

Ispitni postav za mjerenje emisije krutih čestica guma i kočnica cestovnih vozila

Ribičić, Korina

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:086512>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Korina Ribičić

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Goran Šagi, dipl. ing.

Student:

Korina Ribčić

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se svom mentoru doc. dr. sc. Goranu Šagiju na pomoći i savjetima kada sam ih najviše trebala tijekom izrade rada.

Zahvaljujem se i svojoj obitelji i prijateljima koji su ovih godina uvijek bili tu da me bodre i guraju prema naprijed tijekom studiranja.

Korina Ribičić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Korina Ribičić** JMBAG: **0035221516**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispitni postav za mjerenje emisije krutih čestica guma i kočnica cestovnih vozila**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Test setup for measuring particle emissions from road vehicles brakes and tyres**

Opis zadatka:

Posljednjih godina, smanjenjem emisije krutih čestica koja nastaju prilikom izgaranja u motoru s unutarnjim izgaranjem i nalaze se u ispušnim plinovima, u fokus istraživanja, mjerenja i praćenja stanja dolaze emisije krutih čestica koje su posljedica trošenja guma i kočnica vozila. Emisija tih krutih čestica prisutna je kod svih vozila s gumama i kočnicama neovisno o vrsti pogonskog sustava. Cilj ovog rada je za osobno cestovno motorno vozila koncipirati ispitni postav za prikupljanje i mjerenje emisije krutih čestica guma i kočnica. Načelno, ispitni postav bi se sastojao od plašta oko kotača vozila u kojem se prikupljaju čestice guma i kočnica te bio opremljen ventilatorima da se osigura prisilno strujanje čestica prema analizatorima krutih čestica, sustavom za mjerenje protoka, filtrima i sl.

U okviru završnog rada potrebno je:

- analizirati problem štetnosti emisije krutih čestica guma i kočnica vozila, usporedba ovih emisije kod različitih vozila i u odnosu na emisije čestice u ispušnim plinovima,
- proučiti literaturu i napraviti pregled pristupa mjerenju emisija krutih čestica guma i kočnica (na potpunom vozilu ili pojedinačnoj komponenti, u uvjetima stvarne vožnje ili u laboratoriju),
- odrediti što je sve potrebno mjeriti (protok, temperature, broj i količina krutih čestica, kemijski sastav krutih čestica),
- koncipirati ispitni postav uzimajući u obzir konstrukcijske značajke vozila (posebice sklopa kotača i prostora oko kotača), predvidjeti da postavljanjem komponenata postava na vozilo ne dolazi do izmjene vozila ili nepovoljnog utjecaja na performanse vozila te predvidjeti mogućnost korištenja postojećih analizatora krutih čestica iz Laboratorija za motore i vozila u ispitnom postavu,
- konceptijsku razradu popratiti skicama i odgovarajućim proračunima i analizama,
- izraditi sklopne crteže.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.
3. rok: 18. 9. 2023.

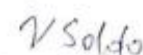
Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zadao:


Doc. dr. sc. Goran Šagi

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. TROŠENJE KOČNICA	3
3. TROŠENJE GUMA	16
4. USPOREDBA UKUPNIH EMISIJA ČESTICA KOJE ISPUŠTAJU ELEKTRIČNA VOZILA I VOZILA S MOTOROM S UNUTARNJIM IZGARANJEM	26
5. MJERENJA EMISIJA GUMA U KOČNICA U LABORATORIJSKIM UVJETIMA ...	30
6. MJERENJE EMISIJA ČESTICA GUMA I KOČNICA U STVARNIM UVJETIMA VOŽNJE	40
7. MJERENJE ŠTETNIH EMISIJA NA GUMAMA I KOČNICAMA VOZILA	47
8. ZAKLJUČAK.....	52

POPIS SLIKA

Slika 1. Trend porasta štetnih emisija PM _{2,5} zbog trošenja guma i kočnica vozila u prometu unutar EU [1].....	1
Slika 2. Disk kočnice s kočnim čeljustima s jednim klipom i ventiliranim diskom (rotor) [3] .	3
Slika 3. Udio emisija PM ₁₀ trošenja kočnica u prometu na lokacijama Zürich-Weststrasse (desno) i Reiden (lijevo) u Švicarskoj [3]	5
Slika 4. Udio veličine čestica za EF za osobna i laka gospodarska cestovna vozila (LDV) i za teža teretna cestovna vozila (HDV) određenih za tragove elemenata povezanih s trošenjem kočnica [3]	6
Slika 5. Kompozicija gume [3]	16
Slika 6. Profili brzina za četiri različite WLTC faze [4]	29
Slika 7. Shema testnog postava za mjerenje čestica nastalih trošenjem kočnica pomoću dinamometra [4]	30
Slika 8. Shematski prikaz kočnog dinamometra i modula za testiranje skupljača prašine (inercijalnog separatora, ESP-a ili hibridnog precipitatora) [5]	31
Slika 9. Mjerni postav s dinamometrom za provođenje testa emisija pri kočenju u laboratoriju [6]	33
Slika 10. Shematski prikaz rotacije diska iz pogleda [6]	33
Slika 11. Shema testnog postava za ispitivanje i mjerenje karakteristika čestica trošenja guma [4]	34
Slika 12. Prilagođena kućišta s ulazima i izlazima zraka dizajnirane oko kočnica i guma [7]	35
Slika 13. Laboratorijski ispitni postav za analizu brzine trošenja i faktora emisije PM-a na ispitnom podlogom s jednim valjkom [9]	38
Slika 14. (a/b) Ispitni postav na kombiju (VW T6), (c) CVS sustavi za emisije čestica iz kočnica (plavo) i čestica povezanih s gumama (crveno) [9] [10]	41
Slika 15. CVS ovoj za mjerenje emisije čestica kočnica [10].....	42
Slika 16. CFD simulacija: Uzimanje uzoraka čestica sa staništa gume i ceste pomoću lijevka-obraza za uzorkovanje [10]	43
Slika 17. Tehnički zahtjevi za mjerenje emisija PM čestica trošenja guma [11].....	44
Slika 18. Dvije verzije mlaznica koje se koriste za prikupljanje čestica trošenja gume i mjerenje emisije PM čestica [10]	45
Slika 19. Pregled preuzetog CAD modela gume, kočnice, ovjesa i amortizera [12]	47
Slika 20. Bliži prikaz kočnice i kočnog diska preuzetog CAD modela [12]	48
Slika 21. Dijelovi ovojnice za kočnicu i sklapanje tih dijelova	49
Slika 22. Dijelovi ovojnice za gumu i njihov sklop	49
Slika 23. Poredak postavljanja ovojnica oko diska i čeljusti kočnice	50
Slika 24. Cijeloviti sklopovi ovojnica	51

POPIS TABLICA

Tablica 1. Pregled najvažnijih literaturnih istraživanja koja se bave karakterizacijom čestica trošenja kočnica u smislu njihove raspodjele mase prema veličini [3]	7
Tablica 2. Pregled istraživanja u literaturi vezano uz raspodjelu broja čestica u zraku nastalih trošenjem kočnica [3]	10
Tablica 3. Najčešći elementi i njihove koncentracije u oblogama kočnica i prašini od trošenja kočnica [3]	12
Tablica 4. Pregled najvažnijih istraživanja koje se bave karakterizacijom čestica trošenja guma u smislu njihove raspodjele mase prema veličini [3]	19
Tablica 5. Pregled istraživanja u literaturi vezano uz raspodjelu broja čestica u zraku nastalih trošenjem guma [3]	21
Tablica 6. Specifikacije za vozila s motorima s unutarnjim izgaranjem i električna vozila [4]	27

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

BROJ CRTEŽA 9-2023-01

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
APS	Instrument koji se koristi za mjerenje veličine čestica u zraku, posebno u rasponu od nekoliko mikrometara do nekoliko stotina mikrometara. APS koristi aerodinamičku analizu čestica kako bi odredio njihovu veličinu (engl. <i>Aerodynamic Particle Sizer</i>).
BLPI	Instrument koji se koristi za brojanje čestica u zraku, posebno onih manjih veličina. Ovaj instrument radi na principu detekcije čestica koje prolaze kroz tekućinu, obično butanol. Kada čestica prolazi kroz tekućinu, generira se signal koji se koristi za brojanje čestica i određivanje njihovih veličina. (engl. <i>Butanol Liquid Particle Counter</i>).
EEPS	Instrument koji se koristi za mjerenje veličine čestica u zraku. Koristi električki nabijene čestice kako bi ih razdvojio prema njihovoj veličini. Ovaj instrument je sličan drugim elektrostatskim brojačima čestica i koristi se u znanstvenim istraživanjima, posebno za mjerenje čestica u aerosolima. (engl. <i>Engine Exhaust Particle Sizer</i>).
ELPI	Instrument koji se koristi za sakupljanje i analizu čestica u zraku, posebno onih smanjih veličina. ELPI koristi elektrostatski princip kako bi razdvojio i brojao čestice prema njihovoj veličini (engl. <i>Electrical Low-Pressure Impactor</i>)
EV	električna vozila (engl. <i>Electric Vehicle</i>)
GRIMM	Tvrtka koja se specijalizirala za razvoj i proizvodnju instrumenata za mjerenje aerosola i čestica u zraku. Njihovi instrumenti, kao što su brojači čestica i spektrometri, koriste se u znanstvenim istraživanjima i industriji kako bi se analizirala prisutnost i karakteristike čestica u zraku (engl. <i>Grimm Aerosol Technik</i>).
HEPA filter	Vrsta filtera koja se koristi za uklanjanje čestica iz zraka (engl. <i>High-Efficiency Particulate Air filter</i>).
ICEV	vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem (engl. <i>Internal Combustion Engine Vehicle</i>)
MOUDI	Uređaj koji se koristi za skupljanje čestica u zraku i njihovu analizu prema veličini (engl. <i>Micro-Orifice Uniform Deposit Impactor</i>).
PIXIE	Analitička tehnika koja se koristi za određivanje kemijskog sastava materijala, posebno čvrstih uzoraka, putem generiranja karakterističnih rendgenskih zraka sakupljanjem uzorka ionima. Ova tehnika se često koristi u znanstvenim istraživanjima, forenzici, analizi materijala i drugim primjenama (engl. <i>Particle Induced X-ray Emission</i>).
PM	čestice (engl. <i>Particulate Matter</i>)
PM ₁₀	Čestice čija je aerodinamička veličina manja ili jednaka 10 mikrometara (µm). To su čestice koje su vidljive golim okom i često se nazivaju "grubim česticama" (engl. <i>Particles which pass through a size-selective inlet with a 50% efficiency cut-off at 10 µm aerodynamic diameter</i>).
PM _{2.5}	Čestice čija je aerodinamička veličina manja ili jednaka 2,5 mikrometara (µm). To su sitne čestice koje su manje od PM ₁₀ čestica i često se nazivaju "finim česticama" (engl. <i>Particles which pass through a size-</i>

	<i>selective inlet with a 50% efficiency cut-off at 2.5 μm aerodynamic diameter).</i>
PM _{0.1}	Čestice čija je aerodinamička veličina manja od 0,1 mikrometara (μm). To su ultrafine čestice koje su vrlo male i mogu prodrijeti duboko u dišne puteve i čak ući u krvotok (engl. <i>Mass concentration of particles of diameter smaller than 0.1 μm</i>).
SMPS	Instrument koji se koristi za karakterizaciju veličine čestica u aerosolima. Ovaj instrument kombinira tehnike električne mobilnosti i brojanja čestica kako bi odredio veličinsku raspodjelu čestica u aerosolnom uzorku (engl. <i>Scanning Mobility Particle Sizer</i>).
TEM	Vrsta elektronske mikroskopije koja se koristi za proučavanje strukture materijala na nanometarskoj skali. TEM koristi snop elektrona koji prolazi kroz tanki presjek uzorka, omogućavajući visoko razlučivanje i detaljnu analizu unutarnje strukture materijala (engl. <i>Transmission Electron Microscopy</i>).

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
EM	mg	Služi za određivanje kvantifikacije emisije određenog onečišćivača pojedinog vozila ili skupa vozila, tj. predviđaju količinu onečišćenih čestica koje nastaju po prijedenoj udaljenosti, potrošenoj energiji ili količini potrošenog goriva.

SAŽETAK

Dozvoljene emisije štetnih tvari u ispušnim plinovima regulirane su Euro emisijskim razinama, no emisije koje nastaju kao posljedica trošenja kočnica i guma još su uvijek dio aktualnih istraživanja te se njihove granice tek trebaju jasno definirati. Kako bi se utvrdile emisije štetnih tvari potrebno je proučiti sastav pojedinih komponenti, definirati postupak ispitivanja te kontrolirati uvjete, u kojima se testiranje odvija, kako bi dobili što točnije rezultate. Emisije štetnih tvari, provode se i u realnim uvjetima vožnje, ali i u laboratorijskim uvjetima. Tema ovog rada je analizirati i proučiti samu građu kočnica i guma vozila, a potom izvjestiti o emisijama koje nastaju prilikom njihovog trošenja. Bitno je spomenuti u kojim se veličinama pojavljuju te štetne čestice, kakva im je raspodjela, emisijski faktor te sam utjecaj na zdravlje živih bića. Također, bit će i usporedba između vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem i električnih vozila. Iako je poznato da se električna vozila smatraju vozilima bez emisija jer nemaju ispuh, u ovom radu će se pokazati da to nije tako.

U radu su također prikazani neki ispitni postavi koji su korišteni u različitim istraživanjima za određivanje emisija kočnica i guma, bilo u laboratorijskim uvjetima bilo u realnim uvjetima stvarne vožnje. Na kraju rada biti prikazan prijedlog odnosno koncept ispitnog sustav za prikupljanje i mjerenje štetnih čestica.

Ključne riječi: kočnice, gume, emisija čestica, emisijski faktor, ispitni postav

SUMMARY

Allowed vehicle emissions of exhaust gases are regulated by Euro emissions, but emissions from brake and tire wear are still under research, and their limits have yet to be clearly defined. To determine emissions of harmful substances, it is necessary to study the composition of individual components, define the testing procedure, and control the conditions under which testing takes place to obtain as accurate results as possible. Emissions of harmful substances are conducted, both, under real driving conditions and in laboratory settings. The topic of this paper is to analyze and study the structure of vehicle brakes and tires and then report on their emissions. It is important to mention the size at which these harmful particles appear, their distribution, emission factors, and their impact on the health of living organisms. Additionally, a comparison will be made between internal combustion engine vehicles and electric vehicles. Although electric vehicles are considered emission-free because they have no exhaust emissions, this paper will show that this is not entirely accurate. The paper also presents some test setups that have been used in various studies to determine brake and tire emissions, either in laboratory conditions or under real-world driving conditions. At the end of the paper, a proposal or concept for a test system for collecting and measuring harmful particles will be presented.

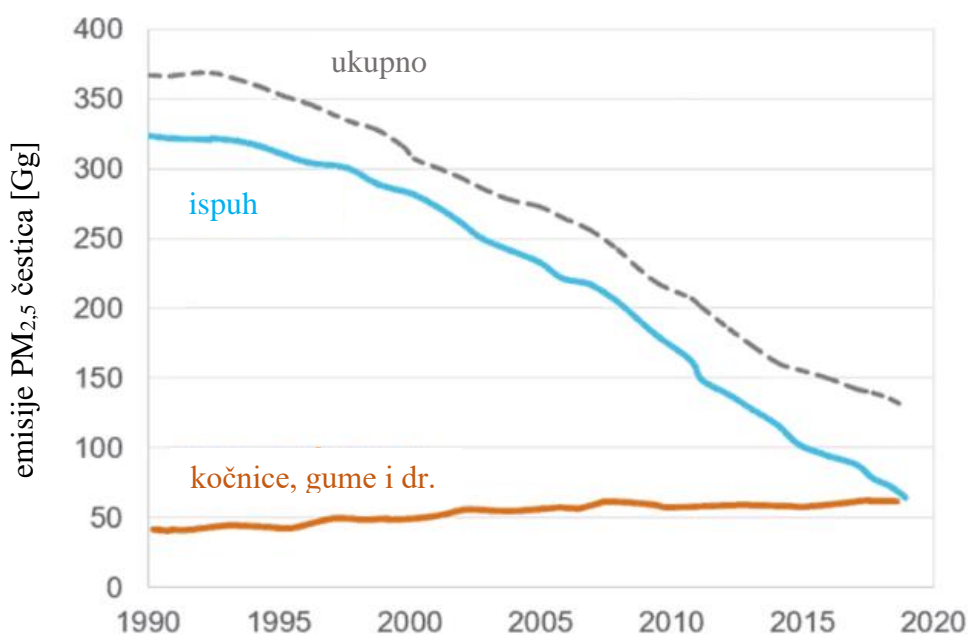
Keywords: brakes, tires, particles emission, emission factor, testing setup

1. UVOD

Dosad je glavna pozornost, po pitanju štetnosti emisija čestica, bila na česticama koje se nalaze u ispušnim plinovima automobila pogonjenih motorom s unutarnjim izgaranjem. Međutim, danas su te čestice, njihov utjecaj na okoliš, a time i na ljudsko zdravlje, već vrlo dobro istražene i dobro se zna njihova štetnost. Do sada su razvijene određene regulative kako bi se što više smanjila njihov utjecaj, a osim uvedenih regulativa, krenula je i proizvodnja hibridnih i električnih automobila koja je pridonijela smanjenju proizvodnje emisije štetnih čestica jer koriste bateriju i elektromotor za pogon automobila.

Iako se radilo na tome da se smanji štetna emisija čestica u okoliš, primijetilo se da i dalje postoji visoka razina nekih štetnih čestica i kemijskih spojeva, tj. da njihov udio nije toliko pao koliko se očekivalo. Iz tog razloga je započeto novo istraživanje na cestovnim vozilima kako bi shvatili i pronašli izvor te daljnje proizvodnje štetnih emisija u okoliš.

Istraživači su primijetili da glavni procesi abrazije koji dovode do izravnog ispuštanja čestica u okoliš su trošenje guma, kočnica i površine ceste. Ostali potencijalni izvori izravnog ispuštanja čestica su: trošenje spojke i motora, abrazija ležajeva kotača te korozija ostalih dijelova vozila, međutim najveći je fokus na trošenju guma i kočnica.



Slika 1. Trend porasta štetnih emisija $PM_{2,5}$ zbog trošenja guma i kočnica vozila u prometu unutar EU [1]

Procjenjuje se da će emisije iz guma biti najveći izvor mikroplastike u okolišu. Očekuje se da će do 2050. godine emisije koje ne potiču iz ispuha činiti do 90% svih čestica koje ispušta cestovni promet, jer će emisije iz ispušnih plinova opadati zbog elektrifikacije vozila. Stoga bi te emisije, koje nisu iz ispuha, trebale biti mjerene i ograničene. Komisija bi trebala pripremiti izvješće o abraziji guma do kraja 2024. godine kako bi pregledala metode mjerenja i najnovije tehnologije te predložila ograničenja za abraziju guma [2].

Postoji različite veličine štetnih čestica trošenja, od manjih i finijih do onih većih i grubljih pa ovisno o njihovoj veličini mogu se taložiti na cesti ili blizu nje, uvući u gumu vozila ili ako su manje čestice, mogu se raspršiti zrakom. Procjenjuje se da se otprilike 40-50 % ukupne mase nastalih čestica trošenja kočnica emitira kao PM₁₀, dok se samo 0,1-10 % čestica trošenja guma emitira kao PM₁₀ [3]. PM₁₀ čestice su čestice aerodinamičke veličine manje ili jednake 10 mikrometara (µm). To su čestice koje su vidljive golim okom i često se nazivaju "grubim česticama" (engl. *Particles which pass through a size-selective inlet with a 50% efficiency cut-off at 10 µm aerodynamic diameter*).

Rezultati istraživanja pokazali su da ispušni i neispušni izvori, povezani s prometom, gotovo jednako doprinose ukupnim emisijama PM₁₀ vezanim za promet, međutim relativni doprinos neispušnih izvora više će rasti u nadolazećem periodu [3]. Procjenjuje se da doprinos trošenja kočnica emisijama PM₁₀ vezanim za promet koji potječe od neispušnih izvora varira između 16-55% ukupne mase, dok su nešto niži doprinosi (5-30 % ukupne mase) za trošenje guma [3]. Značajno niži doprinosi trošenja kočnica (~3 % ukupne mase) su na autocestama zbog manje uporabe kočnica. Udio neispušnih izvora u ukupnoj koncentraciji PM₁₀ u okolišu, je procijenjen da u slučaju trošenja guma iznosi između 0.8-7 % ukupne mase i ovisi o različitim parametrima kao što su, primjerice, lokacija, metodologija, korištenje različitih kemijskih markera i poteškoće u razlikovanju čestica trošenja guma od čestica trošenja površine ceste [3].

