

# Ispitivanje kvalitete zraka u kabini vozila/zrakoplova

---

Jurčević, Mia

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:369601>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-06-21**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Mia Jurčević**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**ISPITIVANJE KVALITETE  
ZRAKA U KABINI  
VOZILA/ZRAKOPLOVA**

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Lulić, dipl. ing. stroj.

Student:

Mia Jurčević

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Zoranu Luliću na pomoći i savjetima tijekom izrade ovog rada.

Mia Jurčević



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**  
Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomске ispite studija zrakoplovstva



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 24 – 06 / 01	
Ur.broj: 15 – 24 –	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Mia Jurčević**

JMBAG: **0035227663**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispitivanje kvalitete zraka u kabini vozila/zrakoplova**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Testing the air quality in the vehicle/aircraft cabin**

Opis zadatka:

Danas se sve više pozornosti posvećuje kvaliteti zraka, a pri tome se primarno misli na koncentraciju različitih komponenti plinova te masu i broj čestica. Dokazano je da kvaliteta zraka može imati značajan utjecaj na zdravlje ljudi, okoliš i životinje. Posebna pažnja posvećuje se česticama koje se najčešće klasificiraju prema njihovom srednjem promjeru, a dvije najčešće skupine su PM10 i PM2.5. PM 10 označava čestice srednjeg aerodinamičkog promjera manjeg od 10 mikrometara tako da se među njima mogu naći čestice različitih veličina, od nanočestica pa do čestica promjera približno 10 mikrometara. PM2.5 označava čestice čiji je srednji aerodinamički promjer manji od 2,5 mikrometra te su znatno manje od čestica PM10. Uključuju čestice u rasponu od nekoliko nanometara pa do 2.5 mikrometra, a smatra ih se posebno problematičnima zbog njihove male veličine. Budući da su izrazito male, mogu dugo lebdjeti u zraku, a postoji znatno veća vjerojatnost da tijekom udisanja prodru duboko u dišne puteve i krvotok te znatan potencijal da izazovu štetne zdravstvene učinke.

Čestice iz skupine PM (*Particulate Matter*) mjere se prema njihovoj veličini odnosno promjeru i kvantificiraju masom. S druge strane, PN (*Particle Number*) odnosi se na broj čestica u zraku, bez obzira na njihovu veličinu. PN uključuje sve čestice, bez obzira na njihov aerodinamički promjer, dakle, obuhvaća i čestice koje su znatno manje od čestica PM2.5.

U okviru završnog rada treba:

- izraditi kratki pregled utjecaja pojedinih emisija na ljudsko zdravlje;
- proučiti i izraditi pregled metoda za mjerenja (određivanje) i klasificiranje broja čestica u zraku;
- proučiti mjernu opremu za mjerenje broja čestica raspoloživu u Laboratoriju za motore i vozila i njihove procedure održavanja;
- mjernu opremu postaviti u kabinu vozila/zrakoplova i izmjeriti broj čestica za nekoliko različitih scenarija uporabe u stvarnim uvjetima uporabe odnosno vožnje;
- obraditi prikupljene rezultate i prikazati ih na odgovarajući način.

Pri izradi se treba pridržavati uobičajenih pravila za izradu završnog rada. U radu treba navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

30. 11. 2023.

1. rok: 22. i 23. 2. 2024.  
2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.  
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

1. rok: 26. 2. – 1. 3. 2024.  
2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.  
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Zoran Lulić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Milan Vrdoljak

## SADRŽAJ

Sadržaj .....	I
Popis slika .....	II
Sažetak .....	III
Summary .....	IV
1. Uvod .....	1
2. Utjecaj pojedinih emisija na ljudsko zdravlje.....	2
3. Metode mjerenja čestica .....	7
3.1. PM vage .....	8
3.2. Princip rada PN brojača čestica .....	9
3.3. Metoda kondenzacijskog brojanja čestica.....	10
3.4. Metoda difuzijskog nabijanja.....	11
4. Mjerna oprema.....	13
5. Postupak mjerenja.....	18
5.1. Razlučivost uređaja .....	18
5.2. Mjerenje broja čestica u kabini vozila .....	19
5.3. Uzorak iz sustava ventilacije.....	21
5.4. Mjerenje broja čestica iz ispuha vozila .....	22
6. Rezultati.....	24
6.1. Diskusija rezultat.....	28
7. Zaključak .....	30
Literatura .....	31

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Izvori onečišćenja zraka [5] .....	2
Slika 2.2. Utjecaj pojedinih emisija na ljudsko zdravlje [7] .....	3
Slika 2.3 Ovisnost broja čestica o promjeru [13] .....	5
Slika 2.4. Usporedba veličine čestica [14] .....	5
Slika 2.5. Raspodjela uobičajenih koncentracija PM čestica u svijetu za 2018. godinu [16] ....	6
Slika 3.1. Podjela uređaja za mjerenje čestica prema karakterističnoj vrijednosti [17] .....	7
Slika 3.2. Princip rada vage za mjerenje mase čestica [18] .....	8
Slika 3.3. Princip rada PN brojača čestica [19] .....	10
Slika 3.4. Princip rada kondenzacijskog brojača čestica [21] .....	11
Slika 3.5. Princip rada difuzijskog uređaja za brojanje čestica [23] .....	12
Slika 4.1. Natapanje umetka izopropilenom .....	13
Slika 4.2. Ispitni postav za mjerenje čestica TSI NPET uređajem .....	14
Slika 4.3. Filter za vodu .....	15
Slika 4.4. Grijane cijevi povezane s uređajem za razrjeđivanje .....	16
Slika 4.5. Ispitni postav za mjerenje čestica uređajem AVL M.O.V.E - PN PEMS .....	17
Slika 5.1. Ispitivanje razlučivosti uređaja kad je sonda na sredini vozila .....	18
Slika 5.2. Uređaji za mjerenje montirani u vozilo .....	20
Slika 5.3. Mjerenje kad je sonda postavljena na otvor ventilacije .....	21
Slika 5.4. Senzor mjernog uređaja u ispušnoj cijevi .....	22
Slika 5.5. Senzor mjernog uređaja udaljen od ispušne cijevi za trideset centimetara .....	23
Slika.6.1. Razlučivost uređaja .....	25
Slika 6.2. Utjecaj ventilacije na broj krutih čestica .....	26
Slika 6.3. Koncentracija čestica u kabini u vožnji, crvene točke rezultati mjerenja TSI NPET uređajem, zelene točke rezultati mjerenje uređajem PEMS .....	27
Slika 6.4. Rezultati mjerenja koncentracije čestica u ispuhu mjerenjem PEMS uređajem, crvena točka dizel (EURO 6), zelena točka benzin (EURO 6), plava točka benzin (EURO 5) .....	28
Slika 6.5. Usporedba broja čestica u okolišu i u kabini s ispušnim česticama Ottovog motora (Euro 6) .....	29

## **SAŽETAK**

Lebdeće čestice PM<sub>2,5</sub> i PM<sub>10</sub> zbog malog promjera ulaze duboko u dišne puteve i krvotok te mogu imati negativan utjecaj na ljudsko zdravlje. Najveći izvori emisije lebdećih čestica su potrošnja energije u domaćinstvima, industrijska postrojenja i cestovni promet. Cilj ovog rada je odrediti broj krutih čestica u kabini vozila za vrijeme vožnje te kad je vozilo udaljeno od prometne ceste i ispušnih čestica drugih vozila. Mjerenja su provedena za karakteristične vožnje: na autoputu, gradska vožnja u gužvi, brza i spora gradska vožnja. Za usporedbu rezultata izmjeren je broj čestica iz ispuha za tri različita vozila. TSI NPET i AVL M.O.V.E PN PEMS su mjerni uređaji koji su se koristili tijekom ovih mjerenja.

Ključne riječi: lebdeće čestice, vozilo, emisija krutih čestica, TSI NPET, AVL M.O.V.E PN PEMS.



## **SUMMARY**

Due to their small diameter, PM<sub>2,5</sub> and PM<sub>10</sub> (Particulate Matter) enter deep into the respiratory tract and bloodstream and can have a negative impact on human health. The biggest sources of emissions of Particulate Matter are energy consumption in households, industrial plants and road traffic. The aim of this work is to determine the number of solid particles in the vehicle cabin while driving and when the vehicle is away from the busy road and exhaust particles from other vehicles. Measurements were carried out for typical driving conditions: on the highway, city driving in crowded conditions, fast and slow city driving. To compare the results, the number of particles from the exhaust was measured for three different vehicles. TSI NPET and AVL M.O.V.E PN PEMS are the measuring devices that were used during these measurements.

Keywords: Particulate Matter, vehicle, solid particles emission, TSI NPET, AVL M.O.V.E PN PEMS

## 1. UVOD

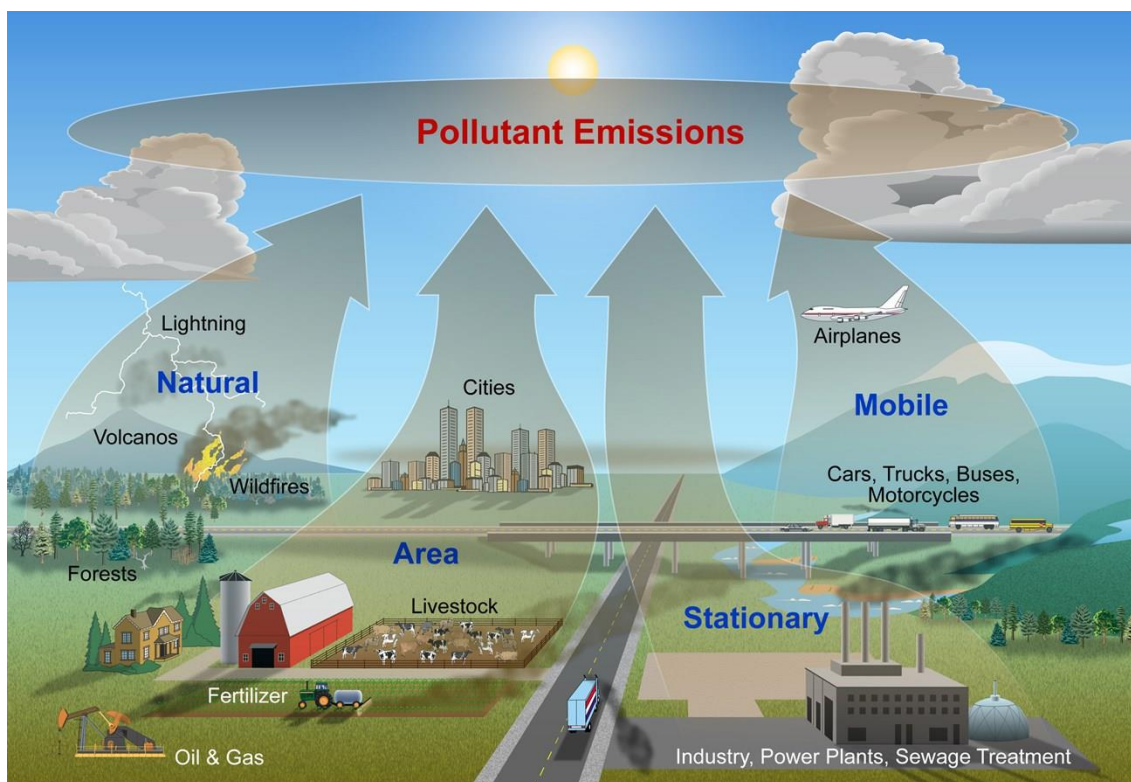
Kvaliteta zraka je svojstvo zraka kojim se iskazuje značajnost u njemu postojećih razina stranih čestica, odnosno govori koliko je zrak onečišćen. Onečišćenje zraka je onečišćenje vanjskog ili unutarnjeg okoliša uzrokovano nekim kemijskim, fizičkim ili biološkim sredstvom koje mijenja prirodne karakteristike atmosfere. Onečišćenja zraka u kućanstvu nastaju korištenjem otvorene vatre ili štednjaka za kuhanje pogonjenih na ukapljeni naftni plin, prirodni zemni plin, biomasu ili ugljen. Vanjsko onečišćenje zraka nastaje iz energetske potrošnje u kućanstvima, motornih vozila, proizvodnjom energije, spaljivanjem otpada, industrijskim i proizvodnim postrojenjima. Prema podacima Svjetske zdravstvene organizacije gotovo cijelo stanovništvo (99 %) udiše zrak koji sadrži visok udio onečišćenja i prelazi granične vrijednosti koje propisuje Svjetska zdravstvena organizacija.

