

Projekta atskaite

PĒTĪJUMS
PAR RĪGAS GAISA KVALITĀTI VIETĀS AR TRŪKSTOŠIEM
DATIEM, IZMANTOJOT TIEŠSAISTES BEZVADU
SENSORU TĪKLU

Projekta pasūtītājs - Rīgas Domes Mājokļu un vides departaments
(2018. gada 2. februāra līgums Nr. DMV-18-49-lī)

Projekta autors – SIA „Vidzemes Elektrotehnikas Fabrika”

Rīga
2018

Saturs

Ievads	3
1. GAISA PIESĀRŅOJUMA PROBLEMĀTIKA UN ZEMU IZMAKSU SENSORU PAMATOJUMS.....	4
2. SENSORI GAISA KVALITĀTES PIESĀRŅOJUMA MĒRĪJUMIEM	5
2.1. Sensoru vispārīgs raksturojums	5
2.2. Signālu apstrādes principi un algoritmi	7
2.3. Zemu izmaksu sensoru sistēmu reprezentativitātes snieguma izvērtējums un to precizitātes uzlabošanas iespējas.....	11
2.4. Tirgū pieejamo vides gaisa kvalitātes sensoru sistēmu apskats.....	12
3. PĒTĪJUMA PROJEKTĀ IZSTRĀDĀTAIS SENSORU TĪKLS. VIETU RAKSTUROJUMS. .	17
3.1. Pētījumā izmantotās sensoru sistēmas raksturojums	17
3.2. Pētījuma vietu raksturojums	18
4. REZULTĀTI	25
4.1. Sensoru un references iekārtu mērījumu rezultātu salīdzinājums.....	25
4.2. Sensoru mērījumu rezultāta novērtējums citās stacijās bez references mērījumiem	34
4.3. Sensoru mērījumu rezultātu izvērtējums rudens sezonā.....	37
4.4. Sensoru mērījumu rezultātu un meteoroloģisko parametru mainības izvērtējums	39
4.5. Testa vietne sensoru mērījumu rezultātu attēlošanai tiešsaistē	40
Secinājumi.....	42
Izmantotās literatūras saraksts	43
1. Pielikums. Publikācija.	46
2. Pielikums. Konfernces ziņojuma kopsavilkums.	54

Ievads

Projekta „**Pētījums par Rīgas gaisa kvalitāti vietās ar trūkstošiem datiem, izmantojot tiešsaistes bezvadu sensoru tīklu**” ietvaros Rīgas centrā tika uzstādītas piecas ar sensoriem aprīkotas tiešsaistes bezvadu un energoautonomas iekārtas ar mērķi pilnveidot gaisa kvalitātes novērojumu tīklu, attiecīgi:

- paplašināt novērojumu tīklu, papildus iegūstot telpiski pilnīgāku informāciju par gaisa kvalitāti Rīgā;
- iegūt gaisa kvalitātes mērījumus ar iespējami augstāku temporālo izšķirtspēju.

Pētījuma sākumā tika analizētas dažāda sarežģītības līmeņa gaisa kvalitātes sensoru sistēmas no vairākiem aspektiem, lai novērtētu to piemērotību Rīgas pilsētai un atrastu labāko risinājumu. Tika ierīkota gaisa kvalitātes tiešsaistes bezvadu sensoru sistēma. Sensoru sistēma būvēta, balstoties uz tālas darbības zemu frekvenču bezvada tīklu, par bāzes staciju izmantojot vārteju. Viena vārteja spēj ievākt datus no sensoru sistēmām, aptuveni, 2-20 km rādiusā laika intervālā, sākot no 5 minūtēm. Ierīkota viena vārteja datu saņemšanai, viena mobila sensoru sistēma pārvietošanai teleskopiskā mastā ar kalibrētiem NO₂, SO₂, O₃, CO gāzu sensoriem un putekļu PM₁, PM_{2.5} un PM₁₀ sensoru, un četras stacionāras sensoru sistēmas ar sensoriem NO₂, SO₂, O₃, CO gāzu mērīšanai, kā arī gaisa temperatūras un mitruma sensori.

Mērījumu veikšanas periods saskaņā ar projekta prasībām – vismaz divi mēneši. Projekta realizācijas laikā salīdzināti paralēli veiktu sensoru un references iekārtu mērījumi Rīgā, Brīvības ielā 73. Kopumā mērījumu dati no 5 sensoru iekārtām, kas tika izvietotas dažādās vietās Rīgas centrā, tika apkopoti un analizēti laikā no 2018.gada 12.jūnija līdz 16.augustam, kā arī rudens periodā - no 2018.gada 25.oktobra līdz 25.novembrim.

Projekta realizācijas laikā izvirzītais mērķis - iegūt, analizēt un apkopot zinātniskā publikācijā jaunus ilglaicīgus gaisa kvalitātes datus Rīgas centrā, un novērtēt dažādu faktoru ietekmi uz gaisa kvalitātes izmaiņām, izmantojot projektā izstrādātu pašpietiekamu autonomu bezvadu tiešsaistes sensoru sistēmu tīklu **ir sasniegts**.

1. GAISA PIESĀRŅOJUMA PROBLEMĀTIKA UN ZEMU IZMAKSU SENSORU PAMATOJUMS

Gaisa piesārņojuma monitoringam pilsētās tradicionāli tiek izmantotas references iekārtas, kas sniedz ticamus, atkārtojamus un salīdzināmus rezultātus, kuriem ir liela vērtība, it sevišķi, ja references gaisa monitoringa iekārtas tiek ekspluatētas ilgu laiku (vairākus gadus) bez pārtraukumiem, sniedzot iespēju analizēt ilglaicīgās tendences. References iekārtu lielākais trūkums ir to izmaksas - gan pašu iekārtu izmaksas (pārsniedz simts tūkstošus EUR), gan to uzturēšanas izmaksas (vairākus desmitus tūkstošus gadā). References iekārtas parasti ir lielas, un tām ir nepieciešama stabila temperatūra un no ārējās vides slēgta telpa, kurā iekārtu darbināt, kā arī pietiekami liela platība, uz kuras iekārtu uzmontēt. Vietas vai telpas nepieciešamība ierobežo references iekārtu izvietojuma iespējas, īpaši blīvas apbūves teritorijās, pie kurām pieskaitāmi arī pilsētu centri - vietas, kur šāda gaisa kvalitātes mērījumi ir nepieciešami visvairāk. Minēto references iekārtu ierobežojumu un trūkumu dēļ references iekārtas parasti nav pietiekamā daudzumā, lai telpiski nosegtu nepieciešamās pilsētas teritorijas ar mērījumiem.

Rīgā gaisa piesārņojums ir aktuāla problēma, un visnozīmīgākā loma gaisa piesārņojuma veidošanā ir autotransporta radītajiem izmešiem. Pētījuma veikšanas brīdī Rīgas centrā ir tikai viena gaisa monitoringa stacija ar references iekārtām, kas izvietota tiešā transporta satiksmes ietekmē - Brīvības ielā 73. Lai gan gaisa monitoringa stacija Brīvības ielā 73 sniedz vērtīgus ilgtermiņa novērojumus, tomēr ar vienu staciju ir par maz, lai būtu iespējams novērtēt transporta satiksmes radītā gaisa piesārņojuma izkliedi citās Rīgas centra vietās ar intensīvu satiksmi.

Rīgas pilsētas centrā ir nepieciešams paplašināt gaisa piesārņojuma mēriekārtu tīklu iedzīvotāju ietekmes vietās un augstumā, t.i., mērot piesārņojošās vielas gājēju ietvju tuvumā un nelielā augstumā (līdz 3 m). Tīkls ar vairākām šādi izvietotām iekārtām pavērtu iespējas: (1) novērtēt gaisa piesārņojuma telpisko izkliedi ar ievērojami augstāku izšķirtspēju, (2) kvalitatīvāk novērtēt meteoroloģisko apstākļu ietekmi uz gaisa piesārņojumu, (3) novērtēt dažādas intensitātes un rakstura transporta plūsmu ietekmi uz gaisa piesārņojumu, (4) analizēt un modelēt gaisa piesārņojuma raksturu atkarībā no transporta, laikapstākļu un citu faktoru mijiedarbības. Tā kā tradicionālās references gaisa monitoringa mēriekārtas šādam mērķim ir sarežģīti pielāgojamas un ļoti dārgas, ir jāmeklē lētāki alternatīvi risinājumi

Pēdējos gados pasaulē strauji attīstās dažādu zemu izmaksu sensoru izstrādes gaisa kvalitātes noteikšanai, kā arī uzlabojas sensoru jutība un precizitāte, kas ir bijis šķērslis zemu izmaksu sensoru straujai ienākšanai gaisa kvalitātes monitoringa nozarē (Miskell et al., 2017). Attīstās arī tehnoloģijas

ildināt tradicionālo references iekārtu gaisa monitoringa tīklu, bet šādas iekārtas spēj arī darboties kā agrās brīdināšanas sistēmas, laicīgi brīdinot par gaisa piesārņojuma līmeņa celšanos vai kādas bīstamas vielas noplūšanu gaisā, ar ievērojami labāku telpisko izšķirtspēju (Rai et al., 2017). Ņemot vērā zemu izmaksu sensoru priekšrocības, ir vērts apsvērt šādu iekārtu ieviešanu kā papildinājumu gaisa kvalitātes monitoringa tīklā arī Rīgā.

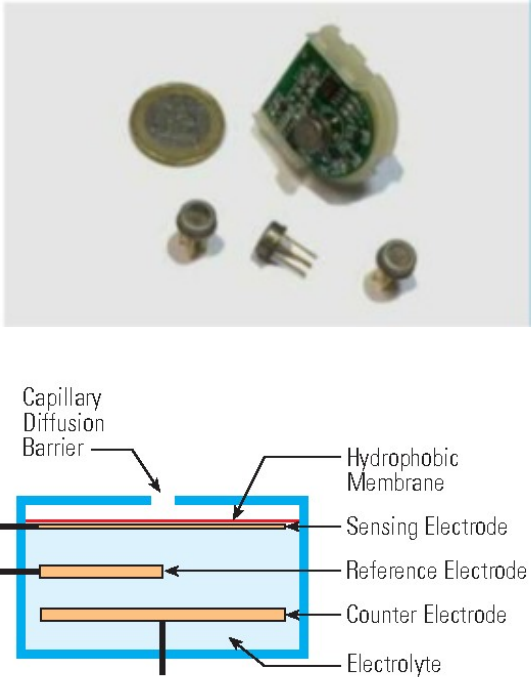
2. SENSORI GAISA KVALITĀTES PIESĀRŅOJUMA MĒRĪJUMIEM

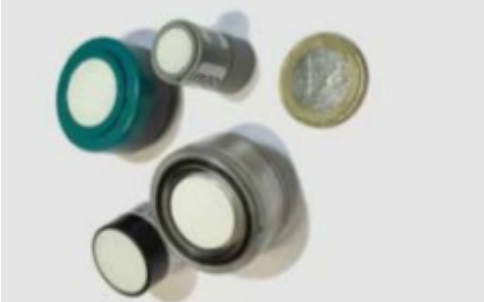
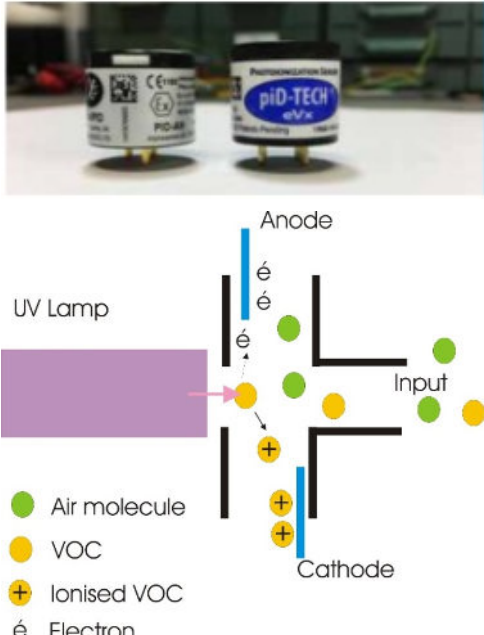
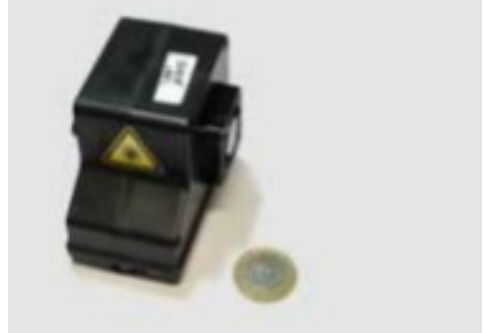
2.1. Sensoru vispārīgs raksturojums

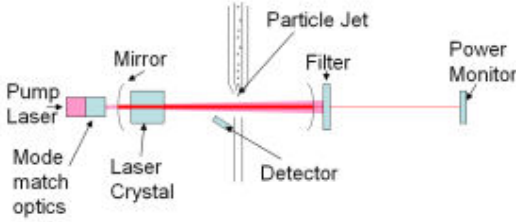
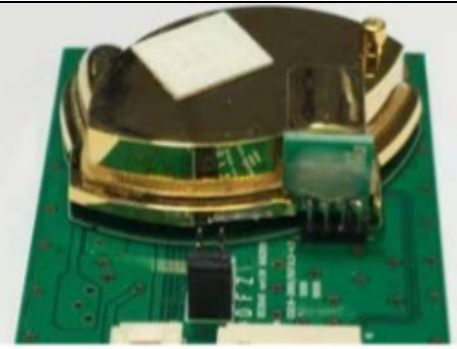
Šobrīd globālajā tirgū ir pieejami (nopērkami) dažādu tehnoloģiju sensori gaisa kvalitātes piesārņojuma mērījumiem: metāla oksīda sensori, elektrovadoša polimēra gāzes sensori, pjezoelektriskie, elektroķīmiskas šūnas, optisko šķiedru sensori, akustisko viļņu sensori, katalītisko lodīšu sensori un citi (skat 1.attēlu zemāk). Neatkarīgi no datu ieguves, ierīces veida, mērījumu principa, sensoram:

- rezultāti ir jāsniedz momentāni,
- mērījumam ir jābūt reproducējamam jeb atkārtojamam un ar atgriezenisku reakciju specifiskai gāzei vai aerosolu maisījumam.

Pētījumos un lauka studijās pēdējo desmit gadu periodā pierādīts, ka metāla oksīdu sensori spēj kvalitatīvi identificēt visai plašu gāzveida vielu spektru, - O_2 , H_2 , CO , NO_2 un virkni gaistošu organisko vielu - propānu, metānu, etanolu, metanolu, acetonu un citas (Bene et al., 2000; Hsueh et al., 2007; Yang et al., 2009; Wallgren & Sotiropoulos, 2009). Plašajā sensoru spektrā kā vieni no daudzsoļākajiem tiek uzskatīti metāla oksīdu sensori, kuri ir pietiekami lēti un spēj identificēt piesārņojošo vielu koncentrācijas “ppm” līmenī (Fine et al., 2010; Kanan et al., 2009). Cita, salīdzinoši viegli pieejama, alternatīva - arvien populārāki kļūst biosensori, t.sk. arī māklīgi radīti sensori, kuru darbība balstīta uz biomimikriju.