Iako se električna vozila smatraju vozilima bez emisija zbog odsutnosti ispušnih plinova, ona i dalje doprinose emisijama čestica (PM) koje nastaju trošenjem kočnica, guma, ceste i podizanjem prašine s ceste. Budući da su električna vozila veće mase od vozila s motorima s unutarnjim izgaranjem, njihove štetne emisije koje ne potječu iz ispuha mogu biti čak i veće, ali više o tome u sljedećim poglavljima.

Tema i fokus ovog rada je na česticama koje ne potječu iz ispuha u prometu, a proučavane su zbog njihove važnosti, fizikalno-kemijskih karakteristika, faktora emisije i mogućih štetnih zdravstvenih učinaka.

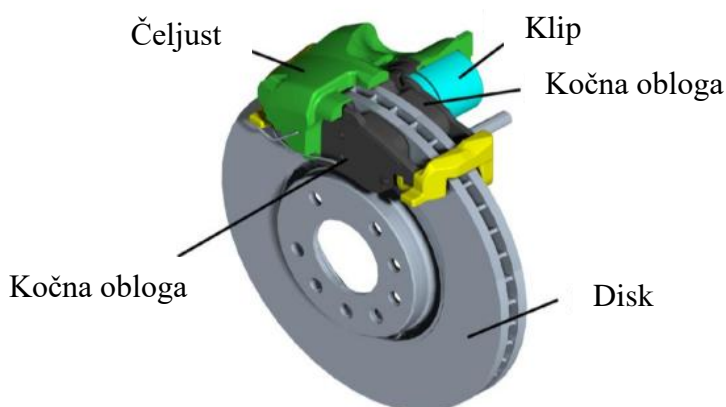
2. TROŠENJE KOČNICA

2.1. Vrsta kočnica

Trenutno su najčešće u uporabi dvije vrste kočnica, a to su disk kočnice i bubanj kočnice. Disk kočnice su po načelu djelovanja aksijalne kočnice. Čeljusti su postavljene tako da se po dvije kočne obloge pritisnu aksijalno na disk tako da se aksijalna sila na disk, a time i na vratilo poništava. Bubanj kočnice su po načelu djelovanja radijalne kočnice, a uključuju bubanj na rotacijskoj komponenti, na koji se pritišću čeljusti s kočnim oblogama, radijalno na bubanj.

Disk kočnice se više upotrebljavaju za prednje kočnice u odnosu na bubanj i češće se mijenjaju jer se više koriste u odnosu na stražnje kočnice koje mogu biti bilo disk bilo bubanj. Glavna razlika je u tome što disk kočnice nisu zabrtvljene od okolišnog zraka zbog čega se, prilikom njihovog zagrijavanja i postizanja visoke temperature, mogu puno brže i učinkovitije ohladiti u odnosu na bubanj kočnice.

Na slici 2. prikazana je građa diskovne kočnice:



Slika 2. Disk kočnice s kočnim čeljustima s jednim klipom i ventiliranim diskom (rotor) [3]

Kočne obloge su dijelovi kočnog sustava vozila koji se nalaze između kočnih pločica i kočnih diskova (ili bubnjeva). Vrlo su bitne radi sigurnog i učinkovitog kočenja. Sastoje se od dvije glavne komponente: trenutnog materijala i nosača. Trenutni materijal je obično smjesa koja se sastoji od različitih aditiva, veziva i vlakana, a služi za stvaranje trenja između kočnih obloga i kočnih diskova ili bubnjeva prilikom kočenja. Trenutni materijal je oblikovan tako da ima visoku otpornost na toplinu, habanje i trljanje, kako bi osigurao dugotrajnu i pouzdanu kočnu snagu. Nosač kočnih obloga je metalna ploča koja pridržava trenutni materijal i omogućuje pričvršćivanje obloge na kočnu pločicu ili kočni cilindar. Nosač također pruža

stabilnost i otpornost na deformaciju pri visokim temperaturama koje se javljaju prilikom kočenja.

Postoji nekoliko različitih vrsta kočnih obloga, uključujući organske, polu-metalne i metalne obloge. Svaka vrsta ima svoje prednosti i ograničenja, a odabir ovisi o specifičnim potrebama vozila i uvjetima vožnje [3].

Neazbestne organske (NAO) kočne pločice, ili se još zovu i nemetalne, su vrsta kočnih pločica koje se koriste u vozilima i koje ne sadrže azbest. Sastoje se od organskih vlakana, smola, punila i drugih aditiva koji pružaju potrebna kočna svojstva i performanse. Neka od dobrih svojstava su: sigurne su za okoliš i zdravlje jer ne emitiraju štetna azbestna vlakna, razina buke je niska, imaju tendenciju manjeg trošenja što može produljiti vijek trajanja diskova te pružaju dobar koeficijent trenja i učinkovito zaustavljanje vozila, što je važno za sigurnost i kontrolu pri kočenju.

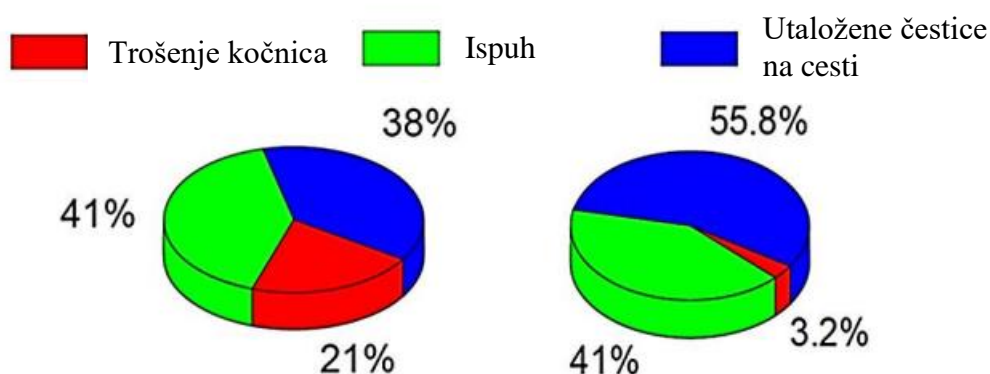
Polu-metalne kočne pločice se sastoje od kombinacije organskih vlakana, smola, punila i metalnih čestica poput bakra, čelika ili drugih legura metala. Neke od karakteristika polu-metalnih kočnih pločica: visoka kočna snaga zbog visokog koeficijenta trenja što omogućava brže zaustavljanje vozila, izdržljive su i otporne na toplinu, imaju bolje svojstvo raspršivanja topline u usporedbi s nekim drugim vrstama kočnih pločica što pomaže u sprječavanju pregrijavanja kočnih sustava, budući da polu-metalne pločice sadrže metalne čestice, mogu proizvesti malo više buke tijekom kočenja u usporedbi s drugim vrstama kočnih pločica te je moguće nešto veće habanje kočionih diskova u odnosu na neke druge vrste pločica. Često su korištene kod srednjih i teških teretnih vozila koja zahtijevaju visoku kočnu snagu i izdržljivost. Nisko-metalne kočne pločice su vrsta kočnih pločica koje sadrže manji udio metala u odnosu na polu-metalne ili metalne pločice. One se sastoje od kombinacije organskih vlakana, smola, punila i manjeg udjela metalnih čestica. Neke od karakteristika nisko-metalnih kočnih pločica: imaju dobar koeficijent trenja i pružaju učinkovito kočenje vozila, imaju tendenciju proizvoditi manje buke prilikom kočenja, uzrokuju manje habanje kočnih diskova u usporedbi s metalnim pločicama što im osigurava dulji vijek trajanja kočnih diskova, imaju dobru otpornost na visoke temperature tijekom kočenja. Često su korištene kod putničkih (osobnih) automobila i vozila za svakodnevnu vožnju zbog dobre kočne snage, manje buke i habanja kočnih diskova.

2.2. Nastajanje štetnih čestica

Prilikom kočenja, kočnica djeluje mehanički na oblogu. Obloga se pritisne uz disk i zatim se kinetička energija vozila pretvara u toplinsku energiju koja se raspršuje zrakom. Tijekom prisilnog usporavanja vozila, proizvodi se veliko trenje i toplina, što dovodi do trošenja obloga i diska. Posljedično nastaju čestice veličine mikrona ili mikrometra (μm) koje se raspoređuju u različitim veličinama. Postoje i sustavi kočnica s diskom, za bolje performanse kočenja, koji zahtijevaju da su obloge u kontaktu s rotorom pod niskim tlakom. Na taj način se efikasno uklanja bilo kakav sloj oksida (npr. hrđa) s rotora, a površine kontakta ostaju čišće. Negativan efekt je povećavanje potrošnje goriva i oslobađanje čestica u okoliš.

Sadržaj čestica trošenja kočnica ovisi o: uvjetima pod kojima se događa kočenje (brzina vozila, temperatura okoline i kemikalije dostupne u okruženju) i ponašanju vozača (učestalost i intenzitet procesa kočenja). S obzirom na to da trošenje kočnica nastaje tijekom prisilnih usporavanja, najviše koncentracije štetnih emisija čestica trošenja kočnica pronađene su blizu prometnih raskrižja, semafora, pješačkih prijelaza i zavoja.

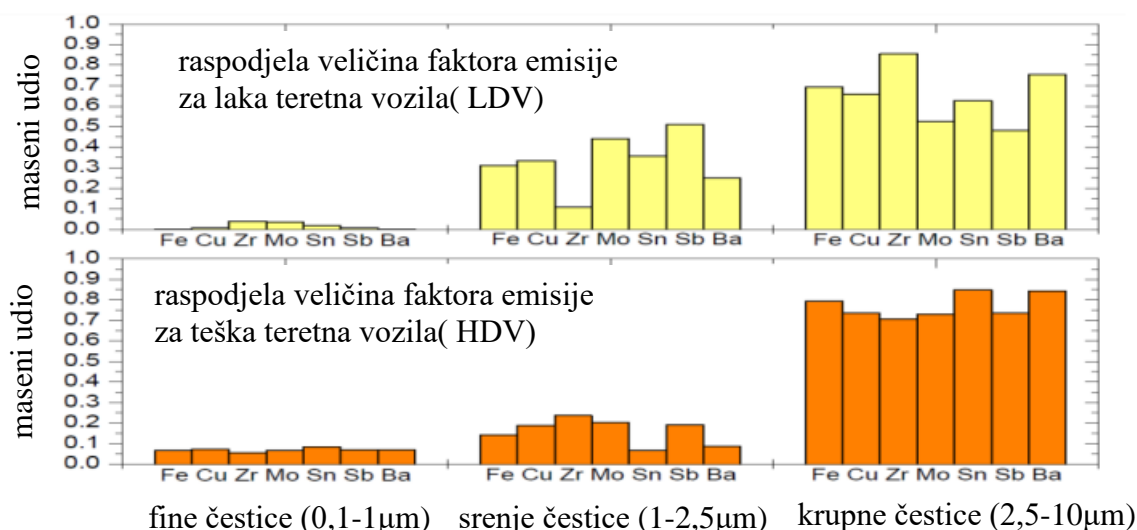
Kočenje se smatra glavnim izvorom emisija koje ne potječu iz ispuha, posebno u urbanim područjima. Procjenjuje se da doprinos trošenja kočnica emisijama koje ne potječu iz ispuha iznosi otprilike 16-55% ukupne mase, dok su manji doprinosi ($\sim 3\%$ ukupne mase) prijavljeni na autocestama gdje su događaji kočenja manje učestali [3]. Na slici 3. prikazan je udio emisija trošenja kočnica u prometu na dvije lokacije koje imaju drugačije karakteristike.



Slika 3. Udio emisija PM_{10} trošenja kočnica u prometu na lokacijama Zürich-Weststrasse (desno) i Reiden (lijevo) u Švicarskoj [3]

Čestice trošenja kočnica emitiraju se kao rezultat, uglavnom, mehaničkog procesa i očekuje se da će se nalaziti u gruboj frakciji veličine čestica. Međutim, postoje mnoga istraživačka izvješća koja su prijavila visoke koncentracije čestica u finim i ultrafinim frakcijama veličine.

Jedna skupina istraživača proučavala je veličinsku raspodjelu tragova elemenata povezanih s trošenjem kočnica u urbanoj okolici. Ustanovili su da većina njihove mase pripada u područje veličina većih od 1 μm (za laka teretna (gospodarska) vozila). Neke elemente (bakar, molibden, antimon) jednako su raspodijelili između finih i krupnih čestičnih frakcija. S druge strane, većina čestica trošenja kočnica emitiranih od teških teretnih vozila pronađena je u frakciji $\text{PM}_{2.5-10}$ (Slika 4.).



Slika 4. Udio veličine čestica za EF za osobna i laka gospodarska cestovna vozila (LDV) i za teža teretna cestovna vozila (HDV) određenih za tragove elemenata povezanih s trošenjem kočnica [3]

U tablici 1. mogu se vidjeti različita istraživanja nekih znanstvenika. Svaki od njih radio je istraživanje na različitim materijalima kočnih obloga, pod različitim uvjetima i metodama. Rezultati su pokazali da postoje čestice različitih veličina [3].

Skupina istraživača provela je testiranje preko dinamometara na različitim kočnim oblogama (polu-metalne i neazbestne) i utvrdili da se 86 % i 63 % mase čestica, nastale prilikom trošenja kočnica, raspodijelilo u frakcijama PM_{10} odnosno $\text{PM}_{2.5}$. Unimodalna raspodjela mase prema veličini označava da se većina čestica nalazi unutar jednog vrha distribucije veličina. U ovom slučaju, veličina čestica se kreće u rasponu 0,01-1,0 μm . To znači

da većina čestica, koje su emitirane kao rezultat trošenja kočnica, imaju veličinu unutar tog raspona. Važno je napomenuti da je ova raspodjela usredotočena na čestice koje se nalaze u finim frakcijama veličina, što znači da se najveći broj čestica nalazi u manjem rasponu veličina.

Tablica 1. Pregled najvažnijih literaturnih istraživanja koja se bave karakterizacijom čestica trošenja kočnica u smislu njihove raspodjele mase prema veličini [3]

<i>Referenca</i>	<i>Način istraživanja</i>	<i>Testirano na (vrsta kočionih obloga)</i>	<i>Metoda</i>	<i>Raspodjela mase po veličini</i>
Garg i suradnici 2000.	dinamometar	polu-metalne i NAO	MOUDI ($> 0,1 \mu\text{m}$)	unimodalna ($0,01-1,0 \mu\text{m}$)
Sanders i sur. 2003.	dinamometar	Nisko-metalne, polu-metalne i NAO	MOUDI- ELPI	unimodalna ($4-5 \mu\text{m}$)
von Uexkull i sur. 2005.	dinamometar	disk i bubanjske kočnice kamiona	Optički brojač čestica ($> 0,3 \mu\text{m}$)	unimodalna ($2-3 \mu\text{m}$)
Iijima i sur. 2007.	dinamometar	NAO	APS ($> 0,5 \mu\text{m}$)	unimodalna ($3-6 \mu\text{m}$)
Iijima i sur. 2008.	dinamometar	NAO	APS ($> 0,5 \mu\text{m}$)	unimodalna ($2,0 \mu\text{m}$)
Kukutschova i sur. 2011.	dinamometar	nisko-metalne	APS- SMPS- BLPI	unimodalna ($2-4 \mu\text{m}$)
Harrison i sur. 2012.	testiranje na cesti	PM čestice uz cestu koje nisu nastale iz ispuha vozila	MOUDI	unimodalna ($2-3 \mu\text{m}$)

Prilikom testiranja korištene su ove metode i uređaji: impaktor s mikro otvorima za ravnomjerno taloženje (engl. *Micro-Orifice Uniform Deposit Impactor*, MOUDI), električki niskotlačni impaktor (engl. *Electrical Low-Pressure Impactor*, ELPI), aerodinamički veličinski

analizator čestica (engl. *Aerodynamic Particle Sizer*, APS), analizator pokretljivosti čestica pomoću skeniranja (engl. *Scanning Mobility Particle Sizer*, SMPS), brojač tekućih čestica butanola (engl. *Butanol Liquid Particle Counter*, BLPI), optički brojač čestica (engl. *Laser Scattering Analyzer*).

2.3. Raspodjela broja čestica

Kako bi se shvatilo koje čestice nastaju zbog trenja na kočnicama bitno je proučiti raspodjelu broja tih čestica. Raspodjela (distribucija) broja čestica opisuje broj čestica koje se nalaze u određenim rasponima veličina. Ova raspodjela pruža informacije o broju čestica u svakom rasponu veličina i može biti unimodalna (s jednim vrhom) ili multimodalna (s više vrhova) ovisno o karakteristikama sustava. Kod raspodjele broja čestica povezanih s trošenjem kočnica, može se analizirati broj čestica u različitim rasponima veličina kako bi se razumjelo koliko čestica emitira sustav kočnica. Ova distribucija može obuhvaćati širok raspon veličina, uključujući fine, ultrafine i/ili grube čestice.

Raspodjela broja čestica može varirati ovisno o mnogim faktorima, uključujući vrstu vozila, stanje kočnica, način vožnje i uvjete okoline. Provedba detaljnih analiza raspodjele broja čestica važna je za razumijevanje emisija i mogućeg utjecaja na okoliš i zdravlje ljudi.

U tablici 2. su navedena neka istraživanja u kojima su se autori bavili raspodjelom broja čestica. Naveden je način istraživanja, na čemu je provedeno testiranje, metoda koja se koristila te na kraju i rezultati.

Jedna skupina istraživača provela je testiranje na kočnom dinamometaru, koristeći različite kočne obloge, i zaključili da se najveći broj ispuštenih čestica nalazi u promjerima manjim od 30 nm. To je minimalni prag za detekciju veličine broja čestica pomoću ELPI uređaja (elektrostatskog volumetrijskog spektrometara za broj čestica (engl. *electrical low-pressure impactor*)).

Druga skupina istraživača provela je istraživanje preko simulacije vožnje u stvarnim uvjetima. Istraživali su potencijalno nastajanje ultrafinih čestica pod različitim uvjetima stvarne vožnje primjenjujući uređaj koji mjeri veličinu čestica ispušnih plinova motora (EEPS, engl. *engine exhaust particle sizer*). Ustanovili su da su čestice trošenja, nastale prilikom potpunog zaustavljanja pri brzini od 100 km/h, pokazivale bimodalnu raspodjelu veličine broja čestica s nukleacijskim vrhom na 10 nm i drugim vrhom unutar ultrafine frakcije između 30 nm i 50 nm. Prilikom potpunog zaustavljanja pri brzini od 30 km/h rezultati pokazuju unimodalnu

raspodjelu bez odvojenog nukleacijskog vrha i lagano su se pomiču prema većim srednjim promjerima čestica (70-90 nm) [3].

Oni koji su istraživali raspodjelu veličine broja čestica trošenja kočnica na oblogama s niskim metalnim udjelom koristili su SMPS analizator (analizator pokretljivosti čestica pomoću skeniranja (engl. *Scanning Mobility Particle Sizer*)) i APS analizator (aerodinamički veličinski analizator čestica (engl. *Aerodynamic Particle Sizer*) te su utvrdili da koncentracija nanočestica manjih od 100 nm značajno poraste s povećanjem temperature lijevano željeznog diska (do 340°C). Na temelju raspodjele čestica i njihove promjene tijekom vremena, zaključili su da se submikronske čestice uglavnom formiraju procesom isparavanja, tj. kondenzacije.

Naravno, nisu sva istraživanja zabilježila vrhove raspodjele veličine broja čestica trošenja kočnica u ultrafinoj frakciji. Treća skupina istraživača testirala je niskometalne i neazbestne (NAO) kočnice obloge u čistom ambijentnom okruženju i pomoću GRIMM aerosolnog spektrometra (engl. *Grimm Aerosol Technik*). Pronašli su bimodalnu raspodjelu veličine broja čestica s vrhovima na približno 280 nm i 350 nm [3]. Nažalost to bi mogla i biti posljedica ograničenja instrumenta za mjerenje veličine čestica uzoraka tako da taj rezultat nije u potpunosti pouzdan.

Istraživači su zaključili da fine čestice trošenja potječu od lijevanog željeznog diska, dok grublje čestice uglavnom dolaze od materijala kočnice obloge. Također su uočili da niskometalne obloge rezultiraju većim stopama trošenja materijala diska od neazbestnih obloga, a time i većim koncentracijama čestica trošenja u zraku.

Naposljetku, postoje neka istraživanja koja izvješćuju o prvom vrhu raspodjele veličine čestica pri približno 1,0 μm .

Na temelju koncentracije broja čestica pokazalo se da je otprilike 90% prašine od trošenja kočnica raspodijeljeno u frakciji finih čestica [3].

Uz već gore navedene neke metode ovdje su još prisutne: analizator raspršivanja laserom (engl. *Laser Scattering Analyzer*), transmisijska elektronska mikroskopija (engl. *Transmission Electron Microscopy*, TEM), analizator čestica ispušnih plinova motora (engl. *Engine Exhaust Particle Sizer*, EEPS).