Izloženost onečišćenom zraku predstavlja velik zdravstveni rizik i glavni je uzrok preranih smrti i raznih bolesti. Procjenjuje se da je s onečišćenjem zraka godišnje povezano 7 milijuna preranih smrti u cijelom svijetu [1]. Prema podacima iz 2021. godine u Europi s onečišćenjem zraka povezano je 389,000 preuranjenih smrti, od toga 293,000 je uzrokovano lebdećim česticama, u Hrvatskoj je procijenjeno 4,510 preuranjenih smrti, od toga 3,800 je uzrokovano lebdećim česticama [2]. Prema podacima Europske agencije za zaštitu okoliša lebdeće čestice su najviše utjecale na zdravlje stanovnika jugoistočne Europe, a najmanji utjecaj su imale na stanovnike sjeverozapadne Europe.

Djeca i adolescenti su posebno osjetljiva skupina jer se njihovo tijelo, organi i imunološki sustav još razvijaju. Lebdeće čestice zbog malog promjera mogu ući duboko u dišne sustave i krvotok, što može uzrokovati ozbiljne zdravstvene posljedice na organizam. Reguliranjem kvalitete zraka podižemo kvalitetu života. Svjetska zdravstvena organizacija prati i izvještava o globalnim trendovima i promjenama zdravstvenog stanja povezanim s akcijama koje doprinose smanjenju onečišćenja zraka na nacionalnoj, regionalnoj i globalnoj razini.

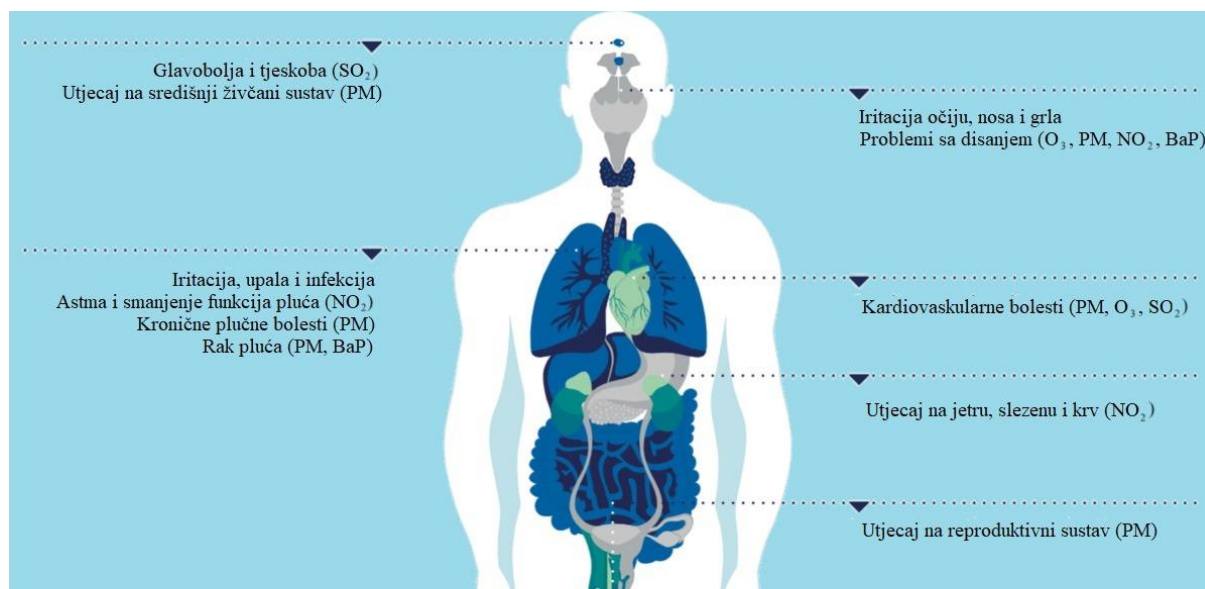
## 2. UTJECAJ POJEDINIH EMISIJA NA LJUDSKO ZDRAVLJE

Onečišćenje zraka se definira kao materijal u zraku koji može utjecati na ljudsko zdravlje ili okoliš. Predstavlja značajan problem u svijetu, jer ima ozbiljan toksikološki utjecaj na ljudsko zdravlje. Glavni tipovi izvora emisije su transport, prirodni izvori, industrijska postrojenja i poljoprivreda (Slika 2.1.). Onečišćenje zraka može se smanjiti zamjenom goriva fosilnog porijekla s obnovljivim izvorima energije, smanjenjem potrošnje energije, uporabom električnih vozila, javnog prijevoza i zelenom gradnjom [3]. Najveći izvori emisije finih lebdećih čestica su: proizvodnja energije 58 %, industrijska postrojenja 14 % te cestovni promet 9 % [4].



Slika 2.1. Izvori onečišćenja zraka [5]

Prema Svjetskoj zdravstvenoj organizaciji (World Health Organisation WHO) šest glavnih onečišćivača zraka su: fine lebdeće čestice, ozon, ugljikov monoksid, sumporovi oksidi, dušikovi oksidi i olovo. Dugotrajna i kratkotrajna izlaganja onečišćenom zraku imaju različit toksikološki utjecaj na ljudsko zdravlje uključujući respiratorne i kardiovaskularne bolesti, neuropsihijatrijske komplikacije, iritaciju očiju, kožne bolesti i dugotrajne kronične bolesti (Slika 2.2.). Izloženost onečišćenom zraku pogoršava stanje bolesti poput astme, raka pluća, Alzheimerove i Parkinsonove bolesti i autizma [6].



Slika 2.2. Utjecaj pojedinih emisija na ljudsko zdravlje [7]

**Ugljikov monoksid** je štetan plin, bez okusa, boje i mirisa, koji može nastati ljudskim utjecajem poput nepotpunog izgaranja fosilnih goriva ili prirodnim procesima iz vulkana. Afinitet ugljikovog monoksida je znatno veći od afiniteta kisika prema hemoglobinu, zbog toga dolazi do smanjenja koncentracije kisika u krvi, što može uzrokovati kardiovaskularne bolesti, hipoksiju i smanjenu opskrbu organa kisikom. Kod dugotrajne izloženosti visokim koncentracijama ugljikovog monoksida može doći do ozbiljnog trovanja, pa čak i smrti. Simptomi trovanja ugljikovim monoksidom su: glavobolja, vrtoglavica, slabost, mučnina, povraćanje i gubitak svijesti [8].

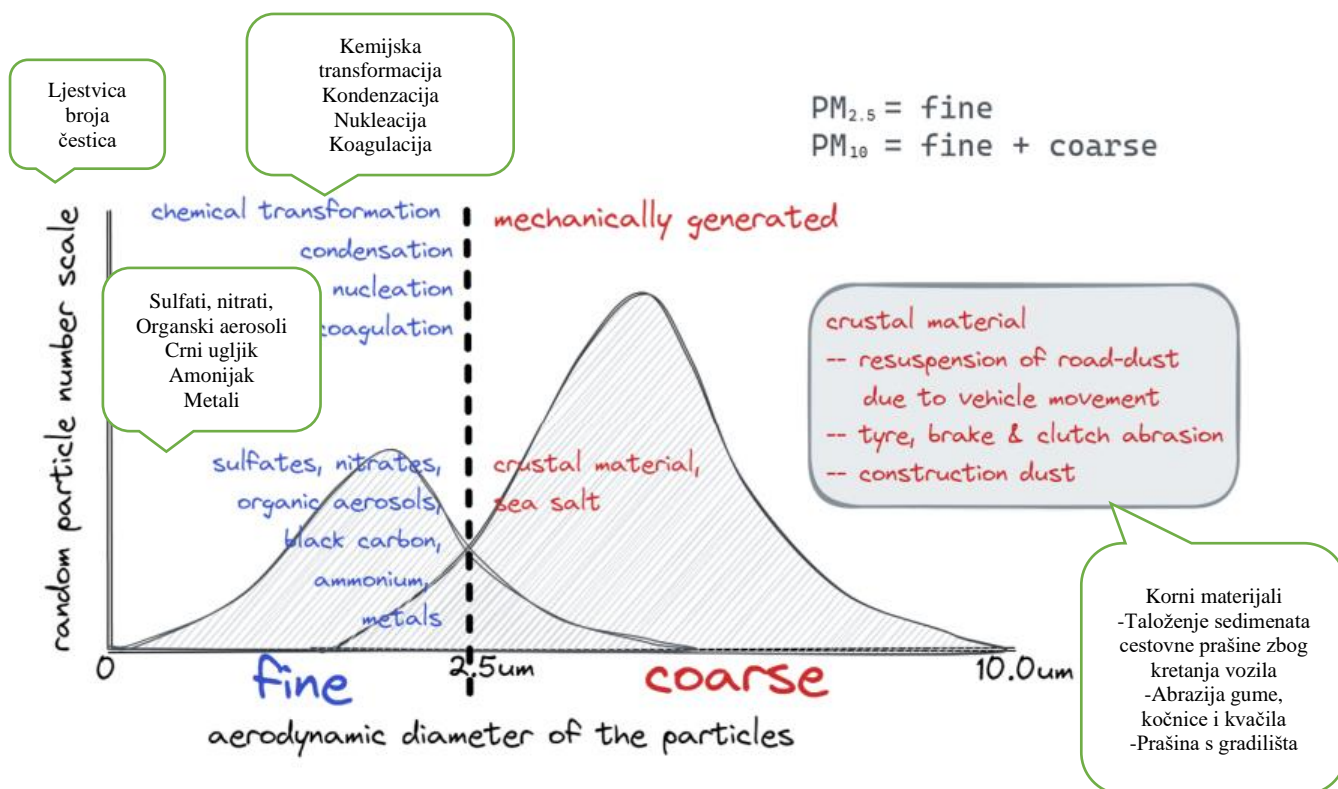
**Dušikov dioksid** je oštar i kiseli plin crvenkastosmeđe boje, jako oksidirajući i korozivan. Nastaje kada dušikov oksid i drugi dušikovi oksidi reagiraju s kemijskim spojevima u zraku. Prirodni izvori dušikovog dioksida su vulkani, glavni izvor nastanka je izgaranje goriva fosilnog porijekla, može nastati i proizvodnjom dušične kiseline, zavarivanjem, upotrebom eksploziva i pri proizvodnji hrane. Prodire duboko u pluća i uzrokuje iritaciju dišnih puteva, respiratorne bolesti, plućni edem kad se udiše u visokim koncentracijama, pogoršava stanje astme, uzrokuje iritaciju očiju te grla i nosa [9].

