Konstrukcija jednostavnog sustava za mjerenje kvalitete zraka

Jakoubek, Mateo

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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:235:630201

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

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







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mateo Jakoubek

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

dr. sc. Petar Ilinčić, dipl. ing.

Student:

Mateo Jakoubek

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem mentoru dr. sc. Petru Ilinčiću na strpljivosti i savjetima pri izradi ovog diplomskog rada. Također, hvala i ostalim djelatnicima Katedre za motore i vozila koji su pomogli pri mjerenju u Laboratoriju za motore i vozila.

Nadalje, zahvaljujem prijateljima, posebice Alenu i Filipu, na savjetima prilikom izrade programskog koda.

Hvala mojoj obitelji, posebno roditeljima, što su se odricali i bili podrška tijekom cijelog studija i koji su sa mnom prolazili svaki ispit.

Na kraju, hvala mojoj dragoj Kristini koja mi je uvijek bila potpora i ohrabrenje. Zahvaljujem i na pruženoj motivaciji i strpljenju!

Mateo Jakoubek

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Mateo Jakoubek** Mat. br.: 0035197885

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Konstrukcija jednostavnog sustava za mjerenje kvalitete zraka**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Design of a Simple Air Quality Measuring System**

Opis zadatka:

Sve veća koncentracija stanovništva u urbanim sredinama zahtijeva i sve veću brigu o kvaliteti zraka jer ona direktno utječe na zdravlje ljudi. Obzirom da su urbana područja isprepletena mrežom prometnica, često je upravo sektor transporta najodgovorniji za kvalitetu zraka. U gradu Zagrebu kvaliteta zraka se prati na tri mjerne stanice, što je nedovoljno da bi se kvalitetno mogao procijeniti utjecaj prometa na kvalitetu zraka. U sklopu diplomskog rada potrebno je konstruirati i izraditi jednostavni mjerni sustav za praćenje kvalitete zraka, posebice čestica i dušikovih oksida.

U okviru rada potrebno je:

- Objasniti pojam kvalitete zraka i objasniti kako se određuje indeks kvalitete zraka.
- Opisati metode koje se primjenjuju za mjerenje kvalitete zraka.
- Napraviti pregled i opis sustava koji se koriste za mjerenje kvalitete zraka u mjernim stanicama.
- Napraviti pregled senzora za mjerenje kvalitete zraka u jednostavnim sustavima.
- Koncipirati jednostavni mjerni sustav te opisati princip njegova rada.
- Izraditi jednostavni mjerni sustav.
- Napraviti seriju probnih mjerenja. Lokacije i broj mjerenja dogovoriti s mentorom te voditeljem Laboratorija za motore i vozila.

Sve radnje tijekom izrade rada treba opisati i popratiti odgovarajućim skicama, crtežima odnosno fotografijama. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:	Datum predaje rada:	Predviđeni datum obrane:
14. studenoga 2019.	16. siječnja 2020.	20. do 24. siječnja 2020.

Zadatak zadao: Predsjednica Povjerenstva:

Doc. dr. sc. Petar Ilinčić

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

POPIS SLIKA I
POPIS TABLICA IV
POPIS KRATICA V
SAŽETAK VI
SUMMARY VII
1. UVOD 1
2. KVALITETA ZRAKA. INDEKS KVALITETE ZRAKA 3
2.1. Indeks kvalitete zraka 4
2.2. Lebdeće čestice 5
2.2.1. Lebdeće čestice $PM_{2,5}$ 6
2.2.1.1. Pokazatelj prosječne izloženosti 8
2.2.2. Lebdeće čestice PM_{10} 9
2.3. Dušikovi oksidi 10
2.4. Sumporov dioksid 11
3. METODE ZA MJERENJE KVALITETE ZRAKA 13
3.1. Gravimetrijska metoda 13
3.2. Metoda atenuacije beta zračenja 13
3.3. Kemiluminiscencija 14
3.4. Metode apsorpcijske spektroskopije 16
3.4.1. Nedisperzivna ultraljubičasta apsorpcijska spektroskopija 16
3.4.2. Nedisperzivna infracrvena apsorpcijska spektroskopija 18
4. JEDNOSTAVNI MJERNI UREĐAJI 20
4.1. Senzori za mjerenje koncentracije plina 20
4.1.1. Elektrokemijski senzor 20
4.1.2. Fotoakustički senzor 23
4.2. Senzori za mjerenje koncentracije lebdećih čestica 24
4.2.1. Optički senzor 24
5. JEDNOSTAVNI MJERNI SUSTAV 27
5.1. Razvojna pločica Arduino Uno 28
5.2. Senzor za mjerenje dušikovog dioksida SPEC 110-502 28

5.3. Senzor za mjerenje lebdećih čestica Plantower PMS5003 31
5.4. Povezivanje jednostavnog mjernog sustava 32
5.5. Signal i komunikacija senzora 35
5.5.1. Komunikacijski protokol 36
5.5.1.1. SPI komunikacijski protokol 37
5.5.1.2. UART komunikacijski protokol 40
5.5.1.3. I2C komunikacijski protokol 42
6. PROGRAMSKI KÔD 44
6.1. Usrednjavanje izmjerenih vrijednosti izvršnim kodom 44
7. MJERENJE JEDNOSTAVNIM MJERNIM SUSTAVOM 47
7.1. Testna mjerenja 47
7.1.1. Prva skupina usporednih mjerenja 49
7.1.2. Druga skupina usporednih mjerenja 50
7.1.3. Treća skupina usporednih mjerenja 52
7.1.4. Četvrta skupina usporednih mjerenja 53
7.1.5. Peta skupina usporednih mjerenja 54
7.2. Mjerenje kvalitete zraka 56
7.2.1. Mjerna lokacija K 57
7.2.1.1. Prvo mjerenje: 1.1.2020. 57
7.2.1.2. Drugo mjerenje: 3.1.-5.1.2020. 58
7.2.1.3. Treće mjerenje: 6.1.-7.1.2020. 59
7.2.1.4. Četvrto mjerenje: 10.1.-12.1.2020. 60
7.2.2. Mjerna lokacija FSB 62
7.2.2.1. Prvo mjerenje: 7.1.-9.1.2020 62
7.2.2.2. Drugo mjerenje: 13.1.-15.1.2020. 64
8. ZAKLJUČAK 66
LITERATURA 67
PRILOZI 71

POPIS SLIKA

Slika 1. Zone, aglomeracije i državne mjerne postaje u Republici Hrvatskoj [7] 3
Slika 2. Usporedba veličine čestica [13] 6
Slika 3. Pokazatelj prosječne izloženosti (PPI) u Republici Hrvatskoj [1] 8
Slika 4. Ocjena onečišćenosti (sukladnosti) zona i aglomeracija lebdećim česticama $PM_{2,5}$ u 2018. godini [1] 9
Slika 5. Ocjena onečišćenosti (sukladnosti) zona i aglomeracija lebdećim česticama PM_{10} u 2018. godini [1] 10
Slika 6. Shematski prikaz uređaja s atenuacijom beta zračenja [21] 14
Slika 7. Reakcija dušikovog monoksida i ozona [22] 15
Slika 8. Shema uređaja s nedisperzivnom ultraljubičastom apsorpcijom [25] 17
Slika 9. Transmisijski spektri dušikovih oksida i sumporovog dioksida [26] 17
Slika 10. NDIR CO_2 senzor [28] 18
Slika 11. Apsorpcijske valne duljine molekula [30] 19
Slika 12. Shematski prikaz elektrokemijskog senzora [33] 21
Slika 13. Shematski prikaz troelektrodnog elektrokemijskog senzora [33] 21
Slika 14. Fotoakustički senzor 23
Slika 15. Princip rada optičkog senzora [40] 24
Slika 16. Unutrašnjost optičkog $PM_{2,5}$ senzora PPD42NS [41] 25
Slika 17. Shema fotodiode [42] 25
Slika 18. Naponski signal fotodiode za čestice različitih promjera [40] 26
Slika 19. Kvalitativna prikaz promjene napona ovisno o koncentraciji [47] 28
Slika 20. Utjecaj temperature na grešku mjerenja kod senzora SPEC 110-502 [48] 30
Slika 21. Utjecaj temperature na grešku mjerenja kod senzora PMS5003 [46] 32
Slika 22. Shema povezivanja 33
Slika 23. Jednostavni mjerni sustav 34
Slika 24. Analogni i digitalni signal [44] 35
Slika 25. Logičke razine napona [45] 36
Slika 26. Paralelna (lijevo) i serijska (desno) komunikacija [46] 37
Slika 27. SPI komunikacija nadređenog i podređenog uređaja [46] 38
Slika 28. Ciklus slanja podatka u SPI komunikaciji [46] 39

Slika 29. Komunikacija UART uređaja [46] 40
Slika 30. Primanje podatka od upravljačke jedinice i pretvorba [46] 40
Slika 31. Ponovna pretvorba i slanje podataka [46] 41
Slika 32. Pretvorba podatka i slanje upravljačkoj jedinici [46] 41
Slika 33. I2C komunikacija nadređenog i podređenog uređaja [46] 42
Slika 34. Poruka nadređenog I2C uređaja [46] 42
Slika 35. Identificiranje nadređenog uređaja [46] 43
Slika 36. Primjer usrednjavanja rezultata 45
Slika 37. Vremenski intervali izvođenja programa kod definiranja referentne vrijednosti vremena na početku (gore) i na kraju (dolje) *if* uvjeta 46
Slika 38. Ispitni uređaj za usporedno mjerenje lebdećih čestica 47
Slika 39. Pozicioniranje senzora za usporedno mjerenje lebdećih čestica 48
Slika 40. Prvo usporedno mjerenje broja čestica 49
Slika 41. Drugo usporedno mjerenje broja čestica 49
Slika 42. Prvo usporedno mjerenje broja čestica s radom motora u praznom hodu 51
Slika 43. Drugo usporedno mjerenje broja čestica s radom motora u praznom hodu 51
Slika 44. Prvo usporedno mjerenje broja čestica s radom motora u praznom hodu pri 1810 okretaja 52
Slika 45. Drugo usporedno mjerenje broja čestica s radom motora u praznom hodu pri 1810 okretaja 52
Slika 46. Nove pozicije senzora u odnosu na ispuh motora 53
Slika 47. Prvo usporedno mjerenje broja čestica s radom motora u praznom hodu pri 1810 okretaja s novim pozicijama senzora 53
Slika 48. Drugo usporedno mjerenje broja čestica s radom motora u praznom hodu pri 1810 okretaja s novim pozicijama senzora 54
Slika 49. Drugo usporedno mjerenje broja čestica s radom motora pri 33 Nm i 1810 okretaja s novim pozicijama senzora 54
Slika 50. Deformirano kućište PMS5003 uređaja u frontalnom (lijevo) i stražnjem (desno) pogledu 55
Slika 51. Unutrašnjost uređaja nakon toplinskih preopterećenja 55
Slika 52. Karta mjernih postaja [53] 56
Slika 53. Novogodišnje vrijednosti PM_{10} pod utjecajem vatrometa 57
Slika 54. Koncentracije PM_{10} drugog mjerenja 58

Slika 55. Koncentracije NO_2 drugog mjerenja 59
Slika 56. Koncentracije PM_{10} trećeg mjerenja 59
Slika 57. Koncentracije NO_2 trećeg mjerenja 60
Slika 58. Koncentracije PM_{10} četvrtog mjerenja 60
Slika 59. Koncentracije NO_2 četvrtog mjerenja 61
Slika 60. Jednostavni mjerni sustav na mjernoj lokaciji FSB 62
Slika 61. Koncentracije PM_{10} prvog mjerenja 63
Slika 62. Koncentracije NO_2 prvog mjerenja 63
Slika 63. Koncentracije PM_{10} drugog mjerenja 64
Slika 64. Koncentracije NO_2 drugog mjerenja 64

POPIS TABLICA

Tablica 1. Razine indeksa za različite onečišćujuće tvari [9] 4
Tablica 2. Obavijest građanima o indeksu kvalitete zraka [10] 5
Tablica 3. Ocjena kvalitete zraka za $PM_{2,5}$ u 2018. godini [16] 7
Tablica 4. Elektrokemijski senzori dva različita proizvođača 22
Tablica 5. Cijena komponenti jednostavnog mjernog sustava 27
Tablica 6. Osjetljivost na druge kemijske spojeve 30
Tablica 7. Uvjeti mjerenja 31
Tablica 8. Povezivanje microSD modula s Arduinom 34
Tablica 9. Uvjeti mjerenja 48

POPIS KRATICA

BAM	Atenuacija beta zračenja, eng. *Beta Attenuation Monitor*
CAQI	Indeks kvalitete zraka, eng. *Common Air Quality Index*
DPP	Donji prag procjene
EAQI	Europski indeks kvalitete zraka, eng. *Europe Air Quality Index*
EDL	Bezelektrodna lampa, eng. *Electrodeless Discharge Lamp*
GPP	Gornji prag procjene
I2C	Komunikacijski protokol, eng. *Inter-Integrated Circuit*
LED	Svjetlosno emitirajuća dioda, eng. *light emiting diode*
MISO	Konektor za prijenos podataka SPI komunikacijskog protokola, eng. *Master Input / Slave Output*
MOSI	Konektor za prijenos podataka SPI komunikacijskog protokola, eng. *Master Output / Slave Input*
NDUV	Nedisperzivno ultraljubičasto, eng. *non-dispersive ultraviolet*
$PM_{2,5}$	Lebdeće čestice aerodinamičkog promjera do 2,5 μm, eng. *particulate matter*
PM_{10}	Lebdeće čestice aerodinamičkog promjera do 10 μm
PPI	Pokazatelj prosječne izloženosti
SCLK	Konektor za signal sata SPI komunikacije, eng. *Serial Clock*
SPI	Komunikacijski protokol, eng. *Serial Peripheral Interface*
SS/CS	Konektor za uspostavljanje SPI komunikacije, eng. *Slave Select / Chip Select*
UVRAS	Apsorpcijska spektroskopija ultraljubičastog rezonantnog zračenja, eng. *Ultraviolet Resonance Absorption Spectroscopy*
UART	Komunikacijski protokol, eng. *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*)

SAŽETAK

Onečišćujuće tvari u zraku mogu imati ozbiljne posljedice na ljudsko zdravlje. Povećanje koncentracije lebdećih čestica i dušikovih oksida velikim je dijelom uzrokovano energetskim sektorom, industrijom i sektorom transporta, zbog čega je potrebno ograničiti koncentracije onečišćujućih tvari u zraku. Objektivnom procjenom kvalitete zraka dolazi se do podataka na temelju kojih se određuju mjere zaštite i poboljšanja kvalitete zraka s ciljem smanjenja štetnih posljedica na ljudsko zdravlje i povećanja kvalitete života. U ovom radu prikazani su onečišćivači zraka te postupak procjene kvalitete zraka i određivanja indeksa kvalitete zraka. Nadalje, prikazane su određene metode mjerenja kvalitete zraka koje se koriste u državnim mjernim sustavima te je konstruiran jednostavni mjerni sustav za mjerenje koncentracije lebdećih čestica i dušikova dioksida.

Jednostavnim mjernim uređajem provedena su mjerenja kvalitete zraka na dvije različite lokacije u gradu Zagrebu. Rezultati mjerenja usrednjavani su u vremenskom intervalu od jednoga sata i uspoređeni su s rezultatima mjerenja državnih mjernih stanica.

KLJUČNE RIJEČI: senzor, kvaliteta zraka, mjerenje, dušikov dioksid, lebdeće čestice

SUMMARY

Air pollutants can have serious effects on human health. The increase in the concentration of particulate matter and nitrogen oxides is mainly caused by the energy sector, industry and the transport sector. Due to stated, it is necessary to limit the concentrations of pollutants in the air. Protection measures and air quality improvement are based on air quality monitoring results, with the aim of reducing the adverse effects on human health and increasing the quality of life. This paper presents air pollutants, as well as the process of air quality assessment and air quality index determination. Furthermore, the paper presents certain air quality measurement methods used in state measurement systems. Moreover, a simple measuring system was designed to measure the concentration of particulate matter and nitrogen dioxide.

A simple measuring device carried out air quality measurements at two different locations in Zagreb. Measurement data were averaged over a one-hour time interval and were compared with measurements of state stations.

KEYWORDS: sensor, air quality, measurement, nitrogen dioxide, particulate matter

1. UVOD

Razvojem industrija povećalo se i onečišćenje zraka koje može imati negativan utjecaj na zdravlje i kvalitetu života živih bića te vegetaciju. Kratkotrajno izlaganje umjereno onečišćenom zraku najčešće ne uzrokuje ozbiljne posljedice općoj populaciji, no dugotrajno izlaganje zraku s visokim koncentracijama onečišćujućih tvari može imati negativne posljedice na ljudski organizam. Najugroženije skupine su srčani i plućni bolesnici, a posebno osjetljive skupine ljudi su starije osobe i djeca [1]. Objektivnom procjenom kvalitete zraka dolazi se do podataka na temelju kojih se određuju mjere zaštite i poboljšanja kvalitete zraka s ciljem smanjenja štetnih posljedica na ljudsko zdravlje i povećanja kvalitete života.

Najveći onečišćivači zraka su industrije, sektor transporta, agrikultura te prirodne pojave (npr. erupcija vulkana) [2], . Aktualna tema gotovo svih velikih gradova u svijetu je potreba za smanjenjem zagađenja koje je posljedica sektora transporta, posebice motornih vozila. Naime, ekspanzivni porast broja automobila, kao i velike količine ispušnih plinova koje oni proizvode, doveli su do znatnog lokalnog zagađenja okoliša te smanjili kvalitetu života. Prema statistici, 1950. godine bilo je oko 53 milijuna automobila u svijetu, dok je 44 godine kasnije globalna automobilska flota narasla na više od 460 milijuna [3]. Prosječno, flota je u navedenom razdoblju rasla za 9,5 milijuna jedinica na godinu. Shodno tome, emisija stakleničkih plinova po kilometru putovanja osobnim vozilom porasla je za 13 % u posljednjem desetljeću 20. stoljeća [3]. Zagađenje okoliša izgaranjem fosilnih goriva doprinosi akumulaciji stakleničkih plinova u atmosferi te je neposredno odgovorno za klimatske promjene u svijetu, ali i za zdravlje ljudi.

Najveći doprinos povećanju dušikovih oksida i lebdećih čestica ima energetski, industrije i sektor transporta, posebice motori s kompresijskim paljenjem [4], [5]. Smanjenje koncentracije navedenih polutanata u urbanoj sredini može se postići udaljavanjem industrijske zone od gusto naseljenog područja, dok je sektor transporta onečišćivač kojeg je teže regulirati. Neki gradovi su već poduzeli stroge mjere poput zabrane prometovanja vozila koja ne ispunjavaju određene emisijske norme.

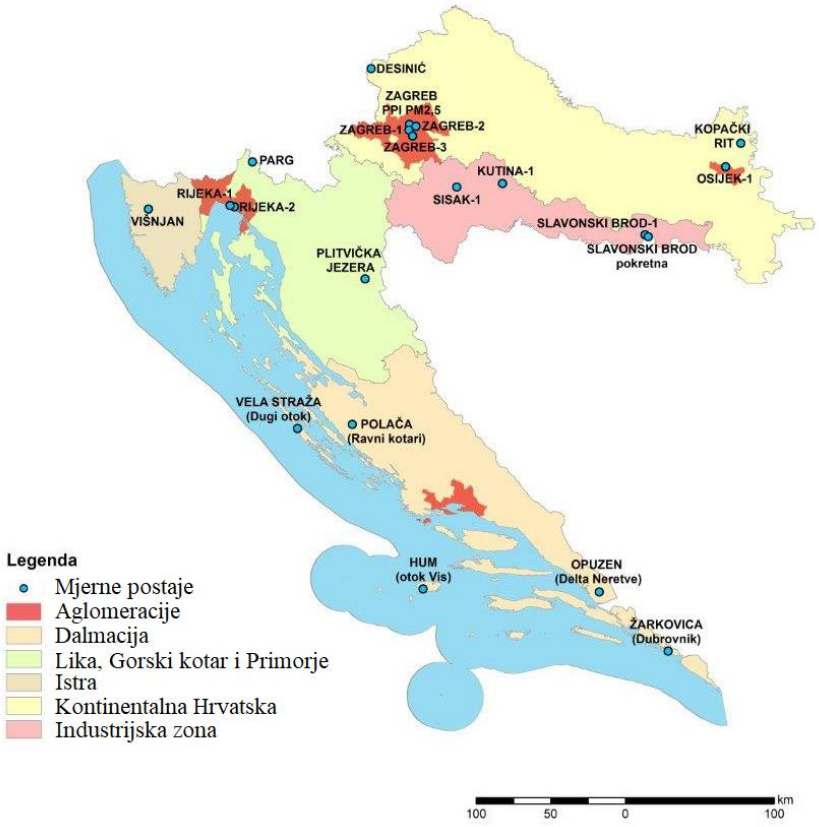
Produkti izgaranja najveći negativni zdravstveni utjecaj imaju na dišni sustav. Naime, procijenjeno je da je onečišćenje zraka odgovorno za 24 000 preuranjenih smrti u Velikoj Britaniji svake godine. Mnoge od tih smrti uzrokovane su astmom, bronhitisom i drugim bolestima dišnog sustava za koje je potvrđeno da se pogoršavaju izlaganjem produktima

izgaranja fosilnih goriva [3], što pokazuje potrebu praćenja i reguliranja koncentracije onečišćujućih tvari.

Mjerenje kvalitete zraka zahtijeva skupe uređaje s velikim troškovima održavanja. Konstruiranjem jednostavnog i relativno jeftinog mjernog uređaja, prikazat će se kako se mogu dobiti informativni podaci o promjeni kvalitete zraka.

2. KVALITETA ZRAKA. INDEKS KVALITETE ZRAKA

Kvaliteta zraka procjenjuje se kako bi se pravovremeno odredila štetnost za ljude te biljni i životinjski svijet kojeg okružuje. Prikupljanjem podataka može se odrediti trend kvalitete zraka pa prema tome na vrijeme aktivno djelovati s ciljem poboljšanja njegove kvalitete, ako je to potrebno. Uredbom o određivanju zona i aglomeracija prema razinama onečišćenosti zraka na teritoriju Republike Hrvatske (NN 1/14) [6] određeno je pet zona i četiri aglomeracije koje se mogu vidjeti na slici 1.



Slika 1. Zone, aglomeracije i državne mjerne postaje u Republici Hrvatskoj [7]

Prema Zakonu o zaštiti zraka (NN 127/19) [8], „*aglomeracija* (*naseljeno područje*) je područje s više od 250 000 stanovnika ili područje s manje od 250 000 stanovnika na kojem je gustoća stanovništva veća od prosječne u Republici Hrvatskoj ili je kvaliteta zraka znatno narušena te je nužna ocjena i upravljanje kvalitetom zraka“. Prema istome Zakonu, „*zona* (*područje*) je jedan od razgraničenih dijelova teritorija Republike Hrvatske, od ostalih takvih

dijelova, koji predstavlja funkcionalnu cjelinu s obzirom na praćenje, zaštitu i poboljšanje kvalitete zraka te upravljanje kvalitetom zraka“. Svakoj zoni/aglomeraciji dodijeljena je posebna oznaka te se za ta područja usrednjavaju podaci mjerenja i prikazuje kvaliteta zraka u godišnjim izvješćima (tablica 3.).

2.1. Indeks kvalitete zraka

Hrvatski propisi određuju standarde kvalitete zraka za kratkoročne (satne i/ili dnevne) i dugoročne (godišnje) razine kvalitete zraka. Pošto su posljedice na zdravlje ozbiljnije kod dugoročnog izlaganja onečišćujućim tvarima, standardi kvalitete zraka su stroži za dugoročne razine [9]. Indeks kvalitete zraka predstavlja ocjenu kratkoročne razine kvalitete zraka te kao takav ne služi za ocjenu onečišćenosti. U tablici 1. prikazane su razine indeksa ovisno o koncentraciji pojedine onečišćujuće tvari u zraku.

Tablica 1. Razine indeksa za različite onečišćujuće tvari [9]

Onečišćujuća tvar	Razina indeksa (na osnovi koncentracija u µg/m^3)				
	Dobro	Prihvatljivo	Umjereno	Loše	Vrlo loše
$PM_{2,5}$	0-10	10-20	20-25	25-50	50-800
PM_{10}	0-20	20-35	35-50	50-100	100-1200
NO_2	0-40	40-100	100-200	200-400	400-1000
O_3	0-80	80-120	120-180	180-240	240-600
SO_2	0-100	100-200	200-350	350-500	500-1250

Koncentracije u tablici 1. imaju različito vrijeme usrednjavanja. Satne koncentracije se koriste za računanje indeksa za dušikov dioksid, prizemni ozon i sumporov dioksid, dok se za PM_{10} i $PM_{2,5}$ koriste 24-satni pomični prosjeci. Koncentracije sumporovog dioksida na prometnim mjernim postajama mogu biti visoke samo u lokaliziranim prostorima, dok je istovremeno koncentracija prizemnog ozona na takvim postajama vrlo niska. Zato se indeks kvalitete zraka takvih postaja računa prema mjerenjima dušikovog oksida i lebdećih čestica [9].

Svaka razina indeksa nosi uz opisni naziv i obavijest građanima o indeksu kvalitete za opću populaciju te za osobe slabog zdravlja i osjetljive osobe, a koje se mogu vidjeti u tablici 2.

Tablica 2. Obavijest građanima o indeksu kvalitete zraka [10]

Indeks kvalitete zraka	Obavijesti za osjetljivu grupu građana (stariji, djeca, oboljeli, trudnice, astmatičari, radnici na otvorenom)	Obavijesti za opću populaciju
Vrlo nizak	Uživajte u svojim svakodnevnim aktivnostima na otvorenom.	Kvaliteta zraka je idealna za aktivnost na otvorenom
Nizak	Uživajte u svojim svakodnevnim aktivnostima na otvorenom.	Kvaliteta zraka je idealna za aktivnost na otvorenom
Srednji	Razmislite o smanjenju zahtjevnijih aktivnosti na otvorenom, ako se pojave simptomi.	Nema potrebe mijenjati svoje uobičajene aktivnosti na otvorenom, osim ako imate simptome kao što su kašalj i iritacija grla
Visok	Smanjite ili odgodite zahtjevnije aktivnosti na otvorenom. Djeca i stariji bi trebali provoditi manje vremena na otvorenom.	Razmislite o smanjenju ili odgađanju zahtjevnijih aktivnosti na otvorenom ako se pojave simptomi kao što su kašalj i iritacija grla.
Vrlo visok	Izbjegavajte zahtjevnije aktivnosti na otvorenom. Djeca i stariji bi također trebali izbjegavati zahtjevnije aktivnosti na otvorenom.	Smanjite ili odgodite zahtjevnije aktivnosti na otvorenom, osobito ako se pojave simptomi kao što su kašalj i iritacija grla.

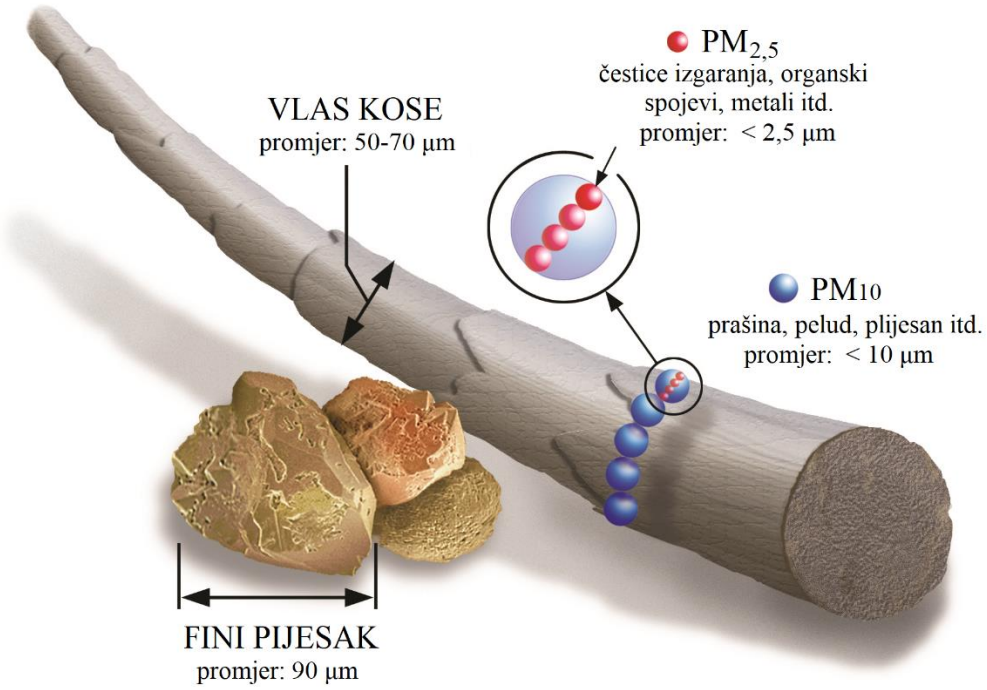
Mogu se primijetiti razlike opisnih naziva u tablicama 1. i 2. U tablici 2., nazivi pripadaju starim oznakama, a glase: vrlo nizak, nizak, srednji, visok i vrlo visok. Takvi nazivi službeno su se koristili od 2006. do 2017. godine, kad se koristio indeks kvalitete zraka CAQI (eng. *Common Air Quality Index*). 2017. godine u Europi se prestaje koristiti CAQI, a na snagu stupa opisani europski indeks kvalitete zraka EAQI (eng. *European Air Quality Index*). Prije je naziv opisivao koliko je indeks visok, a danas kakva je kvaliteta zraka. Osim toga, mogu se primijetiti i razlike u bojama odgovarajućeg razreda indeksa kvalitete zraka. U manjoj mjeri razlikuju se i koncentracije po kojima se određuje razina indeksa kvalitete zraka.