Tablica 2. Pregled istraživanja u literaturi vezano uz raspodjelu broja čestica u zraku nastalih trošenjem kočnica [3]

<i>Referenca</i>	<i>Način istraživanja</i>	<i>Testirano na (vrsta kočionih obloga)</i>	<i>Metoda</i>	<i>Raspodjela broja čestica</i>
Sanders i sur. 2003.	dinamometar	nisko-metane, polumetalne i NAO	ELPI	unimodalna (1,0 μm)
Mosleh i sur. 2004.	dinamometar	polu-metalne kočnice kamiona	Analizator raspršivanja laserom	bimodalna (350 nm i 2,0 μm)
Von Uexkull i sur. 2005.	dinamometar	diskovne i bubanjske kočnice kamiona	Optički brojač čestica ($> 0,3 \mu\text{m}$)	unimodalna (0,5-1,0 μm)
Iijima i sur. 2007.	dinamometar	NAO	APS ($> 0,5 \mu\text{m}$)	unimodalna (1,0-2,0 μm)
Riediker i sur. 2008.	dinamometar	Različitim vozila prilikom usporavanja i potpunog kočenja	TEM	bimodalna (80 nm i 400 nm)
Iijima i sur. 2008.	dinamometar	NAO	APS ($> 0,5 \mu\text{m}$)	unimodalna (0,8-1,0 μm)
Wahlstrom i sur. 2010.a	dinamometar	nisko-metane i NAO	GRIMM ($> 0,25 \mu\text{m}$)	bimodalna (280 nm i 350 nm)
Wahlstrom i sur. 2010.b	dinamometar	nisko-metane i NAO	GRIMM- SMPS	multimodalna (100, 280, 350, 550 nm)
Mathissen i sur. 2011.	testiranje na cesti	vozilu prilikom različitih uvjeta	EEPS ($< 0,56 \mu\text{m}$)	bimodalna (10 nm i 40 nm)
Kukutschova i sur. 2011.	dinamometar	nisko-metane	APS-SMPS	bimodalna (100 i 300 nm)

2.4. Kemijska karakterizacija

Iako nema dovoljno dokaza koji bi identificirali učinak različitih kemijskih komponenti na razini populacije, postoje dokazi o opasnoj prirodi nekih sastavnih čestica PM (čestice suspendirane u zraku) poput crnog ugljika (engl. *black carbon*) prisutnog u PM_{2.5}, kao i određenih komponenti (npr. PAH spojevi, metali, anorganske soli) koji su vezani za crni ugljik. Stoga bi kemijski sastav čestica trebao biti uzet u obzir prilikom istraživanja mogućih štetnih učinaka PM na zdravlje ljudi. Nekoliko epidemioloških studija povezano je nepoželjne zdravstvene reakcije s povećanim koncentracijama ugljičnih spojeva u PM, kao i s prisutnošću tragova elemenata i teških metala.

Prije svega bitno je reći da se kemijski sastav štetnih emisija čestica nastalih prilikom kočenja razlikuju od samog sastava kočionih obloga. Sastav kočnih obloga ovisi o proizvođaču, o samoj vrsti obloga te o udjelu punila, aditiva, pjena i ostalih tvari od kojih se proizvode. Moraju biti izdržljive za jaka mehanička i toplinska naprezanja te moraju imati visoku otpornost na otapala ako dođe do istjecanja kočne tekućine iz kočnica. Najčešći elementi, prikazani u tablici 3., koji se pronalaze u oblogama su željezo, bakar, cink i olovo, ali se olovo sve više pokušava izbaciti, zbog svoje štetnosti, prilikom izrade novih obloga. Značajne udjele zatim imaju i titanij te kalij, a u tragovima se još mogu pronaći: barij, magnezij, mangan, nikal, kadmij, krom i antimon. Neke kočne obloge sadrže 1-5 % antimona, ali u obliku kemijskog spoja stibnita (Sb₂S₃). Taj spoj se koristi kao mazivo kako bi se smanjile vibracije i trenje, međutim ako dođe do oksidacije prilikom kočenja nastaje štetan spoj, antimonov(III) oksid (Sb₂O₃), koji je kategoriziran kao potencijalno karcinogeno sredstvo što nikako nije dobro za zdravlje živih bića. U novijim oblogama nastoji se izbjeći korištenje antimona u kemijskom sastavu.

Testiranjem niskometalnih i neazbestnih obloga, istraživači su utvrdili da ispuštene fine čestice sadrže željezo, bakar, titanij, aluminijski, kisik i ugljikovodik, dok su se grube čestice pojavile u obliku pahuljica u kojima je najzastupljeniji element bio željezo i to u obliku njegovih oksida. Ove čestice nastale su mehaničkim putem, što znači da potječu od trošenja diska.

Primjerice, koncentracija barija u prašini od trošenja kočnica i u samim oblogama kočnica mogu biti različite zbog više faktora, uključujući način kako se materijali troše i kako se čestice raspršuju u okolišu. Neki od vjerojatnih razloga su:

1. Disperzija prašine: Kada se kočnice tare, čestice prašine koje se oslobađaju iz obloga kočnica raspršuju se u okolni zrak. To znači da će koncentracija barija biti viša u prašini koja se taloži na okolnim površinama.

2. Reakcije i transformacije: Barij u oblogama kočnica može biti podložan kemijskim reakcijama ili transformacijama tijekom trošenja što može rezultirati oslobađanjem barijevih iona ili spojeva koji se mogu pridružiti prašini.
3. Sadržaj u materijalu obloga: Ako su kočnice izrađene od materijala koji sadrže barij, tada će tijekom trošenja veća koncentracija tog materijala završiti kao prašina. Ovisno o sastavu materijala, barij može biti prisutan u većim količinama.
4. Procesi trošenja: Procesi trošenja kočnica mogu biti složeni, a različiti dijelovi kočnica mogu se trošiti na različite načine. To može rezultirati neravnomjernom raspodjelom barija u prašini.

Tablica 3. Najčešći elementi i njihove koncentracije u oblogama kočnica i prašini od trošenja kočnica [3]

<i>Metal</i>	<i>Kočione obloge (mg/kg)</i>	<i>Čestice od trošenja kočnica (mg/kg)</i>
aluminij	3765	330-2500
barij	2638	5900-74400
kalcij	14300	920-8600
kadmij	<1,0-41,4	<0,06-2,6
kobalt	6,4-45,8	12-42,4
krom	<10-411	135-1320
bakar	11-234000	70-39400
željezo (%)	1,2-63,7	1,1-53,7
kalij	857	190-5100
magnezij	6140	83000
mangan	181-3220	620-5640
natrij	15400	80
nikal	3,6-660	80-730
olovo	1,3-119000	4,0-1290
antimon	0,07-201	4,0-16900
cink	25-188000	120-27300

U najfinijim PM česticama nastalima od trošenja kočnica pronađeni su metalni i ugljikovi spojevi. PIXE analizom (analiza emisija rendgenskim zrakama potaknuta protonima, (engl. *Proton Induced X-ray Emission*)) otkrili su da željezo, od metalnih elemenata, prevladava u obje frakcije, i u finoj i u gruboj, a TEM analizom su pronađeni razni željezni oksidi u finoj frakciji. Osim željeznih nađeni su još i oksidi bakra, kositra i cinka te visoka koncentracija sumpora u svim frakcijama čestica.

Što se tiče ugljikovodikovih spojeva, Raman mikrospektroskopija je pokazala prisutnost čađe, koja je posljedica oksidativnog trošenja i taloženja iz isparljivih tvari, a uz to su nađene i grafitne čestice koje su rezultat abrazivnog trošenja.

Nažalost, samo mali dio organskog sadržaja prašine od trošenja kočnica može se izdvojiti i analizirati konvencionalnim laboratorijskim tehnikama. Među otkrivenim organskim spojevima, najveći postotak su imali polialkilenski glikol etri (56,9 %) i n-alkanoične kiseline (34,3 %), a uz to su u malim koncentracijama nađeni i n-alkani, PAH spojevi i supstituirani PAH spojevi [3].

Iako je potvrđeno prisustvo vrsta kao što su prijelazni metali i ugljikovodikovi spojevi u česticama trošenja, još uvijek postoji malo informacija o specifičnim tvarima PM₁₀ čestica trošenja kočnica, a posebno o njihovoj organskoj frakciji.

2.5. Emisijski faktor

Emisijski faktori (EF) služe za određivanje kvantifikacije emisije određenog onečišćivača pojedinog vozila ili skupa vozila. Emisijski faktori predviđaju količinu onečišćenih čestica koje nastaju po prijedenoj udaljenosti, potrošenoj energiji ili količini potrošenog goriva. Postoje različiti kriteriji ovisno o kategoriji vozila i ovise o različitim parametrima kao što su karakteristike vozila, tehnologije za kontrolu emisija vozila, vrsta i kvaliteta korištenog goriva te uvjeti okoline i rada.

Kako bi se odredila količina emisija, koriste se ili izravna mjerenja iz izvora, uključujući mjerenja u stvarnim uvjetima vožnje i/ili laboratorijske eksperimente, ili se primjenjuje modeliranje prijemnika (receptora). Modeliranje prijemnika je statistička tehnika koja se koristi za određivanje doprinosa pojedinih izvora emisija na ukupne koncentracije onečišćujućih tvari koje se detektiraju na određenom području. Ova metoda se temelji na analizi kemijskih i fizikalnih svojstava onečišćujućih tvari te njihovoj prostornoj raspodjeli kako bi se identificirali izvori emisija te kako bi se procijenio njihov doprinos u ukupnoj koncentraciji onečišćujućih

tvari u zraku. Izravna mjerenja pružaju emisijske faktore za relativno mali broj vozila, ali se provode pod vrlo dobro kontroliranim uvjetima.

Prva skupina istraživača provela je testiranje preko dinamometra koristeći komercijalne kočnice, koje se koriste u osobnim i lakim gospodarskim vozilima (LDV), te su dobili sljedeće rezultate emisijskih faktora od trošenja kočnica: za PM_{10} je raspon 2,9-7,5 mg po prijeđenom kilometru vozila, za $PM_{2.5}$ je 2,1-5,5 mg po prijeđenom kilometru vozila te za $PM_{0.1}$ je 1,2-3,1 mg po prijeđenom kilometru vozila [3]. Gornja granica raspona za emisijski faktor PM_{10} čestica bila je vrlo blizu vrijednosti U.S. EPA od 7,9 mg po prijeđenom kilometru vozila koja je dobivena za benzinska vozila, opremljena uglavnom kočnicama od azbesta. Slični rezultati su dobiveni i u testovima provedenim s nisko-metalnim, polu-metalnim i NAO kočnicama.

Emisijski faktori PM_{10} čestica nastalih prilikom trošenja kočnica u urbanom području, Zürich-Weststrasse, u Švicarskoj, iznosili su 8 ± 4 mg po prijeđenom kilometru osobnih i lakih gospodarskih vozila (LDV) i 81 ± 39 mg po prijeđenom kilometru teških (teretnih) gospodarskih vozila (HDV). Emisijski faktori na mjestu uz autoput, Reiden u Švicarskoj, bili su znatno niži, s vrijednostima od $1,6 \pm 1,1$ i $9,0 \pm 7,0$ mg po prijeđenom kilometru vozila za laka i teška teretna vozila [3]. Iz ovih rezultata se primjećuje koliko manje nastaju štetne emisije čestica, prilikom kočenja, na mjestima poput autoputa gdje se manje usporava i koči.

Prosječni ukupni faktori trošenja kočnica iznose od 10-20 mg po prijeđenom kilometru vozila (LDV) i 50-80 mg po prijeđenom kilometru vozila (HDV), pri čemu se 40 % tih čestica emitira u zrak (PM_{10}). To znači da se 4-8 mg po prijeđenom kilometru vozila za LDV i 20-32 mg po prijeđenom kilometru vozila za HDV raspršuje atmosferskim zrakom [3].

Prilikom mjerenja emisijskih faktora štetnih čestica u Švicarskoj, istraživači su primjetili da su primjetili da su, kako u urbanim područjima tako i na autocestama, ovi elementi usko povezani s trošenjem kočnica: željezo, bakar, cink, molibden, cirkonij, kositar, antimon i barij. Najveći emisijski faktori su pronađeni za željezo i bakar, i za laka i za teška teretna vozila. Barij, cirkonij, molibden, kositar i antimon također su pronađeni u značajnim koncentracijama, ali s nižim vrijednostima emisijskih faktora.

Iz navedenog je zaključeno da je trošenje kočnica uzrok za relativno visoke emisije željeza (do 1 mg po prijeđenom kilometru vozila za putnička vozila) i bakra (0,05-0,7 mg po prijeđenom kilometru vozila za putnička vozila). Antimon pokazuje emisijske faktore u rasponu od 11-51 μ g po prijeđenom kilometru vozila [3].

2.6. Utjecaj i značenje za ljudsko zdravlje

Već od prije postoje istraživanja koja pokazuju da je veličina čestica važan faktor koji utječe na taloženje čestica u dišnom sustavu. Dok se krupne čestice uglavnom talože u gornjem dišnom sustavu (nos i grlo), ultrafine čestice prodiru duboko u pluća. Svjetska zdravstvena organizacija je izvijestila kako kratkoročna i dugoročna izloženost štetnim učincima prilikom udisanja PM čestica može uzrokovati zdravstvene probleme poput respiratornih i kardiovaskularnih bolesti te raka pluća, a ako se zakomplicira postoji i smrtna vjerojatnost.

Budući da duboko prodiru u dišne puteve, onečišćujuće čestice predstavljaju opasnost u vezi s oksidativnim stresom. Oksidativni stres je stanje u kojem prevladava neravnoteža između proizvodnje slobodnih radikala (reaktivne molekule koje sadrže neuparene elektrone) i sposobnosti tijela da neutralizira ove slobodne radikale pomoću antioksidativnih mehanizama. Kada je oksidativni stres prisutan, slobodni radikali mogu oštetiti stanice i tkiva, što može dovesti do upale, oštećenja DNK, proteina i lipida, te doprinijeti razvoju raznih bolesti.

Osim oksidativnog stresa, teški metali se smatraju odgovornima za različite druge negativne reakcije. Epidemiolozi su otkrili visoku povezanost između olova u krvi i kardiovaskularne smrtnosti, a bakar i sumpor su povezali s povećanom mjesečnom smrtnošću. Utvrđeno je da prisutnost željeza, nikla i cinka u udjelu finih čestica imaju veze s kratkotrajnom smrtnošću, a prisutnost kalcija, bakara, željeza, cinka, mangana, olova, titana i vanadija, također u udjelu finih čestica, s dnevnom smrtnošću.

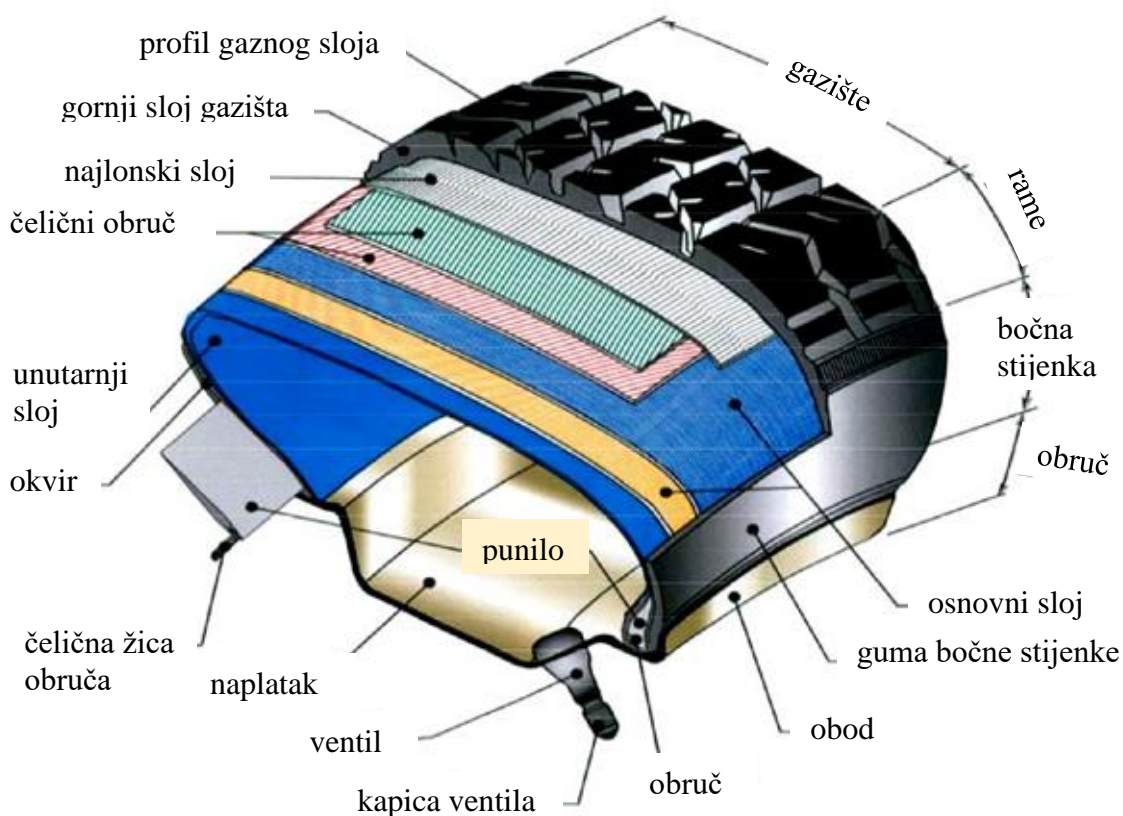
Osim kemijskog sastava i raspodjele veličina, toksičnost čestica trošenja kočnica također ovisi o drugim svojstvima kao što su njihova kemijska površina i površina po masi. Bitno je dobro proučiti sastave onečišćujućih čestica te uzroke njihovog nastajanja kako bi ih potencijalno što više smanjili u budućnosti i tako si osigurali zdraviji i dulji život [3].

3. TROŠENJE GUMA

3.1. Faktor trošenja gume i sastav gume vozila

Faktor trošenja gume je definiran kao ukupna količina izgubljenog materijala po kilometru, a zavisi o nekoliko parametara:

- karakteristike gume - veličina gume (radijus i širina), dubina profila, konstrukcija, tlak i temperatura, površina kontakta, kemijski sastav, prijeđena kilometraža
- karakteristike vozila - masa, raspodjela opterećenja, položaj pogonskih kotača, snaga motora, elektronički sustavi kočenja, tip ovjesa i stanje održavanja
- karakteristike ceste - materijal (bitumen/beton), poroznost, stanje, vlažnost, završna obrada površine
- način vožnje vozila - brzina, linearno ubrzanje, radijalno ubrzanje, frekvencija, intenzitet kočenja i zavoja.



Slika 5. Kompozicija gume [3]

Što se tiče sastava gazišta, on se sastoji od mješavine različitih vrsta guma (41 %) pomiješanih s punilima (30 %), ojačavajućim materijalima (15 %), plastifikatorima (6 %), kemikalijama za vulkanizaciju (6 %) i sredstvima za sprečavanje starenja (2 %) [3].

Neke vrste guma koje se koriste: prirodni gumeni kopolimeri, polibutadienske gume, stirensko-butadienske gume, nitrilne gume, izoprenske gume. Karakteristike čvrstoće poput tvrdoće i otpornosti na trošenje se poboljšavaju dodavanjem punila (primjerice, ugljeni crni prah često se koristi kao punilo). Vulkanizacijski agensi (sumpor, selenij, telurij, tiazoli, organski peroksidi, nitrosojevi) obično čine 1 % ukupne mase gume za pneumatike i svrha im je poboljšati trajnost gume. Ostale kemikalije koje se koriste u procesu vulkanizacije su akceleratori (olovo, magnezij, cink, sumporni spojevi i oksidi kalcija) i retardanti (smjese terpen-razinih kiselina). Sredstva protiv starenja uglavnom uključuju konzervanse dok se plastifikatori (sintetička organska ulja i smole) koriste kao omekšivači kako bi se gumi osigurala elastičnost i ljepljivost.

Doprinos trošenja guma, PM₁₀ česticama, je značajno veći kada se koriste zimske gume (uključujući i rjeđe korištene gume s čavlima) i/ili kada se koriste nepropusni kolnički premazi koji nisu dobro održavani. Čavli, na zimskim gumama, su obično smješteni unutar gume, tako da ne strše izvan nje. Integrirani su u gumenu smjesu tijekom procesa proizvodnje gume. Ovom konstrukcijom se omogućava bolje prianjanje na cesti, posebno na snježnim i ledenim površinama, dok istovremeno pridonose sigurnosti i stabilnosti vožnje.

Procjenjuje se da prosječna guma putničkog vozila traje između 40 000 i 50 000 km prije nego što se istroši, pri čemu se otprilike 10-30% njenog profila otpušta u okoliš [3].