**Lebdeće čestice** su mješavina čvrstih čestica i aerosola sastavljenih od malih kapljica suhih čvrstih fragmenata i čvrstih jezgri sa tekućim premazima. Čestice nalazimo u različitim veličinama, oblicima i kemijskim sastavima (Slika 2.3.). Mogu sadržavati anorganske ione, metalne spojeve, elemente ugljika, organske spojeve i spojeve iz zemljine kore. Masa čestice

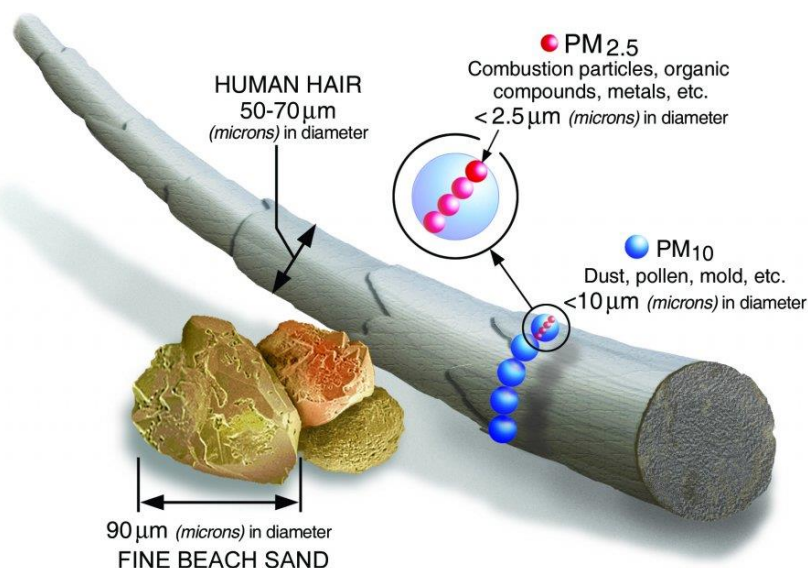
(PM) i broj čestice (PN) razlikuju se po metodama i instrumentima s kojima se mjeri njihova koncentracija. Mjerna jedinica za PM je  $\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ , a mjerna jedinica za PN je  $\frac{\text{broj čestica}}{\text{cm}^3}$ . PM čestice se klasificiraju prema njihovom promjeru i kvantificiraju masom. PN čestice se odnose na sve čestice u zraku. PM čestice se klasificiraju prema njihovom srednjem promjeru, a prema promjeru razlikujemo PM10 čestice promjera deset mikrometara ili manje i PM2,5 čestice promjera dva i pol mikrometra ili manje (Slika 2.4.). Izgaranjem ulja, benzina i dizelskog goriva nastaju čestice PM2,5 i veći dio PM10. PM10 uključuju prašinu s odlagališta, gradilišta i poljoprivrede, požare i vjetrom nosivu prašinu s otvorenih površina [10].

Za zadovoljavanje propisa o dozvoljenim emisijama iz vozila pogonjenih motorima s unutarnjim izgaranjem koriste se posebni filteri na kojima se čestice talože tijekom ispitnog ciklusa, a kasnije se određuje masa nataloženih čestica. Osim cestovnog i zračni promet doprinosi onečišćenju zraka, radnici na aerodromima i stanovnici u blizini aerodroma izloženi su većim količinama lebdećih čestica. Razina emisije mlaznog motora ovisi o stanju motora, tipu goriva i načinu rada letjelice. Tijekom polijetanja i rulanja po pisti izmjerene su najveće koncentracije finih lebdećih čestica na aerodromu. Prema istraživanjima miješanje goriva s biogorivom u omjeru 50:50 smanjuje emisija čestica od 50 % do 70 %. U odnosu na konvencionalna goriva za mlazne motore [11].

Izloženost lebdećim česticama povezana je s brojnim zdravstvenim problemima. Kratkotrajna izloženost česticama može prouzročiti upalu pluća i respiratorne bolesti jer zbog malog promjera može prodrijeti duboko u pluća. Zabilježen je porast prijema u bolnice, traženja liječničke pomoći i povećanje smrtnosti uzrokovanih finim lebdećim česticama. Dugotrajna izloženost uzrokuje bolesti u donjem dijelu dišnog sustava, smanjuje rad pluća, izaziva kronične bolesti i smanjenje životnog vijeka [12].



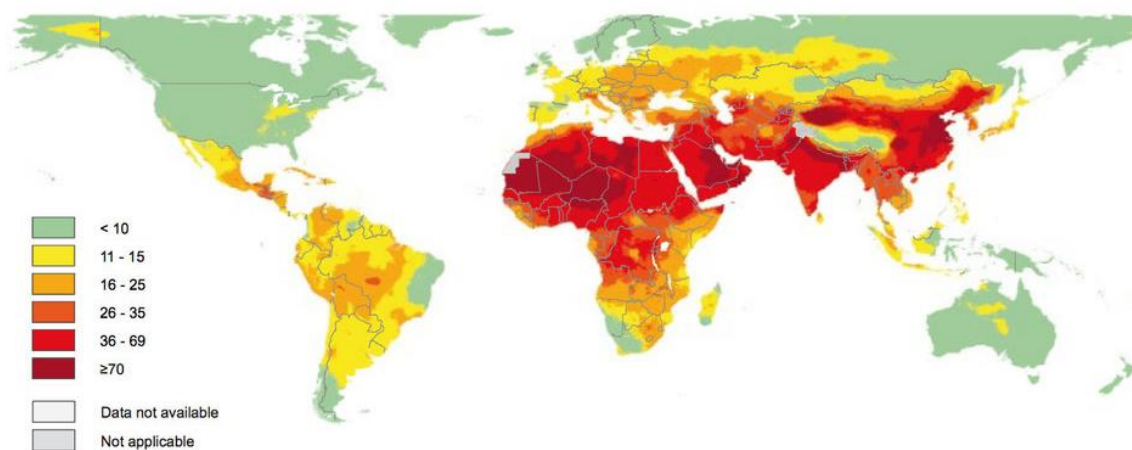
Slika 2.3 Ovisnost broja čestica o promjeru [13]



Slika 2.4. Usporedba veličine čestica [14]

Cilj Svjetske zdravstvene organizacije i Europske unije je smanjiti onečišćenje zraka. Europska komisija pod nazivom „Zero pollution action plan“ ima cilj smanjiti broj finih lebdećih čestica ( $PM_{2.5}$ ) za 55 % do 2030. godine. Prema Svjetskoj zdravstvenoj organizaciji preporučena

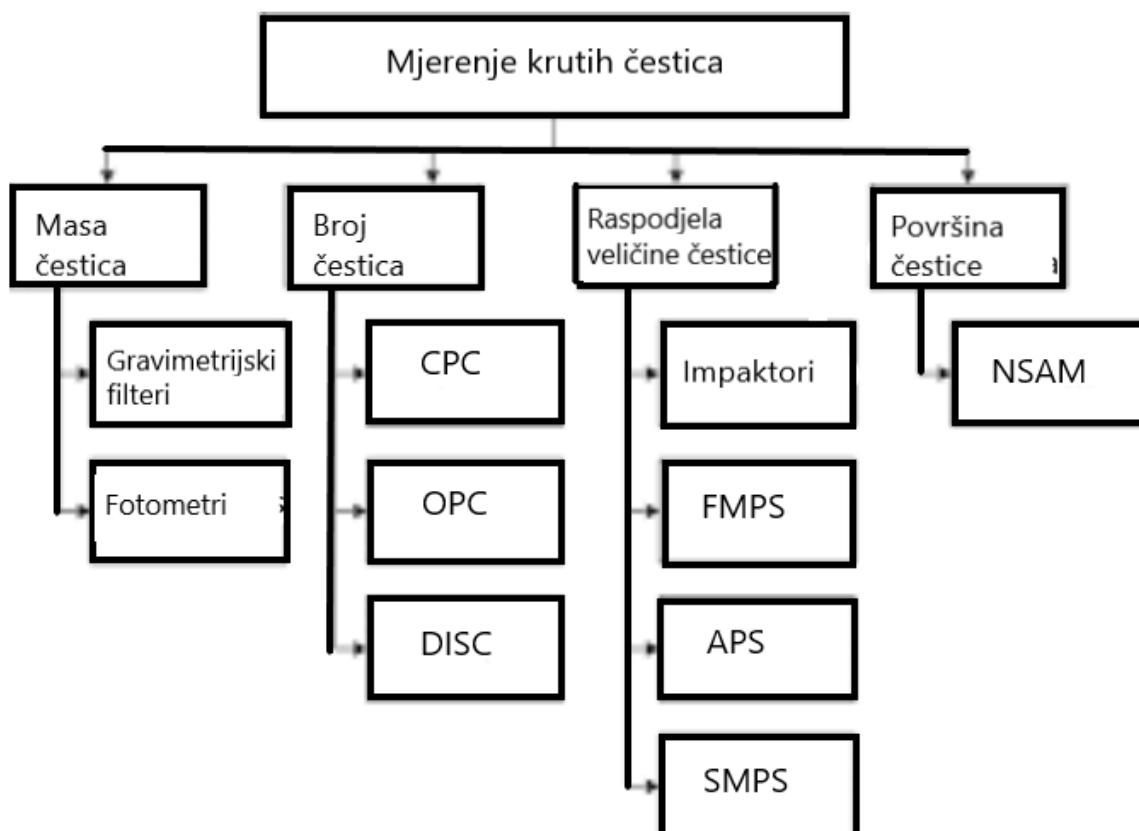
dnevna izloženost čestica PM<sub>2,5</sub> iznosi  $15 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ , a godišnja izloženost iznosi  $5 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ . Za čestice PM<sub>10</sub> dnevna dozvoljena količina iznosi  $45 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ , a godišnja  $15 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ . [15] Prema slici 2.5. je vidljivo da su područja s najmanjom koncentracijom krutih čestica u zraku: Sjeverna Amerika, Australija, Sjeverna Europa i Sjeverna Azija, dok su područja s najvišom koncentracijom krutih čestica u zraku: Afrika, Jug Azije, Indija i Saudijska Arabija.



