zdravlje ljudi. Glavni produkti izgaranja uključuju ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>), ugljični monoksid (CO), dušikove okside (NO<sub>x</sub>), ugljikovodike (HC) i čestice (PM). Svaki od ovih produkata ima specifične karakteristike i utjecaje koji su važni za razumijevanje emisija iz motornih vozila. Ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>) je jedan od glavnih produkata potpunog izgaranja benzina, koji se sastoji uglavnom od ugljika i vodika. Kada se benzin spali u prisutnosti dovoljno kisika, ugljik u gorivu se oksidira i stvara CO<sub>2</sub>. Iako CO<sub>2</sub> nije toksičan za ljude pri normalnim razinama, njegov utjecaj na okoliš je značajan jer je jedan od glavnih stakleničkih plinova koji doprinosi globalnom zagrijavanju i klimatskim promjenama. S obzirom na to da se količina CO<sub>2</sub> izravno povezuje s potrošnjom goriva, smanjenje potrošnje goriva kroz povećanje učinkovitosti motora i upotrebu alternativnih goriva ključni su za smanjenje emisija CO<sub>2</sub>. Ugljični monoksid (CO) nastaje zbog nepotpunog izgaranja goriva kada nema dovoljno kisika za potpunu oksidaciju ugljika u gorivu do CO<sub>2</sub> [19]. CO je bezbojan, bez mirisa i vrlo otrovan plin. Udisanje CO može uzrokovati ozbiljne zdravstvene probleme, uključujući glavobolje, vrtoglavicu, mučninu i u teškim slučajevima, smrt. Emisije CO se smanjuju korištenjem katalizatora koji pretvaraju CO u manje štetni CO<sub>2</sub> i korištenjem sustava za precizno upravljanje omjerom zraka i goriva kako bi se osiguralo što potpunije izgaranje. Dušikovi oksidi (NO<sub>x</sub>) su skupina plinova koji uključuju dušikov dioksid (NO<sub>2</sub>) i dušikov oksid (NO). NO<sub>x</sub> nastaje pri visokim temperaturama izgaranja kada dušik i kisik iz zraka reagiraju. NO<sub>x</sub> je značajan zagađivač zraka koji doprinosi stvaranju smoga i kiselih kiša te ima štetne učinke na ljudsko zdravlje, uključujući iritaciju dišnih puteva, astmu i druge

respiratorne bolesti. NO<sub>x</sub> emisije se smanjuju korištenjem tehnologija kao što su recirkulacija ispušnih plinova (EGR) koja snižava temperature izgaranja i selektivna katalitička redukcija (SCR) koja kemijski smanjuje NO<sub>x</sub> na dušik i vodu. Ugljikovodici (HC) su nesagorjeli ili djelomično sagorjeli spojevi goriva koji se ispuštaju u ispušnim plinovima. HC mogu uključivati različite organske spojeve, uključujući benzene, aldehide i druge toksične tvari. Oni su ključni prekursori stvaranja prizemnog ozona i smoga, koji imaju negativne učinke na okoliš i zdravlje ljudi. Udisanje HC može uzrokovati respiratorne probleme, iritacije očiju i kože te povećati rizik od raka. Katalizatori u ispušnom sustavu imaju ulogu u smanjenju emisija HC, pretvarajući ih u CO<sub>2</sub> i vodu.) Iako benzinski motori općenito proizvode manje čestica (PM) u usporedbi s dizelskim motorima, ipak mogu emitirati fine čestice koje su rezultat nepotpunog izgaranja i drugih procesa unutar motora. Čestice su mješavina krutih čestica i kapljica te mogu uključivati čađu, metalne okside i druge tvari [20]. PM ima značajne zdravstvene učinke, posebno na respiratorni i kardiovaskularni sustav, uzrokujući probleme poput astme, bronhitisa, srčanih bolesti i raka pluća. Napredne tehnologije poput partikularnih filtera (GPF) koriste se za smanjenje emisija čestica iz benzinskih motora s direktnim ubrizgavanjem. Osim glavnih produkata, izgaranje u benzinskim motorima može stvoriti i druge tvari kao što su sumporovi oksidi (SO<sub>x</sub>) i aldehidi, iako u manjim količinama. Sumporovi oksidi nastaju izgorijevanjem sumpora prisutnog u gorivu, dok aldehidi mogu nastati kao međuprodukti nepotpunog izgaranja. Oba ova produkta imaju potencijalne štetne učinke na okoliš i zdravlje, te se stoga kontinuirano rade na smanjenju njihovih emisija kroz poboljšanje kvalitete goriva i napredne tehnologije za kontrolu emisija. Razumijevanje glavnih produkata izgaranja u benzinskim motorima ključno je za razvoj tehnologija i strategija za smanjenje emisija i poboljšanje kvalitete zraka. Korištenje naprednih sustava za kontrolu emisija, poboljšanje učinkovitosti izgaranja i prijelaz na čišća goriva su ključni koraci prema smanjenju negativnog utjecaja ispušnih plinova na okoliš i zdravlje ljudi. Integracija ovih tehnologija i kontinuirano praćenje emisija osiguravaju da motorna vozila zadovoljavaju sve strože ekološke standarde i doprinose globalnim naporima u borbi protiv zagađenja zraka i klimatskih promjena [20].

Ispušni plinovi iz benzinskih motora sadrže niz štetnih tvari koje značajno utječu na okoliš i zdravlje ljudi. Razumijevanje tih utjecaja ključno je za razvoj učinkovitih strategija za smanjenje emisija i poboljšanje kvalitete zraka. Glavni produkti izgaranja, uključujući ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>), ugljični monoksid (CO), dušikove okside (NO<sub>x</sub>), ugljikovodike (HC) i čestice (PM), imaju različite