3.2. Nastajanje štetnih čestica

Grube čestice prilikom trošenja guma nastaju mehaničkim putem zbog sile trenja koja nastaje između gaznog sloja gume i ceste, dok finije čestice uglavnom nastaju zbog isparavanja. Fine čestice nastaju termomehaničkim procesom u kojem se, na lokalnim vrućim točkama gaznog sloja gume, postižu visoke temperature preko 180°C (primjerice zbog: ekstremnog skretanja, manevara, potpunog zaustavljanja kočnjem) zbog koje hlapljive tvari iz gume isparavaju.

Većim dijelom, kao posljedica trošenja guma, nastaju relativno velike čestice (>20 µm) te se talože na cestu ili vrlo blizu nje, a otprilike se samo 0,1-10 % nastalih čestica od trošenja guma raspršuje zrakom, iako neki istraživači spominju i brojke do 30 % [3].

Trošenje guma se smatra značajnim izvorom emisija iz prometa koji nisu povezani s ispušnim plinovima, posebno na mjestima uz rub ceste. Vrlo vjerojatno su, osim čestica nastalih trošenjem guma, uključene i čestice trošenja ceste jer je teško razlikovati izvor nastajanja pojedinih čestica. Ovisno o mjestu i specifičnim parameterima korištenim u istraživanju, prijavljeni su i različiti udjeli štetnih emisija čestica nastalih trošenjem gume. Guma vozila ima sklonost razvijanju elektrostatičkog naboja što dovodi do toga da se dio čestica pričvršćuje na površine vozila, što utječe na proučavanje raspodjele veličina čestica.

U tablici 4. prikazana su najvažnija istraživanja koje se bave karakterizacijom čestica trošenja guma u smislu njihove raspodjele mase prema veličini. Bimodalna raspodjela označava da postoje dva glavna vrha u raspodjeli, odnosno dva područja s visokom koncentracijom čestica. Unimodalna raspodjela znači da postoji samo jedan glavni vrh u raspodjeli, odnosno jedno područje s visokom koncentracijom čestica.

Jedna skupina istraživača je testirala ljetne i zimske gume na asfaltiranim površinama pomoću cestovnog simulatora i utvrdili da se veličinska raspodjela prikupljenih čestica, nastalih od trošenja guma, kretala između 5,0 μm i 220 μm , pri čemu je uočen jasan vrh na 70-80 μm . Cestovni simulator je sustav koji se koristi za simuliranje vožnje na cestama u kontroliranim uvjetima. Ovi simulatori obično uključuju stvarne komponente automobila poput upravljača, papučice gasa, kočnice i pedala spojke te ih povezuju s računalnim programom koji stvara virtualno okruženje ceste i vozila. Veličinska raspodjela čestica nastalih od trošenja guma prikupljenih u stvarnim uvjetima vožnje (stalna brzina vožnje, ubrzavanje/kočenje $< 2 \text{ m/s}^2$) bila je slična, s vrhom na 50 μm [3].

Druga skupina istraživača testirala je gume s različitim faktorom trenja prianjanja i zimskim gumama s čavlima na različitim vrstama asfaltiranih podloga te odredili raspodjelu masenih veličina čestica istrošenih guma PM_{10} putem APS-a. Gume s povećanim trenjem pokazale su bimodalnu raspodjelu mase PM_{10} čestica s vrhovima na otprilike 2-3 μm i 8-9 μm , dok su zimske gume s čavlima imale relativno unimodalnu distribuciju s vrhom na 5-6 μm [3].

Treća skupina je testirala zimske gume s čavlima na asfaltiranoj podlozi i pronašli su različite raspodjele mase čestica, zavisno o vrsti gume i brzini. Niže brzine (15 km/h) povezane su s bimodalnom raspodjelom mase čestica, barem za gume s čavlima, gdje su vrhovi bili oko 1,0 i 10 μm , dok su veće brzine (30 km/h) rezultirale pomalo unimodalnom raspodjelom s izraženim vrhom na 9-10 μm [3].

Tablica 4. Pregled najvažnijih istraživanja koje se bave karakterizacijom čestica trošenja guma u smislu njihove raspodjele mase prema veličini [3]

<i>Referenca</i>	<i>Način istraživanja</i>	<i>Testirano na (vrsta guma i podloge)</i>	<i>Metoda</i>	<i>Raspodjela mase po veličini</i>
Kupiainen i sur. 2005.	simulacije na cesti	zimske gume s čavlima na asfaltu	kaskadni impaktor	unimodalna i bimodalna (1,0 μm i 10 μm)
Gustafsson i sur. 2008.	simulacije na cesti	zimska guma s čavlima na podlogama od kamena i gustog betona	APS (> 0,5 μm)	bimodalna (2,5 μm i 8-9 μm)
Aatmeeyata i sur. 2009.	simulacije na cesti	ljetne gume na betonskoj cesti	GRIMM analizator (> 0,3 μm)	bimodalna (0,3 μm i 4-5 μm)
Panko i sur. 2009.	simulacije na cesti	ljetne i zimske gume na gustom asfaltu	APS (> 0,5 μm)	bimodalna (1,0 μm i 5-8 μm)
Sjodin i sur. 2010.	simulacije na cesti	ljetne i zimske gume s čavlima na podlozi od kamena	APS (> 0,5 μm)	unimodalna (2-4 μm)
Kreider i sur. 2010.	simulacije na cesti	ljetne i zimske gume na standardnom asfaltnom	laserska difrakcija (> 0,3 μm)	unimodalna (75 μm)
Hussein i sur. 2008.	izravno mjerenje na cesti	svi tipovi guma na podlozi od kamena i na gustom beton	GRIMM analizator (> 0,265 μm)	unimodalna (3-5 μm)
Kreider i sur. 2010.	izravno mjerenje na cesti	ljetne i zimske gume na asfaltu	laserska difrakcija (> 0,3 μm)	unimodalna (50 μm)
Kwak i sur. 2013.	izravno mjerenje na cesti	zimske gume na asfaltu	kaskadni impaktor (> 0,5 μm)	unimodalna (2-3 μm)

Iz navedenog se zaključuje da se rezultati razlikuju kada je u pitanju masena veličinska distribucija čestica od trošenja guma. Zbog parametara poput vrste gume, brzine vozila, vrste asfalta, mjerne metoda, i slično otežane su usporedbe. Većina istraživanja ima rezultate po bimodalnoj raspodjeli s jednim vrhom u finoj frakciji i drugim vrhom u gruboj frakciji, dok su neka istraživanja naišla na samo jedan vrh, što može biti posljedica ograničenja mjerne opreme.

3.3. Raspodjela broja čestica

Raspodjela broja čestica opisuje broj čestica koje se nalaze u određenim rasponima veličina. Ova raspodjela pruža informacije o broju čestica u svakom rasponu veličina i može biti unimodalna (s jednim vrhom) ili multimodalna (s više vrhova) ovisno o karakteristikama sustava.

U tablici 5. prikazana su najvažnija istraživanja koje se bave karakterizacijom čestica trošenja guma u smislu njihove raspodjele broja čestica.

Prva skupina istraživača su testiranje proveli pomoću simulacije vožnje na cesti u kojima su koristili zimske gume s čavlima na različitim vrstama asfalta. Analizom skupljenih čestica dobili su unimodalnu raspodjelu, ultrafinih čestica, s vrhom između 15-50 nm, ovisno o vrsti guma i podlozi. Osim toga, primijetili su da se više čestica generira pri većim brzinama te da čestice trošenja više nastaju iz guma, budući da je raspodjela čestica i snaga izvora ovisna o vrsti guma.

Druga skupina istraživača testirala je ljetne i zimske gume na podlozi od asfalta, ali su testiranje proveli i izravnim mjerenjem na cesti i u laboratoriju, no unatoč tome što su se testovi proveli u kontroliranim uvjetima vožnje, nisu pronađene ultrafine čestice. Prijavili su unimodalnu raspodjelu broja čestica sa jasnim vrhom na otprilike 25 μm i bimodalnu raspodjelu prilikom testiranja u laboratoriju sa prvim vrhom na 5 μm i drugim na 25 μm [3].

Treća skupina istraživača je istraživala nastajanje vrlo malih i ultrafinih čestica (5,6-562,3 nm) na kontaktu guma i ceste, tijekom izravnog mjerenja na cesti, testirajući ljetne gume na asfaltu. Za normalne uvjete vožnje (stabilna vožnja pri brzinama od 50, 70, 100 i 120 km/h, skretanje na promjeru od 48 m pri brzini od 30 km/h i lateralnoj akceleraciji od 2,9 m/s^2 , ubrzanje do 2,4 m/s^2 , kočenje s ubrzanjem manjim od 3 m/s^2) nije primijećeno povećanje koncentracije čestica u ultrafinoj kategoriji. S druge strane, ekstremni uvjeti vožnje (npr. skretanje na promjeru od 48 m pri brzinama od 46-48 km/h i lateralnoj akceleraciji od 8,0 m/s^2 , ubrzanja s trkaćim startom) rezultirali su povišenim koncentracijama ultrafinih čestica u usporedbi s pozadinskim

mjerenjem [3]. Nažalost, istraživači nisu mogli jasno ustanoviti jesu li čestice potjecale od guma, cestovne površine ili iz oba izvora jer nije provedena kemijska analiza čestica.

Tablica 5. Pregled istraživanja u literaturi vezano uz raspodjelu broja čestica u zraku nastalih trošenjem guma [3]

<i>Referenca</i>	<i>Način istraživanja</i>	<i>Testirano na (vrsta guma i podloge)</i>	<i>Metoda</i>	<i>Raspodjela broja čestica</i>
Dahl 2006.	simulacije na cesti	zimski guma s čavlima na podlogama od kamena i gustog betona	SMPS	unimodalna (15-50 μm)
Gustafsson 2008.	simulacije na cesti	zimski guma s čavlima na podlogama od kamena i gustog betona	SMPS	unimodalna (15-50 μm)
Aatmeeyata 2009.	simulacije na cesti	ljetne gume na betonskoj cesti	GRIMM analizator ($> 0,3 \mu\text{m}$)	bimodalna (0,3 μm i 1,7 μm)
Panko 2009.	simulacije na cesti	ljetne i zimske gume na gustom asfaltu	SMPS	unimodalna (30-90 μm)
Kreider 2010.	simulacije na cesti	ljetne i zimske gume na standardnom asfaltnom	laserska difrakcija i TOM ($> 0,3 \mu\text{m}$)	bimodalna (5 μm i 25 μm)
Sjodin 2010.	simulacije na cesti	ljetne i zimske gume s čavlima na podlozi od kamena	SMPS	unimodalna (30 μm) samo za zimske gume s čavlima
Kreider 2010.	izravno mjerenje na cesti	ljetne i zimske gume na asfaltu	laserska difrakcija i TOM ($> 0,3 \mu\text{m}$)	unimodalna (25 μm)

Iako postoje neka istraživanja koja ne izvještavaju o generiranju ultrafinih čestica pri normalnim uvjetima vožnje, postoje i druga istraživanja koja su prijavila značajno prisustvo ultrafinih čestica u PM₁₀ kao posljedica trošenja guma, bez obzira na vrstu guma i podloge. Većina tih istraživanja su provedena u laboratoriju pod kontroliranim uvjetima koji isključuju mogućnost kontaminacije iz drugih izvora, no i dalje se provode različita istraživanja kako bi se što više saznalo o raspodjeli čestica koje nastaju od guma vozila.

3.4. Kemijske karakteristike

Već je gore navedeno od kojih se sve komponenata sastoji guma vozila, a te komponente su građene od raznovrsnih kemijskih elemenata i spojeva ovisno o tipu vozila za koje će se te gume koristiti te o potrebnim performansama. Glavnu komponentu gaznog sloja gume čine raznovrsni hidrokarboni, a osim njih se kao punila koriste i silicij i industrijska čađa (poznatija kao engl. *carbon black*).

Što se tiče anorganskih spojeva u zraku, nastalih od čestica trošenja guma na površini ceste, uočeni su u tragovima ovi elementi: silicij, aluminijski, kalcij, titanij, sumpor, kalij, bakar, željezo, olovo, magnezij, telurij, selenij i kadmij koji se koriste u proizvodnji guma.

Prva skupina istraživača, koja je testirala zimske gume i gume s čavlima na različitim podlogama, otkrila je da se u česticama koje se raspršuju zrakom najvećim dijelom nalaze aluminijski i silicij. Te čestice većinom nastaju trošenjem podloge ceste, dok od trošenja guma uglavnom nastaju fine čestice u kojima prevladava sumpor te anorganski i organski spojevi cinka. Cink je u većem postotku nađen u urbanim područjima u odnosu na autoceste te se nalazi u svim veličinama štetnih čestica koje nastaju prilikom trošenja guma, a ipak malo više u onima manjim od 2 μm [3]. Koncentracije cinka koje nastaju od trošenja guma automobila veće su u odnosu na koncentracije pronađene prilikom testiranja štetnih čestica koje nastaju od kočnica. Cink je, zbog toga, istraživačima postao specifičan uzorak za mjerenje štetnih emisija čestica nastalih od trošenja guma, međutim postoje različiti izvori cinka u okolišu pa je upitno koliko su svi ti rezultati pouzdani.

Druga skupina istraživača bazirala se na organske tvari koje nastaju prilikom trošenja guma te su se najviše istaknuli ugljikovi spojevi i benzotiazoli, a osim njih su pronađeni i n-alkani, n-alkanske kiseline i prirodne smole. Policiklički aromatski ugljikovodici (engl. *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*, PAH) su skupine organskih spojeva koji se sastoje od više spojenih aromatskih prstena od ugljika i vodika. Njihov udio u štetnim emisijama čestica nastalih od trošenja gume je oko 5 % što je malo u odnosu na njihov udio koji nastaje iz ispušnih plinova,

iz čestica trošenja cesta i sl., no bitno ih je spomenuti jer zagađuju okoliš zbog svoje toksičnosti, a imaju i štetan faktor na ljude zbog svojih kancerogenih svojstava. Benzotiazoli su organski spojevi koji sadrže zajedno povezane aromatske prstene i tiazolne prstene. Iako su prisutni u malim koncentracijama u proizvodima za antifriz, jedni su od specifičnih uzoraka pomoću kojih se identificiraju i prate tragovi čestica koje potječu od trošenja guma na cesti. Policiklički aromatski ugljikovodici i benzotiazoli mogu se pronaći u različitim veličinama u česticama zraka, a to ovisi o izvoru i procesima u kojima nastaju te čestice. Najzastupljeniji su u finoj frakciji, međutim mogu se naći i u ultrafinoj te grubljoj veličini.

3.5. Emisijski faktor

Emisijski faktori (EF) služe za određivanje kvantifikacije emisije određenog onečišćivača pojedinog vozila ili skupa vozila. Predviđaju količinu onečišćenih čestica koje nastaju po prijeđenoj udaljenosti, potrošenoj energiji ili količini potrošenog goriva. Kako bi se odredila količina emisija, PM čestica iz guma, koriste se izravna mjerenja iz izvora (npr. uzimanje uzoraka na cesti, iz simulacija ceste) i modeliranje. Kako je već prije rečeno i analizirano, brzina, vrsta gume, vrsta podloge i uvjeti vožnje su najznačajniji parametri za štetne emisije čestica nastalih iz guma. Gume mogu izgubiti do 10 % svoje mase kroz vrijeme njihovog korištenja, a pri normalnim uvjetima vožnje u okoliš se ispušta manje od 10 % materijala iz gume u obliku PM₁₀ čestica.

Razne skupine istraživača su prema navedenim parametrima prijavili različite emisijske faktore za PM₁₀ čestice, a neki od njih su: 9,0 mg po prijeđenom kilometru vozila za zimske gume, 3,8 mg po prijeđenom kilometru vozila za ljetne gume, 7,0 mg po prijeđenom kilometru vozila uzimanjem uzoraka sa ceste. Ove vrijednosti slične su starijim faktorima emisije PM₁₀ prijavljenim za laka gospodarska vozila (5,0 mg po prijeđenom kilometru vozila) prema U.S. EPA. Za gume s čavlima prijavljen je emisijski faktor od 350 mg po prijeđenom kilometru vozila što je znatno veće od dosad navedenih vrsta guma [3].

Modeliranjem receptora (engl. *receptor modeling*), analitička tehnika koja se koristi za procjenu izvora zagađenja ili emisija čestica u okolišu, u tunelu Berlin-Tegel, određeni su faktori emisije PM₁₀ čestica, 6,1 mg po prijeđenom kilometru vozila za laka gospodarska i osobna vozila, a 31 mg po prijeđenom kilometru vozila za teška teretna vozila. Slične rezultate zabilježio je i Regionalni informacijski i simulacijski sustav zagađenja zraka (engl. *Regional Air Pollution Information and Simulation*, RAINS), a uz to su odredili i emisijske faktore PM_{2,5} čestica u iznosu od 0,3 mg po prijeđenom kilometru vozila za laka gospodarska i osobna vozila

i 2,0 mg po prijeđenom kilometru vozila. Naravno, nisu svi istraživači došli do istih rezultata, neki su odredili i puno veće brojke u odnosu na prije spomenute, ali to opet sve zavisi o navedenim parametrima.

U britanskom voznom parku emisijski faktori pronađeni su u ovom rasponu: za putnička vozila 6-7.5 mg po prijeđenom kilometru za PM_{10} i oko 5 mg po prijeđenom kilometru za $PM_{2.5}$, za teška teretna vozila 16-18.5 mg po prijeđenom kilometru za PM_{10} i 11.5-13 mg po prijeđenom kilometru za $PM_{2.5}$, za vučna teška teretna vozila 35 mg po prijeđenom kilometru za PM_{10} i 25 mg po prijeđenom kilometru za $PM_{2.5}$ [3].

Naravno, uvijek se postavlja pitanje koliko su ta mjerenja pouzdana, a na to je pitanje uvijek teško dati odgovor jer prilikom ovakvih ispitivanja može doći do sprječavanja nakupljanja čestica na filterima tijekom sakupljanja uzoraka zbog elektrostatičkog naboja čestica trošenja guma, a osim toga mogu nastati i poteškoće u razlikovanju čestica koje su nastale od trošenja guma od onih nastalih od trošenja ceste.

3.6. Utjecaj na zdravlje

Štetne emisije od čestica guma vozila, testirale su se različitim metodama na različitim organizmima i pronađeni su određeni elementi koji imaju štetan utjecaj na zdravlje živih bića. Ta štetnost je značajna, ali je manja u odnosu na štetne emisije iz ispušnih plinova iz primjerice dizelskih vozila.

Jedna od vrsta testiranih guma su gume sa čavlima čija je svrha bolje prianjanje za podlogu u zimskim uvjetima, no njihova je velika mana što prilikom dodira između čeličnih čavala i podloge može doći do otpuštanja sitnih metalnih čestica u okoliš. Metalne čestice mogu se taložiti na cesti i okolnom području, a zatim se mogu podići u zrak. Povećana koncentracija metalnih čestica u zraku može imati negativan utjecaj na kvalitetu zraka, posebno u urbanim područjima. U velikim količinama su štetne za ljudsko zdravlje, a mogu pridonijeti i problemima s dišnim sustavom i povećati rizik od respiratornih bolesti.

Neka ispitivanja su se provodila na laboratorijskim životinjama, izoliranim staničnim kulturama, tkivima i organima u kontroliranim uvjetima u laboratoriju. Kelacija je postupak kojim se izdvajaju određeni metali ili kemikalije iz uzoraka čestica guma te se potom analiziraju kako bi se točno utvrdilo koji su se metali izdvojili. Izlaganjem određenih organizama (mali planktonski račići, mikroalge prisutne u slatkovodnim područjima, vodene buhe), česticama koje su prošle proces kelacije, pokazalo se da je smanjen toksični utjecaj na te organizme u odnosu na organizme koji su bili izloženi štetnim česticama prije kelacije. Metodom kelacije,

rezultati su pokazali su da su cink i neki organski spojevi najveći zagađivači i da imaju najveći utjecaj na zdravlje živih bića pogotovo na respiratorni sustav [3].

4. USPOREDBA UKUPNIH EMISIJA ČESTICA KOJE ISPUŠTAJU ELEKTRIČNA VOZILA I VOZILA S MOTOROM S UNUTARNJIM IZGARANJEM

Električna vozila su svrstana među vozila bez emisija jer nemaju ispuh, međutim i dalje pridonose štetnim emisijama koje nisu vezane uz ispuh, već su vezane za štetne čestice koje nastaju trošenjem guma, kočnica i podloge ceste. Štoviše zbog svoje mase moguće je da čak i više pridonose štetnim emisijama koje nisu iz ispuha u odnosu na vozila s motorima s unutarnjim izgaranjem.