Slika 2.5. Raspodjela uobičajenih koncentracija PM čestica u svijetu za 2018. godinu [16]

### 3. METODE MJERENJA ČESTICA

Mjerenje čestica se provodi u svrhu istraživanja kvalitete zraka u zatvorenom i otvorenom prostoru, primjene nadziranja zraka i osnovnih istraživanja aerosola. Mjerenje čestica može se podijeliti u četiri skupine: mjerenje mase, broja, raspodjele veličine i površine čestica (Slika 3.1.). Mjerenje mase primjenjuje se pri procjeni utjecaja PM čestica na ljudsko zdravlje, mjerna jedinica je  $\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ . Osnovne metode su gravimetrijska i fotometrom. Ove metode većinom se koriste za mjerenje PM10 i PM2,5 čestica, ali postoje i senzori kojima se može mjeriti masu česticama koje imaju promjer 1 mikrometar ili manji. Brojanje čestica se koristi za određivanje PN čestica u okolišu, mjerenje i karakterizaciju emisija iz vozila, a mjerna jedinica je  $\frac{\text{broj}}{\text{cm}^3}$ . Uređaji kojima se mjeri broj čestica su optički brojač čestica, brojač čestica s kondenzacijom i razvrstavač veličine difuzije. Koriste se za brojanje finih lebdećih čestica promjera 0,5 mikrometara ili manje.

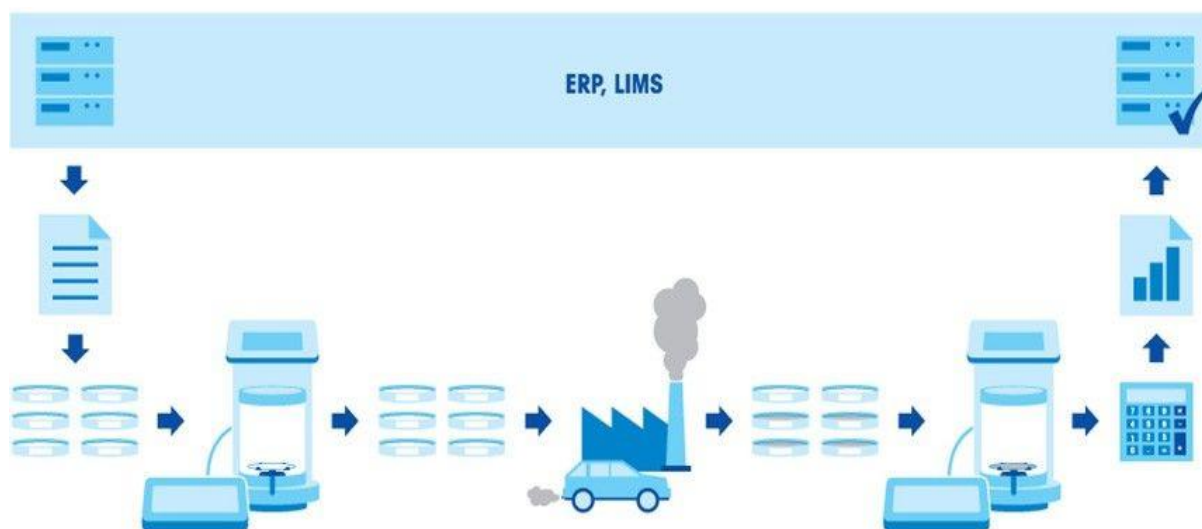


Slika 3.1. Podjela uređaja za mjerenje čestica prema karakterističnoj vrijednosti [17]



### 3.1. PM vage

Gravimetrijska metoda je najrasprostranjenija metoda za određivanje mase čestica, PM u zatvorenom prostoru. Vaganje filtera obavlja se u čistoj sobi, kako ne bi došlo do kontaminacije filtera iz okolnog zraka. Alternativno se može koristiti komora s rukavcima. Filteri se moraju vrlo precizno izvagati prije i nakon nastrujavanja česticama, jer PM čestice imaju vrlo malu masu. Preporučena je upotreba vage s razlučivosti od 1 mikrogram do 0,1 mikrograma. Procedura mjerenja čestica u ispušnim plinovima, nastrujavanjem emisija te atmosferskog i okolnog zraka je uvijek ista. Prvo se u laboratoriju treba izvagati prazan filter, zatim se stavljaju označene patrone filtera, pripremaju i prevoze do mjesta testiranja. Na mjestu testiranja zrak ili plinovi se uvlače kroz filter pri poznatoj brzini protoka tijekom određenog vremena. Sve čestice ostaju na filteru te se u laboratoriju filteri ponovno važu. Masa čestica se određuje oduzimanjem mase praznog filtera od mase filtera nakon taloženja. Koncentracija čestica se računa preko protoka uzorka plina ili zraka. Testiranje se može provesti koristeći samo jedan filter, ali uglavnom se testiranje ponavlja za dobivanje točnijih rezultata. Testiranje može trajati duže vremena, za ispitivanja emisija ispušnih plinova na autu potrebno je do dva dana ili više dana (Slika 3.2).



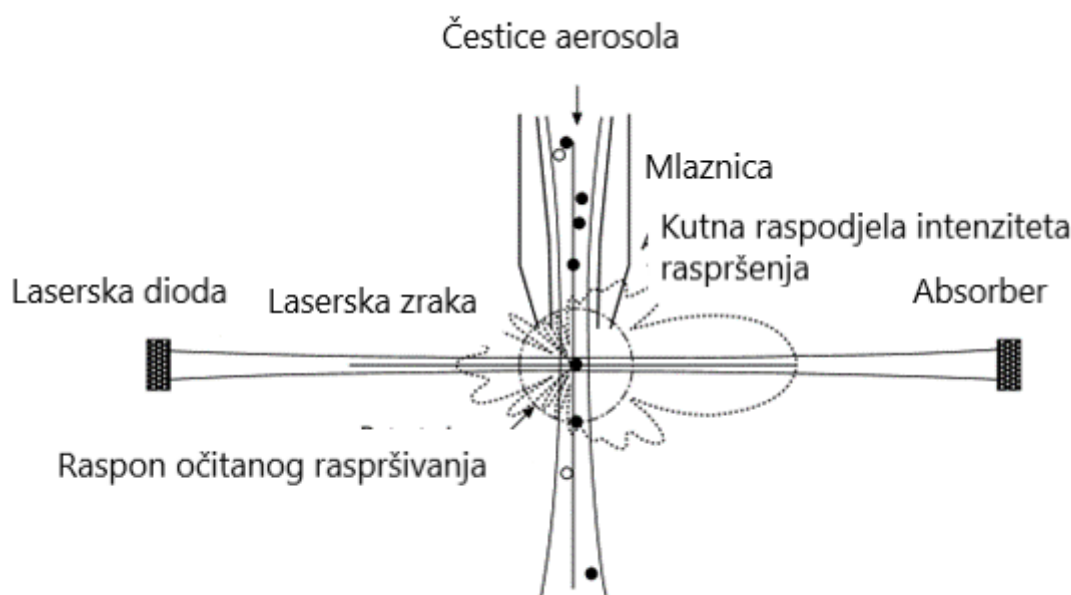
Slika 3.2. Princip rada vage za mjerenje mase čestica [18]

Fotometri se primjenjuju za proučavanje industrijskih radnih mjesta i praćenje emisije. Temelje se na principu raspršivanja svjetlosti za precizno određivanje koncentracije mase čestica. Intenzitet i uzorak raspršivanja svjetlosti ovise o omjeru veličine čestice i valnoj duljini upada svjetlosti. Promjer čestice koju fotometri mogu izmjeriti je u rasponu od 0,1 do 10 mikrometra. Ne mogu se mjeriti čestice promjera manjeg od 0,1 mikrometar jer su premale da bi raspršile

prepoznatljivu količinu svjetlosti. Pumpa uvlači uzorak u instrument, uzorak određene veličine prolazi kroz usmjerenu mlaznicu i ulazi u komoru detektora svjetlosti. Kad svjetlo koje emitira laserska dioda dotakne uzorak, raspršuje se u svim smjerovima. Svjetlosni detektor pretvara svjetlo u napon koji je kalibriran prema poznatoj koncentraciji mase aerosola ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ). U instrumentima dio uzorka može biti izvučen iz glavne struje zraka, filtriran i ponovno uveden kao omotač zraka koji okružuje uzorak čestice i štiti optiku od prljavštine. Nova kategorija fotometara je kombinacija karakteristika fotometara i optičkog brojača čestica koja pruža točnije rezultate praćenja čestica od uobičajenog fotometra, ali je skuplji.

### **3.2. Princip rada PN brojača čestica**

Brojač čestica koristi se za nadziranje čistoće sobe, testiranje filtera, nadziranje vanjskog okoliša i proučavanje kvalitete zraka u zatvorenom prostoru. Mjere broj i veličinu čestica raspršujući svjetlost na uzorak čestice. Pojedina čestica prolazi kroz usmjereni laserski snop i proizvodi bljesak čiji intenzitet svjetlosti ovisi o promjeru, obliku i indeksu loma čestice te valnoj duljini i geometriji optičkog detektora. Količina svjetlosti koju čestica rasprši mjeri se svjetlosnim detektorom koji očitava broj čestica za kalibrirani raspon veličina. Pojedini instrumenti su ograničeni maksimalnom koncentracijom, koliko svjetlosnih impulsa mogu prebrojati prije podudaranja. Povećanjem protoka smanjuje se maksimalna koncentracija. Minimalni promjer čestica koje se mjere ovim uređajem je 0,3 mikrometra, jer raspršivanje svjetlosti ovisi o promjeru, pa je otkrivanje manjih čestica teže. Za mjerenje manjih promjera potrebno je znatno povećati intenzitet svjetlosti. U optičkim brojačima koji mogu mjeriti čestice promjera 0,1 mikrometar i manje, čestice prolaze kroz šupljinu lasera gdje je intenzitet svjetlosti većeg reda veličine od izlazne snage lasera. Na slici 3.3. grafički je prikazan opisani način rada PN brojača čestica.