2.2. Lebdeće čestice

Lebdeće čestice su skup tekućih i čvrstih štetnih čestica u zraku (eng. *particulate matter* - PM). Lebdeće čestice podijeljene su u skupine prema veličini, odnosno aerodinamičnom promjeru. Pošto čestice nisu pravilnog sferičnog oblika, ne može se prikazati običnim promjerom, nego se određuje ekvivalentni aerodinamični promjer. Aerodinamični promjer ovisi o gustoći čestica, a definira se kao promjer sferične čestice gustoće 1 g/cm^3 s jednakom brzinom taloženja kao i stvarna čestica [11], [12]. Podjela lebdećih čestica u skupine prema geometrijskoj veličini je prikladna jer se pri mjerenju koncentracije filtriranjem dobiju čestice podjednake veličine, ovisno o finoći filtera. Nadalje, taloženje čestica u dišnom sustavu ovisi o njihovim aerodinamičnim svojstvima, koja su također povezana s kemijskim sastavom

lebdećih čestica [1]. Skupine čestica označuju se dodavanjem indeksa veličine uz skraćenicu PM ovisno o aerodinamičnim promjerima. Čestice promjera do 10 μm imaju oznaku PM_{10}, dok kod promjera čestica do 2,5 μm, one imaju oznaku $PM_{2,5}$ itd. Čestice $PM_{2,5}$ nazivaju se još i fine čestice, a čestice promjera manjeg od 0,5 μm ultrafine čestice.

Kako bi se dobio dojam o veličini lebdećih čestica, na slici 2. prikazana je usporedba veličine čestica s vlasi kose i finim pijeskom.



Slika 2. Usporedba veličine čestica [13]

2.2.1. Lebdeće čestice $PM_{2,5}$

Za povećanje koncentracije lebdećih čestica $PM_{2,5}$ veliku ulogu imaju produkti izgaranja iz motora, tj. čestice čađe Dieselovog motora. Napretkom tehnologije, napredovali su i sustavi ubrizgavanja goriva: povećani su tlakovi ubrizgavanja te je omogućeno sitnije raspršivanje goriva za izgaranje, a posljedica toga su sitnije kancerogene čestice koje se oslobađaju u okolinu i ulaze u respiratorni sustav čovjeka i ostalih živih bića. Zbog navedenih razloga, potrebno je ograničiti $PM_{2,5}$ kako bi se na vrijeme mogle poduzeti potrebne mjere ukoliko dođe do opasno visokih vrijednosti.

S obzirom da lebdeće čestice $PM_{2,5}$ imaju negativan utjecaj na ljudsko zdravlje kod dugoročne izloženosti, njihova koncentracija prikazuje se kao srednja vrijednost na godišnjoj razini. Kada bi se rezultati usrednjavali npr. u vremenskom intervalu jednog sata, pojave

visokih koncentracija u takvim intervalima ne bi pružale jasnu sliku izloženosti i utjecaju na ljudsko zdravlje jer kratkoročno izlaganje visokim koncentracijama nije toliko štetno [1]. Osim toga, još uvijek nije jasno utvrđena granica razine koncentracije ispod koje lebdeće čestice $PM_{2,5}$ ne predstavljaju rizik, ali bi se trebalo težiti ka općem smanjenju koncentracije kako bi se poboljšala kvaliteta zraka [14]. Iz tog razloga su utvrđene granične i ciljne vrijednosti kojima treba težiti radi poboljšanja opće kvalitete zraka.

Prema podacima Državnog hidrometeorološkog zavoda [16], u tablici 3. ocjenjena je kvaliteta zraka za lebdeće čestice $PM_{2,5}$ prema pragovima procjene za zaštitu ljudi na temelju Priloga 2 Uredbe o razinama onečišćujućih tvari u zraku (NN 117/12, 84/17) . Gornji prag procjene (GPP) iznosi 70 % granične vrijednosti, a donji prag procjene (DPP) 30 % granične vrijednosti pa se tako kvaliteta zraka za $PM_{2,5}$ ocjenjuje prema vrijednostima 17 $\mu g/m^3$ za gornji, odnosno 12 $\mu g/m^3$ za donji prag procjene. Prekoračenja tih pragova određuju se na temelju srednjih koncentracija (C) tijekom prethodnih pet godina, ako postoji dovoljno podataka. Prag se smatra prekoračen, ako se prekoračenje dogodilo u tri ili više godina od prethodnih pet.

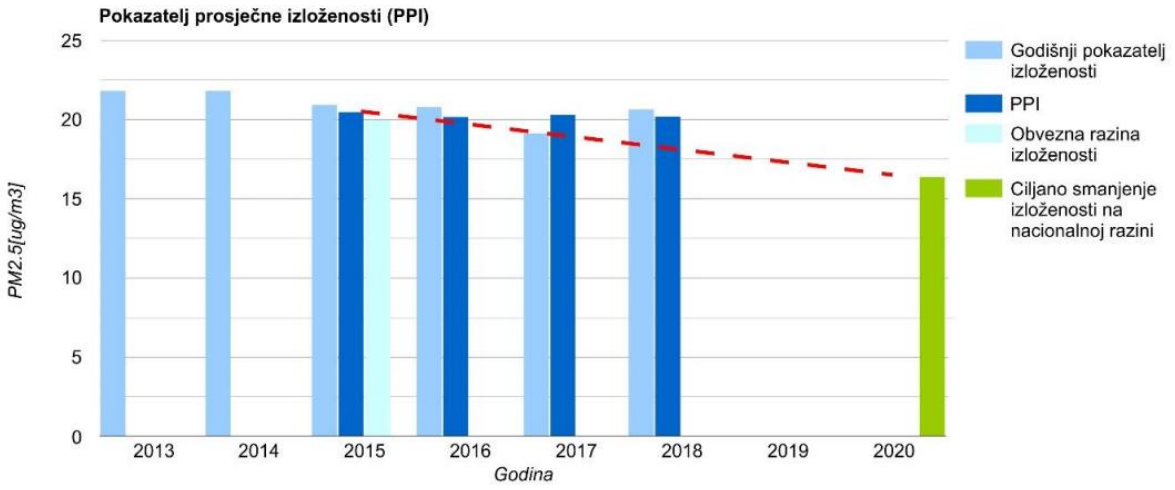
Tablica 3. Ocjena kvalitete zraka za $PM_{2,5}$ u 2018. godini [16]

Mjerno mjesto	Zona / aglomeracija	C ($\mu g/m^3$)	Ocjena		
			C < DPP	DPP < C < GPP	GPP < C
Desinić	HR 01	18			√
Kopački rit		19			√
Slavonski brod-1	HR 02	39			√
Parg	HR 03	10	√		
Plitvička jezera		9	√		
Višnjan	HR 04	9	√		
Hum (otok Vis)	HR 05	8	√		
Polača (Ravni kotari)		9	√		
Vela straža (Dugi otok)		14		√	
Žarkovica (Dubrovnik)		9	√		

U tablici 3. može se vidjeti da najveću godišnju koncentraciju ima Slavonski Brod koja premašuje dvostruku vrijednost gornjeg praga procjene u 2018. godini. Redovi označeni sivom bojom nemaju dostatan obuhvat podataka mjerenja zbog prekida u radu. Najčešći uzroci prekida rada su kvarovi mjernih uređaja, problemi u radu uređaja za prihvat i prijenos podataka te učestali prekidi u opskrbi električnom energijom [1]. Zbog navedenih uzroka nije moguće prikupiti dovoljan broj mjernih podataka da bi oni bili relevantni. Primjerice, mjerna postaja Hum na otoku Visu, osim što je imala probleme u radu uređaja za prihvat i prijenos podataka, nije bila u funkciji od ožujka do kolovoza 2018. godine zbog servisa izvanrednog kvara. Za ovakve situacije bilo bi dobro imati jednostavniji zamjenski mjerni uređaj koji bi mogao dati podatke o kvaliteti zraka koji su nedostupni zbog prekida u radu glavnog uređaja. Iako jednostavni uređaji nemaju jednako veliku pouzdanost podataka mjerenja kao uređaji koji zadovoljavaju pripadajuće norme, kod ovakvih slučajeva bi dali bar informativne podatke o kvaliteti zraka.

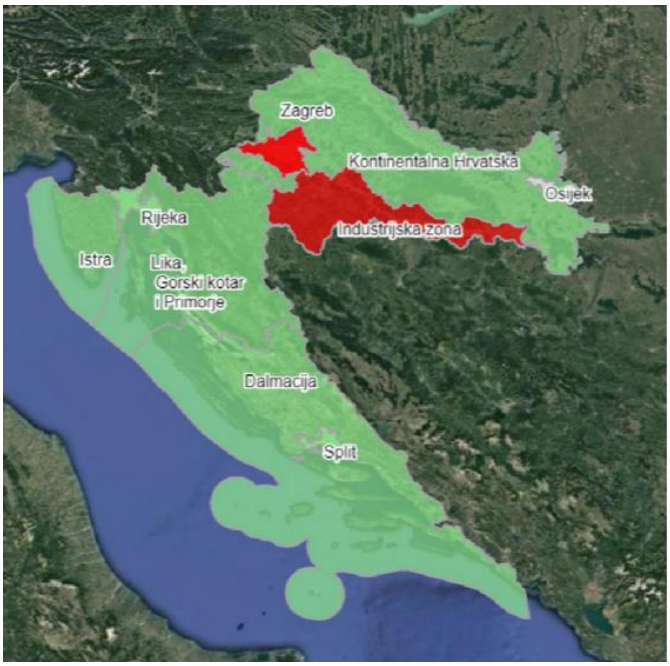
2.2.1.1. Pokazatelj prosječne izloženosti

Drugi način prikazivanja koncentracije čestica $PM_{2,5}$ u zraku je pomoću pokazatelja prosječne izloženosti (PPI), a izražava se u $\mu g/m^3$. PPI se procjenjuje kao prosjek srednjih vrijednosti godišnjih koncentracija u tri uzastopne godine na svim točkama uzorkovanja koje su postavljene u skladu s Direktivom 2008/50/EZ [14] na čitavom teritoriju države. Primjerice, za 2018. godinu, PPI je jednak prosjeku srednjih vrijednosti koncentracije za 2016., 2017. i 2018. godinu te je iznosio 20,25 $\mu g/m^3$ kako je i prikazano grafikonom na slici 3.



Slika 3. Pokazatelj prosječne izloženosti (PPI) u Republici Hrvatskoj [1]

U odnosu na 2017. godinu kada je PPI iznosio 20,35 μg/m^3, vrijednost je u 2018. godini neznatno smanjena, što može ukazati na problem postizanja ciljanog smanjenja izloženosti na nacionalnoj razini prema kojem bi PPI za 2020. godinu trebao iznositi 16,45 μg/m^3 [1]. Još jedan pokazatelj su i ocjene onečišćenosti zona i aglomeracija lebdećim česticama $PM_{2,5}$ što je prikazano na slici 4.



Slika 4. Ocjena onečišćenosti (sukladnosti) zona i aglomeracija lebdećim česticama $PM_{2,5}$ u 2018. godini [1]

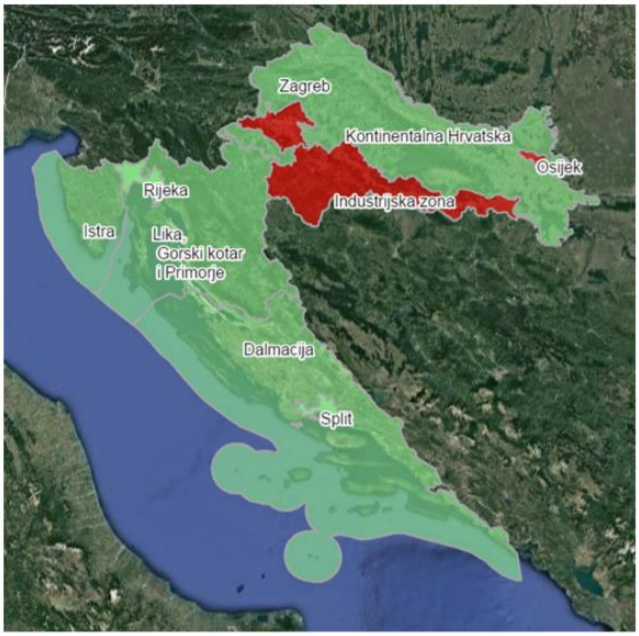
U područjima označenim crvenom bojom prekoračena je granična vrijednost koja je određena s ciljem izbjegavanja, sprečavanja ili umanjivanja štetnih učinaka na ljudsko zdravlje i okoliš [14]. U naznačenim dijelovima Republike Hrvatske ovakvo je stanje već nekoliko godina uzastopno te bi se u skorijoj budućnosti trebale poduzeti mjere kako bi se poboljšala kvaliteta zraka.

2.2.2. Lebdeće čestice PM_{10}

Pri ocjeni onečišćenosti lebdećim česticama PM_{10} relevantni su 24-satni prosjeci te godišnji prosjek izmjerenih koncentracija. Gornji i donji pragovi procjene određuje se kao za $PM_{2,5}$, ali sa drukčijom graničnom vrijednosti koja iznosi 40 μg/m^3 za godišnje usrednjavanje. Osim na godišnjoj razini, čestice PM_{10} se usrednjavaju i u vremenskom intervalu od 24 sata, a

te vrijednosti ne smiju prekoračiti graničnu vrijednost od 50 μg/m^3 više od 35 puta u kalendarskoj godini [14].

Na slici 5. prikazane su ocjene onečišćenosti zona i aglomeracija lebdećim česticama PM_{10}.



Slika 5. Ocjena onečišćenosti (sukladnosti) zona i aglomeracija lebdećim česticama PM_{10} u 2018. godini [1]

Prema Izvješću o praćenju kvalitete zraka za 2018. godinu [1], aglomeracije Zagreb, Osijek i Industrijska zona (slika 1.) nesukladne su s graničnom vrijednošću za 24-satne koncentracije PM_{10} obzirom na zaštitu zdravlja ljudi, dok je Industrijska zona nesukladna i s graničnom vrijednošću za srednju godišnju vrijednost.

2.3. Dušikovi oksidi

Pojam dušikovih oksida podrazumijeva dušikov monoksid i dioksid, a računa se kao zbroj volumnog omjera dušikovog monoksida i dušikovog dioksida, izražen u jedinicama masene koncentracije dušikova dioksida (μg/m^3). Koncentracija dušikovog dioksida usrednjava se u vremenskim intervalima jednog sata te se prikazuje u srednjoj godišnjoj koncentraciji. Prema Direktivi 2008/50/EZ [14], jednosatna srednja koncentracija ne bi smjela prekoračiti graničnu vrijednost od 200 μg/m^3 više od 18 puta tijekom kalendarske godine, a srednja godišnja koncentracija ne smije prekoračiti graničnu vrijednost iznosa 40 μg/m^3.

Gornji prag procjene definira se kao 70 % iznosa granične vrijednosti, a ne smije se prekoračiti više od 18 puta u kalendarskoj godini. Donji prag procjene definira se kao 50 % iznosa granične vrijednosti i također se ne smije prekoračiti više od 18 puta u godini.

Razina iznad koje postoji rizik za zdravlje ljudi i pri kratkotrajnom izlaganju naziva se prag upozorenja. Pri takvoj razini država bi morala poduzeti hitne mjere kako ne bi došlo do ugrožavanja zdravlja ljudi. Prag upozorenja za dušikov dioksid iznosi 400 $\mu g/m^3$, a on se smatra prekoračenim ako je masena koncentracija plina veća od tog broja tijekom tri uzastopna sata.

Onečišćeni zrak ima utjecaj i na vegetaciju pa su određene i kritične razine koncentracije plina za vegetaciju. Za dušikove okside kritična razina u kalendarskoj godini iznosi 30 $\mu g/m^3$. Mjerenja za usporedbu s kritičnim razinama za zaštitu vegetacije vrše se na lokacijama udaljenima od urbanih područja. Prema dostupnim podacima mjerenja, u Republici Hrvatskoj tijekom 2018. godine nije nijednom prekoračena kritična razina za zaštitu vegetaciju, granična vrijednost za zaštitu ljudi niti gornji prag procjene. Ukoliko dođe do prekoračenja gornjeg praga procjene, prema Direktivi 2008/50/EZ [14] u toj zoni potrebno je procjenjivati kvalitetu zraka koristeći mjerenja na stalnom mjestu.

2.4. Sumporov dioksid

Sumporov dioksid se usrednjava u vremenskom intervalu jednog sata te jednog dana. Prema [14], granična vrijednost srednje koncentracije u jednom satu iznosi 350 $\mu g/m^3$, a ona se ne bi smjela prekoračiti više od 24 puta u kalendarskoj godini. Srednja dnevna koncentracija ne smije više od tri puta u kalendarskoj godini prekoračiti graničnu vrijednost koja iznosi 124 $\mu g/m^3$. Prag upozorenja za sumporov dioksid iznosi 500 $\mu g/m^3$, a smatra se prekoračenim jednako kao za dušikov dioksid: ako je masena koncentracija plina veća od odgovarajućeg praga tijekom tri uzastopna sata. U Republici Hrvatskoj je 2018. godine zabilježena samo jedna pojava satne koncentracije veće od praga upozorenja i to u Rijeci, međutim prag upozorenja nije prekoračen.

Kritična razina za zaštitu vegetacije iznosi 20 $\mu g/m^3$, a relevantni podaci usrednjavaju se u vremenskom intervalu od jedne kalendarske godine i tijekom zime (od 1. listopada do 31. ožujka), kada je povećana emisija SO_2 kao produkt grijanja.

Na svim stanicama koje imaju dovoljan obuhvat podataka, ocjene kvalitete zraka za 2018. godinu su bile zadovoljavajuće. Mjerna stanica Slavonski Brod-2 ima nedostatan obuhvat mjernih podataka koji iznosi manje od 75 % zbog čestih izvanrednih kvarova mjernog

uređaja i dugotrajnog roka nabavke rezervnih dijelova [1]. Treba ukazati na problem nedostatka podataka gdje bi indikativna mjerenja koja zadovoljavaju manje stroge ciljeve kvalitete podataka od onih koji su izmjereni na stalnim mjernim mjestima, u ovakvim slučajevima, dala dovoljan broj podataka o kvaliteti zraka u razdoblju kad mjerenje na stalnom mjestu nije bilo moguće.

3. METODE ZA MJERENJE KVALITETE ZRAKA

Referentne metode mjerenja pojedinih onečišćivača zraka određene su Pravilnikom o praćenju kvalitete zraka (NN, 79/17). Također, Pravilnikom su određeni i načini dokazivanja ekvivalentnosti za druge metode mjerenja, provjera kvalitete mjerenja i podataka, načini obrade i prikaza rezultata itd.

U daljnjem tekstu opisani su principi rada najčešćih metoda mjerenja na mjernim postajama u Republici Hrvatskoj.

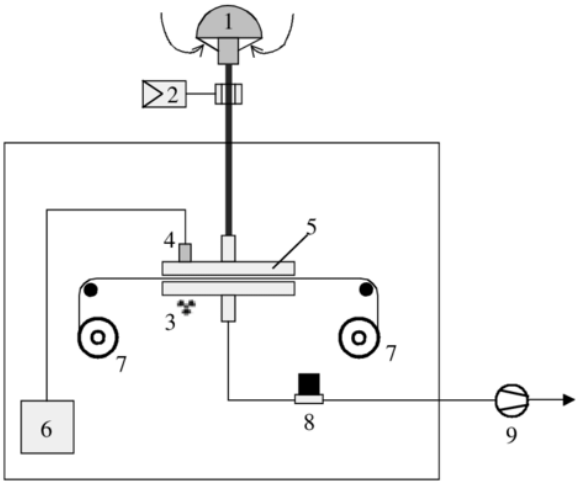
3.1. Gravimetrijska metoda

Metoda za određivanje masenih koncentracija lebdećih čestica vaganjem filtera naziva se gravimetrijska metoda. Gravimetrija je referentna metoda kojom se provjerava točnost mjerenja čestica drugim ne-referentnim metodama, a opisana je normom HRN EN 12341:2014. Ovakva metoda je jako osjetljiva zbog mjerenja vrlo malih iznosa te je potrebno voditi računa o velikom broju parametara. Filter je potrebno držati u kontroliranim uvjetima kako ne bi došlo do neželjenih promjena u masi uzrokovanih promjenom temperature, vlažnosti zraka ili kontaminacijom okolnog zraka. Također, utjecaj na mjerenje može imati statički elektricitet na filteru pri mjerenju malih masa [18].

Pošto se kod gravimetrijske metode mjeri samo masa čestica u zraku, izlazni podatak može se činiti irelevantan za doprinos zagađenju zraka [19], jer manje čestice imaju manju masu. Treba imati na umu da dugotrajnom izloženosti manje čestice više škode ljudskom organizmu [20] jer ulaze u pluća i tamo se zadržavaju.

3.2. Metoda atenuacije beta zračenja

Metoda atenuacije beta zračenja skraćeno se naziva BAM (eng. *Beta Attenutation Monitor*), a zasniva se na mjerenju zračenja koje prolazi kroz filter. Zračenje se prvo mjeri bez uzorka zraka na filteru te s uzorkom zraka. Iz razlike izmjerenih podataka može se dobiti masena koncentracija čestica. Shematski prikaz BAM uređaja može se vidjeti na slici 6.



1 ulaz plina (zraka)
2 grijanje cijevi
3 izvor beta zračenja
4 Geiger-Müllerov brojač
5 kućište filtera
6 mikroprocesor
7 filter u obliku trake
8 uređaj za mjerenje masenog protoka
9 vakuumska pumpa

Slika 6. Shematski prikaz uređaja s atenuacijom beta zračenja [21]

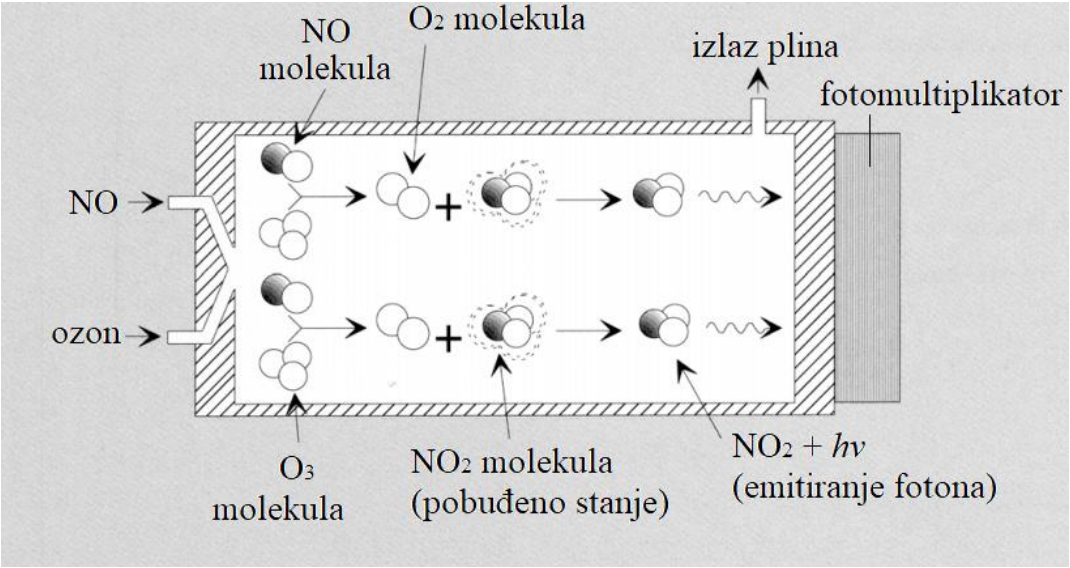
U dovod zraka (1) ulazi uzorak zraka, a potom se u razdjelniku odvajaju čestice promjera većeg od 2,5 μm kako bi se dobili rezultati mjerenja za $PM_{2,5}$. Uzorak zraka zatim prolazi kroz filter (7) u obliku trake. Izvor beta zračenja (3) najčešće je ugljik-14 (^{14}C) koji se nalazi s jedne strane trake, dok je s druge strane Geiger-Müllerov brojač (4) koji detektira zračenje kroz traku prije uzorkovanja. Nakon prolaska uzorka zraka, zasad nepoznata količina čestica ostaje na filteru. Pri tome Geiger-Müllerov brojač detektira manje zračenje zbog nataloženih čestica iz zraka. Razlika u izmjerenom zračenju proporcionalna je masi čestica u uzorku zraka. Mjerenjem volumena uzorka, lako se može izraziti masa čestica po jedinici volumena.

3.3. Kemiluminiscencija

Kemiluminiscencija (eng. *chemiluminescence detection*- CLD) je metoda koja se koristi za mjerenje dušikovih oksida (NO_x). Reakcija koja je neizostavna za mjerenje je reakcija dušikovog monoksida i ozona čime nastaje dušikov dioksid:

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2^* + O_2 \quad (1)$$

Zvjezdica u jednadžbi (1) označava da je molekula NO_2 u pobuđenom stanju. Ona se u svoje osnovno energijsko stanje vraća emitiranjem fotona, odnosno crvenog svjetla. Upravo zato je ova metoda dobila to ime. Nadalje, senzor kao osjetni element prima taj signal te ga pretvara u napon koji je proporcionalan broju emitiranih fotona. Senzori koji mogu osjetiti signal koji uzrokuje foton su fotomultiplikator i lavinska fotodioda. Princip rada fotodiode opisan je uz sliku 17., a treba napomenuti da lavinska dioda ima 10000 puta veću fotoosjetljivost pa je zbog toga u stanju detektirati malu energiju emitiranog fotona.



Slika 7. Reakcija dušikovog monoksida i ozona [22]

Na opisani način mjeri se koncentracija NO u uzorku zraka. Kako bi se odredio podatak o koncentraciji NO_x (ukupna koncentracija NO_2 i NO), potrebno je napraviti pretvorbu NO_2 u NO prije nego započne reakcija dušikovog monoksida i ozona. To se omogućava grijanim slojem od staklastog ugljika kojeg karakteriziraju otpornost na visoke temperature, visoka tvrdoća te visoka toplinska i električna vodljivost [22]. Za vrijeme pretvorbe NO_2 u NO, dušikov monoksid koji je ušao s okolnim zrakom ostaje nepromijenjen. Nakon što je uzorak zraka prošao ovu fazu, odvija se promjena prema slici 7. Na taj se način dobije ukupna vrijednost NO_2 i NO u zraku izražena kao NO_x.

Mjerenjem NO i NO_x, lako se može izračunati koncentracija NO_2. Nedostatak kod ovakvog mjerenja može biti što uređaji koji koriste ovakvu metodu često imaju jednu komoru za dvije opisane pretvorbe, stoga naizmjenično mjere NO i NO_x u intervalima, gdje postoji mogućnost da su se između intervala promijenile koncentracije NO i NO_x u zraku pa će

procjena NO_2 biti netočna [23]. Greška se može ukloniti mjerenjem dvokanalnim uređajem u kojemu se istovremeno u jednom kanalu mjeri koncentracija NO, a u drugom NO_x. Greške jednokanalnog mjernog uređaja nisu značajne za mjerenje kvalitete zraka jer promjene u koncentraciji vanjskog zraka ne osciliraju u tolikoj mjeri da bi napravile znatna odstupanja u mjerenju pa se ova metoda može smatrati pouzdanom.

3.4. Metode apsorpcijske spektroskopije

Metode apsorpcijske spektroskopije temelje se na Lambert-Beerovom zakonu kojim se može odrediti koncentracija molekula *c* u ovisnosti o izmjerenoj fizikalnoj veličini, apsorbanciji *A* pripadne molekule prema jednadžbi [23]:

$$A = \log\left(\frac{I_0}{I}\right) = \varepsilon bc \tag{2}$$

gdje je

A - apsorbancija pri određenoj valnoj duljini,

I_0 - intenzitet emitirane svjetlosti,

I - intenzitet detektirane svjetlosti,

ε [L mol^{-1} cm^{-1}] molarni apsorpcijski koeficijent,

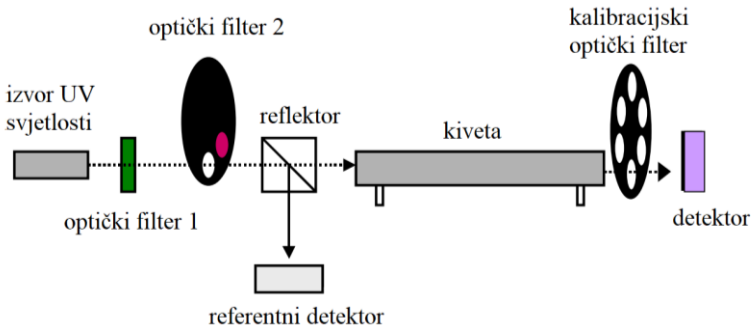
b [cm] duljina puta svjetlosti kroz uzorak,

c [mol L^{-1}] koncentracija tvari u otopini.

