Analiza onečišćenja čestičnim tvarima u urbanim područjima Republike Hrvatske

Habulan, Martina

Master's thesis / Diplomski rad

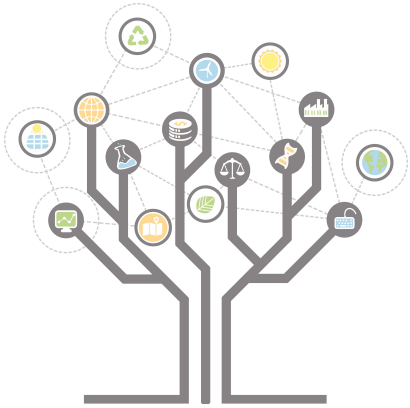
2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:669990

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**



Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

MARTINA HABULAN

ANALIZA ONEČIŠĆENJA ČESTIČNIM TVARIMA U URBANIM PODRUČJIMA REPUBLIKE HRVATSKE

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2020.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva za
16.04.2020. u _____ sati.

Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred ispitnim povjerenstvom u Varaždinu.

Varaždin, _____.

Predsjednik ispitnog
povjerenstva:
Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović

Članovi povjerenstva

1) Izv. prof. dr. sc. Nikola Sakač _____
2) Izv. prof. dr. sc. Anita Ptiček Siročić _____
3) Izv. prof. dr. sc. Ivan Kovač _____
4) _____ _____

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

ANALIZA ONEČIŠĆENJA ČESTIČNIM TVARIMA U URBANIM PODRUČJIMA REPUBLIKE HRVATSKE

KANDIDAT: **MENTOR:**

MARTINA HABULAN **izv.prof.dr.sc. NIKOLA SAKAČ**

VARAŽDIN, 2020.

Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnica: MARTINA HABULAN

Matični broj: 231 - 2018./2019.

Smjer: UPRAVLJANJE OKOLIŠEM

NASLOV DIPLOMSKOG RADA:

ANALIZA ONEČIŠĆENJA ČESTIČNIM TVARIMA U URBANIM PODRUČJIMA REPUBLIKE HRVATSKE

Rad treba sadržati:
1. Uvod
2. Literaturni pregled
3. Eksperimentalni dio
4. Rezultati mjerenja i rasprava
5. Zaključak
6. Literatura
7. Popis slika
8. Popis tablica

Pristupnica je dužna predati mentoru jedan uvezen primjerak diplomskog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade diplomskog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 16.03.2020. Rok predaje: 02.07.2020.

Mentor: Izv.prof.dr.sc. Nikola Sakač

REPUBLIKA HRVATSKA 1 VARAŽDIN GEOTEHNIČKI FAKULTET SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

Predsjednik Odbora za nastavu: Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

ANALIZA ONEČIŠĆENJA ČESTIČNIM TVARIMA U URBANIM PODRUČJIMA REPUBLIKE HRVATSKE

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom izv.prof.dr.sc. Nikole Sakača.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 26.06.2020.

HARTINA HABULAN
(Ime i prezime)

Habulan
(Vlastoručni potpis)

IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI ZAVRŠNOG RADA S VEĆ OBJAVLJENIM RADOVIMA

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

ANALIZA ONEČIŠĆENJA ČESTIČNIM TVARIMA U URBANIM PODRUČJIMA REPUBLIKE HRVATSKE

pregledan anti-plagijat programskim paketom PlagScan te da postotak sličnosti cjelovitog završnog rada, s već objavljenim radovima, ne prelazi 20%, kao i da pojedinačni postotak sličnosti završnog rada sa svakom literaturnom referencom pojedinačno ne prelazi 5%.

U Varaždinu, 26.06.2020.

NIKOLA BAKAČ
(Mentor)

(Vlastoručni potpis)

Zahvala

Zahvaljujem se mentoru, izv.prof.dr.sc Nikoli Sakaču na pruženoj pomoći, savjetima, strpljenju i vodstvu pri izradi ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem se i kolegama iz Državnog hidrometeorološkog zavoda na ustupljenim podacima i stručnim savjetima.

Na posljetku, zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima na podršci iskazanoj tijekom studiranja.

SAŽETAK:

Lebdeće čestice (PM) obuhvaćaju mješavinu kemijskih spojeva i čestica vode koje se nalaze u zraku. Većinom su heterogenog kemijskog sastava, a u okoliš dospijevaju iz različitih izvora, u različitim veličinama i oblicima (u obliku prašine, pepela, čađe, dima, čestica minerala, silikata). Osim industrijskih objekata, značajan utjecaj u emisiji lebdećih čestica imaju pokretni izvori onečišćenja (promet). Prema veličini, dijele se na dvije skupine: PM10 i PM2,5. Veličina lebdećih čestica izravno je povezana s negativnim utjecajem na ljudsko zdravlje i okoliš. Djeca su posebno osjetljiva na učinke onečišćenja zraka jer dišu brže od odraslih i tako apsorbiraju više onečišćenja. Prema istraživanjima Svjetske zdravstvene organizacije u Europskoj Uniju svake se godine dogodi oko 100 000 prijevremenih smrti odraslih osoba uslijed onečišćenju zraka (emisije iz cestovnog prometa predstavljaju značajni udio).

Nekoliko je metoda kojima se mjeri prisutnost lebdećih čestica, a baziraju se na gravimetriji, oscilirajućoj kristalnoj mikrovagi, na raspršenju laserskog svjetla i na upijanju β-zračenja.

U ovom radu napravljena je analiza onečišćenja PM u urbanim područjima Hrvatske. Podaci o koncentracijama PM10 i PM2,5 preuzeti su iz mjernih postaja u Zagrebu, Slavonskom Brodu, Osijeku, Rijeci i Dubrovniku. Analizirani su: dnevni hod koncentracija PM2,5 i PM10, srednje vrijednosti dnevnih koncentracija PM2,5 i PM10 i prosječne dnevne koncentracije PM2,5 i PM10, tijekom godišnjih doba za razdoblja od 2017. do 2019. godine. Na većini mjernih postaja maksimalne koncentracije zabilježene su tijekom jeseni i zime što se može objasniti intenzivnim korištenjem fosilnih goriva i prometu. Povećanja koncentracija PM tijekom ljetnih mjeseci na mjerim postajama u Rijeci i Dubrovniku može se povezati sa intenzivnim dolaskom turista za vrijeme turističke sezone avionskim prijevozom.

KLJUČNE RIJEČI: Lebdeće čestice, urbana područja, onečišćenje zraka

SUMMARY

Particulate matter (PM) comprises a mixture of chemical compounds and water particles found in air. They mostly have heterogeneous chemical composition and reach the environment from different sources, in different sizes and shapes (in the form of dust, ash, soot, smoke, mineral particles, silicates). In addition to industrial facilities, mobile sources of pollution (traffic) have a significant impact on the emission of suspended particles. According to size, they are divided into two groups: PM10 and PM2.5. The size of suspended particles is directly related to the negative impact on human health and the environment. Children are particularly sensitive to the effects of air pollution because they breathe faster than adults and thus absorb more pollution. According to a research study conducted by the World Health Organization, every year about 100,000 premature deaths of adults occur in the European Union due to air pollution (emissions from road traffic represent a significant share).

There are several methods for measuring the presence of suspended particles, such as gravimetry, oscillating crystal microbalance, laser light scattering and β-radiation absorption.

The paper presents an analysis of particulate matter pollution in urban areas of the Republic of Croatia. Data on PM10 and PM2.5 concentrations were taken from measuring stations in Zagreb, Slavonski Brod, Osijek, Rijeka and Dubrovnik. The following parametres were analyzed: daily course of PM2.5 and PM10 concentrations, mean values of daily PM2.5 and PM10 concentrations and average daily PM2.5 and PM10 concentrations, during four seasons for the periods from 2017 to 2019. At most measuring stations, maximum concentrations were recorded during autumn and winter, which can be explained by the intensive use of fossil fuels and traffic. Increases in PM concentrations during the summer months at measuring stations in Rijeka and Dubrovnik may be associated with the intensive arrival of tourists by air during the tourist season.

KEY WORDS: Particulate matter, urban areas, air pollution

SADRŽAJ:

1. UVOD 1

2. LITERATURNI PREGLED 2

2.1. Onečišćenje zraka 2

2.2. Lebdeće čestice PM 10 i PM 2.5 4

2.2.1. Utjecaj lebdećih čestica (PM) na ljudsko zdravlje 6

2.2.2. Utjecaj lebdećih čestica (PM) na ekosustav 10

2.3. Meteorološki utjecaji 11

2.4. Metode određivanja lebdećih čestica 11

2.4.1. Gravimetrijska metoda 12

2.4.2. Oscilirajuća mikrovaga 13

2.4.3. Metoda upijanja β-zračenja 15

2.4.4. Metoda raspršenja laserskog svjetla 17

2.5. Zakonodavstvo u HR i svijetu 19

3. EKSPERIMENTALNI DIO 20

3.1. Opis mjernih lokacija 21

3.1.1. Mjerne postaje Zagreb 21

3.1.2. Mjerna postaja Osijek 22

3.1.3. Mjerne postaje Slavonski Brod 23

3.1.4. Mjerna postaja Rijeka 25

3.1.5. Mjerna postaja Dubrovnik 26

3.2. Mjerni uređaji 26

3.2.1. Mjerni uređaj Thermo Andersen ESM FH 62 I-R 27

3.2.2. Mjerni uređaj Horiba model APDA 371 29

3.2.3. Mjerni uređaj LECKEL - LVS 3 30

3.2.4. Mjerni uređaj Derenda PNS 16T3.1 31

3.2.5. Mjerni uređaj Leckel SEQ47/50 31

4. REZULTATI MJERENJA I RASPRAVA 32

4.1. Koncentracija lebdećih čestica PM2,5 na mjernoj postaji Zagreb PPI PM2,5 – Ksaverska cesta i koncentracija lebdećih čestica PM10 na mjernoj postaji Zagreb-1 33

4.2. Koncentracija lebdećih čestica PM10 na mjernoj postaji Osijek 38

4.3. Koncentracija lebdećih čestica PM2,5 na mjernoj postaji Slavonski Brod-1 i koncentracija lebdećih čestica PM10 na mjernoj postaji Slavonski Brod-2 41

4.4. Koncentracija lebdećih čestica PM2,5 i PM10 na mjernoj postaji Rijeka-2 47

4.5. Koncentracija lebdećih čestica PM2,5 i PM10 na mjernoj postaji Zračna luka Dubrovnik . 52

5. ZAKLJUČAK 59

6. LITERATURA 60

7. POPIS SLIKA 64

8. POPIS TABLICA 67

1. UVOD

Jedan od najvećih globalnih problema današnjice je onečišćenje zraka, svojim brojnim negativnim posljedicama šteti ljudskom zdravlju i ekosustavu. Prema podacima Svjetske zdravstvene organizacije (WHO) onečišćenje zraka se klasificira kao najveći ekološki rizik za zdravlje ljudi na području Europe [1].

Lebdeće čestice su jedne od brojnih onečišćujućih tvari koje pospješuju smanjenje kvalitete zraka. U svom nehomogenom sastavu mogu sadržavati brojne toksične tvari i spojeve. Dijele se prema veličini na dvije skupine, a to su PM10 i PM2,5. U nastavku će se spomenuti više o lebdećim česticama, njihovom nastajanju, izvorima, te negativnim utjecajima na ljudsko zdravlje i ekosustav.

Cilj rada je bio analizirati koncentracije lebdećih čestica PM10 i PM2,5 u urbanim područjima Republike Hrvatske Zagrebu, Slavonskom Brodu, Osijeku, Rijeci i Dubrovniku te uočiti razlike u vrijednostima koncentracija tijekom promatranog vremena.

2. LITERATURNI PREGLED

2.1. Onečišćenje zraka

Onečišćenje zraka predstavlja prisutnost jedne ili više tvari u zraku kao što su aerosoli (prašina, dim, magla) plinovi i pare koje svojim značajkama i koncentracijama mogu štetno utjecati na život i zdravlje ljudi i/ili životinja odnosno mogu imati štetan utjecaj na okoliš, na osjećaj udobnosti čovjeka te mogu oštetiti predmete koji mu služe [2]. Prema zakonu o zaštiti zraka: "Onečišćenim zrakom se smatra zrak čija je kvaliteta takva da može narušiti zdravlje, kvalitetu življenja i/ili štetno utjecati na bilo koju sastavnicu okoliša" [3].

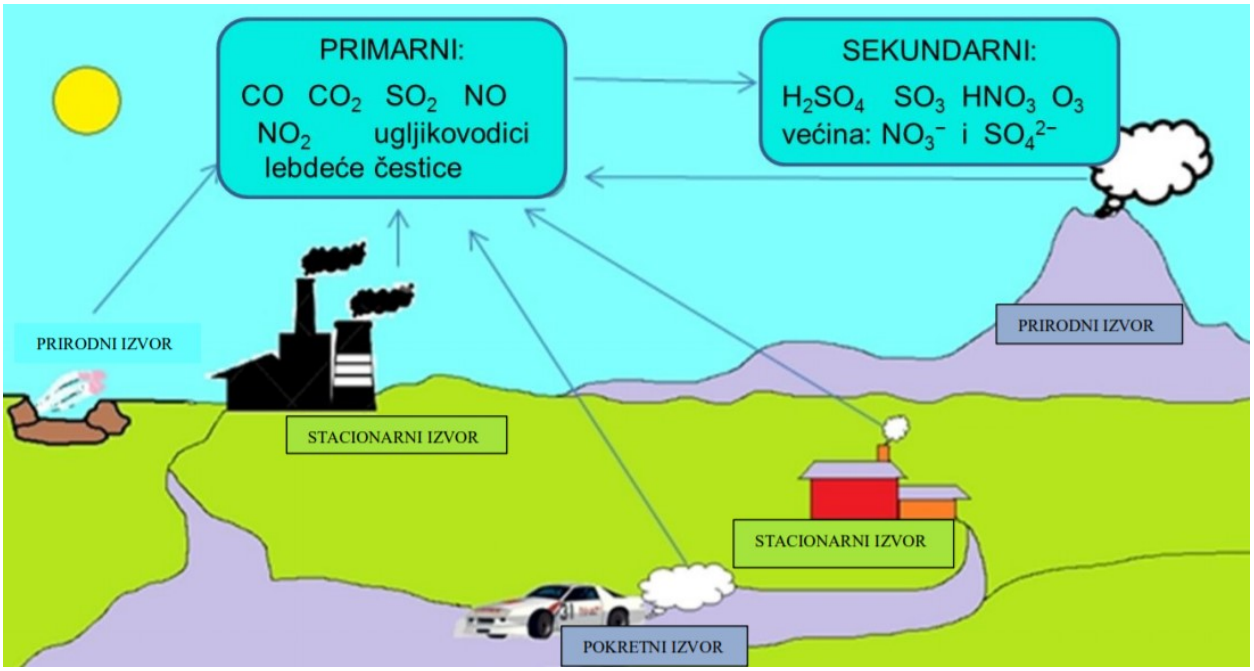
Tvari koje onečišćuju zrak nisu samo posljedica ljudske djelatnosti, već mogu biti i prirodnog porijekla, pa se razlikuju prirodni izvori onečišćenja i antropogeni izvori onečišćenja. U prirodne izvore onečišćenja se ubrajaju različiti procesi anaerobne mikrobiološke razgradnje tla, vulkanske erupcije, atmosferska električna izbijanja, sagorijevanja biomase (šumski požari) te isparavanje sa površine mora i oceana. Prirodnim procesima u velikom obujmu mogu nastati mnogi štetni spojevi kao što su CO_2, CH_4 i N_2O, ali postoje i prirodni mehanizmi kojima se uklanjaju iz atmosfere. Glavni antropogeni izvori onečišćenja zraka su uglavnom procesi izgaranja fosilnih goriva pri proizvodnji toplinske, električne ili nekog drugog oblika energije, procesi izgaranja goriva u motornim vozilima te različita industrijska postrojenja. Procesi izgaranja definiraju se kao oksidacija ugljikovih spojeva koji se nalaze u gorivu sa kisikom iz zraka. Glavni produkti izgaranja su CO_2 i H_2O, a u uvjetima nepotpuno izgaranja nastaju različiti međuprodukti kao što su ugljikov monoksid, alkoholi, aldehidi, dioksini i aromatski spojevi. Fosilna goriva većinom sadrže heteroatome (S, N) te njihovim izgaranjem nastaju produkti kao što su sumporni oksidi, uglavnom SO_2, dušikovi oksidi (NO_x) koji se pretežno sastoje od NO (90-95 %) te od neznatnih količina didušikovog oksida i N_2O. Ukupna količina produkata koji nastaju izgaranjem ovisi o uvjetima pri kojima se samo izgaranje provodi te o sastavu i vrsti goriva. Bitni izvori emisija u atmosferu dolaze i iz različitih industrijskih procesa kao što su rafinerijska i petrokemijska prerada, keramička i staklarska industrija, proizvodnja cementa, mineralnih gnojiva, proizvodnja željeza, čelika i čađe. Neželjeni produkti koji nastaju kod različitih rafinerijskih postrojenja su većinom emisije hlapljivih organskih spojeva (VOC), H_2S, CO_2, SO_x te NO_x. Pri proizvodnji mineralnih gnojiva u većim količinama emitiraju se amonijak i N_2O, pri proizvodnji čađe H_2S i CO.

Izvori onečišćujućih tvari u zraku se dijele na nepokretne i pokretne izvore onečišćenja. Pokretni ili mobilni izvori onečišćenja su uglavnom prijevozna sredstva (motorna vozila, lokomotive, plovni objekti, zrakoplovi) koja ispuštaju onečišćenja u okoliš tijekom izgaranja pogonskog goriva. Nepokretni ili stacionarni izvori odnose se na različita postrojenja, tehnološke procese, različite industrijske pogone i uređaje, građevine i površine iz kojih se onečišćujuće tvari ispuštaju u atmosferu te se dijele na točkaste, površinske i difuzne. Točkasti izvori onečišćenja najčešće se ispuštaju u velikim količinama iz različitih industrijskih i tehnoloških postrojenja kroz posebno oblikovane ispuste (dimnjaci). Emisija iz točkastog izvora obično se iskazuje emisijskim veličinama, kao što su maseni protoci i/ili masene koncentracije te emisijskim faktorima. Izvori koji emitiraju male količine onečišćenja nazivaju se površinski izvori, a onečišćivala koja dospijevaju u atmosferu bez određenog ispusta nazivaju se difuznim izvorima.

Bez obzira da li su izvori onečišćenja zraka pokretni ili nepokretni, onečišćujuće tvari se mogu podijeliti prema agregatnom stanju na dvije glavne skupine, a to su suspendirane čvrste čestice ili aerosoli koji obuhvaćaju lebdeće čestice, dimove i suspendirane čestice u kapljevinama te na plinove i pare. Aerosoli označavaju sustave sa dvije faze, od kojih je glavna faza plinovita, a u njoj može biti dispergirana kruta ili kapljevita faza. Lebdeće čestice predstavljaju krute čestice različitog porijekla i veličine, a njihova osnovna karakteristika je da se u dugom vremenskom razdoblju mogu održati u struji ispušnih ili dimnih plinova jer su premale da bi imale značajnu brzinu taloženja. Krute čestice se pojavljuju u obliku prašine, pepela i dima. Plin se očituje kao plinovita faza tvari koja može istovremeno biti u plinovitom ili kapljevitom stanju. Bitno je znati da plin i para nisu istoznačnice, ponašanje plina može se precizno predvidjeti primjenom zakona o idealnom plinu, dok pare pokazuju izuzetno odstupanje od navedenog zakona. Plinovitim onečišćivalima zraka smatraju se SO_2, NO, NO_2 i CO, dok hlapljive organske spojeve (VOC) ubrajamo u pare (izuzetak su metan, etan, etilen i drugi hlapljivi organski spojevi s niskim vrelištem).

Osim prema agregatnom stanju onečišćujuće tvari mogu se podijeliti na primarne i sekundarne onečišćujuće tvari, slika 1. Primarne onečišćujuće tvari se izravno emitiraju u okoliš iz različitih izvora. U primarna onečišćivala ubrajaju se spojevi sumpora (uglavnom SO_2), dušikove okside (NO_x; x= 1 ili 2) i ostale dušikove spojeve (kao što su N_2O, NH_3, HCN), ugljikove spojeve (CO i CO_2), hlapljive organske spojeve (VOC), čestice olova, halogenih metala i teških metala i lebdeće

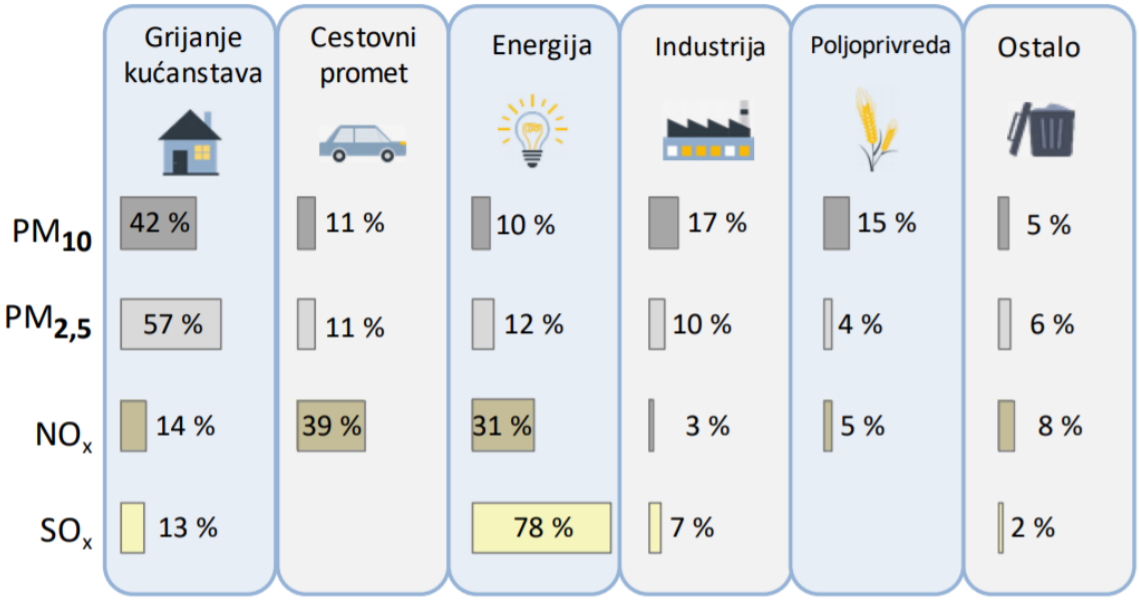
čestice ukoliko se nalaze u obliku u kojem su i emitirane, a ako to nije slučaj govori se o sekundarnim česticama. Međudjelovanjem primarnih onečišćenja u nižim slojevima atmosfere pod utjecajem Sunčeve svjetlosti nastaju sekundarne onečišćujuće tvari kao npr. ozon, peroksiacil nitrat (PAN, $CH_3C(O)OONO_2$) [4].



Slika 1. Primarne i sekundarne onečišćujuće tvari

2.2. Lebdeće čestice PM 10 i PM 2.5

Izraz „lebdeće čestice“ (PM) označava mješavinu kemijskih spojeva i čestica vode koje se nalaze u zraku. Većinom su heterogenog kemijskog sastava, a u okoliš dospijevaju iz različitih izvora, u različitim veličinama i oblicima (u obliku prašine, pepela, čađe, dima, čestica minerala, silikata). Mješavina su anorganskih i organskih tvari koje ponajviše potječu iz energetskih postrojenja te kao produkt izgaranja dizelskih goriva. Njihov kemijski i fizikalni sastav ovisi o lokaciji, godišnjem dobu i vremenskim uvjetima. Promet, grijanje stambenih zgrada i različite industrije su uglavnom najveći izvori lebdećih čestica, slika 2 [2].



Slika 2. Izvori onečišćujućih tvari u zraku

Lebdeće čestice mogu biti primarne, odnosno izravno emitirane iz nekog izvora u atmosferu i sekundarne, odnosno čestice koje su iz prekursora formirane u atmosferu. Hlapivi organski spojevi SO_2, NO_x i NH_3 su glavni plinoviti prekursori plinova za formiranje sekundarnih lebdećih čestica.