Slika 3.3. Princip rada PN brojača čestica [19]

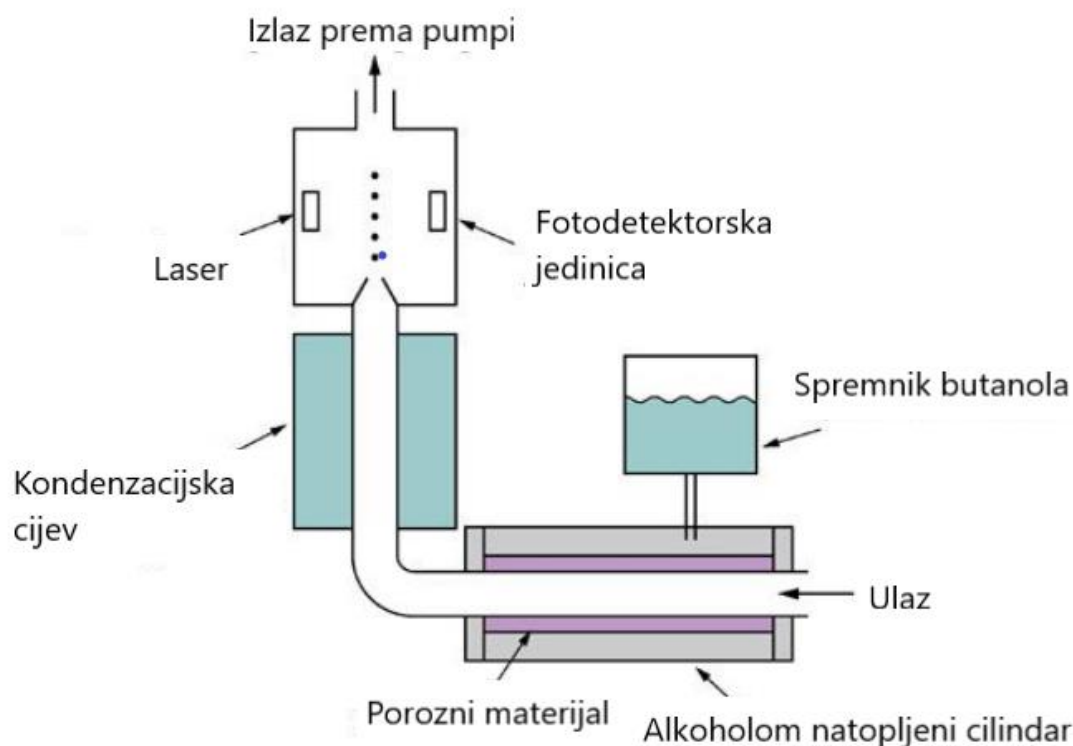
### 3.3. Metoda kondenzacijskog brojanja čestica

Brojač čestica koji rade po principu kondenzacije (CPC) povećava čestice na veličinu koju može detektirati. Broji čestice koje su nevidljive za fotometre i optičke brojače čestica. Raspon veličina čestica koje uređaj može detektirati se kreće od 0,02 do preko 1 mikrometar. Metoda kondenzacijskog brojanja čestica sastoji se od tri faze (Slika 3.4.):

1. U prvoj fazi kruta čestica se zasićuje alkoholnim parama, čestica se uvlači u instrument i prolazi kroz alkoholom natopljeni cilindar.
2. U drugoj fazi dolazi do kondenzacije, uzorak prolazi kroz kondenzacijsku cijev gdje alkoholna para kondenzira na česticama i pretvara ih u veće kapljice.
3. Treća faza je optička faza u kojoj čestice prolaze kroz žarišnu točku laserskog snopa i stvaraju bljesak, koji se broji kao jedna čestica.

Razvijena je nova kategorija Condensation Particle Counter uređaja koji umjesto alkohola koriste vodu. Ulazni uzorak prolazi kroz rashladni uređaj, gdje umetak zasićen s vodom okružuje struju čestica i održava visoku razinu vlažnosti. U dijelu cijevi gdje čestice rastu zagrijani umetak uzrokuje brzu difuziju vodene pare u struji čestica, što uzrokuje prezasićenost. Male molekule vode kondenziraju na ohlađenim česticama i oblikuju veće kapljice. Razvijene

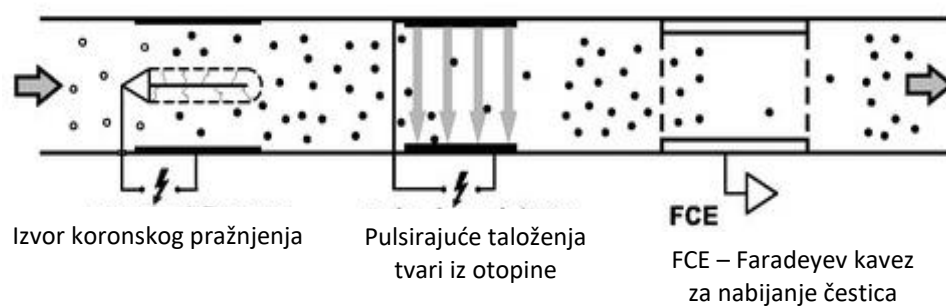
su varijante oba tipa CPC uređaja koji mogu detektirati vrlo male čestice promjera od 0,0025 mikrometra [20].



Slika 3.4. Princip rada kondenzacijskog brojača čestica [21]

### 3.4. Metoda difuzijskog nabijanja

Difuzijsko nabijanje (Unipolar Diffusion Charging) nastaje sudaranjem iona s česticama, može se reći da se ion zalijepi na česticu koja preuzima njegov naboj. Pomoću koronskog pražnjenja ostvaruje se dovoljna koncentracija unipolarnih iona. Koronsko pražnjenje nastaje kad postoji nejednoliko električno polje, a njega se može ostvariti odgovarajućom geometrijom vodiča odnosno cijevi. Karakteristično je da u tom slučaju u zraku dolazi do raspada pojedinih molekula i oslobađanja iona te zrak postaje vodljiv. Elektroni na tankom sloju na površini žice imaju velike brzine i imaju dovoljno energije za izbijanje elektrona iz molekule zraka prilikom sudara. Elektroni će se kretati prema žici jer je ona pozitivno nabijena u odnosu na cijev prema kojoj teku ioni. U prostor između cijevi i žice dovode se čestice aerosola, koje će biti nabijene zbog difuzijskog nabijanja. Difuzijsko punjenje slijedi impulsni elektrostatički filtar koji stvara nabojnu modulaciju u aerosolu, koja se detektira u Faradayevom kavezu koji je povezan s elektrometrom, pomoću kojeg mjerimo broj čestica (Slika 3.5) [22].



Slika 3.5. Princip rada difuzijskog uređaja za brojanje čestica [23]

#### 4. MJERNA OPREMA

Korištena je oprema koja se nalazi u Laboratoriju za motore i vozila, a prvi od uređaja koji je korišten je TSI Nano particle Emission Tester 3795 koji mjeri broj čvrstih čestica u ispušnim plinovima iz ispušne cijevi motora odnosno vozila. Cijev za razrjeđivanje i cijev za aerosol se spajaju s uređajem i zategnu se odgovarajućim ključem. Prije korištenja uređaja, potrebno je natopiti poseban umetak uređaja s izopropilnim alkoholom čistoće veće od 99,5 %. Prvo se ukloni čep s kapsule i ulije se izopropilni alkohol u kapsulu do označene linije. Umetak koji se izvadi iz uređaja stavi se u kapsulu i pričeka se minimalno dvije minute. Zbog upijanja izopropilena u šupljine umetka, razina izopropilena u kapsuli bi se trebala početi smanjivati (Slika 4.1.). Zatim se ukloni umetak iz kapsule i protrese dok višak alkohola ne iscuri natrag u kapsulu, te se umetak stavi natrag u uređaj.



*Slika 4.1. Natapanje umetka izopropilenom*

NPET se spaja na računalo preko mrežnog kabla. Kad se NPET uključi treba pričekati jednu do dvije minute dok uređaj prepozna i uspostavi komunikaciju s računalom te pričekati deset minuta da uređaj postigne radnu temperaturu (Slika 4.2.). Mjerenje se provodi prema Švicarskom propisu Swiss Regulation 941.242 ili „slobodno“ (opće) koje omogućava prilagodbu mjerenja prema potrebama istraživanja. Službeno mjerenje traje četrdeset sekundi. Prvo petnaest sekundi traje zagrijavanje i prikupljanje podataka. Zatim pet sekundi tijekom kojih se izračunava i prikazuje prva srednja vrijednost, pet sekundi tijekom kojih se prikupljaju podatci, pet sekundi u kojima se izračunava i prikazuje druga srednja vrijednost, pet sekundi

prikupljanja podataka i pet sekundi u kojima se izračunava i prikazuje treća srednja vrijednost. Prilikom službenog mjerenja treba unijeti proizvođača, model i identifikacijski broj stroja, identifikacijski broj motora i ime osobe koja vodi mjerenje u za to predviđena polja na računalo. Kad je mjerenje gotovo softver prikazuje rezultate i izvješće se formira u PDF datoteci. Rezultati mogu biti prolazni kad je sveukupna srednja vrijednost manja od  $250000 \text{ cm}^{-3}$ , mogu biti nezadovoljavajući kad je ukupna srednja vrijednost veća od  $250000 \text{ cm}^{-3}$  te nevažeći ukoliko se dogodi pogreška prilikom mjerenja. Prilikom općeg mjerenja treba unijeti vrijeme mjerenja, prema zadanim postavkama mjerenje traje jedan sat, a maksimalno mjerenje se može postaviti na osam sati. Mjerenje se pokrene i graf prikazuje čestice/ $\text{cm}^3$  u proteklom vremenu, podatci se bilježe frekvencijom od 1 Hz. Kad je mjerenje dovršeno podatci se mogu preuzeti na računalo i iduće mjerenje može započeti.

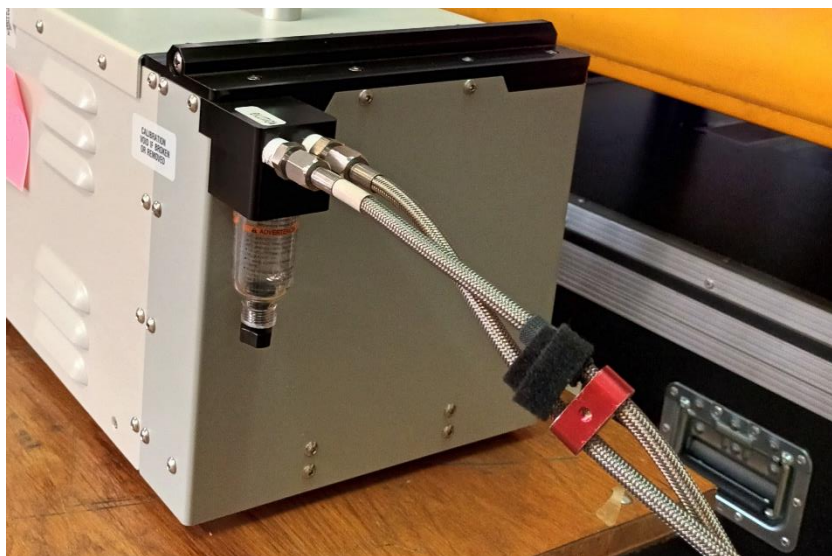


Slika 4.2. Ispitni postav za mjerenje čestica TSI NPET uređajem

Uređaj se mora održavati da bi bio funkcionalan, održavanje obuhvaća:

- Umetak se mijenja svaka tri dana kroz testiranje. Izvadi se iz uređaja, metalna patrona i čep se odvoje i ukloni se umetak. Prije ponovne upotrebe umetak se mora zamijeniti. Nakon vraćanja umetka čep se promjeni te se metalna patrona vraća nazad u uređaj.
- Filter za vodu se prazni kad god se uoči da se voda krene nakupljati. Prije samog procesa uređaj se mora isključiti. Ispod filtera se stavi ručnik da upije vodu, čep se okreće suprotno smjeru kazaljke na satu i podiže, a voda se ispušta. Kad sva voda iscure čep se zavrne (Slika 4.3.).