Eksperimentalnom analizom istražene su ispušne i neispušne emisije koje proizvode vozila s Ottovim (benzinskim) motorom (ICEV), vozila s Dieselovim (dizelskim) motorom (ICEV) i električna vozila (EV). Rezultati analize pokazali su da su faktori emisija čestica za ukupne emisije PM čestica kod vozila s unutarnjim izgaranjem i električnih vozila ovisni i o udjelu sekundarnih emisija PM čestica iz ispušnih plinova, vrsti kočnih pločica i intenzitetu regenerativnog kočenja kod električnih vozila. Primarne čestice nastaju uslijed trenja između kočnih obloga i diskova, a sekundarne iz ispušnih plinova. Vrlo je bitno o kojim česticama je riječ jer se koncentracija štetnih emisija mijenja ovisno gledaju li se primarne ili primarne i sekundarne čestice zajedno prilikom usporedbe navedenih vozila. Faktori emisije primarnih čestica određeni su izravno korištenjem gravimetrijske metode. Gravimetrijska metoda (metoda vaganja ili metoda težinskog mjerenja) je tehnika mjerenja mase čestica u uzorku zraka kako bi se odredila njezina količina. Uzorak zraka se skuplja na poseban filter, koji se zatim precizno važe te se uspoređuje masa prije i poslije skupljanja čestica. Razlika u masi filtra prije i poslije skupljanja čestica daje informacije o koncentraciji čestica u zraku. Emisijski faktori sekundarnih čestica su izračunati neizravno pomoću konverzijskih faktora kako bi se odredila pretvorba tvari koje se transformiraju u plinove pod određenim uvjetima poput dušikovih oksida (NO_x), sumporovog dioksida (SO₂) i amonijaka (NH₃) u PM čestice [4].

Primjerice, ako se uzimaju u obzir samo primarne emisije čestica iz ispušnih plinova, ukupni faktori emisija PM₁₀ kod električnih vozila, s neazbestnim kočnim pločicama, iznose 10-17 % više (47,7-49,3 mg po prijeđenom kilometru vozila) u odnosu na benzince (42,3 mg po prijeđenom kilometru vozila) i dizelaše (43,2 mg po prijeđenom kilometru vozila). Faktori emisije su drugačijih iznosa zavisno o kojim se kočnim pločicama radi, no kada bi se gledale zajedno i primarne i sekundarne PM₁₀ čestice iznosi bi izgledali ovako: za električna vozila 47,7-57,7 mg po prijeđenom kilometru vozila, za benzince 56,5-70,5 mg po prijeđenom kilometru vozila i za dizelaše 58,0-72,0 mg po prijeđenom kilometru vozila [4]. Ukratko, kada

se gledaju ukupne emisije, vozila s motorima s unutarnjim izgaranjem imaju veću koncentraciju štetnih emisija od električnih.

Upotrebom regenerativnog kočenja kod električnih vozila te smanjenjem mase vozila za 3.5%, ukupni faktori emisija primarnih PM čestica bili bi sličniji onima koji su izmjereni kod vozila s motorima s unutarnjim izgaranjem [4]. Regenerativno kočenje se koristi u električnim vozilima i hibridnim vozilima kako bi se povećala energetska učinkovitost i produžio vijek trajanja baterija i kočnica. Kinetička energija se, pri kočenju ili usporavanju, pretvara natrag u električnu energiju koja se pohranjuje u bateriji. Vrsta cestovne podloge također je jedan od bitnih parametara za mjerenje štetnih emisija.

4.1. Testna vozila i metode

Kao osnovno vozilo za ispitivanje odabrana je Hyundai KONA (Hyundai Motor Company, Koreja) jer se može opremiti s tri različita motora: benzinskim, dizelskim i električnim. Posljedično se lakše i uspješnije mogu uspoređivati ukupne emisije čestica ovisno o tipu pogona te o uvjetima vožnje. vrsta benzinskog motora koji kombinira turbo punjač i sustav izravnog ubrizgavanja goriva.

Tablica 6. Specifikacije za vozila s motorima s unutarnjim izgaranjem i električna vozila [4]

<i>Model</i>	<i>Gorivo</i>	<i>Pogonski sklop</i>	<i>Radni volumen cilindra (cm³)</i>	<i>Godina</i>	<i>Brojač prijeđene udaljenosti (km)</i>	<i>Katalizator</i>	<i>Masa (kg)</i>
KONA 1.6T	benzin	T/C GDI motor	1591	2018.	92 998	TWC	1370
KONA 1.6T	dizelsko gorivo	T/C DI motor	1582	2019.	58 091	DPF+LNT	1395
KONA EV	baterija	električni motor	-	2020.	25 000	-	1665

U tablici 6. su prikazani parametri i karakteristike sva tri tipa Hyundai KONA-e. Benzinac je imao 1.6L turbo-benzinski motor s direktnim ubrizgavanjem goriva (engl. *Gasoline Direct Injection*, GDI) i trosmjerni katalizator (engl. *Three-Way Catalyst*, TWC). Dizelaš je imao 1.6L dizelski turbo-punjeni motor te filter za čestice dizela (engl. *Diesel Particulate Filter*, DPF) i uređaj za smanjenje emisija dušikovih oksida (engl. *Lean NOx Trap*, LNT). U zadnjem stupcu tablice primjećuje se da je električno vozilo za 20 % teže od vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem zbog ugrađene baterije [4].

4.2. Emisije iz ispuha

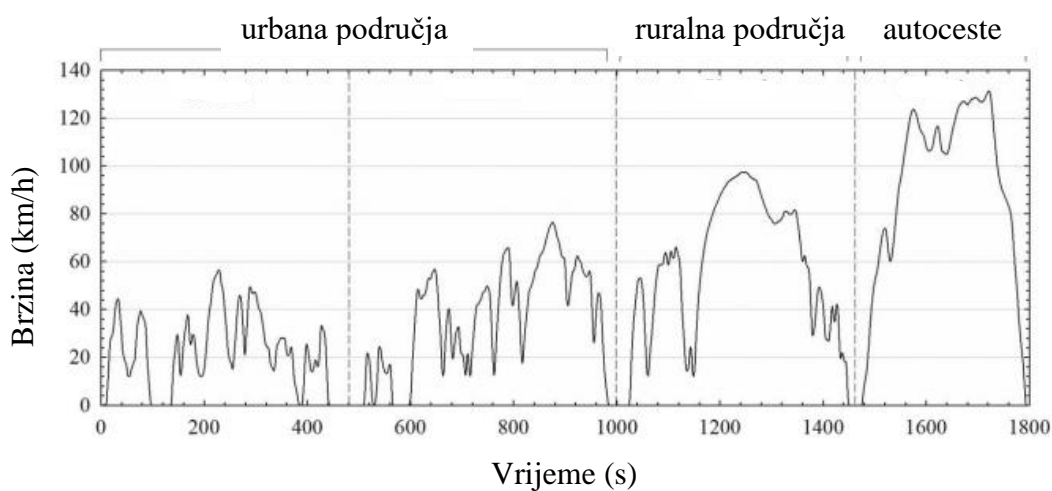
Kako bi se izmjerile ispušne emisije benzinskog i dizelskog vozila, provedeno je ispitivanje vozila na valjcima (engl. *chassis dynamometer*) primjenjujući postupak ispitivanja motora prema standardnom postupku za ispitivanje motora i mjerenje njihovih emisija. Ovaj postupak omogućuje precizno mjerenje emisija ispušnih plinova vozila tijekom simuliranja stvarnih uvjeta vožnje u kontroliranim uvjetima laboratorija te je bitan za procjenu utjecaja vozila na okoliš i pridržavanju regulacija o emisijama kako bi se osiguralo da vozila ispunjavaju propisane standarde emisija.

Faktor konverzije PM_{2.5} čestica može se procijeniti korištenjem nekoliko različitih metoda, ali u ovom istraživanju korištena je ReCiPe metoda. ReCiPe (engl. *Relevance and Performance in Life Cycle Assessment*) je metoda koja se koristi u ocjeni životnog ciklusa (engl. *Life Cycle Assessment*, LCA) kako bi se procijenili ekološki utjecaji proizvoda, procesa ili sustava tijekom njihovog cijelog životnog ciklusa. Koristi karakterizacijske faktore koji pretvaraju količinu emisija ili potrošnje resursa u ekološke efekte, kao što je PM_{2.5}. 24 % amonijaka (NH₃), 11 % dušikovih oksida (NO_x) i 29 % suporovog dioksida (SO₂) prisutnih u ispušnim plinovima pretvara se u PM_{2.5} čestice [4]. Koncentracije ova tri plina mjerene su izravno povezivanjem Fourierove transformacijske infracrvene spektrometrije (engl. *Fourier transform infrared spectrometer*, FTIR) na ispušnu cijev vozila. FTIR je tehnika analize koja se koristi za identifikaciju i kvantitativno mjerenje molekula u uzorcima. Temelji se na svojstvima apsorpcije infracrvenog zračenja od strane molekula, a prednosti FTIR metode su: visoka osjetljivost, brzo analiziranje i sposobnost identifikacije različitih kemijskih spojeva.

Svjetski usklađeni ciklus za ispitivanje lakih vozila (engl. *World-wide harmonized Light-duty Test Cycle*, WLTC) je globalno usklađeni testni ciklus za laka vozila, razvijen za mjerenje emisija ispušnih plinova i potrošnje goriva. Podijeljen je u četiri faze vožnje prikazan na slici 6. koje simuliraju vožnju u urbanim područjima (v_{\max} : 56,5 km/h), predgrađima (v_{\max} :

76,6 km/h), ruralnim područjima (v_{\max} : 97,4 km/h) i autocestama (v_{\max} : 131,3 km/h) [4].

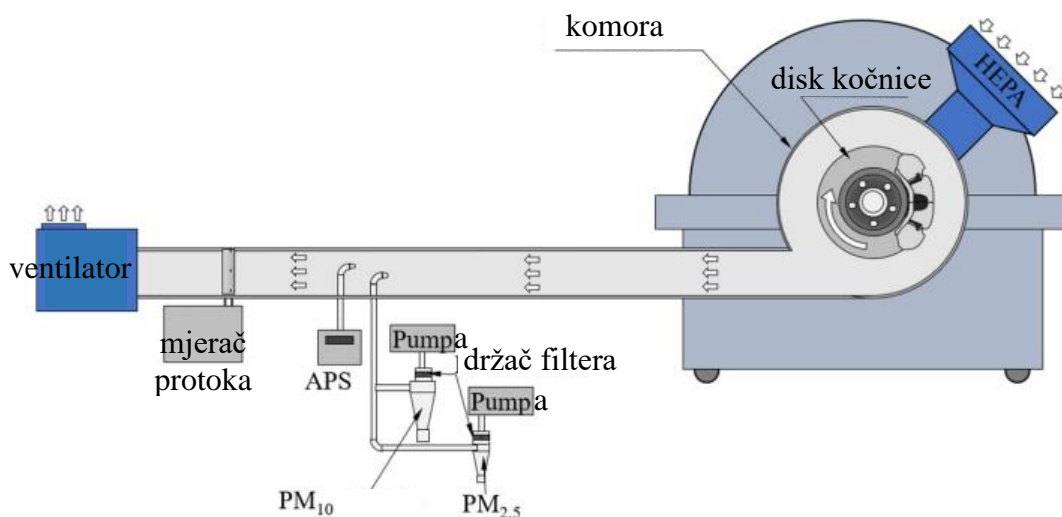
Emisije po prijednom kilometru mogu značajno varirati zbog razlika u maksimalnoj brzini i dinamici vožnje pa je bitno razlikovati tipove cesta. Podaci o vožnji u urbanim područjima i predgrađima su spojeni kako bi se simulirala urbana područja, dok je razlika između ruralnih cesta i autocesta zadržana.



Slika 6. Profili brzina za četiri različite WLTC faze [4]

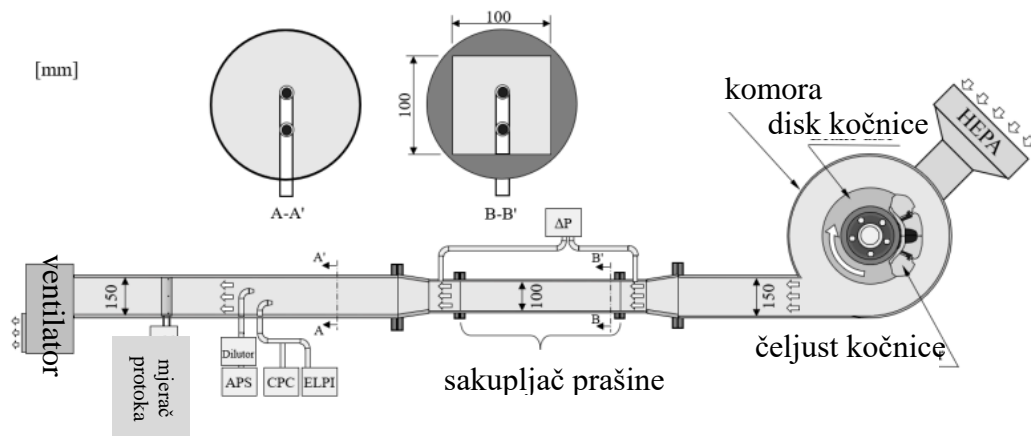
5. MJERENJA EMISIJA GUMA U KOČNICA U LABORATORIJSKIM UVJETIMA

5.1. Emisije koje nastaju od trošenja kočnica



Slika 7. Shema testnog postava za mjerenje čestica nastalih trošenjem kočnica pomoću dinamometra [4]

Kako je već prije navedeno čestice od trošenja kočnica nastaju mehaničkim putem prilikom dodira kočnih pločica i diskova uslijed procesa kočenja. One čine 55 % ukupnih čestica onečišćenja koje nisu vezane s ispušnim plinovima vozila te čine 21 % ukupnih čestica veličine do 10 μm , tj. PM₁₀ čestica, u prometu na cestama [4]. Kako bi se mjerile te emisije na tri spomenuta pogonska sklopa, korišten je dinamometar za kočnice prikazan na slici 7. i na slici 8.



Slika 8. Shematski prikaz kočnog dinamometra i modula za testiranje skupljača prašine (inercijalnog separatora, ESP-a ili hibridnog precipitatora) [5]

Na osovinu dinamometra postavljen je rotirajući uteg, mase 280 kg i promjera 120 cm, kako bi se simulirao moment inercije od $50,4 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, koji odgovara ukupnoj masi vozila s jednim putnikom, uz pretpostavku raspodjele sile kočenja u omjeru 7:3 između prednjih i stražnjih kočnica. Brzina vozila se mjeri na temelju kotača s gumama dimenzija 205/65R16. Kotači s gumama dimenzija 205/65R16 je konfiguracija koja se često koristi na različitim vrstama vozila. Emisijski faktor izmjeren na dinamometru kočnica množi se faktorom 2,86 kako bi se dobile emisije po vozilu na temelju pretpostavljene raspodjele sile kočenja od 7:3 [4] [5].

U ovom istraživanju dinamometar je mogao simulirati brzine vozila do 150 km/h. Kočni disk napravljen je od lijevanog željeza, a promjer mu je 300 mm, a testirane su neazbestne i niskometalne kočne obloge. Tlak kočnog ulja bio je u rasponu od 1 do 50 bara. Brzina rotacije kočnog diska i tlak kočenja automatski su kontrolirani prema profilu brzine vožnje. Temperatura diska mjerena je pomoću beskontaktnog infracrvenog termometra koji je postavljen na površini diska iza kočne čeljusti. [5]

Masa vozila s motorima s unutarnjim izgaranjem iznosile su oko 1400 kg, što je odgovaralo inerciji korištenoj u ovom istraživanju. Električno vozilo je oko 20 % veće mase pa se i njegova inercija morala povećati za 20 %. S obzirom na tehničko ograničenje dinamometra, pretpostavljeno je da je emisijski faktor čestica iz trošenja kočnica kod električnog vozila 20 % veći od onog kod vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem [4]. S obzirom da su provedena istraživanja koja su pokazala da se čestice trošenja guma povećavaju s povećanjem mase vozila, to je moglo tako biti izvršeno.

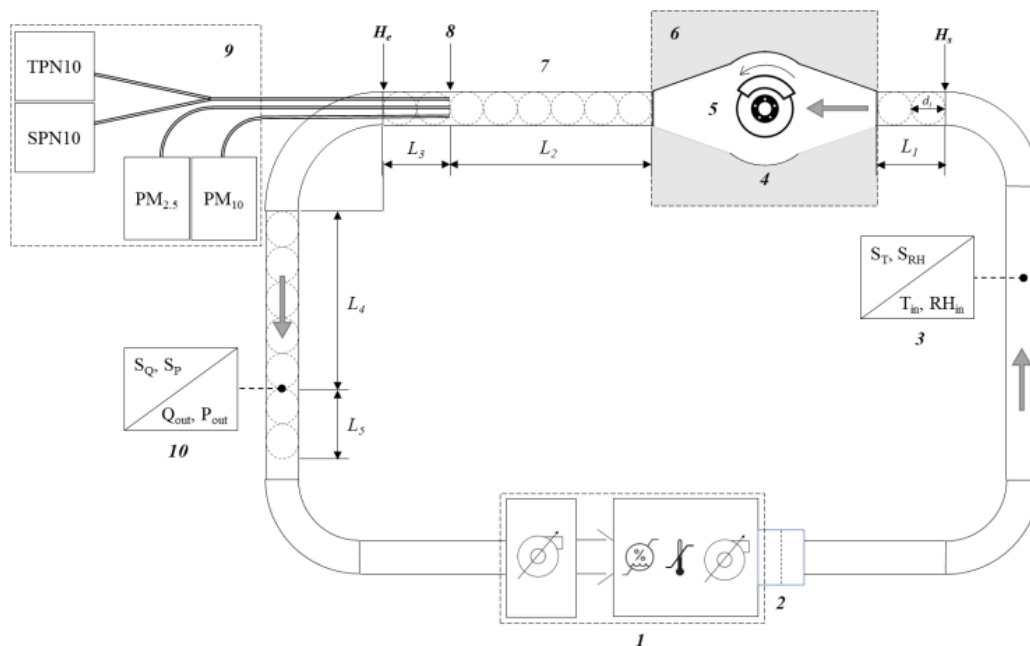
Djelovanje intenziteta regenerativnog kočenja na stvaranje PM čestica trošenja kočnica uzeto je u obzir prilikom mjerenja. Regenerativno kočenje može smanjiti emisije trošenja

kočnica za čak 95 %. Na temelju analiza načina vožnje dokazalo se da smanjenje emisija trošenja kočnica može doseći i iznos od 90 % ukoliko se koristi regenerativno kočenje. Intenzitet regenerativnog kočenja postavljen je na 50 % kao umjereno regenerativno kočenje i 90 % kao snažno regenerativno kočenje. Emisijski faktor emisija trošenja kočnica smanjen je sukladno tome.

Također, korišten je aerodinamički mjerač čestica (APS), koji detektira mikročestice u rasponu 0,52-19,8 μm , kako bi se mjerile čestice nastale trošenjem kočnica [4].

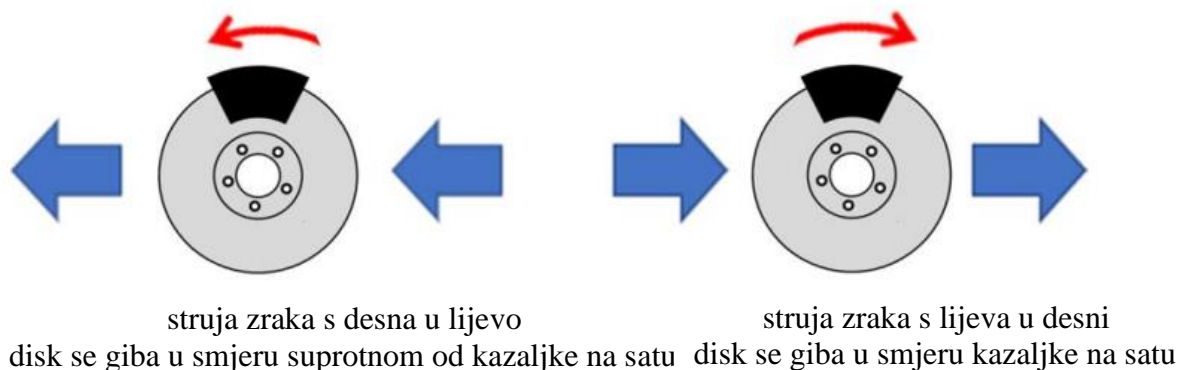
Istraživanje je simuliralo emisije čestica od trošenja kočnica na vozilu pod određenim uvjetima kako bi se razumjelo kako se takve čestice oslobađaju tijekom vožnje. Faktor raspodjele sile kočenja i ostali parametri uzeti su u obzir kako bi se postigla što realnija simulacija.

Na slici 9. prikazan je još jedan mjerni postav s dinamometrom pomoću kojeg se mjere štetne emisije čestica kočnica. Prikazani sustav sadrži jedinicu za kondicioniranje kojom se kontrolira temperatura i vlažnost te opskrbljuje sustav ventiliranim zrakom. Ventilirani zrak ulazi u zatvoreni prostor gdje je postavljen cijeli sklop kočnice koji se testira. Taj prostor je izravno povezan s tunelom za sakupljanje čestica blizu čijeg su kraja montirane tri (ili četiri) sonde. Sonde se koriste za izdvajanje (prikupljanje) čestica iz tunela prema instrumentima (analizatorima) za mjerenje PM i PN. Uređaj za mjerenje protoka smješten je unutar tunela, ali nakon mjesta gdje se izdvajaju (prikupljaju) čestice. Postoji nekoliko prihvaćenih konfiguracija pozicioniranja podsustava za pripremu zraka i kontrolu sustava. Ispitno mjesto (ispitna kabina) bilo koje konfiguracije mora uključivati najmanje podsustave i karakteristike kako je to već navedeno u GTR-u [6].