Apsorbancija je bezdimenzijska veličina, a predstavlja logaritam omjera emitiranog intenziteta svjetlosti I_0 i detektiranog intenziteta *I* nakon kivete. Molarni apsorpcijski koeficijent ε svojstven je svakoj molekulskoj vrsti i ovisan o valnoj duljini svjetlosti [23].

3.4.1. Nedisperzivna ultraljubičasta apsorpcijska spektroskopija

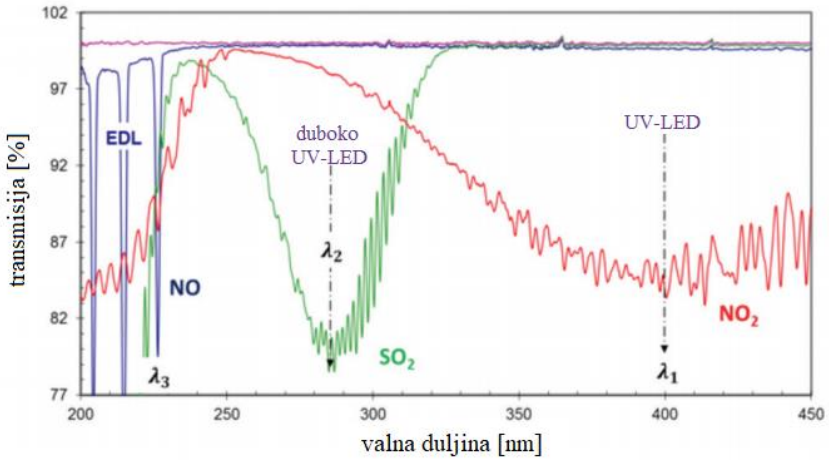
Naziv metode dolazi od eng. *Non-dispersive ultra-violet* - NDUV, a koristi se za mjerenje NO_x i SO_2 molekula. Slika 8. shematski prikazuje princip rada ove metode.



Slika 8. Shema uređaja s nedisperzivnom ultraljubičastom apsorpcijom [25]

Izvor svjetlosti emitira UV svjetlo kroz optički filter nakon čega se zraka svjetlosti reflektira u dva smjera: jedan snop usmjeren je prema referentnom detektoru, a drugi snop svjetla prema kiveti u kojoj je uzorak plina. Prolaskom svjetlosti odgovarajuće valne duljine kroz kivetu, molekulama dušikovih oksida omogućuje se apsorpcija svjetlosne energije. Različite molekule imaju različitu apsorpcijsku valnu duljinu, a ona se regulira pomoću optičkih filtera ispred kivete ovisno o tome koje molekule u uzorku se žele mjeriti. Zrake UV svjetla lome se u reflektoru kako bi referentni detektor primio signal svjetlosti ukupne energije. Drugi smjer zrake je kroz kivetu prema drugom detektoru. Prolaskom kroz kivetu u kojoj se nalaze molekule plina, one apsorbiraju svjetlosno zračenje odgovarajuće apsorpcijske valne duljine, a preostalo zračenje prima detektor iza kivete. Uz pomoć referentnog detektora, poznata je razlika zračenja koju su apsorbirale molekule, a ona je proporcionalna broju molekula u uzorku.

Valna duljina UV svjetla određena je optičkim filterom ovisno o molekulama čija se koncentracija mjeri. Može se vidjeti ovisnost transmisije o valnoj duljini molekule na slici 9**.**



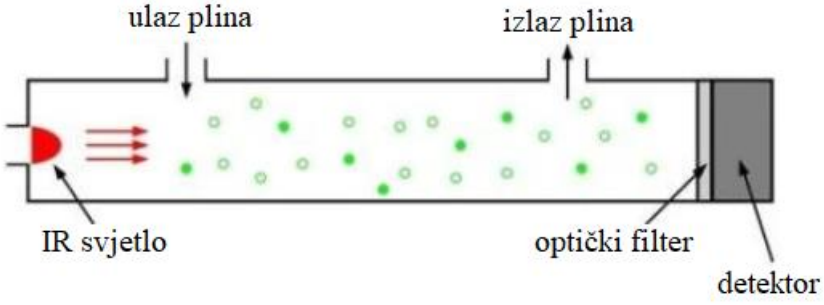
Slika 9. Transmisijski spektri dušikovih oksida i sumporovog dioksida [26]

Prikazani su transmisijski spektri NO, NO_2 i SO_2 u rasponu valne duljine UV svjetla od 200 nm do 450 nm. Transmisija predstavlja propušteno zračenje [23] koje mjeri detektor iza kivete. Što je više zračenja apsorbirano, manje će biti transmisijsko zračenje pa će tako najmanja transmisija biti na valnoj duljini maksimalne apsorpcije odgovarajuće molekule. Uobičajene valne duljine [26] UV-LED izvora svjetla za mjerenje su 405 nm za NO_2, 285 nm za SO_2 i 226 nm za NO. Preciznost mjerenja ovakve metode očituje se u tome što su apsorpcijske valne duljine svojstvene skupu istovrsnih molekulskih jedinki pa je osjetljivost senzora na druge molekule jako mala.

Posebna izvedba NDUV metode je UVRAS metoda (eng. UV *Resonance Absorption Spectroscopy*). Kod takvih uređaja, izvor svjetlosti nije LED, nego šuplja katodna lampa ili bezelektrodna lampa (eng. *Electrodeless Discharge Lamp* - EDL). EDL se sastoji od kvarcne cijevi unutar koje se nalaze plinovi N_2 i O_2. Dovođenjem energije, dolazi do razdvajanja molekula N_2 i O_2 na elementarni dušik i kisik, nakon čega se kao takvi vezuju u NO u pobuđenom stanju [25]. Potom takve pobuđene molekule emitiraju ultraljubičasto rezonantno zračenje koje nadalje odlazi prema reflektoru. Takva tehnologija bezelektrodnih lampi omogućuje visoku preciznost i osjetljivost detekcije te dugi vijek trajanja [27].

3.4.2. Nedisperzivna infracrvena apsorpcijska spektroskopija

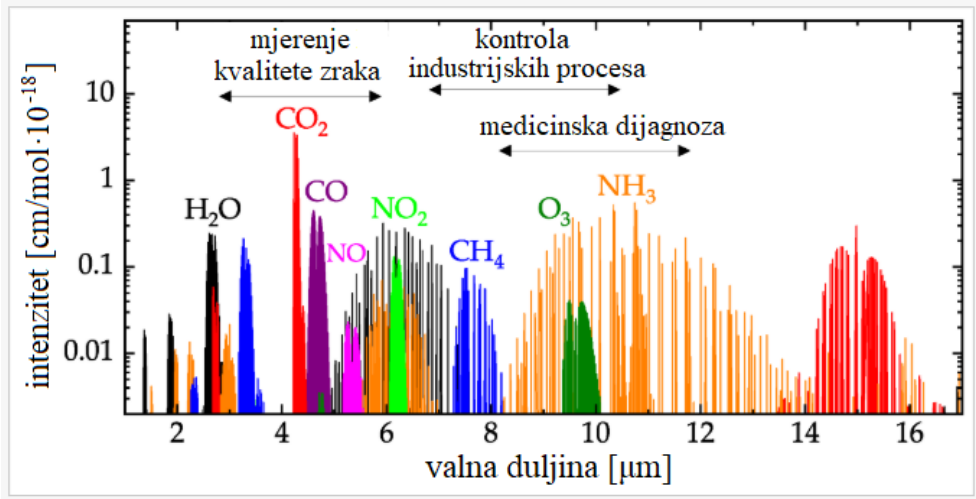
Princip nedisperzivne infracrvene apsorpcijske spektroskopije (eng. *non-dispersive infrared* - NDIR) sličan je NDUV apsorpcijskoj spektroskopiji. Izvor svjetla u NDIR senzoru emitira infracrveno zračenje prema optičkom filteru koje ga zatim apsorbira, a detektor mjeri koliko je zračenja apsorbirano filterom (slika 10.).



Slika 10. NDIR CO_2 senzor [28]

Pošto valna duljina infracrvenog zračenja iznosi 4,2 μm, a apsorpcijska valna duljina ugljikovog dioksida 4,26 μm, ugljikov dioksid apsorbira infracrveno zračenje [28]. Razlika

emitiranog zračenja i zračenja apsorbiranog filterom, koje je izmjerio detektor, predstavlja ukupno zračenje koje su apsorbirale molekule CO_2 pa je moguće odrediti koncentraciju ugljikovog dioksida u uzorku plina. Na slici 11. prikazane su apsorpcijske valne duljine infracrvenog zračenja pojedinih molekula uz intenzitet infracrvenog zračenja [29] na ordinati.



Slika 11. Apsorpcijske valne duljine molekula [30]

Mogu se primijetiti razlike u valnoj apsorpcijskoj duljini pripadajućih molekula. Ako se emitira zračenje valne duljine koja je približnog iznosa apsorpcijskoj valnoj duljini ugljikovog dioksida, tu svjetlosnu energiju neće apsorbirati druge molekule, ako nije u njihovom apsorpcijskom spektru, stoga se ova metoda mjerenja može smatrati pouzdanom za mjerenje koncentracija ciljanog plina.

4. JEDNOSTAVNI MJERNI UREĐAJI

Jednostavni mjerni uređaji razvijali su se paralelno s razvojem tehnologija. Prvi uređaji za mjerenje koncentracije ugljikovog dioksida u plinu (zraku) mjerili su pomoću živinog manometra. Mjerio bi se tlak plinova te se uz poznatu temperaturu i volumen uzorka plina pomoću jednadžbe idealnog plina[1] računa količina ugljikovog dioksida [32]. Ovakav tip mjerenja je zadovoljavajuće točnosti no mjerenje je relativno zahtjevno i dugotrajno. Danas su mjerni uređaji bazirani na elektronici, zauzimaju manje prostora te se na tržištu mogu naći senzori zadovoljavajuće kvalitete uz pristupačnu cijenu.

4.1. Senzori za mjerenje koncentracije plina

Senzori za mjerenje koncentracije plina dijele se na nekoliko vrsta ovisno o principu rada [31]:

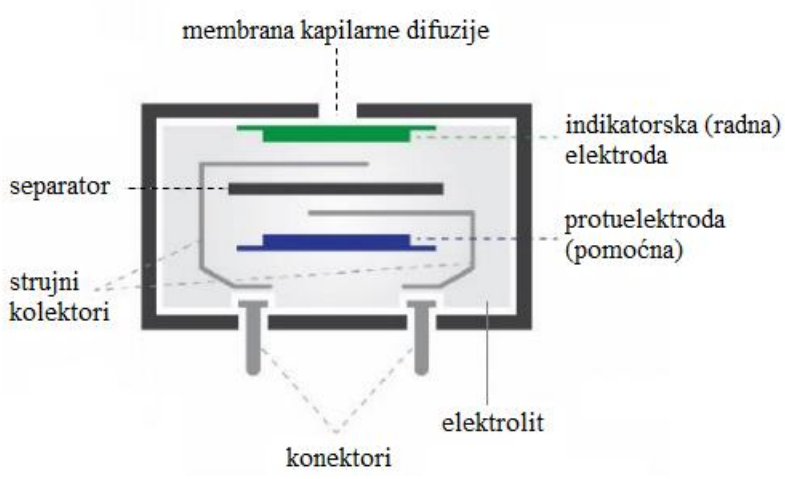
- elektrokemijski
- optički
- kalorimetrijski
- akustički
- metal-oksidni

Od spomenutih principa rada, na tržištu su najviše zastupljeni elektrokemijski senzori za mjerenje koncentracije plinova u jednostavnim mjernim uređajima.

4.1.1. Elektrokemijski senzor

Elektrokemijski senzor generira električki signal proporcionalan volumnom udjelu određenog plina [33]. Na slici 12. shematski je, u presjeku, prikazan potenciometrijski elektrokemijski senzor.

[1] Jednadžba idealnog plina: $pV=nRT$

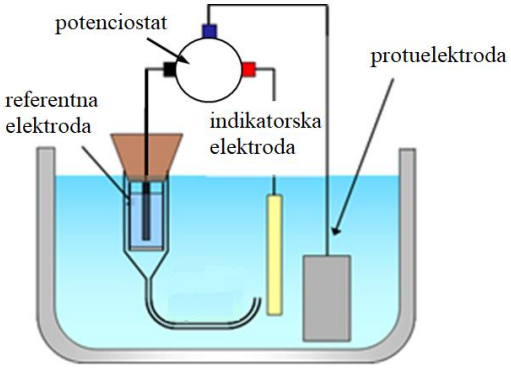


Slika 12. Shematski prikaz elektrokemijskog senzora [33]

Kod potenciometrijskog senzora, odzivni signal jednak je razlici potencijala između elektroda. Potencijal protuelektrode određen je elektrolitom, a potencijal radne elektrode mijenja se ovisno o okolnom zraku.

Elektrokemijska reakcija odvija se na indikatorskoj ili radnoj elektrodi koja je izrađena od metala koji služi kao katalitički aktivna komponenta. Vrsta metala ovisi o molekulskim skupinama čija koncentracija se želi mjeriti [33] te o materijalu membrane [34]. Plin prolazi kroz membranu i reagira u doticaju s radnom elektrodom. Ta reakcija na radnoj elektrodi uzrokuje odzivni signal [35], dok protuelektroda omogućuje ostvarivanje el. struje kroz elektrolit.

Opisan je princip rada dvoelektrodne elektrokemijske ćelije. Danas se najčešće primjenjuju troelektrodne elektrokemijske ćelije [35] kod kojih je treća elektroda tzv. referentna elektroda. Troelektrodna elektrokemijska ćelija prikazana je na slici 13.



Slika 13. Shematski prikaz troelektrodnog elektrokemijskog senzora [33]

Referentna elektroda služi za regulaciju signala pobude, tj. za mjerenje signala odziva [37], a rezultat je poboljšana stabilnost, smanjenje šuma signala te smanjeno vrijeme odziva u odnosu na dvoelektrodnu ćeliju pružajući stabilni elektrokemijski potencijal u elektrolitu. Kako ne bi došlo do promjene tog potencijala, kroz referentnu elektrodu ne smije teći struja [33].

Potenciostat je uređaj koji mijenja potencijal pomoćne elektrode ovisno o jakosti struje kroz ćeliju, zbog čega je razlika potencijala između radne i referentne elektrode jednaka zadanoj (reguliranoj) vrijednosti [37].

Elektrokemijski senzor mjeri koncentraciju jednog plina, a na tržištu se mogu naći elektrokemijski senzori za velik broj različitih plinova. Svi elektrokemijski senzori imaju osjetljivost na više plinova (eng. *cross-sensitivity*), ali se ne može mjeriti pripadajuća koncentracija za različite plinove. U tablici 4. prikazani su neki od dostupnih elektrokemijskih senzora dva različita proizvođača.

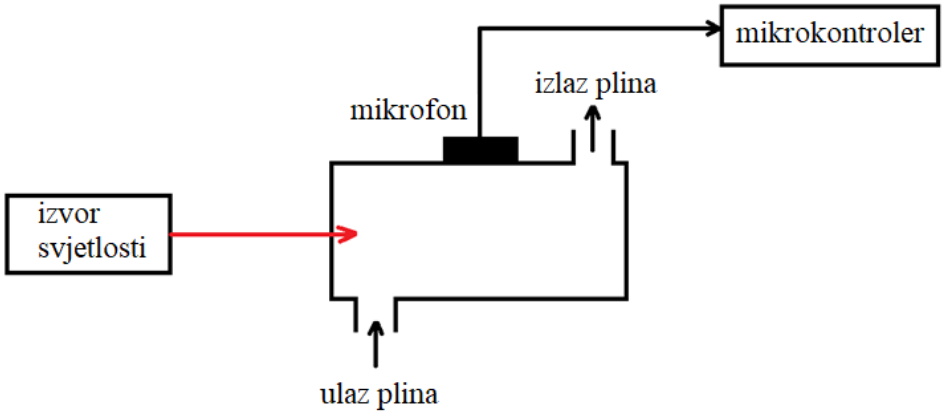
Tablica 4. Elektrokemijski senzori dva različita proizvođača

Proizvođač	Plin										
Tecnosens:	CO	NO_2	H_2S	O_2	H	NO	SO_2	Cl	C_2H_4O	AsH_3	NH_3
SPEC				O_3							

Jedan od nedostataka elektrokemijskih senzora je osjetljivost na druge molekule (eng. c*ross-sensitivity*). Primjerice, NO_2 elektrokemijski senzor ima relativno veliku osjetljivost na ozon i klor. Pošto klor nije jedan od onečišćujućih tvari u zraku, on nema utjecaj na mjerenje kvalitete zraka, dok je ozon uvijek prisutan u okolnom zraku [38]. Jedan od načina rješavanja tog problema je dodavanje filtera u senzor koji bi u većoj mjeri uklonio utjecaj ozona. Problem ovakve metode smanjenja osjetljivosti na druge molekule je što može doći do smanjenja osjetljivosti senzora na ciljane molekule koje se mjere. Nadalje, takvi filteri gube učinkovitost prije nego prođe životni vijek senzora. Drugi način bi bio mjeriti ozon drugim senzorom koji nema osjetljivost na NO_2 pa prema dobivenim mjerenjima raditi korekcije u rezultatima mjerenja NO_2 senzora [38].

4.1.2. *Fotoakustički senzor*

Na slici 14., prikazan je princip rada senzora s fotoakustičkim efektom. Valna duljina svjetla odabire se ovisno o molekulskim skupinama koje se žele mjeriti, jer različite molekulske skupine imaju različite apsorpcijske spektre.



Slika 14. Fotoakustički senzor

Apsorpcijom emitiranog zračenja, molekula dolazi u pobuđeno stanje. U svoje osnovno stanje vraća se otpuštanjem, tj. prijenosom energije, a to se može ostvariti na tri načina [39]:

- Emitiranjem fotona
- Neelastičnim sudarom s drugom molekulom
- Elastičnim sudarom s drugom molekulom

Ranije su opisane spektrometrijske metode u kojima se molekula vraća u osnovno stanje emitiranjem fotona te se pomoću detekcije tih fotona dolazi do koncentracije molekulskih skupina. Kod neelastičnog sudara, unutarnja energija prve molekule sudarom se prenosi na drugu molekulu te se tako prva molekula vraća u osnovno stanje dok je druga molekula u pobuđenom stanju.

Pri koliziji s drugom molekulom, može doći do pretvorbe energije apsorbiranog fotona u translacijsko gibanje druge molekule, odnosno dolazi do elastičnog sudara. Takvom pojavom povećava se temperatura plina, što dovodi do povećanja tlaka plina, a to uzrokuje toplinske i zvučne valove koji se detektiraju senzorom.

Ova metoda prikladna je za izravno mjerenje optičke apsorpcije jer je generirani zvučni signal proporcionalan apsorbiranoj svjetlosnoj energiji pa se koncentracija molekula koje

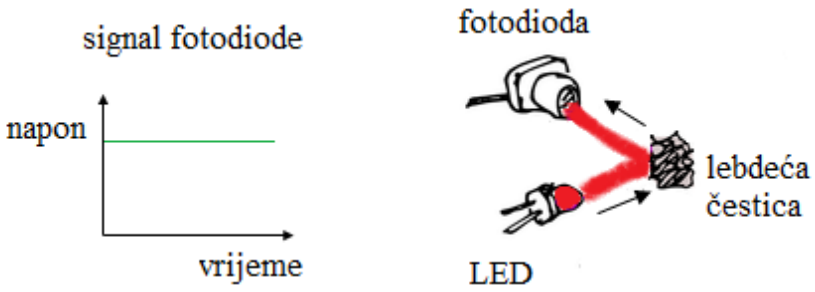
apsorbiraju svjetlosnu energiju može lako izračunati [39]. Za razliku od većine metoda mjerenja, kod fotoakustičke spektroskopske metode ne proizvodi se signal sve dok se ne počne apsorbirati svjetlosna energija, stoga je ova metoda točnija spektroskopska tehnika od konvencionalnih optičkih apsorpcijskih metoda [39].

4.2. Senzori za mjerenje koncentracije lebdećih čestica

Senzori koji se koriste u jednostavnim mjernim sustavima za mjerenje koncentracije i broja lebdećih čestica u zraku su najčešće optički senzori. Postoje različite izvedbe optičkih senzora za mjerenje lebdećih čestica: u jednima se protok zraka omogućuje ventilatorom, u drugima otpornikom koji služi kao grijač zraka. Nadalje, izvor svjetlosti može biti LED ili laser. Unatoč razlikama u komponentama koje uzrokuju manju ili veću preciznost, svi imaju isti princip rada.

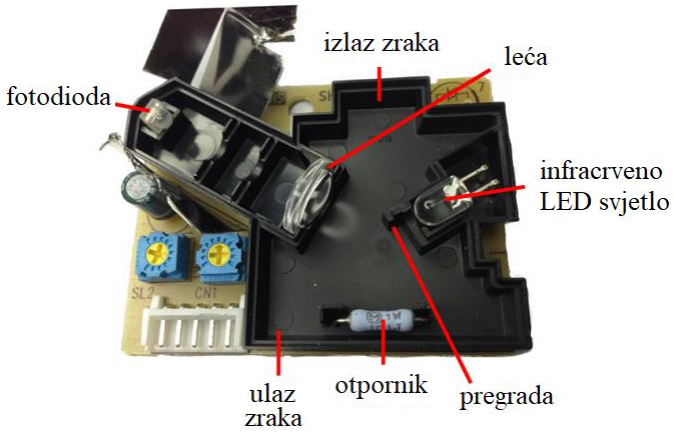
4.2.1. Optički senzor

Glavni dijelovi optičkog senzora za mjerenje čestica su izvor svjetlosti i fotodioda. Princip rada optičkog senzora prikazan je na slici 15.



Slika 15. Princip rada optičkog senzora [40]

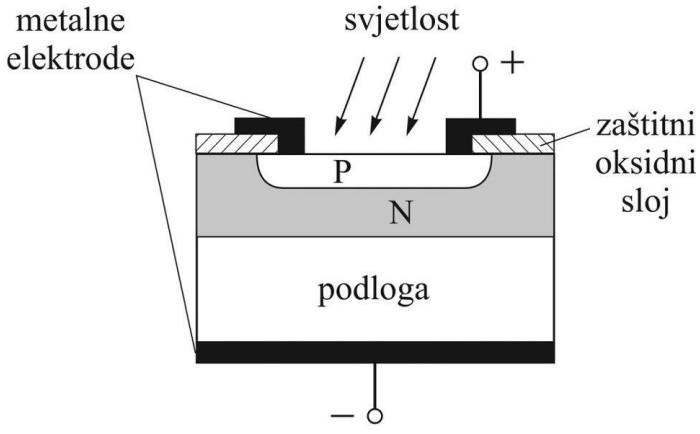
Izvor svjetlosti, u ovom slučaju LED, emitira infracrvenu svjetlost. Lebdeće čestice nailaze na emitiranu svjetlost te se ona reflektira prema fotodiodi. Unutrašnjost jeftinije verzije senzora za mjerenje lebdećih čestica prikazana je na slici 16.



Slika 16. Unutrašnjost optičkog $PM_{2,5}$ senzora PPD42NS [41]

Ispred fotodiode smještena je leća koja fokusira zraku svjetlosti na fotodiodu. Za poboljšanje protoka zraka u jeftinijoj izvedbi senzora može se koristiti otpornik kao na slici 16. koji svojim zagrijavanjem osigurava protok zraka. Kod skupljih izvedbi, umjesto LED izvora svjetlosti koristi se laser, a protok zraka omogućen je ventilatorom pa je samim time i preciznost takvih senzora veća.

Reflektirana svjetlost koja pada na fotodiodu uzrokuje promjenu naponskog signala fotodiode kojeg mikrokontroler prepoznaje kao logičku jedinicu. Shematski prikaz fotodiode može se vidjeti na slici 17.

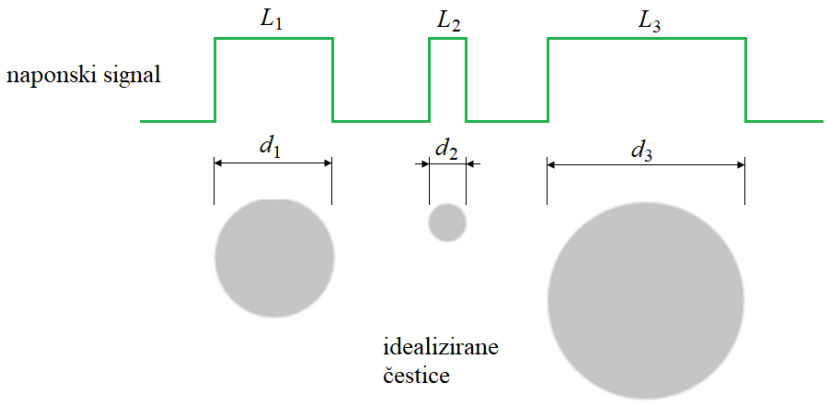


Slika 17. Shema fotodiode [42]

Fotodioda je poluvodički elektronički element u kojem svjetlost uzrokuje unutarnji fotoelektrični efekt u zapornome sloju poluvodičkoga kristala (PN-prijelaz). Njegova vodljivost mijenja se promjenom intenziteta osvijetljenosti pa fotodioda služi kao fotodetektor. Posebni su tipovi fotodioda: PIN-fotodioda, Schottkyjeva fotodioda i lavinska fotodioda.

Lavinska fotodioda koristi se za detekciju fotona koje emitiraju pobuđene molekule jer ima visoku osjetljivost te se koristi u ranije opisanoj metodi kemiluminiscencije.

Trajanje signala fotodiode ovisi o veličini čestice na kojoj se svjetlost reflektira, kako je prikazano na slici 18.



Slika 18. Naponski signal fotodiode za čestice različitih promjera [40]

Promjer čestice procjenjuje se tako što se pomnoži vrijeme trajanja visokog naponskog signala s prosječnim protokom zraka [40] koji je definiran u specifikacijama senzora. Takvim postupkom procjenjivanja promjera čestica mogu se dobiti odstupanja od stvarnog stanja u zraku zbog formiranja kapljice oko lebdeće čestice. Ultrafine čestice nastaju pri procesima s visokim temperaturama i tlakovima, kao što je izgaranje u motoru, a potom čestice dolaze u doticaj s okolnim zrakom. Njihovim hlađenjem, zrak koji okružuje česticu može kondenzirati i u takvom se obliku vezati na česticu pa u konačnici senzor prepoznaje česticu većeg promjera nego on uistinu jest [43]. Povećanjem vlažnosti zraka, povećava se utjecaj te pojave pa je i mjerenje nepouzdanije. Međutim, ovakvi senzori ne koriste se u referentnim mjernim stanicama, nego bi se mogli koristiti za informativna mjerenja jer kondenzirani plin oko lebdeće čestice utječe na izlazne rezultate o veličini čestica, a promjene u koncentraciji lebdećih čestica bi prikazivale kvalitativno sličan profil u dijagramima.

5. JEDNOSTAVNI MJERNI SUSTAV

Mjerenje koncentracija određenih onečišćujućih tvari na državnim mjernim mjestima izvodi se relativno skupim mjernim uređajima koji imaju velike troškove održavanja zbog kojih se ponekad koncentracija onečišćujućih tvari ne mjeri i po nekoliko mjeseci. U takvim bi se okolnostima mogli koristiti jednostavni mjerni uređaji koji su cjenovno znatno pristupačniji. Osim toga, iako se takvi mjerni uređaji ne mogu koristiti za službene rezultate mjerenja i izvještaje o kvaliteti zraka kakvi se zahtijevaju Direktivom 2008/50/EZ [14], mogu dati informativna mjerenja o trendovima promjena kvalitete zraka na mjestima na kojima se inače ne mjere koncentracije onečišćujućih tvari, a potom, ukoliko se prema rezultatima ukaže potreba, mjerenje se može na tom području provoditi sukladno s navedenom Direktivom. Na taj način bi se mogla na vrijeme uočiti potreba za provođenjem postupaka za poboljšanje kvalitete zraka.

Vlastiti jednostavni uređaj izrađen je na bazi Arduino. Tablica 5. prikazuje cijene pojedinih komponenti potrebnih za izradu jednostavnog mjernog sustava konstruiranog u sklopu ovoga rada.

Tablica 5. Cijena komponenti jednostavnog mjernog sustava

Opis komponente	Naziv	Cijena [HRK]
Razvojna pločica	Arduino Uno	219,00
Senzor za mjerenje NO_2	NO2 click	359,00
Senzor za mjerenje koncentracije lebdećih čestica	PMS5003	379,00
Modul za pohranu podataka	microSD modul	20,00
Eksperimentalna pločica	-	54,00
Kabeli za spajanje komponenti	-	20,00
Kabel za napajanje / povezivanje Arduino pločice s računalom	Kabel USB A/B	15,00
	Ukupno	1066,00

Ukoliko se dijelovi naručuju u većim količinama, mogu se ostvariti popusti ovisno o količini koja se naručuje. Izradom većeg broja ovakvih mjernih sustava, cijena po mjernom sustavu bi bila manja od navedene ukupne cijene u tablici.