- Čišćenje ciklona se obavlja kvartalno ili kad se uoči nakupljanje prljavštine. Ukoliko je voda prisutna u ciklonu uređaj se mora isključiti. Čep se okrene suprotno od smjera kazaljke na satu i otpusti te kad sva voda iscure čep se zatvori. Odvije se bocu s ciklona i unutrašnjost glave očisti pamukom, a glavu ciklona treba ispuhati komprimiranim zrakom kako bi se očistila od prljavštine. Na kraju se provjeri O-prsten kojeg treba zamijeniti ako je oštećen te se boca vrati na mjesto u instrumentu.
- Sonda se čisti jednom tjedno. Prilikom čišćenja uređaj treba biti ugašen. Ključem se otpusti matica na vrhu sonde i odvrne vrh sonde. Pomoću pamučne krpice mogu se očistiti unutrašnje površine vrha i drške sonde. Ako je O-prsten oštećen ili prljav treba ga zamijeniti novim. Vrh sonde i drška se zavrne i stegne se matica koja drži vrh sonde.
- Filter i sušilo patrone se mijenjaju svaka tri mjeseca ili kad se primijeti kondenzat u boci za nakupljanje vode. Odvrne se gornja crna ploča i podigne. Treba provjeriti u kakvom su stanju patrone i o-prstenovi na ploči. Zatim se izvade dva HEPA filtera i sušilo patrone te se zamijene. Crna ploča se vrati nazad na uređaj i zategnu se svi vijci.



Slika 4.3. Filter za vodu

AVL M.O.V.E. PN PEMS je uređaj za mjerenje emisije ispušnih plinova iz vozila u stvarnim uvjetima vožnje. Utemeljen je metodom nabijanja čestica i kondenzacijskim brojačem čestica. Uređaj se može montirati na kuku izvan vozila ili unutar vozila. Ukoliko je montiran unutar vozila potrebno ga je osigurati remenjem i pojasevima kako bi uređaj ostao stabilan u slučaju prometne nezgode. Sustav se sastoji od nosivog okvira za brzo i lako montiranje mjernog uređaja te uređaja za razrjeđivanje na nosač, pomoću kojeg se cijeli uređaj montira na kuku



vozila. Mjerni uređaj i uređaj za razrjeđivanje uvijek moraju biti zajedno kalibrirani. Uređaj mora biti spojen na izvor energije da bi se mogao pokrenuti, AVL battery box iS 496 je povezan s uređajem i omogućava napajanje uređaja za vrijeme mjerenja. Baterije se napune tijekom noći i iskopčaju s uređaja tijekom zagrijavanja, kako se ne bi trošila energija iz baterija za zagrijavanje. Nakon što je uređaj zagrijan i spreman za mjerenje na njega se spoje baterije i mjerenje može početi, potpuno napunjena baterija za vrijeme testne vožnje bi trebala izdržati između 90 i 120 minuta. Kroz sonde ulaze krute čestice i ispušni plinovi, koji se kroz cijev dovode do uređaja za razrjeđivanje. Na uređaj za razrjeđivanje spojene su dvije grijane cijevi, jedna za plinove i druga za krute čestice, kroz koje se dovodi uzorak do mjernog uređaja (Slika 4.4). Temperatura ispušnog plina koji se mjeri ne smije biti veća od 200 °C, jer može doći do oštećenja grijane cijevi te ju je onda potrebno zamijeniti.



*Slika 4.4. Grijane cijevi povezane s uređajem za razrjeđivanje*

Uređaj uspostavlja vezu s računalom preko mrežnog kabla i mora se zagrijati prije početka mjerenja.(Slika 4.5)

Radna stanja uređaja:

1. Pause – uređaj se zagrijava na radnu temperaturu i priprema za mjerenje.
2. Standby - uređaj je spreman za mjerenje.
3. Measurement – senzor broji čestice.
4. Sleep – uređaj ne broji čestice, ali održava radnu temperaturu.



Slika 4.5. Ispitni postav za mjerenje čestica uređajem AVL M.O.V.E - PN PEMS

## 5. POSTUPAK MJERENJA

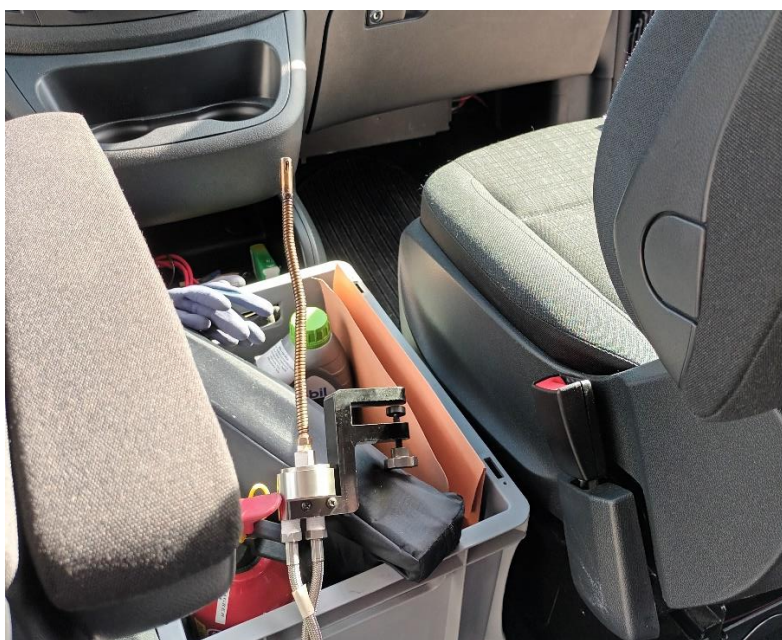
Cilj mjerenja je određivanje broja krutih čestica u kabini vozila za nekoliko karakterističnih slučajeva. Mjerenja su provedena u kabini za vrijeme vožnje i s isključenim motorom. Zbog usporedbe rezultata izmjerena je koncentracija čestica iz ispuha vozila, za slučaj kad je senzor postavljen u ispuh i kad je odmaknut od ispuha. TSI NPET i AVL M.O.V.E PN PEMS su uređaji koji su se koristili za brojanje krutih čestica. Za svako mjerenje vrijeme na uređaju je postavljeno na jednu minutu.

### 5.1. Razlučivost uređaja

Prije korištenja uređaja potrebno je provjeriti njegovu razlučivost, da bi se dobili ispravni rezultati mjerenja. Razlučivost je mjerena na TSI NPET uređaju koji je postavljen u kabinu vozila.

Provedena su četiri pokusa kad je motor vozila ugašen:

1. Vrata vozila su zatvorena i sonda je postavljena na sredini vozila.
2. Vrata vozila su otvorena i sonda je postavljena na sredini vozila (Slika 5.1.).
3. U vozilu s otvorenim vratima ispred sonde je zapaljena šibica.
4. Maramica je zapaljena u vozilu s otvorenim vratima, a sonda se nalazi na sredini vozila.



Slika 5.1. Ispitivanje razlučivosti uređaja kad je sonda na sredini vozila

## 5.2. Mjerenje broja čestica u kabini vozila

Mjerenja su provedena pomoću dva uređaja TSI NPET i AVL M.O.V.E PN PEMS. Za ovo mjerenje potrebno je montirati oba uređaja unutar vozila.

Pripreme za mjerenje:

1. Montiranje uređaja unutar vozila, pri čemu treba paziti da se TSI NPET tijekom montiranja ne smije nagnuti za kut veći od 15 stupnjeva.
2. Osigurati uređaje pojasevima i remenjem kako ne bi došlo do pomicanja uređaja prilikom vožnje, što može utjecati na mjerenja i oštećenje samog uređaja (Slika 5.2.).
3. Uređaji se povezuju pomoću Ethernet kabla na računalo i pokrenu, zatim treba pričekati neko vrijeme dok se uređaji zagriju na radnu temperaturu.
4. Nakon što su se uređaji zagrijali isključe se s računala i izvora energije, AVL M.O.V.E PN PEMS se spoji na svoju bateriju koja je prethodno napunjena, a TSI NPET je potrebno spojiti na izvor energije unutar vozila.
5. Kad su uređaji opet povezani na izvor energije trebaju se ponovno povezati s računalima. Neposredno prije samog mjerenja potrebno je promijeniti umetak u TSI NPET uređaju.
6. Nakon što se napravi sve navedeno pokrene se program za svaki uređaj na zasebnom računalu i mjerenje može početi.



Slika 5.2. Uređaji za mjerenje montirani u vozilo

Za ovo mjerenje potrebne su četiri osobe. Jedna upravlja vozilom i kontrolira njegovu brzinu. Druga bilježi karakteristike svakog mjerenja, kako bi nakon mjerenja mogli znati koje je mjerenje karakteristično za određenu vožnju. Treća osoba postavlja vrijeme mjerenja na TSI NPET uređaju i pokreće mjerenje - taj uređaj nakon što prođe zadano vrijeme automatski zaustavlja mjerenje. Tijekom mjerenja svi podaci se spremaju na uređaj i nakon završetka se mogu preuzeti na računalo. Četvrta osoba pokreće i zaustavlja mjerenja na AVL M.O.V.E PN PEMS uređaju, jer se na njemu ne može zadati vrijeme mjerenja pa se mjerenje ne može automatski zaustaviti. Za mjerenje koncentracije krutih čestica u kabini vozila vrijeme mjerenja postavljeno je na jednu minutu.

Mjerenje je provedeno za karakteristične slučajeve:

1. Vozilo je udaljeno od ceste i ispušnih plinova drugih vozila te je mjerenje ponovljeno dva puta.
2. Vožnja po Vukovarskoj ulici u Zagrebu, zbog semafora dolazi do zastoja u prometu, u okolišnom zraku se nalaze krute čestice koje nastaju u ispuhu drugih vozila i ulaze u kabinu.

3. Vožnja Avenijom Većeslava Holjevca, nema zastoja u prometu, ali zbog ograničenja brzine vožnja je sporija.
4. Kretanje po autoputu, gdje se vozila kreću brže jer su dozvoljene veće brzine u odnosu na gradsku vožnju.
5. Nakon što se vozilo vratilo u bazu obavljeno je još jedno mjerenje, kad se vozilo ne kreće, a motor je uključen.

### 5.3. Uzorak iz sustava ventilacije

TSI NPET uređaj je postavljen u kabinu vozila i spojen je s računalom, prije samog mjerenja promijenjen je umetak i nakon što je uređaj postigao radnu temperaturu mjerenje može započeti. Prvo je izmjerena koncentracija čestica u kabini kad je ventilacija isključena; sonda uređaja se nalazi na sredini vozila. Zatim je ventilacija postavljena na maksimalni režim rada i izmjerena je koncentracija krutih čestica u kabini kada se sonda nalazi na sredini vozila i kada se postavi unutar otvora ventilacije (Slika 5.3.). Vrijeme mjerenja je postavljeno na jednu minutu, a sva mjerenja su ponovljena tri puta. Tijekom ovog mjerenja vrata automobila su bila zatvorena.



Slika 5.3. Mjerenje kad je sonda postavljena na otvor ventilacije

#### 5.4. Mjerenje broja čestica iz ispuha vozila

Izmjerena je koncentracija krutih čestica iz ispuha vozila s PN PEMS uređajem u okolini koja nije onečišćena ispušnim česticama iz drugih vozila. Mjerenje je obavljeno ispred laboratorija na tri različita vozila te je svako mjerenje ponovljeno dva puta. Prvo ispitno vozilo je Mercedes-Benz Vito Tourer proizveden 2019. godine. Motor pogonjen na dizel (Euro 6), norma prema kojoj vozilo mora proizvoditi manje od 0,005 g/km čestica. Koncentracija krutih čestica iz ispuha dizelskih motora regulirana je filterom čestica za dizel. Drugo ispitno vozilo je Nissan Qashqai proizveden 2019. godine. Motor pogonjen na benzin (Euro 6), katalizatorom se regulira količina ispušnih čestica. Treće vozilo je Citroen C4 proizveden 2012. godine, motor pogonjen na benzin (Euro 5) s katalizatorom. Za prvo mjerenje senzor uređaja je postavljen u ispušnu cijev automobila (Slika 5.4.). Broj čestica je određen za dva slučaja, kad motor radi u praznom hodu i kad motor radi pri povišenoj brzini okretaja. Ova dva slučajeva su ponovljena za sva tri vozila kada je senzor uređaja odmaknut od ispušne cijevi za trideset centimetara (Slika 5.5.).