	Elektroķīmisko sensoru darbības pamatā - ķīmiskā reakcijas starp piesārņojošo gāzi gaisā un elektrolītu. Sensori izmantojami NO_2, SO_2, NO un CO gāzu koncentrāciju noteikšanai, vidējās izmaksas par sensoru ir , sākot no 300 EUR. Tiem ir laba jutība – spēj noteikt piesārņojumu mg/m^3-$\mu g/m^3$ robežās, un ātra reaģētspēja (30-200 sek.). Augsta jutība pret temperatūras un relatīvā mitruma izmaiņām (atkarībā no elektrolīta), augsta šķērselektivitāte līdzīgu molekulu gadījumā.
---	--

	Metāla oksīdu sensori, gāzu koncentrācija tiek noteikta, balstoties uz pretestības izmaiņām. Biežāk izmantotie metāla oksīdi – ZnO, WO₃, un citi. Iespējams veikt NO₂, O₃, CO un citu, t.sk. gaistošo organisko vielu, mērījumus; izmaksas - mazākas par 100 EUR par sensoru, laba jutība (mg/m³ – µg/m³). Mērījumu rezultātus ietekmē relatīvais mitrums un gaisa temperatūra, atkarībā no mērāmām gāzēm, mērījumu veikšana iespējama 5 - 50 min. ekspozīcijai.
 UV Lamp Anode Cathode Input ● Air molecule ● VOC ⊕ Ionised VOC é Electron	Fotojonizācijas sensori bieži tiek izmantoti GOS mērījumu veikšanai. To izmaksas ir 400 - 5000 EUR par sensoru, augstākās izmaksas mobilām ar sensoru aprīkotām iekārtām, augsta jutība mg/m³ - µg/m³, temperatūras un relatīvā mitruma izmaiņas praktiski neietekmē, atkārtotu mērījumu veikšana iespējama ik pēc dažām sekundēm. Šie sensori nav selektīvi, parasti iespējams izmērīt visu GOS grupu (ko jonizē UV lampā), bet ne atsevišķas gāzes.
	Optiskie daļiņu skaitītāji tiek izmantoti sīko daļiņu (PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀) noteikšanai. Izmaksas ir 300 – 2000 EUR (mobilās iekārtas). Šiem sensoriem ir augsta jutība – 1 µg/m³, ekspozīcija – 1 sek. Būtiskākie trūkumi – pēc daļiņu skaitīšanas pāreja no skaita uz masas koncentrācijām tiek veikta, balstoties uz matemātiski vidējo / raksturīgāko noteikšanas algoritmu, un rezultāts ir atkarīgs no daļiņu formas, krāsas, blīvuma, mitruma, un berzes indeksa.

	
	Optiskie sensori tiek izmantoti gāzveida piesārņojuma mērījumiem. To cena ir 100 - 350 EUR par sensoru, 2000 EUR – mobilām iekārtām, tiem ir laba jutība – CO₂ (30 - 2000 ppm), ekspozīcija 20 - 120 sek. Mērījumiem nepieciešama temperatūras, relatīvā mitruma un spiediena korekcija.

1. attēls. Biežāk izmantoto sensoru īss raksturojums

2.2. Signālu apstrādes principi un algoritmi

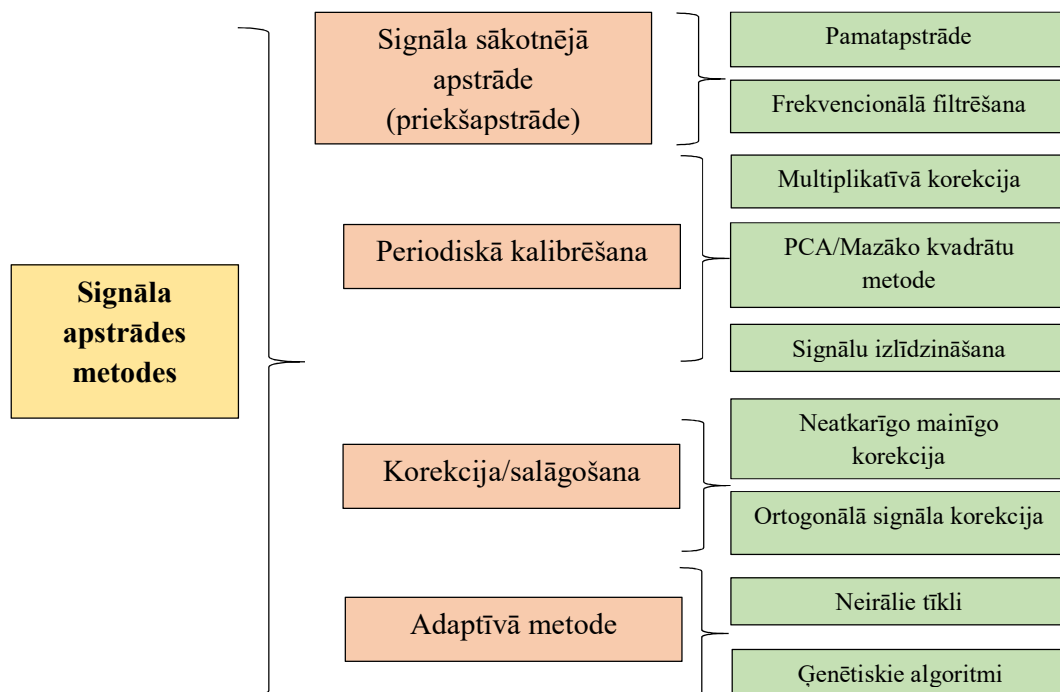
Galvenie sensoru darbības raksturojošie parametri ir šādi:

- **jutība** – sensora izejas signāla izmaiņas attiecībā uz ienākošo signālu jeb attiecība starp diviem nehomogēniem lielumiem – izejas signālu un ienākošajiem mērījumiem;
- **reakcijas laiks** – norāda laiku, kad sensora signāla vērtība no 10% sasniedz 90% stabilu vērtību;
- **reģenerācijas laiks** – norāda laiku, kad sensora signāla vērtība pāriet no 90% uz 10%, lai no jauna sasniegtu stabilu stāvokli pēc reģenerācijas norises;
- **rezolūcija (izšķirtspēja)** – minimālā novirze ienākošo signālu apjomā, uz kuru sensors spēj reaģēt konkrētā signālu - traucējumu proporcijā;
- **noteikšanas robeža** – minimālā gāzes koncentrācija, ko sensors spēj konstatēt;
- **selektivitāte** – raksturo sensora spēju izšķirt noteiktus ienākošos mērījumu datus no mērījumiem, kas pieder pie citas grupas;
- **signāla nobīde** – sensora izejas signāla izmaiņas, kas radušās, piemēram, sensora materiāla vai elektronikas dēļ;
- **stabilitāte** – sensora reakcija, saglabājot nemainību laikā;
- **atkārtojamība** – sensora nemainīga reakcija pret fiksētiem mērījumiem vairākos atkārtojumos (*Brattoli et al., 2011*).

Sensora ienākošais signāls visbiežāk ir ķīmiskas vai fizikālas reakcijas rezultāts jeb koncentrācija vienai vai vairākām gāzveida vielām, savukārt izejošais signāls ir atkarīgs no transdukcijas mehānisma, kas parasti ir kāda no sensora jutīgā elementa fizikālajām īpašībām – elektrovadītspēja vai citi elektriski rādītāji, svārstību biežums jeb frekvence, temperatūra, elektroķīmiskais potenciāls vai optiskās īpašības (Janata, 2009). Vispārīgi to sauc par sensora reakcijas atbildi.

Piemēram, alvas oksīda gāzu sensora uztveršanas īpašības ir balstītas uz alvas dioksīda vadītspēju. Sensors sastāv no nelieliem alvas dioksīda graudiem. Tā jutība ir saistīta ar zaudēto elektronu slāni virs alvas dioksīda graudiem. Slānis izveidojas, kad skābeklis tiek adsorbēts, saistot elektronus no oksīda. Tādā veidā tiek izraisīts pretestības pieaugums uz graudu virsmas. Kad strāva pāriet no viena grauda uz citu, tai ir jāšķērso šie slāņi, kas tādējādi nosaka sensora pretestību. Sensora jutīgums jeb atbildes reakcija uz reducējošām vai oksidējošām gāzēm tiek noteikta pēc šo savienojumu adsorbcijas un adsorbcijā zaudētajiem vai pievienotajiem elektroniem (Sberveglieri, 1992).

Sensoru signālu apstrādes metodes var nosacīti iedalīt četrās galvenajās kategorijās: sensora signāla priekšapstrāde, periodiska kalibrēšana, salāgošanas metodes un adaptīvās metodes (2. att. zemāk).



2. attēls. Signālu nobīdes apstrādes metodes (sagatavots pēc *Di Carlo & Falasconi, 2012*).

Sensora signāla pamatapstrāde – apstrāde novirzes izlīdzināšanai, noteiktu sensora signālu transformācija, kas balstīta uz „izlecošo” vērtību likvidēšanu mērījuma laikā (Gardner & Bartlett, 1999).

Frekvencionālā filtrēšana - balstās uz tās datu daļas transformāciju, kurā atrodas „izlecošas” vērtības. Parasti šādas vērtības atrodas citā frekvenču apgabalā, attiecībā uz interesējošiem jeb mērķa signāliem. Izvēloties piemērotu sensora signāla transformāciju no laika uz frekvenču apgabalu un, veicot rūpīgu zemāko frekvenču sastāvdaļu likvidēšanu, iespējams izvairīties no nobīdes vērtībām datu rindās (Di Carlo & Falasconi, 2012).

Noviržu korekcijas metodes ir balstītas uz noviržu ietekmes novērtējumu, lai vēlāk varētu likvidēt nobīdes signālus. Noviržu ietekmes novērtējumu var veikt, piemēram, mērot izmaiņas sensora atbildes reakcijās uz vienu vai vairākām etalongāzēm eksperimenta laikā.

Vienfaktora kalibrēšana ir vienkāršākā metode, kurā tiek izmantota references vērtība, piemēram, sensora atbildes reakcija uz etalongāzi, pēc tam visi sekojošie sensora lasījumi tiek individuāli pielāgoti (Di Carlo & Falasconi, 2012). Biežāk izmantojamās korekcijas metodes ir šādas:

- 1) *Multiplikatīvā korekcija* - tiek izmantota, lai modelētu sistēmas īslaicīgas izmaiņas laikā, izmantojot korekcijas koeficientu. Koeficients tiek iegūts kalibrācijas gāzu mērījumos un pēc tam piemērots faktiskajiem paraugiem. Labāku rezultātu iegūšanai var veikt atkārtotu kalibrēšanu divos posmos – veikt mērījumu vienai sensora atbildes reakcijai, lai izlīdzinātu īstermiņa tendences, un veikt mērījumus starp atbildes reakcijām, lai kompensētu ilgtermiņa fluktuācijas (Fryder et al., 1995; Haugen et al., 2000). Šāda stratēģija tiek izmantota komerciālajiem gāzes sensoriem.
- 2) *Galveno komponentu analīze / Mazāko kvadrātu metode* - mērījumi, kas veikti ar vairākiem ķīmiskajiem sensoriem, var saturēt vairākas izlecošas vērtības, taču kopumā šie rezultāti ir kolineāri. Galveno komponentu analīze ir plaši pazīstama datu normalizēšanas metode, lai varētu efektīvi reprezentēt iegūto informāciju (Wold et al., 1987).

Galveno komponentu analīzē mērījumu variāciju telpā iespējams aptvert ar divu veidu matricām. Viena no slodzes matricām reprezentē jaunu koordinātu sistēmu, kurā projicēts vektors no mērījumos iegūtām vērtībām. Savukārt otra rezultatīvā matrica reprezentē mērījumu vērtību koordinātas. Ja sensora atbildes reakcija uz noteiktu etalongāzi satur ievērojamu nobīdīto vērtību apjomu, pēc komponenta ar vislielāko variāciju ir iespējams noteikt virzienu, kurā datu dispersija ir vislielākā. Tas ir pamatots ar faktu, ka sensors vienmēr reaģēs uz to pašu gāzi un atbildes reakcija būs vienāda, izņemot gadījumus ar nejaušiem traucējumiem. Signālu nobīdes apstrādi var īstenot no sākotnējiem datiem atņemot bilineāru izteiksmi, kas reprezentē aptuvenas nobīžu vērtības, tādā veidā tiek iegūta normalizēta datu kopa. Ar viena komponenta izņemšanu no datu kopas parasti ir pietiekami, ja signālu nobīdes radušās sensoru ilgstošas ekspluatācijas rezultātā. Konstatējot vairākus nelineārus nobīdes efektus, piemēram, sensora ekspluatācijas un ķīmiskā fona ietekmē, no datu kopas ir iespējams atdalīt vairākus komponentus (Di Carlo & Falasconi, 2012).

Mazāko kvadrātu metode - ir iespējams noteikt saistību starp divām mainīgos saturošām kopām izmantojot ortogonālas vektoriālas vērtības. Nobīdes vērtības tiek

aprēķinātas, izmantojot šo vektoru vērtības. Līdzīgi kā galveno komponentu analīzē, aprēķinus var veikt, izmantojot etalongāzes mērījumos iegūtos datus, atņemot nobīžu vērtību rezultātus, iegūstot izlabotu datu kopu (Di Carlo & Falasconi, 2012).

- 3) *Signālu izlīdzināšana* - tiek izveidota ar vektoru definēta mainīgo kopa. Vektora vērtības ir definētas, izmantojot signālu nobīžu rādītājus vai citu traucējumu vērtības. Piemēram, paredzot atbildes reakciju uz etalongāzi, ir iespējams izšķirt tādu faktoru kā laika, temperatūras, spiediena un mitruma ietekmi. Galvenā ideja ir izmērīt sensora atbildes reakciju uz noteiktu gāzi un likvidēt signāla nobīdes vērtības datu kopā (Di Carlo & Falasconi, 2012).

Kopumā metodes, kas balstītas uz sensoru kalibrēšanu, izmantojot etalongāzi, sniedz labus rezultātus, taču ir jāizvērtē izvēlētajās gāzes atbilstība. Šādai gāzei ir jābūt stabilai laikā, pieejamai, viegli izmēramai un reprezentatīvai, lai rezultātus varētu attiecināt uz dažādu grupu gāzēm (Salit & Turk, 1998).

Salāgošanas metodēs komponentu korekcijai netiek izmantoti kalibrācijas rezultāti, bet tiek veikta tieša nobīdes signālu meklēšana sagatavotajos datos. Izmantojot šāda veida metodes, iespējams iegūt korektus datus, kurus izmantot gāzu kvantitatīvajās analīzēs (Di Carlo & Falasconi, 2012).