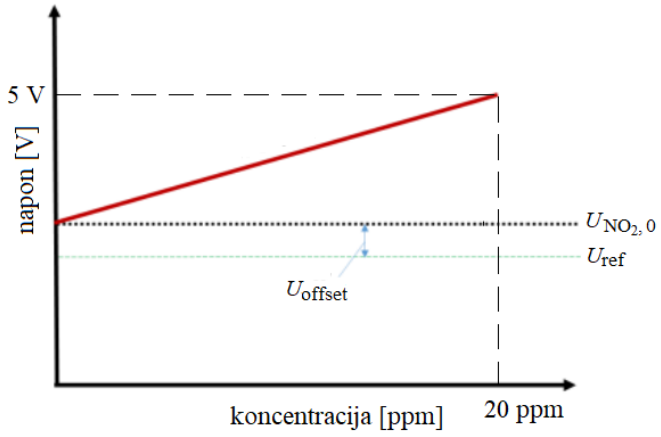
5.1. Razvojna pločica Arduino Uno

Primarna komponenta jednostavnog mjernog sustava je razvojna pločica Arduino Uno koja prima signale od senzora te ih obrađuje. Arduino Uno je *open-source* razvojna pločica s mikrokontrolerom *ATmega328P*, a ima 6 analognih ulaza te 14 digitalnih ulaza/izlaza čime je omogućeno povezivanje uređaja preko 3 različita komunikacijska protokola: *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*, *Inter-Integrated Circuit*, *Serial Peripheral Interface*. Uz pomoć dodataka tzv. štitova (eng. *shield*), moguće je nadograditi Arduino pločicu. Raznim dodacima, primjerice uz Wi-Fi štit, Arduino može biti spojen na bežičnu mrežu. Arduino Uno je relativno kompaktan, troši malo energije i ima široku primjenu što ga čini pogodnim za jednostavni mjerni sustav.

5.2. Senzor za mjerenje dušikovog dioksida SPEC 110-502

Za mjerenje dušikovih dioksida u jednostavnom mjernom sustavu odabran je SPEC 110-502 čiji opseg mjerenja iznosi od 0 do 20 ppm. Senzor je spojen na pločicu Click board™ proizvođača Mikroelektronika koja pruža mogućnost analognog i I2C povezivanja te se kao takav sklop naziva se NO2 click.

Senzor mjeri promjenu napona ovisno o promjeni koncentracije dušikovih dioksida. Promjene napona proporcionalne su koncentraciji NO_2, a na slici 19. može se vidjeti kvalitativna promjena napona u ovisnosti o koncentraciji dušikovih dioksida.



Slika 19. Kvalitativna prikaz promjene napona ovisno o koncentraciji [47]

Napon $U_{NO_2,0}$ predstavlja vrijednost napona senzora u okolini bez dušikovih dioksida, a naziva se i nulta vrijednost napona. U_{ref} označava referentnu vrijednost napona. Ukoliko tijekom mjerenja dođe do promjene u naponu napajanja, mjerenjem referentnog napona ne bi utjecale na mjerenje. U_{offset} je mala razlika napona između nulte i referentne vrijednosti napona. Ako se uzme vrijednost $U_{offset} = 0$ V, dobit će se mala odstupanja u iznosima apsolutnih koncentracija, ali rezultati će i dalje biti zadovoljavajući [47].

Mikrokontroler Arduino pločice preračunava promjene napona u koncentraciju prema jednadžbi (3) iz specifikacije senzora [47].

$$C(\mathrm{NO_2}) = \frac{(U_{\mathrm{NO_2}} - U_{\mathrm{NO_2},0})}{M} \tag{3}$$

gdje je:

$C(NO_2)$ [ppm] - koncentracija dušikovih dioksida,

U_{NO_2} [V] - trenutni napon,

$U_{NO_2,0}$ [V] - nulta vrijednost napona.

Kalibriranje NO_2 senzora provodi se u kontroliranoj okolini koja ne sadrži dušikov dioksid. Nakon stabilizacije senzora koja prema specifikacijama traje oko sat vremena, trenutna vrijednost napona U_{NO_2} uzima se kao nulta vrijednost $U_{NO_2,0.}$

Nagib pravca na slici 19. definiran je kalibracijskim faktorom senzora M koji se računa jednadžbom [47]:

$$M = SC \cdot 10^{-9} \cdot TIA \cdot 10^{3} \tag{4}$$

gdje je:

$M \left[\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{ppm}}\right]$ - kalibracijski faktor senzora,

$SC \left[\frac{\mathrm{nA}}{\mathrm{ppm}}\right]$ - oznaka osjetljivosti senzora (eng. *Sensitivity Code*),

$TIA \left[\frac{\mathrm{kV}}{\mathrm{A}}\right]$ - otpor transimpedancijskog pojačala (eng. *transimpedance amplifier*).

Iznosi *SC* i *TIA* otpor navedeni su u specifikacijama senzora.

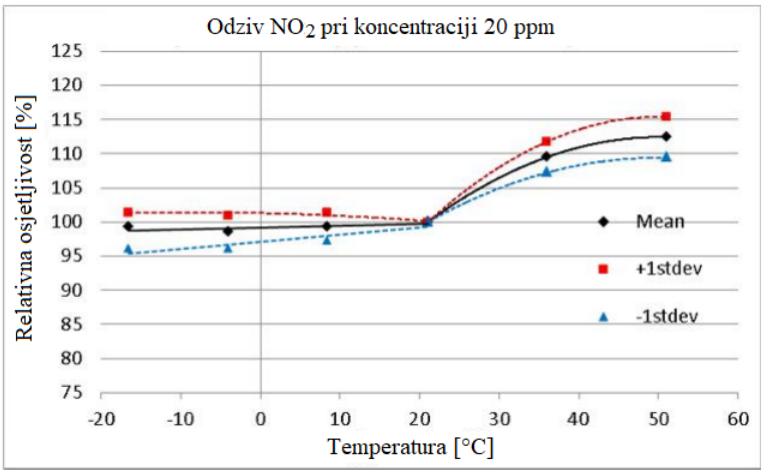
Jedna od glavnih karakteristika elektrokemijskih senzora je osjetljivost na druge spojeve (eng. *cross sensitivity*) koja je prikazana u tablici 6.

Tablica 6. Osjetljivost na druge kemijske spojeve

Kemijski spoj/element	NO_2	H_2S	O_3	NO	SO_2	CO	Cl	CH_4	NH_3	C_7H_{16}
Koncentracija (ppm)	10	25	5	50	20	400	10	500	100	500
Izmjerena vrijednost	10	-5,8	5	0,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1

Prema tablici 6. može se vidjeti koliku izmjerenu vrijednost pokazuje senzor pri njegovoj izloženosti odgovarajućoj koncentraciji pojedinog kemijskog spoja, odnosno elementa. Greška u mjerenju, prema specifikacijama, manja je od 3 %.

Temperaturno radno područje senzora je između -20 i 40 °C. Osjetljivost senzora nije jednaka u cijelom tom području što se može vidjeti na slici 20.



Slika 20. Utjecaj temperature na grešku mjerenja kod senzora SPEC 110-502 [48]

Osjetljivost za trenutnu temperaturu prikazana je u postotcima relativno u odnosu na osjetljivost senzora mjerenjem pri 20 °C. Povećanjem temperature, povećava se i osjetljivost senzora što znači da će u ljetnom razdoblju osjetljivost senzora biti veća nego pri niskim temperaturama u zimskom razdoblju.

5.3. Senzor za mjerenje lebdećih čestica Plantower PMS5003

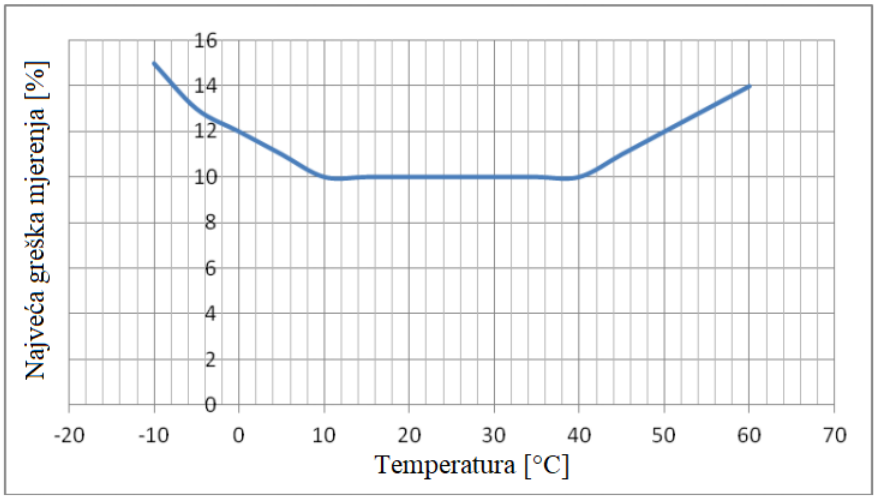
Senzor PMS5003 proizvođača Plantower je optički senzor čiji izvor svjetla je laser, a protok zraka kroz senzor omogućen je malim ventilatorom. Deklariran je kao senzor za mjerenje $PM_{2,5}$, a minimalni promjer čestica koje senzor prepoznaje iznosi 0,3 μm. Tablica 7. prikazuje specifikacije senzora PMS5003

Tablica 7. Uvjeti mjerenja

Efektivni raspon mjerenja lebdećih čestica $PM_{2,5}$ pri standardnim uvjetima [μg/m^3]		0-500
Najveća izlazna vrijednost koncentracije lebdećih čestica $PM_{2,5}$		≥ 1000
Komunikacijski protokol		UART
Efikasnost brojanja čestica [%]	d = 0,3 μm	50
	$d \geq$ 0,5 μm	98
Temperaturno radno područje [°C]		-10 ÷ +60
Izlazne vrijednosti koncentracije čestica [μg/m^3]		$PM_{S1,0}$; $PM_{S2,5}$; PM_{S10} $PM_{1,0}$; $PM_{2,5}$; PM_{10}
Izlazne vrijednosti broja čestica [0,1L^{-1}]		$N_{0,3}$; $N_{0,5}$; $N_{1,0}$; $N_{2,5}$; N_5; N_{10}

U tablici 7. indeks *S* označava standardne uvjete koji su definirani pri temperaturi 20 °C i vlažnosti zraka 50 %. Indeksi kod izlaznih vrijednosti broja čestica označavaju čestice s aerodinamičkim promjerom većim od pripadajućeg indeksa. Primjerice, oznaka $N_{0,3}$ predstavlja broj čestica s aerodinamičkim promjerom 0,3μm < d < 0,5 μm. Shodno tome označavaju se i ostale vrijednosti broja čestica.

Prema specifikacijama senzora [46], efektivni mjerni raspon za $PM_{2,5}$ iznosi 0-500 μg/m^3, dok odstupanja pri standardnim uvjetima iznose ±10 μg za koncentraciju $PM_{2,5}$ do 100 μg/m^3 te 10 % za koncentraciju 100 - 500 μg/m^3. Temperaturno radno područje senzora je između -10 i 60 °C. Na slici 21. prikazana je greška mjerenja ovisno o temperaturi mjerne okoline.

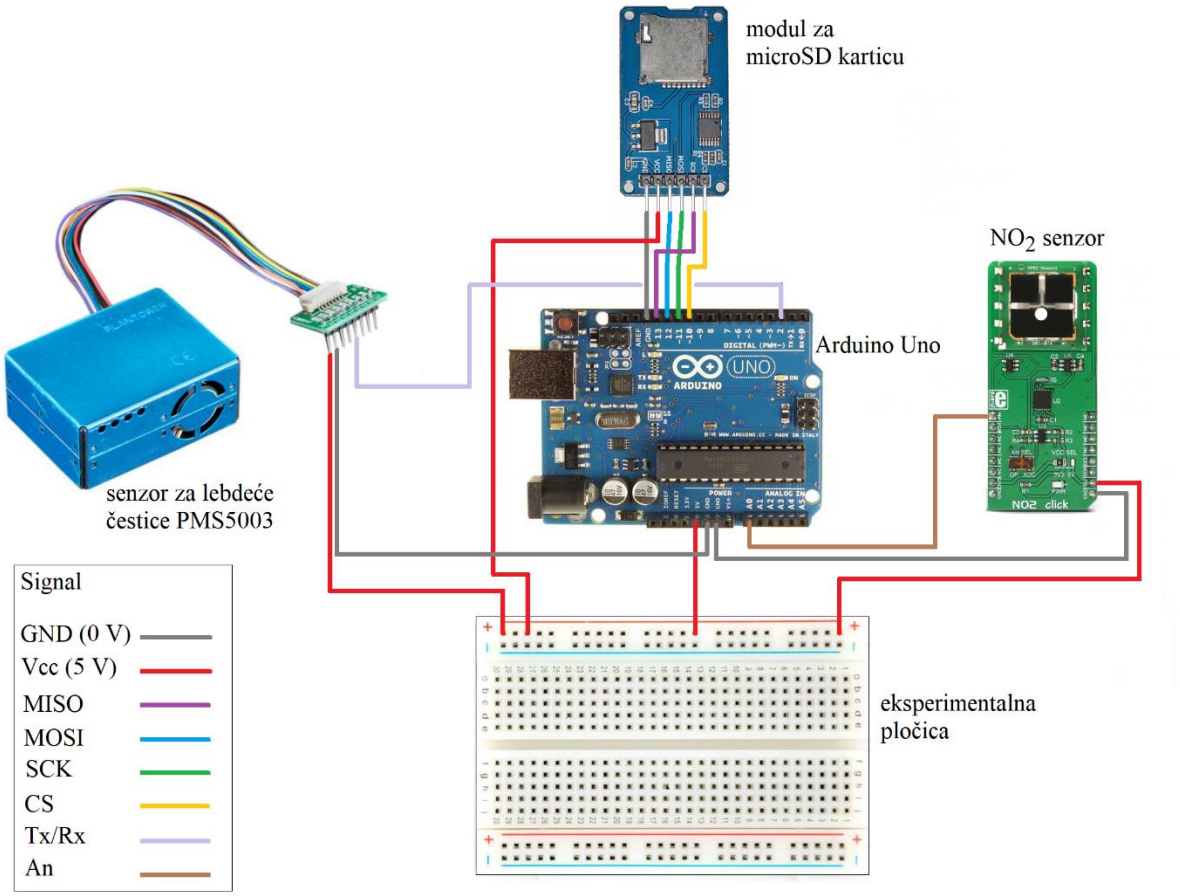


Slika 21. Utjecaj temperature na grešku mjerenja kod senzora PMS5003 [46]

Može se uočiti na slici 21. da se minimalna greška mjerenja nalazi pri mjerenju u temperaturnom radnom području između 10 i 40 °C, a iznosi 10 %.

5.4. Povezivanje jednostavnog mjernog sustava

Jednostavni mjerni sustav sastoji se od Arduino Uno pločice, senzora za mjerenje NO_2 110-502 proizvođača SPEC, senzora za lebdeće čestice PMS5003 proizvođača Plantower, modula za microSD karticu i eksperimentalne pločice. Na slici 22., prikazana je shema povezivanja navedenih komponenti.



Slika 22. Shema povezivanja

Svi prikazani moduli spojeni su na napajanje iznosa 5 V koje isporučuje Arduino Uno pločica. S obzirom da Arduino ima samo jedan konektor s izlazom napona 5 V, potrebno je dodati još jednu komponentu koja omogućuje povezivanje svih komponenti na napon iznosa 5 V. U skladu s navedenim, Arduinov konektor koji isporučuje napon 5 V spojen je na eksperimentalnu pločicu (eng. *breadboard*) koja je omogućila da se svi moduli spoje na nazivni napon 5 V.

Sive linije na shemi povezivanja označuju spajanje konektora GND koji služi kao referentna vrijednost napona (0 V) u strujnom krugu Arduina. Iako su svi moduli spojeni na drukčiji komunikacijski protokol, napajanje i uzemljenje jednako se povezuju s Arduinom.

NO_2 senzor s Arduinom komunicira preko SPI komunikacijskog protokola. Tablica 8. prikazuje odgovarajuće parove konektora modula za SD karticu i Arduino pločice.

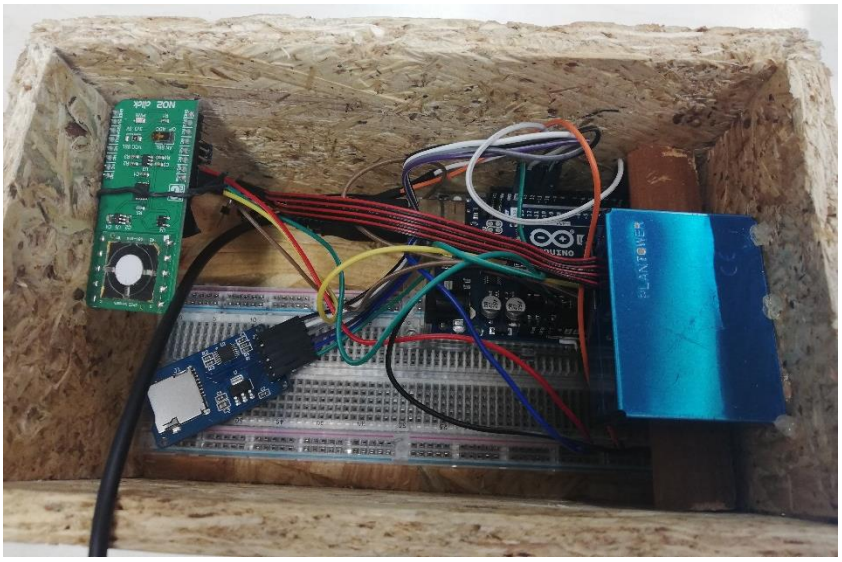
Tablica 8. Povezivanje microSD modula s Arduinom

SD modul	GND	Vcc	MISO	MOSI	SCLK	CS
Arduino	GND	5 V	12	11	13	10

Za lakše praćenje dijagrama povezivanja, ćelije oznaka konektora SD modula u tablici 8. prikazane se u bojama koje odgovaraju bojama povezivanja na shemi. MISO i MOSI služe za prijenos podataka između mikrokontrolera i microSD modula, dok je SCLK oznaka za signal sata, a CS konektor preko kojeg se modul uključuje za prijenos podatak. SPI komunikacijski protokol detaljnije je objašnjen u poglavlju 5.5.1.1.

Komunikacija senzora za mjerenje lebdećih čestica s Arduinom odvija se putem UART komunikacijskog protokola. Pošto je komunikacija između ta dva uređaja u ovom slučaju jednosmjerna, povezani su samo jednom žicom tako da se podaci šalju od senzora prema Arduinu na način da je konektor Tx na senzoru spojen na Arduino konektor 2 koji ima ulogu Rx konektora. Arduino Uno ima mogućnost spajanja samo jednog uređaja putem UART komunikacije, stoga se ovakvim načinom povezivanja ostavlja mogućnost povezivanja s još jednim uređajem. U kodu je potrebno deklarirati konektor 2 na Arduinu kao Rx konektor, a za komunikaciju se koristi *open-source* kôd *Softwareserial.h* za serijsku *software* UART komunikaciju. Na taj se način *hardware* UART komunikacija preko konektora 0 (Rx) i 1 (Tx) ostavlja slobodnom za povezivanje još jednog uređaja.

Slika 23. prikazuje jednostavni mjerni sustav.



Slika 23. Jednostavni mjerni sustav

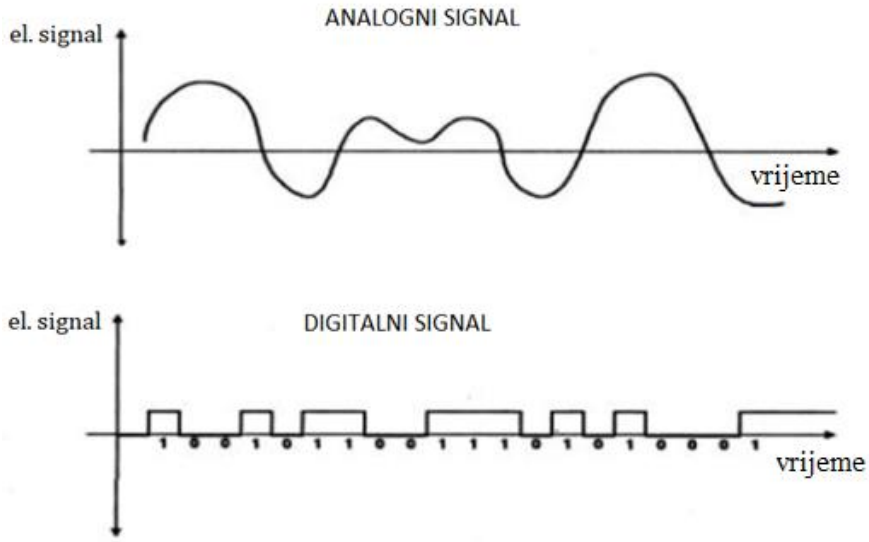
5.5. Signal i komunikacija senzora

Senzor je uređaj koji prima i reagira na podražaj iz okoline te šalje izlazni signal o promjeni podražaja. Podražaj je zapravo ulazni parametar senzora. Ovisno o vrsti senzora i njegovoj svrsi, ulazni parametar može biti neka fizikalna veličina kao što je temperatura, vlažnost, tlak, svjetlost, pokret itd. Izlazni parametar je promjena signala napona koja se šalje do mikrokontrolera i obrađuje za daljnju uporabu dobivenog podatka. Primarni senzor najčešće ne može sam za sebe emitirati izlazni signal dovoljno visokog intenziteta pa je potrebna lokalna obrada signala. Za to je zaslužan pretvornik koji pretvara signal fizikalne veličine, koji je kao ulazni podatak primio primarni senzor, u drugi oblik, tj. u analogni signal.

Osnovna podjela senzora vrši se prema vrsti izlaznog signala. Tako razlikujemo dvije vrste senzora:

- Analogni
- Digitalni

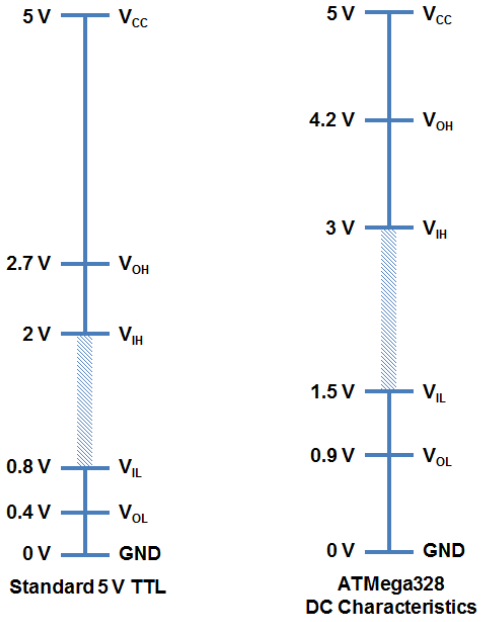
Slika 24. prikazuje analogni i digitalni signal za pripadajući senzor.



Slika 24. Analogni i digitalni signal [44]

Analogni senzor kao izlaz ima analogni signal, dok u digitalnom senzoru postoji složenija obrada signala kako bi se dobile dvije vrijednosti koje su pogodne za računalnu obradu. Takav signal se ponaša kao binarni sustav, tj. ima logičku vrijednost 0 i 1. U smislu napona, te vrijednosti su zapravo 0V i 5V (u ovom radu opisuju se sustavi s mikrokontrolerima koji imaju nazivnu vrijednost napona 5V). Kod analognog signala logičke vrijednosti nule i jedinice nisu prikazane jednom vrijednosti napona pa je potrebno odrediti raspon napona u

kojem će se smatrati da je signal u području logičke nule, odnosno jedinice. Različiti el. sustavi imaju različito definirane logičke razine. Na slici 25. prikazane su logičke razine napona za dva različita sustava koji imaju istu nazivnu vrijednost napona.



Slika 25. Logičke razine napona [45]

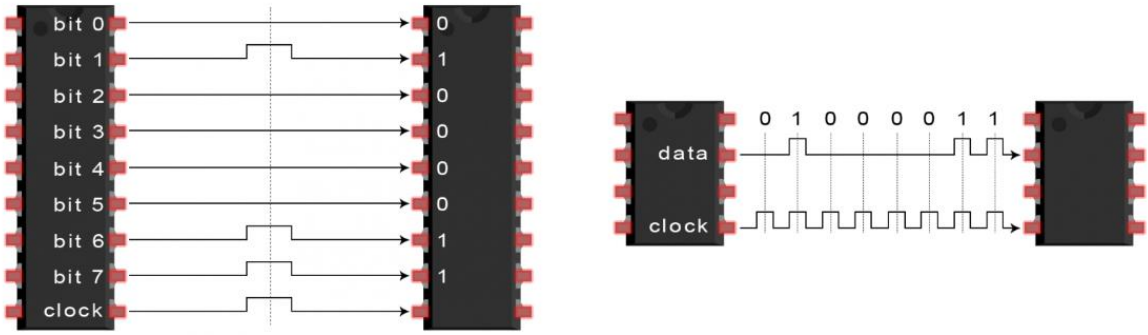
Lijeva logička razina na slici pripada spoju TT (tranzistor-tranzistor), a desna pripada mikrokontroleru ATMega328 koji je dio Arduino Uno pločice. Indeks „I“ i „O“ predstavljaju ulaz, odnosno izlaz (eng. *input* i *output*), a indeksi „H“ i „L“ predstavljaju logičku jedinicu i nulu (eng. *high* i *low*). Na primjeru Arduino Uno pločice, ulazni podaci poprimaju vrijednost logičke nule za raspon napona od 0 V do 1,5 V, a izlazni vrijednosti od 0 V do 0,9 V. Shodno tome, ulazni podaci poprimaju vrijednost logičke jedinice za raspon napona od 3 V do 5 V, a izlazne od 4,2 V do 5 V. Raspon vrijednosti napona od 1,5 V do 3 V zove se zabranjeno područje jer se ne može jednoznačno odrediti hoće li podaci poprimiti vrijednost nule ili jedinice.

5.5.1. Komunikacijski protokol

Nakon što senzor primi fizički podražaj i pošalje izlazni signal o promjeni mjerene fizičke veličine, potreban je odgovarajući komunikacijski protokol da bi mikrokontroler preuzimao izlazni signal senzora. Tri su najčešća komunikacijska protokola za digitalnu komunikaciju koja se koriste u sustavu sa senzorima:

- SPI (eng. *Serial Peripheral Interface*)
- UART (eng. *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*)
- I2C (eng. *Inter-Integrated Circuit*)

Navedeni protokoli sporiji su od protokola poput USB-a i Bluetootha, no troše puno manje resursa i učinkoviti su u sustavima gdje nije potrebno slati veliku količinu podataka velikom brzinom. Komunikacija između dviju el. komponenti može se odvijati serijski ili paralelno. Razliku između tih dviju komunikacija prikazuje slika 26.

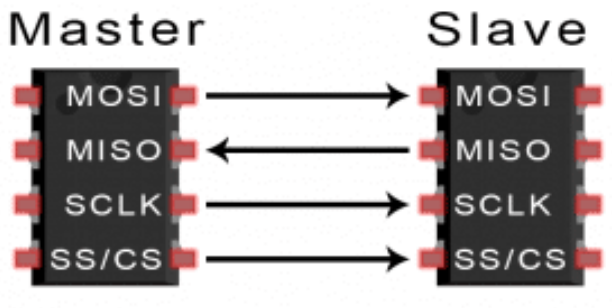


Slika 26. Paralelna (lijevo) i serijska (desno) komunikacija [46]

Prikazan je primjer slanja slova „C“ u binarnom zapisu: 01000011. Za vrijednost 0, puls iznosi 0 V, a za vrijednost 1, šalje se kratki impuls napona 5 V (ukoliko se radi o sustavu s naponom 5 V). Kod paralelne komunikacije, 1 bit se šalje preko jedne žice pa se tako koristi 8 žica za slanje slova „C“ u 8-bitnom zapisu. Kod serijske komunikacije, svih osam bitova šalje se preko samo jedne žice.

5.5.1.1. SPI komunikacijski protokol

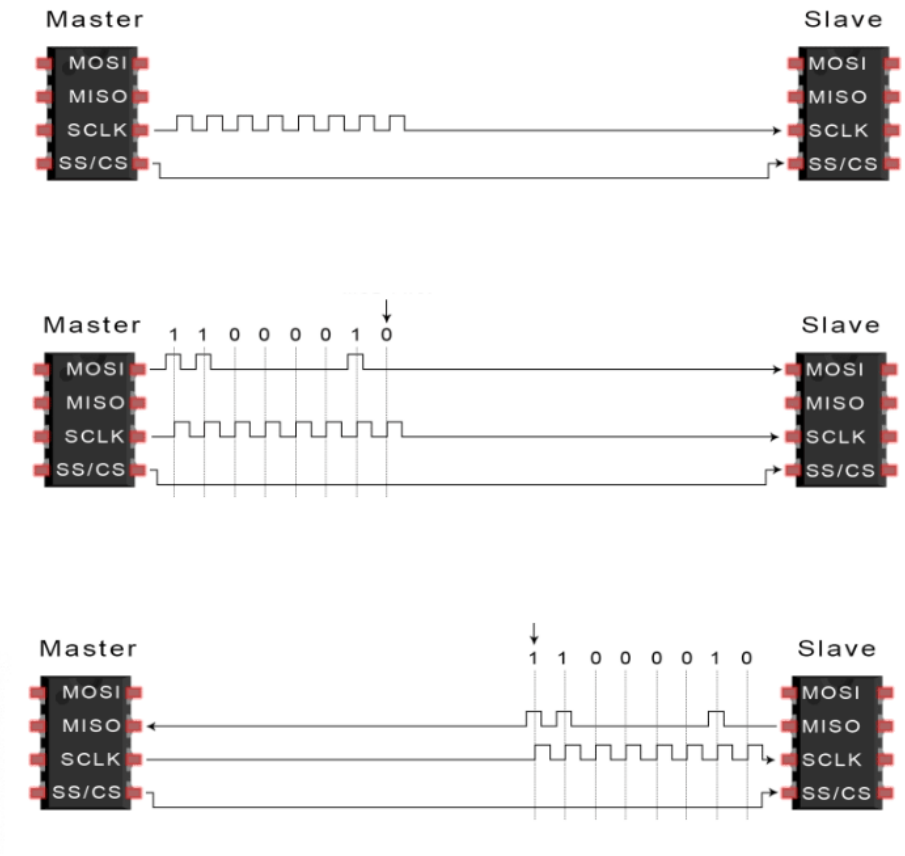
Jedan od primjera uređaja koji koristi SPI komunikacijski protokol jest SD kartica. SPI je serijski komunikacijski protokol kojeg karakterizira neprekidno slanje podataka s neograničenim brojem bitova. Uređaji ovakvog protokola su u podređeno-nadređenom odnosu. Obično je nadređeni uređaj mikrokontroler, a podređeni uređaj može biti npr. senzor. Slika 27. prikazuje osnovni oblik SPI komunikacije jednim nadređenim i jednim podređenim uređajem. Kod SPI protokola, moguće je imati više podređenih uređaja, ali samo je jedan nadređeni.