negativne posljedice na okoliš i ljudsko zdravlje. Ugljični dioksid je glavni staklenički plin koji doprinosi globalnom zagrijavanju i klimatskim promjenama. Emisije CO<sub>2</sub> iz motornih vozila nastaju kao rezultat potpunog izgaranja benzina. Povećane koncentracije CO<sub>2</sub> u atmosferi dovode do efekta staklenika, što uzrokuje porast globalnih temperatura, promjene klimatskih obrazaca, topljenje polarnih kapa i porast razine mora. Ovi klimatski učinci imaju dugoročne posljedice na ekosustave, poljoprivredu, opskrbu vodom i ljudska staništa, ugrožavajući bioraznolikost i ljudsku sigurnost. Ugljični monoksid je visoko otrovan plin koji nastaje zbog nepotpunog izgaranja goriva. CO ometa sposobnost krvi da prenosi kisik jer se veže za hemoglobin u crvenim krvnim stanicama, stvarajući karboksihemoglobin. Izloženost visokim razinama CO može uzrokovati trovanje, koje se manifestira simptomima poput glavobolje, vrtoglavice, mučnine i u teškim slučajevima, gubitka svijesti i smrti. Dugotrajna izloženost niskim razinama CO također može imati negativne učinke na kardiovaskularni sustav i povećati rizik od srčanih bolesti. Dušikovi oksidi su značajni zagađivači zraka koji doprinose stvaranju smoga i kiselih kiša. NO<sub>x</sub> reagiraju s drugim kemikalijama u atmosferi stvarajući ozon na prizemnoj razini, koji je glavni sastojak smoga. Prizemni ozon može uzrokovati iritaciju dišnih puteva, pogoršati astmu i smanjiti plućnu funkciju, posebno kod djece i starijih osoba. NO<sub>x</sub> također sudjeluju u formiranju kiselih kiša koje zakiseljenu tlo i vodene sustave, šteteći šumama, jezerima i rijekama te ugrožavajući vodeni i kopneni život. Ugljikovodici, uključujući različite organske spojeve poput benzena, aldehida i drugih toksičnih tvari, imaju značajan utjecaj na okoliš i zdravlje. Oni su ključni prekursori stvaranja prizemnog ozona i smoga, koji štetno djeluju na ljudsko zdravlje, uzrokujući respiratorne probleme, iritacije očiju i kože te povećavajući rizik od raka. Benzene, kao jedan od najpoznatijih ugljikovodika, je poznati kancerogen koji može uzrokovati leukemiju i druge vrste raka krvi. Duga izloženost visokim razinama ugljikovodika može imati ozbiljne posljedice za ljudsko zdravlje, uključujući neurološke poremećaje i oštećenja jetre i bubrega [19]. Čestice (PM) iz benzinskih motora, iako manje izražene nego kod dizelskih motora, predstavljaju značajan rizik za ljudsko zdravlje. Fine čestice mogu prodrijeti duboko u pluća i ući u krvotok, uzrokujući respiratorne i kardiovaskularne probleme. Izloženost visokim razinama PM može uzrokovati akutne zdravstvene probleme kao što su astma, bronhitis i smanjena plućna funkcija. Dugotrajna izloženost povezana je s povećanim rizikom od srčanih bolesti, moždanog udara i raka pluća. Čestice također mogu imati negativan utjecaj na okoliš, taložeći se na biljkama i vodenim površinama, čime štete ekosustavima i ugrožavaju bioraznolikost. Iako sumporovi oksidi (SO<sub>x</sub>) i drugi zagađivači poput aldehida nisu

dominantni produkti izgaranja u benzinskim motorima, oni ipak mogu imati negativne učinke na okoliš i zdravlje. SO<sub>x</sub> nastaju izgaranjem sumpora prisutnog u gorivu i doprinose stvaranju kiselih kiša, koje štete tlu, biljkama i vodenim ekosustavima. Aldehidi, kao međuprodukti izgaranja, mogu uzrokovati iritacije očiju, nosa i grla te su povezani s rizikom od raka. Emisije ispušnih plinova iz benzinskih motora imaju značajan utjecaj na okoliš i zdravlje ljudi. Razumijevanje ovih utjecaja ključno je za razvoj i implementaciju mjera za smanjenje emisija, kao što su poboljšanje učinkovitosti motora, korištenje čistijih goriva i naprednih tehnologija za kontrolu emisija. Smanjenje emisija štetnih tvari ne samo da pomaže u zaštiti okoliša i zdravlja, već također pridonosi globalnim naporima u borbi protiv klimatskih promjena i zagađenja zraka. Korištenje naprednih sustava za kontrolu emisija, kao što su katalizatori i sustavi za recirkulaciju ispušnih plinova, te prelazak na alternativna goriva i elektrifikaciju vozila, ključni su koraci prema održivijoj budućnosti [20].

## 4. Izgaranje i produkti izgaranja u dizelskim motorima

Dizelski motori koriste kompresijsko paljenje, gdje se gorivo ubrizgava u komprimirani zrak visoke temperature, što izaziva izgaranje. Ovaj proces je različit od onoga u benzinskim motorima koji koriste svjećice za iniciranje paljenja. Dizelski motori ovise o visokim temperaturama koje nastaju kompresijom zraka kako bi se gorivo zapalilo, što omogućuje veću efikasnost izgaranja i bolju iskoristivost goriva [21].

Proces izgaranja u dizelskom motoru može se podijeliti u nekoliko ključnih faza: usisavanje, kompresija, ubrizgavanje goriva i paljenje, ekspanzija, te ispuštanje. U prvoj fazi, poznatoj kao usisni takt, klip se pomiče prema dolje unutar cilindra, otvarajući usisni ventil i omogućujući zraku da uđe u cilindar. Ovaj zrak ne sadrži gorivo, što je značajna razlika u odnosu na benzinske motore gdje se mješavina goriva i zraka uvlači zajedno. Nakon što klip dosegne donju mrtvu točku, usisni ventil se zatvara, a klip se počinje kretati prema gore, komprimirajući zrak unutar cilindra. Ova kompresija značajno povećava tlak i temperaturu zraka, obično na više od 500°C. Visoka kompresija je ključna za dizelske motore jer omogućuje da se gorivo zapali samo pod utjecajem temperature i tlaka. Kada je zrak u cilindru maksimalno komprimiran, gorivo se ubrizgava u cilindar pod visokim tlakom putem mlaznica [21]. Ubrizgavanje goriva mora biti precizno vremenski usklađeno kako bi se osiguralo učinkovito izgaranje. Gorivo se raspršuje u fine kapljice koje brzo isparavaju i miješaju se s vrućim zrakom, uzrokujući spontano paljenje. Ovaj proces paljenja bez svjećica naziva se kompresijsko paljenje. Spontano paljenje rezultira vrlo brzim porastom temperature i tlaka unutar cilindra. Paljenje goriva uzrokuje eksploziju koja gura klip prema dolje, pretvarajući kemijsku energiju goriva u mehanički rad. Ova faza je poznata kao ekspanzijski ili radni takt. Energija iz eksplozije prenosi se kroz klip na radilicu, koja dalje prenosi snagu na kotače vozila. Ekspanzijski takt je faza u kojoj se ostvaruje najveći dio rada u motoru. Nakon što klip dosegne donju mrtvu točku tijekom ekspanzijskog takta, otvara se ispušni ventil, a klip se pomiče prema gore, istiskujući ispušne plinove iz cilindra. Ova faza poznata je kao ispušni takt. Ispušni plinovi se izbacuju kroz ispušni sustav, prolazeći kroz različite sustave za kontrolu emisija kao što su katalizatori i filteri za čestice kako bi se smanjila količina štetnih tvari koje se ispuštaju u atmosferu. Kompresijsko paljenje omogućuje dizelskim motorima postizanje veće učinkovitosti i veće termalne efikasnosti u usporedbi s benzinskim motorima. Visoki omjeri

kompresije koji su karakteristični za dizelske motore (obično između 14:1 i 22:1) omogućuju veću iskoristivost energije sadržane u gorivu. Ovaj proces rezultira nižim specifičnim potrošnjama goriva i većim okretnim momentom pri nižim brzinama motora, što je posebno korisno za teška teretna vozila i vozila koja zahtijevaju veliku vučnu snagu. Jedan od ključnih elemenata uspješnog procesa izgaranja u dizelskim motorima je precizno upravljanje ubrizgavanjem goriva. Moderni dizelski motori koriste sustave za direktno ubrizgavanje goriva pod visokim tlakom, kao što su *Common Rail* sustavi, koji omogućuju višestruko ubrizgavanje goriva unutar jednog ciklusa izgaranja. Ova tehnologija omogućuje finu kontrolu količine i vremena ubrizgavanja goriva, što pomaže u optimizaciji procesa izgaranja i smanjenju emisija [22].