Slika 9. Mjerni postav s dinamometrom za provođenje testa emisija pri kočenju u laboratoriju [6]

Raspored uključuje: jedinicu za kondicioniranje zraka s ventilatorom (1), rashlađivač zraka s filtrom (2), senzore temperature i vlažnosti hlađenog zraka (3), zatvoreni prostor u koji je postavljen sklop kočnice (4), sklop kočnice povezan s dinamometrom (5), dinamometar (koji je samo naznačen sivom površinom) (6), tunel za sakupljanje čestica (7), površinu sakupljanja čestica s odgovarajućim PM i PN sondama (8), skup instrumenata (analizatora) za mjerenje mase PM i koncentracija (broja) PN čestica (9).



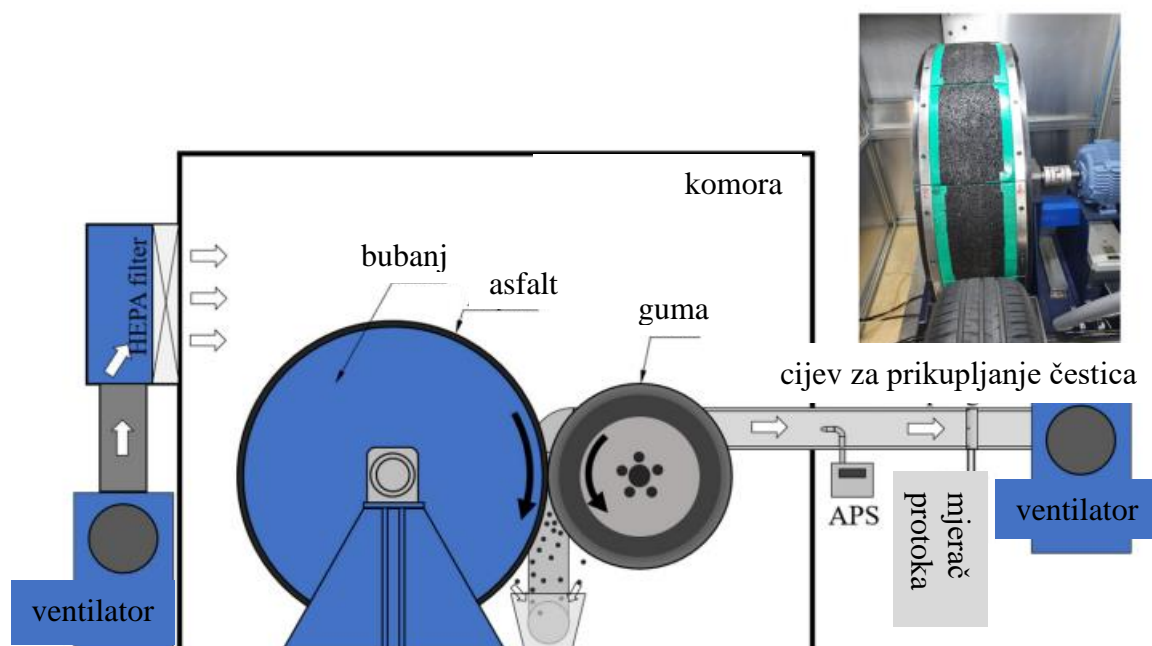
Slika 10. Shematski prikaz rotacije diska iz pogleda [6]

Na ispitnom mjestu (ispitnoj kabini) konfiguracija kočnice mora biti tako postavljena da zrak s česticama struje iz kočnica koja uvijek rotira u smjeru vožnje prema naprijed, kako je prikazano na slici 10. Kada hladni zrak struji s desna na lijevo (slika 10. lijevo), disk mora rotirati u smjeru suprotnom kazaljci na satu. Kada hladni zrak struji s lijeva na desno (slika 10. desno), disk mora rotirati u smjeru kazaljke na satu [6]. Alternativni smjerovi rotacije nisu dopušteni te zato treba pripaziti da ne dođe do nevažjećeg testa.

5.2. Emisije koje nastaju od trošenja guma

Kako je već prije navedeno čestice od trošenja guma nastaju mehaničkim putem djelovanjem smične sile između gaznog sloja gume i površine ceste. Ovisi o različitim parametrima poput vrste gume, tipa ceste, brzini vožnje i slično.

Za mjerenje emisija trošenja guma, korišten je simulator trošenja guma, u laboratoriju, koji se sastoji od bubnja, gume i dva motora. Simulator je zatvoren u komori dimenzija 3,5 m (duljina) × 2,4 m (širina) × 2,2 m (visina) kako bi se isključile smetnje od ambijentalnih čestica, a čisti zrak se dovodi kroz HEPA filter [4]. Masena koncentracija raspodjele čestica, određena trenjem gaznog sloja gume i površine ceste, mjerena je pomoću APS-a. Simulator je prikazan na slici 11.

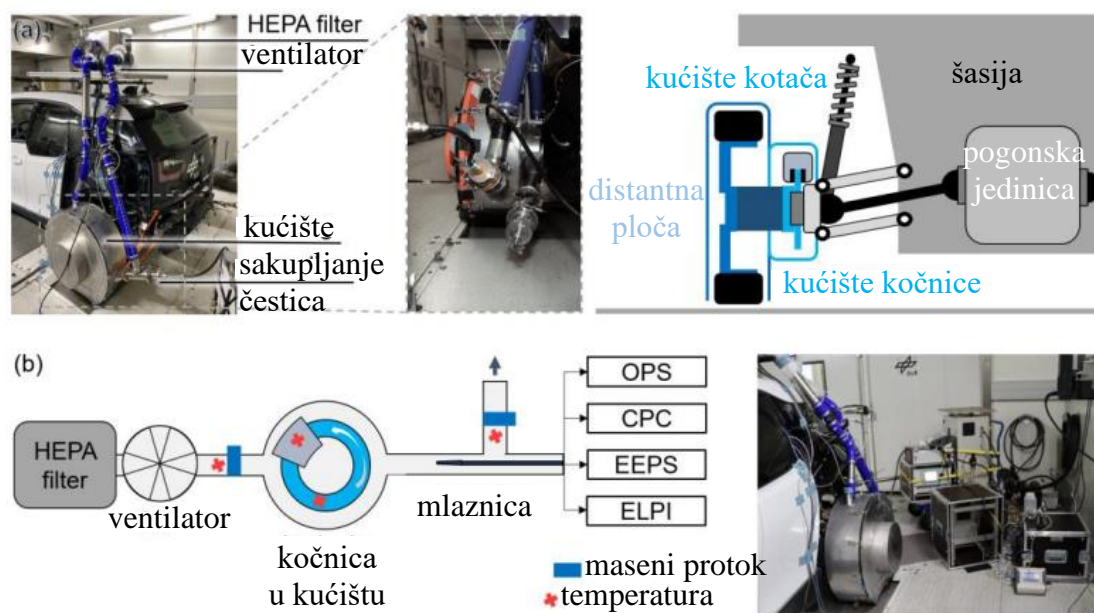


Slika 11. Shema testnog postava za ispitivanje i mjerenje karakteristika čestica trošenja guma [4]

U laboratorijskim mjerenjima, korištenjem simulatora trošenja guma, omjer $PM_{2.5}$ i PM_{10} čestica iz trošenja guma iznosio je 0,16. Iz tog omjera pretpostavljeno je da se, pod uvjetima vožnje na cesti, 5 % istrošenog gaznog sloja pretvara u PM_{10} čestice, od čega se 16 % kategorizira pod $PM_{2.5}$ čestice [4].

Ispitivanja u stvarnim uvjetima vožnje na cesti provedena su na pet kilometara dugoj cesti korejskog instituta za ispitivanje i istraživanje automobila (KATRI), smještenom u predgrađu Hwaseonga u Koreji. Testovi su se morali provoditi na izoliranom području kako emisije ispušnih plinova iz susjednih vozila ne bi utjecale na točnost i pouzdanost mjerenja. Površina testne ceste prekrivena je asfaltnim betonom. Svako ispitno vozilo prešlo je ukupno 550 km ceste bez skretanja, pri konstantnim brzinama od 50, 80 i 110 km/h. Ispitivanja su provedena tri dana za redom, svaki dan jedan od tri različita pogona vozila. Kako bi se simulirali različiti tipovi cesta, brzine vozila odabrane su tako da simuliraju vožnju u urbanoj okolini, ruralne ceste i autoceste, uzimajući u obzir ograničenja brzine za svaki tip ceste u Koreji. Gubitak gaznog sloja guma mjerio se pomoću mjerne vage s rezolucijom od 0,1 g, pri čemu se pretpostavilo da 5 % i 0,8 % gubitka gaznog sloja gume rezultira emisijama PM_{10} i $PM_{2.5}$ čestica iz guma [4].

Na slici 12. prikazan je još jedan ispitni postav na BMW i3, koji je odabran za testove električnog vozila koja se koriste u urbanim područjima. Masa vozila je 1228 kg, a kapacitet baterije 60 Ah [7].



Slika 12. Prilagođena kućišta s ulazima i izlazima zraka dizajnirane oko kočnica i guma [7]

Na slici 12. (a) prikazan je mjerni postav na vozilu, za uzimanje uzoraka, za mjerenje emisija vezanih za čestice trošenja kočnica i guma. Postav uključuje odvojena kućišta za gume i kočnice, ventilacijski sustav i senzore za parametre vozila. U (b) dijelu slike prikazan je zatvoreni sustav sakupljanja čestica koje nastaju trošenjem kočnica i povezana mjerna oprema (TSI 3330 optički uređaj (analizator) za određivanje veličine i koncentracije čestica (OPS), TSI 3752 brojač kondenzacijskih čestica (CPC), TSI 3090 uređaj (analizator) za određivanje veličine i koncentracije čestica ispušnih plinova (EEPS), električni niskotlačni impaktor (ELPI)).

Testno vozilo je modificirano kako bi se omogućilo odvojeno mjerenje čestica koje se emitiraju pri kočenju i trošenju guma. Sustav za sakupljanje čestica na vozilu je postavljen na lijevoj strani stražnjeg kotača vozila. Taj kotač je pogonski, neupravljački i ima disk kočnicu. Mjereni i kontrolirani parametri vozila uključuju: rutu vožnje, brzinu vozila, lateralna i longitudinalna ubrzanja, okretni moment kotača i snagu pogonskog sustava što se regulira i mjeri sensorima (senzor okretnog momenta, senzori ubrzanja i GPS modul).

Kočnica se sastoji od pomične kočne čeljusti s jednim klipom i diska od lijevanog željeznog bez unutarnje ventilacije. Kako bi dobili više informacija o stanju kočnog sustava, mjereni su hidraulički tlak i temperature na različitim mjestima. Za to su se koristili termoparovi koji su integrirani u kočnu čeljust, kočne pločice i kočni disk. Slika 12. (a) prikazuje integraciju dva termopara u kočni disk [7].

Kao i većina drugih električnih vozila, BMW i3 koristi regenerativno kočenje pomoću električnog pogonskog sustava. Hidraulički kočni sustav se aktivira samo ako se zatražena kočna snaga približi ili premaši maksimalnu moguću regenerativnu kočnu snagu. Kako bi se istražio utjecaj regenerativnog kočenja na emisiju čestica, rekuperacija je isključena za nekoliko testova. To je postignuto unošenjem greške u sustav dinamičke stabilnosti (engl. *dynamic stability control*, DSC).

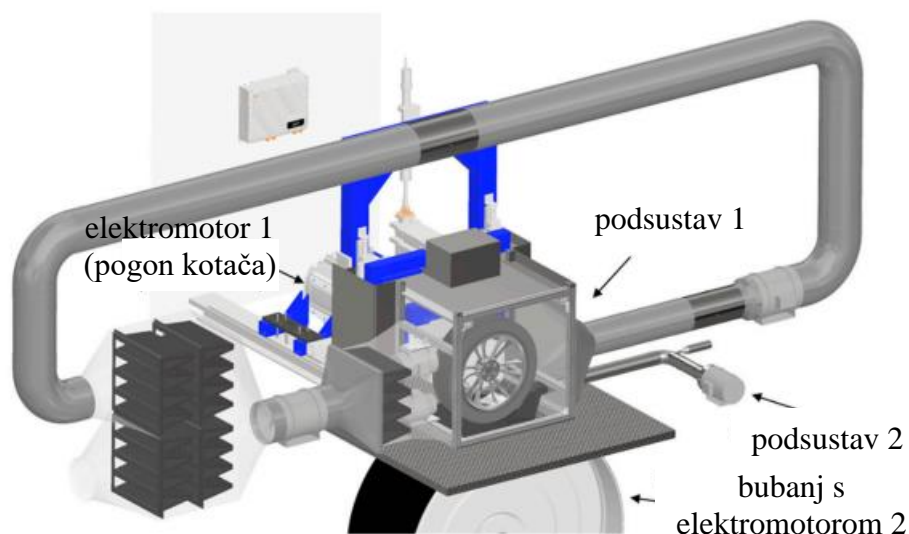
Za selektivno istraživanje čestica koje se emitiraju pri kočenju i trošenju guma, te dvije komponente su razdvojene distantnom pločom. Ventilacijski sustav ima zračne kanale koji vode do električnih puhala i može se povezati s oba kućišta. Filter i ostali dijelovi zračnog kanala spojeni su s fleksibilnim cijevima i nalaze se na krovu vozila. Za zatvoreni sustav sakupljanja oko kočnice, usis zraka je spojen na višestupanjski H 13/F7 sustav filtra koji osigurava koncentraciju pozadinskih čestica ispod 15 čestica po cm^3 [7]. Protok i tlak unutar kućišta prilagodljivi su, dok se maseni protok zraka, temperatura i tlak ventilacijskog sustava

određuju integriranim senzorima (Bosch HFM 5, Tip K, AMS 4712-1200-B, AMS 4712-0020-D-B).

U ovom postavu, ventilacija kočnice odstupa od stvarnih uvjeta jer je kočnica zatvorena i umjetno je ventilirana zrakom preko HEPA filtra. Kako bi se osigurala realna ventilacija kočnice unatoč zatvorenom okruženju, temperature kočnice su određene putem referentnog mjerenja na cestama oko Stuttgarta s testnim vozilom u njegovom izvornom stanju. Zabilježeni profil vožnje je repliciran u mjernom postavu na vozilu dinamometra šasije. U četiri vožnje konstantni protok ventilacije varirao je između 31 i 78 m³/h. U urbanom prometu, temperatura kočnice raste zbog brojnih kočnih događanja i niske ventilacije kočnice, što znači da u suprotnom, pri visokim brzinama vozila, temperatura kočnice opada. U ponavljanju vožnji, ventilacija kočnice je neovisna o brzini vozila i ostaje konstantna što dovodi do odstupanja temperature. Veliki protok ventilacije može reproducirati temperature diska pri visokoj brzini vozila, ali rezultira prekomjernim hlađenjem pri niskoj brzini vozila. Najniža razina ventilacije od 31 m³/h reproducirala je maksimalnu temperaturu iz cestovnih testova i zato je odabrana za mjerenje emisija [7].

Kao što je prikazano na slici 12. (b), sakupljanje čestica izvršeno je u kanalu blizu izlaza zraka iz kućišta. Usisani zrak je podijeljen pomoću razdjelnika protoka i spojen na ulaze za mjerenje čestica koristeći karbonizirane cijevi. Oprema za mjerenje koja se koristi redovito se podvrgava kalibraciji kod proizvođača. Prije svakog ponovnog postupka mjerenja provjeravala se usklađenost mjernih uređaja pomoću generatora aerosola.

Rezultat ovog istraživanja je uspješan razvoj referentnog testnog postava (guma i kočnica) te dobro definirani akumulacijski vrh i prikupljene čestice ispod 10 nm u normalnim uvjetima korištenja kočnica [8].



Slika 13. Laboratorijski ispitni postav za analizu brzine trošenja i faktora emisije PM-a na ispitnom podlogom s jednim valjkom [9]

Na slici 13. prikazana je ispitna podloga s jednim valjkom za dinamičku simulaciju sile i omjera proklizavanja (pogon kotača naspram valjka ispitne podloge), otpora pri vožnji i kuta bočnog klizanja. Razvijen je dvostruki sustav, koji objedinjuje prednosti realističnijih uvjeta hlađenja i optimalnih uvjeta prikupljanja čestica. Podsustav 1 koristi se za hlađenje guma uz mogućnost podešavanja volumnog protoka. Podsustav 2 koristi se za usisavanje čestica guma i transport čestica do mjernog sustava. Promjer cijevi podsustava 1 iznosi 300 mm, dok promjer cijevi podsustava 2 iznosi 100 mm [9]. Filtracijski sustav je postavljen iznad ulaza u prostor za testiranje guma kako bi se smanjila pozadinska koncentracija, a temperatura i vlažnost kontroliraju se pomoću sustava za kondicioniranje zraka smještenog u kabini za ispitivanje. Bubanj je napravljen s prevlakom od korunda kako bi se simulirala površina ceste te se omogućila selektivna analiza čestica koje nastaju trenjem guma. Za pogon kotača koristi se električni vučni stroj s izlaznom snagom do 240 kW i okretnim momentom od 3500 Nm. Dinamička varijacija izvodi se pomoću računalnog sustava u stvarnom vremenu kako bi se implementirali dinamički ciklusi stvarne vožnje. Kut proklizavanja može se podesiti unutar raspona od ± 2 stupnja. Konstantna niska koncentracija čestica u pozadini omogućuje online analizu najmanjih emisijskih i energetske pretvorbi. Promjena kuta proklizavanja rezultira povećanjem temperature i koncentracijom broja čestica. Niska koncentracija čestica u pozadini može se koristiti za procjenu korelacija između scenarija vožnje (skretanja, ubrzanja, brzine vozila ili temperature gume) i stvaranja čestica koje nastaju trošenjem guma.

Postoji i korelacija između tlaka u gumi i kontaktne površine. Ako se smanji tlak u gumi, kontaktna površina na bubnju testne podloge znatnije raste nego na asfaltnoj cesti. Površina se povećava kako tlak u gumi opada, a dubina prodora zbog nepravilnosti podloge se smanjuje zbog smanjenog kontaktnog tlaka.

Stopa abrazije tijekom testova na testnoj podlozi s jednim bubnjem biti će značajno niža nego tijekom testova na cesti, a uz to postoje i odstupanja zbog ograničenog bočnog kuta klizanja [9].

6. MJERENJE EMISIJA ČESTICA GUMA I KOČNICA U STVARNIM UVJETIMA VOŽNJE

U ovom poglavlju prikazana su neka od istraživanja emisija čestica kočnica i guma u realnim uvjetima u vožnji gdje se čestice prikupljaju direktno s komponente na vozilu koja je u pogonu.

U prvom istraživanju čestica vezanih za štetne emisije koje nastaju na kočnicama i gumama korišteno je lakše komercijalno vozilo (Volkswagen T6). Ovaj kombi ima dovoljno prostora za smještaj svih potrebnih komponenti, kao što su napajanje, uređaji za prikupljanje podataka te uređaji za mjerenje čestica [10].

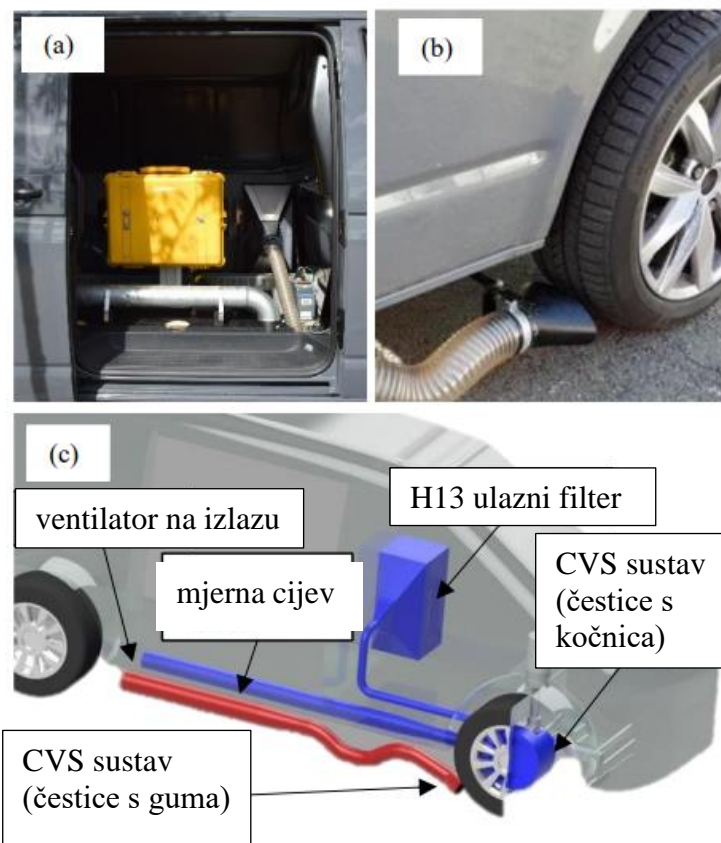
6.1. Postav i mjerni instrumenti

Za mjerenje koncentracije broja čestica (engl. *particle number concentration*, PNC) se koristi prijenosni kondenzacijski brojač čestica (engl. *condensation particle counter*, CPC). Za mjerenje koncentracije mase čestica (engl. *particle mass concentration*, PMC) koriste se TSI uređaj za prašinu (engl. *TSI DustTrak Aerosol Monitor*) i DEKATI E-filter koji su uključeni u mjernu postavu. DEKATI E-filter se može koristiti za prikupljanje uzoraka čestica na filtrirnoj podlozi, uz istovremeno online mjerenje.