Neatkarīgo mainīgo korekcija - metodes priekšrocība ir mērījumu vidē iegūto signālu traucējumu apstrāde (Di Natale et al., 2002). Signālu nobīdes apstrādes metodēs, kas balstītas uz galveno komponentu analīzi, izskaitļotie komponenti savstarpēji nekorelē (Artursson et al., 2000). Tomēr šis nosacījums negarantē, ka būtiskie signāli ir pilnībā atdalīti no traucējumiem. Tas, ka galvenie komponenti savstarpēji nekorelē, ne vienmēr liecina par statistisko neatkarību. Galvenie komponenti bieži sastāv no informācijas gan par būtiskajiem signāliem, gan signālu traucējumiem. Šīs problēmas risināšanai ierosināts izmantot neatkarīgo mainīgo korekciju, lai sadalītu datu matricu savstarpēji neatkarīgu komponentu virknēs (Comon, 1994). Šajā gadījumā neatkarība nozīmē, ka informāciju par katru komponentu iegūst neatkarīgi no pārējiem. Pretēji uz Gausa modeļiem balstītajā galveno komponentu analīzē un mazāko kvadrātu metodē, neatkarīgo mainīgo korekcijā nav iespējams noteikt katra komponenta novirzi. Ar šo metodi tiek atlasīti galvenie komponenti, kas lielākoties korelē ar mērķa mērījumiem, savukārt komponenti, kuru korelācija vairāk saistīta ar traucējumiem, tiek likvidēti. Šāds risinājums nodrošina labu rezultātu ieguvu, sevišķi saistībā ar tādiem ārējiem faktoriem kā gaisa temperatūra un atmosfēras spiediens, kurus var uzraudzīt mērījuma laikā un izmantot kā mainīgos, lai atbrīvotos no traucējošajiem komponentiem. Gadījumos, kad signāla nobīdes cēloņus nav iespējams noteikt, rodas sarežģījumi traucējošo komponentu likvidēšanā (Di Carlo & Falasconi, 2012).

2.3. Zemu izmaksu sensoru sistēmu reprezentativitātes snieguma izvērtējums un to precizitātes uzlabošanas iespējas

Zinātniskajā literatūrā ir atrodami virkne pētījumu, kuri gan pārbauda dažādu sensoru precizitāti, gan meklē risinājumus sensoru mērījumu precizitātes uzlabošanai. Apjomīgu pētījumu ir veikusi pētnieku komanda COST akcijas “EuNetAir” ietvaros, kurā veikts salīdzinājums starp 130 mikrosensoru sistēmām un references iekārtām reālos apstākļos, lai novērtētu dažādu sensoru reprezentativitāti uz vairākiem gaisa kvalitātes parametriem (Borrego et al., 2016). Pētījums diemžēl tika veikts tikai 2 nedēļu garumā, un nav novērtēta sensoru stabilitāte pie ilgākas sensoru ekspluatācijas. Pētījumā secināts, ka vislabākā rezultātu sakritība ar references iekārtām ir O_3 , CO un NO_2 sensoriem, toties putekļu cieto daļiņu sensori un SO_2 sensori uzrādīja ievērojami sliktākus rezultātus.

Līdzīgu pētījumu veica arī pētnieki projektu “Citi-Sense-MOB” un “Citi-Sense” ietvaros, kurā izmantoja 24 identiskus komerciāli pieejamus zemu izmaksu sensorus un salīdzināja to rezultātus ar references iekārtām (Castell et al., 2017). Tika secināts, ka sensoru reprezentativitāte mainās gan laikā, gan telpā, jo tie ir atkarīgi no gaisa sastāva un meteoroloģiskajiem apstākļiem. Sensoru reprezentativitāte mainās arī no sensora uz sensoru, norādot, ka datu kvalitātes kontrole ir jāveic katram sensoram atsevišķi. Pētījumā secināts, ka zemo izmaksu sensoru zemā precizitāte neļauj tos pagaidām pielietot, lai uz to rezultātiem pamatotu nopietnus lēmumus, tomēr šāda veida dati nodrošina relatīvu, vispārīgu informāciju par gaisa kvalitāti. Pētījumā tika veikta sensoru datu salīdzināšana ar references iekārtām gan laboratorijas apstākļos, gan lauka apstākļos. Pētījumā tika secināts, ka, lai gan laboratorijas apstākļos mākslīgā atmosfērā sensori uzrāda labus rezultātus, tomēr lauka apstākļos tie uzrāda ievērojami sliktākus rezultātus, kas liecina par gaisā esošo citu vielu lielo ietekmi uz rezultātiem. Putekļu cieto daļiņu sensors uzrādīja labus rezultātus nelielas satiksmes intensitātē, tomēr pie augstākas satiksmes intensitātes putekļu cieto daļiņu sensora rezultāti bija sliktāki. Tas, visdrīzāk, saistāms ar neatbilstošu daļiņu izmēra uz masas pārrēķina koeficientu, un rezultātus būtu iespējams uzlabot, ja būtu pieejami dati par konkrētajā vietā gaisā esošo putekļu cieto daļiņu faktisko blīvumu un pārrēķina koeficientu. Pētījumā secināts, ka nav iespējams veikt sensoru kalibrēšanu laboratorijas apstākļos un turpmāk veikt mērījumus lauka apstākļos, bet tā vietā ir jāveic kalibrēšana uzreiz lauka apstākļos, pie tam, tas jādara regulāri, pie dažādiem meteoroloģiskajiem apstākļiem un sensora novietojumiem. Pētījumā secināts, ka gaisa kvalitātes monitoringam vislabāk piemēroti NO un PM_{10} zemo izmaksu sensori (Castell et al., 2017).

Vairāku pētījumu rezultātus ir apkopojis Rajs Aakašs (Rai et al., 2017), akcentējot nepieciešamību pēc sensoru kalibrācijas un komplicētu algoritmu pielietošanas signālu apstrādē. Analizējot vairāku pētījumu rezultātus, secināts, ka O_3 mērījumi precīzāki ir ar metālu oksīdu sensoriem, nekā ar elektroķīmiskajiem sensoriem, kuriem ir šķērsselektivitāte ar NO_2 , kā to parāda arī (Mead et al., 2013) pētījums. NO_2 un CO gāzēm gan metālu oksīdu sensori, gan elektroķīmiskie sensori uzrāda līdzīgus rezultātus, bet jāņem vērā, ka metālu oksīdu sensoriem, iespējams, ir ātrāka un izteiktāka novecošanās, kas izpaužas kā signāla drifts. Lai gan ir plašs pieejamo sensoru klāsts un sarežģītas datu apstrādes metodes, tomēr

autori secina, ka zemo izmaksu sensori kopumā nespēj sniegt pietiekoši ticamus un atkārtojamus rezultātus, kādus pieprasa Eiropas Parlamenta un Padomes Direktīva 2008/50/EK (Rai et al., 2017).

Sensoru rādījumu precizitāti ir iespējams uzlabot, datu pēcāpstrādē izmantojot dažādus algoritmus. Plašā pētījumu projektā “MACPoll” (Metrology for Chemical Pollutants in Air) tika aplūkotas iespējas ar dažādiem datu āpstrādes algoritmiem uzlabot NO₂ un O₃ sensoru precizitāti un reprezentativitāti (Spinelle et al., 2015). Tika pārbaudīti lineārās regresijas, daudzfaktoru regresijas un mašīnmācīšanās algoritmi, un tika secināts, ka precīzu O₃ datu iegūšanai pilnīgi pietiek ar lineāro regresiju, savukārt, reprezentatīvu NO₂ datu iegūšanai, vispiemērotākā metode ir mašīnmācīšanās. Problēma ir sensoru šķērsselektivitāte, ko varētu mazināt ar vairāku sensoru ieviešanu sensoru sistēmā. Pētījuma turpinājumā tika pārbaudīti NO, CO un CO₂ sensori, un tika secināts, ka šo sensoru datu kvalitātes uzlabošanai vislabāk pielietojama mākslīgo neironu tīklu mašīnmācīšanās metode, savukārt, lineārā regresija un daudzfaktoru regresijas metode uzrādīja nedaudz sliktākus rezultātus (Spinelle et al., 2017).

Specifiskāks pielietojums ir bijis citā pētījumā, kur salīdzināti NO₂, CO, PM_{2.5} un O₃ zemu izmaksu sensori ar references iekārtām un pielietoti faktiskos gaisa kvalitātes mērījumos Honkongas 2015. gada maratona ietvaros (Sun et al., 2016). Pētījuma autori izstrādāja katrai mērāmajai vielai komplicētu algoritmu jeb funkciju, kas konkrētā parametra aprēķināšanā ņem vērā gan paša sensora signālu, gan gaisa relatīvo mitrumu, gan gaisa temperatūru. Rezultātā tika iegūti augstas precizitātes, ar references iekārtām salīdzināmi dati. Tā kā pētījums tika veikts īslaicīgi, nav iespējams novērtēt sensora signāla novirze kļūdu jeb driftu, kas negatīvi ietekmē sensora precizitāti.

2.4. Tirgū pieejamo vides gaisa kvalitātes sensoru sistēmu apskats

Nodaļā aplūkotas izplatītākās tirgū pieejamās gaisa monitoringa sistēmas, kuras var izmantot gaisa kvalitātes monitoringa papildināšanai kā zemu izmaksu sistēmas Rīgas pilsētā. Tirgū pieejamās sensoru sistēmas, kas atbilst prasībām (zems enerģijas patēriņš, elastīgas komplektēšanas un montāžas iespējas, datu pārsūtīšana reālā laikā) nav pārāk plaši pārstāvētas, toties plašāk tirgū ir pieejamas sensoru sistēmas, kas pielāgotas iekštelpu monitoringam, kuras pārsvarā ražo jaunuzņēmumi, un to pieprasījums, iespējams, ir lielāks.

Tirgū ir plaši pārstāvētas iekštelpu gaisa kvalitātes sensoru sistēmas, piemēram, Air Mentor, Air Quality Egg, Awair, Dylos, AirAssure, foobot, Netatmo, Speck, no kurām lielākā daļa mēra PM_{2.5} ar precizitāti līdz $\pm 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Air Mentor Pro), CO₂ ar precizitāti līdz ± 1 ppm (Air Mentor Pro un Foobot) un daļa no minētajām iekārtām mēra arī viegli gaistošos ogļūdeņražus ar precizitāti līdz ± 1 ppb (Air Mentor Pro un Foobot). Lai gan uzrādītie raksturlielumi būtu pietiekami labi to izmantošanai arī ārtelpu monitoringa nolūkos, tomēr visām šīm sistēmām trūkst iespējas to papildināšanai ar sensoriem citu gāzu analizēšanai, kā arī iekārtas nav piemērotas lauka apstākļiem, tāpēc sīkāk netiek apskatītas.

Geotech AQMesh



AQMesh ir nopietna sensoru sistēma, kas darbojas ar baterijām vai saules baterijām un izmanto Alphasense sensorus ar četriem elektrodiem, tādējādi palielinot stabilitāti un mazinot signāla novirzi laikā jeb driftu. Sensoru dzīves ilgums ir līdz 2 gadiem. Iekārta spēj veikt gaisa kvalitātes mērījumus ar precizitāti līdz 5 ppb, kas tiek panākta, zmantojot iekārtā iestrādātus matemātiskos aprēķinus, kas ņem vērā šķērsselektivitāti. Iekārta izmanto GPRS datu pārraides tehnoloģiju un datus uzglabā ražotāja serverī, kur tie ir pieejami lietotājam lejupielādēšanai. Iekārta ir relatīvi neliela, un to iespējams piestiprināt pie laternu stabiem,

žogiem, sienām u.c. Iekārtas izmaksas 4 gāzu mērīšanai ir, aptuveni, 6000 - 8000 EUR, bez putekļu cieto daļiņu skaitītāja. Lai gan iekārta sola augstu precizitāti bez papildus datu apstrādes, tomēr (Cordero *et al.*, 2018) pētījumā secināts, ka NO₂ sensora mērījumi nedod pietiekoši labus rezultātus. Pētniekiem izdevās NO₂ rezultātus uzlabot, datu pēcapstrādē pielietojot mākslīgā neironu tīkla mašīnmācīšanās algoritmus.

Libelium Wasmote Plug & Sense

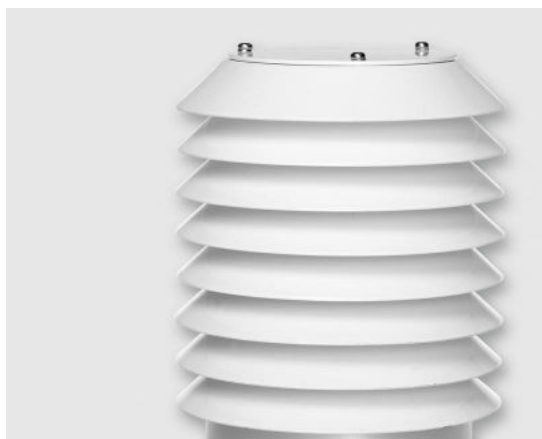
Libelium produkts ir neliela izmēra ūdensizturīga sensoru sistēma, ko ir iespējams piestiprināt pie apgaismes stabiem, žogiem vai sienām. Sensoru sistēmai ir iespējams piestiprināt līdz sešiem sensoriem, atkarībā no izvēlēta modeļa sērijas (piemēram, Smart Environment PRO, Smart Cities PRO, Smart Water u.c.). Šim ražotājam ir pieejams plašs gaisa kvalitātes sensoru klāsts, kā arī putekļu cieto daļiņu skaitītājs. Libelium sensoru sistēmām ir pieejams plašs klāsts ar bezvadu tehnoloģijām (WiFi, GPRS, 4G, LoRaWAN, Sigfox, u.c.), līdz ar to ir iespējas izmantot lietotājam ērtāko tehnoloģiju. Iekārta var darboties gan no tīkla, gan no baterijām, gan arī iespējams pievienot saules paneli. Libelium sensoru precizitāte, visbiežāk, ir 0.1 ppm (NO₂, SO₂, CO) vai 0.2 ppm (O₃). Elektroķīmisko sensoru strāvas patēriņš ir zem 1mA pie 5 V sprieguma, bet putekļu cieto daļiņu skaitītāja enerģijas patēriņš darbības laikā ir 250mA, bet gaidīšanas režīmā Libelium iekārta var “gulēt”, patērējot maz enerģijas. Libelium sensoru sistēmas pamatā ir Wasmote pamatplate, kuras darbības ir jāieprogrammē, izmantojot Wasmote Pro IDE programmatūru. Lai gan šāda pieceja iekārtas lietotājam ir neērtāka, jo ir nepieciešamas zināšanas par mikrokontrolieru programmēšanu, tomēr šādā veidā tiek nodrošinātas visplašākās iespējas iekārtu programmēt jebkādā konfigurācijā atkarībā no nepieciešamības. Libelium sensoru sistēmas izmaksas veido, galvenokārt, divas komponentes - pati iekārta, aptuveni, 500 - 1000 EUR (atkarībā no bezvadu risinājuma) un sensori 40 - 500 EUR par sensoru (putekļu cieto daļiņu sensors - ap 1500 EUR). Sensoru aptuvenais dzīves ilgums ir 2 gadi, lai gan kalibrētā sensoru precizitāte tiek garantēta tikai 6 mēnešus.



Libelium izstrādā dažādas sensoru sistēmu platformas, t.sk. arī tādas, kas piemērotas arī metāla oksīdu sensoriem, tomēr tās vairāk ir paredzētas sistēmu izstrādātājiem, jo ražotājs piedāvā detaļas, kuras lietotājam pašam jāsamontē savā iekārtā. Šāda Libelium Waspote platforma ir apskatīta pētījumā, kur Waspote ir izmantota kā pamatne jaunas sensoru sistēmas izstrādnei *uSense (Brienza et al., 2015)*. Šajā sistēmā tiek izmantoti zemu

izmaksu pretestības tipa sensori ar 10 bitu ADC (*analog-to-digital converter*), kuru cena ir daži desmiti EUR. Visi sensori pirms testēšanas un mērījumu veikšanas tika individuāli kalibrēti, jo pretestības tipa sensoru signāls pat viena un tā paša modeļa sensoram var stipri atšķirties, un laika gaitā sensoru izvades signālā rodas novirzes kļūdas. Izstrādātā iekārta pētījumā pierādīja zemu izmaksu sensoru pielietojuma efektivitāti gaisa kvalitātes monitoringam, kā arī šādu iekārtu plašās modifikācijas un pielāgošanas iespējas datu pārsūtīšanai uz serveri un mērījumu attēlošanai tiešsaistē interneta vietnē. Lai gan pretestības tipa sensori spēj uzrādīt salīdzināmus rezultātus ar references iekārtām, tomēr šādiem sensoriem nepieciešama individuāla kalibrēšana, pie tam, to signālu bieži ietekmē arī šķērsselektīvas vielas vai gaisa mitruma un temperatūras izmaiņas, kas jāņem vērā interpretējot datus. Tāpat, jāņem vērā, ka signālā ar laiku rodas novirzes kļūda jeb signāla drifts (*Brienza et al., 2015*).