Korištenje turbo punjača je još jedna značajna tehnologija koja poboljšava proces izgaranja u dizelskim motorima. Turbo punjači komprimiraju zrak prije nego što uđe u cilindar, čime se povećava količina zraka koja ulazi u cilindar i omogućuje bolje miješanje zraka i goriva. Ovo povećava učinkovitost izgaranja i snagu motora bez povećanja veličine motora. Dizelski motori također koriste sustave za recirkulaciju ispušnih plinova (EGR) kako bi smanjili emisije dušikovih oksida (NO<sub>x</sub>). EGR sustavi vraćaju dio ispušnih plinova natrag u cilindar, gdje se miješaju s usisnim zrakom. Ova recirkulacija smanjuje vršne temperature izgaranja, što rezultira manjim stvaranjem NO<sub>x</sub>. Međutim, EGR sustavi također mogu utjecati na učinkovitost izgaranja i zahtijevaju precizno upravljanje kako bi se postigla ravnoteža između smanjenja emisija i performansi motora [23].

Proces izgaranja u dizelskim motorima složen je i zahtjeva precizno upravljanje kako bi se postigla visoka učinkovitost i niske emisije. Kombinacija visokih omjera kompresije, direktnog ubrizgavanja goriva, turbo punjenja i sustava za recirkulaciju ispušnih plinova omogućuje dizelskim motorima postizanje bolje iskoristivosti goriva i većih performansi u usporedbi s benzinskim motorima. Međutim, emisije iz dizelskih motora, posebno dušikovih oksida i čestica, predstavljaju značajan izazov za okoliš i zdravlje, što zahtjeva korištenje naprednih tehnologija za kontrolu emisija kako bi se smanjio njihov negativan utjecaj [23].

Ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>) je glavni produkt potpunog izgaranja dizelskog goriva, koje se sastoji uglavnom od ugljika i vodika. Kada se gorivo potpuno oksidira u prisutnosti dovoljno kisika, ugljik iz goriva stvara CO<sub>2</sub>. Iako CO<sub>2</sub> nije toksičan, on je glavni staklenički plin koji doprinosi



globalnom zagrijavanju i klimatskim promjenama. Dizelski motori, zbog svoje veće efikasnosti, obično proizvode manje CO<sub>2</sub> po jedinici potrošenog goriva u usporedbi s benzinskim motorima, no zbog veće primjene dizelskih motora u komercijalnom prijevozu, ukupne emisije CO<sub>2</sub> mogu biti značajne. Smanjenje emisija CO<sub>2</sub> iz dizelskih motora ključno je za borbu protiv klimatskih promjena i zahtjeva povećanje efikasnosti motora te korištenje alternativnih, manje ugljično intenzivnih goriva. Ugljični monoksid (CO) je vrlo otrovan plin koji nastaje zbog nepotpunog izgaranja goriva, posebno pri hladnom startu motora ili u uvjetima kada je smjesa goriva bogata. CO ometa sposobnost krvi da prenosi kisik jer se veže za hemoglobin, stvarajući karboksihemoglobin, što može uzrokovati trovanje koje se manifestira simptomima poput glavobolje, vrtoglavice, mučnine i, u teškim slučajevima, gubitka svijesti i smrti. Dizelski motori obično emitiraju manje CO u usporedbi s benzinskim motorima zbog efikasnijeg izgaranja, ali su emisije i dalje prisutne. Napredni sustavi za kontrolu emisija, poput oksidacijskih katalizatora, koriste se za smanjenje emisija CO pretvarajući ga u manje štetni ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>) [24]. Dušikovi oksidi (NO<sub>x</sub>) su skupina plinova koji uključuju dušikov dioksid (NO<sub>2</sub>) i dušikov oksid (NO). NO<sub>x</sub> nastaje pri visokim temperaturama izgaranja kada dušik i kisik iz zraka kemijski reagiraju. Dizelski motori, zbog svojih visokih temperatura izgaranja i visokog omjera kompresije, proizvode veće količine NO<sub>x</sub> u usporedbi s benzinskim motorima. NO<sub>x</sub> emisije doprinose stvaranju smoga i kiselih kiša te imaju ozbiljne štetne učinke na ljudsko zdravlje, uključujući iritaciju dišnih puteva, pogoršanje astme i druge respiratorne bolesti. Za smanjenje emisija NO<sub>x</sub> koriste se tehnologije kao što su selektivna katalitička redukcija (SCR), koja koristi aditive poput uree za kemijsku redukciju NO<sub>x</sub> na dušik (N<sub>2</sub>) i vodu (H<sub>2</sub>O), te sustavi za recirkulaciju ispušnih plinova (EGR) koji smanjuju vršne temperature izgaranja. Ugljikovodici (HC) su nesagorjeli ili djelomično sagorjeli spojevi goriva koji se ispuštaju u ispušnim plinovima. HC mogu uključivati različite organske spojeve, uključujući benzene, aldehide i druge toksične tvari. Ugljikovodici su ključni prekursori stvaranja prizemnog ozona i smoga, što ima negativne učinke na okoliš i zdravlje ljudi, uzrokujući respiratorne probleme, iritacije očiju i kože te povećavajući rizik od raka. Emisije HC iz dizelskih motora su obično niže nego iz benzinskih motora, ali su i dalje prisutne. Za smanjenje emisija HC koriste se oksidacijski katalizatori koji pretvaraju nesagorjele ugljikovodike u ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>) i vodu (H<sub>2</sub>O). Čestice (PM) iz dizelskih motora, poznate i kao dizelske čestice, predstavljaju značajan zdravstveni rizik jer fine čestice mogu prodrijeti duboko u pluća i ući u krvotok, uzrokujući respiratorne i kardiovaskularne probleme. PM uključuju čađu, metalne

okside i druge tvari koje nastaju zbog nepotpunog izgaranja goriva i visokih temperatura izgaranja. Izloženost visokim razinama PM povezana je s akutnim i kroničnim respiratornim bolestima, uključujući astmu, bronhitis i smanjenu plućnu funkciju, a dugotrajna izloženost može povećati rizik od srčanih bolesti, moždanog udara i raka pluća. Napredne tehnologije za kontrolu emisija, poput dizelskih partikularnih filtera (DPF), koriste se za smanjenje emisija čestica filtrirajući ih iz ispušnih plinova prije nego što napuste ispušni sustav vozila. Iako sumporovi oksidi (SOx) nisu dominantni produkti izgaranja u dizelskim motorima, oni nastaju izgaranjem sumpora prisutnog u gorivu. SOx doprinosi stvaranju kiselih kiša koje štete tlu, biljkama i vodenim ekosustavima. Aldehidi, kao međuprodukti izgaranja, mogu uzrokovati iritacije očiju, nosa i grla te su povezani s rizikom od raka. Upotreba goriva s niskim udjelom sumpora značajno smanjuje emisije SOx, dok napredni sustavi za kontrolu emisija pomažu u smanjenju emisija drugih zagađivača [24].