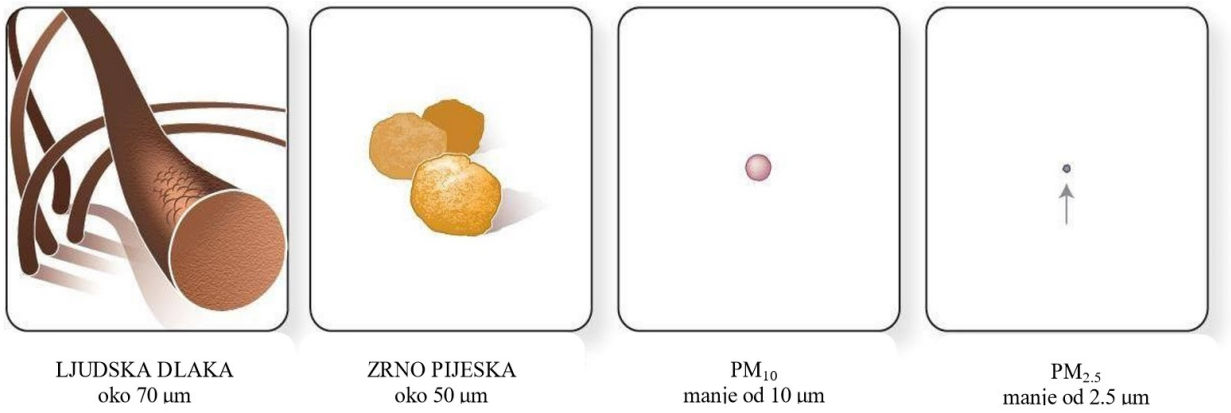
Iz prekursora, uglavnom fotokatalitičkim reakcijama u zraku, nastaju različiti spojevi u zraku poput amonijevih soli, nitrata ili fosfata, odnosno dolazi do formiranja novih čestica u zraku ili pak dolazi do kondenzacije vode i drugih spojeva na primarnim česticama tvoreći sekundarne u obliku anorganskih i organskih aerosola koji mogu biti kapljični i čvrsti [5].

Nakon emisije čestica u atmosferu postoje dva mehanizma uklanjanja čestica iz atmosfere, a to su vlažno taloženje i suho taloženje. Suhim taloženjem smatra se taloženje čestica na Zemljinu površinu, a vlažno taloženje je uklapanje u kapljice oblaka tijekom stvaranja oborina. Sastav i koncentracija čvrstih čestica na Zemljinoj površini vrlo je neujednačen zbog geografske raspodjele izvora čestica [6].

Veličina lebdećih čestica izravno je povezana sa utjecajem na ljudsko. Po veličini, dijele se na dvije skupine: PM10 i PM2,5.

Prema zakonu o zaštiti zraka: „PM10 je frakcija lebdećih čestica koja prolazi kroz ulaz sakupljača propisano normom HRN EN 12341 s 50 postotnom učinkovitošću odstranjivanja čestica aerodinamičkog promjera 10 µm“, a „PM2,5 je frakcija lebdećih čestica koja prolazi kroz ulaz sakupljača propisana normom EN 14907 s 50 postotnom učinkovitošću odstranjivanja čestica aerodinamičkog promjera 2,5 µm“ [3].

Čestice PM 10 su grube čestice dimenzija 2,5-10 µm, one su inhalibilne odnosno dišljive i mogu prodrijeti u pluća. Čestice PM 2,5 su fine čestice dimenzija < 2,5 µm, one su respirabilne i mogu prodrijeti duboko u pluća do alveola. Na slici 3. prikazana je usporedba veličina čestica PM10 i PM2,5 sa ljuskom dlakom i zrnom pijeska radi boljeg razmijevanja odnosa veličina čestica [4].



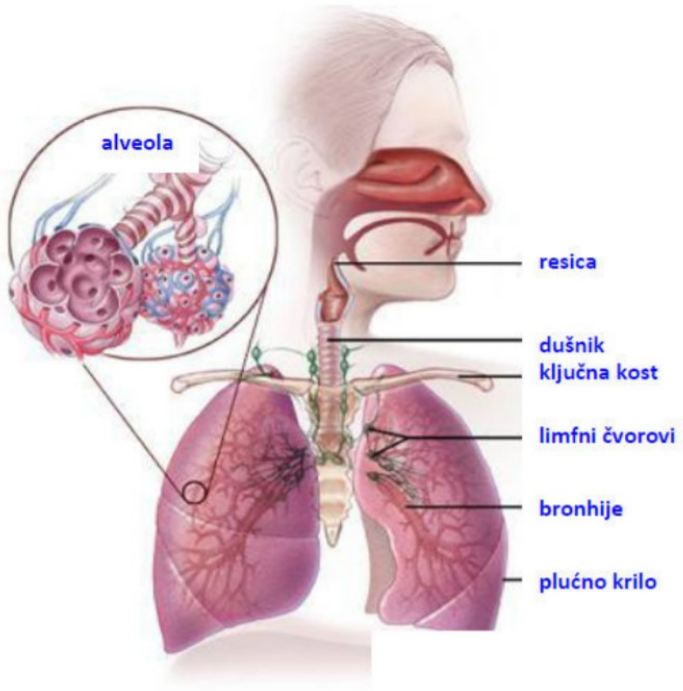
Slika 3. Usporedba veličina čestica PM 10 I PM 2,5 sa ljudskom dlakom i zrnom pijeska

Osim industrijskih objekata, značajan utjecaj u nastajanju lebdećih čestica imaju pokretni izvori onečišćenja (promet). U blizini velikih autocesta i gradilišta zabilježena je prisutnost grubih čestica (PM10), a prisutnost finih čestica PM 2,5 zabilježena je za vrijeme trajanja šumskih požara [6].

2.2.1. Utjecaj lebdećih čestica (PM) na ljudsko zdravlje

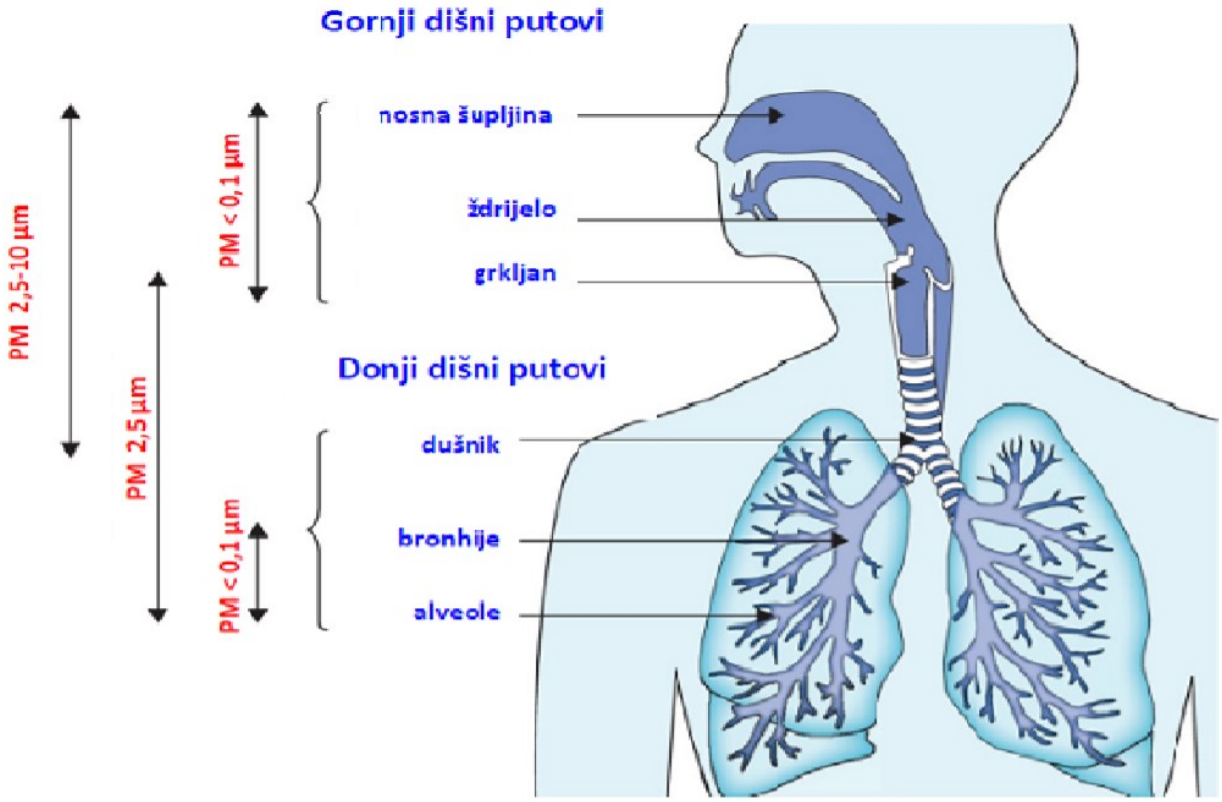
Negativni učinak lebdećih čestica na ljudsko zdravlje može biti različitog intenziteta i trajanja ovisno o obliku, veličini, agregatnom stanju, koncentraciji, vremenu izloženosti i fizikalno-kemijskim svojstvima lebdećih čestica. Dišni sustav kod čovjeka sastoji se od dišnih puteva koji

dovode zrak do pluća gdje se odvija izmjena plinova. Nosnom šupljinom započinje dišni sustav, a nastavlja se ždrijelom, grkljanom, dušnikom i plućima gdje završavaju malim vodovima u koje se otvaraju plućni mjehurići ili alveole. Dišni sustav čovjeka prikazan je na slici 4.



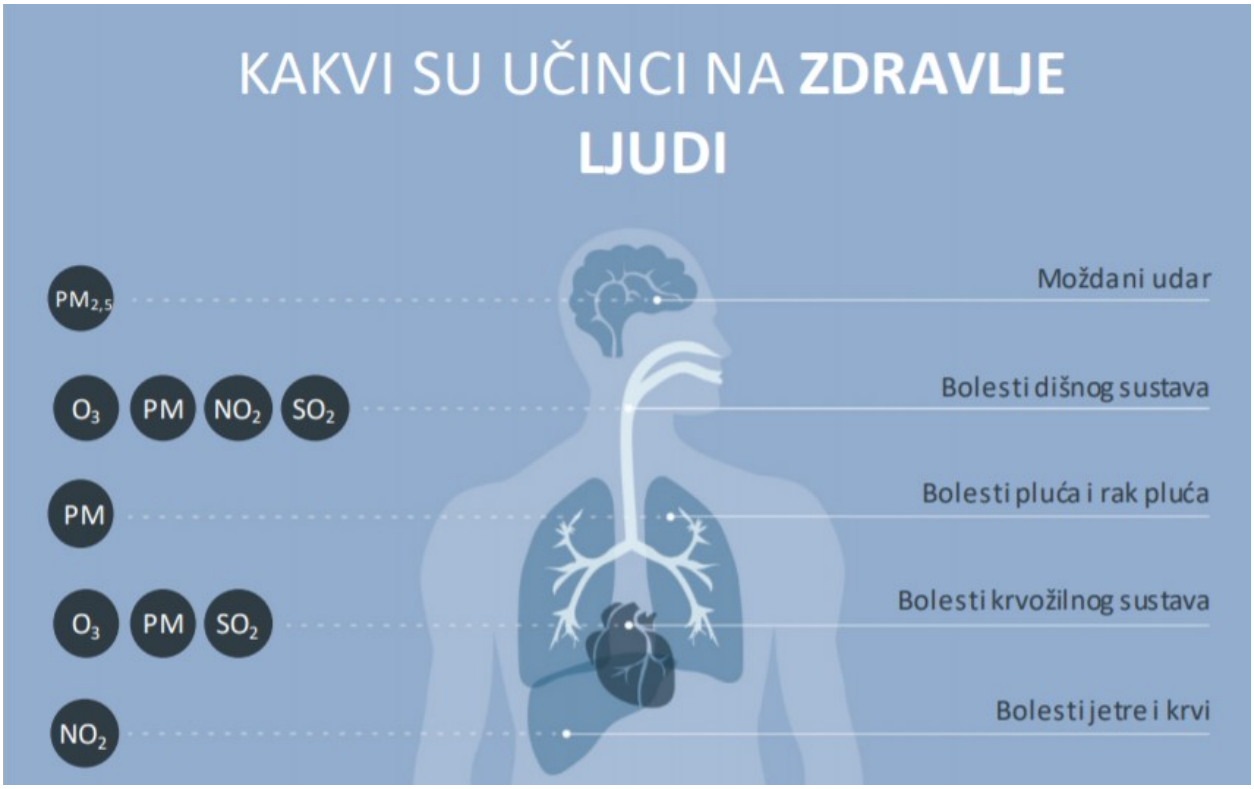
Slika 4. Shematski prikaz dišnog sustava čovjeka

Lebdeće čestice, kada dospiju u dišni sustav čovjeka većinom se zaustave na prvoj promjeni smjera, odnosno u nosu čovjeka. Kod promjene smjera kretanja čestica iz zraka se odlažu u sluznicama zbog inercije, to se naziva inpakcija. Veličina inpakcije ovisi o masi i dimenzijama lebdećih čestica. Na dlačicama i sluznicama gornjih dišnih puteva zaustavljaju se krupnije čestice (čestice promjera većih od 10μm, ali i PM10), dok one sitnije (PM2.5 i PM10) prolaze kroz gornji dio dišnih putova i talože na stjenkama bronhija, a one najsitnije su sposobne da prodru u donje dišne putove, odnosno u pluća sve do alveola, slika 5. Dubina prodiranja plinovitih onečišćujućih tvari ovisi o njihovoj topljivosti, što su one topljivije, to lakše prolaze kroz sluznicu i brže se resorbiraju u dišnom sustavu.



Slika 5. Raspored čestica prema veličini u dišnim putovima

Prema istraživanju Svjetske zdravstvene organizacije (WHO) zbog dugotrajne izloženosti finim česticama može doći do ateroskleroze, neželjenih ishoda trudnoće i bolesti dišnih putova kod djece [5]. Isto tako, istraživanje ukazuje na uzročno-posljedičnu vezu između PM2,5 i kardiovaskularnih odnosno smrti uzrokovanih bolestima dišnih putova. Prema podacima Svjetske zdravstvene organizacije sitne lebdeće čestice (PM2,5) skraćuju prosječno očekivano trajanje životne dobi u Europskoj uniji za više od osam mjeseci. Od posljedica onečišćenja zraka svake godine umre gotovo sedam milijuna ljudi, pri čemu se onečišćen zrak smatra odgovornim za bolesti dišnih putova, ali se i povezuje sa bolestima srca i rakom [5]. Utjecaj onečišćujućih tvari u zraku na ljudsko zdravlje prikazan je na slici 6.



Slika 6. Utjecaj onečišćujućih tvari u zraku na ljudsko zdravlje

Prema procjenama onečišćenje zraka na otvorenom uzrokuje 40 % ishemijskih bolesti srca, 40 % moždanih udara, 11 % kroničnih opstruktivnih bolesti pluća, 6 % slučajeva raka pluća, i 3 % slučajeva akutnih respiratornih infekcija kod djece, onečišćenje zraka u zatvorenim prostorima smatra se krivim za 34 % moždanih udara, 26 % ishemijskih bolesti srca, 22 % kroničnih opstruktivnih bolesti pluća, 12 % slučajeva akutnih respiratornih infekcija kod djece i oko 6 % slučajeva raka pluća [5]. Posebni učinci plinovitih onečišćujućih tvari u zraku na zdravlje ljudi uglavnom se manifestiraju kao iritacija sluznice dišnih putova. Pri kratkom vremenu izloženosti ili pri nižim koncentracijama negativni učinci na zdravlje manifestiraju se u obliku nadražajnog djelovanja na sluznicu dišnih putova i očiju, pa se kao posljedica javlja upala očne spojnice i izrazito suzenje očiju, nadražaj nosa i grla, kašalj, stezanje u prsištu, otežano disanje te mnoge druge negativne posljedice [5].

Prema najnovijem istraživanju Svjetske zdravstvene organizacije (WHO) najugroženija dobna skupina na koju onečišćenje zraka ima velike negativne posljedice su djeca [7]. Jedan od razloga zašto su baš djeca posebno osjetljiva na učinke onečišćenja zraka je taj da dišu brže od odraslih i tako apsorbiraju više onečišćenja. Oni također udišu bliže površine zemlje zbog svoje visine gdje neke onečišćujuće tvar dostižu vršne koncentracije koje djeca apsorbiraju u vremenu kada im se mozak i tijelo još uvijek razvijaju. Globalno gledano, 93 % svjetske djece mlađe od 15 godina izloženo je raznim finim lebdećim česticama (PM2,5) čije koncentracije premašuju smjernice WHO-a o kvaliteti zraka. Od tih 93 % svjetske djece, 630 milijuna djece je mlađe od 5 godina, a 1,8 milijardi djece su mlađi od 15 godina. Svjetska zdravstvena organizacija procjenjuje da je 2016. godine 600 000 djece umrlo od akutnih infekcija donjih dišnih puteva koji se direktno povezuju sa onečišćenjem zraka. SZO procjenjuje da je 2016. godine 600 000 djece umrlo od akutnih infekcija donjih dišnih puteva uzrokovanih zagađenim zrakom [7].

Isto tako, prema novim istraživanjima koja je provela WHO glavni izvor onečišćenja zraka je promet te su utvrđeni dokazi da on ima izravan utjecaj na povećanje smrtnosti, kao i na povećanje respiratornih i kardiovaskularnih bolesti. U Europskoj uniji prema istraživanjima WHO-a svake se godine dogodi oko 100 000 prijevremenih smrti odraslih osoba koje se mogu pripisati onečišćenju zraka, a emisije iz cestovnog prometa predstavljaju značajni dio ovog tereta. Oko 40 milijuna ljudi na području 115 najvećih gradova Europske unije izloženo je zraku koji premašuje smjernice WHO-a za kvalitetu zraka. Isto tako, istraživanja potvrđuju kako djeca koja žive u blizini cesta s velikom cirkulacijom prometa imaju dvostruko veći rizik od respiratornih bolesti od onih koja žive u blizini cesta s malom cirkulacijom prometa [8].

2.2.2. Utjecaj lebdećih čestica (PM) na ekosustav

Postoje različiti izravni i neizravni utjecaji lebdećih čestica na ekosustav. Do različitih fitotoksičnih reakcija može doći zbog izloženosti određenoj koncentraciji i sastavu čvrstih čestica u zraku. Taloženje čestica smanjuje rast, prinos, cvjetanje i razmnožavanje biljaka. Najveći negativni učinak na vegetaciju imaju lebdeće čestice koje sadrže nitrate i sulfate koji pospješuju zakiseljavanje, te elemente u tragovima i teške metale. Sitne lebdeće čestice čije su pH vrijednosti

≥ 9 mogu prouzrokovat izravne ozljede tkiva lista na kojem se talože ili neizravno putem izmjene pH tla. Taloženje lebdećih čestica na površine listova biljaka isto tako mogu imati -negativan utjecaj na fotosintezu jer se smanjuje količina svjetlosti. Lebdeće čestice imaju i veliki utjecaj na onečišćenje tla. Promjene u tlu zbog onečišćenja česticama ne mogu se primijetiti u kratkom vremenu osim ako su u pitanju jako onečišćena područja oko industrije. Onečišćenje se javlja tek nakon 10 ili više godina kada se nakupi velika koncentracija lebdećih čestica. Zbog taloženja lebdeći čestica koje sadrže spojeve sa dušikom dolazi do eutrofikacije vodenih ekosustava [9].

2.3. Meteorološki utjecaji

Na koncentraciju lebdećih čestica ne utječe samo izvor emisije već i razni difuzijski uvjeti, a na difuziju krutih čestica u zraku utječu zemljopisni i meteorološki uvjeti. Neki od glavnih meteoroloških uvjeta koji utječu na koncentraciju lebdećih čestica u zraku su vjetar, temperatura, oborine i relativna vlažnost.

Smjer vjetra i jačina vjetra utječu na smjer širenja lebdećih čestica u zraku, te na koncentraciju lebdećih čestica u zraku.

Prema istraživanjima, između temperature zraka i koncentracije lebdećih čestica dolazi do negativne korelacije što bi značilo da kada je temperatura zraka najveća, koncentracija lebdećih čestica će biti najmanja [10].

Između relativne vlažnosti zraka i koncentracije lebdećih čestica primijećena je pozitivna korelacija koja je vidljiva do određene granične vrijednosti iznad koje prestaje. Naime, lebdeće čestice akumuliraju vlagu te se s povećanjem vlage povećava i koncentracija lebdećih čestica do točke u kojoj dolazi do takozvanog suhog taloženja [10].

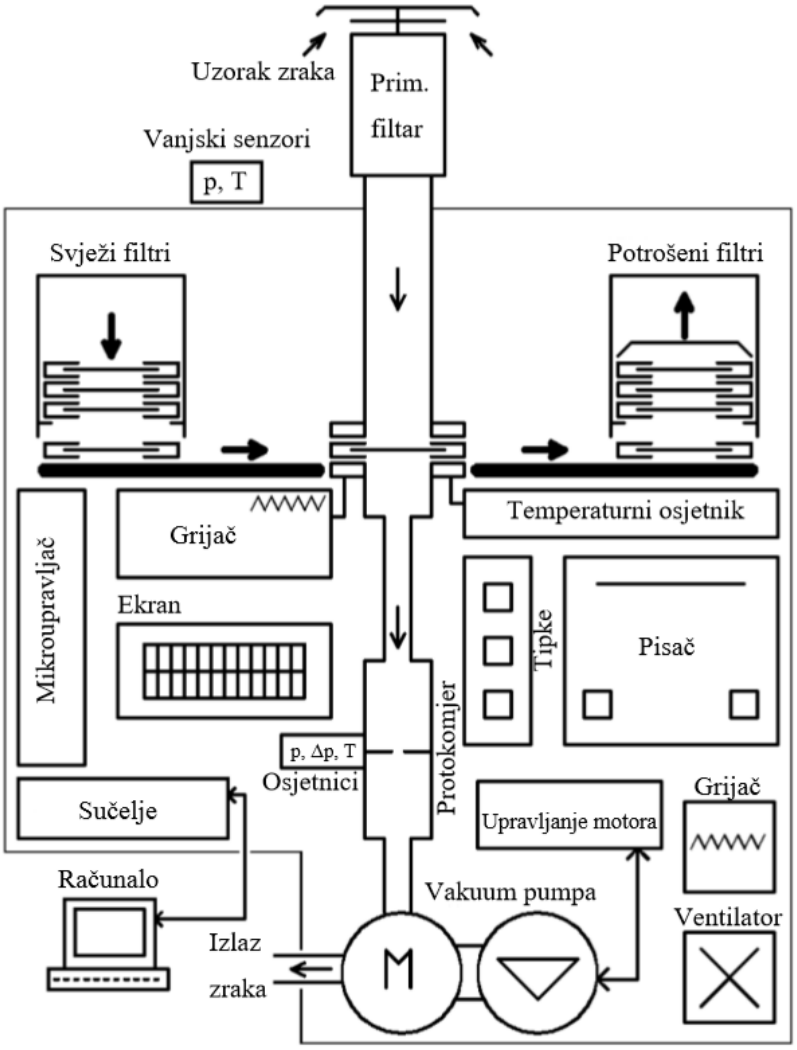
2.4. Metode određivanja lebdećih čestica

Iz predhodno navedenih istraživanja koja ukazuju na negativne posljedice onečišćenja zraka ne samo na ljudsko zdravlje već i na ekosustav vidljivo je koliko je bitno poboljšati kvalitetu zraka u cijelom svijetu. Da bi se poboljšala kvaliteta zraka, potrebno je izmjeriti koncentracije lebdećih čestica u zraku. Mjerenja koncentracija lebdećih čestica u zraku vrše se referentnom metodom odnosno gravimetrijskom metodom ili nekom od metoda za koje je dokazana ekvivalencija, primjerice metoda oscilirajuće mikrovage, metoda upijanja β-zračenja ili metoda raspršenja laserskog svijetla.