Vaisala AQT420



Vaisala AQT420 iekārta paredzēta gaisa kvalitātes mērījumu veikšanai lauka apstākļos. Iekārta veic NO_2 , O_3 , SO_2 un CO gāzu mērījumus, no kuriem CO sensora noteikšanas robeža 10 ppb, bet pārējiem trim 5 ppb, savukārt lauka apstākļos sensoru precizitāte ir no 25 ppb (NO_2) līdz 200 ppb (CO), norādot uz salīdzinoši labu precizitāti. Iekārta mēra arī putekļu cietās daļiņas PM_{10} un $\text{PM}_{2.5}$ ar izšķirtspēju $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, kā arī gaisa temperatūru, relatīvo gaisa mitrumu un spiedienu. Šī iekārta, atšķirībā no pārējām aplūkotajām, ir iebūvēta

saules radiācijas aizsargkorpusā, kas nodrošina pareizu temperatūras un citu mērījumu veikšanu pat tad, ja iekārta tiek apstarota ar tiešiem saules stariem. Iekārtā ir iestrādāti algoritmi, kas automātiski kompensē sensoru mērījumus pret vides efektiem – temperatūru, relatīvo gaisa mitrumu un pat pret sensoru novecošanos, tādējādi ir uzlabota sensoru precizitāte. Ražotājs iesaka sensoru nomaiņu pret jauniem ik pēc 12 līdz 24 mēnešiem, kas ir atkarīgs no ekspluatējamiem apstākļiem.

Datu pārraidei nepieciešama papildus ražotāja izstrādāta bāzes stacija MOG100, kura nodrošina datu saglabāšanu pašā stacijā, kā arī datu pārraidi, izmantojot 2G vai 3G GSM tīklu. Iekārta AQT420 barojas no 8 līdz 30 V līdzstrāvas un patērē vidēji 0.7 W, kā arī bāzes stacija MOG100 datu pārraides brīžos var patērēt līdz 5 W, kas ir relatīvi daudz un ierobežo iekārtas darbību autonomā režīmā, tāpēc iekārta ir paredzēta darbībai no patstāvīga barošanas avota un ierobežo iekārtas izvietojanas iespējas vietās, kur nav pieejams elektrotīkls.

RUBIX WT1



RUBIX ražotā iekārta WT1 jeb WatchTower 1 paredzēta gaisa kvalitātes mērījumu veikšanai lauka apstākļos, izmantojot plašu klāstu ar sensoriem. Vienlaicīgi iespējams integrēt līdz 6 elektroķīmiskajiem sensoriem tādu gāzu mērīšanai kā NO₂, SO₂, O₃, CO u.c., kā arī iespējams papildus uzstādīt 4 metāla oksīdu sensorus. Ražotājs norāda, ka ar sensoriem iespējams nomērīt zemu ppb un ppm līmeņa gāzu koncentrācijas, kas tiek panākts ar autokalibrācijas palīdzību, bet konkrēti precizitātes un noteikšanas robežas raksturlielumi publiski pieejamā specifikācijā nav norādīti, kā arī nav norādīts sensoru dzīves ilgums. Papildus gāzēm, WT1 iekārta mēra arī putekļu cietās daļiņas PM₁, PM_{2.5} un PM₁₀, kā arī gaisa temperatūru un relatīvo gaisa mitrumu. Datu pārraidei iekārta var izmantot gan GPRS, gan LoRa tehnoloģijas, kā arī saglabāt datus līdz 2 diennaktīm iekšējā atmiņā. Iekārta var tikt darbināta gan no 220V elektrotīkla, gan ar iebūvēto akumulatoru, lai gan iekārtas darbības ilgums ar akumulatoru ir tikai 2 diennaktis. Autonomai darbībai iekārta jāaprīko arī ar saules baterijas paneli, bet, ņemot vērā akumulatora mazo ietilpību (2 diennakšu rezerve), ir maz ticams, ka reālos laikapstākļos šāda iekārta spētu autonomi darboties ilgtermiņā.

Aeroqual



Aeroqual piedāvā gan portatīvas, gan stacionāras sensoru sistēmas, no kurām stacionārās patērē relatīvi lielu enerģijas daudzumu (~100W) un darbojas tikai no elektrības tīkla, tāpēc tās nav autonomas un turpmāk netiek aplūkotas. Portatīvā sistēma (Series 500), savukārt, darbojas ar akumulatoru, un tā ir pielietojama autonomiem mērījumiem. Šai sistēmai ir pieejams plašs sensoru klāsts (NH₃, CO₂, CO, H₂, NO₂, O₃, SO₂, PM₁₀/PM_{2.5}, u.c.), un daudziem no tiem ir pieejami vairāki varianti - mērījumu diapazoni, atkarībā no prognozētās gāzes koncentrācijas. Ražotāja solītā sensoru precizitāte mainās no 10% (CO) līdz pat 0.2 ppm (NO₂ sensoram). Zinātniskajā literatūrā ir pieejams pētījums, kurā ir testēta sensoru sistēma Aeroqual Series 500 ENV ar O₃ un NO₂ sensoriem. Šajā pētījumā tika secināts, ka metāla oksīdu O₃ sensors uzrāda labus un ar references iekārtu

salīdzināmus rezultātus, savukārt elektroķīmiskais NO₂ sensors bez papildus datu apstrādes uzrāda ļoti sliktus rezultātus, ko ir iespējams ievērojami uzlabot, veicot datu korekciju ar O₃ sensoru (Lin et al., 2015). Aeroqual iekārta vairāk paredzēta kā portatīva gaisa kvalitātes iekārta ar datu ierakstīšanas funkciju, un ar to nav iespējams datus pārsūtīt reālā laika režīmā. Iekārtas baterijas darbības laiks ir tikai 8 stundas, un tai nav iespējas pievienot saules paneli, tādējādi iekārta nav paredzēta ilglaicīgai darbībai lauka apstākļos. Arī citā pētījumā (Deville Cavellin et al., 2016) pārbaudīta Aeroqual Series 500 sensoru sistēma ar NO₂ un O₃ sensoriem, un ir secināts, ka pie augstākām koncentrācijām šie sensori mēdz uzrādīt lielākas gāzu koncentrāciju vērtības nekā references iekārtas.



Aeroqual piedāvā arī AQY (Micro Air Quality Monitor), kas ir neliela izmēra iekārta, kas piestiprināma pie žogiem, stabiem un citur. Tajā ir iebūvēti NO₂, O₃ un PM_{2.5} sensori, kuriem ar ventilatora palīdzību tiek nodrošināta aktīva gaisa piegāde. Lai gan iekārta ir neliela un šķietami portatīva, tā tomēr nav autonoma, un tai jānodrošina 12V līdzstrāvas spriegums. Šīs iekārtas cena ar NO₂, O₃ un PM_{2.5} sensoriem ir ap 3000 EUR.

UniTec SENS-IT



UniTec izstrādātie sensori ir neliela alumīnija kastīte, kas piemērota kādas konkrētas piesārņojošās gāzes mērīšanai: (CO, NO₂, O₃, C₆H₆ vai CH₄, izmantojot metāla oksīdu sensorus, kā arī SO₂, H₂S, NH₃ un VOC, izmantojot elektroķīmiskos sensorus. Ražotājs sola salīdzinoši augstu mērījumu precizitāti, piemēram, 10 ppb NO₂ sensoram, 20 ppb SO₂ sensoram, 10 ppb O₃ sensoram un 0.2 ppm CO sensoram. Lai gan SENS-IT sistēma iekļauj iegulto procesoru un citas sensora darbināšanai nepieciešamās lietas, tomēr tā nedarbojas kā pilnvērtīga sistēma - nesaglabā datus, tā vietā izdodot tikai signālu. Turklāt SENS-

IT sistēmai jānodrošina 12 V līdzstrāva, un tā patērē 3-4W. Minētais fakts SENS-IT sensorus padara nepiemērotus autonomām iekārtām, kur ir nepieciešams mazs enerģijas patēriņš.

3. PĒTĪJUMA PROJEKTĀ IZSTRĀDĀTAIS SENSORU TĪKLS. VIETU RAKSTUROJUMS.

3.1. Pētījumā izmantotās sensoru sistēmas raksturojums

Pētījuma faktisko mērījumu veikšanai izmantotas Spānijā bāzētā uzņēmuma Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L. ražotās sensoru sistēmas “Smart Environment PRO” ar zemu frekvenču tīklu, no kurām visas 5 iekārtas aprīkotas ar NO₂, SO₂, CO un O₃ elektroķīmiskajiem gāzu sensoriem un temperatūras, relatīvā gaisa mitruma un spiediena sensoru, kā arī viena iekārta aprīkota ar putekļu cieto daļiņu skaitītāju. Šī sistēma izvēlēta plašas konfigurācijas iespēju un pieejamo sensoru klāsta dēļ, kas padara iekārtu elastīgi pielāgojamu dažādām nepieciešamībām un situācijām. Visas iekārtas barojas no iekārtā iebūvēta akumulatora, kura uzlādi nodrošina saules baterijas panelis. Mērījumi tika veikti reizi 10 minūtēs un pēc katra mērījuma dati automātiski tiek pārsūtīti uz serveri, izmantojot zemu frekvenču tīklu. Sākotnējā iekārtas programmēšana un testēšana veikta biroja apstākļos, savukārt, pēc iekārtu izvietojanas Rīgas centrā, korekcijas programmatūrā ir veiktas lauka apstākļos. Korekcijas programmatūrā ir nepieciešamas, ja ir nepieciešams izmainīt mērīšanas intervālu, sensoru jutību, iekārtas darbību (t.i. izmainīt iekārtas gulēšanas, uzsilšanas un mērīšanas laiku intervālus), kā arī tad, ja tiek izmainīta sensoru konfigurācija, veiktas izmaiņas bezvadu tīkla nodrošinājumā vai arī konstatētas kļūdas, kuras jāizlabo.

Pētījumā izmantoto sensoru jutība ir sekojoša: 0.1 ppm NO₂, SO₂ un CO sensoriem, un 0.2 ppm O₃ sensoram. Mērījumos tika novērots, ka reizēm sensori spēj uzrādīt vērtības arī zem to jutības robežas, bet nereti sensori uzrādīja vērtību “0”, ja gaisā esošā gāzes koncentrācija nesasniedz sensora jutības robežu.

Visiem pētījumā izmantotajiem sensoriem ražotājs dod 6 mēnešu garantēto kalibrācijas periodu, kura laikā tiek nodrošināta specifikācijā norādītā sensoru precizitāte. Sensoru kopējais dzīves ilgums ir 2 gadi, bet jāņem vērā, ka 6 mēnešus pēc sensoru izgatavošanas to iegūtie mērījumi var būt neprecīzāki kā specifikācijā norādītā precizitāte un tie būtu jānomaina pret jauniem sensoriem. Sensorus var izmantot arī ilgāk par 6 mēnešiem indikatīvu mērījumu veikšanai, tomēr pastāv risks iegūt pārāk neprecīzus datus, tāpēc iespējamais indikatīvu mērījumu veikšanas periods varētu būt vēl 6 mēneši pēc sensoru garantētā kalibrācijas perioda beigām, tomēr projekta ierobežotais termiņš neļāva šo pieņēmumu pārbaudīt. Visi šajā pētījumā iegūtie sensoru dati ietilpst ražotāja garantētajā kalibrācijas periodā.

Sensoru sistēmas Rīgas pilsētas centra apstākļos darbojās stabili un netika novēroti darbības traucējumi. Saules baterija nodrošināja patstāvīgu iekārtas iekšējā akumulatora uzlādi un, lai gan pētījums tika veikts vasaras periodā, ir prognozējams, ka arī ziemas periodā saules baterija spētu nodrošināt iekārtas darbību, izņemot gadījumus, kad saules baterijas panelis tiktu nosepts ar sniegu vai pārāk biezu putekļu kārtu. Šī pētījuma ietvaros tika novērtota putekļu uzkrāšanās uz saules paneļa, bet tā kā tas ir 45° leņķī un no gluda materiāla, tad nokrišņu epizodēs vairums putekļu tiek noskaloti, tomēr regulāra apkope ir nepieciešama.

Testa nolūkos viena iekārta, kurai pieslēgts putekļu cieto daļiņu skaitītājs (līdz ar to patērē ievērojami vairāk enerģijas, nekā pārējās iekārtas bez putekļu cieto daļiņu sakaitītāja), tika ekspluatēta 1 mēnesi bez pievienota saules bateriju paneļa, kā laikā tika iztērēti 75% no baterijas enerģijas, savukārt, pēc saules baterijas paneļa pievienošanas, iekārtā iebūvētā akumulatora enerģija tika atjaunota ar ātrumu 15-30% diennaktī, kas mainās atkarībā saņemtā saules radiācijas raudzuma. Šis tests parāda, ka vasaras periodā iekārtai, kas aprīkota ar saules bateriju paneli, nav problēmas ar enerģijas nodrošināšanu.

Ja izvēlas izmantot pētījumā pielietotās sensoru sistēmas pastāvīgu mērījumu veikšanai Rīgas pilsētā, tad jāreķinās, ka 5 šāda veida iekārtu uzturēšanas izmaksas ir ap 300 EUR mēnesī, neieskaitot PVN, viena gada ilgā periodā. Būtiskākās izmaksas ietver:

- 1) iekārtu uzturēšanu tehniskajā darba kārtībā un to apkopi;
- 2) iekārtu pārvietošanas izmaksas līdz 2 reizēm gadā, atkarībā no novietojuma;
- 3) iekārtu apdrošināšanas izmaksas;
- 4) maksu par bezvadu tīkla izmantošanu (atkarībā no izmantotā tīkla veida);
- 5) datu uzkrāšanas un attēlošanas vietas uzturēšana.

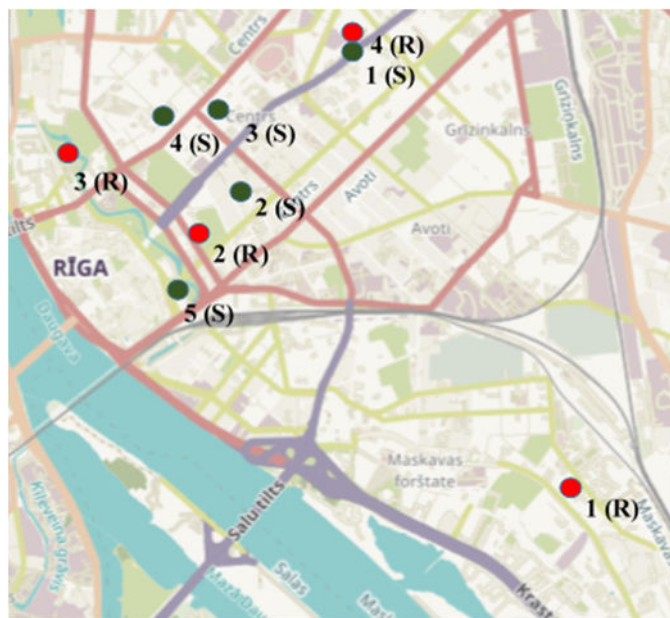
Papildus uzturēšanas izmaksām jāreķinās ar pašu sensoru izmaksām, jo, apmēram, reizi gadā jāveic sensoru nomaiņa pret jauniem kalibrētiem sensoriem, tādējādi nodrošinot salīdzināmu datu ieguvu visā mērījumu veikšanas periodā.