TSI DustTrak je uređaj za praćenje i mjerenje čestica u zraku. Ovaj uređaj koristi lasersku tehnologiju za identifikaciju i mjerenje koncentracije čestica u zraku. Može se koristiti za praćenje različitih veličina čestica, uključujući PM₁₀ i PM_{2,5} koje su važne za praćenje kvalitete zraka i potencijalne zdravstvene rizike. E-filter je specifičan tip filtera koji se koristi za hvatanje i koncentriranje čestica iz zraka na analizu. Često se koriste u laboratorijskim istraživanjima kako bi se proučavala kemijska ili fizikalna svojstva čestica, uključujući njihovu veličinu, oblik i kemijski sastav.

Na slici 14. prikazano je testno vozilo opremljeno s dva odvojena sustava za sakupljanje konstantnog volumena (engl. *constant volume sampling systems*, CVS) za čestice iz kočnica (plave boje) i čestice povezane s gumama (crvene boje), oba postavljena na desnom prednjem kotaču. CVS sustav za emisije povezane s gumama sastoji se od lijevka za sakupljanje koji je postavljen iza desnog prednjeg kotača. Lijevak je pričvršćen na nosač kotača što osigurava da otvor i kotač uvijek budu usklađeni kako bi se čestice učinkovito prikupljale. Najviše vrijednosti emisija čestica trebale bi biti izmjerene prilikom skretanja. Za razliku od kočnog sustava, nije moguće potpuno zatvoriti gumu pa se pozadinski utjecaji koji se javljaju tijekom vožnje ne

možu potpuno izbjeći. Zrak s prikupljenim česticama prenosi se u odvojeni mjerni tunel do ventilatora na izlazu.



Slika 14. (a/b) Ispitni postav na kombiju (VW T6), (c) CVS sustavi za emisije čestica iz kočnica (plavo) i čestica povezanih s gumama (crveno) [9] [10]

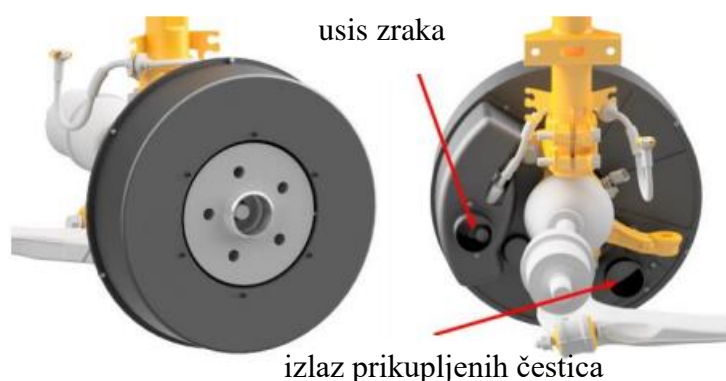
6.2. CFD uređaj za prikupljanje čestica

CFD (eng. *Computational Fluid Dynamics*) su uređaji za sakupljanje čestica u zraku koji koriste simulaciju računalne dinamike fluida kako bi poboljšali točnost i učinkovitost sakupljanja. Koriste CFD analizu za modeliranje i optimizaciju protoka zraka oko testnih površina. Na temelju tih simulacija, dizajniraju se posebni oblici i strukture uređaja kako bi se poboljšalo sakupljanje čestica iz zraka. CFD uređaji mogu uključivati razne komponente kao što su usmjerivači zraka, mlaznice, filteri i druge elemente koji su optimizirani za maksimalno sakupljanje čestica. Za vozila koja se kreću brzinama do 30 km/h, moguće je prikupiti razumnu količinu čestica (oko 40 %). Međutim, pri većim brzinama, kao što su brzine veće od 60 km/h, učinkovitost sakupljanja opada ispod 10 % zbog visoke brzine te razrijeđenosti okolne struje zraka. Na tom se nivou učinkovitost sakupljanja gotovo ne mijenja do otprilike 120 km/h [10].

Što se tiče taloženja čestica, za čestice veličine do 5 μm očekuje se visoka učinkovitost prijenosa (više od 90 %), dok se za čestice veličine 10 μm ta učinkovitost smanjuje ispod 40 % [9] [10].

6.2.1. Uređaj za sakupljanje čestica kočnica

Korištenje CFD modela omogućava detaljnu analizu strujanja zraka i raspodjele čestica unutar CVS sustava. Na temelju simulacija, može se prilagoditi geometrija, pozicioniranje komponenti i drugi parametri kako bi se postigla optimalna učinkovitost sakupljanja. Primjena CFD modela u optimizaciji dizajna CVS sustava omogućava smanjenje utjecaja varijacija u protoku zraka i raspodjeli čestica, što dovodi do veće točnosti i pouzdanosti mjerenja. CFD modeliranje pruža alat za predviđanje ponašanja sustava i identifikaciju poboljšanja koja se mogu implementirati radi optimizacije performansi sakupljanja.

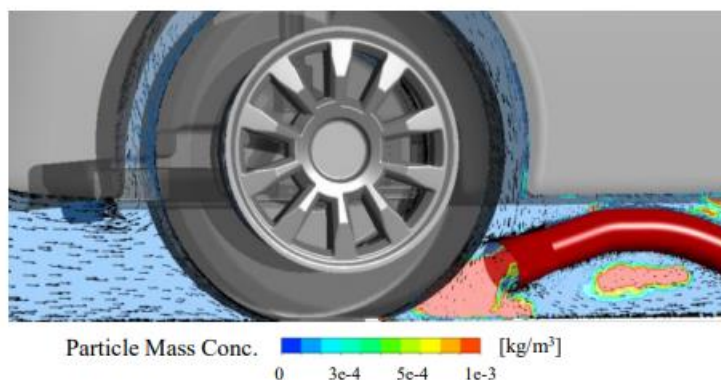


Slika 15. CVS ovoj za mjerenje emisije čestica kočnica [10]

6.2.2. Uređaj za sakupljanje čestica povezanih s gumama

Slika 16. prikazuje simulaciju prikupljanja čestica guma. Čestice su visoko koncentrirane u neposrednoj blizini mjesta nastanka blizu sučelja guma i ceste. Na stražnjoj strani kotača prisutne su niske prosječne brzine protoka zbog strujanja zraka oko gume. Aktivnim usisom s protokom od 1300 l/min (što odgovara brzini usisavanja od 2,8 m/s) moguće je prenijeti dovoljnu količinu čestica u mjerni tunel. Pri brzinama puno većim od 30 km/h, brzina zračne struje u prostoru kotača znatno premašuje brzinu usisavanja u lijevak [6]. Kao rezultat toga, visokobrzinska zračna struja prodire u područje između gume i lijevka. Zbog toga se visok postotak čestica vuče prema vanjskoj strani gume i nestaje iz mjerenja. U suprotnosti

s rješenjem oko kočnog sustava, ne postoji mogućnost potpunog zatvaranja gume, što otežava skaliranje izmjerene koncentracije čestica na ukupnu masu emitiranih čestica (PM) i broj čestica (PN) po vozilu i kilometru.



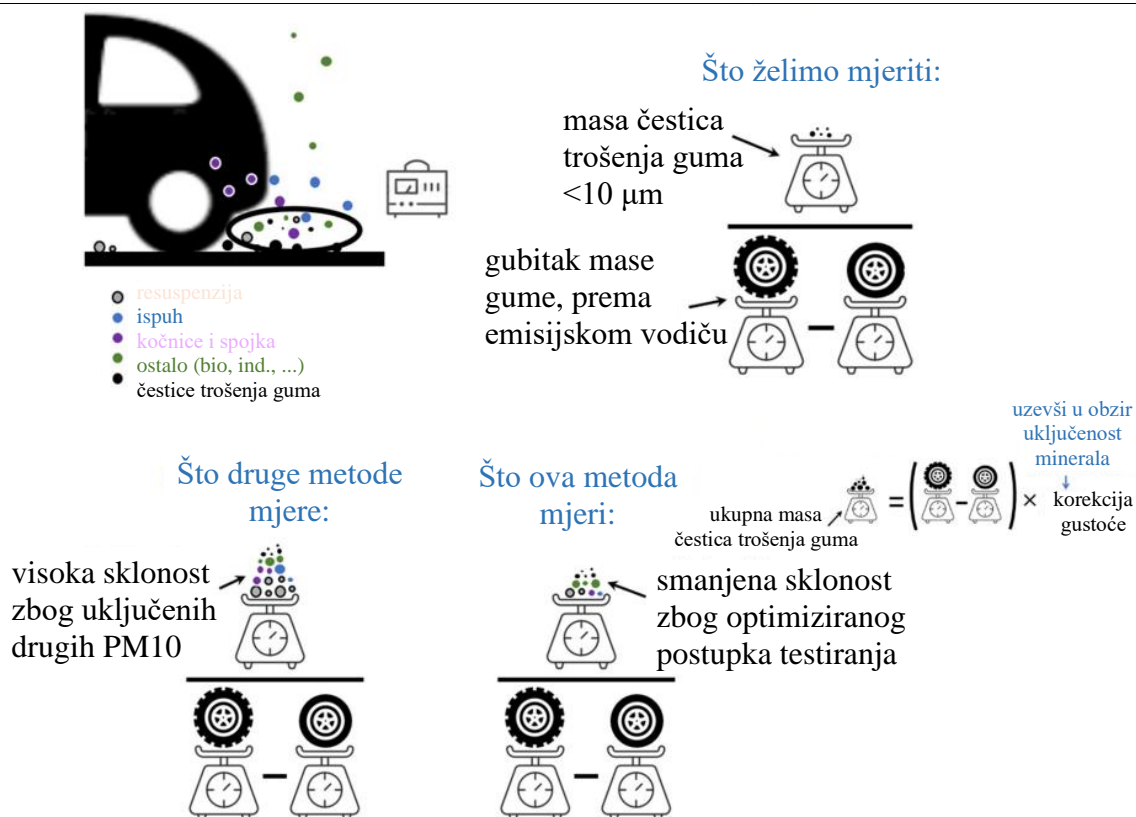
Slika 16. CFD simulacija: Uzimanje uzoraka čestica sa staništa gume i ceste pomoću lijevka-obraza za uzorkovanje [10]

Na slici 17., prikazane su prikupljene čestice koje nisu povezane s istrošenim gumama, ali se sve smatraju česticama nastalih od guma.

Jedna skupina istraživača sakupila je čestice pomoću sustava za usisavanje koji je postavljen iza guma automobila i kamiona, na otvorenim cestama i u prometu. Posljedično je uređaj za usisavanje uhvatio mnoge čestice koje nisu bile čestice nastale od guma, a to samo ukazuje na ograničenja direktnih mjerenja emisija guma.

Druga skupina istraživača je postavila cijev za uzimanje uzoraka zraka i iza guma i na drugim mjestima na vozilu, ali nisu osigurali izokinetičko sakupljanje. Izokinetičko sakupljanje je prikupljanje čestica u pokretnoj struji koja se kreće istom brzinom u mlaznici za sakupljanje kao i drugdje u struji. Neizokinetičko sakupljanje može propustiti neke vrste čestica. S obzirom da su testovi provedeni na zatvorenom poligonu bez drugih vozila, manja je količina uhvaćenih čestica koje dolaze od drugih vozila pa su i rezultati pouzdaniji [10].

Cilj istraživanja bio je razviti metodologiju koja omogućuje procjenu emisijskih faktora guma (PM₁₀ i PM_{2.5}) sa što manje mjernih nedostataka.



Slika 17. Tehnički zahtjevi za mjerenje emisija PM čestica trošenja guma [11]

Michelin Engineering Services razvio je i dizajnirao uređaj za prikupljanje čestice trošenja guma PM_{10} i $\text{PM}_{2.5}$ tijekom vožnje na cesti, koristeći putnički automobil s pogonom na stražnje kotače (BMW 530i, 2001). Uređaj je postavljen blizu lijevog stražnjeg kotača jer se desna strana ceste vjerojatnije kontaminira vanjskim onečišćenjem (npr. vegetacija, minerali, ...). Uređaj se sastoji od tri mlaznice pričvršćene za kočnu čeljust i povezane s tri usisna uređaja (Easy-Clean 200, Aspilusa, svaki snage 1400 W). Ta tri usisna uređaja nalaze se unutar prikolice pričvršćene za automobil. Sustav za prikupljanje napajan je pomoću agregata za proizvodnju energije (GYW-9 M5, Genelec, 230 V, 6000 W) koji je smješten unutar prikolice. Oblik mlaznica je optimiran kako bi se izbjegle zračne turbulencije i maksimizirao protok zraka, a kako bi se osiguralo da se sustav za prikupljanje ne začepi tijekom testiranja, brzina protoka zraka sustavno se mjeri prije i poslije svakog testa na ulazu u svaku mlaznicu. Odstupanje ne smije prelaziti 5 %. Brzina protoka zraka izmjerena na ulazu u svaku mlaznicu iznosi $75 \pm 5 \text{ m}^3/\text{h}$ [11].



Slika 18. Dvije verzije mlaznica koje se koriste za prikupljanje čestica trošenja gume i mjerenje emisije PM čestica [10]

Prva verzija mlaznica prikazana je na slici 18., lijevo. Mlaznice su smještene na udaljenosti od 10 mm od tla i 10 mm od vanjske površine gume. Potpora mlaznica izravno je pričvršćena za kočnu čeljust kako bi se izbjeglo ikakvo gibanje sustava za prikupljanje tokom provođenja testova. Prva verzija sustava za prikupljanje pokazala je dobru, ali poboljšivu stopu prikupljanja u smislu količine prikupljenih čestica u usporedbi s masom koju je guma izgubila. Druga verzija, prikazana na slici 18., desno, razvijena je kako bi se poboljšala stopa prikupljanja čestica trošenja guma. Na svaku mlaznicu može se priključiti ELPI+ za mjerenje emisije čestica u stvarnom vremenu. ELPI+ je kaskadni impaktorski brojač čestica koji broji i prikuplja čestice u 14 veličinskih kanala od 6 nm do 10 μm , frekvencijom od 1 Hz i protokom zraka od 10 l/min. Budući da je protok zraka ELPI+ različit od protoka zraka unutar mlaznica, odnosno 10 l/min i 75 m³/h, izgrađena je posebna linija smještena unutar glavne linije (slika 18., dno) kako bi izokinetičko sakupljanje čestica bilo osigurano, što jamči reprezentativnost ELPI+ mjerenja u odnosu na ukupnost prikupljenih čestica [11].

Usporedbom metoda u stvarnim uvjetima vožnje i u laboratorijskim uvjetima, uviđa se da je lakše i pouzdanije mjeriti te analizirati čestice trošenja guma u kontroliranim uvjetima laboratorija. Teže je postaviti ispitni postav u stvarnim uvjetima vožnje te ima puno parametra,

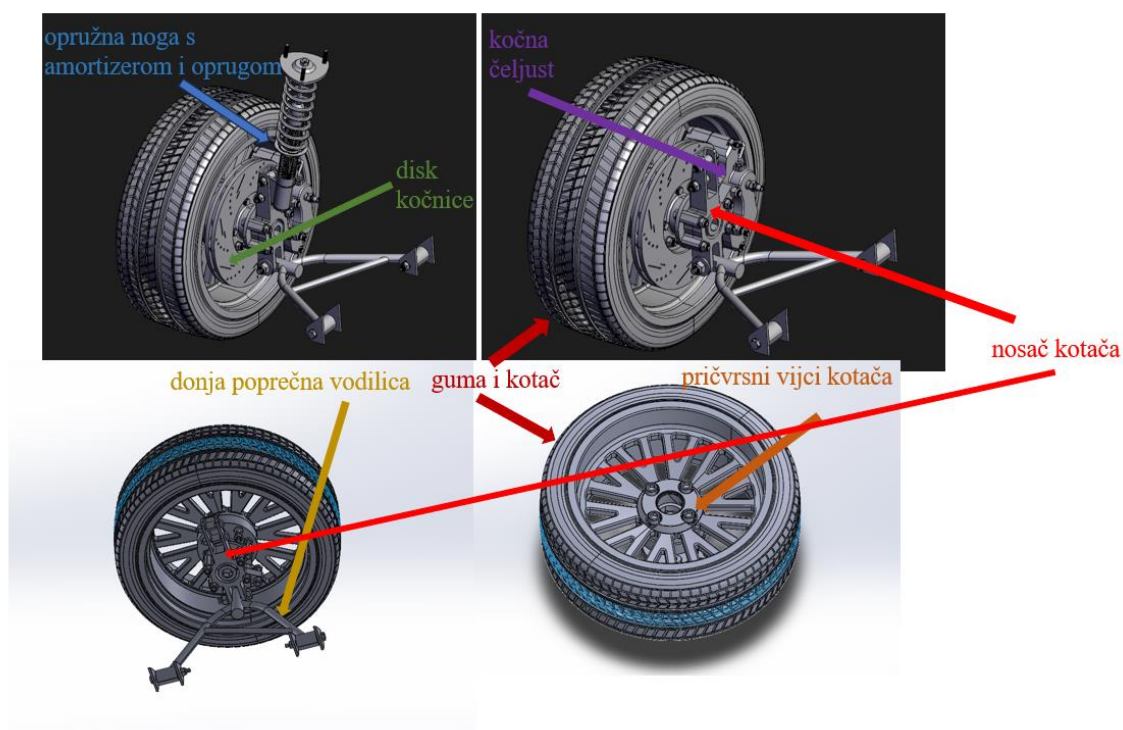
na količinu i sastav prikupljenih čestica, koji mogu imati loš utjecaj na rezultate. U laboratoriju postoje razvijene metode i postavi koji se koriste za što bolju izolaciju gume kako bi se dobili što pouzdaniji rezultati. Zbog mogućnosti utjecaja na bitne parametre tijekom testiranja, mogu se i dati realniji i pouzdaniji rezultati.

7. MJERENJE ŠTETNIH EMISIJA NA GUMAMA I KOČNICAMA VOZILA

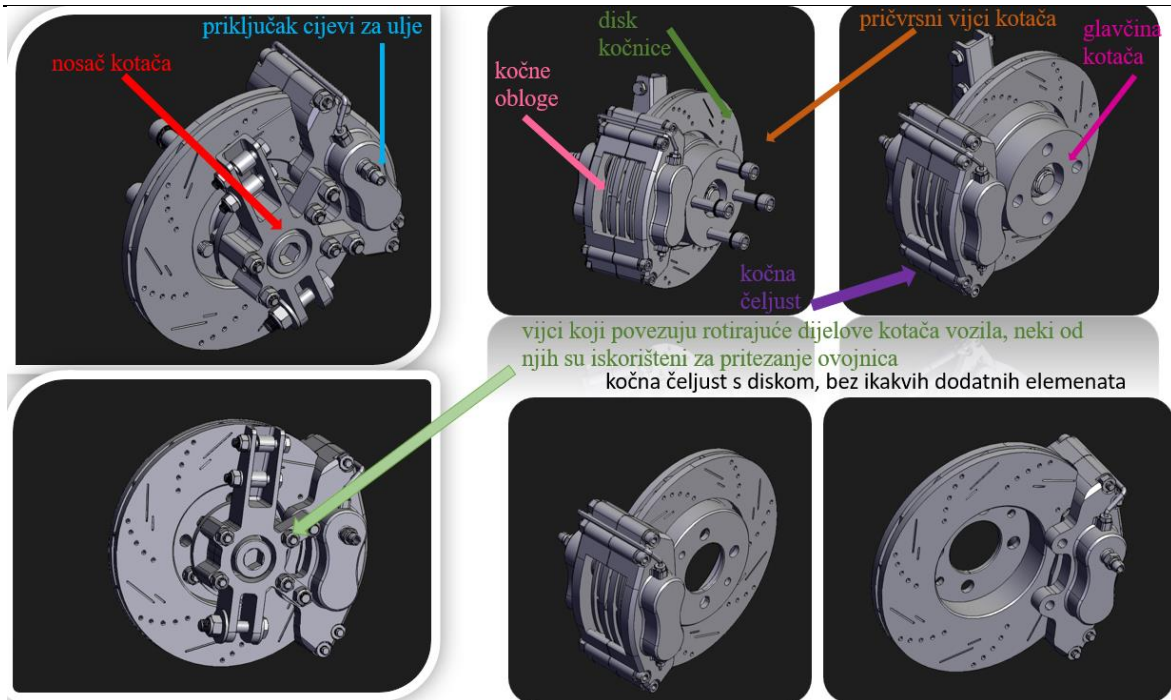
Na slici 12. prikazan je mjerni postav koji je uzet kao temelj predloženog rješenja ispitnog postava. Postav uključuje odvojena kućišta (ovojnice) za gume i kočnice, ventilacijski sustav i mjerni sustav za određivanje emisija čestica guma i kočnica.