Emisije ispušnih plinova iz dizelskih motora imaju značajan utjecaj na okoliš i zdravlje ljudi. Glavni produkti izgaranja uključuju ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>), ugljik monoksid (CO), dušikove okside (NO<sub>x</sub>), ugljikovodike (HC) i čestice (PM), a svaki od njih doprinosi različitim ekološkim i zdravstvenim problemima. Ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>) je glavni staklenički plin koji doprinosi globalnom zagrijavanju i klimatskim promjenama. Emisije CO<sub>2</sub> iz motornih vozila nastaju kao rezultat potpunog izgaranja dizelskog goriva. Povećane koncentracije CO<sub>2</sub> u atmosferi doprinose efektu staklenika, koji uzrokuje porast globalnih temperatura, promjene klimatskih obrazaca, topljenje polarnih kapa i porast razine mora. Ovi klimatski učinci imaju dugoročne posljedice na ekosustave, poljoprivredu, opskrbu vodom i ljudska staništa, ugrožavajući bioraznolikost i ljudsku sigurnost. Klimatske promjene izazvane emisijama CO<sub>2</sub> također povećavaju učestalost i intenzitet ekstremnih vremenskih događaja, poput uragana, poplava i suša, što dodatno ugrožava ljudske živote i imovinu. Ugljik monoksid (CO) je vrlo otrovan plin koji nastaje zbog nepotpunog izgaranja goriva. CO ometa sposobnost krvi da prenosi kisik jer se veže za hemoglobin u crvenim krvnim stanicama, stvarajući karboksihemoglobin. Izloženost visokim razinama CO može uzrokovati ozbiljne zdravstvene probleme, uključujući glavobolje, vrtoglavicu, mučninu, gubitak svijesti i u teškim slučajevima smrt [25]. Dugotrajna izloženost niskim razinama CO također može imati negativne učinke na kardiovaskularni sustav, povećavajući rizik od srčanih bolesti i moždanog udara. CO emisije su posebno opasne u urbanim sredinama gdje se mogu akumulirati u visokoj koncentraciji zbog guste prometne mreže i slabije ventilacije. Dušikovi oksidi (NO<sub>x</sub>) su značajni zagađivači zraka koji doprinose stvaranju smoga i kiselih kiša. NO<sub>x</sub> reagiraju s drugim

kemikalijama u atmosferi stvarajući prizemni ozon, koji je glavni sastojak smoga. Prizemni ozon može uzrokovati iritaciju dišnih puteva, pogoršati astmu i smanjiti plućnu funkciju, posebno kod djece i starijih osoba. NO<sub>x</sub> također sudjeluju u formiranju kiselih kiša, koje zakiseljuju tlo i vodene sustave, šteteći šumama, jezerima i rijekama te ugrožavajući vodeni i kopneni život. Kisele kiše mogu izravno oštetiti biljke, degradirati tlo i smanjiti pH vrijednost vode, što negativno utječe na riblji i biljni svijet. Dugotrajna izloženost NO<sub>x</sub> može uzrokovati kronične respiratorne bolesti i smanjenje životnog vijeka. Ugljikovodici (HC) su nesagorjeli ili djelomično sagorjeli spojevi goriva koji se ispuštaju u ispušnim plinovima. HC uključuju različite organske spojeve, poput benzena, aldehida i drugih toksičnih tvari. Oni su ključni prekursori stvaranja prizemnog ozona i smoga, koji imaju negativne učinke na okoliš i zdravlje ljudi. Prizemni ozon može uzrokovati respiratorne probleme, iritacije očiju i kože te povećati rizik od raka. Benzen, kao jedan od najpoznatijih ugljikovodika, je poznati kancerogen koji može uzrokovati leukemiju i druge vrste raka krvi. Dugotrajna izloženost HC može također dovesti do neuroloških poremećaja, oštećenja jetre i bubrega te drugih ozbiljnih zdravstvenih problema [25]. Čestice (PM) iz dizelskih motora predstavljaju značajan rizik za ljudsko zdravlje. Fine čestice mogu prodrijeti duboko u pluća i ući u krvotok, uzrokujući respiratorne i kardiovaskularne probleme. Izloženost visokim razinama PM može uzrokovati akutne zdravstvene probleme, poput astme, bronhitisa i smanjene plućne funkcije. Dugotrajna izloženost PM povezana je s povećanim rizikom od srčanih bolesti, moždanog udara i raka pluća. Djeca, starije osobe i osobe s postojećim zdravstvenim problemima posebno su osjetljive na negativne učinke PM. Čestice također mogu imati negativan utjecaj na okoliš, taložeći se na biljkama i vodenim površinama, čime štete ekosustavima i ugrožavaju bioraznolikost. Onečišćenje PM može smanjiti fotosintetsku aktivnost biljaka, utjecati na zdravlje šuma i poljoprivrednih kultura te smanjiti kvalitetu vode u jezerima i rijekama. Sumporovi oksidi (SO<sub>x</sub>) nastaju izgaranjem sumpora prisutnog u gorivu i doprinose stvaranju kiselih kiša. Kisele kiše imaju negativne učinke na tlo, biljni i životinjski svijet te zgrade i infrastrukturu. Kiselost tla može smanjiti plodnost i otpornost biljaka na bolesti, dok zakiseljene vodene površine mogu ugroziti riblji fond i druge vodene organizme. Ostali zagađivači, poput aldehida, također imaju negativne učinke na zdravlje ljudi, uključujući iritacije očiju, nosa i grla te povećani rizik od raka. Aldehidi, kao međuprodukti izgaranja, mogu uzrokovati kratkoročne zdravstvene probleme kao što su glavobolje i mučnina, te dugoročne posljedice poput oštećenja unutarnjih organa [25].

Emisije ispušnih plinova iz dizelskih motora imaju značajan utjecaj na okoliš i zdravlje ljudi, što zahtjeva upotrebu naprednih tehnologija za kontrolu emisija, poput selektivne katalitičke redukcije (SCR) i dizelskih partikularnih filtera (DPF). Ove tehnologije pomažu u smanjenju emisija NO<sub>x</sub> i PM, čime se smanjuje njihov štetni utjecaj na okoliš i poboljšava kvaliteta zraka. Korištenje čistih goriva, poboljšanje efikasnosti motora i prelazak na alternativne izvore energije također su ključni koraci u smanjenju negativnog utjecaja dizelskih motora na okoliš i zdravlje ljudi. Razvoj i primjena novih tehnologija te kontinuirano praćenje i regulacija emisija osiguravaju da motorna vozila zadovoljavaju sve strože ekološke standarde, doprinoseći održivijem i zdravijem okolišu za buduće generacije. U konačnici, kombinirani naponi industrije, regulatora i potrošača ključni su za postizanje značajnih smanjenja emisija i zaštitu zdravlja ljudi i okoliša [25].