3.2. Pētījuma vietu raksturojums

Rīgas centrā tika uzstādītas 5 ar sensoriem aprīkotas iekārtas mērījumu veikšanai. Sensoru tīkls izveidots, lai ne mazāk kā 2 mēnešu garumā veiktu mērījumus un:

- novērtētu sensoru iekārtu un references iekārtu mērījumu atbilstību;
- iegūtu papildus informāciju par gaisa kvalitāti Rīgas centrā, tajā skaitā vietās, kur šobrīd mērījumi netiek veikti;
- novērtētu dažādu ārējo faktoru ietekmi uz mērījumu kvalitāti, piemēram, tādu faktoru kā intensīva transporta plūsma, t.s. “zaļās teritorijas”;
- novērtētu sensoru mērījumu izmantošanas iespējas gaisa kvalitātes mērījumu veikšanā.

Izveidotā sensoru tīkla, nacionālā un pašvaldības monitoringa tīkla staciju izvietojums dots 3.attēlā, detalizēts raksturojums – 1.tabulā zemāk.



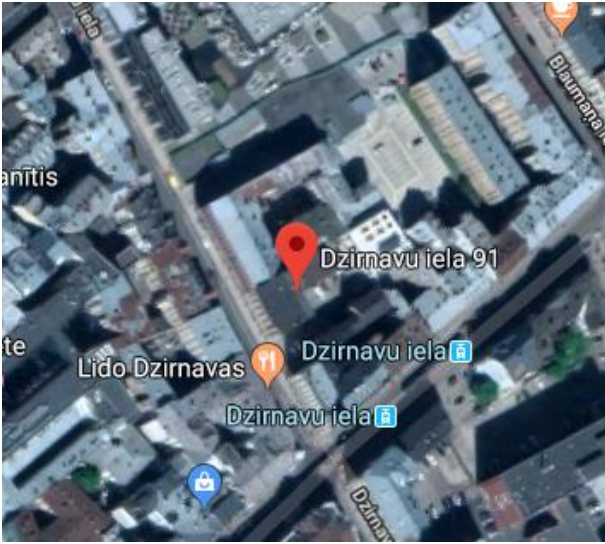
3.attēls. Monitoringa staciju tīkls (R – references iekārtas, S – sensoru iekārta; kartes slānis - www.openstreetmap.org).

1.tabula. Monitoringa vietu raksturojums

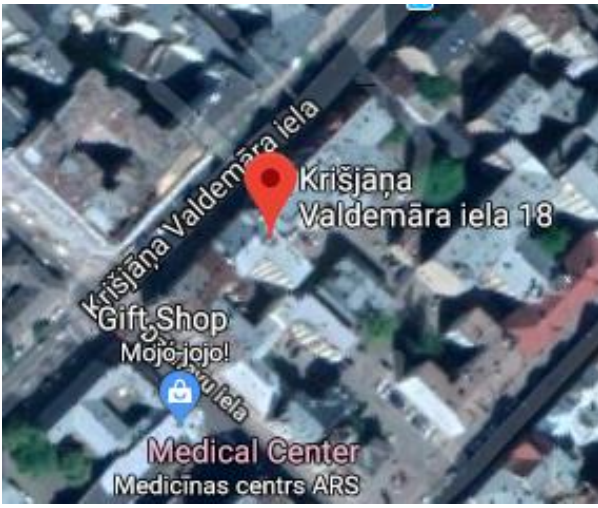
No.	Adrese	Tips	Platums	Garums	Augstums virs jūras līmeņa, m	Vielas
1(R)	Maskavas iela 165	Fona	56.9359 N	24.1565E	7.0	NO ₂ , O ₃
2(R)	Raiņa bulv. 19	Fona	56.9506 N	24.1159 E	8.5	SO ₂ , NO ₂ , O ₃
3(R)	Kronvalda bulv.	Fona	56.9548 N	24.1048 E	6.0	PM _{2.5} , PM ₁₀
4(R)	Brīvības iela 73	Transporta	56.9588 N	24.1257 E	2.5-11.0	SO ₂ , NO ₂ , O ₃ , PM ₁₀
1(S)					2.1	NO ₂ , CO, SO ₂ , O ₃ , PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM ₁
2(S)	Dzirnavu iela 91	Transporta	56.9524N	24.1224 E	2.5	
3(S)	Lāčplēša iela 3	Transporta	56.9582 N	24.1179 E	2.5	
4(S)	Kr.Valdemāra iela 18	Transporta	56.9576 N	24.1160 E	2.2	
5(S)	Aspazijas bulvāris 5	Transporta	56.9472 N	24.1153 E	3.0	

2.tabula. Sensoru mēriekārtu (S) apkārtnes raksturojums

Nr	Monitoringa vieta	Apraksts
S1	Brīvības iela 73  	Intensīva transporta satiksme, ierobežota izkliede, praktiski nav zaļo zonu.

S2	Dzirnavu iela 91  	Intensīva transporta satiksme, ierobežota izkliede, zaļo zonu nav.
----	--	---

S3	Lāčplēša iela 3  	Intensīva transporta satiksme, ierobežota izkliede, praktiski nav zaļo zonu.
----	---	---

S4	Kr.Valdemāra iela 18  	Intensīva transporta satiksme, ierobežota izkliede, praktiski nav zaļo zonu.
----	--	---

S5	Aspazijas bulvāris 5  	Intensīva transporta satiksme, liels zaļo zonu īpatsvars A un Z daļā.
----	--	--

Sensoru mērījumi tika iegūti 2018.gadā šādos laika periodos:

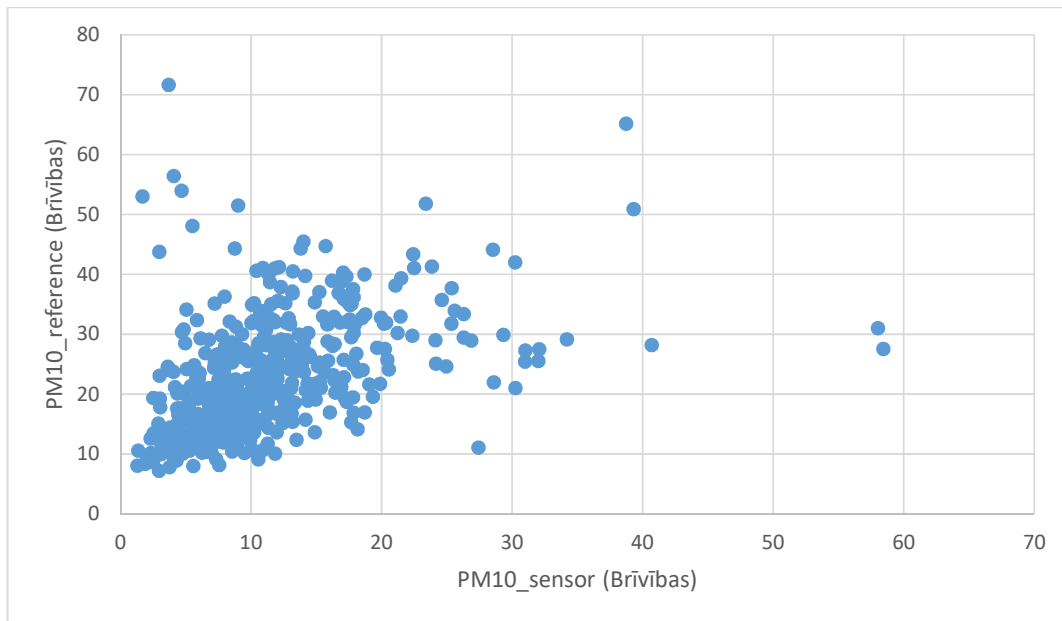
- S1 (Brīvības iela 73) – 12.06.-22.08.2018.
- S2 (Dzirnavu iela 91) – 16.07.-16.08.2018.
- S3 (Lāčplēša iela 3) – 19.07.-16.08.2018.
- S4 (Kr.Valdemāra iela 18) – 19.07.-16.08.2018.
- S5 (Aspazijas bulvāris 5) – 1.08.-16.08.2018.
- 25.10.2018.-25.11.2018. (papildus vasaras sezonas mērījumu rezultātu analīzei, indikatīvs novērtējums veikts rudens sezonā, attēlošanai izmantots meteoroloģiski atšķirīgs periods (pazemināta atmosfēras temperatūra, paaugstināts relatīvais mitrums).

4. REZULTĀTI

4.1. Sensoru un references iekārtu mērījumu rezultātu salīdzinājums

Salīdzinājums veikts 10 minūšu mērījumiem, kuri vidējoti vienas stundas periodā. Pirms mērījumu interpretācijas un apstrādes veikta datu kvalitātes kontrole – pārbaudītas ļoti augstas un ļoti zemas vērtības, t.sk. “nulle vērtības”. Grafikos attēlotas mērījumu variācijas vasaras periodam, orientējoši izvēlēts 2 mēnešu periods, lai arī vizuāli novērtētu mērījumu mainību, atsevišķos gadījumos, lai parādītu mainību diennakts periodā, attēlots 24 h periods.

Cieto daļiņu mērījumu rezultāti

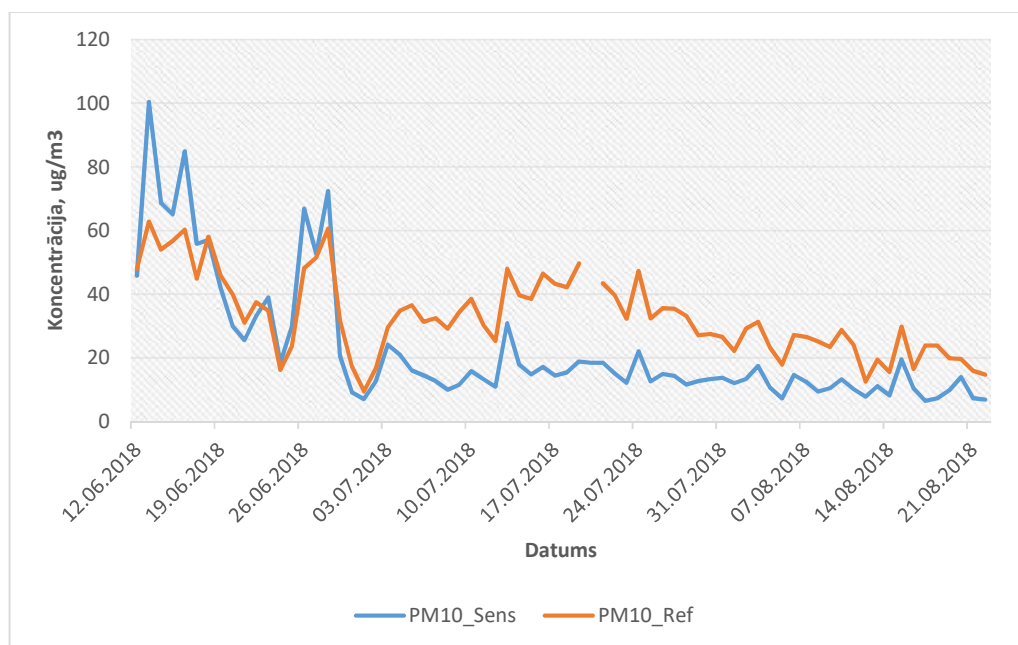


4.attēls. PM stundas koncentrāciju variācijas sensoru un references stacijā (vasaras periods: 12.06.-21.08.2018., sensoru mērījumi – Brīvības ielā).

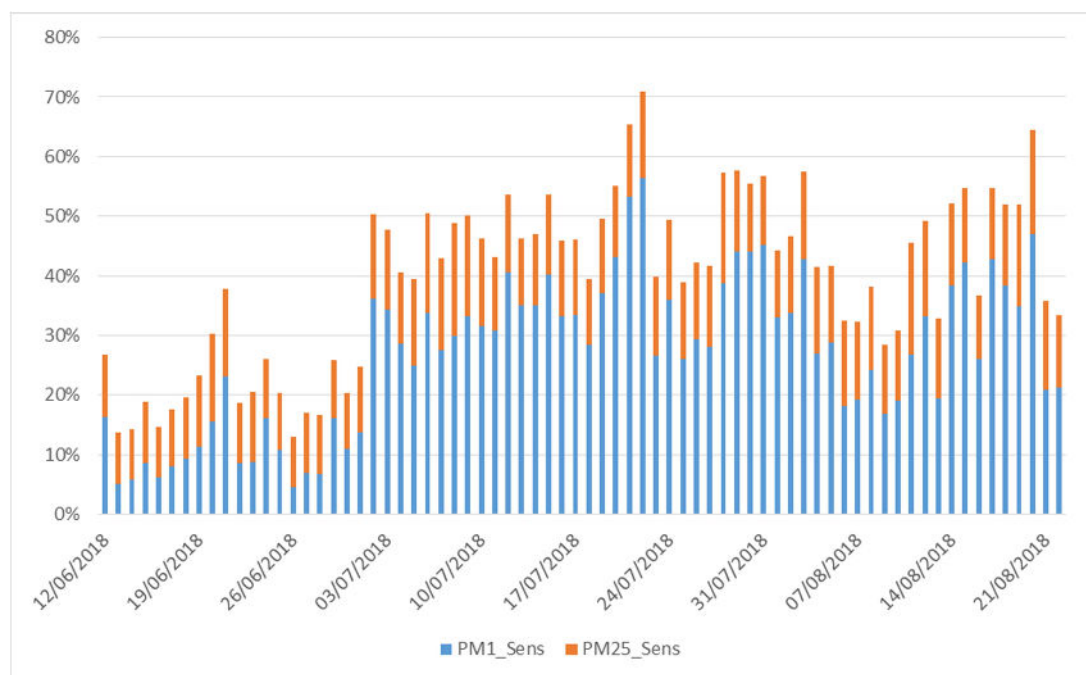
Kopumā sakritība starp references mērījumiem un sensoru mērījumiem uzskatāma par labu, konsekventa tendence un lineāra tieša sakarība starp koncentrācijām ir novērojama, ko arī pierāda korelāciju analīzes rezultāti. Datu rindu analīze (5.attēls) liecina, ka sensoru atbildes reakcija ir atbilstoša, kā jau tas sagaidāms, iespējamās nelielas novirzes, kas saistītas gan ar lokālu meteoroloģisko apstākļu ietekmi. Tomēr pēc ilgstošākas sensoru izmantošanas, signāla apstrādes algoritm uzlabošanas, rezultātus iespējams salāgot un pēc tam sensoru izmantot autonomi.