Testno vozilo je modificirano kako bi se omogućilo odvojeno mjerenje čestica koje se emitiraju pri kočenju i trošenju guma. Modifikacija vozila se provodi na način da se kotač izvuče iz mulde (blatobrana) kotača kako bi se ispitni postav mogao postaviti. Sama modifikacija vozila nije obuhvaćena, prikazano konstrukcijskom razradom ispitnog postava.

Model kotača na slikama 19. i 20. s gumom, kočnicom, ovjesom (donjom poprečnom vodicom i opružnom nogom s amortizerom i oprugom) preuzet je s GrabCAD stranice [12]. Na temelju prikazanog CAD modela, izrađene su ovojnice oko kočnice i diska te ovojnica oko gume. Zbog pomaka ovjesa idrugih rotacijskih elemenata, ovojnice je bilo moguće napraviti jedino tako da se i one same pričvrste pomoću vijaka čija je svrha privrščivanje kotača, dijela ovjesa i ostalih elemenata koji se gibaju.

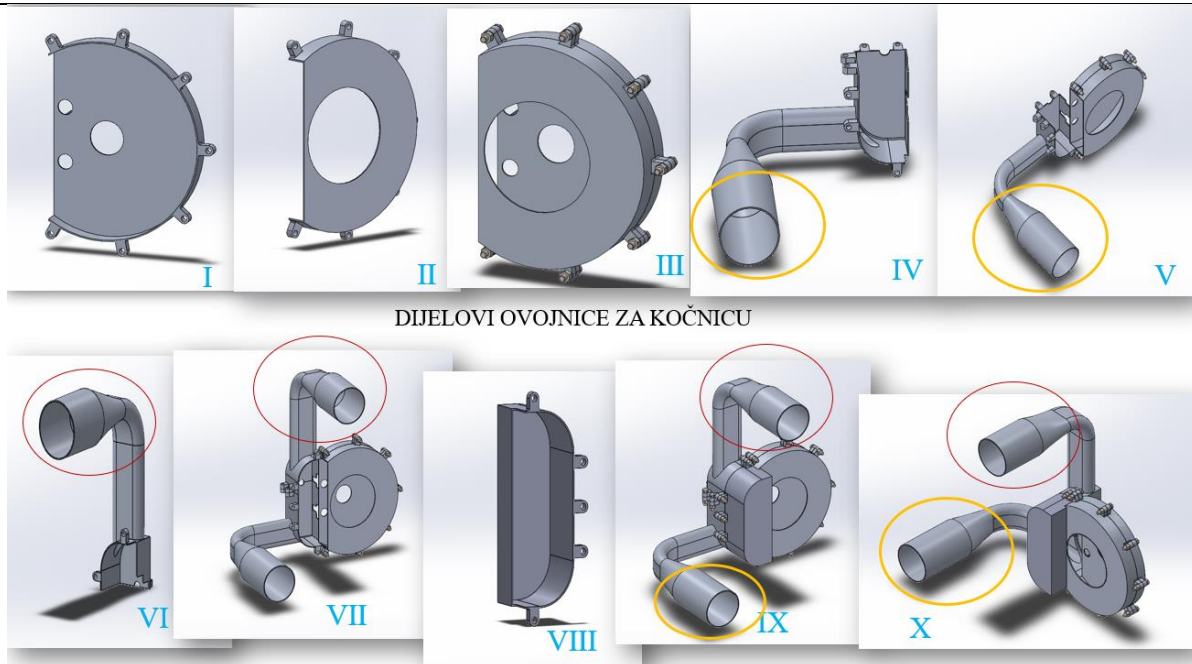


Slika 19. Pregled preuzetog CAD modela gume, kočnice, ovjesa i amortizera [12]

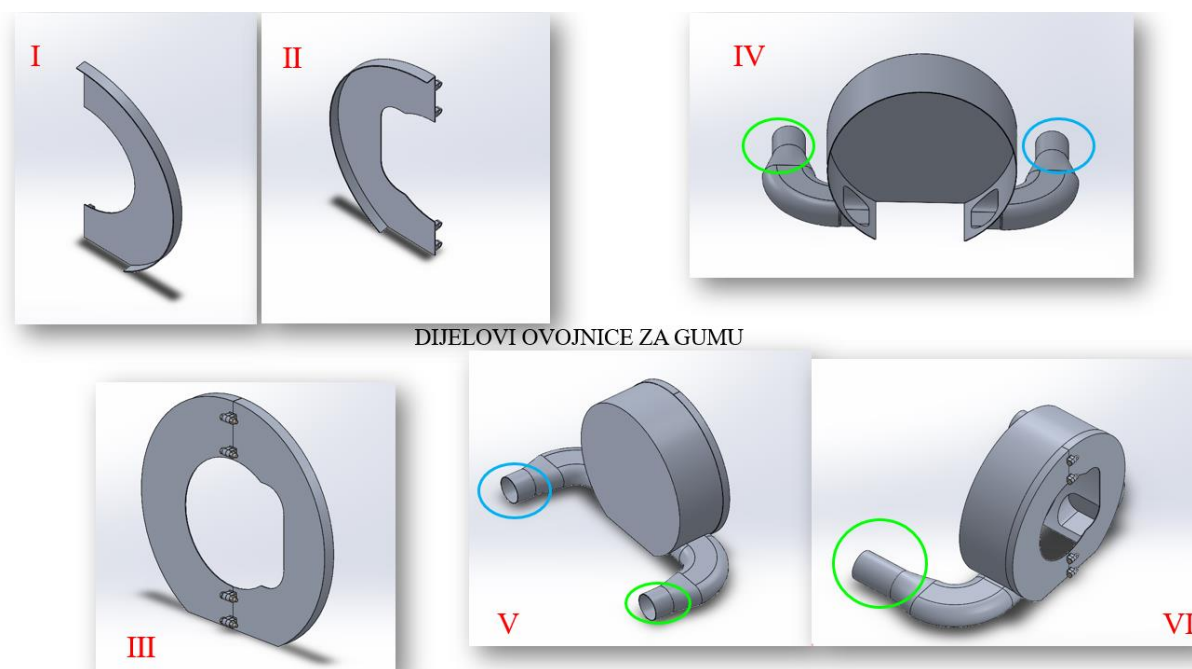


Slika 20. Bliži prikaz kočnice i kočnog diska preuzetog CAD modela [12]

Kočnica se sastoji od kočne čeljusti i diska, kako je to i vidljivo na slici 20. Izrađena su dva dijela ovojnice oko diska kako bi se on obuhvatio, a međusobno se povezuju vijčanim spojem. Za kočnu čeljust su izrađena tri dijela ovojnice kako bi se ona uspjela zatvoriti. Na slici 21. su prikazani dijelovi ovojnice za kočnicu i disk po kojem bi se one trebale postavljati, pa tako redom imamo: donji ovoj oko diska (I), gornji ovoj oko diska (II), njihov sklop povezan vijcima (III), vanjski dio ovojnice oko čeljusti kočnice s cijevi za sakupljanje uzoraka čestica (IV), dio (IV) nadodan na sklop oko diska (V), drugi dio vanjskog dijela ovojnice oko čeljusti s cijevi koja se povezuje drugim cijevima s HEPA filterom (VI), daljnje spajanje ovojnice (VII), unutarnji dio ovojnice oko čeljusti (VIII) te konačni sklop svih ovojnice (IX) i (X) spojen vijcima. Crveno je označena cijev koja se povezuje s HEPA filterom, dok je žutom označena cijev kroz koju izlaze čestice prilikom trošenja kočnica koje sakupljamo za mjerenje emisija, odnosno dio koji dalje vodi prema protokomjeru i sondama za uzimanje uzoraka za analizatore emisija čestica.



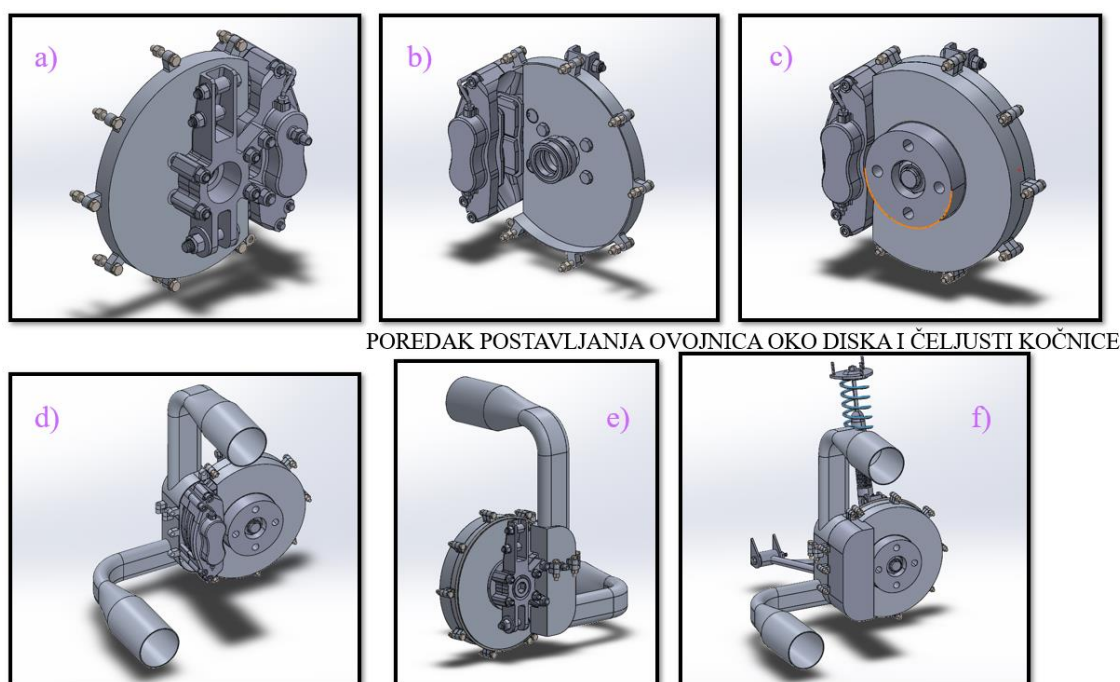
Slika 21. Dijelovi ovojnice za kočnicu i sklapanje tih dijelova



Slika 22. Dijelovi ovojnice za gumu i njihov sklop

Na slici 22. su prikazani dijelovi ovojnice koje se postavljaju oko gume vozila. Sklop ovojnice oko diska i čeljusti kočnice konstruiran je na način da se nakon njegove ugradnje mogu postaviti dalje naplatak i guma vozila te nakon toga svega i sklop ovojnice za gumu. Zbog ovakvog načina sklapanja, prilagođen je oblik unutarnjih ovojnica (koji se postavljaju na

unutarnju stranu kotača) oko ovojnice za čeljust kočnice, kako se vidi na slici 22. (I) i (II). Vanjski dio ovojnice kotača (IV) postavlja se na sklop unutarnjih ovojnica (III) tako da se uvuče u veći promjer unutarnjih ovojnica. Na tom dijelu se nalazi i cijev za sakupljanje uzoraka čestica, označena zelenom bojom, i cijev koja se dalje drugim cijevima povezuje s HEPA filterom. Bitno je napomenuti da su širine tih cijevi otprilike kao i sama širina gume kako bi se omogućilo što bolje i kvantifikacijski više sakupljanje čestica. Dijelovi (V) i (VI) pokazuju sklop cijelog ovoja za gumu s prednje i stražnje strane.

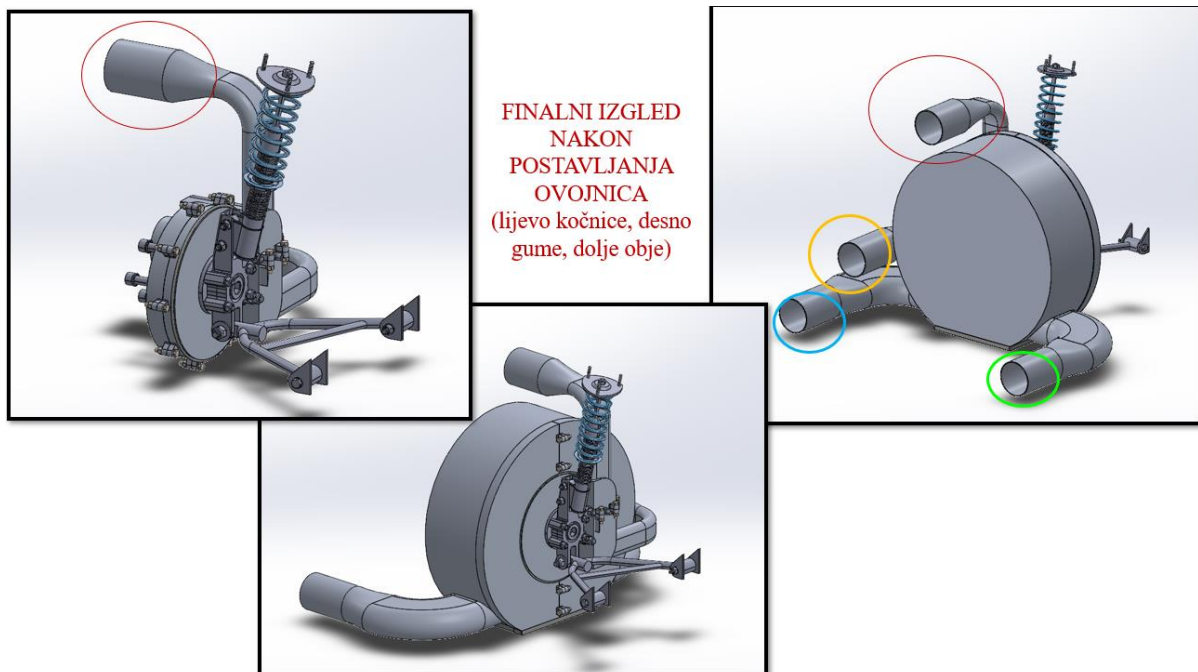


Slika 23. Poredak postavljanja ovojnice oko diska i čeljusti kočnice

Na slici 23. prikazan je redosljed postavljanja dijelova ovojnice, koji su spomenuti kod slike 21., oko CAD modela.

Ovojnica oko diska morala je biti postavljena oko rotirajućeg dijela pa se zato postavila brtva između. Brtva je korištena i kod unutarnjih ovojnica gume koje se naslanjaju na ovojnicu kočnice tako da se onemogući ikakav izlaz čestica koje je potrebno ispitivati. Cijevi moraju zbog robusnosti biti čelične tako da se na njih mogu spojiti drugi elementi koji traže relativno često sastavljanje i rastavljanje (prirubnice za sonde, prirubnice za protokomjere, ...) pa su i ovojnice izrađene od nehrđajućeg čelika kako bi se olakšalo spajanje.

Na slici 24. prikazan moguće krajnji izgled nakon montiranja pojedinih ovojnica oko elemenata kotača vozila.



Slika 24. Cijeloviti sklopovi ovojnica

Cijevi za protok zraka i zraka s česticama izrađene su na način da se zakreću prema vanjskoj strani kotača čim izađu iz ovojnice tako da su što bliže samoj ovojnici gume. Ovim se postiže lakše i kompaktnije rješenje koje omogućuje postavljanje konstrukcije na nemodificirano vozilo. To je rješenje koje ne zahtjeva izmjenu vozila kako je zadano i u samom zadatku rada.

8. ZAKLJUČAK

Štetne čestice iz ispuha te štetne čestice koje nastaju prilikom trošenja kočnica i guma gotovo jednako doprinose ukupnim emisijama PM₁₀ u prometu. U rasponu od 16-55 % (trošenje kočnica), 5-30 % (trošenje guma) i 28-5 % (prašina s ceste) su doprinosi u ukupnim emisijama u prometu. Predviđa se da će se koncentracija štetnih emisija kočnica i guma povećavati u nadolazećim godinama zbog strožih kontrola emisija ispušnih plinova.

PM₁₀ čestice, nastale trošenjem kočnica i guma, sadrže čestice iz svih frakcija koje mogu doći u respiratorni sustav čovjeka, a pojedina istraživanja sugeriraju da one mogu biti opasne ili potencijalno opasne za ljude. Iako još nitko nije dokazao da čestice nastale trošenjem kočnica ili guma imaju negativan učinak na ljudsko zdravlje, testiranja na životinjama pokazala su takav učinak.

Kod usporedbe emisijskih faktora za ukupne emisije PM₁₀, kod vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem (ICEV) i električnog vozila (EV), uvelike su ovisili o uključivanju sekundarnih ispušnih čestica PM iz ICEV-a, vrsti kočnica i intenzitetu regenerativnog kočenja električnog vozila. Kada su razmatrane samo primarne ispušne čestice PM, ukupni emisijski faktor za EV je bio 10% veći od onih kod vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem. Istraživanje je svejedno pokazalo da je ukupni emisijski faktor za EV značajno niži u odnosu na benzince i dizelaše, kada su sekundarne ispušne čestice PM uključene u određivanje. Bitno je još napomenuti da mnoga istraživanja imaju teškoća u određivanju udjela vozila u sekundarnim emisijama PM te je i zato problematično razlikovati primarne i sekundarne PM.

U istraživanju s mjerenjem štetnih emisija kočnica i guma u realnim uvjetima vožnje, opisan je CFD model koji omogućuje procjenu učinkovitosti sakupljanja i transporta čestica vezanih uz gume pomoću naprave u obliku lijevka. Za vozila koja se kreću brzinama do 30 km/h, moguće je prikupiti prihvatljivu i normalnu količinu čestica (oko 40 %), no pri većim brzinama, one veće od 60 km/h, učinkovitost sakupljanja opada ispod 10 % zbog visoke brzine okolnog zraka.

Čestice vezane uz gume su istraživane i na zatvorenom ispitnom poligonu, iz razloga kako bi se isključili utjecaji drugih izvora čestica. Testovi su ukazali na korelaciju između brzine vozila, akceleracije, opterećenja guma i emisija čestica.

Istraživanja provedena u laboratoriju omogućuju određivanje emisija čestica guma i kočnica, u dobro kontroliranim uvjetima, koje nastaju isključivo trošenjem tih komponenata, tj. bez ikakvih štetnih emisija iz ispušnih plinova.

Na temelju jednog od tih ispitnih postava napravljen je i predstavljen koncept ispitnog postava koji bi omogućio pristup odvojenom mjerenju štetnih emisija s kočnica i guma kako u laboratorijskim uvjetima na valjcima, tako i potencijalno u realnim uvjetima stvarne vožnje, ukoliko se sustav izvede dovoljno kompaktno da ne utječe na funkcioniranje vozila u vožnji.

LITERATURA

- [1] [news: Conference report: 25th ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles \(dieselnet.com\)](#)
- [2] Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on type-approval of motor vehicles and engines and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles, with respect to their emissions and battery durability (Euro 7) and repealing Regulations (EC) No 715/2007 and (EC) No 595/2009, Brussels, 10.11.2022.
- [3] JRC: Non-exhaust traffic related emissions, Brake and tyre wear PM, Literature review, 2014., [\(PDF\) Brake wear particle emissions: a review \(researchgate.net\)](#)
- [4] Comparison of total PM emissions emitted from electric and internal combustion engine vehicles, An experimental analysis, 2022.
- [5] Development of Dust Collectors to Reduce Brake Wear PM Emissions, 2022
- [6] Proposal Draft GTR Brake Emissions GRPE, 2022.
- [7] Airborne Brake Wear Emissions from a Battery Electric Vehicle, 2023
- [8] Towards the reduction of brake and tire emissions, The Zero Emission Drive Unit, DLR, 2021
- [9] Comparison of Methods for Sampling Particulate Emissions from Tires under Different Test Environments, 2022
- [10] Measurement of Vehicle Related Non Exhaust Particle Emissions under Real Driving Conditions (2020), [\(PDF\) Measurement of Vehicle Related Non Exhaust Particle Emissions under Real Driving Conditions \(researchgate.net\)](#)
- [11] Methodology for the direct measurement of tire emission factors, 2023
- [12] [Vehicle suspension Electric Car | 3D CAD Model Library | GrabCAD](#)

PRILOZI

I. Tehnička dokumentacija