2.4.1. Gravimetrijska metoda

Sukladno normi HRN EN 12341:2014 referentna metoda mjerenja masene koncentracije lebdećih čestica u zraku je gravimetrijska metoda. Ova europska norma opisuje standardnu metodu za određivanje masenih koncentracija PM10 ili PM2,5 u okolnom zraku uzrokovanjem čestica na filterima i vaganjem. Isto tako daje zahtjeve za upotrebu sekvencijalnih uređaja za uzimanje uzorka, koji su opremljeni sa izmjenjivačima filtra i pogodni su za produženi samostalni rad [11].

Kroz ulazni presjek uzorkivača u sustav se usisava uzorak zraka pomoću vakuum pumpe. Dio ulaznog presjeka je ustvari primarni filtar, kojim se definira veličina čestica čija će se koncentracija mjeriti na sekundarnom filtru. Nakon prolaska uzorka zraka kroz cijev uzorkivača, uzorak prolazi kroz mjerni filtar na kojem se zadržavaju preostale krute čestice. Mjerni filtri izrađuju se od staklenih vlakana, kvarcnih vlakana, teflona (PTFE), celuloznih nitrata ili drugih membrana. Nakon isteka zadanog vremena uzorkovanja filtri se izmjenjuju pomoću automatskog sustava. Iskorišteni filtar se sprema u spremnik potrošenih filtara koji je često hlađen Peltierovim hladnjakom kako bi se spriječio gubitak lako hlapljivih frakcija. Protok zraka se automatski podešava te se vrši provjera mjernom prigušnicom sukladno Bernoullijevoj jednadžbi uz mjerenje pomoćnih parametara prije i nakon prigušivanja. Frekvencijskom regulacijom broja okretaja pumpe postiže se traženi protok, a pumpe su regulirane tako da postižu konstantan volumni protok zraka. Vakumske pumpe su najčešće bez-uljne s karbonskim lopaticama te se sastoje od filtra koji sprečava ulaz čestica u pumpu i filtra na ispustu koji sakuplja čestice nastale trošenjem lopatica. Shema gravimetrijskog uređaja prikazana je na slici 7.



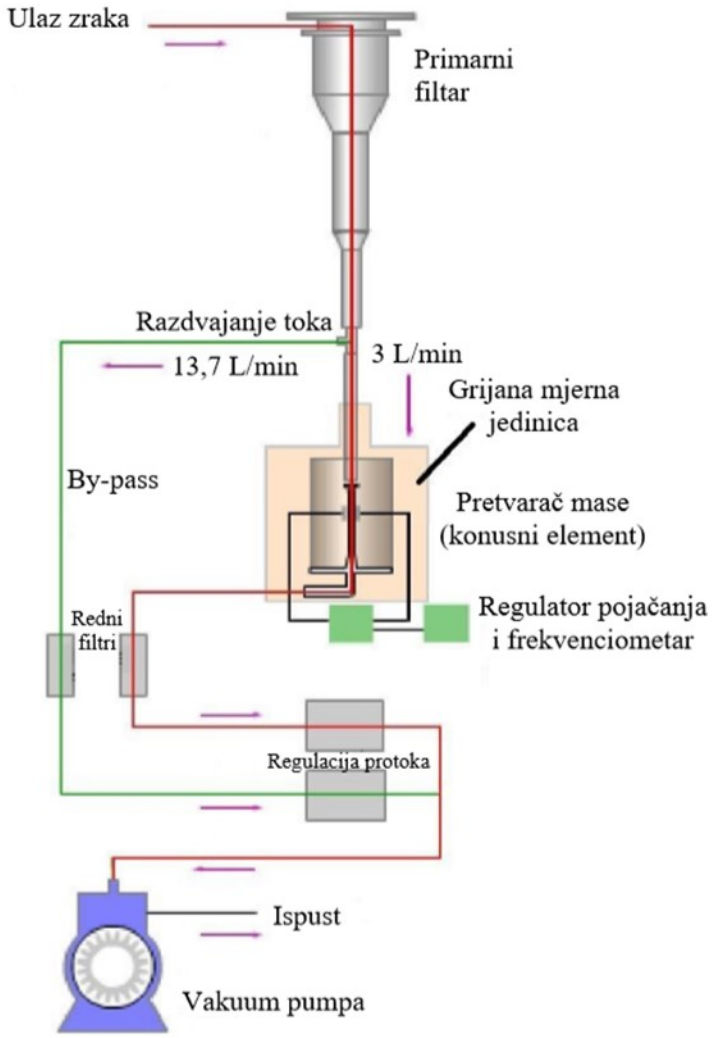
Slika 7. Shema gravimetrijskog uređaja

Zbog utvrđivanja pravilnog rada uređaja radi se provjera nepropusnosti i kalibracija protka. Provjera nepropusnosti izvodi se tako da se začepi ulazni kanal, a kalibracija protoka vrši se ugradnjom vanjskog protokomjera na mjesto ulaznog presjeka te usporednim mjerenjem [12].

2.4.2. Oscilirajuća mikrovaga

Metoda oscilirajuće mikrovage je tehnika koja se uglavnom koristi za kontinuirano mjerenje koncentracija čestica u zraku. Uređaji kojima se vrše mjerenja koncentracije lebdećih čestica u zraku metodom oscilirajuće mikrovage u praksi se često spominju pod kraticom TEOM (*Tapered element oscillating microbalance*). Uređaj se sastoji primarnog filtra koji definira veličinu frakcije lebdećih čestica čija koncentracija će se mjeriti (ukupna suspendirana tvar, PM10, PM2,5 i dr.).

Vakuum-pumpa uvlači uzorak zraka u sustav brzinom od 16,7 L/min kroz otvor koji je predviđen da dopušta prolazak samo česticama određenog raspona veličina. Zatim se struja zraka podijeli tako da je 3 L/min uzorka usmjereno na konusni element a ostatak se usmjeri prema ispuhu. Konusni element se sastoji od filtarskog uloška koji se postavlja na vrh šuplje staklene cijevi. Dno cijevi je pričvršćeno i ne može se pomicati, a vrh slobodno vibrira svojom prirodnom frekvencijom. Svaka čestica koja se dodatno akumulira na filtru mijenja frekvenciju osciliranja cijevi. Elektronički sklop osjeti promjenu u oscilaciji te izračunava masenu koncentraciju lebdećih čestica u uzorku. Nakon toga uređaj postavlja vibracijsku staklenu cijev na svoju početnu odnosno prirodnu frekvenciju, te se može započet slijedeće mjerenje. Uređaj radi pri konstantnoj temperaturi i protoku. Jednostavna shema sustava s oscilirajućom mikrovagom prikazana je na slici 8.



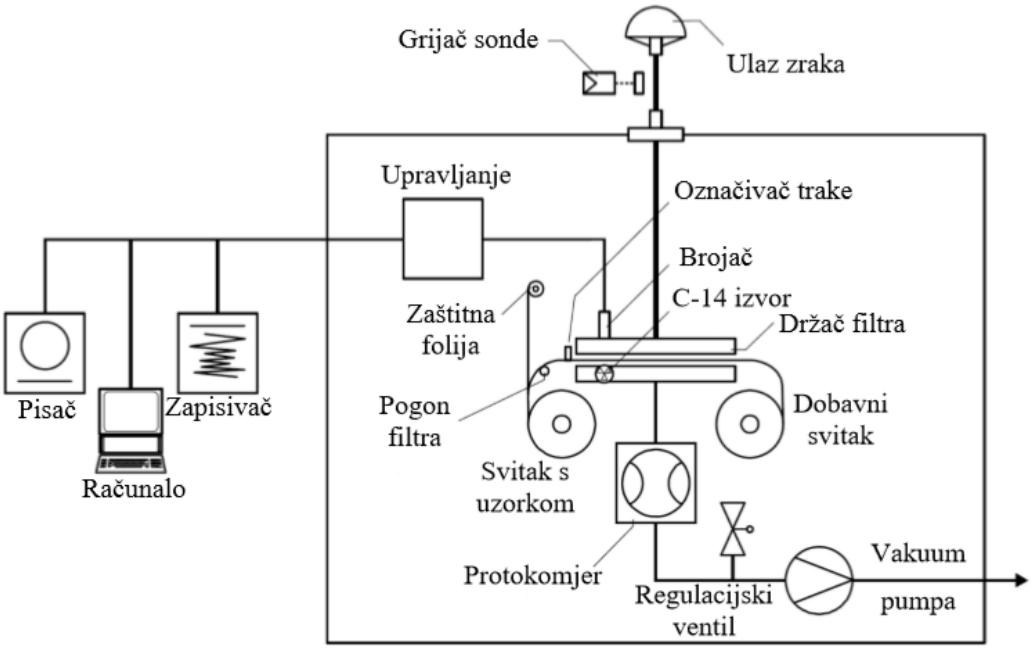
Slika 8. Jednostavna shema sustava s oscilirajućom mikrovagom

Prednosti ovog uređaja su da se uzorkovanje radi kontinuirano i ne trebaju se mijenjati filtri toliko često. Analizatori mogu pružit dodatne informacije, primjer doba dana u kojem dolazi do najviših koncentracija čestica. Uređaj se koristi zajedno sa meteorološkim podacima i to pomaže pri identifikaciji izvora emisija čestica [13].

2.4.3. Metoda upijanja β-zračenja

Princip rada sa metodom upijanja β-zračenja temelji se na dokazanim sposobnostima krutih čestica da apsorbiraju β-zračenje. Mjerni uređaji koji se koriste u praksi nazivamo kraticom BAM (*Beta attenuation monitor*) [14].

Princip rada BAM uređaja za uzorkovanje je da apsorbira energiju iz beta čestica koje prolaze kroz čestice (PM) sakupljene na filtru. Prije uzorkovanja utvrđuje se osnovna vrijednost beta broja pomoću filtra te razlika između osnovnog beta broja i beta broja nakon uzorkovanja izravno je proporcionalna masi čvrstih čestica (PM) u uzorku. Uređaj će mjeriti čistu površinu filtrirajućeg medija za određeno razdoblje kako bi odredio čistu točku. Zatim će u drugom određenom vremenskom razdoblju pomaknuti to područje filtra u uređaj za uzorkovanje te dolazi do detektora za konačno očitanje. Razlika u beta broju može se izravno povezati s masom čestica tako da se uređaj kalibrira pomoću filtrirajućeg medija koji sadrži poznatu masu sličnog materijala. Mjerenje je potrebno obaviti svakih 15 min kako bi ispunili zahtjev za izvješćivanje o podacima [15]. Vakuum-pumpa usisava 16,7 L/min vanjskog zraka kroz primarni filtar pomoću kojeg se određuje veličina čestica koja će se uzorkovati. Zatim uzorak prolazi kroz filtersku vrpcu od staklenih vlakna te se tamo zadržavaju lebdeće čestice. Izvor odnosno ugljik-14 iznad filterske vrpce konstantno emitira beta čestice, koje ispod filtratske vrpce detektor detektira i broji. Mjerenje upijanja β-zračenja na čistoj točki na filtarskoj vrpci traje 8 min. Filtarska traka se pomiče tako da se netom zračenju podvrgnuta čista točka nađe na putu uzorkovanom zraku. Uzorkovanje traje 42 min. Shema metode upijanja β-zračenja prikazana je na slici 9 [16].



Slika 9. Shema metode upijanja β-zračenja

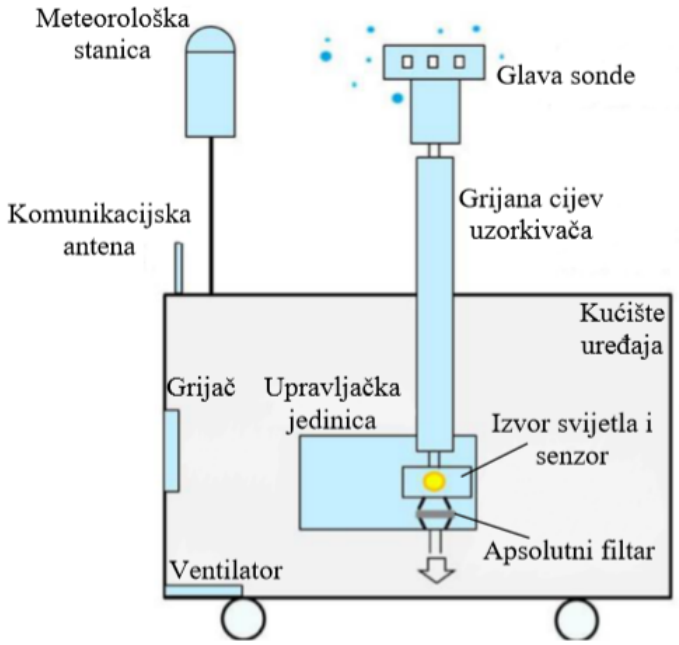
Uređaj se sastoji od dvije osnovne komponente a to su beta izvor i detektor. Beta izvor mora biti odabran tako da ima razinu energije dovoljno visoku da beta čestice prođu kroz volumen zraka i traku za filtriranje. Najčešće se za izvor koristi ugljik-14 jer ima sigurnu, ali i dovoljno visoku razinu energije.cNedostaci ove metode su da je potreban neprekinuti nadzor nad uređajem, tehnologija je prilično skupa, a i zbog radioaktivnog izvora ograničeno je prihvaćanje ove metode [15].

2.4.4. Metoda raspršenja laserskog svjetla

Optička metoda temelji se na raspršenju laserskog svjetla uslijed osvjetljavanja krutih čestica u uzorku zraka. Koristi se za određivanja koncentracija PM10 i PM2,5 u vanjskom zraku.

Prije nego što započne mjerenje udio čestica koji se mjeri unosi se u upravljačku jedinicu. Vakuum-pumpa uvlači vanjski zrak pri volumetrijskom protoku od 3,3 L/min. U nizvodnom dijelu usisani zrak odvaja se u pomoćni (obogačujući) tok i primarni (normalni) tok. Peristaltički ventil

preusmjerava jedan od navedenih toka na disperzijski fotometar. U fotometru lebdeće čestice se osvjetljuju laserom, te raspršenu svijetlost hvata fotodetektor i pretvara ju u pojedinačni izlazni signal. Fotodetektor koji hvata raspršenu svijetlost smješten je u uređaju pod kutom od 90 °. Shema metode raspršenja laserskog svijetla prikazana je na slici 10.



Slika 10. Shema metode raspršenja laserskog svijetla

Izlazni signal je izravno proporcionalan masenoj koncentraciji lebdećih čestica u zraku. Fotometar mjeri koncentraciju PM10 u pomoćnom toku, a koncentraciju PM2,5 u primarnom toku. Valna duljina od 650 nm koju primjenjuje uređaj najosjetljivija je na čestice u rasponu veličine od 0,5 do 1 µm. Iz tog razloga u izlaznom signalu disperzijskog fotodetektora raspoređenog na otvorenom dominira frakcija PM2.5. Može se nadoknadit manjak osjetljivosti koji se odnosi na grubu frakciju PM2,5 do PM10, a nadoknađuje se virtualnim udarnim glavama smještenim uzvodno od fotometra, koji selektivno obogaćuje koncentraciju grube frakcije. Snimljeni podaci se spremaju u unutarnju memoriju i na SD karticu, te se mogu prenijeti na mrežno računalo putem integriranog GPRS modema [17].

2.5. Zakonodavstvo u HR i svijetu

U Republici Hrvatskoj Zakon o zaštiti zraka (NN127/19) je temeljni dokument kojim se određuju nadležnost i odgovornost za zaštitu zraka. Njime se određuju smjernice za praćenje i procjenjivanje kvalitete zraka, mjere za sprječavanje i smanjivanje onečišćavanja zraka te izvještavanje o kvaliteti zraka. Tablicom 1 prikazani su gornji i donji pragovi procjene koncentracija lebdećih čestica PM10 i PM2,5 za zaštitu ljudi u RH [3].

Tablica 1. Gornji i donji pragovi procjene za zaštitu ljudi u RH

PM10	Gornji prag procjene	Kalendarska godina	24 sata	35 $\mu g/m^3$ (70% GV)	Prag procjene ne smije biti prekoračen više od 35 puta u bilo kojoj kalendarskoj godini
			1 godina	28 $\mu g/m^3$ (70% GV)	
	Donji prag procjene	Kalendarska godina	24 sata	25 $\mu g/m^3$ (50% GV)	
			1 godina	20 $\mu g/m^3$ (50% GV)	
PM2,5	Gornji prag procjene	Kalendarska godina	1 godina	17 $\mu g/m^3$ (70% GV)	-
	Donji prag procjene	Kalendarska godina	1 godina	12 $\mu g/m^3$ (50% GV)	

Direktiva o kvaliteti zraka iz 2008. godine temelj je politike EU-a za čisti zrak jer se njome utvrđuju norme kvalitete zraka za koncentracije onečišćujućih tvari u zraku koji udišemo. Direktiva je usmjerena na poboljšanje zdravlja građana dostizanjem bolje kvalitete zraka koji ljudi udišu. Tablicom 2 prikazani su gornji i donji pragovi procjene koncentracija lebdećih čestica PM10 i PM2,5 za zaštitu ljudi u EU [18].

Tablica 2. Gornji i donji pragovi procjene za zaštitu ljudi u EU

	24-satni prosjek PM10	**Godišnji prosjek PM10**	**Godišnji prosjek PM2,5**
Gornji prag procjene	70% od granične vrijednosti (35 $\mu g/m^3$, ne smije se prekoračiti više od 35	70% od granične vrijednosti (28 $\mu g/m^3$)	70% od granične vrijednosti (17 $\mu g/m^3$)

	puta u bilo kojoj kalendarskoj godini)		
Donji prag procjene	50% od granične vrijednosti (25 μg/m^3, ne smije se prekoračiti više od 35 puta u bilo kojoj kalendarskoj godini)	50% od granične vrijednosti (20 μg/m^3)	50% od granične vrijednosti (12 μg/m^3)

Graničnom vrijednošću (GV) prikazuje se granična razina onečišćenja ispod koje temeljem znanstvenih spoznaja, ne postoji rizik štetnih učinka na ljudsko zdravlje i/ili okoliš u cjelini ili je rizik vrlo mali. Kada se granična vrijednost jednom postigne više se ne smije prekoračiti. U tablici 1 prikazane su vrijednosti gornjih i donjih pragova (PM10 i PM2,5) za zaštitu ljudi u RH, a tablicom 2 prikazane su vrijednosti gornjih i donjih pragova (PM10 i PM2,5) za zaštitu ljudi u EU. Iz tablica je vidljivo da su vrijednosti za RH i EU jednake. Gornji prag procjene za 24-satni prosjek PM10 je 35 μg/m^3 te se ne smije prekoračiti više od 35 puta u bilo kojoj godini. Donji prag procjene procjene za 24-satni prosjek PM10 je 25 μg/m^3 te se ne smije prekoračiti više od 35 puta u bilo kojoj godini. Gornji prag procjene za godišnji prosjek PM10 je 28 μg/m^3, a donji prag procjene za godišnji prosjek PM10 je 20 μg/m^3. Za godišnji prosjek čestica PM2,5 su nešto manje vrijednosti za gornji prag procjene iznosi 17 μg/m^3, a za donji prag procjene iznosi 12 μg/m^3.

3. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu analizirati će se podaci iz pet gradova u Republici Hrvatskoj. Svi podaci su preuzeti iz Hrvatske agencije za okoliš i prirodu i Hrvatskog hidrometeorološkog zavoda. Podaci koji će se analizirati su iz mjernih postaja Zagreb-1, Zagreb PPI PM2,5- Ksaverska cesta, Osijek-1, Slavonski Brod-1, Slavonski Brod-2, Rijeka-2 i Zračna luka Dubrovnik te su prikazane na slici 11.

Slika 11. Prikaz analiziranih mjernih postaja

3.1. Opis mjernih lokacija

3.1.1. Mjerne postaje Zagreb

Iz mjerne postaje Zagreb-1 uzeti su satni izvorni podaci koncentracije PM10 čestica u zraku. Mjerna postaja Zagreb-1 ubraja se u Državnu mrežu za trajno praćenje kvalitete zraka. Nalazi se

u gradu Zagrebu na 45,800339 stupnjeva geografske širine i 15,974072 stupnjeva geografske dužine.

Osim koncentracija lebdećih čestica PM10 na mjernoj postaji Zagreb-1 mjeri se dušikov dioksid, ugljikov monoksid, sumporov dioksid, benzen, ozon, toluen, dušikov monoksid i m,p-ksilen. Institucija koja je odgovorna za mjernu postaju je Državni hidrometeorološki zavod. Na slici 12 prikazan je izgled mjerne postaje Zagreb-1.

Slika 12. Mjerna postaja Zagreb-1

Iz mjerne postaje Zagreb PPI PM2,5- Ksaverska cesta uzeti su dnevni validirani podaci koncentracija lebdećih čestica PM2,5 u zraku. Mjerna postaja Zagreb PPI PM2,5-Ksaverska cesta ubraja se u Državnu mrežu za trajno praćenje kvalitete zraka. Mjerna postaja se nalazi u gradu Zagrebu na 45,834372 geografske širine i 15,978394 stupnjeva geografske dužine.

Na mjernoj postaji osim koncentracije lebdećih čestica PM2,5 mjeri se koncentracija Cl u PM2,5, NO3 u PM2.5, SO_4 u PM2.5 , EC u PM2,5, OC u PM2,5 , amonij u PM2,5 , Ca u PM2,5 , Mg u PM2,5 , K u PM2,5 i Na u PM2,5. Institucija koja je odgovorna za mjernu postaju je Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada [19].

3.1.2. Mjerna postaja Osijek

Iz mjerne postaje Osijek-1 uzeti su satni izvorni podaci za koncentraciju lebdećih čestica PM10 u zraku. Mjerna postaja Osijek-1 ubraja se u Državnu mrežu za trajno praćenje kvalitete zraka. Nalazi se u samom gradu Osijeku na 45,558792 stupnjeva geografske širine i 18,698769 stupnjeva geografske dužine.

Na mjernoj postaji Osijek-1 osim koncentracija lebdećih čestica PM10 prate se i koncentracije dušikova dioksida, etil benzena, ozona, dušikovih oksida, toluena, dušikova monoksida, ugljikova monoksida, sumporova dioksida, m,p-ksilena i benzena. Institucija koja je odgovorna za mjernu postaju je Hrvatski hidrometeorološki zavod. Na slici 13 prikazan je izgled mjerne postaje Osijek-1 [19].

Slika 13. Mjerna postaja Osijek-1

3.1.3. Mjerne postaje Slavonski Brod

Iz mjerne postaje Slavonski Brod-1 uzeti su satni izvorni podaci za koncentraciju lebdećih čestica PM2,5. Mjerna postaja Slavonski Brod-1 ubraja se u Državnu mrežu za trajno praćenje kvalitete zraka. Nalazi se u industrijskoj zoni grada Slavonskog Broda na 45,159472 stupnjeva geografske širine i 17,995100 stupnjeva geografske dužine.

Na mjernoj postaji Slavonski Brod-1 osim koncentracija lebdećih čestica PM2,5 mjere se koncentracije dušikovih dioksida, etil benzena, dušikovih oksida, sumporova dioksida, lebdeće čestice PM10, benzen, butadiena 1,3, ozona, toluena, dušikova monoksida i m,p-ksilena. Državni hidrometeorološki zavod je odgovorna institucija za mjernu postaju. Izgled mjerne postaje Slavonski Brod-1 prikazan je na slici 14.

Slika 14. Mjerna postaja Slavonski Brod-1

Iz mjerne postaje Slavonski Brod-2 uzeti su satni izvorni podaci koncentracija lebdećih čestica PM10. Mjerna postaja Slavonski Brod-2 nalazi se u industrijskoj zoni grada Slavonskog Broda na 45,149114 stupnjeva geografske širine i 18,023450 stupnjeva geografske dužine.