Bez tam, sensoru mērījumi sniedz papildus informāciju par cieto daļiņu fracionāro sadalījumu, kas ir būtiski, lai pētītu piesārņojuma struktūru un attiecīgi arī izcelsmi. Šajā

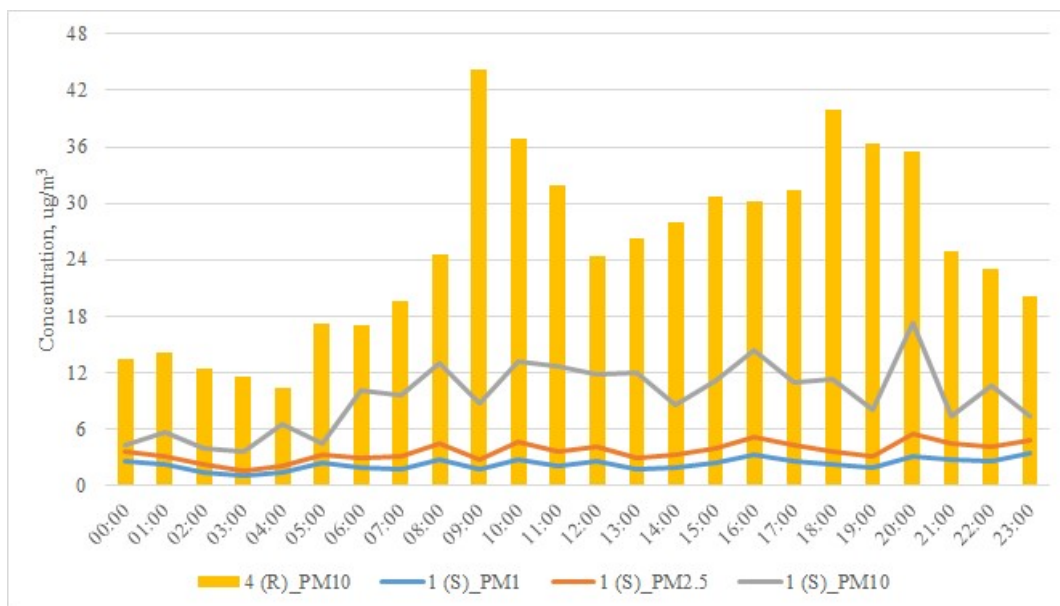
gadījumā redzams, ka izteikti dominē PM_1 frakcija, norādot uz būtisku un dominējošu transporta ietekmi (6.att.).



5.attēls. Cieto daļiņu stundas variācijas sensoru un references stacijā, 12.06.-21.08.2018., sensoru un references mērījumi - Brīvības ielā.



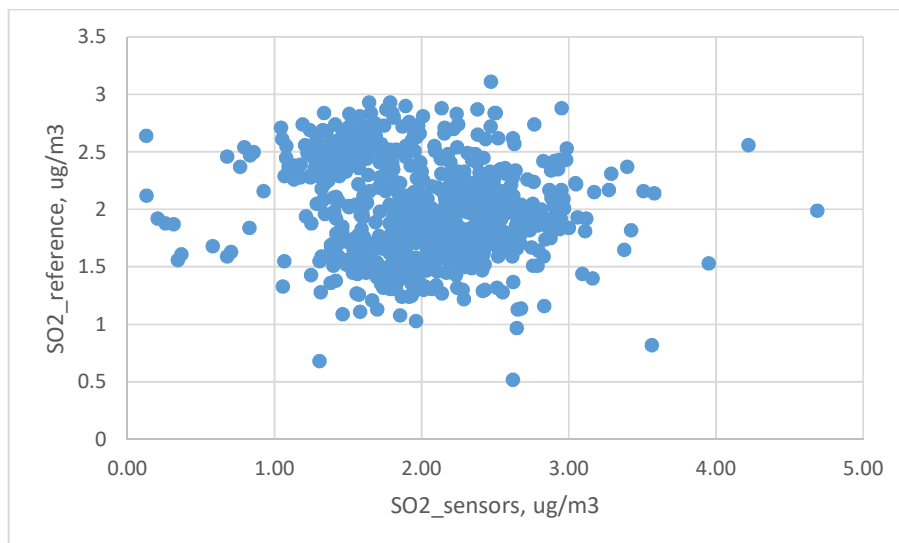
6. attēls. Cieto daļiņu frakcionārās stundas variācijas sensoru un references stacijā, 12.06.-21.08.2018., sensoru PM_1 un $PM_{2,5}$ mērījumi.



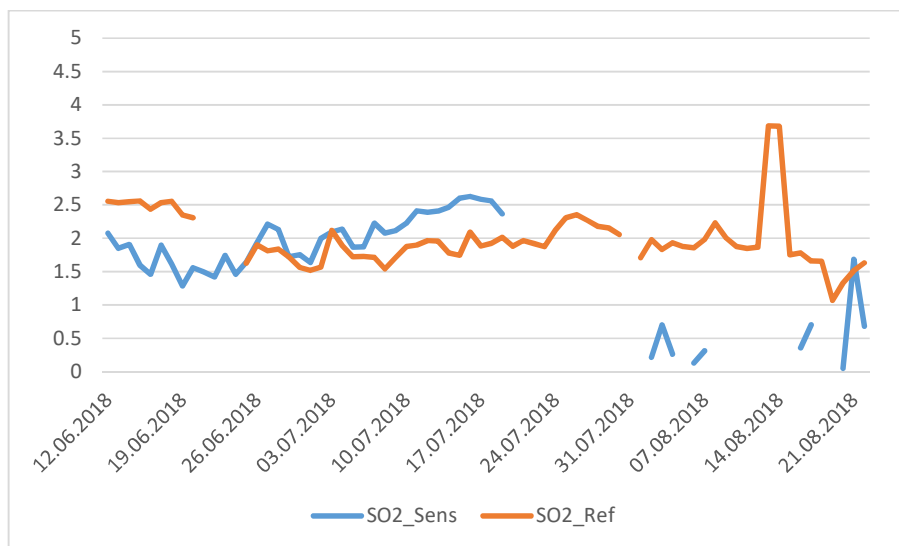
7. attēls. Cieto daļiņu stundas variācijas sensoru un references stacijā, piemērs: 08.08.2018., sensoru PM_1 , $PM_{2,5}$, PM_{10} un references mērījumi Brīvības ielā.

SO₂ mērījumu rezultāti

Līdzīgi kā cieto daļiņu gadījumā, arī sēra dioksīda sensoru mērījumi korelē ar references iekārtas mērījumiem, lai gan šajā gadījumā novērojama stohastiski lielāka izkliede (8.attēls).

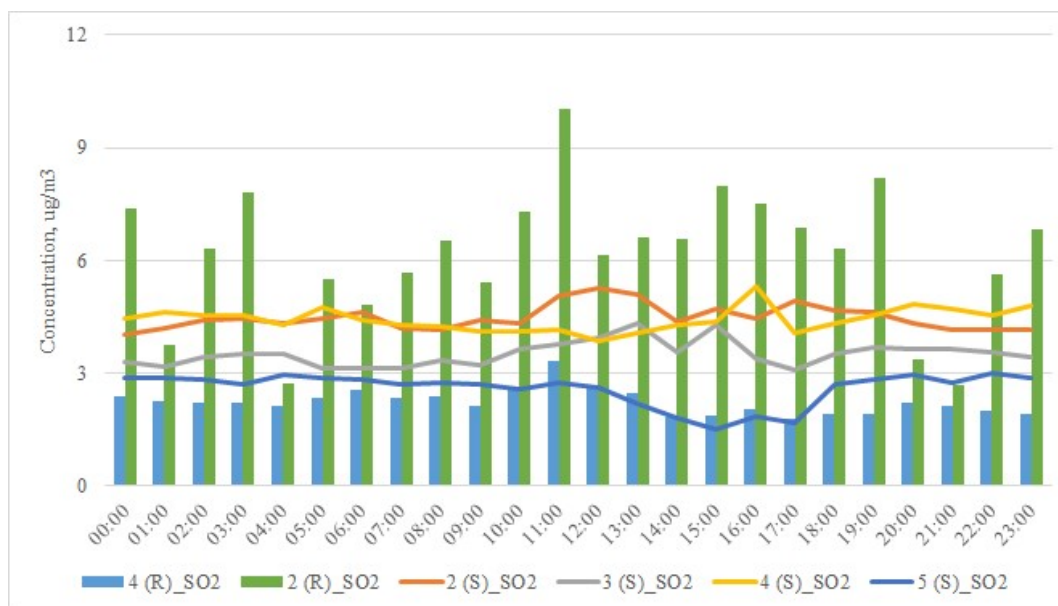


8.attēls. SO₂ references un sensoru mērījumu variācijas Brīvības ielā, piemērs: 08.08.2018.



9. attēls. SO₂ secīgās variācijas sensoru un references stacijā Brīvības ielā, 12.06.-21.08.2018.

Atbilstoši iegūtajiem mērījumiem, redzams, ka lielākākajā daļā novērojumu perioda mērījumi gan sensoru, gan references iekārtā sakrīt, kas redzams 9. un 10. attēlā.



10. attēls. SO₂ variācijas sensoru un references stacijās (stacijas (R) un (S) atbilstoši 1.tabulai; datums: 08.08.2018.).

NO₂ koncentrāciju rezultāti

Slāpekļa dioksīda koncentrāciju atbilstības novērtējums veikts, balstoties uz pieņēmumu, ka urbānās teritorijās saistība starp slāpekļa dioksīda un ozona koncentrācijām ir kopumā zināma. Tādēļ, pamatojoties uz references mērījumiem, veikta regresijas analīze un konstatēts, ka ar augstu ($p < 0,01$) statistisko būtiskumu iespējams izveidot slāpekļa dioksīda indikatīvo vērtību aprēķinu modeli dažādās modifikācijās:

- par būtisku slāpekļa dioksīda prekursoru uzskatāma atmosfēras gaisa temperatūra, ja tā pārsniedz $+19\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- zemāku temperatūru gadījumā, kā prekursori jāizvēlas atmosfēras gaisa temperatūra un ozona piesārņojuma līmenis.

NO₂ koncentrāciju aprēķina algoritma izveides raksturojums

Nemot vērā specifiskos meteoroloģiskos apstākļus (augsta atmosfēras temperatūra, intensīva saules radiācija, paaugstinātas GOS emisijas), nereti novērojamas augstas O₃ koncentrācijas un attiecīgi zemākas NO₂ koncentrācijas, līdz ar to, nereti NO₂ koncentrācijas netika identificētas. Šādās situācijās izmantots regresijas vienādojums, kurš sastādīts, pamatojoties uz references iekārtā iegūtajiem mērījumu rezultātiem.

Lineārās regresijas vienādojums vispārīgā formā:

$$\text{NO}_2 = b_0 + b_1 X_1 + \dots + b_m X_m,$$

NO₂ – transformētā/aprēķinātā NO₂ vērtība;

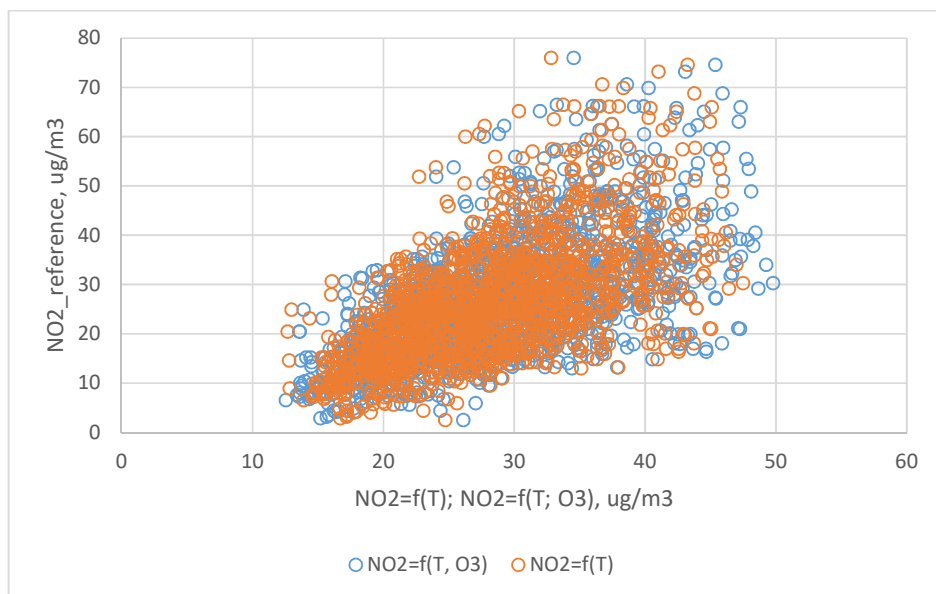
b₀, b₁, ... b_m – regresijas koeficienti;

X₁, ... X_m – prediktori (neatkarīgie mainīgie).

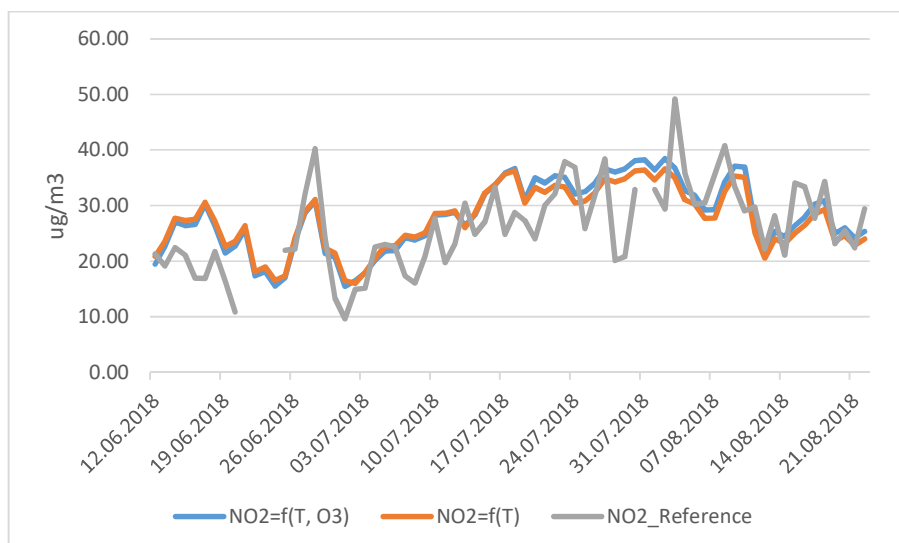
Regresijas vienādojums, prekursors – gaisa temperatūra:

$$\text{NO}_2 = -2.468 + (1.347 \times T)$$

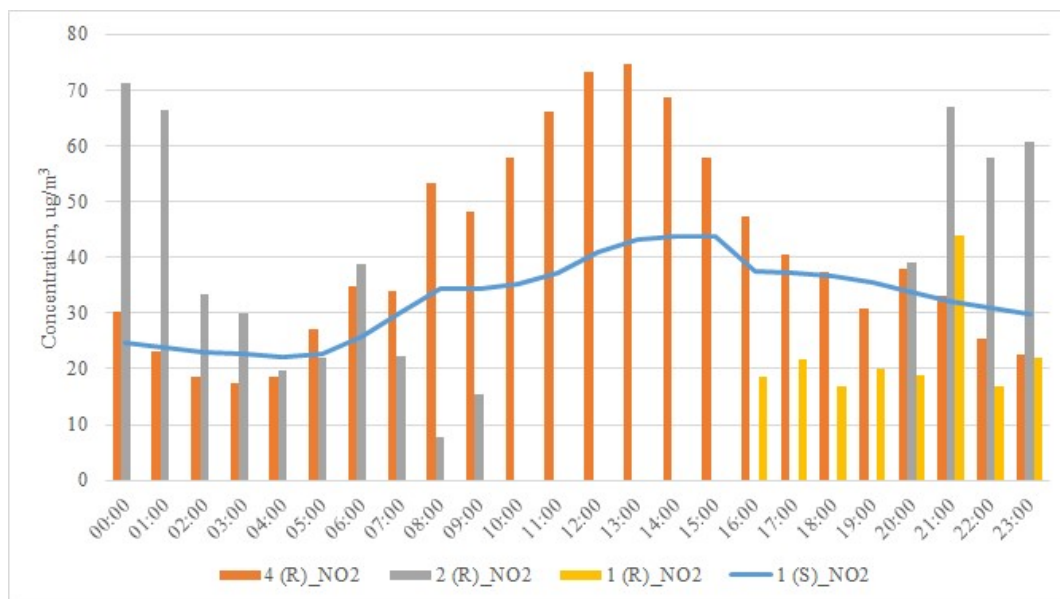
Rezultāti apkopotā formā redzami 11.-12.attēlā.