## 5. Metode ispitivanja ispušnih plinova na motornim vozilima

Standardne laboratorijske metode za ispitivanje ispušnih plinova uključuju upotrebu dinamometričkih ispitnih stanica, gdje se vozila testiraju pod kontroliranim uvjetima. Ovi testovi omogućuju precizno mjerenje emisija u različitim radnim uvjetima simulirajući stvarne vozačke scenarije. Dinamometrička ispitna stanica koristi uređaj koji mjeri snagu proizvedenu od strane vozila dok se nalazi u laboratorijskom okruženju, a vozilo je postavljeno na valjke koji omogućuju rotaciju kotača. Tijekom ispitivanja, vozilo prolazi kroz različite vozačke cikluse, kao što su Novi Europski vozački ciklus (NEDC) i Svjetski usklađeni vozački ciklus (WLTP), koji uključuju različite brzine i opterećenja kako bi se simulirali različiti uvjeti vožnje. Jedna od prednosti laboratorijskih metoda je visoka razina kontroliranosti uvjeta ispitivanja, što omogućuje ponovljivost i usporedivost rezultata. U laboratorijskom okruženju moguće je precizno kontrolirati čimbenike kao što su temperatura, vlažnost i atmosferski tlak, čime se osigurava da svi testovi budu izvedeni pod istim uvjetima. Osim toga, laboratorijske metode omogućuju detaljnu analizu emisija različitih komponenti ispušnih plinova, uključujući CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, HC i PM, koristeći napredne analitičke instrumente kao što su plinski kromatografi i maseni spektrometri [26].

Metode ispitivanja u stvarnim uvjetima, kao što su prijenosni sustavi za mjerenje emisija (PEMS), omogućuju ispitivanje vozila tijekom stvarne vožnje na cesti. PEMS uređaji montiraju se na vozilo i prikupljaju podatke o emisijama dok vozilo radi u normalnim uvjetima vožnje, uključujući gradske, prigradske i autoceste režime. Ovi sustavi pružaju točniju sliku stvarnih emisija vozila u svakodnevnoj upotrebi, jer uzimaju u obzir varijacije u vozačkom ponašanju, prometne uvjete i druge vanjske čimbenike koji mogu utjecati na emisije. Jedna od glavnih prednosti PEMS-a je njihova sposobnost mjerenja emisija tijekom normalne upotrebe vozila, što omogućuje identificiranje razlika između laboratorijskih rezultata i stvarnih emisija. Ovaj pristup postao je posebno važan nakon otkrivanja nesukladnosti u emisijskim testovima tijekom Dieselgate skandala, kada su otkrivene značajne razlike između laboratorijskih mjerenja i stvarnih emisija na cesti. PEMS omogućuje regulatorima i proizvođačima vozila bolji uvid u stvarne performanse vozila u pogledu emisija te pomaže u osiguravanju da vozila zadovoljavaju zakonske norme u stvarnim uvjetima vožnje [27].

Napredne tehnologije i inovacije imaju ključnu ulogu u poboljšanju točnosti i pouzdanosti mjerenja emisija ispušnih plinova. Najnovije tehnologije uključuju senzore koji mogu kontinuirano pratiti emisije u stvarnom vremenu, omogućujući stalno praćenje i analizu podataka o emisijama. Ovi senzori koriste napredne analitičke metode, kao što su infracrvena spektroskopija i laserska tehnologija, za mjerenje koncentracija različitih zagađivača u ispušnim plinovima. Integracija umjetne inteligencije (AI) i strojnog učenja (ML) u analizu podataka o emisijama također predstavlja značajnu inovaciju u ovom području. AI i ML algoritmi mogu analizirati velike količine podataka prikupljenih tijekom ispitivanja i identificirati obrasce koji mogu ukazivati na probleme s emisijama ili potencijalne mogućnosti za poboljšanje performansi motora. Ove tehnologije omogućuju brže i preciznije donošenje odluka te pomažu proizvođačima vozila u optimizaciji dizajna motora i sustava za kontrolu emisija [28].

Laboratorijske metode i metode ispitivanja u stvarnim uvjetima imaju svoje prednosti i ograničenja. Laboratorijske metode pružaju kontrolirane uvjete i visoku ponovljivost rezultata, što omogućuje detaljnu analizu emisija i usporedivost između različitih testova. Međutim, one ne mogu uvijek precizno odražavati stvarne uvjete vožnje i ponašanje vozila na cesti. S druge strane, metode ispitivanja u stvarnim uvjetima, kao što su PEMS, pružaju točniju sliku stvarnih emisija vozila jer uzimaju u obzir varijacije u vozačkom ponašanju i vanjske čimbenike [29]. Međutim, ovi testovi mogu biti manje ponovljivi zbog varijacija u uvjetima vožnje i teškoća u kontroliranju svih varijabli. Kombinacija obje metode daje najcjelovitiju sliku emisija ispušnih plinova. Laboratorijski testovi omogućuju detaljnu analizu i usporedivost, dok testovi u stvarnim uvjetima pružaju uvid u stvarne performanse vozila na cesti. Integracija rezultata iz obje metode omogućuje bolje razumijevanje emisija i pomaže u razvoju učinkovitijih strategija za smanjenje zagađenja zraka i poboljšanje kvalitete zraka. Korištenje naprednih tehnologija i inovacija dodatno poboljšava točnost i pouzdanost mjerenja, osiguravajući da vozila zadovoljavaju sve strože ekološke standarde i doprinose globalnim naporima u borbi protiv klimatskih promjena [29,30].

U svrhu analize budućih trendova emisija ispušnih plinova, važno je razmotriti različite scenarije smanjenja emisija i uvođenja novih tehnologija. Tablica 1 pruža pregled projiciranih emisija ispušnih plinova od 2020. do 2030. godine prema tri scenarija: bez promjena (BAU), uvođenje novih tehnologija, i stroži propisi. Ovi scenariji omogućuju bolje razumijevanje potencijalnog utjecaja različitih politika i tehnoloških inovacija na smanjenje emisija. Analizom ovih scenarija, moguće je identificirati najefikasnije pristupe za postizanje ciljeva smanjenja emisija i zaštite okoliša.

Tablica 2. Projicirane emisije ispušnih plinova do 2030. godine prema različitim scenarijima smanjenja emisija

Godina	Bez promjena	Uvođenje novih tehnologija	Stroži propisi
2020	100	100	100
2021	98	95	94
2022	96	90	88
2023	95	85	82
2024	93	80	76
2025	92	75	70
2026	91	70	64
2027	90	65	58
2028	89	60	52
2029	88	55	46
2030	87	50	40

Izvor: [28].

Kako je prikazano u tablici 5.1, projicirane emisije ispušnih plinova variraju ovisno o scenariju smanjenja emisija. U scenariju bez promjena (BAU), emisije se smanjuju minimalno do 2030. godine, dok uvođenje novih tehnologija i strožih propisa rezultira znatno većim smanjenjem emisija.

Tablica 5.2. prikazuje usporedbu emisija ispušnih plinova između laboratorijskih ispitivanja i ispitivanja u stvarnim uvjetima vožnje pomoću prijenosnih sustava za mjerenje emisija (PEMS). Prikazane su emisije CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, HC i PM izražene u gramima po kilometru (g/km).

Laboratorijska ispitivanja provode se u kontroliranim uvjetima, dok PEMS omogućava mjerenje emisija u stvarnim uvjetima vožnje, pružajući točniju sliku stvarnih emisija vozila. Ova usporedba ističe razlike između dva pristupa mjerenju emisija i važnost ispitivanja u stvarnim uvjetima za precizniju procjenu utjecaja vozila na okoliš.