Na mjernoj postaji Slavonski Brod-2 osim koncentracija lebdećih čestica PM10 mjere se i koncentracije sumporova dioksida, m,p-ksilena, etil benzena, benzena, toluena, o-ksilena. ugljikova monoksida i sumporovodika. Hrvatski hidrometeorološki zavod je odgovorna institucija za mjernu postaju. Izgled mjerne postaje Slavonski Brod-2 prikazan je na slici 15 [19].

Slika 15. Mjerna postaja Slavonski Brod-2

3.1.4. Mjerna postaja Rijeka

Iz mjerne postaje Rijeka-2 uzeti su satni izvorni podaci za koncentraciju lebdećih čestica PM10 i dnevni validirani podaci za koncentraciju lebdećih čestica PM2,5. Mjerna postaja Rijeka-2 ubraja se u Državnu mrežu za trajno praćenje kvalitete zraka. Nalazi se u gradu Rijeci na 45,320794 stupnjeva geografske širine i 14,483511 geografske dužine.

Na mjernoj postaji Rijeka-2 osim koncentracija lebdećih čestica PM10 i PM2,5 mjere se koncentracije dušikova dioksida, dušikova oksida, ozona, dušikova monoksida, ugljikova monoksida i sumporova dioksida. Hrvatski hidrometeorološki zavod je odgovorna institucija za mjerni postaju. Izgled mjerne postaje Rijeka-2 prikazan je na slici 16 [19].

Slika 16. Mjerna postaja Rijeka-2

3.1.5. Mjerna postaja Dubrovnik

Iz mjerne postaje Zračna luka Dubrovnik uzeti su satni izvorni podaci za koncentracije lebdećih čestica PM10 i PM2,5. Mjerna postaja Zračna luka Dubrovnik ubraja se u Mrežu za praćenje kvalitete zraka Zračne luke Dubrovnik. Nalazi se u gradu Dubrovniku na 42,553889 stupnjeva geografske širine i 18,284722 stupnjeva geografske dužine.

Na mjernoj postaji Zračna luka Dubrovnik osim koncentracije lebdećih čestica PM10 i PM2,5 mjere se i koncentracije sumporova dioksida, dušikova dioksida, ozona i benzena. Institucija koja je odgovorna za mjernu postaju Zračna luka Dubrovnik je EKONERG- institut za energetiku i zaštitu okoliša [19].

3.2. Mjerni uređaji

U tablici 3 navedeni su nazivi mjernih uređaja koji se koriste na odabranim postajama za mjerenje koncentracija lebdećih čestica PM2,5 i PM10, lebdeće čestice čija se koncentracija mjeri te naziv mjerne postaje.

Tablica 3. Prikaz mjernih uređaja na mjernim postajama

Mjerne postaje	**Mjerni uređaji**	
	PM2,5	**PM10**
Zagreb-1	-	Thermo Andersen ESM FH 62 I-R
Zagreb PPI PM2,5-Ksaverska cesta	LECKEL - LVS 3	-
Osijek-1	-	Thermo Andersen ESM FH 62 I-R
Slavonski Brod-1	Thermo Andersen ESM FH 62 I-R	-
Slavonski Brod-2	-	Derenda PNS 16T3.1
Rijeka-2	Leckel SEQ47/50	Thermo Andersen ESM FH 62 I-R
Zračna luka Dubrovnik	Horiba model APDA 371	Thermo Andersen ESM FH 62 I-R

3.2.1. Mjerni uređaj Thermo Andersen ESM FH 62 I-R

Mjerni uređaj Thermo Andersen ESM FH 62 I-R za mjerenje koncentracija lebdećih čestica PM10 koriste mjerne postaje Osijek-1, Zagreb-1, Rijeka-2 i Zračna luka Dubrovnik, dok ga mjerna postaja Slavonski Brod- 1 koristi za mjerenje koncentracija lebdećih čestica PM2,5.

Automatski analizator Thermo Andersen ESM FH 62 I-R koristi radiometrijski princip atenuacije beta metodom. Moguće je mjerenje koncentracije lebdećih čestica u filtru u stvarnom vremenu i

mjerenje koncentracije lebdećih čestica u vanjskom zraku. Na slici 17 prikazan je mjerni uređaj Thermo Andersen ESM FH 62 I-R.

Slika 17. Prikaz mjernog uređaja Thermo Andersen ESM FH 62 I-R

Čisti presjek filter trake pomiče se u mjerni položaj, a okolni zrak se uvlači kroz sustav uzorka. Lebdeće čestice sadržane u zraku talože se na filtru. Za uzorkovanje čestica koristi se princip jednog filtra. Jedno područje filtra ostaje duže vrijeme u komori za sakupljanje i mjerenje čestica sve dok se ne postigne potpuno opterećenje ili dok ne prođe neki od parametra promjene filtra (doba dana, odabrano vrijeme, odabrani tlak, brzina protoka zraka, maksimalna masa). Nakon što se taj dio filtra napuni u položaj za mjerenje se pomakne svježi dio filtra. Nakon svakog mijenjanja filtra vrši se automatsko podešavanje nule te započinje novi ciklus.

Zbog točnosti proračuna koncentracije lebdećih čestica, trenutni protok zraka mjeri se sondom. Korištenjem dovoda za odabir veličine čestica (PM10, ciklona, PM2,5), brzina protoka mora biti konstantna. Zbog toga se koristi RPM regulirana vakuumska pumpa ili proporcionalni ventil. Utjecaj nestabilne vlage u vanjskom zraku kao i opasnost od kondenzacije vode u epruveti za uzorkovanje može se spriječiti upotrebom grijane cijevi za uzorkovanje. Ovaj mogući utjecaj važno je uzeti u obzir pri visokoj vlažnosti zraka ljeti ili po maglovitim danima [20].

3.2.2. Mjerni uređaj Horiba model APDA 371

Mjerni uređaj Horiba model APDA 371 koristi se za mjerenje koncentracija lebdećih čestica PM2,5 u mjernoj postoji Zračna luka Dubrovnik. Automatski mjeri i bilježi razine koncentracija lebdećih čestica u zraku, koristeći princip prigušivanja beta zraka. Osigurava dugoročnu stabilnost i mogućnost samodijagnostike, te princip mjerenja djeluje u skladu s EU i EPA propisima. Na slici 18 je prikazan mjerni uređaj Horiba model APDA 371.

Slika 18. Prikaz mjernog uređaja Horiba model APDA 371

Element ugljika- 14 emitira stalan izvor visokoenergetskih elektrona poznatih kao beta zrake kroz mjesto čiste trake za punjenje. Scintilacijski detektor broji i detektira beta zrake kako bi odredio nulto očitanje. Zatim pomiče mjesto trake do mlaznice za uzorak, gdje vakuumska pumpa kroz filtrirnu vrpcu izvlači izmjerenu i kontroliranu količinu lebdećih čestica u zraku. Ovo mjesto se svakodnevno vraća između beta izvora i detektora, čime se prigušuje signal beta zraka koji se koristi za određivanje mase čestica na filter traci [21].

3.2.3. Mjerni uređaj LECKEL - LVS 3

Mjerni uređaj LECKEL - LVS 3 koristi se za mjerenje koncentracija lebdećih čestica PM2,5 na mjernoj postaji ZAGREB PPI PM2,5- Ksaverska cesta. LECKEL - LVS 3 je mali filtratski uređaj koji je dizajniran za vanjsku upotrebu pri vrlo visokim i niskim temperaturama, a može se koristiti i u zatvorenom prostoru. Na slici 19 prikazan je mjerni uređaj LECKEL - LVS 3.

Slika 19. Prikaz mjernog uređaja LECKEL - LVS 3

Željene postavke unose se u upravljačku jedinicu prije početka uzorkovanja. Nakon aktiviranja radnog ciklusa, uzorkovanje se odvija automatski prema zadanim parametrima.Vakuum-puma uvlači okolini zrak, a u dovodu za uzorkovanje se frakcioniraju lebdeće čestice iz zraka. Zrak koji sadrži željenu frakciju lebdećih čestica prolazi kroz filter, gdje se lebdeće čestice sakupljaju i stavljaju na raspolaganje za naknadnu gravimetrijsku analizu. Volumetrijski protok mjeri se pločicom otvora i elektronički se podešava s točnošću od ≤ 2% [22].

Brzina protoka uzorka kontrolira se u skladu s osnovanima fizikalnim načelima prema Bernoullijevom zakonu. Volumen uzorkovanog zraka prikazan je s osjetljivošću 0,01 m^3 na digitalnom zaslonu. Svi relevantni podaci prikazani su na zaslonu uređaja i mogu se pohraniti na memorijsku karticu. U slučaju nestanka struje, svi podaci se pohranjuju u mikrokontroleru i u

memoriji sustava te će biti sigurni nekoliko godina zahvaljujući bateriji velikog kapacitete. Kućište samog uređaja sastoji se od nehrđajućeg čeličnog lima s vratima koja se mogu zaključati. Zbog niske razine emisije buke, može se koristiti u urbanim područjima u bilo koje doba dana te u zatvorenim prostorima [23].

3.2.4. Mjerni uređaj Derenda PNS 16T3.1

Mjerni uređaj Derenda PNS 16T3.1 koristi se za mjerenje koncentracija lebdećih čestica PM10 na mjernoj postaji Slavonski Brod-2.

Derenda PNS 16T3.1 koncentraciju lebdećih čestica u zraku mjeri gravimetrijski. To je uzorkivač malih volumena sa udarnom glavom. Kvarcni filtri se kondicioniraju u eksikatoru koji sadrži destiliranu vodu u komori tri tjedna prije uzorkovanja. Za određivanje koncentracije lebdećih čestica, filtri se izvažu prije i nakon uzorkovanja u aklimatiziranoj prostoriji tijekom 24h pri prosječnoj temperature od 20 ± 1 ° C i u odnosu 50 ± 5 % vlage pomoću mikrobiloze s preciznošću od 1 μg [24].

3.2.5. Mjerni uređaj Leckel SEQ47/50

Mjerni uređaj Leckel SEQ47/50 koristi se za mjerenje koncentracija lebdećih čestica PM2, 5 na mjernoj postaji Rijeka-2. Na slici 20 prikazan je mjerni uređaja Leckel SEQ47/50.

Slika 20. Prikaz mjernog uređaja Leckel SEQ47/50

Mjerni uređaj Leckel SEQ47/50 opremljen je sa Peltier hladnjakom, te je dizajniran za vanjsku upotrebu. Časopis koji sadrži držače filtra s filtrom za uzorkovanje sastoji se od tankozidnog aluminija i postavlja se u malo izolirano kućište. Časopis se hladi jakim Peltierovim agregatom, a temperatura filtra se mjeri unutar časopisa. Sustav za uzorkovanje se hladi iz omotača do filtra. Ovim mjerama povećava se pouzdanost izmjerenih koncentracija tijekom kompletnog uzorkovanja. Brzina protoka zraka kontrolira se u skladu s osnovnim fizikalnim načelima prema Bernoullijevom zakonu. Temperatura protoka zraka mjeri se neposredno iza filtra, koji se trenutno uzorkuje. Kućište uređaja sastoji se od nehrđajućeg čelika s vratima koja se mogu zaključati [25].

4. REZULTATI MJERENJA I RASPRAVA

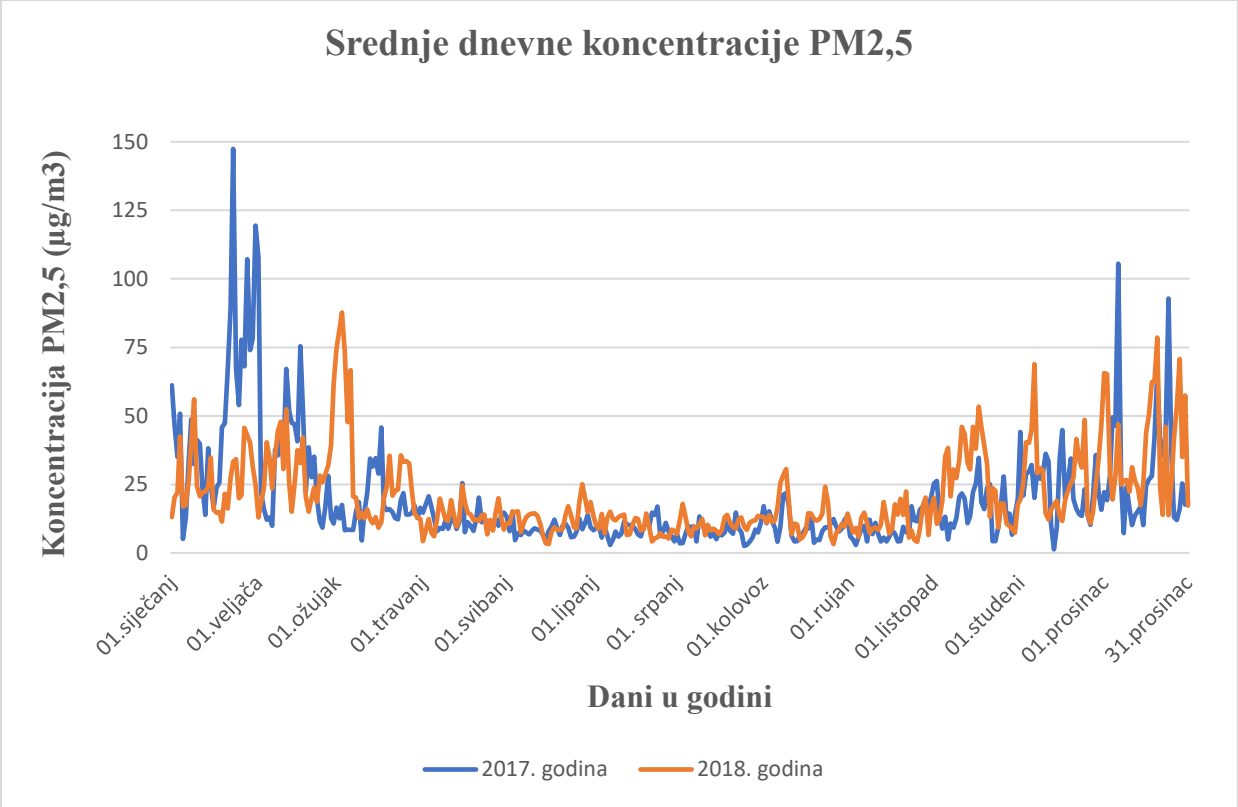
Postupak analize onečišćenja čestičnim tvarima u urbanim područjima Republike Hrvatske predstavljen je u nekoliko koraka. Utvrditi će se dnevni hod koncentracija lebdećih čestica PM2,5 i PM10 za promatrano razdoblje, srednje vrijednosti dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM2,5 i PM10 za promatrano razdoblje i prosječne dnevne koncentracije lebdećih čestica PM2,5 i PM10 tijekom godišnjih doba za promatrano razdoblje.

Svi podaci koncentracija lebdećih čestica PM2,5 i PM10 za promatrano razdoblje preuzeti su iz Hrvatske agencije za okoliš i prirodu i Hrvatskog hidrometeorološkog zavoda uz njihovu suglasnost. Dnevni hod koncentracija lebdećih čestica PM2,5 i PM10 dobiven je prosjekom svih koncentracija svakog dana u pojedinom satu u razdoblju od početka siječnja do kraja prosinca. Srednja dnevna koncentracija lebdećih čestica PM2,5 i PM10 dobivena je prosjekom koncentracija od 0 do 24 sata za svaki dan u godini.

4.1. Koncentracija lebdećih čestica PM2,5 na mjernoj postaji Zagreb PPI PM2,5 – Ksaverska cesta i koncentracija lebdećih čestica PM10 na mjernoj postaji Zagreb-1

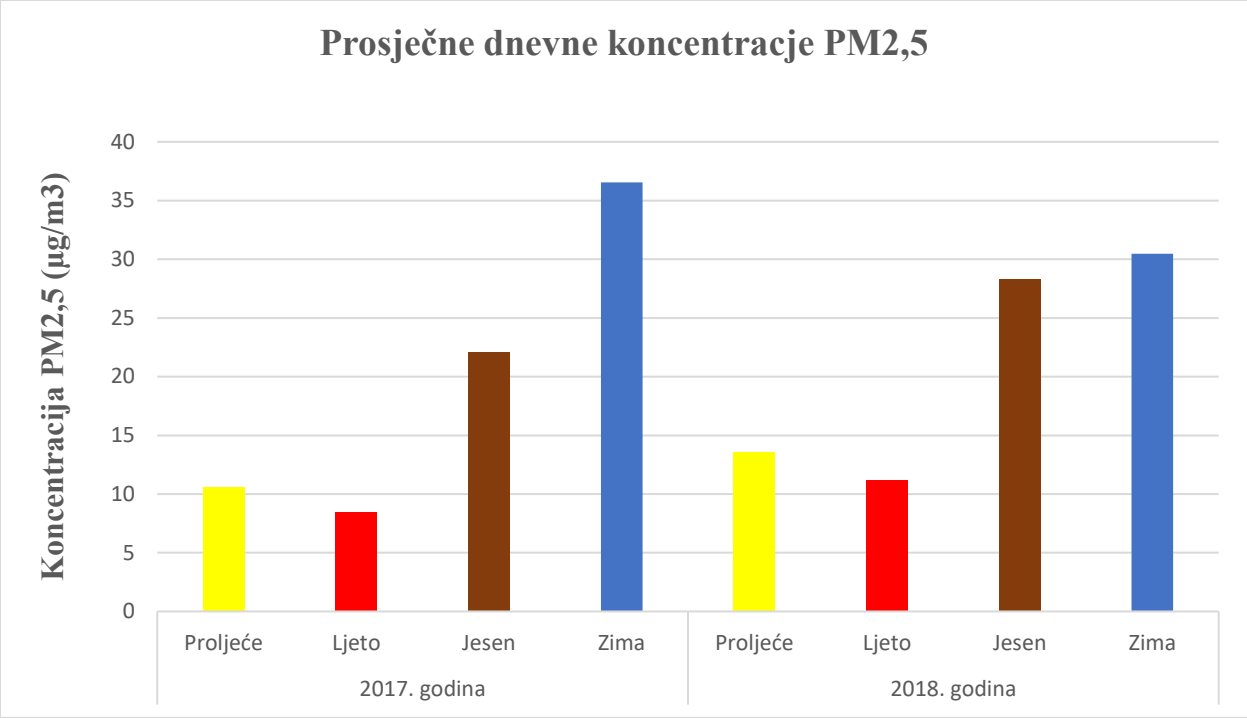
Iz mjerne postaje Zagreb PPI PM2,5 – Ksaverska cesta obrađeni su dnevni validirani podaci koncentracija lebdećih čestica PM2,5 za 2017. i 2018. godinu.

Na slici 21 prikazano je kretanje srednjih dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM2,5 u zraku izmjerenih na mjernoj postaji Zagreb PPI PM2,5 – Ksaverska cesta za 2017. i 2018. godinu. Iz grafa se može uočiti da su tijekom zimskih mjeseci koncentracije lebdećih čestica PM2,5 više dok su u ljeti niže tijekom obje promatrane godine. Može se uočiti da su u 2017. godini koncentracije lebdećih čestica PM2,5 više u odnosu na 2018.godinu. Najveća izmjerena vrijednost koncentracije lebdećih čestica PM2,5 u promatranom razdoblju izmjerena je 24. siječnja. 2017. godine iznosila je 147,44 $\mu g/m^3$.



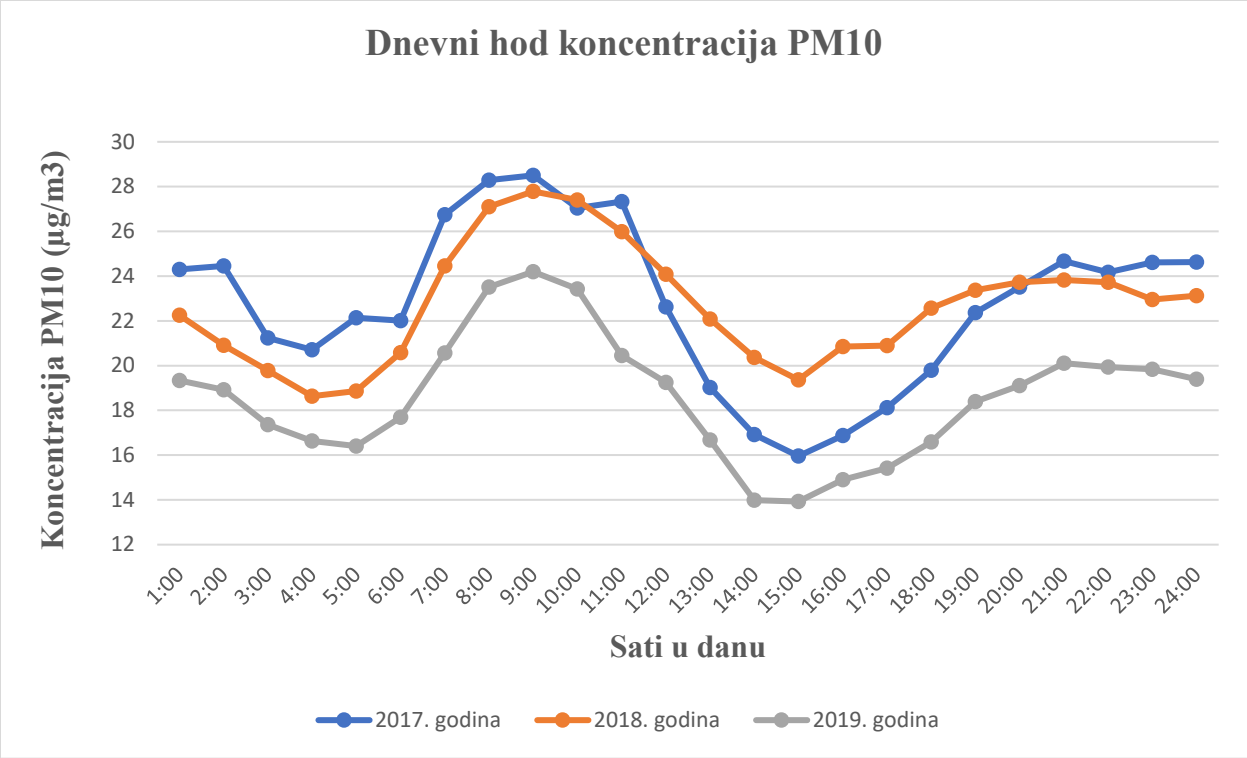
Slika 21. Kretanje srednjih dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM2,5 u zraku na mjernoj postaji Zagreb PPI PM2,5 – Ksaverska cesta za 2017. i 2018. godinu.

Slika 22 prikazuje prosječne dnevne koncentracije lebdećih čestica PM2,5 kroz godišnja doba na mjernoj postaji Zagreb PPI PM2,5 – Ksaverska cesta za 2017. i 2018. godinu. Može se uočiti da su zimi, tijekom obje promatrane godine, koncentracije bile više nego u ostalim godišnjim dobima. Koncentracija lebdećih čestica PM2,5 u zimi 2017. godine bila je najviša dok je u ljeti te iste godine je bila najniža.