11.attēls. NO_2 references un sensoru rādījumukorelācija, (references un sensoru mērījumi – Brīvības iela, iztrūkstošie dati sensoru stacijā noteikti indikatīvi, balstoties uz regresijas aproksimāciju, kur slāpekļa dioksīda koncentrācija ir atkarīga no temperatūras un ozona koncentrācijām, 12.06.-21.08.2018.)



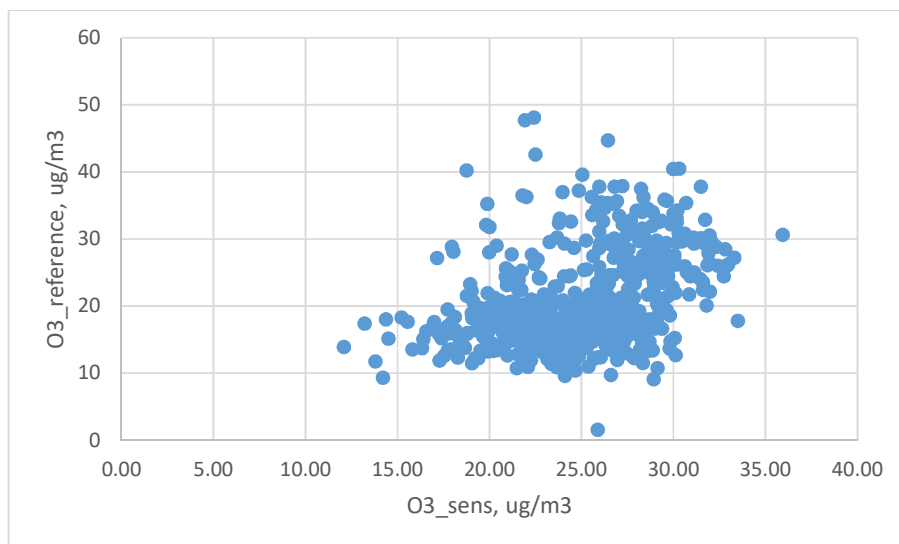
12.attēls. NO_2 references un sensoru mērījumu secīgā mainība (references un sensoru mērījumi – Brīvības iela, iztrūkstošie dati sensoru stacijā noteikti indikatīvi, balstoties uz regresijas aproksimāciju, kur slāpekļa dioksīda koncentrācija ir atkarīga no temperatūras un ozona koncentrācijām, 12.06.-21.08.2018.)



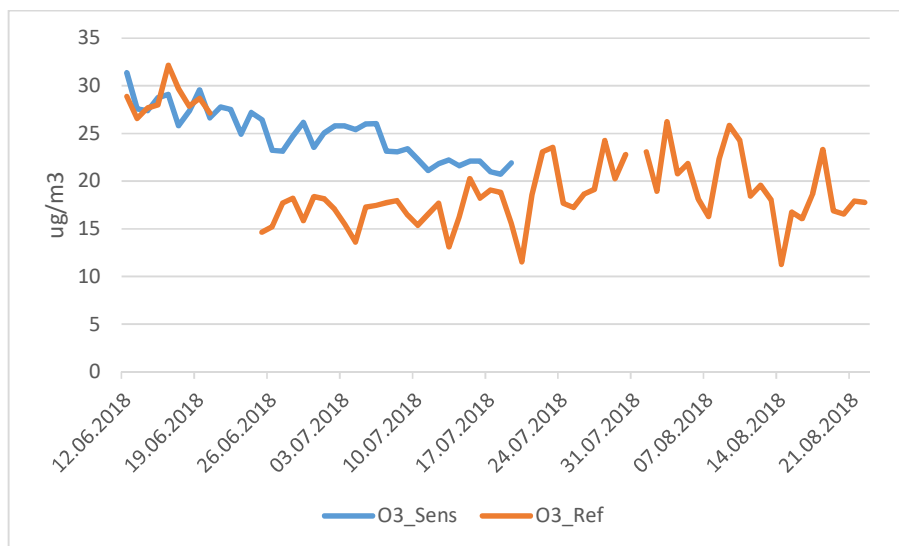
13.attēls. NO₂ secīgās variācijas sensoru un references stacijā (stacijas (R) un (S) atbilstoši 1.tabulai; datums: 08.08.2018.).

Ozona mērījumu rezultāti

Ozona mērījumu rezultāti kopumā atbilst tendencei, kas novērota pārējām piesārņojošām vielām – vērojama tieša lineāra sakarība un stohastiska izkliede (skat. 14.attēlu).



14.attēls. O₃ koncentrāciju korelācija sensoru un references stacijā Brīvības ielā, datums: 08.08.2018.



15.attēls. O₃ secīgās variācijas sensoru un references stacijā Brīvības ielā, 12.06.2018.-21.08.2018.

Korelāciju analīze pierādīja, ka vērojama ļoti augsta korelācija starp SO₂ un O₃, kas, iespējams skaidrojams ar šķērselektivitāti. Detlīzēti korelācijas rezultāti doti 2. un 3. tabulā.

2.tabula. Pīrsona korelācijas koeficienti cieto daļiņu diennakts vērtībām.

	PM 1_Sens	PM2 5_Sens	PM1 0_Sens	PM 10_Ref
PM1 _Sens	1	0.84	0.21	0.42
PM2 5_Sens		1	0.69	0.73
PM1 0_Sens			1	0.76
PM1 0_Ref				1

p < 0.01

3. tabula. Pīrsona korelācijas faktori references un sensoru monitoringa stacijā

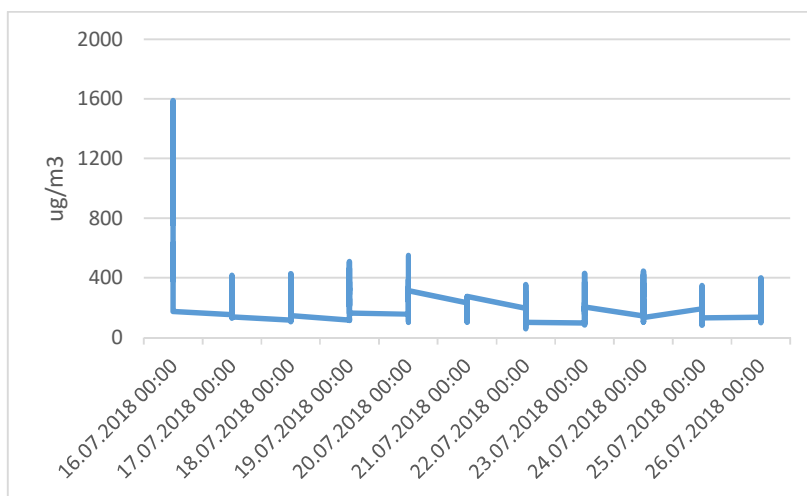
	T_Sens	Hum_Sens	PM1_Sens	PM2.5_Sens	PM10_Sens	CO_Sens	SO2_Sens	O3_Sens	PM10_Ref	NO2_Ref	O3_Ref	SO2_Ref	NO2*
T_Sens	1	-0.018	-0.02	-0.03	-0.02	-0.09	0.00	-0.02	0.24	0.60	0.26	0.08	0.73
Hum_Sens		1	-0.08	-0.02	0.07	-0.04	-0.03	-0.03	0.07	-0.03	-0.02	0.06	-0.004
PM1_Sens			1	0.89	0.32	0.10	0.16	0.17	0.28	0.08	-0.06	0.05	-0.08
PM2.5_Sens				1	0.67	0.07	0.06	0.07	0.50	0.07	0.02	0.12	-0.07
PM10_Sens					1	0.01	-0.02	-0.01	0.63	0.03	0.15	0.19	-0.05
CO_Sens						1	0.92	0.92	-0.01	-0.09	0.00	-0.02	-0.77
SO2_Sens							1	0.999	-0.03	-0.01	-0.03	-0.04	-0.82
O3_Sens								1	-0.03	-0.02	-0.01	-0.03	-0.85
PM10_Ref									1	0.22	0.16	0.17	0.14
NO2_Ref										1	0.05	0.07	0.43
O3_Ref											1	-0.16	0.16
SO2_Ref												1	0.06
NO2*													1

p < 0.01

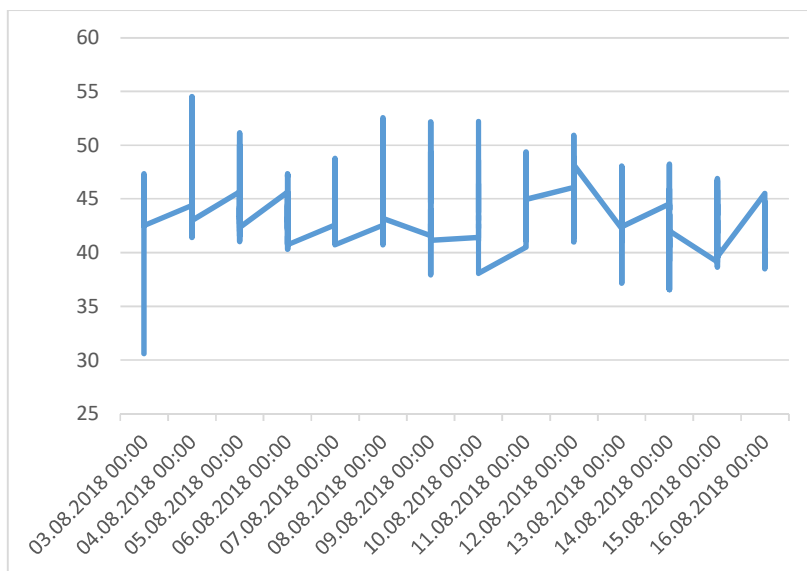
p < 0.05

4.2. Sensoru mērījumu rezultātu novērtējums citās stacijās bez references mērījumiem

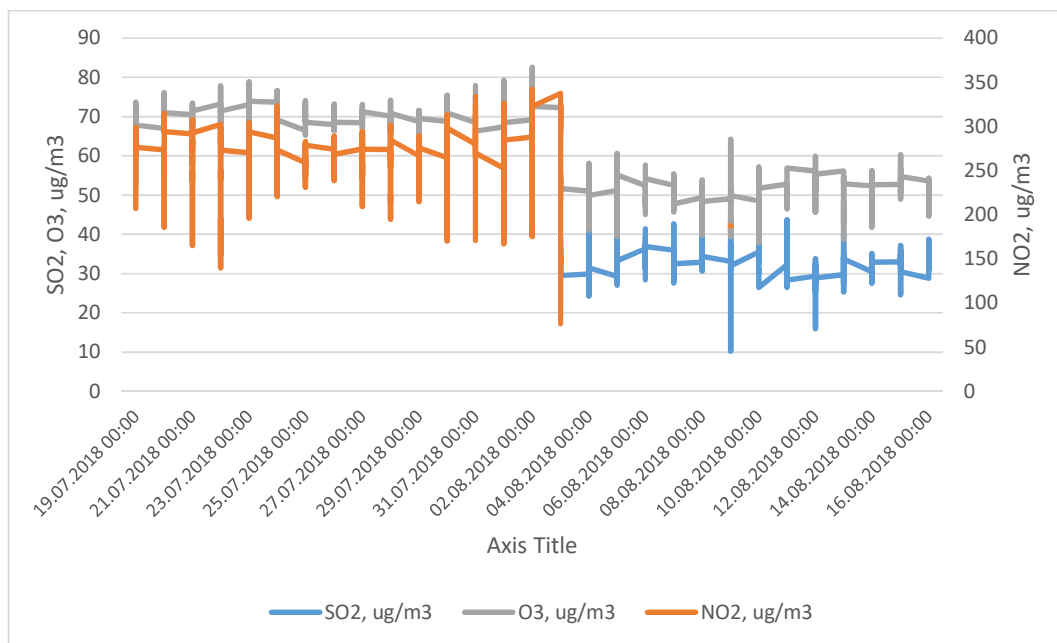
Ņemot vērā, ka iepriekš iegūtie sensoru mērījumu rezultāti uzrādīja augstu atbilstību references mērījumiem, mērījumu tīkls tika paplašināts, iegūti papildus mērījumi vairākās citās vietās Rīgas centrā. Turpmāk šajā nodaļā sniegts vispārīgs raksturojums, atainoti mērījumu rezultāti, kuriem salīdzinājums ar references mērījumiem nebija iespējams.



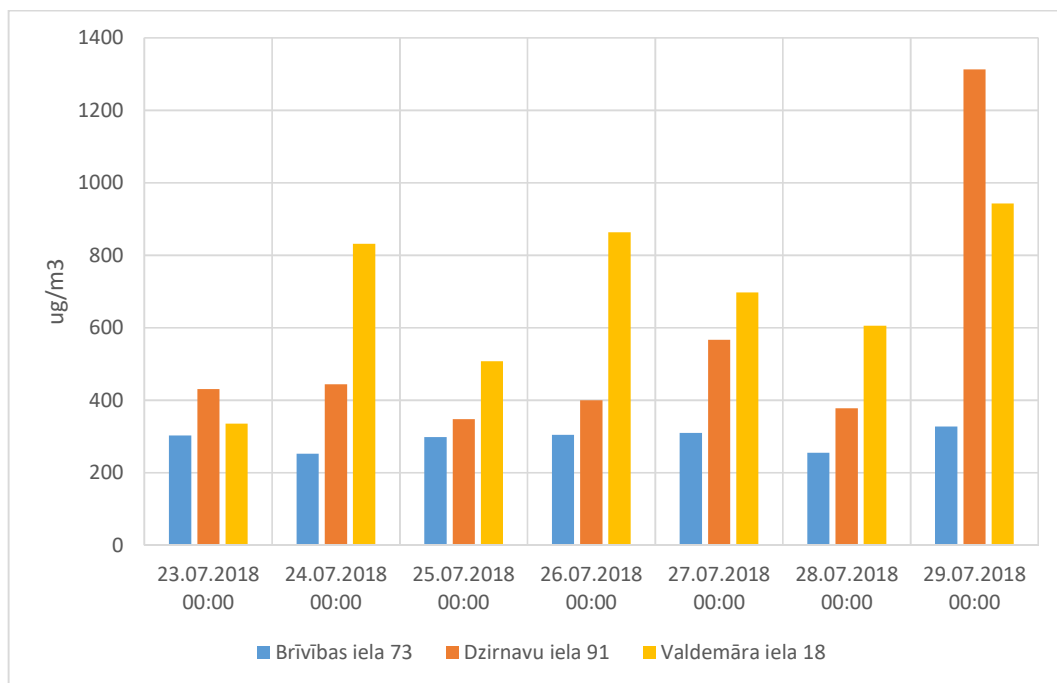
16.attēls. CO secīgās variācijas sensoru stacija (Libelium 2, Dzirnavu iela 91), 16.07.-26.07.2018.