Tablica 3. Usporedba emisija između benzinskih i dizelskih motora

Kategorija	Benzinski motori (g/km)	Dizelski motori (g/km)
<b>CO<sub>2</sub></b>	120	130
<b>CO</b>	30	10
<b>NO<sub>x</sub></b>	20	60
<b>HC</b>	15	10
<b>PM</b>	5	25

Izvor: [29].

Razumijevanje razlika u emisijama ispušnih plinova između laboratorijskih ispitivanja i ispitivanja u stvarnim uvjetima ključno je za procjenu stvarnog utjecaja vozila na okoliš. Tablica 5.2 pruža usporednu analizu emisija CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, HC i PM između ovih dviju metoda ispitivanja. Laboratorijska ispitivanja često ne odražavaju stvarne uvjete vožnje, dok ispitivanja pomoću PEMS sustava pružaju točniji prikaz emisija u svakodnevnim uvjetima. Ova tablica naglašava potrebu za korištenjem PEMS tehnologije za bolje razumijevanje i smanjenje emisija ispušnih plinova.

### 5.1. Proces mjerenja emisija ispušnih plinova

Proces mjerenja emisija ispušnih plinova na motornim vozilima osmišljen je kako bi se osigurala usklađenost vozila s ekološkim standardima te omogućilo donošenje pouzdanih odluka vezanih za smanjenje zagađenja i poboljšanje tehnologija. Ovaj proces obuhvaća složene i precizno definirane procedure koje se provode kako bi se prikupili točni podaci o emisijama u različitim



uvjetima vožnje. Mjerenja se provode u laboratorijima i u stvarnim uvjetima vožnje, što omogućava sveobuhvatan uvid u performanse vozila u pogledu emisija [31,32].

Mjerenje emisija započinje detaljnom pripremom vozila, koja uključuje provjeru osnovnih funkcija te prilagodbu vozila prema standardnim uvjetima testiranja. Priprema obuhvaća provjeru ispravnosti svih komponenti povezanih s emisijama, kao što su sustavi za kontrolu ispušnih plinova, katalizatori, senzori i sustavi za recirkulaciju ispušnih plinova (EGR). Ove provjere osiguravaju da su svi sustavi potpuno operativni te da će vozilo raditi u uvjetima koji što vjernije odražavaju stvarne uvjete vožnje. Nakon početne provjere, vozilo se podešava prema specifičnim zahtjevima testiranja, uključujući prilagodbu temperature motora, tlakova i drugih parametara koji mogu utjecati na rezultate mjerenja [33].

#### *5.1.1. Dinamometrička ispitivanja*

Dinamometrička ispitivanja provode se u laboratorijskim uvjetima, gdje se vozila postavljaju na dinamometar, uređaj koji simulira različite uvjete vožnje, omogućujući testiranje vozila pod kontroliranim uvjetima [34]. Vozila prolaze kroz standardizirane vozačke cikluse kao što su Novi Europski ciklus vožnje (NEDC) i Svjetski usklađeni testni postupak za laka vozila (WLTP). Ovi ciklusi osmišljeni su kako bi simulirali raznolike uvjete vožnje, uključujući gradske, prigradske i auto cestovne režime, pri čemu se vozila podvrgavaju različitim opterećenjima, ubrzanjima i brzinama [34].

Tokom dinamometričkih ispitivanja, emisije se precizno mjere pomoću naprednih analitičkih instrumenata, kao što su plinski kromatografi, spektrometri i uređaji za analizu čestica [35]. Ovi instrumenti omogućuju detaljnu kvantitativnu analizu emisija glavnih zagađivača, uključujući ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>), ugljik monoksid (CO), dušikove okside (NO<sub>x</sub>), ugljikovodike (HC) i čestice (PM). Svaki od ovih plinova ima specifične karakteristike koje zahtijevaju prilagođene metode analize. Na primjer, spektrometri omogućuju precizno određivanje koncentracija NO<sub>x</sub> i HC u ispušnim plinovima, dok plinski kromatografi pružaju dublji uvid u složene kemijske sastave ovih spojeva [35].

#### *5.1.2. Prijenosni sustavi za mjerenje emisija (PEMS)*

Za razliku od laboratorijskih ispitivanja, koja se provode u kontroliranim uvjetima, prijenosni sustavi za mjerenje emisija (PEMS) omogućuju prikupljanje podataka o emisijama dok se vozilo koristi u stvarnim uvjetima vožnje [36]. PEMS uređaji montiraju se izravno na vozilo i

kontinuirano prikupljaju podatke o emisijama u različitim voznim režimima, uključujući vožnju po gradskim, prigradskim i autocestovnim cestama [36]. Ovi sustavi pružaju vrijedne podatke koji često preciznije odražavaju stvarne emisije vozila, jer uzimaju u obzir promjene u uvjetima vožnje, uključujući promjene u brzini, opterećenju vozila, temperaturi i drugim vanjskim čimbenicima. PEMS sustavi uključuju niz senzora i mjernih uređaja koji omogućuju praćenje širokog spektra emisijskih komponenti. Podaci prikupljeni putem PEMS uređaja posebno su značajni jer omogućuju usporedbu stvarnih emisija s onima dobivenim u laboratorijskim uvjetima, otkrivajući potencijalne razlike koje bi mogle ukazivati na potrebu za prilagodbom regulativa ili tehnologija kontrole emisija [36].

### *5.1.3. Analiza rezultata i kalibracija*

Nakon prikupljanja podataka, rezultati se podvrgavaju temeljitoj analizi kako bi se utvrdilo zadovoljava li vozilo propisane standarde emisija. Analiza obuhvaća detaljno ispitivanje svih prikupljenih podataka, uključujući provjeru usklađenosti s normama poput Euro 6 ili sličnim međunarodnim standardima [37]. Svi korišteni uređaji i senzori moraju biti redovito kalibrirani kako bi se osigurala točnost i pouzdanost mjerenja. Proces kalibracije uključuje precizno podešavanje mjernih instrumenata te provjeru njihove točnosti u skladu s referentnim standardima. Osiguravanje točne kalibracije posebno je važno jer čak i minimalna odstupanja u mjerenju mogu rezultirati pogrešnim zaključcima o emisijama vozila, što može imati značajne posljedice na donošenje regulatornih odluka i na procese certificiranja vozila [37].

## **5.2. On-Board Diagnostic**

On-Board Diagnostic (OBD) sustav predstavlja tehnološki napredan mehanizam integriran u vozila s ciljem kontinuiranog praćenja performansi motora i sustava za kontrolu emisija. Njegova osnovna funkcija je nadzor parametara motora, kao i emisijskih komponenti, kako bi se osiguralo da vozilo radi unutar propisanih normi [38]. Sustav je osmišljen tako da može detektirati nesukladnosti i greške te ih odmah prijaviti vozaču putem dijagnostičkih kodova i vizualnih signala na kontrolnoj ploči vozila [38].