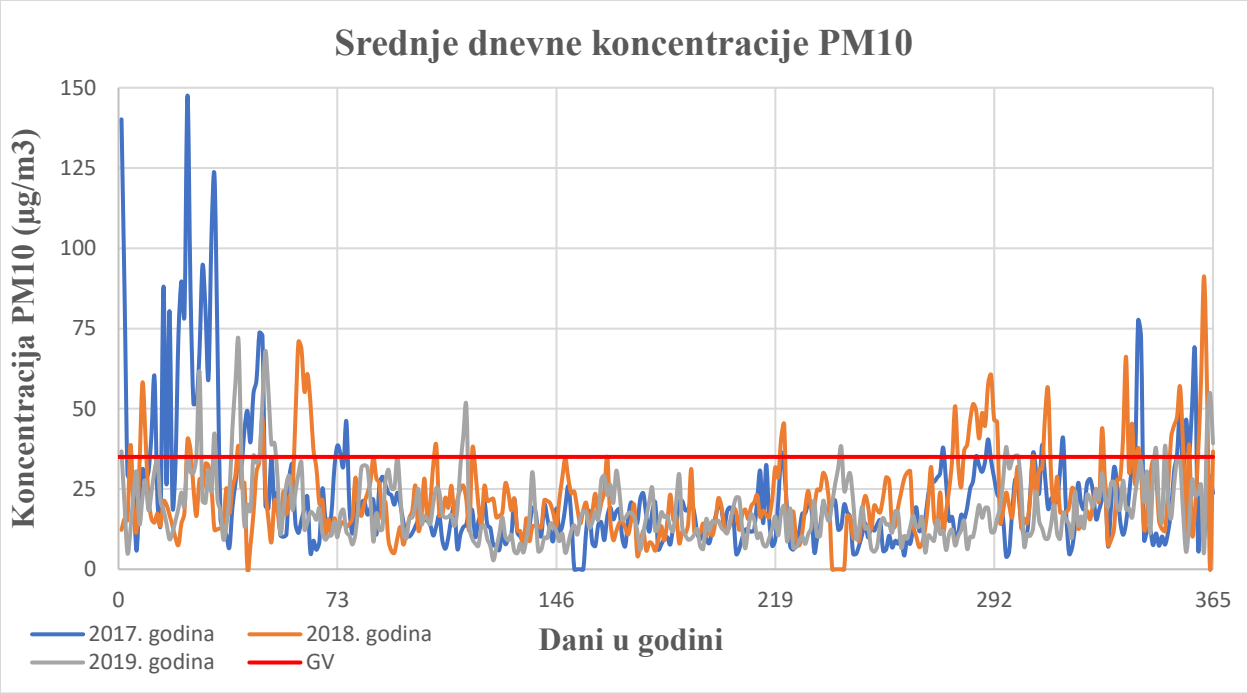
Slika 22. Prosječne dnevne koncentracije PM2,5 u zraku na mjernoj postaji Zagreb PPI PM2,5 – Ksaverska cesta za 2017. i 2018. godinu.

Iz mjerne postaje Zagreb-1 obrađeni su satni izvorni podaci koncentracija lebdećih čestica PM10 za 2017., 2018. i 2019. godinu. Na slici 23 prikazan je dnevni hod koncentracija lebdećih čestica PM10 u zraku izmjerenih na mjernoj postaji Zagreb-1 za 2017., 2018. i 2019. godinu. Iz slike se može uočiti kako su maksimalne koncentracije zabilježene od 7 do 12 sati, dok su najniže koncentracije izmjerene tijekom popodneva i u ranim jutarnjim satima. Najviša vrijednost koncentracija je bila 2017. godine u 9:00 te je iznosila 28,5 µg/m^3 dok je najniža koncentracija zabilježena 2019. godine u 15:00 te je iznosila 13,92 µg/m^3.



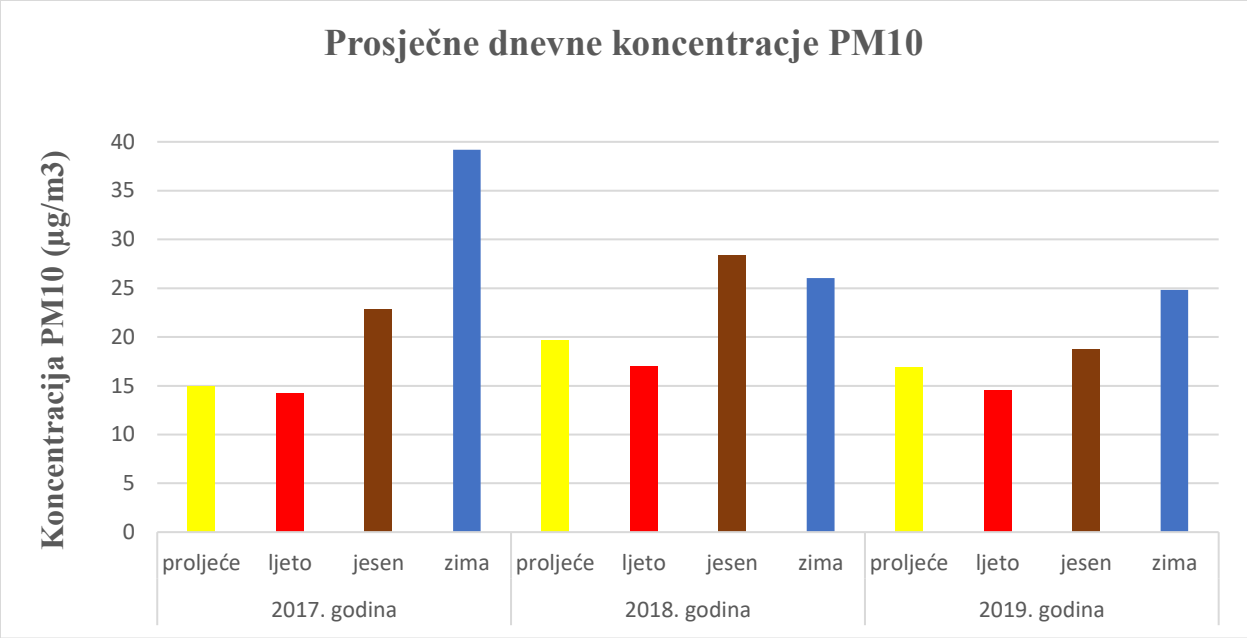
Slika 23. Dnevni hod koncentracija lebdećih čestica PM10 u zraku na mjernoj postaji Zagreb-1 za 2017., 2018. i 2019. godinu

Na slici 24 prikazano je kretanje srednjih dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM10 u zraku izmjerenih na mjernoj postaji Zagreb-1 za 2017., 2018. i 2019. godinu. Iz grafa se može uočiti da su koncentracije lebdećih čestica PM10 više tijekom zimskih mjeseci u odnosu na ljetne mjesece. Najveća zabilježena koncentracija lebdećih čestica PM10 bila je 24. siječnja. 2017. godine te je iznosila 147,58 µg/m^3. Može se uočiti da je granična vrijednost za 24-satni prosjek PM10 prekoračena više od 35 puta u 2017. godini i 2018. godini.



Slika 24. Kretanje srednjih dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM10 u zraku na mjernoj postaji Zagreb-1 za 2017., 2018. i 2019. godinu

Slika 25 prikazuje prosječne dnevne koncentracije lebdećih čestica PM10 kroz godišnja doba na mjernoj postaji Zagreb-1 za 2017., 2018. i 2019. godinu. Može se uočiti da su najviše koncentracije lebdećih čestica PM10 zabilježene tijekom zime, osim 2018. godine kada su u jesen zabilježene više koncentracije. Tijekom sve tri promatrane godine najniže koncentracije su vidljive tijekom ljeta. Najveće koncentracije lebdećih čestica zabilježene su 2017. godine, a najniže iste te godine u ljeti.

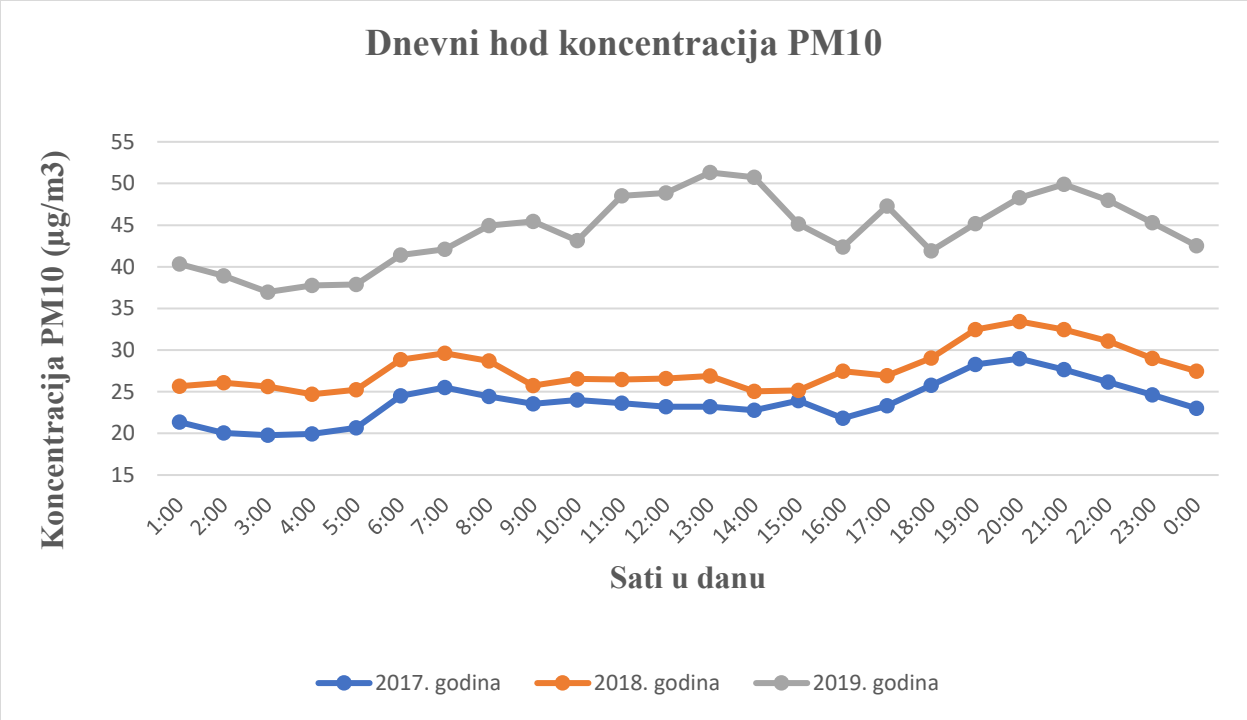


Slika 25. Prosječne dnevne koncentracije PM10 u zraku na mjernoj postaji Zagreb-1 za 2017., 2018. i 2019. godinu

4.2. Koncentracija lebdećih čestica PM10 na mjernoj postaji Osijek

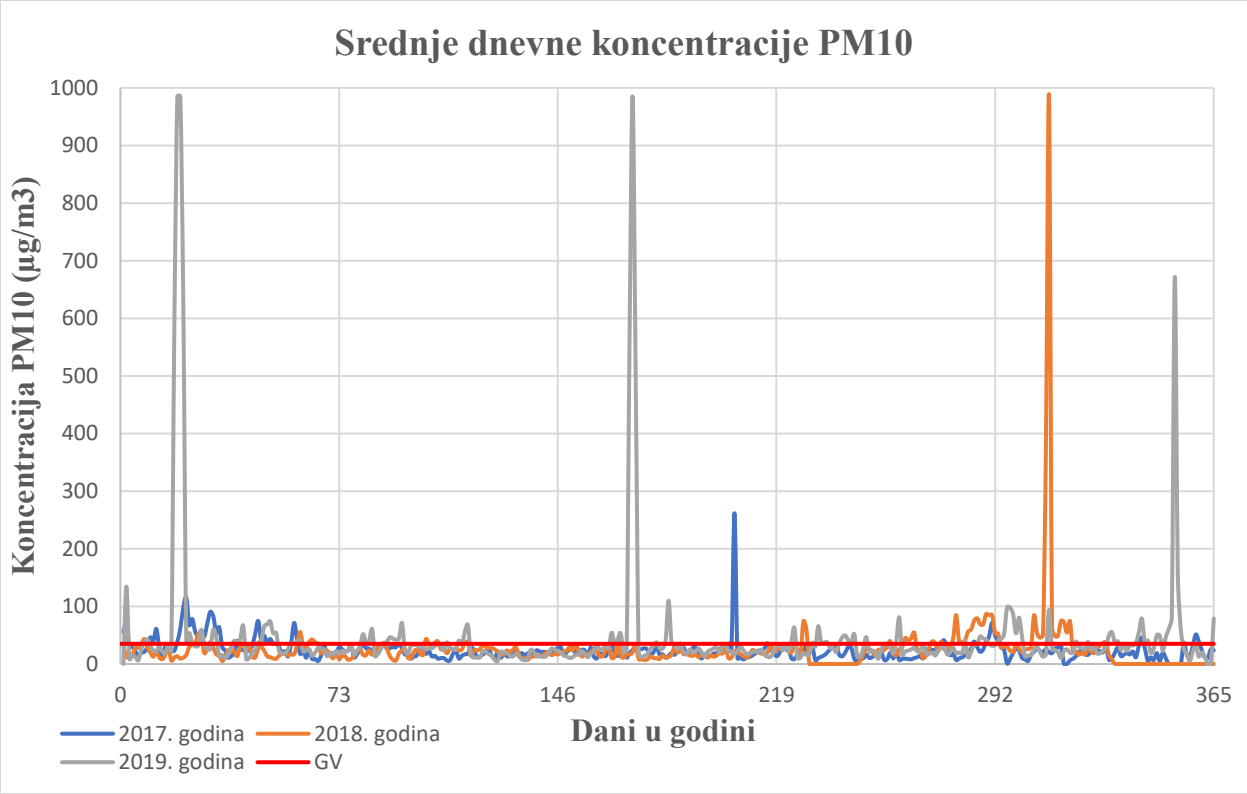
Iz mjerne postaje Osijek-1 obrađeni su satni izvorni podaci koncentracija lebdećih čestica PM10 za 2017., 2018. i 2019. godinu.

Na slici 26 prikazan je dnevni hod koncentracija lebdećih čestica PM10 u zraku izmjerenih na mjernoj postaji Osijek-1 za 2017., 2018. i 2019. godinu. Može se uočiti kako su najviše zabilježene vrijednosti koncentracija lebdećih čestica PM10 bile 2019. godine dok su u 2017. i 2018. godini koncentracije podjednakih razina. Koncentracija lebdećih čestica PM10 u 2019. godini dosta varira, najveća koncentracija zabilježena je u 13:00 i iznosila je 51,32 µg/m^3. Najmanja zabilježena koncentracija u promatranom razdoblju od tri godine zabilježena je 2017. godine u 3:00 i iznosila je 19,78 µg/m^3.



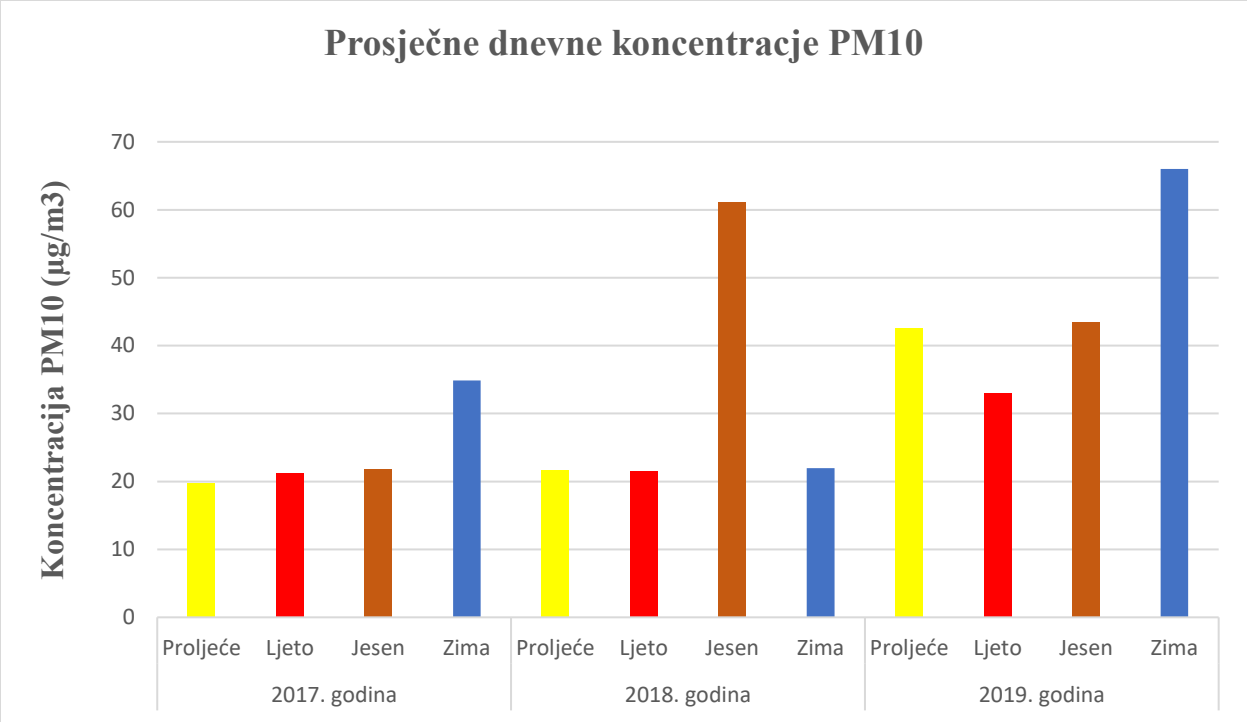
Slika 26. Dnevni hod koncentracija lebdećih čestica PM10 u zraku na mjernoj postaji Osijek-1 za 2017., 2018. i 2019. godinu

Na slici 27 prikazano je kretanje srednjih dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM10 u zraku izmjerenih na mjernoj postaji Osijek-1 za 2017.,2018. i 2019. godinu. Može se uočiti da su u 2019. godini zabilježeni visoki skokovi koncentracija lebdećih čestica tijekom siječnja, lipnja i prosinca. Isto tako, vidljiv je i visoki skok koncentracije u studenom 2018. godine. U srpnju 2017. godine zabilježen je manji skok koncentracija lebdećih čestica PM10. Najviše zabilježene koncentracije lebdećih čestica PM10 bile su 19. i 20. siječnja 2019., 20. lipnja 2019. godine i 06. studenog 2018. godine te su iznosile 985 µg/m^3. Može se uočiti da je granična vrijednost za 24-satni prosjek PM10 prekoračena više od 35 puta u svakoj od promatranim godinama.



Slika 27. Kretanje srednjih dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM10 u zraku na mjernoj postaji Osijek-1 za 2017., 2018. i 2019. godinu

Slika 28 prikazuje prosječne dnevne koncentracije lebdećih čestica PM10 kroz godišnja doba na mjernoj postaji Osijek-1 za 2017., 2018. i 2019. godinu. Može se uočiti da su najviše vrijednosti koncentracija lebdećih čestica PM10 u zimi, osim u 2018. godini kada su najviše koncentracije u jesen. Isto tako vidljivo je da su najniže koncentracije zabilježene ljeti, osim u 2017. godini kada su najniže koncentracije zabilježene u proljeće.

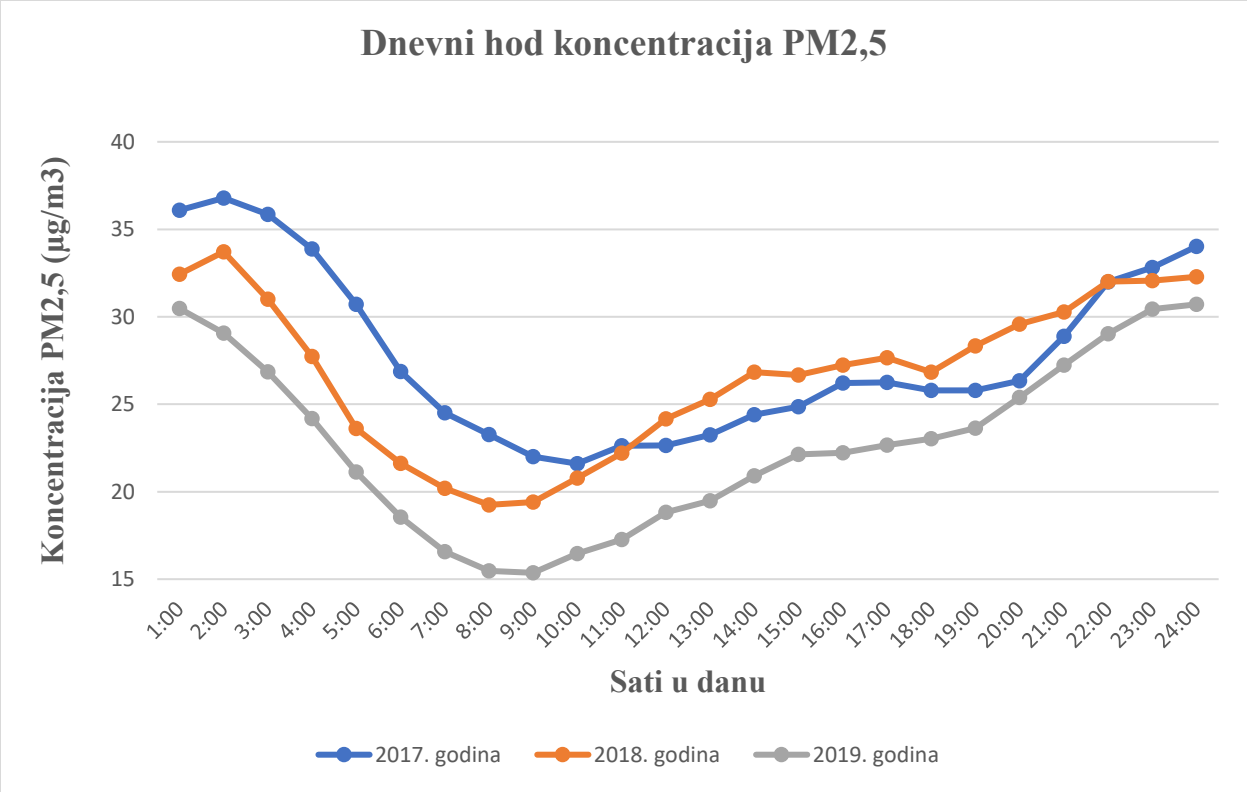


Slika 28. Prosječne dnevne koncentracije PM10 u zraku na mjernoj postaji Osijek-1 za 2017., 2018. i 2019. godinu

4.3. Koncentracija lebdećih čestica PM2,5 na mjernoj postaji Slavonski Brod-1 i koncentracija lebdećih čestica PM10 na mjernoj postaji Slavonski Brod-2

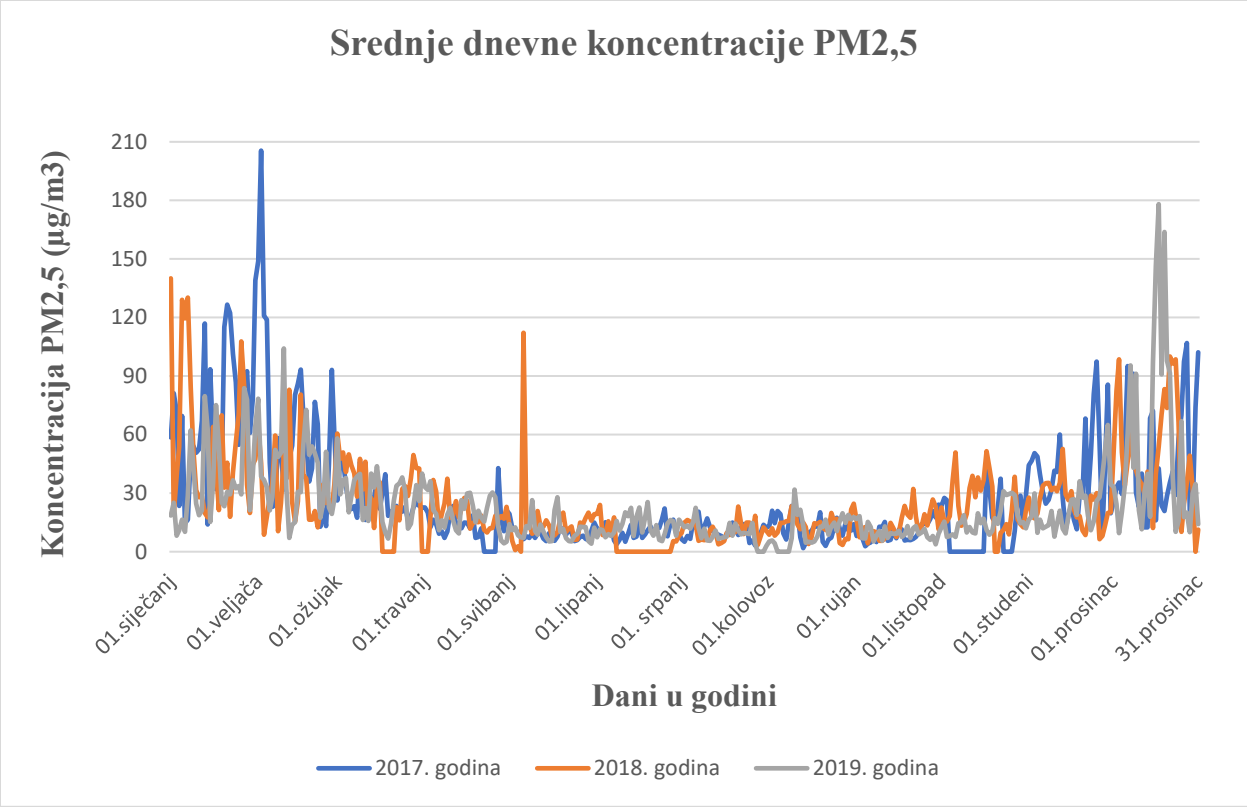
Iz mjerne postaje Slavonski Brod-1 obrađeni su satni izvorni podaci koncentracija lebdećih čestica PM2,5 za 2017., 2018. i 2019. godinu.