Slika 27. SPI komunikacija nadređenog i podređenog uređaja [46]

Prikazani oblik komunikacije sadrži žice s oznakama konektora kao na slici. MOSI (eng. *Master Output / Slave Input*) veza koristi se za slanje podataka nadređenog uređaja ka podređenom. Suprotno od toga, MISO (eng. *Master Input / Slave Output*) služi za slanje podataka od podređenog prema nadređenom uređaju. SCLK (eng. *Serial Clock*) je signal sata koji šalje nadređeni uređaj, a SS/CS (eng. *Slave Select / Chip Select*) je veza za odabir podređenog uređaja kojem će se podatak poslati. Brzina SPI komunikacije ograničena je frekvencijom signala sata zato što se jedan bit podatka obradi u jednoj frekvenciji signala sata. Sat ovdje služi za sinkronizaciju poslanog i primljenog podatka, a upravo zato se takvi komunikacijski protokoli nazivaju sinkronima.

Slika 28. prikazuje proces slanja podatka od nadređenog ka podređenom uređaju i obrnuto.



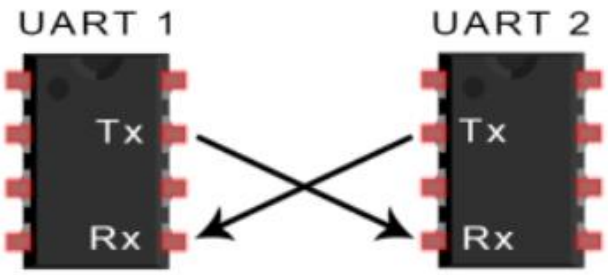
Slika 28. Ciklus slanja podatka u SPI komunikaciji [46]

Nadređeni uređaj prvo pošalje signal sata, a zatim pošalje signal referentnog napona (logičke nule) preko SS/CS konektora čime se podređeni uređaj aktivira i priprema za primanje podatka. Nakon toga nadređeni uređaj šalje podatak bit po bit, a podređeni uređaj čita taj podatak redom kako bitovi pristižu. Ako je potrebno, podređeni uređaj šalje podatak natrag nadređenom uređaju (obratiti pažnju na redoslijed bitova na slici 28.).

Neke od prednosti ovakve komunikacije su brzina prijenosa podataka te odvojeni kanali MOSI i MISO za komunikaciju što omogućuje simultanu razmjenu podataka. Nedostatak je veći broj žica između nadređenog i podređenog uređaja nego kod komunikacijskih protokola UART i I2C, nema povratne informacije o uspješnosti razmjene podatka, nema provjere grešaka u komunikaciji i moguće je imati samo jedan nadređeni uređaj u sustavu komunikacije.

5.5.1.2. UART komunikacijski protokol

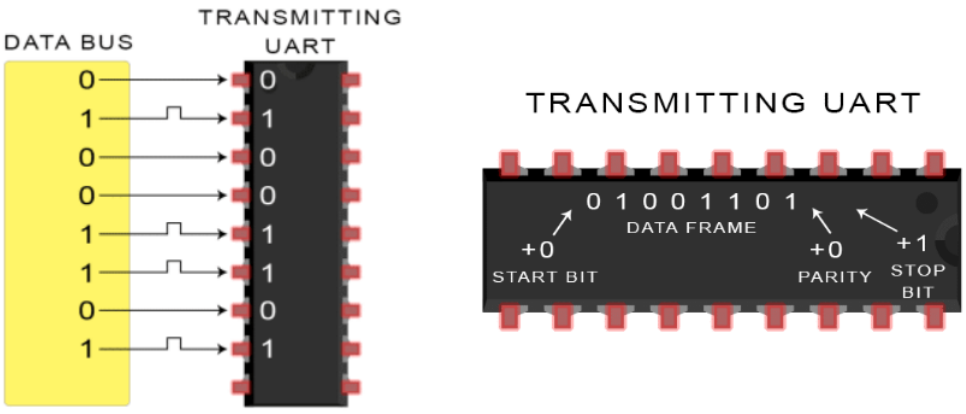
UART dolazi od eng. *universal asynchronous receiver-transmitter*. Uređaji ovakve vrste komunikacije sadrže samo dva konektora: Tx i Rx (slika 29.)



Slika 29. Komunikacija UART uređaja [46]

Tx (T od eng. *transmitt*) konektor služi za slanje podataka drugom UART uređaju koji prima te iste podatke preko Rx (R od eng. *receive*) konektora. Za razliku od SPI komunikacijskog protokola, UART protokol nema signal sata za sinkronizaciju izlaznih podataka jednog i ulaznih podataka drugog uređaja. Umjesto toga, UART uređaji koriste jedan bit za označavanje početka podatka i jedan bit za označavanje kraja podatka. Brzina kojom se prenose podaci između uređaja izražava se u bitovima po sekundi, bps (eng. *bits per second*). Oba uređaja između kojih se odvija prijenos podataka moraju imati jednaku brzinu prijenosa s odstupanjem do 10% .

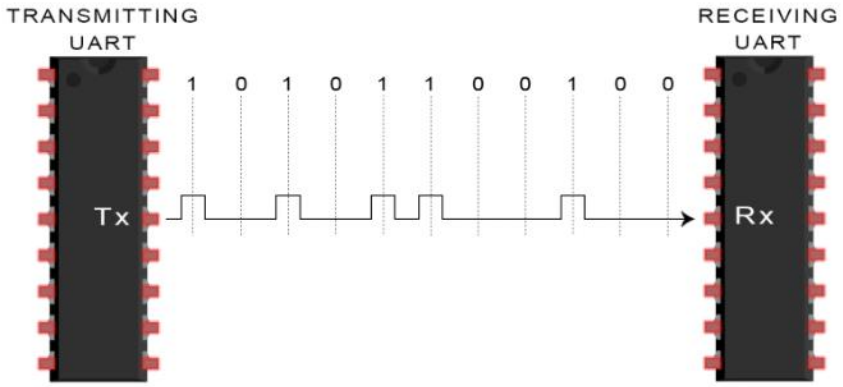
Na slici 30. može se vidjeti početak ciklusa slanja podatka.



Slika 30. Primanje podatka od upravljačke jedinice i pretvorba [46]

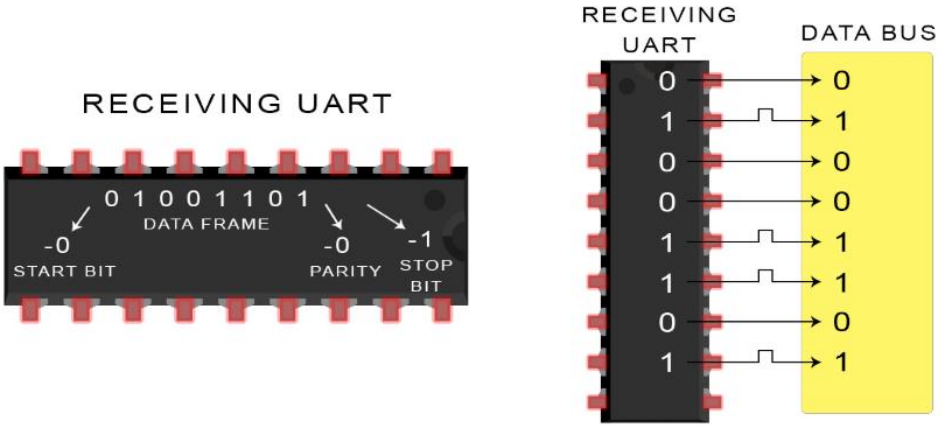
UART komunikacija odvija se serijski, što znači da se kao u SPI komunikaciji bitovi u jednom smjeru šalju preko jedne žice (slika 31.), bit po bit, a podatak koji je primio od

procesora, mikrokontrolera ili memorije je u paralelnom obliku (slika 30.). To znači da je, prije slanja podatka drugom UART uređaju, potrebno pretvoriti podatke u serijski oblik. U pretvorbi se dodaje i početni i završni bit za sinkronizaciju. Također, na kraju podatka u binarnom obliku(slika 30., desno), a prije završnog bita, dodaje se paritetni bit (end. *parity*), tj. bit za provjeru jednostruke greške pri slanju podatka, a potom se podatak šalje drugom UART uređaju.



Slika 31. Ponovna pretvorba i slanje podataka [46]

Kad drugi uređaj primi podatak (slika 32.), broji koliko je jedinica u binarnom zapisu podatka. Ako je taj broj paran, paritetni bit bi trebao biti 0 (parni paritet), a ako je neparan, paritetni bit bi trebao iznositi 1 (neparni paritet). Ako su ovi uvjeti ispunjeni, znači da nije došlo do greške prilikom slanja podatka.



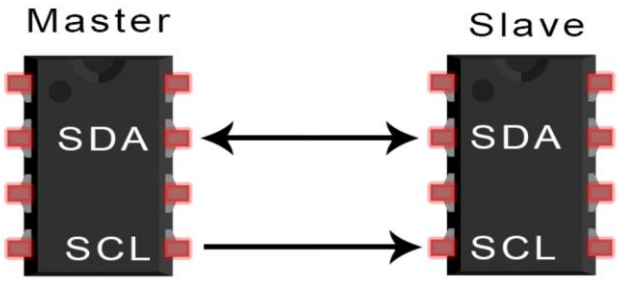
Slika 32. Pretvorba podatka i slanje upravljačkoj jedinici [46]

Nakon provjere, UART primatelj uklanja početni, paritetni i završni bit, a binarni zapis pretvara iz serijskog oblika u paralelni te ga dalje šalje upravljačkoj jedinici.

Prednost UART komunikacijskog protokola je provjera greške kod prijenosa podataka. Također, zbog početnog i završnog bita za sinkronizaciju, nije potreban signal sata čime se ujedno smanjuje i potreban broj žica za komunikaciju.

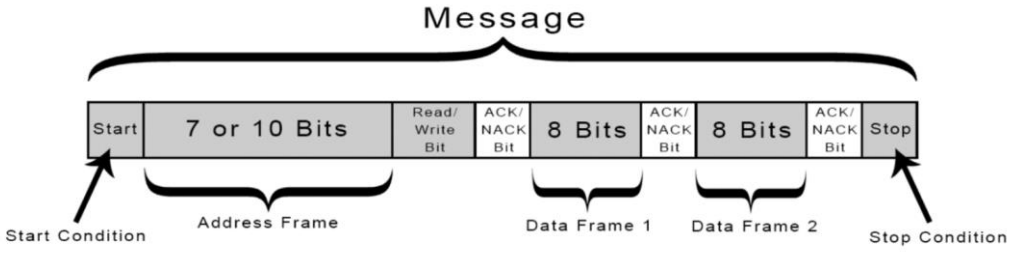
5.5.1.3. I2C komunikacijski protokol

I2C dolazi od eng. *inter-integrated circuit*, a još se označava i s I^2C. To je serijski komunikacijski protokol koji, kao i SPI, koristi signal sata za sinkronizaciju poslanih/primljenih podataka pa ga nazivamo sinkronim. I2C integrira prednosti UART i SPI protokola: komunikaciju ostvaruje preko dvije žice, a komunikacijski uređaji su u podređeno-nadređenom odnosu. Za razliku od SPI protokola, I2C može imati više od jednog nadređenog uređaja. Na slici 33. može se vidjeti kako su povezani nadređeni i podređeni uređaj.



Slika 33. I2C komunikacija nadređenog i podređenog uređaja [46]

Oznaka SDA (eng. *serial data*) označava konektor za serijsku komunikaciju između uređaja, a SCL (eng. *serial clock*) konektor za signal sata. Prikazani uređaji komuniciraju preko „poruka“ koje se sastoje od niza bitova, a čiji su osnovni dijelovi prikazani na slici 34.

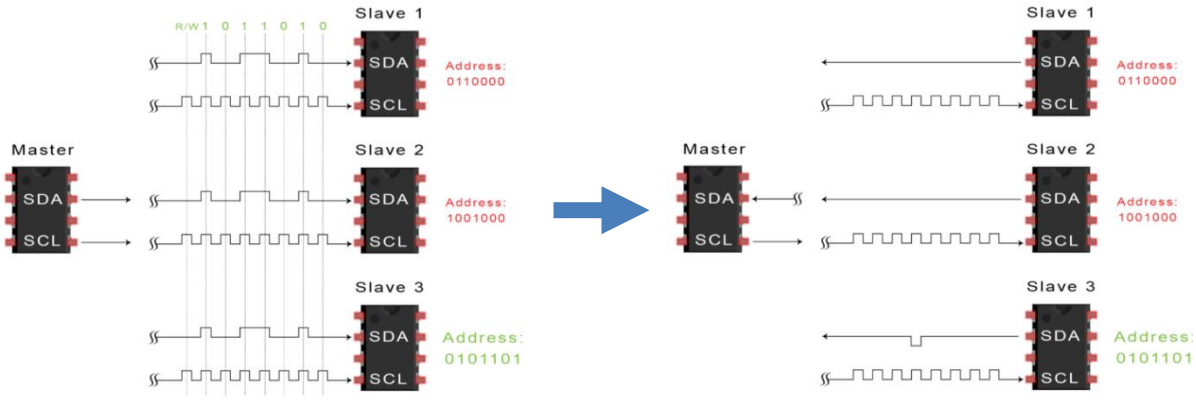


Slika 34. Poruka nadređenog I2C uređaja [46]

Na početku i na kraju poruke nalazi se početni, odnosno završni bit. Bitovi za adresu služe za identifikaciju podređenog uređaja, nakon njega dolazi bit kojim nadređeni uređaj daje do znanja podređenom želi li poslati ili primiti podatke. ACK/NACK (eng. *acknowledgment /*

negative acknowledgment) bit nalazi se nakon svakog cjelokupnog podatka, a služi kako bi podređeni uređaj poslao nadređenom povratnu informaciju o primljenom podatku ili za potvrdu adrese.

Na slici 35. može se vidjeti dio poruke gdje nadređeni uređaj šalje adresu, a nadređeni uređaj br. 3 potvrđuje da je to njegova adresa.



Slika 35. Identificiranje nadređenog uređaja [46]

Prije nego je poslana adresa na upit, nadređeni uređaj dao je signal referentnog napona u trenutku prije nego se signal sata spusti na referentnu vrijednost napona. Na taj način podređeni uređaji su u pripravi za daljnje primanje poruke. Nakon potvrde adrese, nadređeni uređaj šalje ostatak poruke te mu se vraća signal o primljenoj poruci.

Jedna od prednosti I2C protokola je povezivanje više nadređenih uređaja. Problem takvog povezivanje može biti u tome što bi više od jednog uređaja moglo poslati ili primiti poruku u isto vrijeme preko SDA linije. Kako bi se to spriječilo, svaki nadređeni uređaj prije nego pošalje poruku provjerava je li linija zauzeta, tj. je li linija pod signalom logičke jedinice.

6. PROGRAMSKI KÔD

Da bi mikrokontroler Arduino pločice mogao izvršavati određene naredbe, potrebno je napisati programski kôd u kojemu se te naredbe definiraju. U izvršnom kôdu pozivaju se datoteke zaglavlja sufiksa *.h* u kojima su definirane potrebne funkcije za izvršavanje programa. Datoteke sufiksa *.cpp* sadrže izvorni kôd u kojima se izvršavaju postavljeni zadaci, odnosno naredbe u pozadini koristeći funkcije definirane u datoteci zaglavlja. Drugim riječima, izvršni kôd dohvaća vrijednosti koncentracija NO_2 senzora koje se u izvornom kôdu računaju iz izlaznog signala senzora koristeći funkcije definirane u datoteci zaglavlja. Za senzor lebdećih čestica PMS5003, izvorni kôd ujedno je i izvršni.

Izvršni kôd napisan je u programskom paketu otvorenog tipa Arduino IDE koji koristi Arduino programski jezik. Korišteni su *open-source* kodovi za mjerenje koncentracija sa prilagodbama za svrhe jednostavnog mjernog sustava u ovome radu. Na dijagramu se može vidjeti tok izvođenja programa

Varijabla *NO2* za dohvaćanje koncentracije NO_2 definirana je tako da ovisi o tri varijable: promjeni napona, temperaturi i oznaci osjetljivosti *SC* iz jednadžbe (4). Pošto u jednostavnom mjernom sustavu u ovome radu nije prisutna komponenta za dohvaćanje vrijednosti temperature, ona je procijenjena u izvršnom kodu na vrijednost 0 °C pa se korekcije vrijednosti koncentracije za osjetljivost senzora pri različitim temperaturama (slika 20.) izvršavaju kao da je temperatura okoline u svakom trenutku 0 °C.

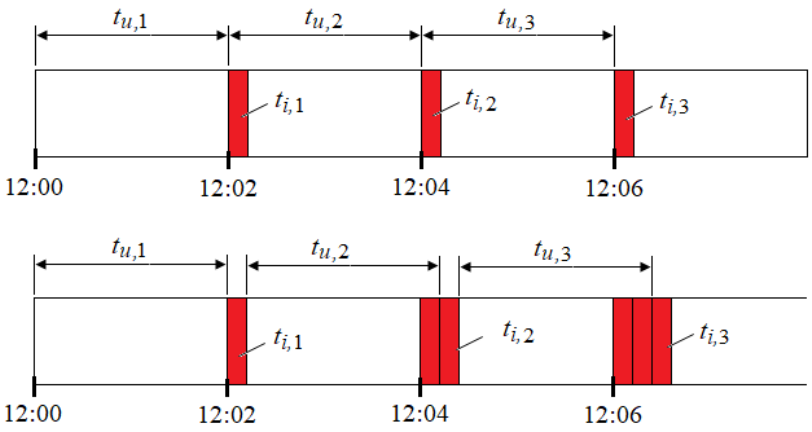
6.1. Usrednjavanje izmjerenih vrijednosti izvršnim kodom

Prvo mjerenje na mjernoj lokaciji *K* trajalo je 21 sat, a zapisano je preko 14000 izmjerenih vrijednosti. Tako veliki broj zapisa otežava obradu podataka i memorijski opterećuje program, stoga je potrebno napraviti usrednjavanje mjerenja prije samog ispisa rezultata. Prikazanim postupkom usrednjavanja u vremenskom periodu od 120 sekundi, za jednako trajanje mjerenja od 21 sat, dobili bi se rezultati mjerenja sa 630 zapisa. Na slici 36. prikazan je postupak usrednjavanja mjerenja.

```
void loop() {
    varijabla=vrijednost;           //dohvaćanje vrijednosti
    varijabla_ukupno += varijabla;  //zbrajanje vrijednosti
    brojanje++;
    //ako je proteklo vrijeme definiranog usrednjavanja
    if (millis() - start_millis >= vrijeme_usrednjavanja) {
        start_millis=millis();  //novo referentno vrijeme
        Serial.println("varijabla_ukupno/brojanje"); //ispisivanje usrednjenih vrijednosti
        varijabla_ukupno = 0;
        brojanje = 0;
    }
}
```

Slika 36. Primjer usrednjavanja rezultata

Konstruirani mjerni sustav ne može ispisivati vrijeme, jer nema modul sata RTC (eng. *Real Time Clock*), stoga nije moguće napisati naredbu koja bi mjerila koncentraciju primjerice od 12:00 do 12:02, a potom ispisala srednja izmjerena vrijednost s pripadajućom vremenskom oznakom. Iz tog razloga, usrednjavanje rezultata omogućeno je na način kao što je prikazano na slici 36. Pomoću varijable *millis()* vraća se vrijednost proteklih milisekundi od početka programa. Glavni kôd dohvaća vrijednost mjerenja senzora i tu vrijednost ne ispisuje, nego ju zbraja s pomoćnom varijablom koja ima sufiks „_ukupno“. Svakim prolaskom kroz glavnu petlju, nakon što se dohvatila i pribrojila vrijednost pomoćnoj varijabli, provjerava se je li prošlo vrijeme usrednjavanja koje se ranije definiralo, a koje u glavnom programu za mjerenje koncentracija iznosi 120 sekundi. Nakon otprilike 50 dana vrijednost *millis()* dođe do svoje maksimalne vrijednosti i ponovno prima vrijednost nule [11], odnosno dogodi se *overflow*. Zbog aritmetike računanja, ova pojava ne utječe na izvršavanje programa [51]. Pomoću jednakosti *start_millis = millis()* definira se novo referentno vrijeme prema kojemu se definira proteklo vrijeme novog ciklusa usrednjavanja. Primjećuje se da se ta jednakost izvodi odmah na početku *if* uvjeta. S pogleda mjerenja zraka, ispravnije bi bilo da se izvodi na kraju *if* uvjeta jer na ovaj način počinje protjecati vrijeme usrednjavanja dok program ispisuje vrijednosti na SD karticu, a ne kad uistinu počne mjeriti koncentracije. Ako se pak novo referentno vrijeme definira na kraju uvjeta, novi interval usrednjavanja neće započeti završetkom prošlog, nego će između ta dva intervala proći vrijeme potrebno za ispis vrijednosti. Pošto se izmjerene vrijednosti ne ispisuju uz oznaku vremena, bilo bi jako teško sinkronizirati podatke. Na slici 37. vizualno su prikazani vremenski intervali izvođenja programa kod definiranja referentne vrijednosti vremena na početku i na kraju *if* uvjeta.



Slika 37. Vremenski intervali izvođenja programa kod definiranja referentne vrijednosti vremena na početku (gore) i na kraju (dolje) *if* uvjeta

Prvim se načinom dio vremenskog intervala usrednjavanja $t_{u,\mathrm{n}}$ iskoristi za ispisivanje usrednjenih vrijednosti prošloga intervala, a koje traje $t_{i,\mathrm{n-1}}$ (vrijeme izvođenja *if* uvjeta), što je iz perspektive mjerenja kvalitete zraka neznatno vrijeme da bi bili netočni rezultati. Drugim načinom, između svakog vremenskog intervala usrednjavanja dodatno se uzima vrijeme ispisivanja t_i. Na taj način vrijeme usrednjavanja se počinje mjeriti od trenutka mjerenja senzora no dolazi do akumulacije pogreške što kod dugih mjerenja uzrokuje veliku nesinkroniziranosti mjernih podataka.

7. MJERENJE JEDNOSTAVNIM MJERNIM SUSTAVOM

Prva mjerenja provedena su samo sa senzorom PMS5003 nakon čega su se uspoređivali rezultati s ispitnim uređajem. Testirala se granica izdržljivosti i rad pri ekstremno visokim temperaturama. Sljedeća mjerenja provodila su se na dvije lokacije koji ne ispunjavaju uvjete Pravilnika o praćenju kakvoće zraka (NN 155/05) [52] te su se prikazale usporedbe rezultata mjerenja s državnim mjernim stanicama u Zagrebu.

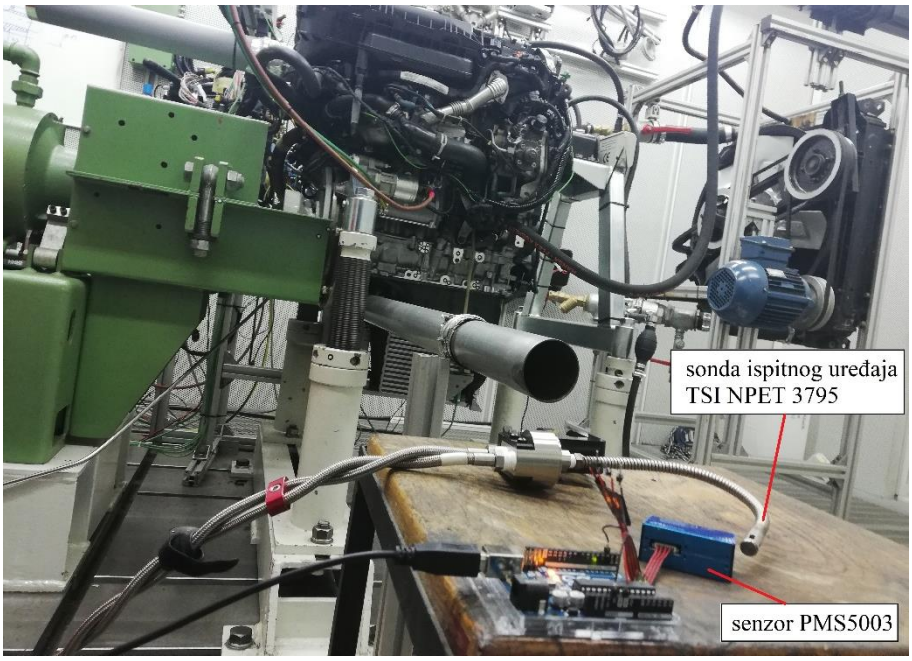
7.1. Testna mjerenja

Kako bi se mogli usporediti podaci s pouzdanim mjernim uređajem, provedeno je usporedno mjerenje u Laboratoriju za motore i vozila na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Ispitni uređaj Laboratorija s kojim su provedena usporedna mjerenja čestica je TSI NPET (eng. *Nanoparticle Emission Tester*), model 3795. Na slici 38. prikazan je spomenuti ispitni uređaj za usporedno mjerenje u kabini za ispitivanje.



Slika 38. Ispitni uređaj za usporedno mjerenje lebdećih čestica

Slika 39. prikazuje pozicioniranje jednostavnog mjernog uređaja PMS5003 i sonde TSI uređaja.



Slika 39. Pozicioniranje senzora za usporedno mjerenje lebdećih čestica

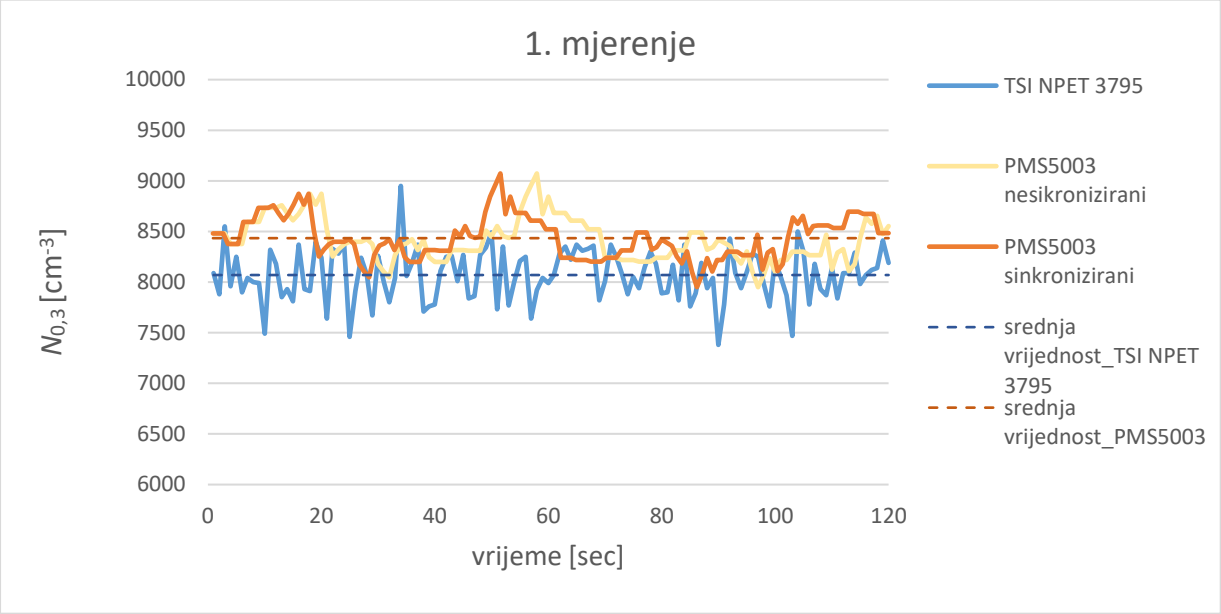
Provedeno je ukupno 10 usporednih mjerenja: dva mjerenja čestica u zraku Laboratorija bez rada motora s unutrašnjim izgaranjem i po dva mjerenja ispušnih plinova za svaku od 4 radne točke motora s unutrašnjim izgaranjem. Parametar koji se mjerio je broj čestica aerodinamičkog promjera većih od 0,3 μm u jedinici volumena. Sva mjerenja trajala su dvije minute, a vrijednost mjerenja ispisivala se u intervalu jedne sekunde. Pregled radnih točaka prikazuje tablica 9.