Slika 5.4. Senzor mjernog uređaja u ispušnoj cijevi



*Slika 5.5. Senzor mjernog uređaja udaljen od ispušne cijevi za trideset centimetara*



## 6. REZULTATI

Mjerenja su provedena 21.2.2024. u Laboratoriju za motore i vozila FSB-a pomoću dva uređaja AVL M.O.V.E PEMS i TSI NPET.

Na svim dijagramima podaci su prikazani na način da:

A označava mjerenje u kabini kad su vrata vozila zatvorena,

B označava mjerenje u kabini kad su vrata vozila otvorena,

C označava mjerenje na okolišnom zraku,

D označava mjerenje PEMS uređajem dok je senzor u ispušnoj cijevi,

E označava mjerenje PEMS uređajem kad je senzor odmaknut od cijevi,

Prvo mjerenje je napravljeno da bi se odredila razlučivost uređaja. Mjereno je TSI NPET uređajem za četiri različite okolnosti. (Slika 6.1.)

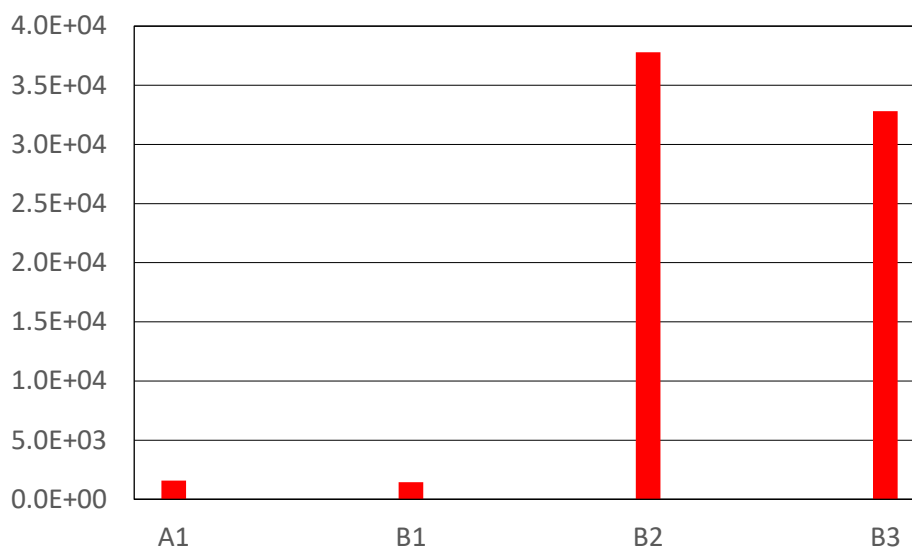
Karakteristične točke dijagrama:

A1 - označava mjerenje u vozilu sa zatvorenim vratima, kad je motor ugašen i ventilacija je isključena, sonda za mjerenje se nalazi na sredini vozila.

B1 - označava mjerenje u vozilu s otvorenim svim vratima, kad je motor ugašen i ventilacija je isključena, sonda za mjerenje se nalazi na sredini kabine vozila.

B2 - označava mjerenje kad je zapaljena šibica ispred sonde za mjerenje u kabini vozila sa otvorenim vratima.

B3 - označava mjerenje kad je zapaljena maramica unutar kabine vozila sa otvorenim vratima, sonda se nalazi na sredini kabine vozila.



Slika.6.1. Razlučivost uređaja

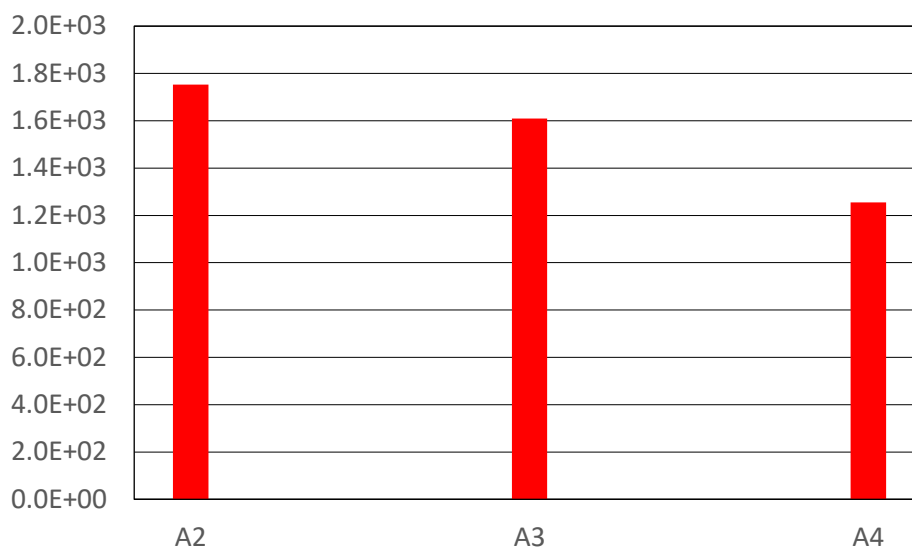
Drugim mjerenjem je ispitan utjecaj rada ventilacijskog sustava na broj čestica u kabini vozila, mjerenje je provedeno TSI NPET uređajem (Slika 6.2.).

Karakteristične točke dijagrama:

A2 - označava mjerenje u vozilu sa zatvorenim vratima, kad je motor uključen i ventilacija je postavljena na maksimalnu jačinu, a sonda za mjerenje se nalazi na sredini kabine vozila.

A3 - označava mjerenje u vozilu sa zatvorenim vratima kad je motor uključen i ventilacija je postavljena na maksimalnu jačinu, a sonda za mjerenje je postavljena ispred prednjeg otvora ventilacije.

A4 - označava mjerenje u vozilu sa zatvorenim vratima, kad je motor ugašen i ventilacija je isključena, a sonda se nalazi ispred prednjeg otvora ventila.



Slika 6.2. Utjecaj ventilacije na broj krutih čestica

Treće mjerenje je napravljeno u kabini vozila za različite stilove vožnje, istovremeno je provedeno mjerenje sa PEMS i TSI NPET uređajima.(Slika 6.3.)

Karakteristične točke dijagrama:

C - označava mjerenje koncentracije krutih čestica u okolišnom zraku, zbog usporedbe s koncentracijom krutih čestica u kabini vozila.

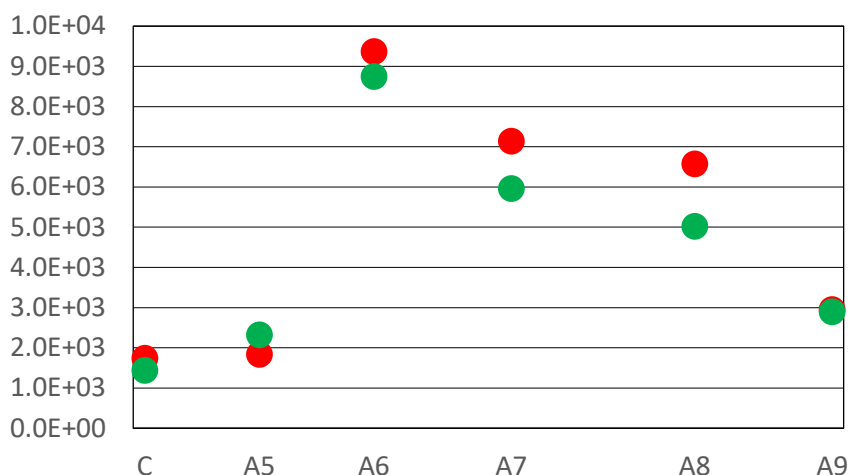
A5 - označava mjerenje koncentracije krutih čestica u kabini vozila kad vozilo stoji na mjestu u nezagađenoj okolini.

A6 - označava mjerenje u kabini vozila za gradsku vožnju u prometnoj gužvi.

A7 - označava mjerenje za sporiju gradsku vožnju bez gužve u prometu.

A8 - označava mjerenje na autocesti.

A9 - označava mjerenje gradske vožnje većom brzinom od točke A7.



Slika 6.3. Koncentracija čestica u kabini u vožnji, crvene točke rezultati mjerenja TSI NPET uređajem, zelene točke rezultati mjerenje uređajem PEMS

U četvrtom mjerenju s PEMS uređajem izmjerena je koncentracija krutih čestica iz ispušne cijevi za tri različita vozila, za dizel (EURO 6), benzin (EURO 6), benzin (EURO 5). (Slika 6.4.)

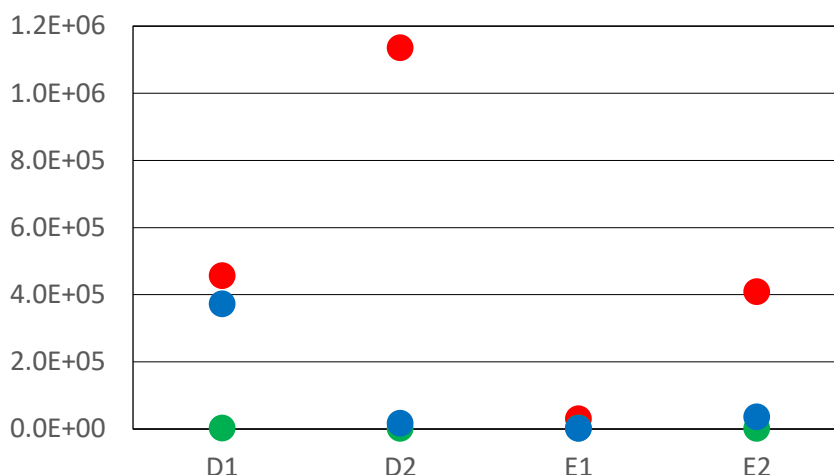
Karakteristične točke dijagrama:

D1 - označava mjerenje kad je senzor uređaja postavljen u ispušnoj cijevi, tijekom praznog hoda motora.

D2 - označava mjerenje kad je senzor postavljen u cijevi, prazni hod s povišenom brzinom vrtnje 2000 okretaja/min.

E1 - označava mjerenje kad je senzor postavljen izvan cijevi i od cijevi odmaknut pola metra, tijekom praznog hoda motora.

E2 - Označava mjerenje kad je senzor postavljen izvan cijevi i od cijevi odmaknut pola metra, prazni hod s povišenom brzinom vrtnje 2000 okretaja/min.