Na slici 29 prikazano je kretanje srednjih dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM2,5 u zraku izmjerenih na mjernoj postaji Slavonski Brod-1 za 2017., 2018. i 2019. godinu. Na slici se mogu uočiti rano jutarnji i kasno večernji maksimumi te popodnevni minimumi. Najviša koncentracija lebdećih čestica PM2,5 zabilježena je 2017. godine u 2:00 te je njezina vrijednost iznosila 36,79 $\mu g/m^3$. Najniža koncentracija lebdećih čestica PM2,5 u zraku zabilježena je 2019. u 9:00 te je njezina vrijednost iznosila 15,36 $\mu g/m^3$.



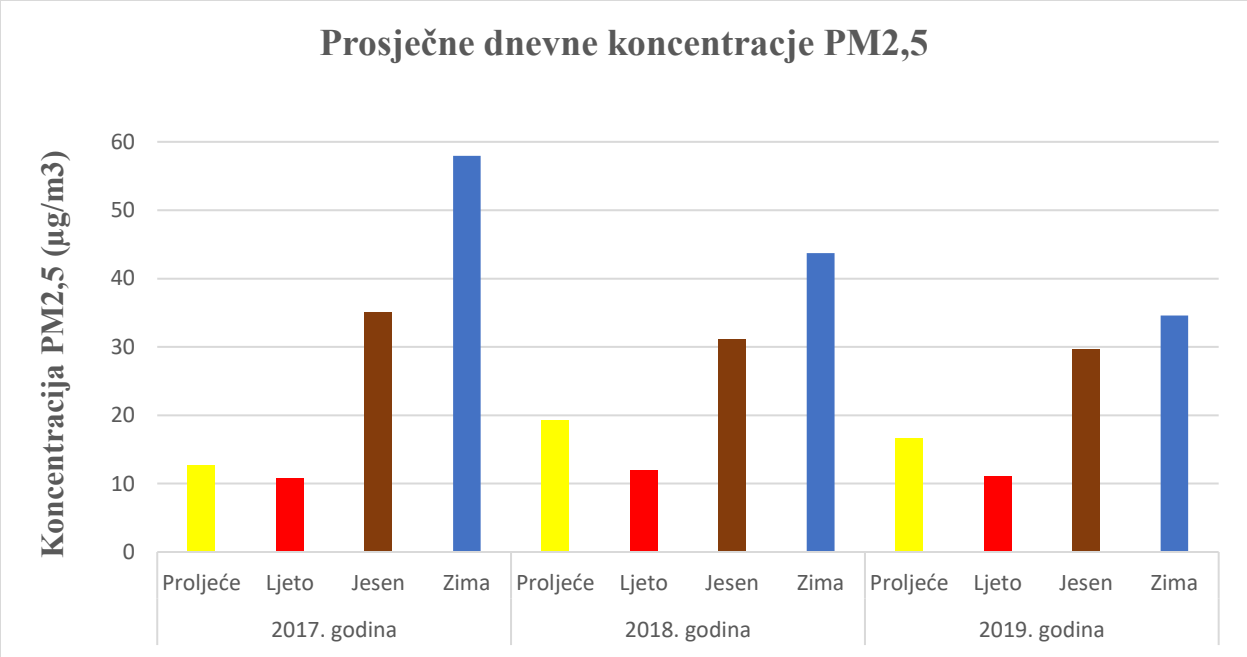
Slika 29. Dnevni hod koncentracija lebdećih čestica PM2,5 u zraku na mjernoj postaji Slavonski Brod-1 za 2017., 2018. i 2019. godinu

Na slici 30 prikazano je kretanje srednjih dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM2,5 u zraku izmjerenih na mjernoj postaji Slavonski Brod-1 za 2017., 2018. i 2019. godinu. Na slici se može uočiti da su najviše koncentracije lebdećih čestica u zimskim mjesecima, osim u 2018. godini gdje se tijekom svibnja dogodio skok u koncentraciji. Maksimalna koncentracija lebdećih čestica PM2,5 tijekom promatranog vremena zabilježena je 02. veljače 2017. godine i iznosila je 205,50 $\mu g/m^3$.



Slika 30. Kretanje srednjih dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM2,5 u zraku na mjernoj postaji Slavonski Brod-1 za 2017., 2018. i 2019. godinu

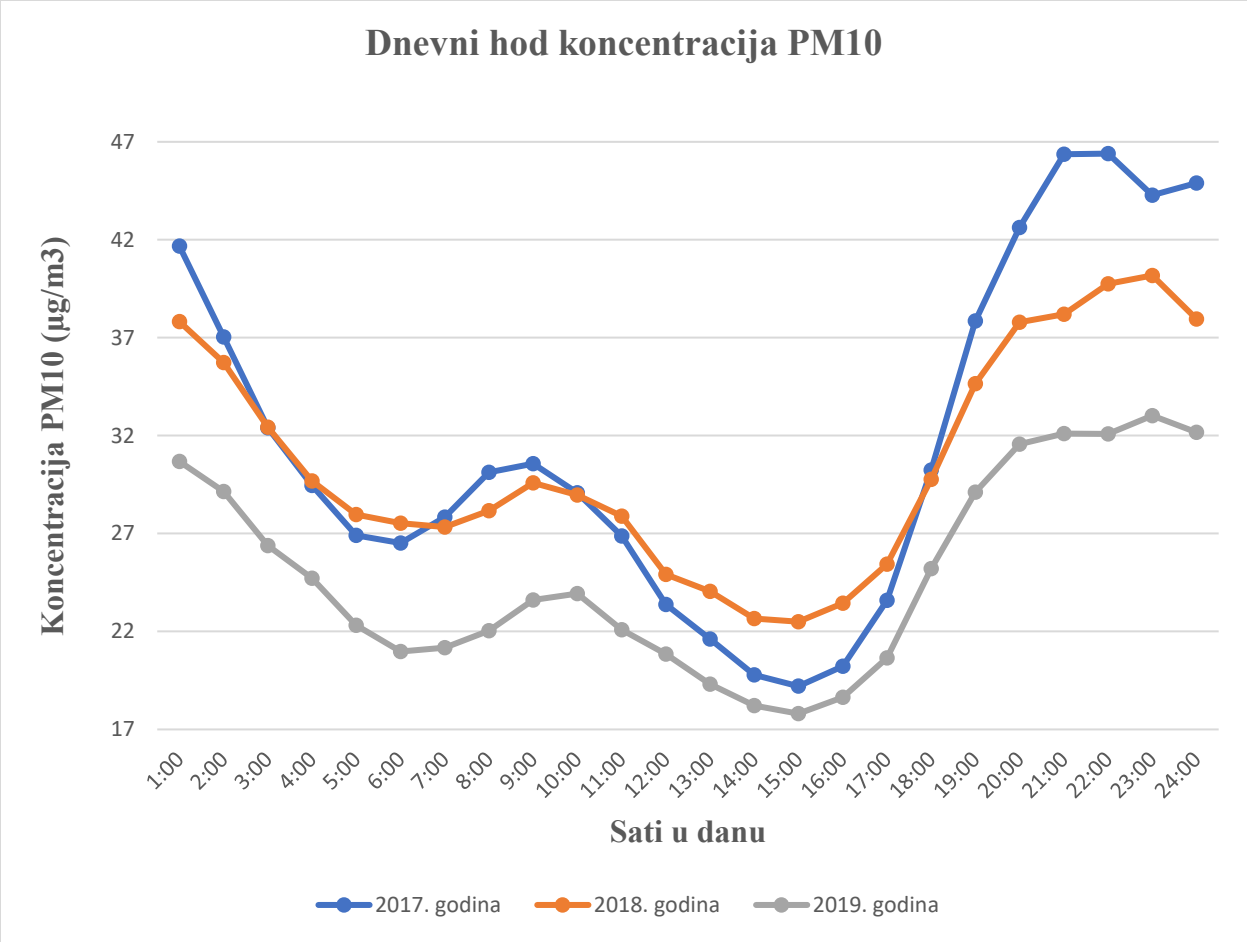
Slika 31 prikazuje prosječne dnevne koncentracije lebdećih čestica PM2,5 kroz godišnja doba na mjernoj postaji Slavonski Brod-1 za 2017., 2018. i 2019. godinu. Može se uočiti da su najviše vrijednosti koncentracija lebdećih čestica PM2,5 zabilježene tijekom zime kroz sve tri godine dok su ljeti koncentracije najniže.



Slika 31. Prosječne dnevne koncentracije PM2,5 u zraku na mjernoj postaji Slavonski Brod-1 za 2017., 2018. i 2019. godinu

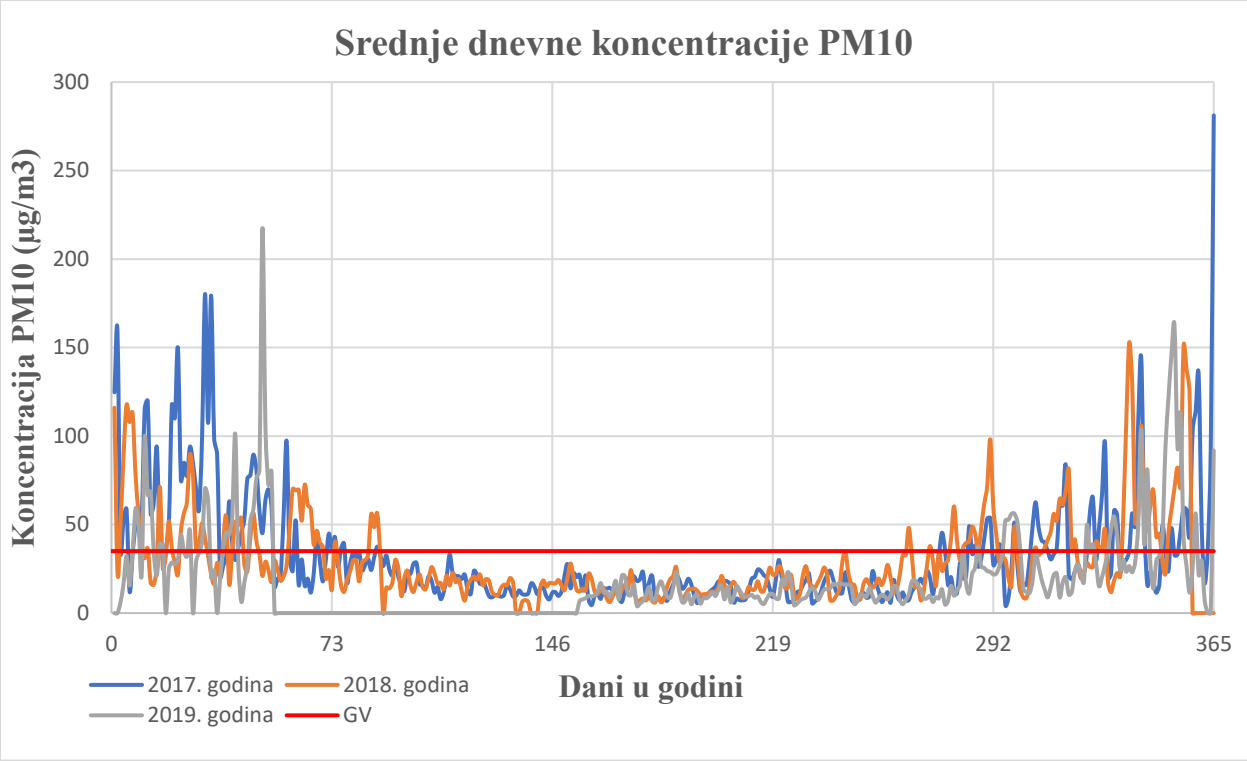
Iz mjerne postaje Slavonski Brod-2 obrađeni su satni izvorni podaci koncentracija lebdećih čestica PM10 za 2017., 2018. i 2019. godinu.

Na slici 32 prikazano je kretanje srednjih dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM10 u zraku izmjerenih na mjernoj postaji Slavonski Brod-2 za 2017., 2018. i 2019. godinu. Na slici se mogu uočiti jutarnji i večernji maksimumi te popodnevni minimumi tijekom promatranog razdoblja. Najviša zabilježena koncentracija lebdećih čestica PM10 bila je 2017. godine u 22:00 te je iznosila 46,40 µg/m^3. Najniža zabilježena koncentracija lebdećih čestica PM10 bila je 2019. godine u 15:00 te je iznosila 17,81 µg/m^3.



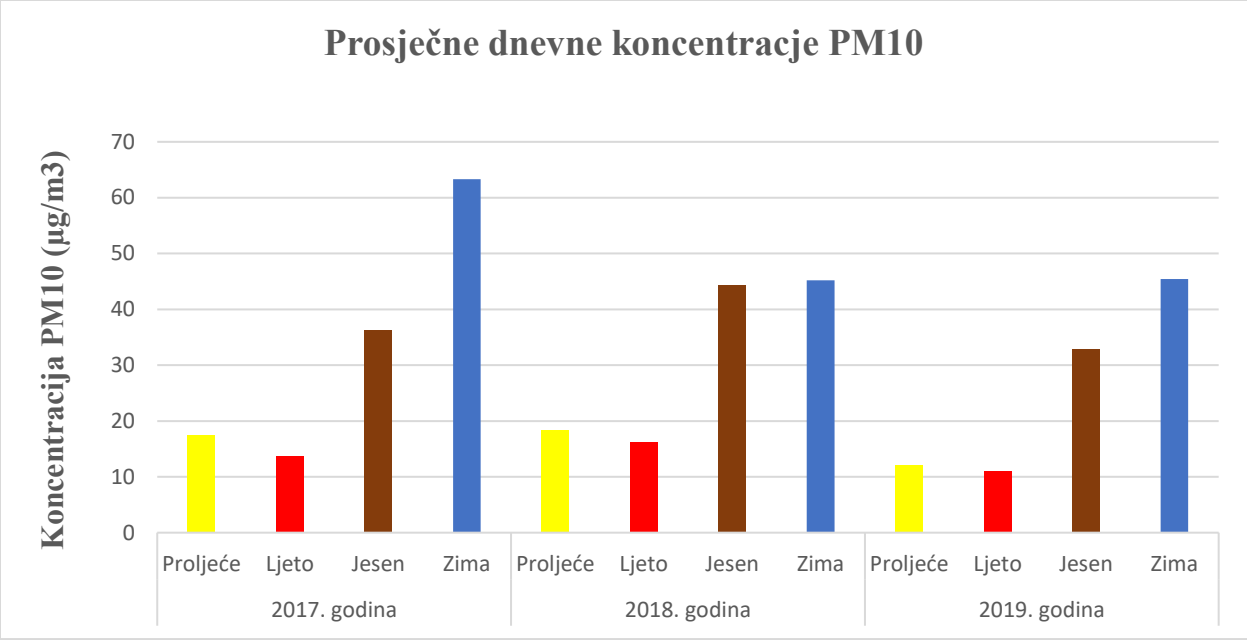
Slika 32. Dnevni hod koncentracija lebdećih čestica PM10 u zraku na mjernoj postaji Slavonski Brod-2 za 2017., 2018. i 2019. godinu

Na slici 33 prikazano je kretanje srednjih dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM10 u zraku izmjerenih na mjernoj postaji Slavonski Brod-2 za 2017., 2018. i 2019. godinu. Može se uočiti kako su tijekom zimskih mjeseci vrijednosti koncentracija lebdećih čestica PM10 više u odnosu na ljetne mjesece. Najviša vrijednost koncentracija PM10 zabilježena je 31. prosinca 2017. godine i iznosila je 281,2 $\mu g/m^3$. Može se uočiti da je granična vrijednost za 24-satni prosjek PM10 prekoračena više od 35 puta u promatranom vremenskom razdoblju.



Slika 33. Kretanje srednjih dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM10 u zraku na mjernoj postaji Slavonski Brod-2 za 2017., 2018. i 2019. godinu

Slika 34 prikazuje prosječne dnevne koncentracije lebdećih čestica PM10 kroz godišnja doba na mjernoj postaji Slavonski Brod-2 za 2017., 2018. i 2019. godinu. Iz histograma se može uočiti kako su najviše koncentracije lebdećih čestica PM10 zabilježene tijekom zime, a najniže tijekom ljeta kroz promatrani vremenski period.

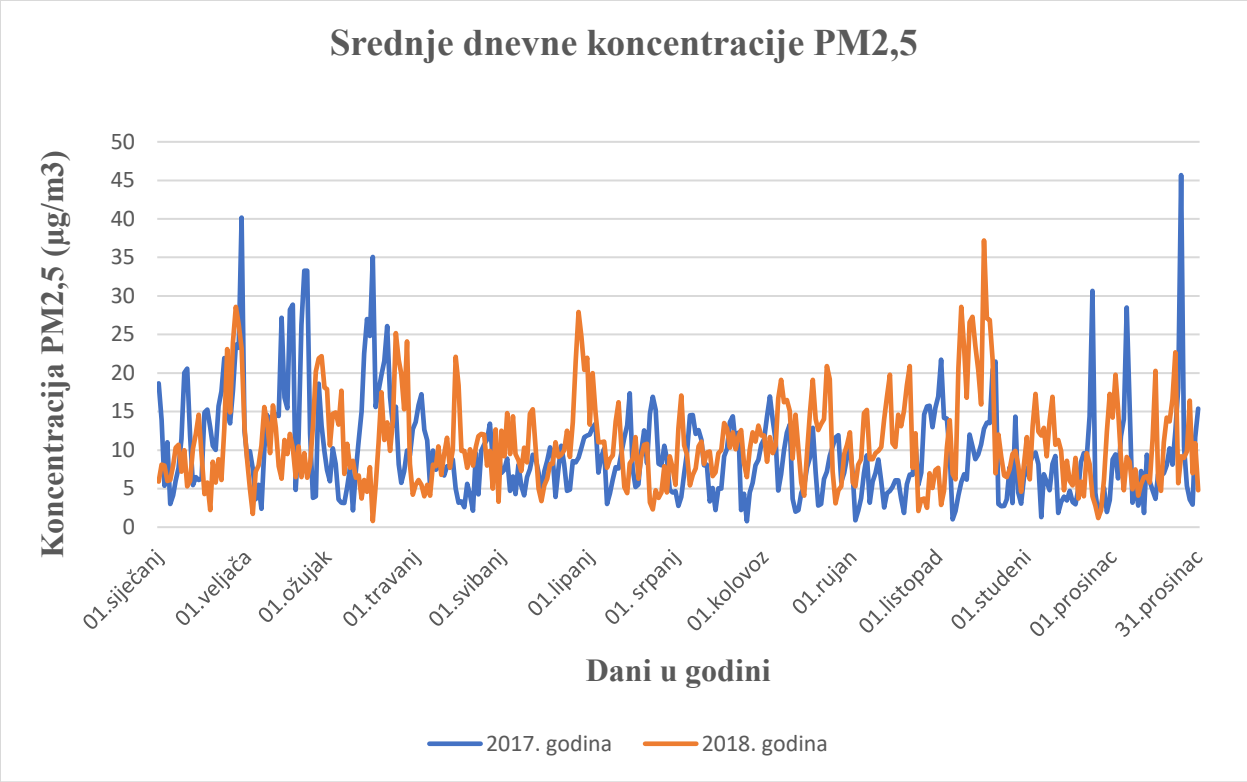


Slika 34. Prosječnie dnevne koncentracije PM10 u zraku na mjernoj postaji Slavonski Brod-2 za 2017., 2018. i 2019. godinu

4.4. Koncentracija lebdećih čestica PM2,5 i PM10 na mjernoj postaji Rijeka-2

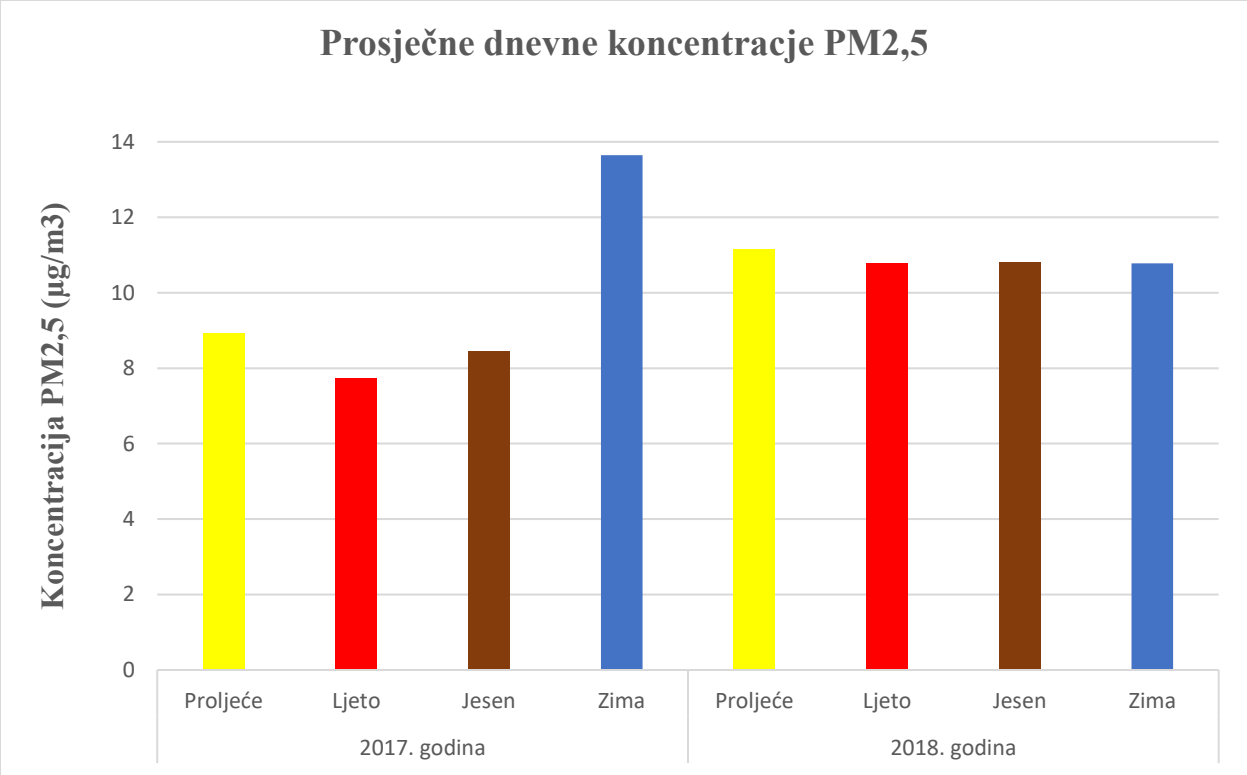
Iz mjerne postaje Rijeka-2 obrađeni su dnevni validirani podaci koncentracija lebdećih čestica PM2,5 .

Na slici 35 prikazano je kretanje srednjih dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM2,5 u zraku izmjerenih na mjernoj postaji Rijeka-2 za 2017. i 2018. godinu. Može se uočiti da tijekom promatrane godine koncentracije lebdećih čestica PM2,5 variraju, ali ipak su nešto više tijekom zimskih mjeseci. Najveća zabilježena koncentracija bila je 25. prosinca 2017. godine i iznosila je 45,68 µg/m^3.