Tablica 9. Uvjeti mjerenja

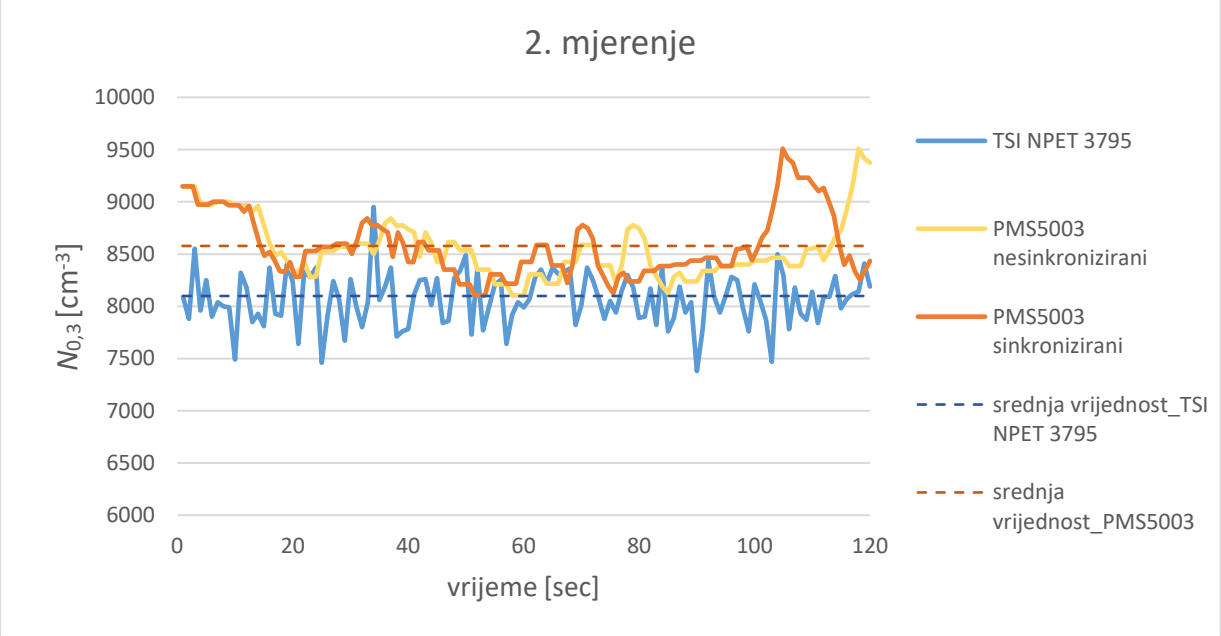
RB	1.	2.	3.	4.	5.
Brzina vrtnje motora[min^{-1}]	-	1000	1810	1810	2000
Opterećenje [Nm]	-	-	-	-	33
Napomena				Novi položaj senzora	Novi položaj senzora

7.1.1. Prva skupina usporednih mjerenja

Za prvu skupinu usporednih mjerenja provedena su dva mjerenja lebdećih čestica u zraku ispitne kabine Laboratorija. Slike 40. i 41. prikazuju rezultate mjerenja broja lebdećih čestica većih od 0,3 μm.



Slika 40. Prvo usporedno mjerenje broja čestica



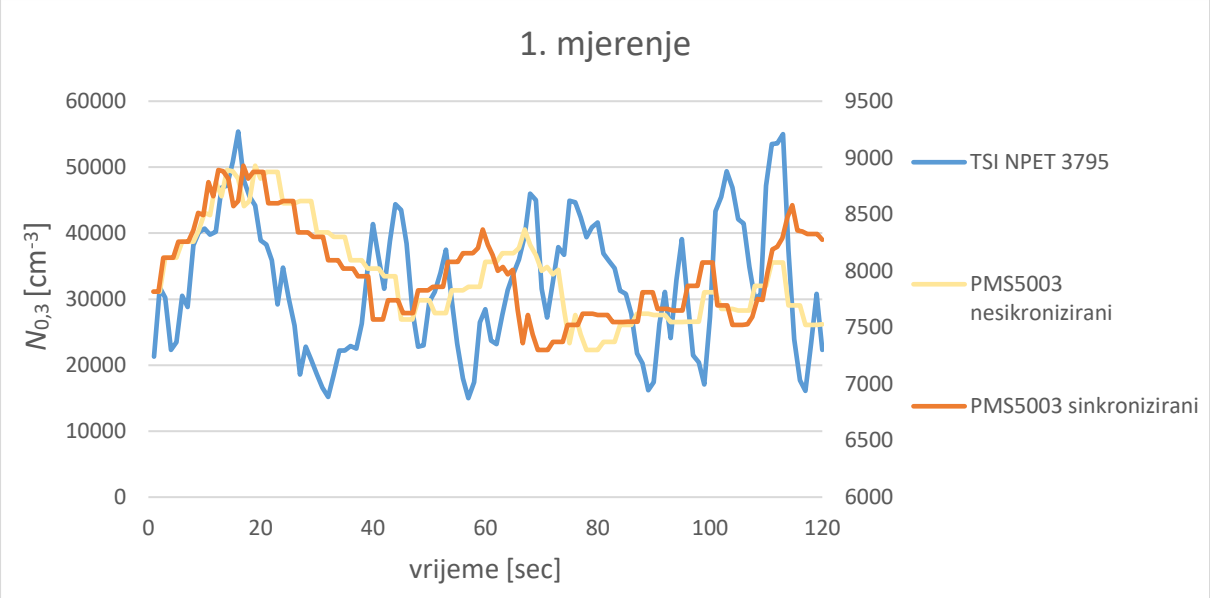
Slika 41. Drugo usporedno mjerenje broja čestica

Srednje vrijednosti mjerenja lebdećih čestica aerodinamičkog promjera većeg od 0,3 μm ispitnim uređajem iznose 8070 cm^{-3} za prvo mjerenje i 8099 cm^{-3} za drugo mjerenje, dok srednje vrijednosti uređaja PMS5003 iznose 8434 cm^{-3}, odnosno 8578 cm^{-3}. Mogući uzrok greške u odstupanju rezultata mjerenja je nesinkroniziranost dva mjerna uređaja jer kôd za Arduino nije bio napisan tako da ispisuje rezultate mjerenja u intervalima od točno jedne sekunde. Zbog toga, što duže traje mjerenje, dolazi do veće akumulacije nesinkroniziranosti. U dvije minute mjerenja, senzor PMS5003 prema napisanom kodu ispisivao je između 135 i 140 mjerenja. S obzirom da se rezultati ne ispisuju uz pripadajuću vremensku oznaku, potrebno je uključiti i isključiti oba senzora u isto vrijeme kako bi se dobila dva referentna vremena za sinkronizaciju podataka. Ovakvom metodom povećava se mogućnost ljudske pogreške.

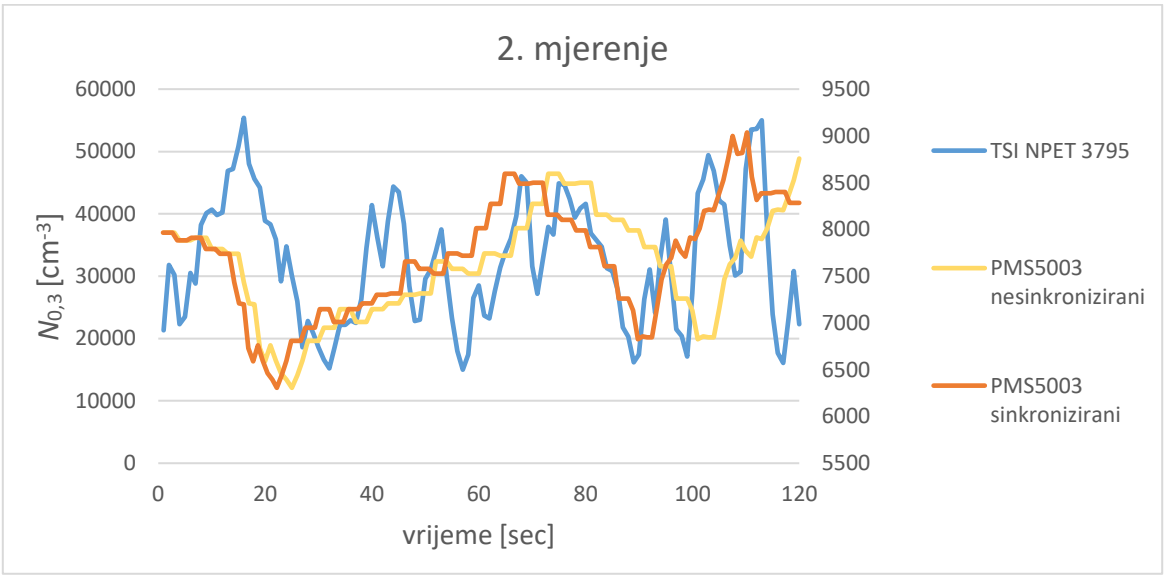
Žuta linija predstavlja nesinkronizirane podatke koji su dobiveni senzorom PMS5003, a plava mjerenje TSI NPET 3795 senzorom. Ako se rezultati senzora PMS5003 sinkroniziraju, dobije se narančasta linija prema kojoj se može uočiti malo bolje podudaranje s mjerenjem senzora TSI. Treba naglasiti da se ne može sa sigurnošću utvrditi sinkroniziranost dvaju senzora na prikazanim mjerenjima zbog nedostatka referentnih vrijednosti vremena. Još jedan razlog odstupanja je učinkovitost brojanja čestica koja za čestice promjera 0,3 μm iznosi 50%, a za čestice promjera većeg od uključno 0,5 μm učinkovitost je 98% [46].

7.1.2. Druga skupina usporednih mjerenja

Nadalje, izvršena su dva mjerenja lebdećih čestica u praznom hodu motora te su podaci obrađeni jednako kao za prethodno mjerenje. Na slici 42. i 43. mogu se vidjeti rezultati mjerenja. U sljedećim dijagramima potrebno je obratiti pažnju na dvostruka mjerila na ordinatama.



Slika 42. Prvo usporedno mjerenje broja čestica s radom motora u praznom hodu

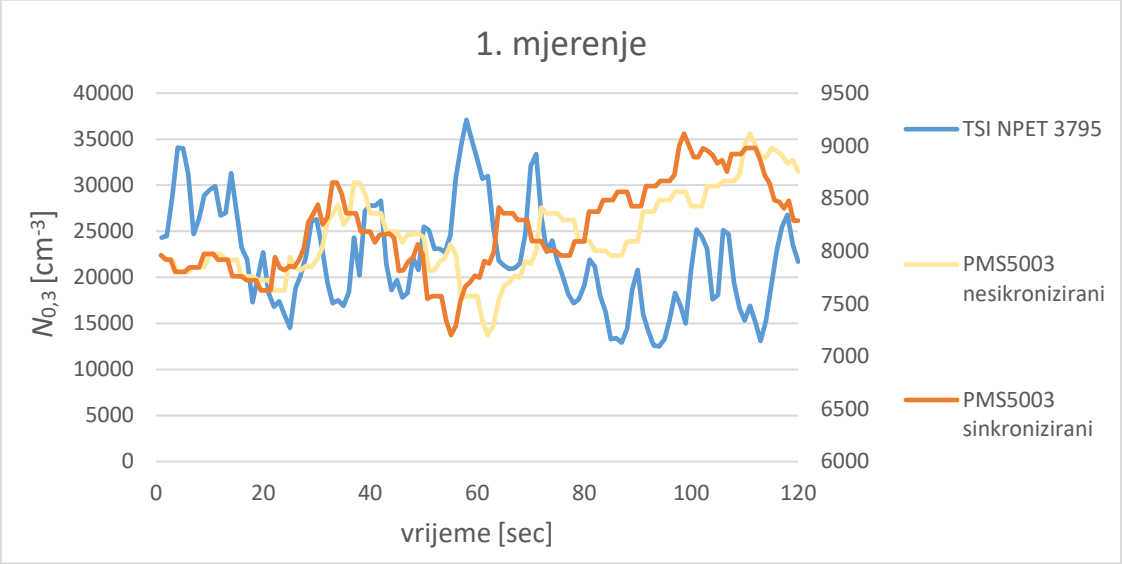


Slika 43. Drugo usporedno mjerenje broja čestica s radom motora u praznom hodu

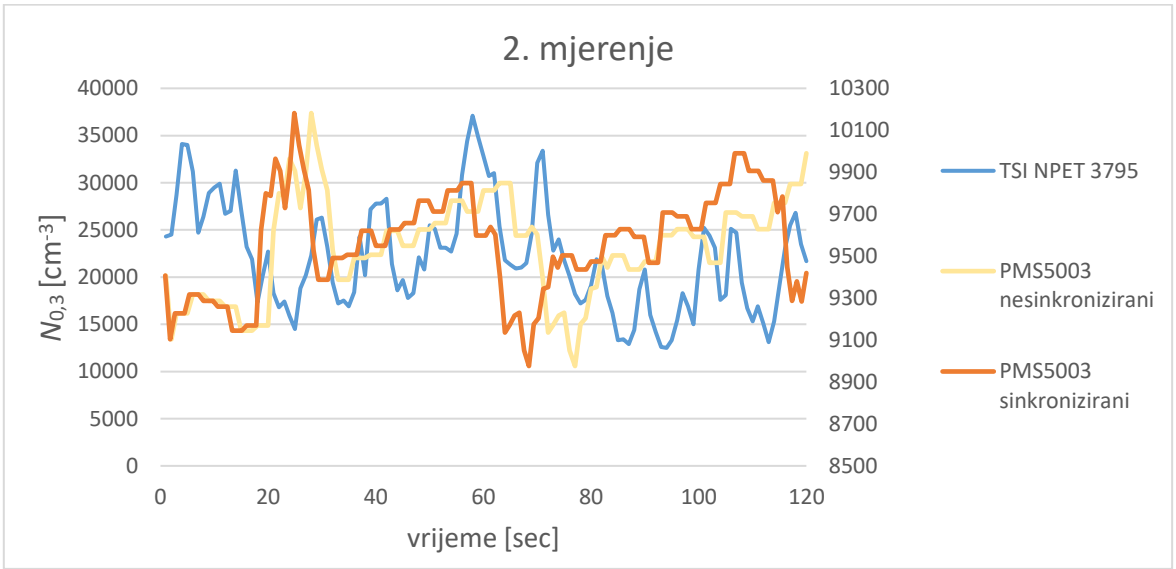
Primjećuje se da senzor PMS5003 nema tako brz odziv kao uređaj TSI NPET 3795. Unatoč slabijem odzivu senzora PMS5003, može se vidjeti prema dijagramima da prati tendenciju porasta i smanjenja čestica.

7.1.3. Treća skupina usporednih mjerenja

Treće testno mjerenje provodilo se s motorom u praznom hodu pri povišenom broju okretaja, a rezultati mjerenja prikazani su slikama 44. i 45. Također, zbog velike kvantitativne razlike, rezultati su prikazani na ordinatama s različitim rasponom vrijednosti.



Slika 44. Prvo usporedno mjerenje broja čestica s radom motora u praznom hodu pri 1810 okretaja

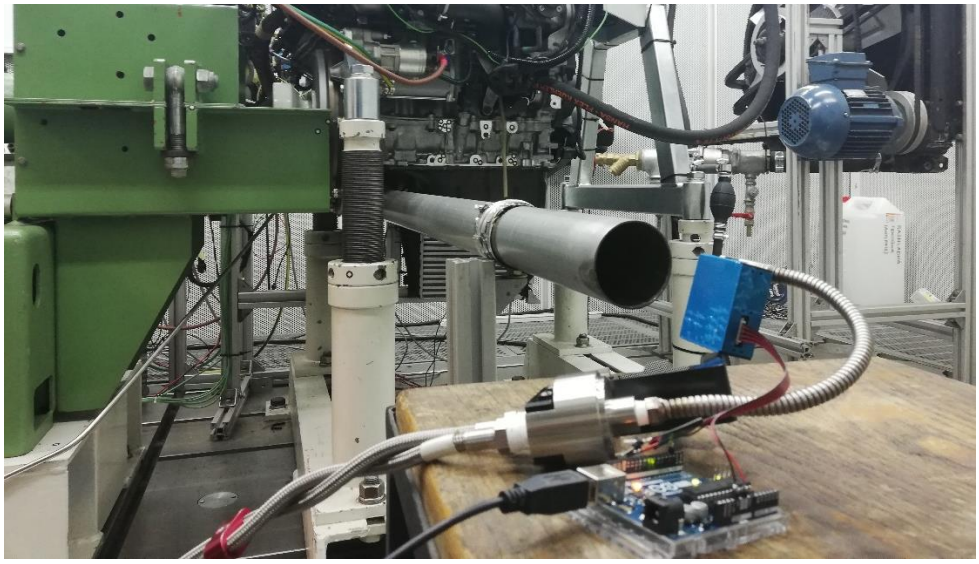


Slika 45. Drugo usporedno mjerenje broja čestica s radom motora u praznom hodu pri 1810 okretaja

U prvom mjerenju, prema slici 44., senzor PMS5003 ne pokazuje niti kvalitativnu promjenu broja čestica, dok se u drugom opet prati tendencija porasta i smanjenja broja čestica te se mogu primijetiti sličnosti profila u pojedinim skokovima.

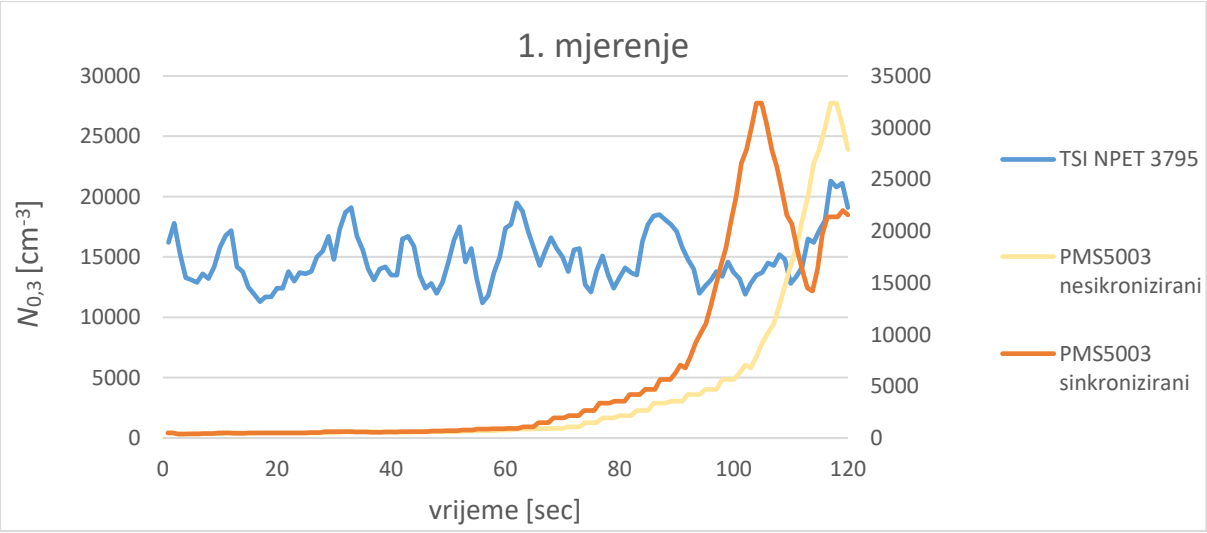
7.1.4. Četvrta skupina usporednih mjerenja

Sljedeće mjerenje provedeno je za istu radnu točku motora kao kod trećeg mjerenja, ali sa drukčijim položajima senzora, kako je prikazano na slici 46.

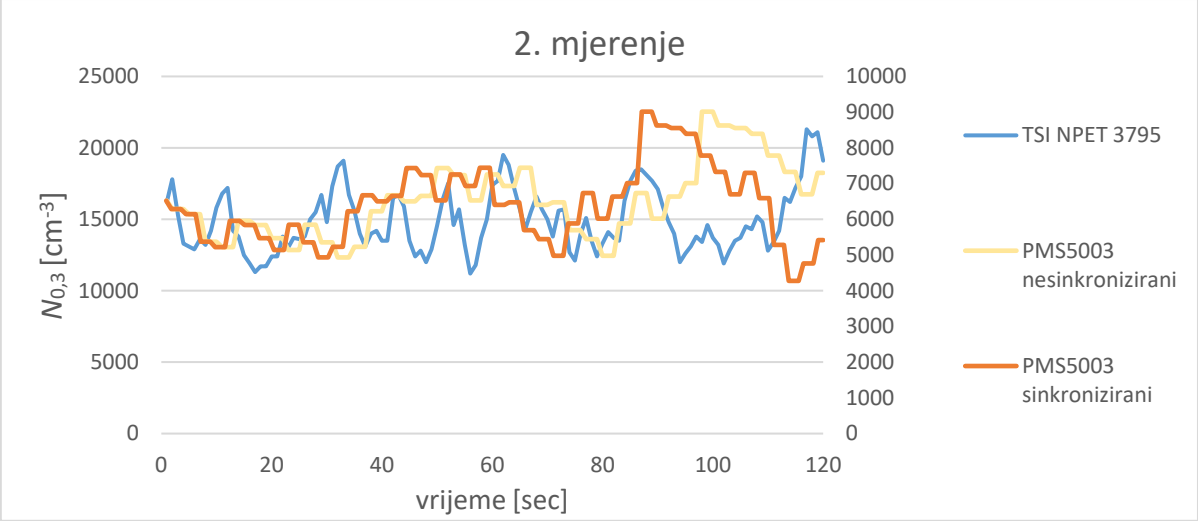


Slika 46. Nove pozicije senzora u odnosu na ispuh motora

Na slikama 47. i 48. prikazani su rezultati mjerenja senzora u novim pozicijama za prazni hod motora s 1810 okretaja.



Slika 47. Prvo usporedno mjerenje broja čestica s radom motora u praznom hodu pri 1810 okretaja s novim pozicijama senzora

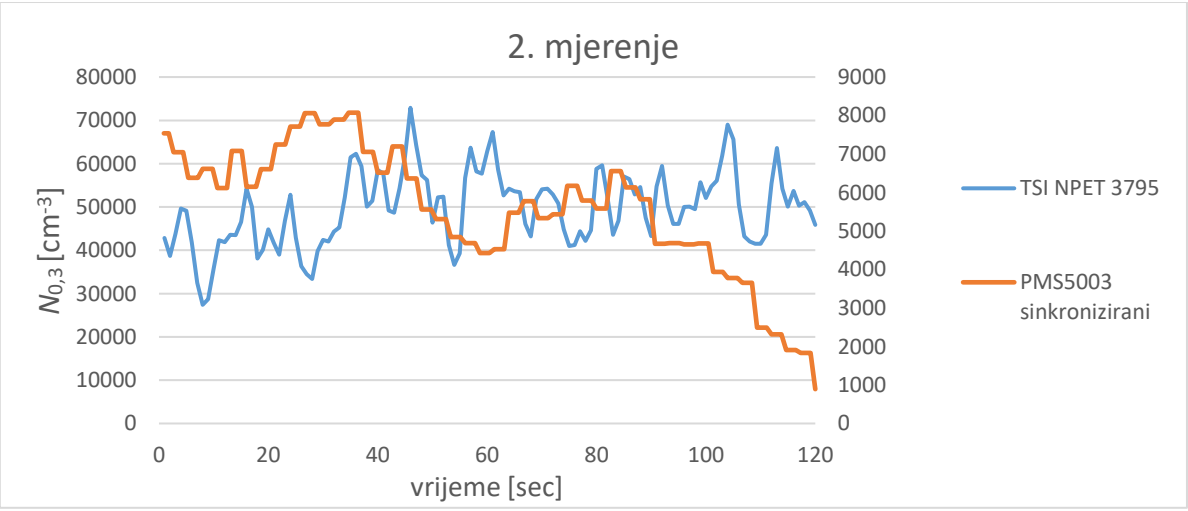


Slika 48. Drugo usporedno mjerenje broja čestica s radom motora u praznom hodu pri 1810 okretaja s novim pozicijama senzora

U prvoj minuti prvog mjerenja, senzor PMS5003 nije davao gotovo nikakav odaziv, dok se kod drugog mjerenja mogu primijetiti promjene u mjerenjima čestica koje ne pokazuju sličnost sa TSI senzorom. Da se zaključiti kako su visoka temperatura ispušnih plinova i preveliko prekoračenje gornje granice onečišćenja senzora PMS5003 trajno oštetili senzor.

7.1.5. Peta skupina usporednih mjerenja

Provedena su još dva mjerenja pri 33 Nm i 2000 okretaja u minuti. Kod prvog mjerenja, niskobuđetni senzor nije ni kvalitativno zadovoljio mjerenje, a pred kraj drugog mjerenja svi iznosi počeli su padati u nulu (slika 49.) te senzor nakon toga nije davao nikakav odziv.



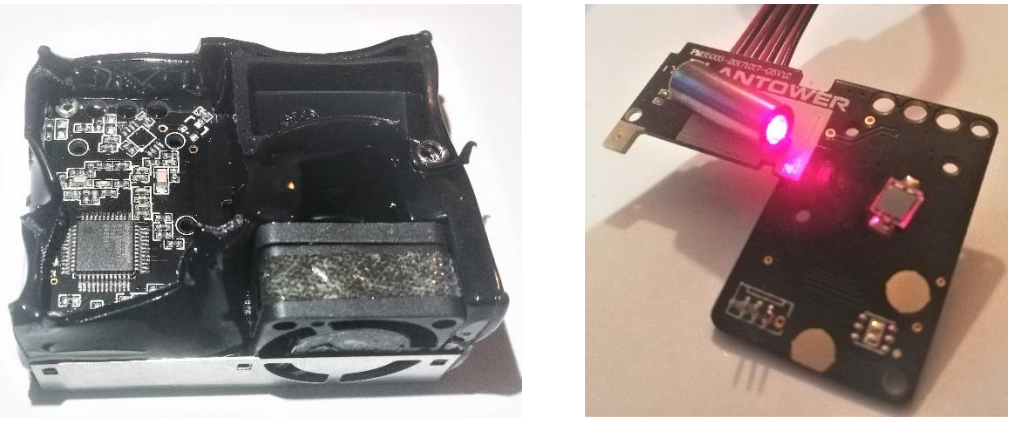
Slika 49. Drugo usporedno mjerenje broja čestica s radom motora pri 33 Nm i 1810 okretaja s novim pozicijama senzora

Na senzoru su bili vidljivi znakovi trajnog oštećenja uslijed toplinskog preopterećenja. Deformacija vanjskog kućišta prikazana je na slici 50.



Slika 50. Deformirano kućište PMS5003 uređaja u frontalnom (lijevo) i stražnjem (desno) pogledu

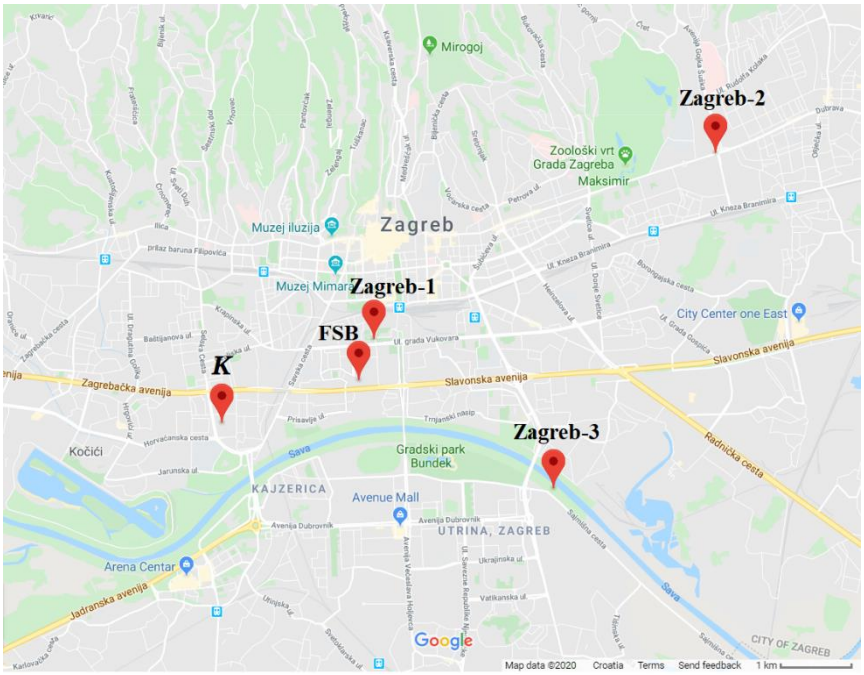
Unutrašnjost kućišta također je deformirana, a laser je i nakon toplinskih opterećenja bio u mogućnosti emitirati svjetlo, što se vidi na slici 51.



Slika 51. Unutrašnjost uređaja nakon toplinskih preopterećenja

7.2. Mjerenje kvalitete zraka

Kvaliteta zraka u Zagrebu se mjeri na tri državne mjerne stanice: Zagreb-1, Zagreb-2 i Zagreb-3. Jednostavni mjerni sustav postavljen je u kvartu „Knežija“, čiji se položaj u odnosu na navedene državne mjerne stanice može vidjeti na slici 52.