### *5.2.1. Funkcija OBD sustava*

Funkcioniranje OBD sustava temelji se na kontinuiranom nadzoru rada vozila. Sustav prikuplja podatke s različitih senzora smještenih u motoru i povezanih emisijskih komponenti, analizirajući ih u stvarnom vremenu. Ako OBD sustav detektira odstupanje od normalnih parametara koje bi moglo uzrokovati povećanje emisija ili smanjiti učinkovitost motora, odmah generira specifični dijagnostički kod greške. Ovaj kod automatski aktivira kontrolnu lampicu na ploči s instrumentima, koja vozača upozorava na postojanje problema. Takav kod, kada ga očita tehničar, pruža točne informacije o prirodi problema, omogućujući precizno i brzo dijagnosticiranje te rješavanje problema, čime se smanjuje vrijeme popravka i vraća vozilo u optimalno stanje [38].

### *5.2.2. Dijagnostika i popravak*

OBD sustav omogućuje značajno skraćivanje vremena potrebnog za dijagnostiku i popravak kvarova na vozilu. Kada sustav detektira grešku, generira dijagnostički kod koji tehničar može očitati pomoću posebnog alata za dijagnostiku. Ovi kodovi pružaju specifične informacije o problemima, kao što su kvarovi u sustavu paljenja, neispravnosti u sustavu za kontrolu isparavanja goriva, problemi s katalizatorom, ili greške u sustavu recirkulacije ispušnih plinova (EGR). Ova razina detalja omogućuje tehničaru da brzo identificira uzrok problema i provede potrebne popravke kako bi vozilo ponovno radilo u skladu s propisanim standardima emisija [39].

### *5.2.3. Evolucija OBD sustava*

Evolucija OBD sustava započela je s jednostavnim OBD-I sustavima, koji su nudili osnovne funkcionalnosti praćenja i dijagnostike. Međutim, s razvojem tehnologije, sustavi su značajno unaprijeđeni do modernog OBD-II sustava, koji je danas standard u gotovo svim vozilima. OBD-II sustavi omogućuju detaljnu dijagnostiku širokog spektra parametara, uključujući ne samo osnovne funkcije motora, već i složene sustave kao što su rad katalizatora, kontrola isparavanja goriva, i učinkovitost sustava recirkulacije ispušnih plinova [39]. OBD-II sustav također omogućuje pohranu povijesti grešaka, što tehničarima pruža uvid u prethodne probleme koji su možda utjecali na rad vozila.

Sustavi OBD-a nastavljaju se razvijati prema još sofisticiranijim verzijama, kao što je OBD-III, koji bi trebao omogućiti daljinsko praćenje i dijagnostiku vozila u stvarnom vremenu. OBD-III sustavi mogli bi automatski prenositi podatke o greškama nadležnim tijelima ili servisnim centrima, omogućujući brzu reakciju i rješavanje problema prije nego što postanu ozbiljni

[39]. Ova tehnologija ima potencijal da dodatno smanji vrijeme potrebno za popravak i održavanje vozila te poveća sigurnost i učinkovitost vozila na cestama. OBD sustav tako predstavlja korak naprijed u tehnologiji vozila, pružajući neprekidan nadzor i održavanje optimalne učinkovitosti te usklađenosti vozila s ekološkim standardima [39].



Slika 2. OBD-II skener

Uređaj na slici 2 je OBD-II (On-Board Diagnostics) skener koji se koristi za dijagnostiku vozila. OBD-II skener se priključuje na OBD port u vozilu kako bi očitao dijagnostičke kodove grešaka, što omogućava tehničarima i korisnicima da brzo identificiraju i riješe probleme s motorom i sustavima za kontrolu emisija. Skener obično pruža osnovne informacije o performansama vozila i može biti koristan alat za redovito održavanje i rješavanje problema.



Slika 3. PEMS (Prijenosni sustav za mjerenje emisija)

Uređaj na slici 3 je dio prijenosnog sustava za mjerenje emisija (PEMS). PEMS se koristi za mjerenje emisija vozila u stvarnim uvjetima vožnje. Ovaj specifični uređaj montira se na vozilo i prikuplja podatke o emisijama tijekom različitih vozačkih režima, uključujući vožnju po gradskim, prigradskim i autocestovnim cestama. PEMS je ključan alat za precizno mjerenje stvarnih emisija, omogućujući usporedbu s laboratorijskim testovima i osiguravajući da vozila zadovoljavaju ekološke standarde.

## 6. Zaključak

Ispitivanje ispušnih plinova na motornim vozilima ključno je za smanjenje zagađenja zraka i zaštitu javnog zdravlja. Kroz povijesni pregled metoda ispitivanja, razvoj zakonskih okvira poput Euro 6 normi i američkih EPA standarda, te tehničke zahtjeve za ispitivanje, jasno je da su se pristupi kontroli emisija značajno unaprijedili. Različite metode ispitivanja, uključujući laboratorijske metode i metode ispitivanja u stvarnim uvjetima, osiguravaju sveobuhvatan pristup mjerenju emisija. Procesi izgaranja u benzinskim i dizelskim motorima stvaraju različite produkte izgaranja koji imaju značajan utjecaj na okoliš i zdravlje ljudi. Ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>), ugljični monoksid (CO), dušikovi oksidi (NO<sub>x</sub>), ugljikovodici (HC) i čestice (PM) su glavni produkti izgaranja, svaki sa svojim specifičnim utjecajem na kvalitetu zraka i ljudsko zdravlje. Razumijevanje ovih produkata i njihovih utjecaja ključ je za razvoj tehnologija koje mogu smanjiti emisije i ublažiti njihove negativne efekte. Laboratorijske metode, koje koriste dinamometričke ispitne stanice, omogućuju precizno mjerenje emisija u kontroliranim uvjetima, pružajući visok stupanj ponovljivosti i usporedivosti rezultata. Metode ispitivanja u stvarnim uvjetima, poput prijenosnih sustava za mjerenje emisija (PEMS), omogućuju točniju procjenu stvarnih emisija vozila tijekom svakodnevne vožnje. Kombinacija ovih metoda, uz upotrebu naprednih tehnologija kao što su kontinuirani senzori i umjetna inteligencija, pruža najcjelovitiji uvid u emisije vozila. Korištenje naprednih sustava za kontrolu emisija, poput selektivne katalitičke redukcije (SCR) i dizelskih partikularnih filtera (DPF), zajedno s poboljšanjem efikasnosti motora i prelaskom na čišća goriva, ključni su koraci u smanjenju emisija ispušnih plinova. Razvoj i primjena ovih tehnologija doprinose postizanju sve strožih ekoloških standarda, čime se smanjuje negativan utjecaj vozila na okoliš i poboljšava kvaliteta zraka. Kontinuirana regulacija, inovacije u tehnologiji i svijest javnosti o važnosti smanjenja emisija imaju ulogu u stvaranju održivijeg transportnog sustava. S obzirom na značajne zdravstvene i okolišne izazove povezane s emisijama ispušnih plinova, nužno je nastaviti unapređivati metode ispitivanja, razvijati nove tehnologije i provoditi učinkovite politike koje će osigurati čistu i zdravu budućnost za sve. Kombinirani naponi industrije, regulatora i potrošača ključni su za postizanje značajnih smanjenja emisija i zaštitu zdravlja ljudi i okoliša.