Slika 35. Kretanje srednjih dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM2,5 u zraku na mjernoj postaji Rijeka-2 za 2017. i 2018. godinu

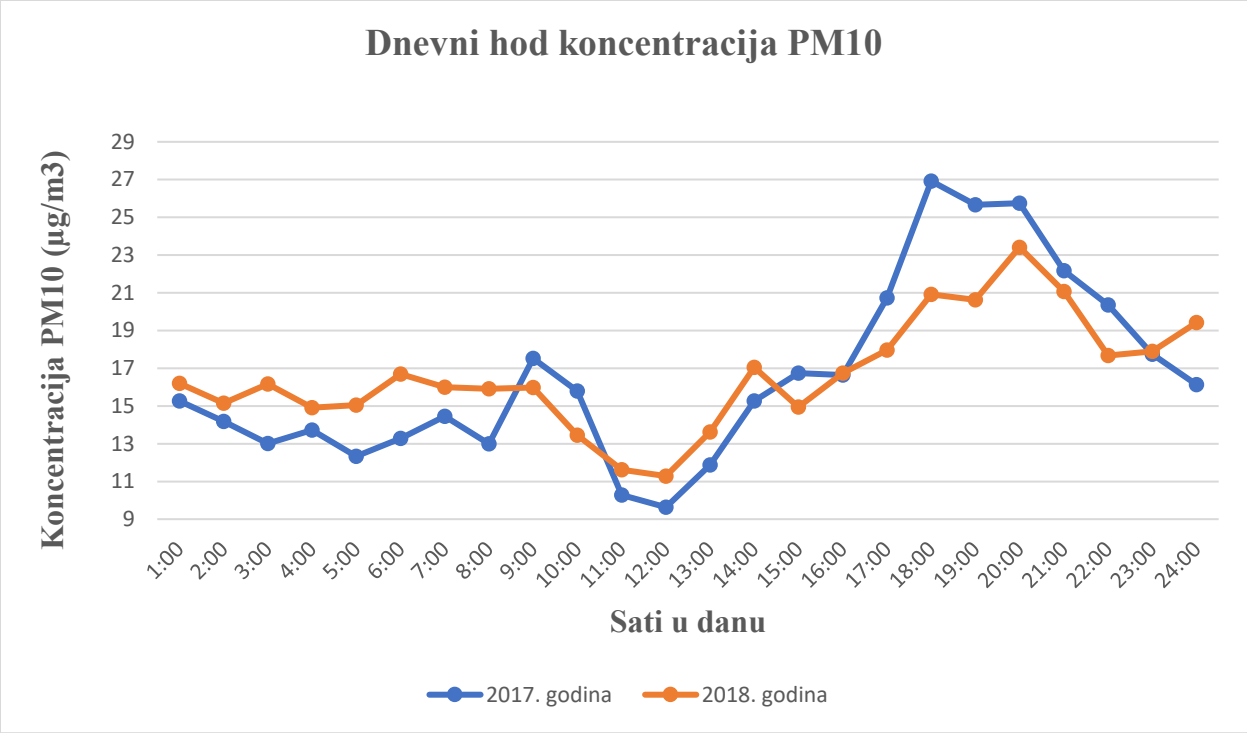
Slika 36 prikazuje prosječne dnevne koncentracije lebdećih čestica PM2,5 kroz godišnja doba na mjernoj postaji Rijeka-2 za 2017. i 2018. godinu. Iz histograma se može uočiti kako su najviše vrijednosti tijekom 2017. godine zabilježene zimi dok su 2018. godine zimi zabilježene najniže koncentracije lebdećih čestica PM2,5 u zraku. U 2017. godini najniže koncentracije su zabilježene tijekom ljeta dok su najviše koncentracije u 2018. godini zabilježene tijekom proljeća.



Slika 36. Prosječne dnevne koncentracije PM2,5 u zraku na mjernoj postaji Rijeka-2 za 2017. i 2018. godinu

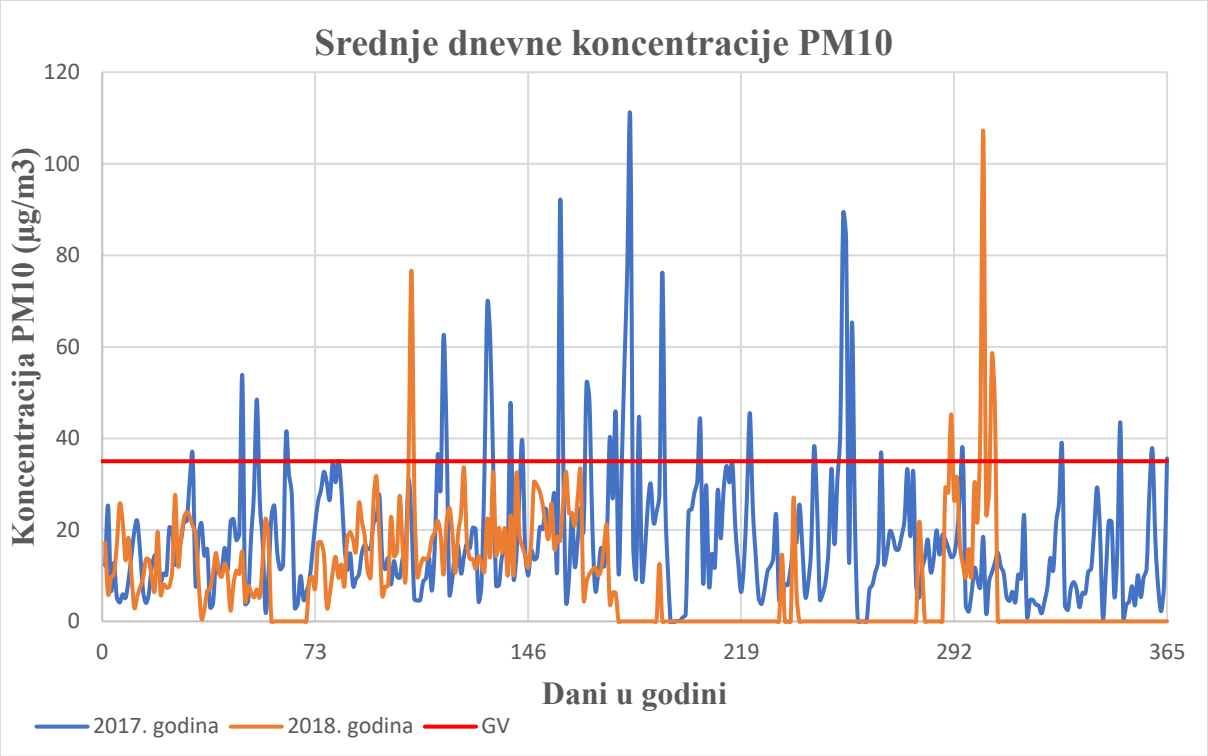
Iz mjerne postaje Rijeka-2 obrađeni su satni izvorni podaci koncentracija lebdećih čestica PM10 za 2017. i 2018. godinu.

Na slici 37 prikazano je kretanje srednjih dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM10 u zraku izmjerenih na mjernoj postaji Rijeka-2 za 2017. i 2018. godinu. Mogu se uočiti večernji maksimumi te popodnevni minimumi. Najviša zabilježena vrijednost koncentracija lebdećih čestica PM10 je bila 2017. godine u 16:00 te je iznosila 26,92 µg/m^3, dok je najniža koncentracija zabilježena iste godine u 12:00 i iznosila je 9,63 µg/m^3.



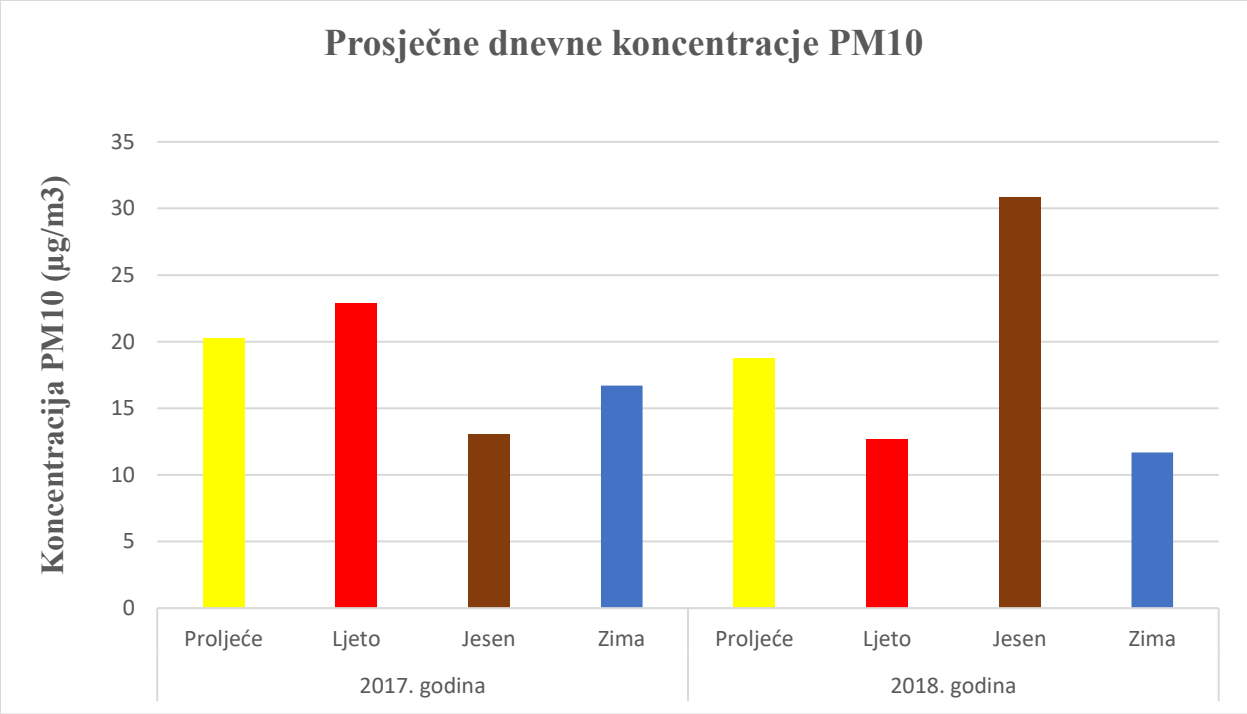
Slika 37. Dnevni hod koncentracija lebdećih čestica PM10 u zraku na mjernoj postaji Rijeka-2 za 2017. i 2018. godinu

Na slici 38 prikazano je kretanje srednjih dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM10 u zraku izmjerenih na mjernoj postaji Rijeka-2 za 2017. i 2018. godinu. Može se uočiti da koncentracije lebdećih čestica PM10 variraju, ali su ipak tijekom ljeta vidljivi maksimumi koncentracija. Najviša vrijednost koncentracija lebdećih čestica PM10 zabilježena je 30. lipnja 2017. godine i iznosila je 109,58 µg/m^3. Može se uočiti da je granična vrijednost za 24-satni prosjek PM10 nije prekoračena više od 35 puta u promatranom vremenskom razdoblju.



Slika 38. Kretanje srednjih dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM10 u zraku na mjernoj postaji Rijeka-2 za 2017. i 2018. godinu

Slika 39 prikazuje prosječne dnevne koncentracije lebdećih čestica PM10 kroz godišnja doba na mjernoj postaji Rijeka-2 za 2017. i 2018. godinu. Iz histograma se može uočiti da su tijekom 2017. godine najviše vrijednosti koncentracija lebdećih čestica PM10 zabilježene ljeti, najniže tijekom jeseni. Tijekom 2018. godine najviše vrijednosti su zabilježene tijekom jeseni dok su tijekom zime zabilježene najniže koncentracije.

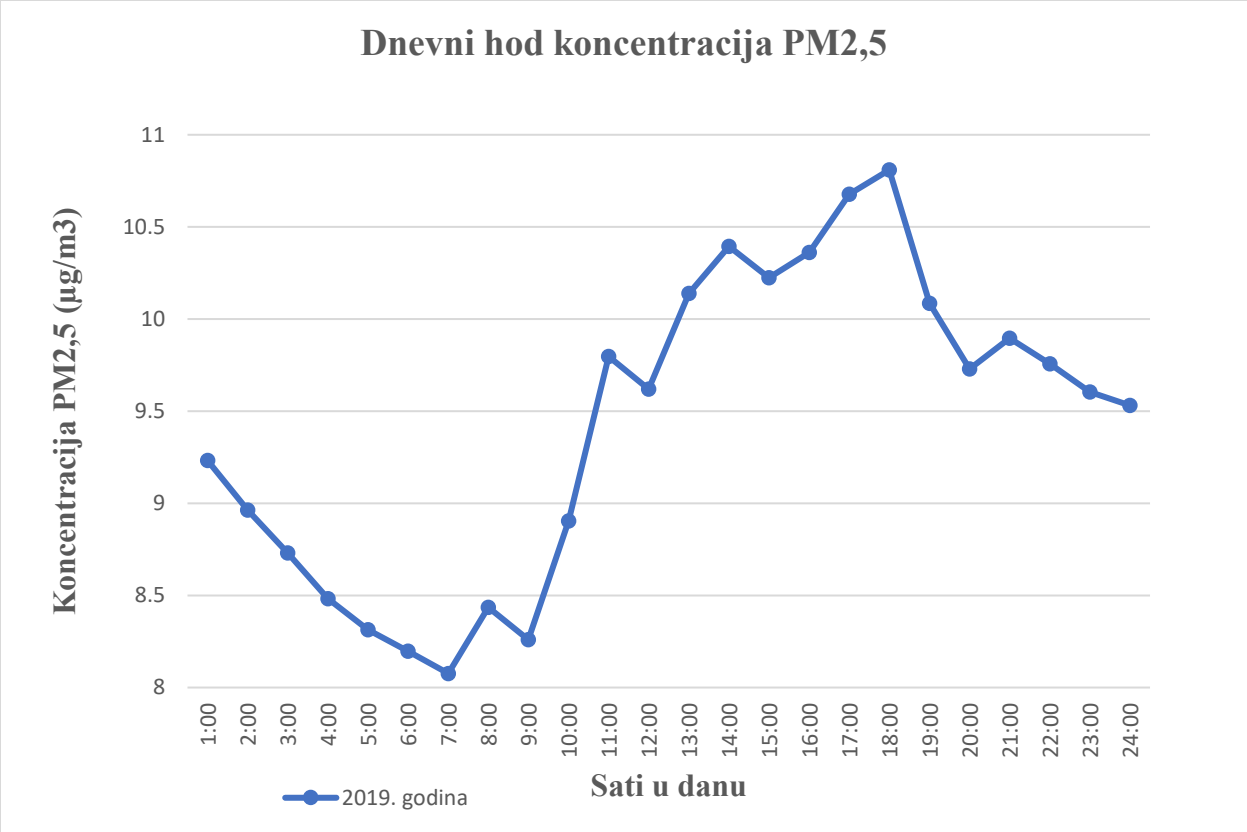


Slika 39. Prosječne dnevne koncentracije PM10 u zraku na mjernoj postaji Rijeka-2 za 2017. i 2018. godinu

4.5. Koncentracija lebdećih čestica PM2,5 i PM10 na mjernoj postaji Zračna luka Dubrovnik

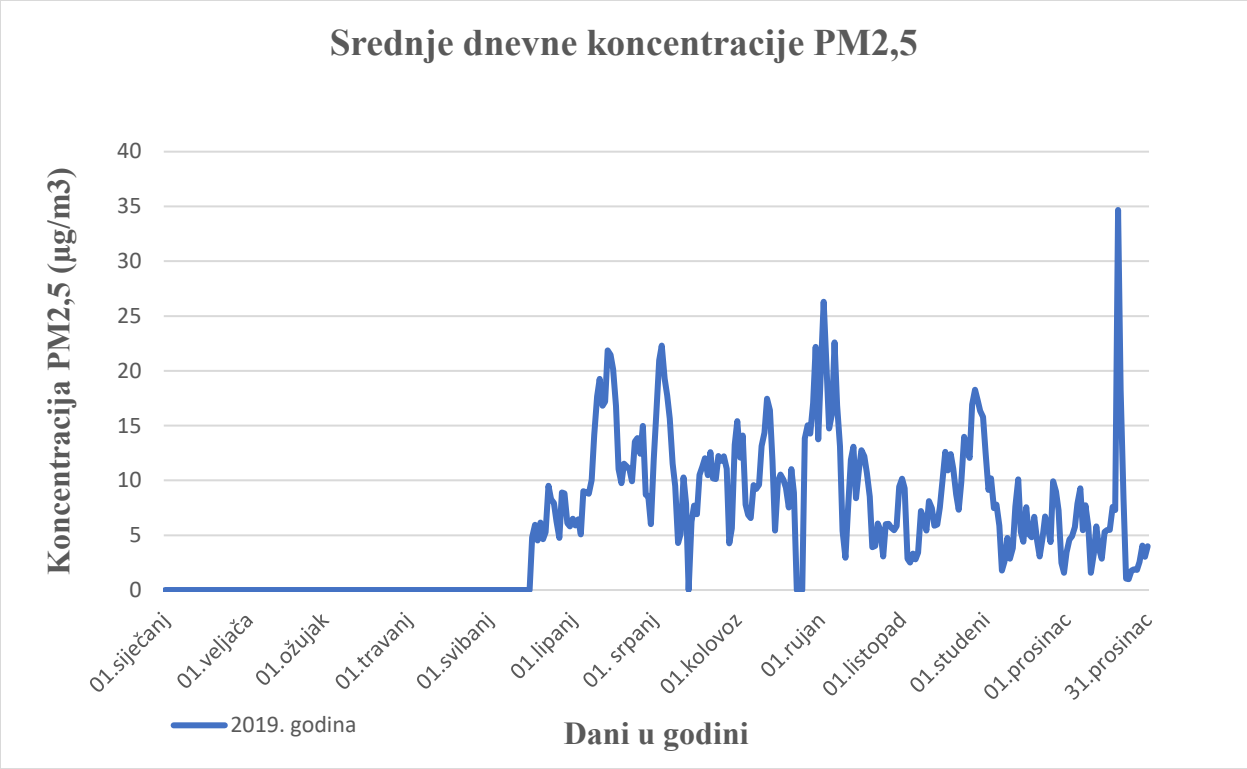
Iz mjerne postaje Zračna luka Dubrovnik obrađeni su satni izvorni podaci koncentracija lebdećih čestica PM2,5 za 2019. godinu. Mjerna postaja je počela sa svojim radom od 17.04.2019. pa su svi podaci koji su preuzeti od 17.05.2019. pa do kraja godine.

Na slici 40 prikazano je kretanje srednjih dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM2,5 u zraku izmjerenih na mjernoj postaji Zračna luka Dubrovnik za 2019. godinu. Mogu se uočiti podnevni i večernji maksimumi te jutarnji minimumi. Najviša zabilježena vrijednost tijekom godine bila je u 18:00 te je iznosila 10,81 µg/m^3, a najniža je zabilježena u 7:00 i iznosila je 8,07 µg/m^3.



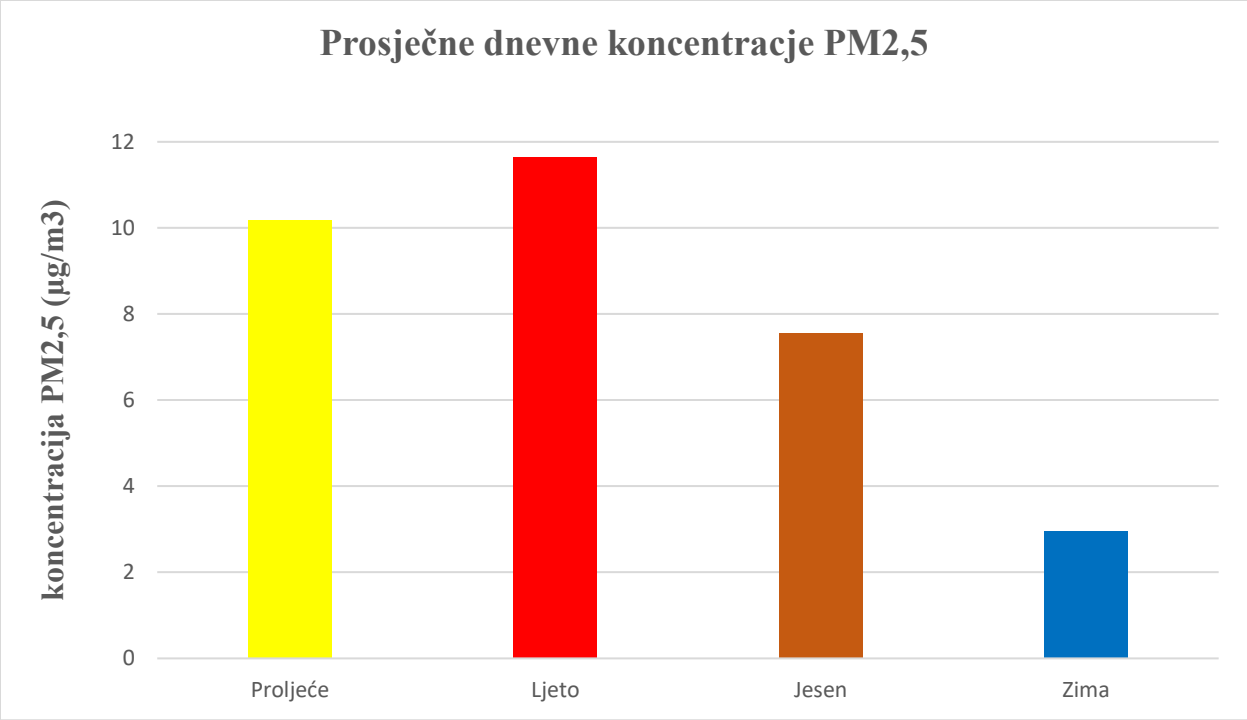
Slika 40. Dnevni hod koncentracija lebdećih čestica PM2,5 u zraku na mjernoj postaji Zračna luka Dubrovnik za 2019. godinu

Na slici 41 prikazano je kretanje srednjih dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM2,5 u zraku izmjerenih na mjernoj postaji Zračna luka Dubrovnik za 2019. godinu. Može se uočiti kako do 17.05.2019. nema podataka. Vidljivo je da koncentracije lebdećih čestica PM2,5 variraju tijekom ostatka godine. Najviša izmjerena vrijednost bila je 20.prosinca i iznosila je 34,68 µg/m^3.