Slika 52. Karta mjernih postaja [53]

Lokacije jednostavnog mjernog sustava označene su s *K* i FSB te će se tako označavati i pripadajuće izmjerene vrijednosti u sljedećim dijagramima. Prema Pravilniku o praćenju kakvoće zraka (NN 155/05) [52], uzorkivač zraka bi trebao biti u zoni disanja, odnosno na visini između 1,5 i 4 m na otvorenom području bez prepreka koje bi mogle utjecati na protok zraka. Nadalje, uzorkivač za praćenje onečišćenja iz prometa bi trebao biti udaljen od ruba kolnika najviše 5 m za NO_2 i 10 m za lebdeće čestice [52]. Iz sigurnosnih razloga nije bilo mogućnosti postaviti jednostavni mjerni sustav na tu visinu i otvorenu lokaciju blizu prometnice.

Nakon što su podaci izmjereni i usrednjeni u vremenskom intervalu od dvije minute, zapisivali su se u tekstualnu datoteku na microSD karticu. Nakon mjerenja podaci su se dalje analizirali i naknadno obrađivali u programskom paketu Microsoft Excel. U sklopu naknadne obrade podataka potrebno je usrednjiti rezultate u vremenskom intervalu od jednoga sata te ih

kao takve prikazati u dijagramima kako bi se mogli usporediti s rezultatima mjerenja državnih mjernih postaja.

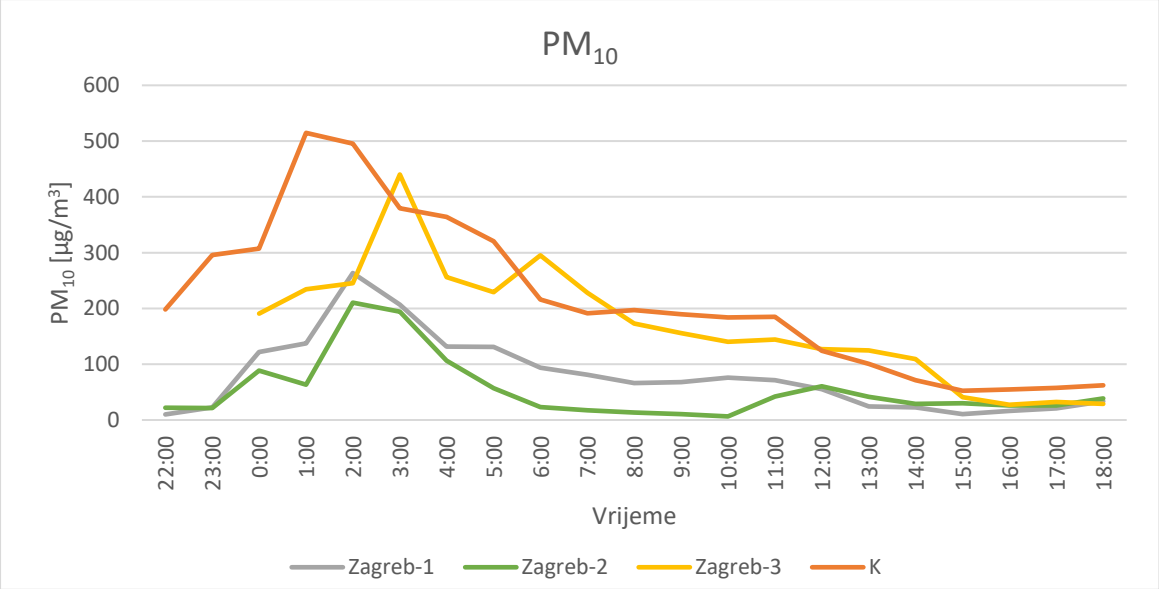
Vrijednosti koncentracija NO2 prikazuju se na zasebnim ordinatama i u dijagramima nemaju mjernu jedinicu. Prema specifikacijama, senzor mjeri koncentraciju u ppm, nije određena nulta vrijednost napona u okolini bez NO_2 stoga senzor ne daje informaciju o koncentracijama dušikovih oksida, nego o promjeni njegovih koncentracija.

7.2.1. Mjerna lokacija K

Koncentracije lebdećih čestica i promjene koncentracija NO_2 mjerene su na balkonu četvrtog kata koji je udaljen 100 metara od prometnice s relativno gustim prometom. Ova mjerna lokacija ne zadovoljava uvjete iz Pravilnika [52] jer je previše udaljena od prometnice, na višoj je nadmorskoj visini te ne zadovoljava uvjete o otvorenosti okolnog prostora.

7.2.1.1. Prvo mjerenje: 1.1.2020.

Jedan od velikih izvora onečišćenja zraka lebdećim česticama je vatromet. Kako bi se prikazale promjene koncentracije lebdećih čestica uzrokovanih vatrometom, mjerenje se provodilo u večeri 31.12.2019. – 1.1.2020. za vrijeme proslave Nove godine. Rezultati mjerenja prikazani su na slici 53.

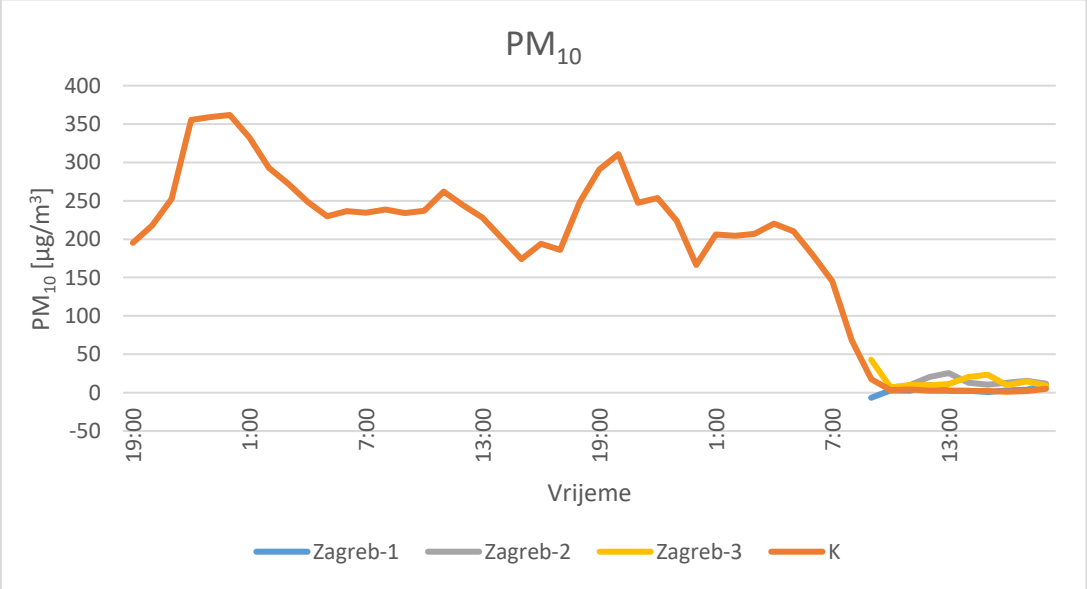


Slika 53. Novogodišnje vrijednosti PM_{10} pod utjecajem vatrometa

Iz slike 53. može se primijetiti da su rezultati senzora PMS5003 kvalitativno slični rezultatima mjerenja lebdećih čestica na mjernim stanicama Državnog hidrometeorološkog zavoda. Mogući uzrok povećanih vrijednosti mjerenja PMS5003 senzora u odnosu na vrijednosti mjernih stanica Z-1, Z-2 i Z-3 jest mjerenje lebdećih čestica na četvrtom katu zgrade, zbog čega je mjerni uređaj visinski bliži eksplozivnim reakcijama.

7.2.1.2. Drugo mjerenje: 3.1.-5.1.2020.

Mjerenje se provodilo od 3.1 do 5.1., ukupno 48 sati, no zbog nedovoljnog broja podataka Hrvatske agencije za okoliš i prirodu, ne mogu se usporediti rezultati mjerenja u zadovoljavajućem vremenskom periodu. Nedostaju podaci od čak 42 uzastopna sata za sve tri mjerne stanice. Dijagrami na slikama 54. i 55. prikazuju izmjerene vrijednosti i usporedbu za dostupne vrijednosti u vremenskom periodu mjerenja kvalitete zraka jednostavnim mjernim sustavom.

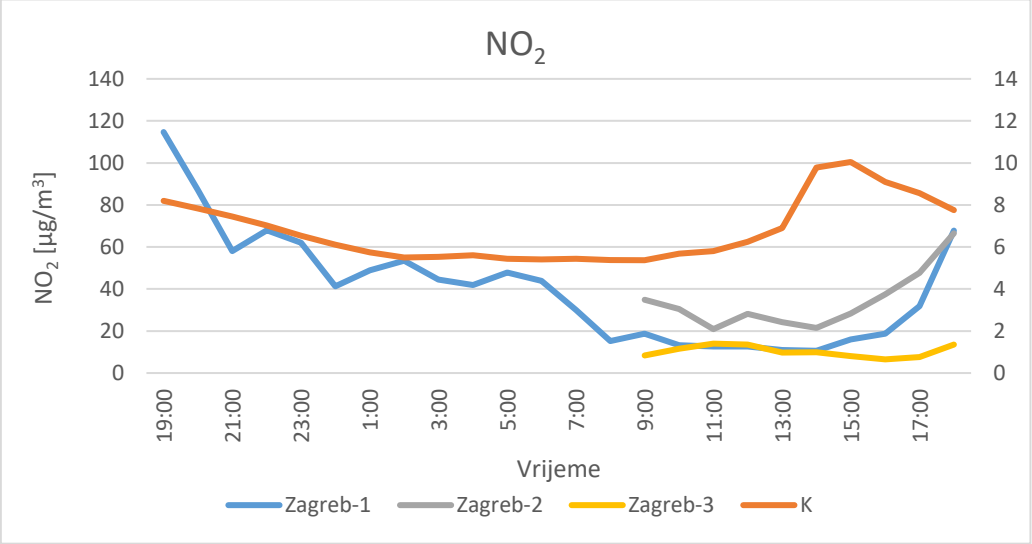


Slika 54. Koncentracije PM_{10} drugog mjerenja

Može se primijetiti da u vremenskom razdoblju za koje nema dostupnih podataka, PM_{10} koncentracije izmjerene senzorom PMS5003 poprimaju poprilično velike vrijednosti, a ti podaci nisu za to razdoblje dostupne javnosti.

Koncentracije NO_2 nisu prikazane za cijeli vremenski period mjerenja (slika 55.), nego samo za vremensko razdoblje u kojem se mogu usporediti rezultati s mjernom stanicom

Zagreb-1. Vrijednosti mjerenja uzete su s internetske stranice DHMZ-a na kojoj su podaci dostupni samo za protekla 24 sata.

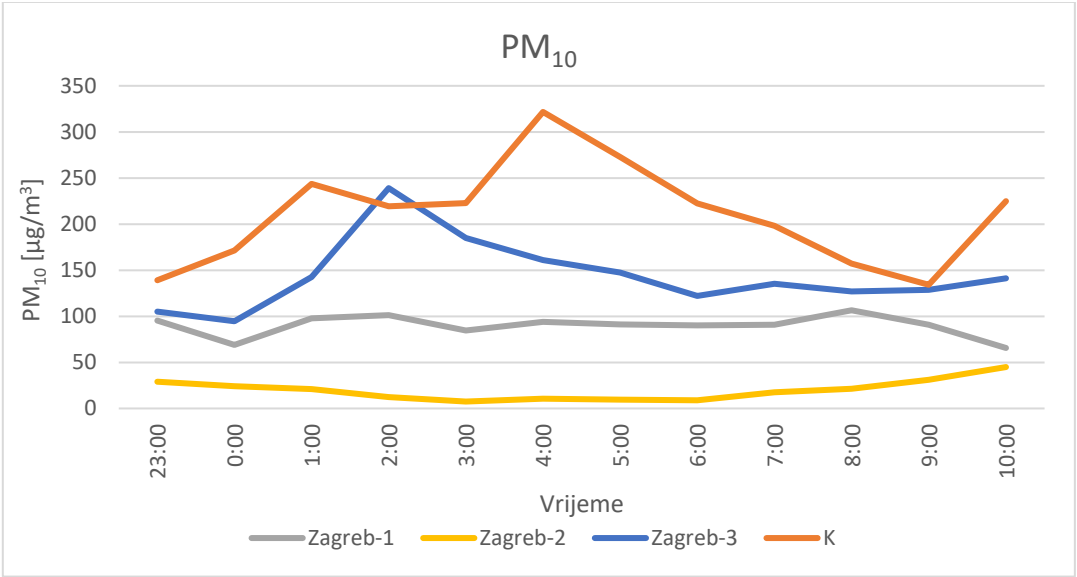


Slika 55. Koncentracije NO_2 drugog mjerenja

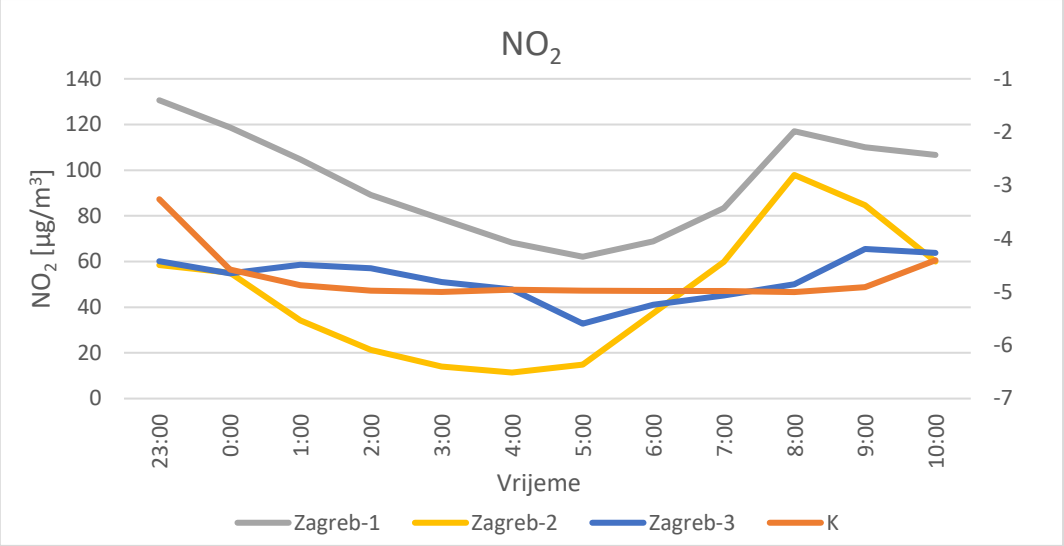
Na dijagramu (slika 55.) se primjećuje da krivulja *K* prati tendenciju smanjenja koncentracije u prvoj polovici vremenskog perioda mjerenja, ali ne reagira na manje promjene u koncentracijama.

7.2.1.3. Treće mjerenje: 6.1.-7.1.2020.

Sljedeće mjerenje provedeno je u noći 6.1.-7.1., a trajalo je 12 sati. Na slikama 56. i 57. prikazani su usrednjeni iznosi mjerenja za navedeno razdoblje



Slika 56. Koncentracije PM_{10} trećeg mjerenja

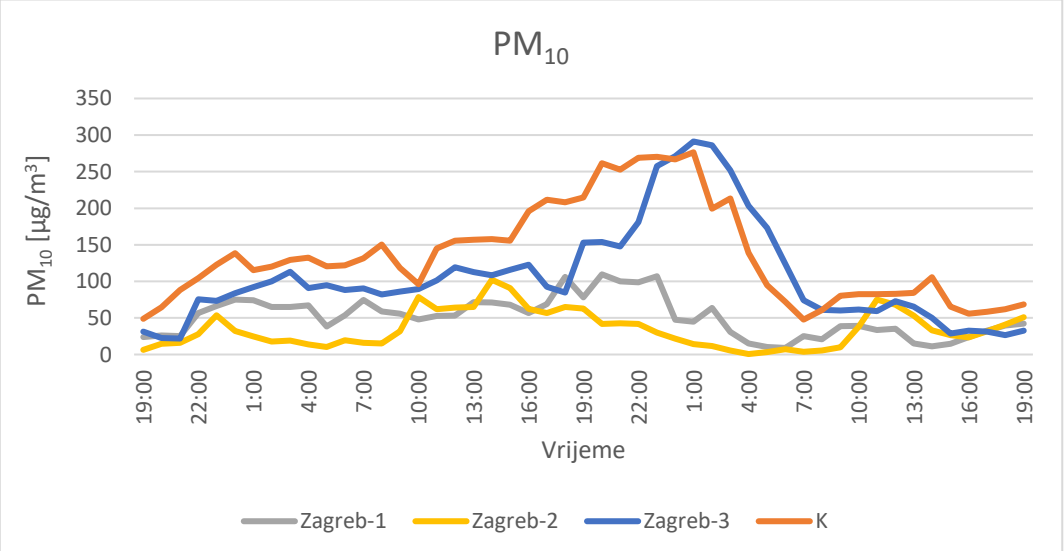


Slika 57. Koncentracije NO_2 trećeg mjerenja

Primjećuje se da su koncentracije lebdećih čestica PM_{10} nešto veće nego li je izmjereno na mjernoj stanici Zagreb-3, a znatno veće nego na stanicama Zagreb-1 i Zagreb-2. Sličan slučaj je kod rezultata mjerenja koncentracija NO_2: krivulja *K* nalikuje krivulji Zagreb-3, ali nema tolike promjene u koncentracijama, nego se ponaša kao njena srednja vrijednost.

7.2.1.4. Četvrto mjerenje: 10.1.-12.1.2020.

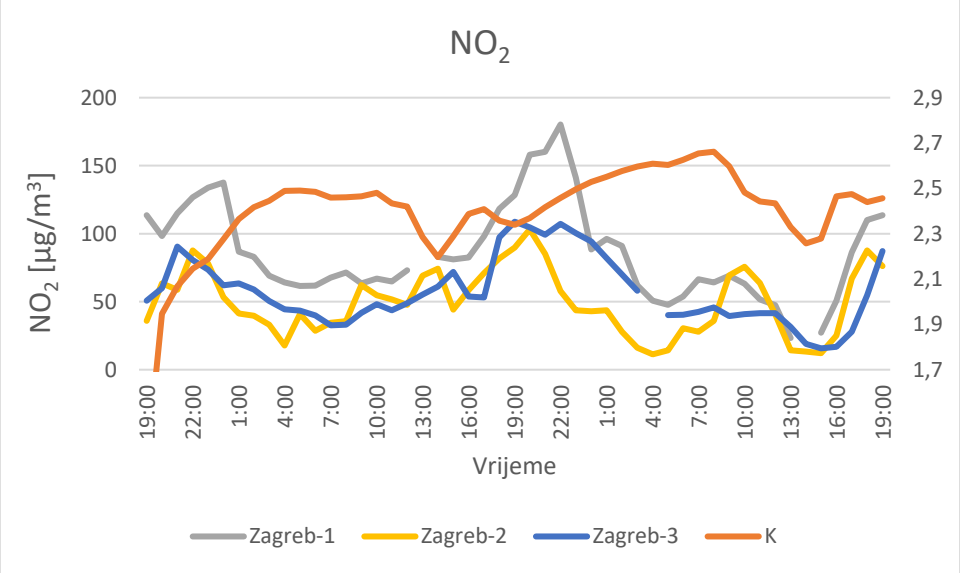
Četvrto mjerenje provodilo se u istom vremenskom razdoblju kao i drugo mjerenje, ali tjedan dana kasnije. Na slici 58. prikazane su koncentracije PM_{10}.



Slika 58. Koncentracije PM_{10} četvrtog mjerenja

Krivulja *K* za koncentraciju PM_{10} kvalitativno je najsličnija krivulji Zagreb-1, dok je kvantitativno najsličnija krivulji Zagreb-3. Ako se mjerni rezultati na lokaciji *K* usporede za četvrto i drugo mjerenje u vremenskom periodu u kojemu nisu dostupni rezultati mjerenja državnih mjernih postaja, primjećuje se da koncentracije lebdećih čestica PM_{10} imaju netipično visoke iznose tijekom dužeg vremena kod drugog mjerenja. Mjerni podaci su nadalje dostupni od trenutka kad koncentracije poprimaju niske vrijednosti.

Nadalje, slika 59. prikazuje izmjerene koncentracije NO_2.



Slika 59. Koncentracije NO_2 četvrtog mjerenja

Može se primijetiti da krivulja *K* u manjim vremenskim intervalima prati krivulje koncentracija državnih mjernih uređaja. Iz dosadašnjih mjerenja zaključuje se da je prema Pravilniku o praćenju kakvoće zraka (NN 155/05) [52] lokacija jednostavnog mjernog sustava neprikladna te kao takva ima veći utjecaj na mjerenje promjena koncentracija NO_2, dok su promjene koncentracija PM_{10} zadovoljavajućih iznosa.

7.2.2. Mjerna lokacija FSB

Mjerenje se provodilo na Katedri za motore i vozila koja se nalazi na 9. katu Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Jednostavni mjerni sustav bio je pozicioniran na južnoj strani zgrade prema Slavonskoj aveniji, jednoj od prometnica s najgušćim prometom u Zagrebu. Mjerna lokacija FSB ima bolju otvorenost nego lokacija *K*, no nalazi se na većoj nadmorskoj visini. Prema Pravilniku o praćenju kakvoće zraka (NN 155/05) [52], visina uzorkivača u posebnim slučajevima može iznositi do 8 metara, a mjerna lokacija FSB je iznad te vrijednosti.

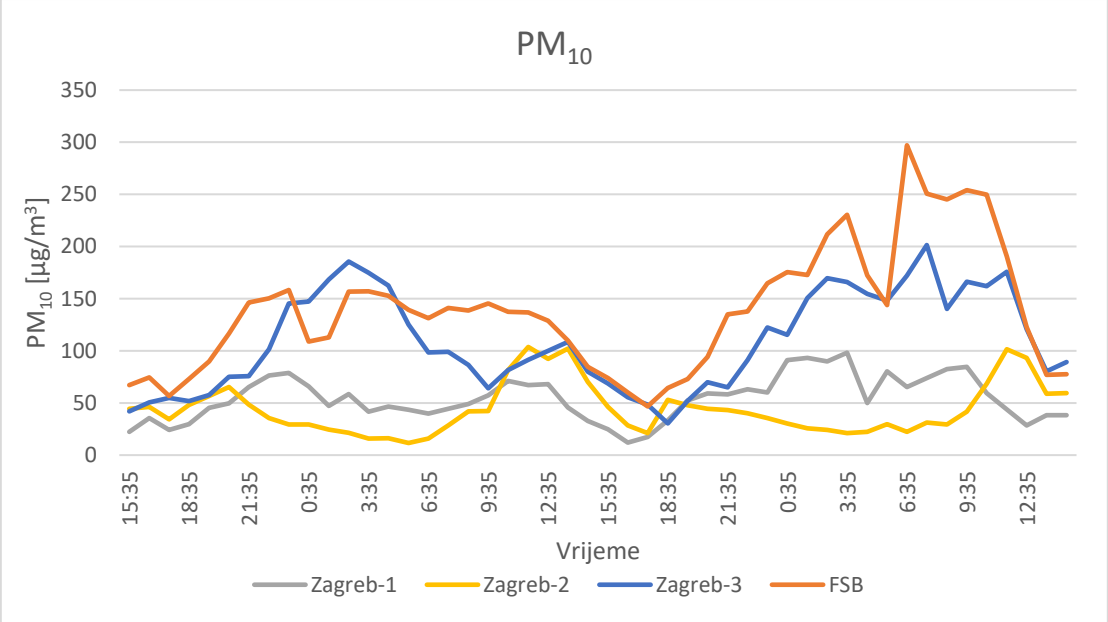
Pozicioniranje jednostavnog mjernog sustava prikazano je na slici 60.



Slika 60. Jednostavni mjerni sustav na mjernoj lokaciji FSB

7.2.2.1. Prvo mjerenje: 7.1.-9.1.2020.

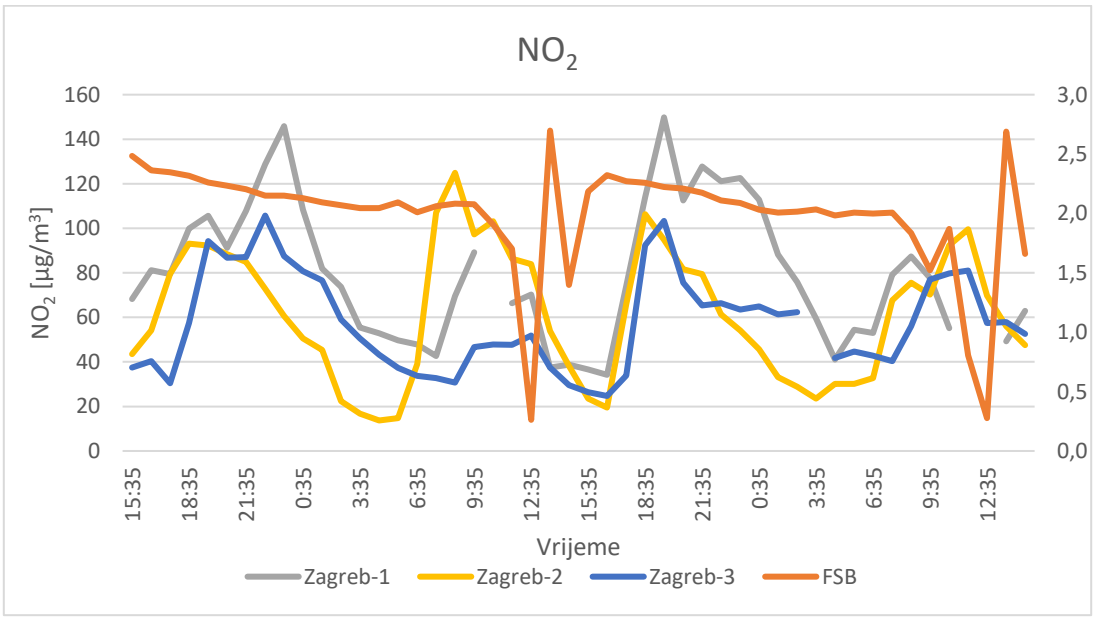
Prvo mjerenje na mjernoj lokaciji trajalo je 48 sati, a mjerenje je počelo prije razdoblja u kojem je najveća koncentracija vozila na prometnici. Rezultati mjerenja lebdećih čestica PM_{10} prikazani su na slici 61.



Slika 61. Koncentracije PM_{10} prvog mjerenja

Primjećuje se da, unatoč velikoj nadmorskoj visini jednostavnog mjernog sustava, senzor PMS5003 daje zadovoljavajuće rezultate prema kojima se povećanja i smanjenja koncentracije lebdećih čestica u odnosu na državne mjerne stanice događaju u jednakim vremenima.

Izmjerene i usrednjene koncentracije NO_2 prikazane su na slici 62.

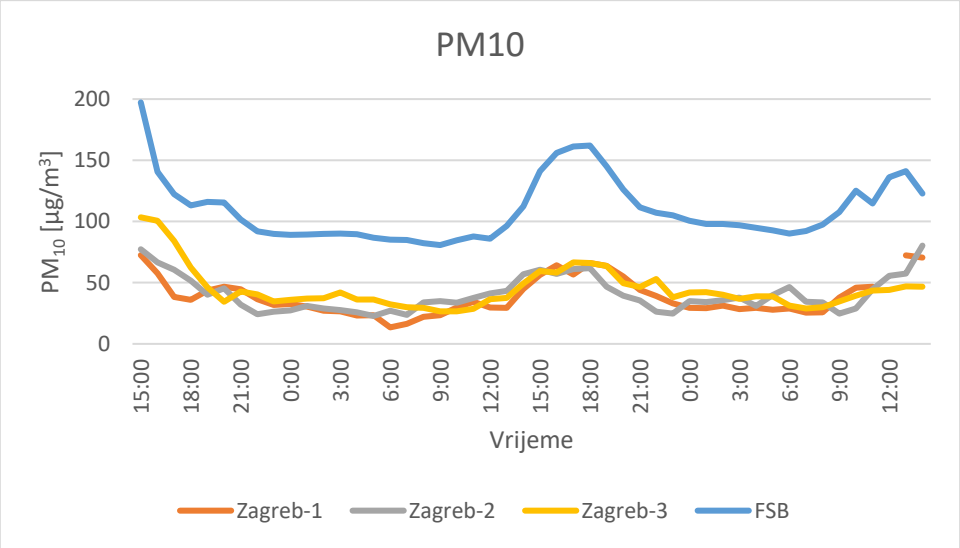


Slika 62. Koncentracije NO_2 prvog mjerenja

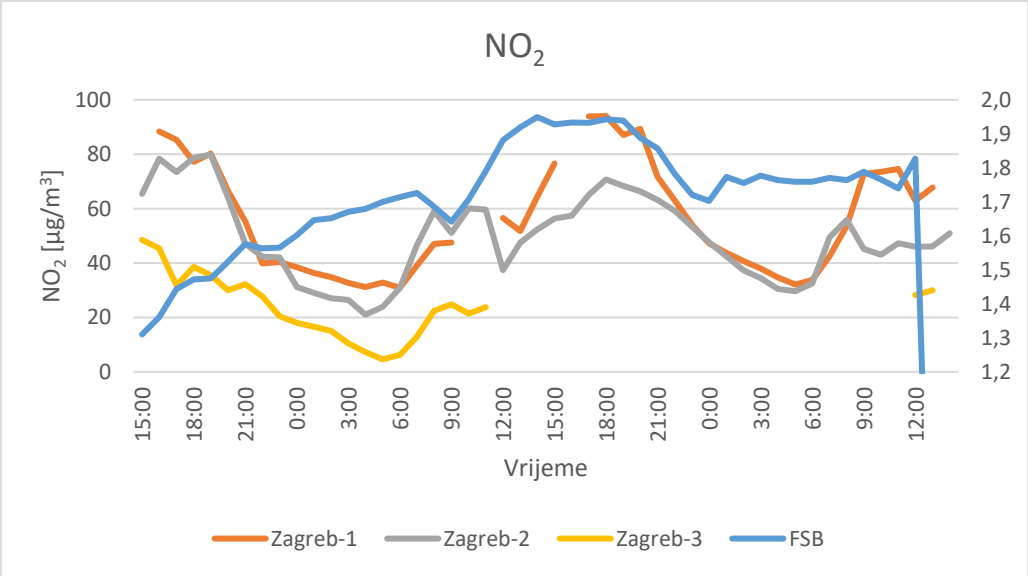
Može se primijetiti sporiji odziv NO_2 senzora u odnosu na najbližu mjernu stanicu Zagreb-1. Nedvojbeno, prevelika nadmorska visina jednostavnog mjernog sustava ima velik utjecaj na izmjerene vrijednosti koncentracija NO_2.