## 7.Literatura

1. Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill.
2. Stone, R. (1999). *Introduction to Internal Combustion Engines*. Macmillan Press Ltd.
3. European Environment Agency (EEA). (2019). *Air Quality in Europe – 2019 Report*. Retrieved from <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2019>.
4. World Health Organization (WHO). (2018). *Ambient Air Pollution: Health Impacts*. Retrieved from [https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab\\_1](https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1).
5. Pulkrabek, W. W. (2003). *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. Prentice Hall.
6. Frey, H. C., & Roupail, N. M. (2003). *Handbook of Emissions Factors for Road Transport*. Springer.
7. Schönborn, A. (2009). *Combustion and Emissions in Advanced Diesel Engines*. VDM Verlag.
8. European Commission. (2019). *Regulation (EU) 2019/631: Setting CO2 Emission Performance Standards for New Passenger Cars and for New Light Commercial Vehicles*. Official Journal of the European Union. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32019R0631>.
9. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2020). *Overview of the Clean Air Act and Air Pollution*. Retrieved from <https://www.epa.gov/clean-air-act-overview>.
10. California Air Resources Board (CARB). (2018). *Regulations for In-Use Off-Road Diesel-Fueled Fleets*. Retrieved from <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/in-use-off-road-diesel-fueled-fleets-regulation>.
11. International Council on Clean Transportation (ICCT). (2017). *European Vehicle Market Statistics Pocketbook 2017/18*. Retrieved from <https://theicct.org/publications/european-vehicle-market-statistics-201718>.
12. Majewski, W. A., & Khair, M. K. (2006). *Diesel Emissions and Their Control*. SAE International.

13. Ladommatos, N., & Abdelhalim, S. M. (1999). *Combustion and Emissions in Diesel Engines*. SAE International.
14. Guzzella, L., & Onder, C. H. (2004). *Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems*. Springer.
15. Pickering, C. (2010). *Advances in Automotive Emissions Control*. SAE International.
16. Turns, S. R. (2013). *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*. McGraw-Hill.
17. Staudt, J. E. (2017). *Technologies for Reducing Carbon Dioxide Emissions from Passenger Cars*. SAE International.
18. Plint, M., & Martyr, A. (2011). *Engine Testing: Theory and Practice*. Elsevier.
19. Merkisz, J., Pielecha, J., & Radzimirski, S. (2014). *New Trends in Emission Control in the European Union*. Springer.
20. Hesterberg, T. W., et al. (2011). *Health Effects of Diesel Engine Emissions: A Comprehensive Literature Review, 2002–2011*. *Inhalation Toxicology*.
21. Johnson, T. V. (2010). *Diesel Emission Control Technologies in the Context of Future Regulations*. SAE International.
22. Zheng, M., & Reader, G. T. (2004). *Diesel Engine Emissions and Their Control*. John Wiley & Sons.
23. Eastwood, P. (2008). *Critical Topics in Exhaust Gas Aftertreatment*. Springer.
24. Mayer, A. (2008). *Diesel Filter Systems*. SAE International.
25. Millington, P. (2006). *Measurement Techniques for Automotive Engine and Exhaust Systems*. SAE International.
26. Society of Automotive Engineers (SAE). (2016). *Emissions Measurement and Testing: Gasoline and Diesel Engines*. SAE International.
27. Carlucci, A. P., et al. (2018). *Advanced Combustion Strategies and Emission Control Technologies for Future Sustainable and Clean Engines*. Springer.
28. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>.



29. Environmental Protection Agency (EPA). (2015). *Tier 3 Motor Vehicle Emission and Fuel Standards*. Retrieved from <https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/tier-3-motor-vehicle-emission-and-fuel-standards>.
30. European Automobile Manufacturers Association (ACEA). (2020). *Emissions Regulations for Passenger Cars*. Retrieved from <https://www.acea.be/publications/article/emissions-regulations-for-passenger-cars>.
31. Heywood JB. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. 2nd ed. McGraw-Hill Education; 2018.
32. Mahanta P, Kalita P. *Advances in Thermofluids and Renewable Energy: Measurement and Control of Vehicular Emissions*. Springer; 2020.
33. Mollenhauer K, Tschöke H. *Handbook of Diesel Engines*. Springer; 2010.
34. Understanding Onboard Diagnostics (OBD) and Vehicle Emissions. Globalmrv; 2024. Dostupno na: <https://www.globalmrv.com/understanding-onboard-diagnostics-obd-and-vehicle-emissions/>
35. SAE International. *Emission Control Technologies for IC Engines*. SAE International; 2013.
36. European Environment Agency. *Monitoring CO2 emissions from passenger cars and vans in 2020*. European Environment Agency; 2021.
37. Mazurek S. *Engine Exhaust Particulate Emissions: A Review of Measurement Techniques*. Journal of Aerosol Science. 2013;66:1-20.
38. Merkisz J, Pielecha J. *New Trends in Emission Control in the European Union*. Springer; 2017.
39. Understanding Onboard Diagnostics (OBD) and Vehicle Emissions, By Globalmrv, 2024, Dostupno na. <https://www.globalmrv.com/understanding-onboard-diagnostics-obd-and-vehicle-emissions/>

## POPIS KRATICA

CO <sub>2</sub>	Ugljični dioksid
CO	Ugljik monoksid
Nox	Dušikovi oksidi
HC	Ugljikovodici
PM	Čestice
EPA	(Environmental Protection Agency) Agencija za zaštitu okoliša
CARB	(California Air Resources Board) Kalifornijski Air Resources Board
Euro 6	Europski standardi za emisije
Tier 1, Tier 2, Tier 3	Faze standarda emisija u SAD-u
SCR	(Selective Catalytic Reduction) Selektivna katalitička redukcija
DPF	(Diesel Particulate Filter) Dizelski partikularni filter
EGR	(Exhaust Gas Recirculation) Sustav recirkulacije ispušnih plinova
NEDC	(New European Driving Cycle) Novi Europski vozački ciklus
WLTP	(Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure) Svjetski usklađeni vozački ciklus
PEMS	(Portable Emissions Measurement Systems) Prijenosni sustavi za mjerenje emisija
AI	(Artificial Intelligence) Umjetna inteligencija
ML	(Machine Learning) Strojno učenje
LEV	(Low Emission Vehicle) Niska emisija vozila
BS	(Bharat Stage) Indijski standardi za emisije
CNG	(Compressed Natural Gas) Stlačeni prirodni plin
LNG	(Liquefied Natural Gas) Utekućeni prirodni plin
EV	(Electric Vehicles) Električna vozila
HEV	(Hybrid Electric Vehicles) Hibridna vozila
Sox	Sumporovi oksidi

## **POPIS GRAFIKONA**

Tablica 5.2. Usporedba emisija između benzinskih i dizelskih motora.....23

Tablica 5.1. Projicirane emisije ispušnih plinova do 2030. godine prema različitim scenarijima smanjenja emisija.....24

## **POPIS SLIKA**

Slika 1 Proces klipa.....13

Slika 2 OBD-II skener.....30

Slika 3 PEMS (Prijenosni sustav za mjerenje emisija).....31

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

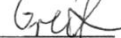
Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je \_\_\_\_\_ Završni rad  
(vrsta rada)

isključivo rezultat mojega vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju upotrijebljene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedopušten način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog/diplomskog rada pod naslovom Suvremene metode ispitivanja ispušnih plinova na motornim vozilima, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

U Zagrebu, 16.09.2024

Student/ica:

Stjepan Greif   
(ime i prezime, potpis)