Slika 41. Kretanje srednjih dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM2,5 u zraku na mjernoj postaji Zračna luka Dubrovnik za 2019. godinu

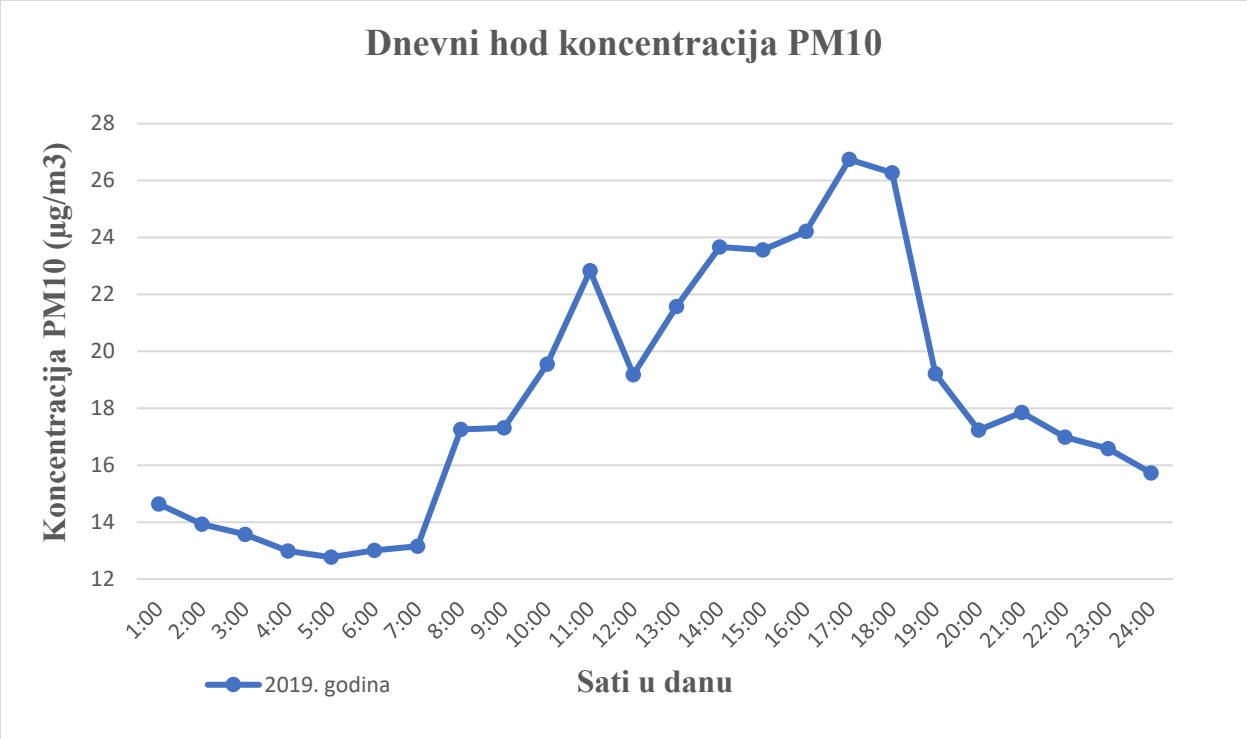
Slika 42 prikazuje prosječne dnevne koncentracije lebdećih čestica PM2,5 kroz godišnja doba na mjernoj postaji Zračna luka Dubrovnik za 2019. godinu. Iz histograma se može uočiti kako su maksimalne koncentracije lebdećih čestica PM2,5 zabilježene tijekom ljeta, a najniže koncentracije tijekom zime.



Slika 42. Prosječne dnevne koncentracije PM2,5 u zraku na mjernoj postaji Zračna luka Dubrovnik za 2019. godinu

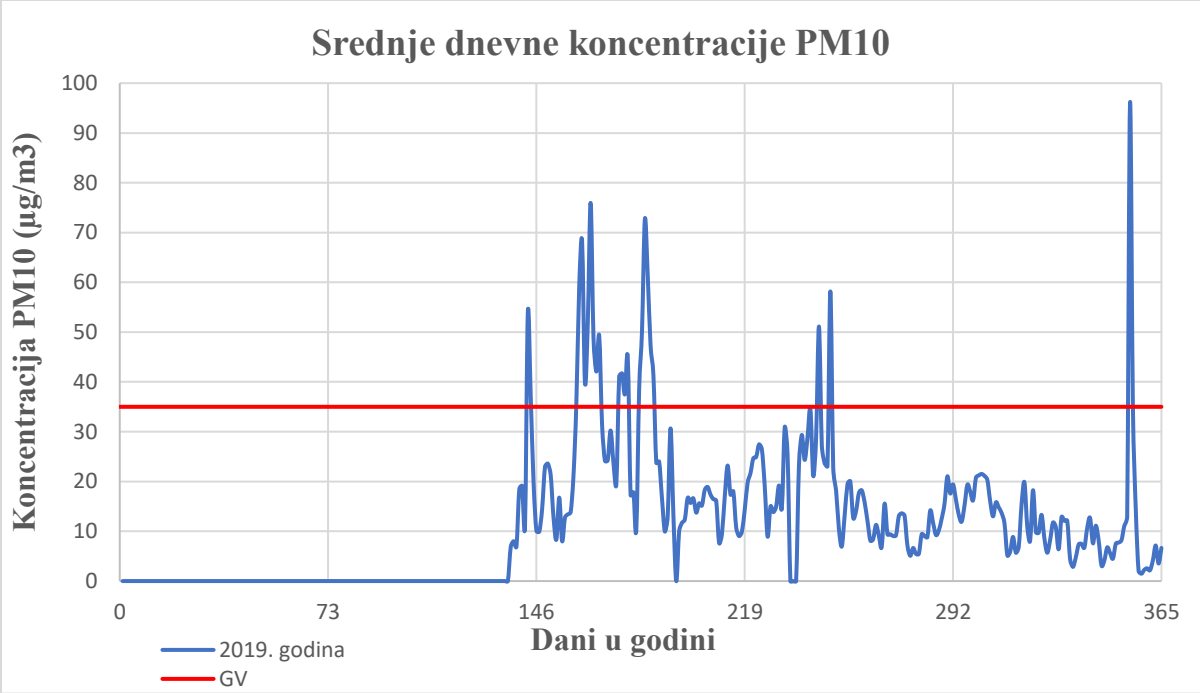
Iz mjerne postaje Zračna luka Dubrovnik obrađeni su satni izvorni podaci koncentracija lebdećih čestica PM10 za 2019. godinu. Mjerna postaja je počela s radom od 17.04.2019. pa su svi podaci koji su preuzeti od 17.05.2019. pa do kraja godine.

Na slici 43 prikazano je kretanje srednjih dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM10 u zraku izmjerenih na mjernoj postaji Zračna luka Dubrovnik za 2019. godinu. Mogu se uočiti podnevni maksimumi, te jutarnji minimumi. Najviša zabilježen koncentracija lebdećih čestica PM10 bila je u 17:00 te je iznosila 26,74 µg/m^3, dok je najniža zabilježena u 5:00 i iznosila je 12,77 µg/m^3.



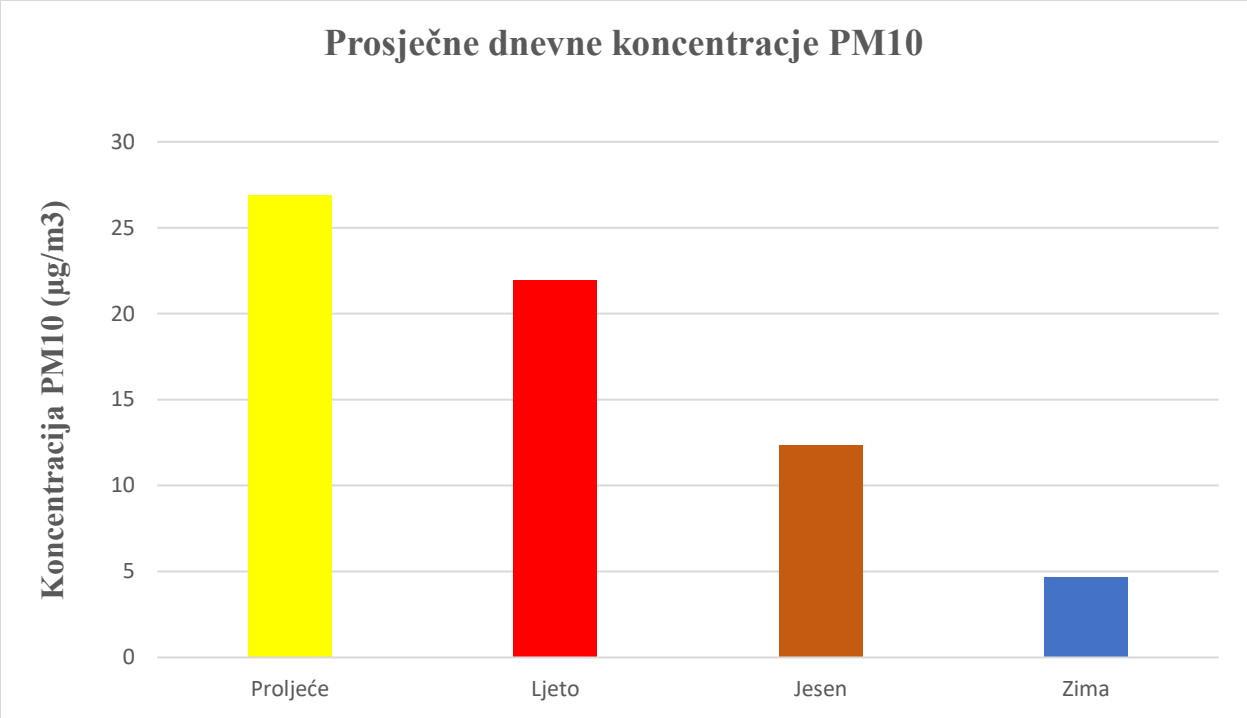
Slika 43. Dnevni hod koncentracija lebdećih čestica PM10 u zraku na mjernoj postaji Zračna luka Dubrovnik za 2019. godinu

Na slici 44 prikazano je kretanje srednjih dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM10 u zraku izmjerenih na mjernoj postaji Zračna luka Dubrovnik za 2019. godinu. Može se uočiti kako do 17.05. nema podataka. Tijekom ljetnih mjeseci koncentracije lebdećih čestica PM10 su više u odnosu na zimske mjesece. Ali ipak 20. prosinca uočen je jedan skok koji je ujedno i maksimalna zabilježena vrijednost u toj godini i iznosi 96,05 µg/m^3. Može se uočiti da granična vrijednost za 24-satni prosjek PM10 nije prekoračena više od 35 puta u promatranom vremenskom razdoblju.



Slika 44. Kretanje srednjih dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM10 u zraku na mjernoj postaji Zračna luka Dubrovnik za 2019. godinu

Slika 45 prikazuje prosječne dnevne koncentracije lebdećih čestica PM10 kroz godišnja doba na mjernoj postaji Zračna luka Dubrovnik za 2019. godinu. Može se uočiti kako su najviše vrijednosti koncentracija lebdećih čestica PM10 zabilježene u proljeće dok su najniže koncentracije zabilježene zimi.



Slika 45. Prosječne dnevne koncentracije PM10 u zraku na mjernoj postaji Zračna luka Dubrovnik za 2019. godinu

Iz slika 40. - 45. koje prikazuju koncentracije lebdećih čestica PM10 i PM2,5 u zraku na mjernoj postaji Zračna luka Dubrovnik za 2019. godinu vidljivo je kako su povećane koncentracije tijekom ljetnih mjeseci. Zračna luka Dubrovnik u ljetnim mjesecima ima značajan porast broja putnika, što objašnjava veće koncentracije lebdećih čestica PM10 i PM2,5 u zraku na mjernoj postaji Zračna luka Dubrovnik [26].

5. ZAKLJUČAK

Nakon provedene analize može se zaključiti da su prosječne vrijednosti dnevnog hoda za lebdeće čestice PM10 i PM2,5 na većini mjernih postaja više tijekom večeri i ranih jutarnjih sati. Izuzetak su mjerne postaja Zagreb-1 gdje koncentracije lebdećih čestica PM10 maksimume imaju u kasnim jutaranjim satima i mjerna postaja Zračna luka Dubrovnik gdje lebdeće čestice PM10 i PM2,5 svoje maksimalne vrijednosti imaju u popodnevnim satima.

Srednje dnevne koncentracije lebdećih čestica PM10 i PM2,5 na većini mjernih postaja veće su tijekom zimskih mjeseci, a izuzetak su mjerne postaje u Rijeci i Dubrovniku gdje su maksimalne vrijednosti zabilježene u ljetnim mjesecima. Uzrok povećanja koncentracija lebdećih čestica PM10 i PM2,5 na mjernim postajama tijekom zime može biti sagorijevanje biomase i fosilnih goriva, a uzrok povećanja koncentracija tijekom ljetnih mjeseci na mjernim postajama u Rijeci i Dubrovniku može biti turistička sezona. Na isti zaključak navode histogrami koji prikazuju prosječne dnevne koncentracije lebdećih čestica PM10 i PM2,5 kroz godišnja doba. Na većini mjernih postaja maksimalne koncentracije zabilježene su tijekom jeseni i zime. Izuzetak su mjerne postaje u Rijeci i Dubrovniku. Najveće prosječne dnevne koncentracije lebdećih čestica PM2,5 na mjernoj postaji Rijeka-2 zabilježene su u proljeće 2018. godine, a najveće vrijednosti za lebdeće čestice PM10 zabilježene su ljeti 2017. godine. Na mjernoj postaji Zračna luka Dubrovnik najveće prosječne dnevne koncentracije lebdećih čestica zabilježene su tijekom ljeta što je uzrokovano izrazitim povećanjem avionskog putničkog prijevoza.

Iz podataka može se zaključiti da na većini mjernih postaja postoji značajna korelacija između lebdećih čestica PM2,5 i PM10. Izuzetak su mjerne postaje Osijek-1 koja ne mjeri koncentraciju lebdećih čestica PM2,5 te mjerna postaja Rijeka-2 kod koje je korelacija između lebdećih čestica PM2,5 i PM10 slaba.

6. LITERATURA

1. Air quality in Europe - 2017 report „Dostupno na:“ file:///C:/Users/PC/Downloads/Air%20Quality%202017%20TH-AL-17-016-EN-N%20-%20page%2018%20corrected%20(1).pdf „Datum pristupa:“ 21.02.2020.

2. Onečišćenje zraka „Dostupno na:“ http://www.zzjzbpz.hr/images/stories/oneciscenje_zraka.pdf „Datum pristupa:“ 07.02.2020.

3. Zakon o zaštiti zraka NN 127/19 „Dostupno na:“ https://www.zakon.hr/z/269/Zakon-o-za%C5%A1titi-zraka „Datum pristupa:“ 07.02.2020.

4. Zrak „Dostupno na:“ https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/Zrak.pdf „Datum pristupa:“ 07.02.2020.

5. T. Sofilić, Zdravlje i okoliš, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2015.

6. J. H. Seinfeld, S. N. Pandis, Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Yersey, 2006

7. WHO: „More than 90% of the world's children breathe toxic air every day“ „Dostupno na:“ https://www.who.int/news-room/detail/29-10-2018-more-than-90-of-the-world%E2%80%99s-children-breathe-toxic-air-every-day „Datum pristupa:“ 07.03.2020.

8. WHO Europe: „Air pollution and climate change“ „Dostupno na:“ http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/Transport-and-health/data-and-statistics/air-pollution-and-climate-change2 „Datum pristupa:“ 07.03.2020.

9. S. Kumar Prajapati, Ecological effect of airborne particulate matter on plants, Environmental Skeptics and Critics, 1 (2012), 12 – 22

10. Temperature and Humidity Effects on Particulate Matter Concentrations in a Sub-Tropical Climate During Winter „Dostupno na:“ https://unitec.researchbank.ac.nz/handle/10652/4299 „Datum pristupa:“ 07.03.2020.

11. NSAI Standards „Ambientair -Standardgravimetric measurement methodfor thedetermination of the PM10 or PM2,5 mass concentrationof suspendedparticulate matter“ „Dostupno na:“ https://infostore.saiglobal.com/preview/98705579385.pdf?sku=857774_saig_nsai_nsai_2040554 „Datum pristupa:“ 08.03.2020.

12. Kostur L. *Mjerenje koncentracije krutih čestica u zraku.* Diplomski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje. 2020.

13. Queensland Government: „Tapered element oscillating microbalance“ „Dostupno na:“ https://www.qld.gov.au/environment/pollution/monitoring/air/airmonitoring/measuring/oscillating-microbalance „Datum pristupa:“ 08.03.2020.

14. Enviro technology services: „Continuous beta-attenuation particulate monitor“ „Dostupno na:“ https://www.et.co.uk/products/air-quality-monitoring/particulate-monitoring/bam1020-2/ „Datum pristupa:“ 09.03.2020.

15. Thermo Fisher scientific: „Beta Attenuation Technology for Particulate Matter Measurement“ „Dostupno na:“ https://www.thermofisher.com/hr/en/home/industrial/environmental/environmental-learning-center/air-quality-analysis-information/beta-attenuation-technology-particulate-matter-measurement.html „Datum pristupa:“ 09.03.2020.

16. Department of ecology, State og Washington: „PM2.5 and PM10 Beta Attenuation Monitor Operating Procedure“ „Dostupno na:“ https://fortress.wa.gov/ecy/publications/documents/1702005.pdf „Datum pristupa:“ 10.03.2020.

17. Comde Derenda: „Particulate matter monitor certified by German TÜV for continuous real-time monitoring of PM2.5 and PM10 concentrations“ „Dostupno na:“ https://www.comde-derenda.com/en/products/apm-2/ „Datum pristupa:“ 10.03.2020.

18. DIREKTIVA 2008/50/ EZ EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA „Dostupno na:“ https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0050&from=EN „Datum pristupa:“ 13.02.2020.

19. HAOP „Detaljni podaci o postaji“ „Dostupno na:“ http://iszz.azo.hr/iskzl/postajad.html?pid=41&mt=0 „Datum pristupa:“ 14.04.2020.

20. Thermo ESM Andersen „Particulate Monitoring Instrument FH 62 I-R (TSP , PM-10) for the continuous Immission measurement“ „Dostupno na:“ https://www.instrumentcompaniet.no/files/THERMO_Datablad/FH62IR-english.pdf „Datum pristupa:“ 14.04.2020.

21. HORIBA „APDA-371 Ambient Dust Monitor“ „Dostupno na:“ https://www.horiba.com/en_en/products/detail/action/show/Product/apda-371-294/ „Datum pristupa:“ 15.04.2020.

22. COMDE DERENDA „Low Volume/Medium Volume Sampler LVS/MVS“ „Dostupno na:“ https://www.comde-derenda.com/en/products/lvs-mvs/ „Datum pristupa:“ 15.04.2020.

23. LVS3 Analyser BROCHURE „Dostupno na:“ https://www.bhb.pt/en/images/Produtos/Analitica/Qualidade_do_Ar/Amostradores_de_Particulas/Brochura_LSV3.pdf „Datum pristupa:“ 15.04.2020.

24. Oxidative Potential of Particulate Matter as a Health-relevant Exposure Metric „Dostupno na:“ https://pdfs.semanticscholar.org/77e0/98c08b084c038f9acc3561d1ce95fffc6317.pdf „Datum pristupa:“ 15.04.2020.

25. SVEN LECKEL „SEQUENTIAL SAMPLER SEQ47/50-CD WITH COOLER“ „Dostupno na:“ http://www.envitech-bohemia.cz/files/003-samplery/05-leckel/06-seq47-50-cd-sequential-sampler-with-cooler/seq47-50-cd---sequential-sampler-with-cooler-en.pdf „Datum pristupa:“ 15.04.2020.

26. Dubrovnik Airport „Statistika“ „Dostupno na:“ https://www.airport-dubrovnik.hr/index.php/hr/o-nama/poslovne-informacije/statistika „Datum pristupa:“ 06.05.2020.

7. POPIS SLIKA

Slika 1. Primarne i sekundarne onečišćujuće tvari

Slika 2. Izvori onečišćujućih tvari u zraku

Slika 3. Usporedba veličina čestica PM10 i PM2,5 sa ljudskom dlakom i zrnom pijeska

Slika 4. Shematski prikaz dišnog sustava čovjeka

Slika 5. Raspored čestica prema veličini u dišnim putovima

Slika 6. Utjecaj onečišćujućih tvari u zraku na ljudsko zdravlje

Slika 7. Shema gravimetrijskog uređaja

Slika 8. Jednostavna shema sustava s oscilirajućom mikrovagom

Slika 9. Shema metode upijanja β-zračenja

Slika 10. Shema metode raspršenja laserskog svijetla

Slika 11. Prikaz analiziranih mjernih postaja

Slika 12. Mjerna postaja Zagreb-1

Slika 13. Mjerna postaja Osijek-1

Slika 14. Mjerna postaja Slavonski Brod-1

Slika 15. Mjerna postaja Slavonski Brod-2

Slika 16. Mjerna postaja Rijeka-2

Slika 17. Prikaz mjernog uređaja Thermo Andersen ESM FH 62 I-R

Slika 18. Prikaz mjernog uređaja Horiba model APDA 371

Slika 19. Prikaz mjernog uređaja LECKEL - LVS 3

Slika 20. Prikaz mjernog uređaja Leckel SEQ47/50

Slika 21. Kretanje srednjih dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM2,5 u zraku na mjernoj postaji Zagreb PPI PM2,5 – Ksaverska cesta za 2017. i 2018. godinu.

Slika 22. Prosječne dnevne koncentracije PM2,5 u zraku na mjernoj postaji Zagreb PPI PM2,5 – Ksaverska cesta za 2017. i 2018. godinu.

Slika 23. Dnevni hod koncentracija lebdećih čestica PM10 u zraku na mjernoj postaji Zagreb-1 za 2017., 2018. i 2019. godinu

Slika 24. Kretanje srednjih dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM10 u zraku na mjernoj postaji Zagreb-1 za 2017., 2018. i 2019. godinu

Slika 25. Prosječne dnevne koncentracije PM10 u zraku na mjernoj postaji Zagreb-1 za 2017., 2018. i 2019. godinu

Slika 26. Dnevni hod koncentracija lebdećih čestica PM10 u zraku na mjernoj postaji Osijek-1 za 2017., 2018. i 2019. godinu

Slika 27. Kretanje srednjih dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM10 u zraku na mjernoj postaji Osijek-1 za 2017., 2018. i 2019. godinu

Slika 28. Prosječne dnevne koncentracije PM10 u zraku na mjernoj postaji Osijek-1 za 2017., 2018. i 2019. godinu

Slika 29. Dnevni hod koncentracija lebdećih čestica PM2,5 u zraku na mjernoj postaji Slavonski Brod-1 za 2017., 2018. i 2019. godinu

Slika 30. Kretanje srednjih dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM2,5 u zraku na mjernoj postaji Slavonski Brod-1 za 2017., 2018. i 2019. godinu

Slika 31. Prosječne dnevne koncentracije PM2,5 u zraku na mjernoj postaji Slavonski Brod-1 za 2017., 2018. i 2019. godinu

Slika 32. Dnevni hod koncentracija lebdećih čestica PM10 u zraku na mjernoj postaji Slavonski Brod-2 za 2017., 2018. i 2019. godinu

Slika 33. Kretanje srednjih dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM10 u zraku na mjernoj postaji Slavonski Brod-2 za 2017., 2018. i 2019. godinu

Slika 34. Prosječne dnevne koncentracije PM10 u zraku na mjernoj postaji Slavonski Brod-2 za 2017., 2018. i 2019. godinu

Slika 35. Kretanje srednjih dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM2,5 u zraku na mjernoj postaji Rijeka-2 za 2017. i 2018. godinu

Slika 36. Prosječne dnevne koncentracije PM2,5 u zraku na mjernoj postaji Rijeka-2 za 2017. i 2018. godinu

Slika 37. Dnevni hod koncentracija lebdećih čestica PM10 u zraku na mjernoj postaji Rijeka-2 za 2017. i 2018. godinu

Slika 38. Kretanje srednjih dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM10 u zraku na mjernoj postaji Rijeka-2 za 2017. i 2018. godinu

Slika 39. Prosječne dnevne koncentracije PM10 u zraku na mjernoj postaji Rijeka-2 za 2017. i 2018. godinu

Slika 40. Dnevni hod koncentracija lebdećih čestica PM2,5 u zraku na mjernoj postaji Zračna luka Dubrovnik za 2019. godinu

Slika 41. Kretanje srednjih dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM2,5 u zraku na mjernoj postaji Zračna luka Dubrovnik za 2019. godinu

Slika 42. Prosječne dnevne koncentracije PM2,5 u zraku na mjernoj postaji Zračna luka Dubrovnik za 2019. godinu

Slika 43. Dnevni hod koncentracija lebdećih čestica PM10 u zraku na mjernoj postaji Zračna luka Dubrovnik za 2019. godinu

Slika 44. Kretanje srednjih dnevnih koncentracija lebdećih čestica PM10 u zraku na mjernoj postaji Zračna luka Dubrovnik za 2019. godinu

Slika 45. Prosječne dnevne koncentracije PM10 u zraku na mjernoj postaji Zračna luka Dubrovnik za 2019. godinu

8. POPIS TABLICA

Tablica 1. Gornji i donji pragovi procjene za zaštitu ljudi u RH

Tablica 2. Gornji i donji pragovi procjene za zaštitu ljudi u EU

Tablica 3. Prikaz mjernih uređaja na mjernim postajama