7.2.2.2. Drugo mjerenje: 13.1.-15.1.2020.

Drugo mjerenje na mjernoj lokaciji FSB trajalo je 48 sati, a rezultati mjerenja prikazani su na slikama 63. i 64.



Slika 63. Koncentracije PM_{10} drugog mjerenja



Slika 64. Koncentracije NO_2 drugog mjerenja

Može se primijetiti da senzor PMS5003 daje zadovoljavajuće kvalitativne mjerne rezultate i u drugom mjerenju, dok su vrijednosti izmjerenih koncentracija veće nego na državnim mjernim postajama.

Na slici 64. primjećuje se da su krivulje državnih mjernih postaja na nekim dijelovima isprekidane. To znači da rezultati mjerenja nisu dostupni za to vrijeme. Krivulja FSB kvalitativno je slična krivuljama Zagreb-1 i Zagreb-2.

8. ZAKLJUČAK

Praćenje kvalitete zraka, osim zakonske osnove, nužno je za poboljšanje kvalitete zraka i života. Ograničavanjem onečišćenosti zraka u urbanim sredinama omogućava se ugodniji život stanovnicima i smanjuje se negativan utjecaj na vegetaciju.

Uz službene mjerne stanice, uporabom većeg broja jednostavnih mjernih uređaja moguće je nadzirati kvalitetu zraka na širem području.

U sklopu ovog diplomskog rada konstruiran je jednostavni mjerni sustav za mjerenje koncentracije lebdećih čestica i dušikova dioksida. Provedeno je ukupno 16 mjerenja, od kojih je 10 provedeno u Laboratoriju za motore i vozila usporedno s ispitnim mjernim uređajem. Četiri mjerenja provedena su u kvartu Knežija, a preostala dva na zgradi Fakulteta strojarstva i brodogradnje na prozoru 9. kata.

Usporedbom rezultata mjerenja jednostavnog mjernog uređaja s podacima mjerenja državnih mjernih stanica može se zaključiti da mjerenje koncentracija lebdećih čestica PM_{10} daje zadovoljavajuće rezultate mjerenja. Rezultati izmjerenih koncentracija dušikova dioksida jednostavnog mjernog uređaja imaju relativno velika odstupanja u odnosu na rezultate mjernih stanica, ali u određenim vremenskim intervalima mogu relativno dobro pratiti trendove. Razlog tome može biti osjetljivost senzora za mjerenje dušikova dioksida na ozon, čiji utjecaj bi se mogao smanjiti korištenjem senzora s filterom za smanjenu osjetljivosti na ozon. Osim toga, osjetljivost senzora za mjerenje dušikova dioksida ovisi o temperaturi okolnog zraka. Mjerenjem temperature i korekcijom rezultata ovisno o temperaturi mogla bi se smanjiti pogreška mjerenja.

Obzirom na relativno mali broj mjernih stanica za praćenje kvalitete zraka, korištenje većeg broja ovakvih jednostavnih mjernih sustava omogućilo bi bolji uvid u kvalitetu zraka na širem gradskom području te bi se na taj način poboljšala kvaliteta života jer bi stanovnici mogli svoje svakodnevne aktivnosti na otvorenom prilagoditi ovisno o kvaliteti zraka.

LITERATURA

[1] Hrvatska agencija za okoliš i prirodu: Izvješće o praćenju kvalitete zraka na području Republike Hrvatske za 2018. godinu, 2019.

[2] World Health Organization: Air Quality Guidelines - Second Edition, Kopenhagen, 2000

[3] World Health Organization: Motor vehicle air pollution, public health impact and control measures, Ženeva, 1992.

[4] European Comission, Directorate General XI: Position paper on Air Quality: nitrogen dioxide, 1997.

[5] CAFE Working Group on Particulate Matter: Second Position Paper on Particulate Matter

[6] Uredba o određivanju zona i aglomeracija prema razinama onečišćenosti zraka na teritoriju Republike Hrvatske (NN 1/14)

[7] http://iszz.azo.hr/iskzl/mreza.html?t=1, (pristupljeno 9.1.2020.)

[8] Zakon o zaštiti zraka, NN 127/19

[9] http://iszz.azo.hr/iskzl/help.htm (pristupljeno 23.12.2019.)

[10] Davila S, Pečar Ilić J, Bešlić I.: Real-time dissemination of air quality information using data streams and Web technologies: linking air quality to health risks in urban areas. Arh Hig Rada Toksikol. 2015., 66(2):171-180., DOI: 10.1515/aiht-2015-66-2633

[11] United States Environmental Protection Agency: Air Quality Criteria for Particulate Matter, Vol. I, EPA/600/P-95/001aF, Washington DC, 1996.

[12] Hrvatska agencija za okoliš i prirodu: Procjena kakvoće zraka na teritoriju države i primjena dodatka XIV. nove Direktive o kakvoći zraka i čišćem zraku za Europu 2008/50/EZ, Zagreb, 2010.

[13] https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics (pristupljeno 3.1.2020)

[14] Direktiva 2008/50/EZ Europskog parlamenta i Vijeća o kvaliteti zraka i čišćem zraku za Europu

[15] Uredba o razinama onečišćujućih tvari u zraku (NN 117/12, 84/17)

[16] Državni hidrometeorološki zavod: Izvješće o praćenju kvalitete zraka na postajama državne mreže za trajno praćenje kvalitete zraka u 2018. godini, Zagreb, 2019.

[17] Pravilnik o praćenju kvalitete zraka, NN 79/17

[18] Swanson, J., Kittelson, D.: A Method to Measure Static Charge on a Filter Used for Gravimetric Analysis, Aerosol Science and Technology, 2008., 42:9, 714-721, DOI: 10.1080/02786820802232980

[19] Occhipinti LG, Oluwasanya PW: Particulate Matter Monitoring: Past, Present and Future, 2017., Int J Earth Environ Sci 2: 144. DOI: 10.15344/2456-351X/2017/144

[20] WHO Regional Office for Europe, Health effects of particulate matter

[21] Asbach, C.: Development and Evaluation of a Highly Effective Gas Particle Partitioner with Minimal Effect on the Gas Composition, 2013.

[22] Emerson Electric Co.: CLD NO/NO_x Analyzer Module. Product Data Sheet, PDS 103-640.A01, Rosemount Analytical Inc., 2008.

[23] http://www.environnement-sa.com/caps-chemiluminescence-no2-measurement/ (pristupljeno 21.12.2019.)

[24] Bajt, P.: Lambert-Beerov zakon, Završni rad, Sveučilište J.J.Strossmayera, Osijek, 2018.

[25] https://library.e.abb.com/public/ad10ee5fd9c6d1e985256d1f004868a5/SC7-54-402-ISAAD.pdf (pristupljeno 12.10.2019.)

[26] Wiegleb, G., Wiegleb, S.: Novel CEM gas detection module for SO2 and NOx monitoring based on small size NDUV- and UVRAS–Technology, 2018., www.envirotech-online.com/article, (pristupljeno 7.10.2019.)

[27] The Perkin-Elmer Corporation: Analytical Methods for Atomic Absorption Spectroscopy, USA, 1996.

[28] https://www.co2meter.com/blogs/news/6010192-how-does-an-ndir-co2-sensor-work (pristupljeno 3.10.2019.)

[29] Spanget-Larsen, J.: Infrared Intensity and Lorentz Epsilon Curve from 'Gaussian' FREQ Output, Roskilde University, 2015., DOI: 10.13140/RG.2.1.4181.6160.

[30] Popa, D., Udrea, F.: Towards Integrated Mid-Infrared Gas Sensors, *Sensors*, 2019., 19(9):2076., DOI:10.3390/s19092076

[31] Kaur, K.: Carbon Dioxide Sensor, AZoSensors. https://www.azosensors.com/article.aspx?ArticleID=234. (pristupljeno 16.9.2019.)

[32] CO2Meter, Inc.. What is an NDIR Sensor, AZoSensors https://www.azosensors.com/article.aspx?ArticleID=1529. (pristupljeno 16.9.2019.)

[33] SPEC Sensors: SPEC Sensor Operation Overview, 2016.

[34] Stradiotto, N. R., Yamanaka, H., Zanoni, M. V. B.: Electrochemical sensors: a powerful tool in analytical chemistry, 2003., *Journal of the Brazilian Chemical Society*, *14*(2), 159-173. https://dx.doi.org/10.1590/S0103-50532003000200003

[35] Kajinić, Ž.: Voltametrijska detekcija arsena u uzorcima vode iz arteških bunara, Diplomski rad, Sveučilište J. J. Strossmayera, Osijek, 2019.

[36] https://mycourses.aalto.fi/mod/book/view.php?id=310173&chapterid=1000 (pristupljeno 15.1.2020.)

[37] Piljac, I.: Senzori fizikalnih veličina i elektroanalitičke metode, Mediaprint-tiskara Hrastić d.o.o., Zagreb, 2010.

[38] https://www.aeroqual.com/challenges-electrochemical-no2-sensors-outdoor-air-monitoring

[39] Bozóki, Z., Pogány, A., Szabo, G., Photoacoustic Instruments for Practical applications: Present, Potentials, and Future Challenges. 2011., Applied Spectroscopy Reviews. 46. 1-37. 10.1080/05704928.2010.520178

[40] https://publiclab.org/wiki/optical-pm (pristupljeno 22.12.2019.)

[41] Canu, M., Galvis, B., Morales, R., Ramírez Hernández, O., Madelin, M.: Understanding the Shinyei PPD24NS low-cost dust sensor, 2018., DOI: 10.1109/EE1.2018.8385268

[42] http://enciklopedija.hr/ (pristupljeno 12.10.2019.)

[43] https://publiclab.org/wiki/pm#Droplets (pristupljeno 6.1.2020.)

[44] https://www.ksixmobile.com/en/post/difference-between-analog-and-digital-sensors-167.php (pristupljeno 5.11.2019.)

[45] https://learn.sparkfun.com/tutorials/logic-levels/all (pristupljeno 13.11.2019.)

[46] http://www.circuitbasics.com (pristupljeno 13.11.2019.)

[47] SPEC Sensors: Ultra-Low Power Analog Sensor Module for Nitrogen Dioxide, ULPSM-NO2 968-047, 2017.

[48] SPEC Sensors: 15x15 NO2 Sensor 20 ppm C Package 110-502, 2016.

[49] Plantower: PMS5003 series data manual, 2016.

[50] https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/time/millis/ (pristupljeno 14.1.2020.)

[51] https://forum.arduino.cc/ (pristupljeno 14.1.2020.)

[52] Pravilnik o praćenju kakvoće zraka, NN 155/05

[53] https://www.google.hr/maps (pristupljeno 14.1.2020.)

[54] https://meteo.hr/kvaliteta_zraka.php?section=podaci_kz&post=Zagreb+1 (pristupljeno 5.1.2020.)

PRILOZI

I. Programski kodovi

II. CD-R

I. Programski kodovi

A. Izvršni kôd

```
#include "Arduino.h"
// datoteka zaglavlja NO2 senzora
#include "ULP.h"
//datoteka zaglavlja za komunikaciju s modulom microSD kartice
#include <SPI.h>
//datoteka zaglavlja za naredbe ispisivanja na microSD karticu
#include <SD.h>
//datoteka zaglavlja za software UART komunikaciju
#include <SoftwareSerial.h>

SoftwareSerial pmsSerial(2, 3);
File myFile;
//---------varijable za usrednjavanje
unsigned long start_millis;
unsigned long  brojanje;
const unsigned long sekunde = 120;       //broj sekundi usrednjavanja
const unsigned long interval = sekunde * 1000;
//---------varijable za koncentraciju NO2
long temp1_ukupno;
long Vgas_ukupno;
float Conc_ukupno;
long sensorValue_ukupno;
//---------varijable za lebdeće čestice-----------------
unsigned long pm10_S_ukupno, pm25_S_ukupno, pm100_S_ukupno;
unsigned long pm10_env_ukupno, pm25_env_ukupno, pm100_env_ukupno;
unsigned long particles_03um_ukupno, particles_05um_ukupno,
particles_10um_ukupno, particles_25um_ukupno, particles_50um_ukupno,
particles_100um_ukupno;
//-----------------------------------------------------

int sensorPin = A0;  //  input konektor za NO2 sensor
```

```
int sensorValue = 0;

int pinCS = 10;
// konstante za primanje vrijednosti koncentracije i temperature:
const int C1 = A0;
const int T1 = A3;

const float Sf1 = 25.46;  //oznaka osjetljivosti NO2 senzora, SC [nA/ppm]

float temp1 = 0; //pretpostavljena temperatura okolnog zraka
float Vgas;
float Concentr;
float TZero;
float Vzero1;

//dohvaćanje vrijednosti NO2 ovisno o temperaturi i oznaci osjetljivosti
NO2 sensor1(C1, T1, Sf1);

void setup() {
  Serial.flush();
  Serial.begin(9600);
  pinMode(pinCS, OUTPUT);
  //------provjera dostupnosti SD kartice-----------------------
  while (!Serial) {
    ;
  }
  Serial.print("Initializing SD card...");
  if (!SD.begin(10)) {
    Serial.println("initialization failed!");
  }
  Serial.println("initialization done.");
  //-------------------------------------------------------------
  myFile = SD.open("mjerenje.txt", FILE_WRITE);
  //================================NO2============================
  Serial.println("Setting Up");
  myFile.println("Setting Up");
  myFile.print("Vsup for all sensors = ");
```

```
  myFile.println(ULP::_Vsup);
  myFile.print("Vcc for all sensors = ");
  myFile.println(ULP::_Vcc);
  myFile.print("Vref for sensor 1 = ");
  myFile.println(sensor1._Vref);
  myFile.print("Vzero = ");
  //vraća vrijednost nultog referentnog napona
  myFile.println(Vzero1 = sensor1.zero());
  myFile.print("Tzero = ");
  myFile.println(sensor1._Tz);
  Serial.println("Finished Setting Up");
  Serial.print("temp.\tmV\tKonc\t"); Serial.print("NO2_A\t");
  myFile.print("temp.\tmV\tKonc\t"); myFile.print("NO2\t");
  //============================================================

  //==============================PM============================
  pmsSerial.begin(9600);
  //koncentracije za standardne uvjete
  Serial.print("PM 1.0S"); Serial.print("\tPM 2.5S");
  Serial.print("\tPM 10S");
  //koncentracije za stvarne uvjete
  Serial.print("\tPM 1.0"); Serial.print("\tPM 2.5");
  Serial.print("\tPM 10");
  //brojanje čestica
  Serial.print("\tN>0.3:"); Serial.print("\tN>0.5");
  Serial.print("\tN>1.0");  Serial.print("\tN>2.5"); Serial.print("\tN>5.0");
  Serial.println("\tN>10.0");

  //myFile.println("Concentration Units (standard)");
  myFile.print("PM 1.0S"); myFile.print("\tPM 2.5S"); myFile.print("\tPM
10S");
  //myFile.println("Concentration Units (environmental)");
  myFile.print("\tPM 1.0"); myFile.print("\tPM 2.5"); myFile.print("\tPM 10");
  //Particles count
  myFile.print("\tN>0.3:"); myFile.print("\tN>0.5"); myFile.print("\tN>1.0");
  myFile.print("\tN>2.5"); myFile.print("\tN>5.0");
  myFile.println("\tN>10.0");
```

```
  myFile.close();
  start_millis = millis();
}

struct pms5003data {
  uint16_t framelen;
  uint16_t pm10_standard, pm25_standard, pm100_standard;
  uint16_t pm10_env, pm25_env, pm100_env;
  uint16_t particles_03um, particles_05um, particles_10um, particles_25um,
particles_50um, particles_100um;
  uint16_t unused;
  uint16_t checksum;
};
struct pms5003data data;
//===============================================================


void loop() {

  /*varijable s dodatkom "_ukupno" služe za zbrajanje izmjerenih vrijednosti
radi usrednjavanja */

  //============================NO2================================
  //temp1 = sensor1.getTemp(1, "C");;
  Vgas = sensor1.getVgas(1);
  Concentr = sensor1.getConc(1, temp1);
  sensorValue = analogRead(sensorPin);
  temp1_ukupno += temp1;
  Vgas_ukupno += Vgas;
  Conc_ukupno += Concentr;
  sensorValue_ukupno += sensorValue;
  //===============================================================

  //=========================PM=================================
  /* izvršavanje prazne petlje sve dok je čitanje podataka PMS5003
    senzora neuspješno */
  while (! readPMSdata(&pmsSerial)) {}
```

```
  pm10_S_ukupno += data.pm10_standard;
  pm25_S_ukupno += data.pm25_standard;
  pm100_S_ukupno += data.pm100_standard;
  pm10_env_ukupno += data.pm10_env;
  pm25_env_ukupno += data.pm25_env;
  pm100_env_ukupno += data.pm100_env;
  particles_03um_ukupno += data.particles_03um;
  particles_05um_ukupno += data.particles_05um;
  particles_10um_ukupno += data.particles_10um;
  particles_25um_ukupno += data.particles_25um;
  particles_50um_ukupno += data.particles_50um;
  particles_100um_ukupno += data.particles_100um;
  //============================================================
  brojanje++;
  if (millis() - start_millis >= interval)
  {
    start_millis = millis();
    myFile = SD.open("mjerenje.txt", FILE_WRITE);
    if (myFile) {
      //ispisivanje prosječnih vrijednosti na microSD karticu
      Serial.print(temp1); Serial.print("\t");
      Serial.print(Vgas_ukupno / brojanje); Serial.print("\t");
      Serial.print(Conc_ukupno / brojanje); Serial.print("\t");
      Serial.print(sensorValue_ukupno / brojanje); Serial.print("\t");

      Serial.print(pm10_S_ukupno / brojanje); Serial.print("\t");
      Serial.print(pm25_S_ukupno / brojanje); Serial.print("\t");
      Serial.print(pm100_S_ukupno / brojanje); Serial.print("\t");
      Serial.print(pm10_env_ukupno / brojanje); Serial.print("\t");
      Serial.print(pm25_env_ukupno / brojanje); Serial.print("\t");
      Serial.print(pm100_env_ukupno / brojanje); Serial.print("\t");
      Serial.print(particles_03um_ukupno / brojanje); Serial.print("\t");
      Serial.print(particles_05um_ukupno / brojanje); Serial.print("\t");
      Serial.print(particles_10um_ukupno / brojanje); Serial.print("\t");
      Serial.print(particles_25um_ukupno / brojanje); Serial.print("\t");
      Serial.print(particles_50um_ukupno / brojanje); Serial.print("\t");
      Serial.print(particles_100um_ukupno / brojanje); Serial.println("\t");
```

```
myFile.print(temp1); myFile.print("\t");
myFile.print(Vgas_ukupno / brojanje); myFile.print("\t");
myFile.print(Conc_ukupno / brojanje); myFile.print("\t");
myFile.print(sensorValue_ukupno / brojanje); myFile.print("\t");

myFile.print(pm10_S_ukupno / brojanje); myFile.print("\t");
myFile.print(pm25_S_ukupno / brojanje); myFile.print("\t");
myFile.print(pm100_S_ukupno / brojanje); myFile.print("\t");
myFile.print(pm10_env_ukupno / brojanje); myFile.print("\t");
myFile.print(pm25_env_ukupno / brojanje); myFile.print("\t");
myFile.print(pm100_env_ukupno / brojanje); myFile.print("\t");
myFile.print(particles_03um_ukupno / brojanje); myFile.print("\t");
myFile.print(particles_05um_ukupno / brojanje); myFile.print("\t");
myFile.print(particles_10um_ukupno / brojanje); myFile.print("\t");
myFile.print(particles_25um_ukupno / brojanje); myFile.print("\t");
myFile.print(particles_50um_ukupno / brojanje); myFile.print("\t");
myFile.print(particles_100um_ukupno / brojanje);
myFile.println("\t");
myFile.close();

//varijable za zbrajanje se vraćaju na početnu vrijednost
Vgas_ukupno  = 0;
Conc_ukupno  = 0;
sensorValue_ukupno = 0;
pm10_S_ukupno = 0;
pm25_S_ukupno = 0;
pm100_S_ukupno = 0;
pm10_env_ukupno = 0;
pm25_env_ukupno = 0;
pm100_env_ukupno = 0;
particles_03um_ukupno = 0;
particles_05um_ukupno = 0;
particles_10um_ukupno = 0;
particles_25um_ukupno = 0;
particles_50um_ukupno = 0;
particles_100um_ukupno = 0;
```

```
      brojanje = 0;

    } else {
      // ako datoteka nije otvorena, ispiši grešku
      Serial.println("error opening mjerenje.txt");
    }
  }
}

boolean readPMSdata(Stream *s) {
  if (! s->available()) {
    return false;
  }
  // čitanje bajta po bajta dok se ne dođe do početnog bajta '0x42'
  if (s->peek() != 0x42) {
    s->read();
    return false;
  }

  // Now read all 32 bytes
  if (s->available() < 32) {
    return false;
  }

  uint8_t buffer[32];
  uint16_t sum = 0;
  s->readBytes(buffer, 32);

  // provjera ispravnosti podataka
  for (uint8_t i = 0; i < 30; i++) {
    sum += buffer[i];
  }

  /*   debugging
      for (uint8_t i=0; i<32; i++) {
      Serial.print("0x"); Serial.print(buffer[i], HEX);
      Serial.print(", ");
```

```
      }
      Serial.println();
  */

  uint16_t buffer_u16[15];
  for (uint8_t i = 0; i < 15; i++) {
    buffer_u16[i] = buffer[2 + i * 2 + 1];
    buffer_u16[i] += (buffer[2 + i * 2] << 8);
  }

  // strukturiranje podataka
  memcpy((void *)&data, (void *)buffer_u16, 30);

  if (sum != data.checksum) {
    return false;
  }
  return true;
}
```

B. Datoteka zaglavlja *ULP.h*

```
#ifndef ULP_h
#define ULP_h

#include "Arduino.h"

class ULP {
    //  static float _Vsup;
    //static float _Vcc;
  private:
    const int _CPin, _TPin;
    float _Sf;
    float _Htemp, _Ltemp;
    float _Hvolt, _Lvolt;
    float _Tb, _Ts;

  public:
    static float _Vcc;
    static float _Vsup;
    float _Voff;
    float _Vref;
    float _Tc;
    float _Ah;
    float _Al;

    float _Tz = 0;
    long int _Gain;     //otpor transimpedancijskog pojačala (TIA)

    ULP (int a, int b, float c);
    int getTemp(int n, const char* U = "C");
    float getConc(int n, float t = 20);

    float setVref (long R1, long R2, long R3, int bias);

    float zero();
```

```
    float getVgas(int n);

    float setXSpan();

    void setTSpan(float t, String R);
};

class NO2: public ULP {
  public:
    NO2(int a, int b, float c);
};

#endif
```

C. Izvorni kôd *ULP.cpp*

```
#include "Arduino.h"
#include "ULP.h"

//#define DEBUG
#ifdef DEBUG
#define DEBUG_PRINT(x)     Serial.print (x)
#else
#define DEBUG_PRINT(x)
#endif

ULP::ULP (int a, int b, float c) : _CPin(a), _TPin(b), _Sf(c) {
  _Htemp = 40.0;
  _Ltemp = 20.0;
  _Tb = 18.0;
  _Ts = 87.0;
  _Tz = 0.0;   //  temperatura pri nultoj vrijednosti napona
  _Hvolt = (_Htemp + _Tb) * _Vsup / _Ts;
  _Lvolt = (_Ltemp + _Tb) * _Vsup / _Ts;
}

float ULP::_Vcc = 5.0;
ULP::_Vsup = 3.3;

int  ULP::getTemp(int n, const char* U) {
  unsigned long etime, i = 0;
  unsigned long AC = 0;
  float temp;
  etime = millis() + n * 1000;

  do {
    AC = AC + analogRead(_TPin);
    delay(1);
    i++;
```

```
  } while (millis() < etime);

  DEBUG_PRINT(AC);
  DEBUG_PRINT(", ");

  float Cnts = float (AC) / float(i);
  float Volts = Cnts * _Vcc / 1024.0;

  temp = (_Ts / _Vsup) * Volts - _Tb;

  if (U == "F") {
    return temp * 9 / 5 + 32;
  }
  else if ( U == "C") {
    return temp;
  }
  else return 0;
}

void ULP::setTSpan(float t, String R) {
  Serial.print(F("Old temp. span and offset: "));
  Serial.print(_Ts);
  Serial.print(F(", "));
  Serial.println(_Tb);
  unsigned long etime, i = 0, n = 10;
  unsigned long AC = 0;
  etime = millis() + n * 1000;
  do {
    AC = AC + analogRead(_TPin);
    delay(1);
    i++;
  } while (millis() < etime);
  float Cnts = float (AC) / float(i);
  float Volts = Cnts * _Vcc / 1024;

  if (R == "HIGH") {
    _Htemp = t;
```

```
    _Hvolt = Volts;
  }
  else if (R == "LOW") {
    _Ltemp = t;
    _Lvolt = Volts;
  }
  _Ts = _Vsup * (_Htemp - _Ltemp) / (_Hvolt - _Lvolt);
  _Tb = _Lvolt * (_Htemp - _Ltemp) / (_Hvolt - _Lvolt) - _Ltemp;
  Serial.print(F("New temp. span and offset: "));
  Serial.print(_Ts);
  Serial.print(F(", "));
  Serial.println(_Tb);
}

float  ULP::setVref (long R1, long R2, long R3, int bias) {
  if (bias > 0) {
    _Vref = _Vsup * float(R1 + R2) / float(R1 + R2 + R3) * 1000.0;
  }
  else if (bias < 0) {
    _Vref = _Vsup * float(R1) / float(R1 + R2 + R3) * 1000.0;
  }
  else return 0;

  return _Vref;
}

float  ULP::zero() { //funkcija za određivanje nultog napona
  unsigned long etime, i = 0, n = 10;
  unsigned long AC = 0;
  etime = millis() + n * 1000;
  do {
    AC = AC + analogRead(_CPin);
    delay(1);
    i++;
  } while (millis() < etime);
  float Cnts = float (AC) / float(i);
```

```
  float Vgas = Cnts * _Vcc * 1000.0 / 1024.0; // [mV]
  _Voff = Vgas - _Vref;
  //_Tz = getTemp(10); //dohvaćanje temperature pri vrijednosti nultog napona
  return _Voff;
} //funkcija vraća napon nulte koncentracije mjerenog plina

float ULP::getVgas(int n) // funkcija vraća vrijednost napona koristeći n
sekundi za usrednjavanje vrijednosti
{
  unsigned long etime, i = 0;
  unsigned long AC = 0;
  etime = millis() + n * 1000;
  do {
    AC = AC + analogRead(_CPin);
    delay(1);
    i++;
  } while (millis() < etime);
  float Cnts = float (AC) / float(i);

  float Vgas = Cnts * _Vcc * 1000.0 / 1024.0; //in mV

  return Vgas;
}

// funkcija vraća koncentraciju plina koristeći n sekundi za usrednjavanje
vrijednosti i temperaturu t za kompenzaciju vrijednosti
float  ULP::getConc(int n, float t) {

  float nA = (getVgas(n) - _Vref - _Voff) / 1000.0 / float(_Gain) *
1000000000.0;
  DEBUG_PRINT(nA);
  DEBUG_PRINT(", ");
  if (t > 23) {
    nA = nA - _Ah * (t - _Tz);
  }
  else {
    nA = nA - _Al * (t - _Tz);
```

```
  }

  float Conc = nA / _Sf * (1 - _Tc * (t - _Tz));

  return Conc;
}

float ULP::setXSpan() {
  Serial.setTimeout(10000);
  float X;
  float nA, Sf;
  Serial.print(F("When gas concentration steady, enter Concentration in ppm
followed by 'cr' = "));
  while (Serial.available() <= 0) {}
  X = Serial.parseFloat();
  Serial.println(X);
  nA = (getVgas(30) - _Vref - _Voff) / 1000.0 / _Gain * 1000000000;
  Sf = nA / X;
  if (abs(Sf - _Sf) * 2 / (Sf + _Sf) < .1) {
    _Sf = Sf;
  }
  else {
    Serial.println(F("Error Setting Span"));
  }
  return _Sf;

}

NO2::NO2(int a, int b, float c) : ULP(a, b, c) {
  setVref(1000000, 143000, 1000000, -1);
  _Gain = 499000;
  _Tc = 0.02;
  _Ah = 0.02;
  _Al = 0.01;
}
```