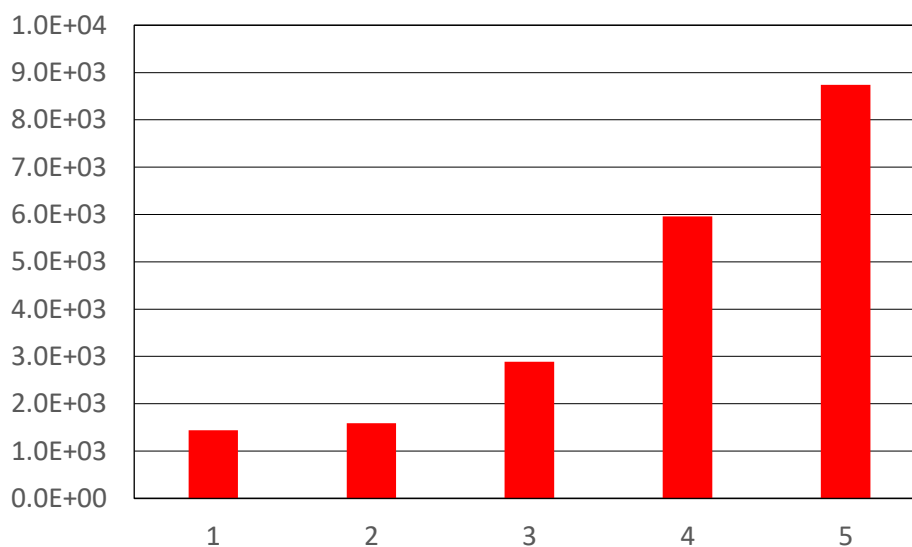


Slika 6.4. Rezultati mjerenja koncentracije čestica u ispuhu mjerenjem PEMS uređajem, crvena točka dizel (EURO 6), zelena točka benzin (EURO 6), plava točka benzin (EURO 5)

### 6.1. Diskusija rezultata

Pokusom koji je izveden pomoću šibice i zapaljene maramice, provjerena je razlučivost TSI NPET uređaja. Za ta dva slučaja uređaj mjeri broj čestica veći je za jedan red veličine u odnosu na okolišni zrak. U prvom mjerenju rezultati pokazuju, ako se vozilo ne kreće, na koncentraciju krutih čestica u kabini neće imati velik utjecaj je li motor uključen ili isključen te jesu li vrata na vozilu zatvorena ili otvorena. Iz rezultata se može vidjeti da ni ventilacijski sustav ukoliko se vozilo nalazi u okolini koja nije onečišćena ispušnim česticama drugih vozila, neće značajno utjecati na kvalitetu zraka u kabini jer se kroz ventilaciju usisava okolišni zrak. Ako se rezultati usporede s koncentracijom krutih čestica u okolišnom zraku koja je prikazana pod točkom C na trećem dijagramu može se uočiti da će zrak u kabini biti približno jednak okolnom zraku. Za vrijeme vožnje u kabini raste broj krutih čestica ovisno o načinu vožnje i broju vozila koji sudjeluju u prometu. Kad je vozilo u prometnom zastoju u kabini je broj čestica veći skoro za jedan red veličine u odnosu na broj čestica u okolini bez vozila. Tijekom brze gradske vožnje, bez gužve na cesti broj čestica u kabini je tri puta manji u odnosu na broj čestica u prometnom zastoju. U dijagramu (Slika 6.4.) se može vidjeti da je najveća koncentracija čestica izmjerena kada je senzor postavljen u ispušnoj cijevi, udaljavanjem senzora od ispušne cijevi uređaj broji manju koncentraciju krutih čestica. Dizelski motor u odnosu na benzinski ima za tri reda veličine veću koncentraciju ispušnih čestica. U točki D1 mjerena je koncentracija ispušnih čestica kad je motor u praznom hodu, benzinski motor (Euro 5) kod inicijalnog pokretanja je imao „cold start“, te je zbog toga broj krutih čestica približno jednak broju čestica kod dizelskog motora. Na dijagramu je dana usporedba broja čestica, prva točka predstavlja

broj čestica u okolišnom zraku, druga točka označava broj čestica iz ispuha benzinskog motora (Euro 6). Točke tri, četiri i pet označavaju broj čestica u kabini vozila za brzu gradsku vožnju bez gužve, sporu gradsku vožnju i zastoj u prometu zbog gužve (Slika 6.5.). Iz dijagrama se može vidjeti da je broj ispušnih čestica motora pogonjenog na benzin (Euro 6) približno jednak broju čestica u okolišnom zraku. Broj čestica u kabini ovisi o ispušnim plinovima drugih vozila.



Slika 6.5. Usporedba broja čestica u okolišu i u kabini s ispušnim česticama Ottovog motora (Euro 6)

## 7. ZAKLJUČAK

Lebdeće čestice nastaju izgaranjem ulja, benzina i dizelskog goriva. Kratkotrajna i dugotrajna izloženost česticama može uzrokovati ozbiljne posljedice na ljudski organizam te može dovesti do preuranjene smrti. Danas su koncentracije čestica u nekim dijelovima svijeta izrazito visoke, znatno više od preporučenih graničnih vrijednosti Svjetske zdravstvene organizacije. Zbog toga je potrebno kontinuirano mjeriti i provjeravati koncentraciju čestica u zraku.

U svrhu provođenja istraživanja izmjerena je koncentracija krutih čestica u kabini vozila Mercedes-Benz Vito. Za ovo mjerenje u kabinu vozila montirani su prijenosni uređaji TSI NPET i AVL M.O.V.E PN PEMS. Treba napomenuti da je primarna namjena tih instrumenata mjerenje broja čestica iz ispuha vozila. Mjerenje je obavljeno za slučaj kad se vozilo nalazi udaljeno od prometa i u vožnji. Za vožnju su odabrane karakteristične situacije odnosno uvjeti korištenja: brza vožnja na autocesti, zastoj u prometnoj gužvi, brza i spora gradska vožnja. Svako mjerenje je ponovljeno te rezultati prikazuju srednju vrijednost za karakteristične točke. Iz grafova prikazanih u šestom poglavlju može se zaključiti da na broj čestica u kabini značajno utječe brzina vožnje i gustoća prometa, odnosno broj čestica iz ispuha vozila. Najveće koncentracije čestica su izmjerene u zastoju zbog prometne gužve. Kad je vozilo udaljeno od prometa broj čestica u kabini približno je jednak broju čestica u okolišnom zraku.

Za usporedbu rezultata izmjeren je broj čestica iz ispuha vozila, za dizelski motor (Euro 6), benzinski motor (Euro 5) i (Euro 6). Prema slici 6.4 može se zaključiti da Dieselovi motori emitiraju više krutih čestica u odnosu na Ottove motore. Broj čestica iz ispuha Ottova motora približno je jednak broju čestica u okolišnom zraku.

Na temelju izmjerenih rezultata može se zaključiti da na broj krutih čestica u zraku više utječu Dieselovi motori te kako bi se smanjila koncentracija krutih čestica u zraku potrebna je bolja kontrola ispušnih čestica Dieselovih motora tijekom njihova životnog vijeka, što se provodi tijekom tehničkog pregleda vozila.

## LITERATURA

- [1] Službena stranica Svjetske zdravstvene organizacije - Air pollution  
<https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab>, 15.1.2024.
- [2] Službena stranica Europske unije - Harm to human health from air pollution in Europe  
<https://www.eea.europa.eu/publications/harm-to-human-health-from-air-pollution>,  
1.2.2024.
- [3] Solarimpulse foundation- How to improve air quality  
<https://solarimpulse.com/air-pollution-solutions>, 6.2.2024.
- [4] Službena stranica Europske unije – Source of air pollutant  
<https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/air-pollution-in-the-eu/#sources>,  
7.2.2024.
- [5] National park service - Air  
<https://www.nps.gov/subjects/air/sources.htm>, 6.2.2024.
- [6] Službena stranica vlade USA  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5122104/>, 10.1.2024.
- [7] Službena stranica Europske unije – Air pollution and health  
<https://www.eea.europa.eu/publications/zero-pollution/health/air-pollution>, 11.1.2024.
- [8] Ministarstva okoliša Novi Zeland - Ugljikov monoksid  
[Carbon monoxide | Ministry for the Environment](#), 15.1.2024.
- [9] Ministarstva okoliša Novi Zeland - Dušikov dioksid  
[Nitrogen dioxide | Ministry for the Environment](#), 15.1.2024.
- [10] The Californica air resources bord – Inahble particulate matter and helth (PM2,5 i PM10)  
<https://ww2.arb.ca.gov/resources/inhalable-particulate-matter-and-health>, 11.1.2024.
- [11] Katja M. Bendsten, Elizabeth Bengtsen, Anne T. Saber, Ulla Vogel, Areview of health effects associated with expousure to jet engine emissions in and around airports, Enviromental helath, 6.2.2021.  
<https://ehjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12940-020-00690-y#:~:text=Like%20other%20combustion%20engines%2C%20jet,%2C%20and%20meta%20%5B24%5D>, 12.2.2024.
- [12] Jose A. Orosa, Indoor and outdoor pollution, (2011)
- [13] Dr. Sarath Guttikunda, Mr. Saikrishna Dammalapati ABC's of air Quality  
<https://urbanemissions.info/publications/primer-on-abc-of-air-quality>, 20.2.2024.



- [14] Službena stranica vlade USA – Particulate matter pollution  
<https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>, 12.1.2024.
- [15] Službena stranica Europske unije – Europe's air quality status 2023  
<https://www.eea.europa.eu/publications/europes-air-quality-status-2023>, 12.1.2024.
- [16] Teheran times, Air pollution  
<https://www.tehrantimes.com/news/420497/Air-pollution-not-this-again>, 15.2.2024.
- [17] Simona Kirešova, Milan Guzan, Measurement of particulate matter: principles and options of measurement at present, 2022.  
<https://intapi.sciendo.com/pdf/10.2478/aei-2022-0007> , 12.2.2024.
- [18] Mettler toledo, Emissions testing – Gravimetric determination of particulate matter  
[https://www.mt.com/my/en/home/applications/Laboratory\\_weighing/emissions-testing-particulate-matter.html](https://www.mt.com/my/en/home/applications/Laboratory_weighing/emissions-testing-particulate-matter.html), 15.2.2024.
- [19] A. Czitrovsky, Solid- State Laser Environmental applications of solid-state lasers, 2013.  
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/optical-particle-counter> , 17.2.2024.
- [20] TSI, Getting data you need with particle measurements,  
<https://tsi.com/getmedia/94ddf3c3-bede-4307-8ee6-faaf6c482a14/PD-001-appnote-A4?ext=.pdf> , 12.2.2024.
- [21] The Universiti of Manchester- Centre for Atmospheric Science  
<http://www.cas.manchester.ac.uk/restools/instruments/aerosol/cpc/Schematic%20CPC/>  
, 16.2.2024.
- [22] AVL M.O.V.E PN PEMS iS 496, Measuring and function principle of the sensor unit, pages 83-84
- [23] M. A. Schriefl, R. T. Nishida, M. Knoll, A. M. Boies, A. Bergmann, Characterization of particle number counters based on pulsed-mode diffusion charging, pages 772-789, 24.2.2020.
- [24] TSI, NANONPARTICLE EMISSION TESTER MODEL 3795, operation and service manual  
<https://gastech.com/sites/default/files/20170207-TSI-NPET3795-Manual.pdf>, 10.2.2024.