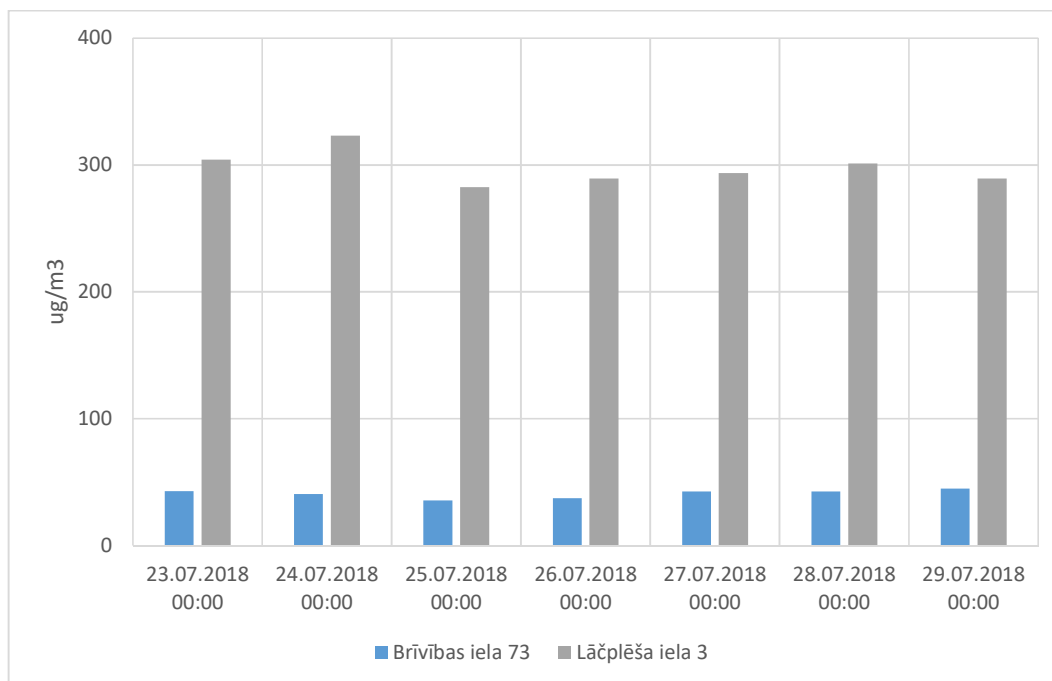
17.attēls. SO₂ secīgās variācijas sensoru stacija (Libelium 2, Dzirnavu iela 91), 03.08.-16.08.2018.



18.attēls. SO₂, NO₂ un O₃ secīgās variācijas sensoru stacijā (Libelium 3, Lāčplēša iela 3), 19.07.-16.08.2018.



19.attēls. CO diennakts vērtības sensoru stacijās, 23.07.-29.07.2018.



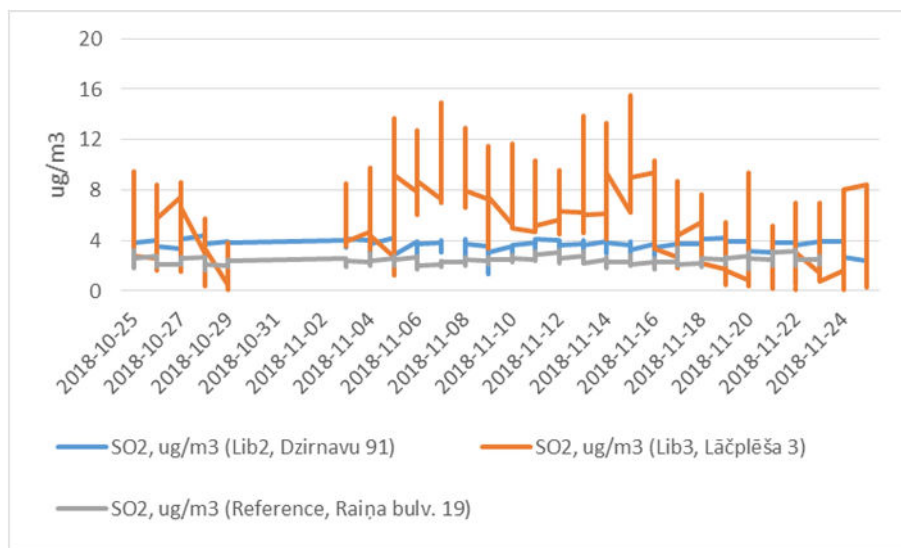
20.attēls. NO₂ diennakts vērtības sensoru stacijās Brīvības ielā un Lāčplēša ielā, 23.07.-29.07.2018.

Sensoru mērījumu rezultātu salīdzinājums novērojumu punktos ar vai bez references iekārtu mērījumiem liecina, ka:

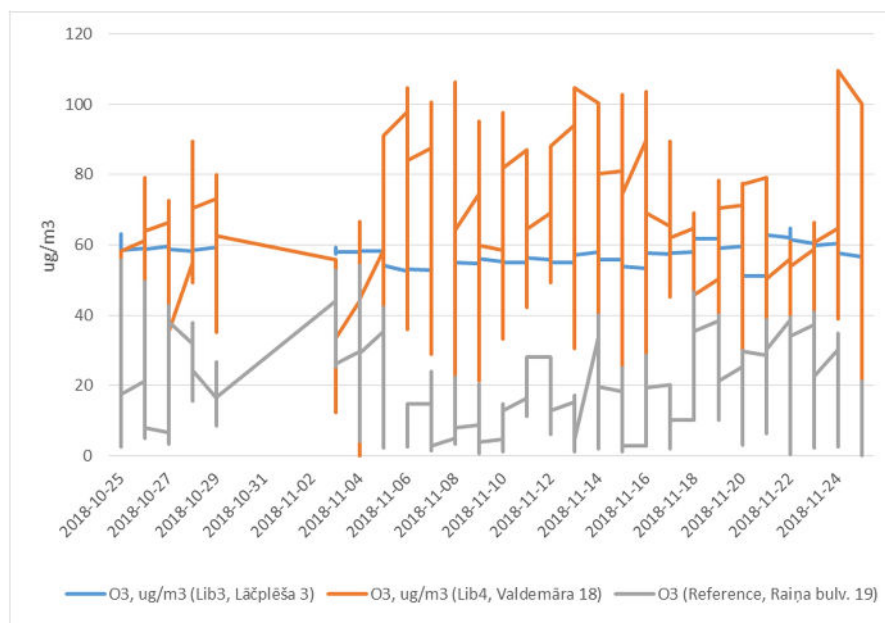
- CO mērījumu rezultātu vērtības, kuras variē robežās no 100-1100 ug/m³, ir uzskatāmas par relatīvi ticamām. Salīdzinājumam - pēdējie 2016. gadā iegūtie CO mērījumi Kr.Valdemāra ielā (n = 50.7%), kas gan ir indikatīvi nepietiekamā projektīvā seguma dēļ, liecina, ka Rīgas centrā gada vidējās CO vērtības ir 330 ug/m³, bet maksimālā stundas vērtība nepārsniedz 690 ug/m³, tomēr jāņem vērā 2018. gada vasaras perioda specifika; faktiski šis periods būtu salīdzināms ar 2012.-2013. gada situāciju, kad CO vērtības Rīgas centrā sasniedza 1100-1300 ug/m³;
- SO₂ mērījumu rezultātu vērtības vasaras periodā variē robežās no 30 līdz 55 ug/m³; 2017. gadā Rīgā references stacijās iegūtie mērījumi (stundas vērtības) ir robežās no 7.7 līdz 13.9 ug/m³. Kā redzams, sensoru mērījumi salīdzinoši sniedz augstākās vērtības, tomēr jāņem vērā, ka monitoringa vietas atšķiras, vasaras periods ir ļoti specifisks, jo īpaši 2018. gada vasara, bez tam rudens mērījumi pierāda augstāku sakritību;
- NO₂ mērījumu rezultātu salīdzinājums vasaras periodā liecina par augstām koncentrācijām Rīgas centrā, kas ir izskaidrojams ar specifiskiem meteoroloģiskiem apstākļiem 2018. gadā un blīvu transporta satiksmi gan Brīvības ielā, gan Lāčplēša ielā.

4.3. Sensoru mērījumu rezultātu izvērtējums rudens sezonā

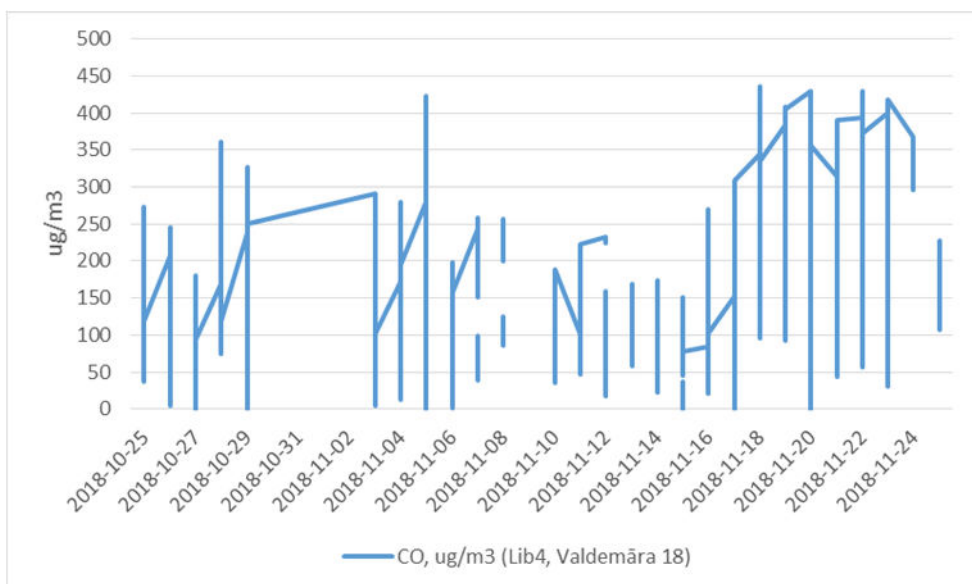
Papildus vasaras sezonas mērījumu rezultātu analīzei, indikatīvs novērtējums veikts rudens sezonā, attēlošanai izmantots meteoroloģiski atšķirīgs periods (pazemināta atmosfēras temperatūra, paaugstināts relatīvais mitrums) – 25.10.2018.-25.11.2018.



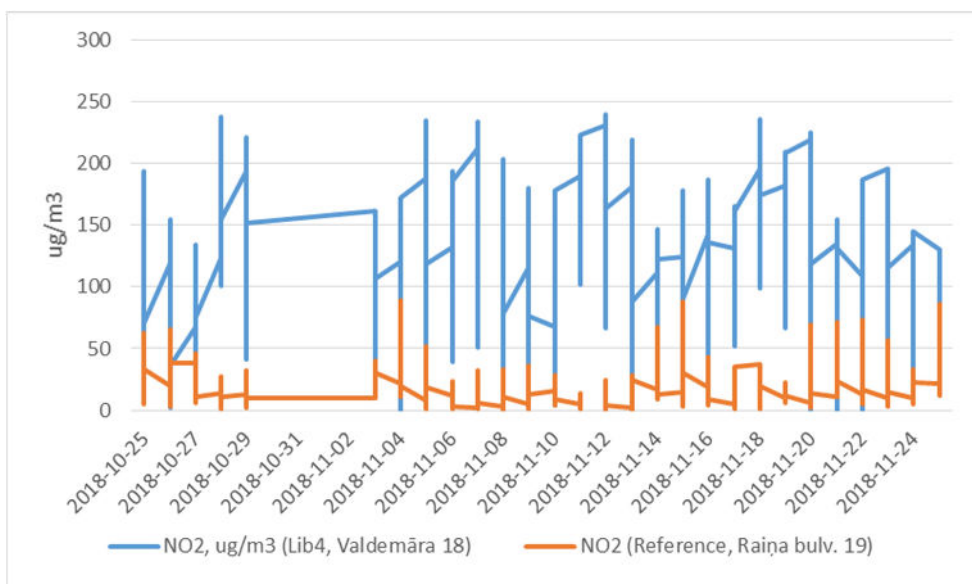
21.attēls. SO₂ mērījumu rezultāti sensoru stacijās un referencs (fona) stacijā Rīgā, Raiņa bulvārī 19, 25.10.-25.11.2018.



22.attēls. O₃ mērījumu rezultāti sensoru stacijās un referencs (fona) stacijā Rīgā, Raiņa bulvārī 19, 25.10.-25.11.2018.



23.attēls. CO mērijumu rezultāti sensoru stacijā, 25.10.-25.11.2018.

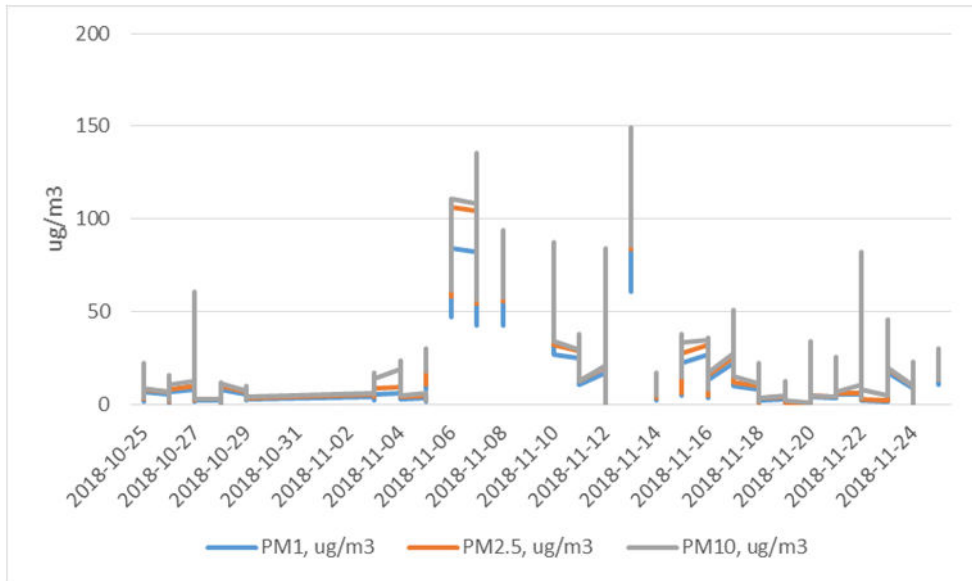


24.attēls. NO₂ mērijumu rezultāti sensoru stacijās un referencs (fona) stacijā Rīgā, Raiņa bulvārī 19, 25.10.-25.11.2018.

Kā jau sagaidāms, pilsētas fona stacijā (Raiņa bulvārī 19), kura izvietota uz Latvijas Universitātes ēkas jumta, novērotas zemākas piesārņojošo vielu koncentrācijas. Izvērtējot piesārņojuma līmeni sensoru stacijās, iespējams secināt:

- augstākas koncentrācijas vērojamas sensoru stacijās (mērijumu punktos), kuri izvietoti tuvāk intensīvas satiksmes plūsmām, piemēram Kr.Valdemāra ielā;

- pilsētas centrā vietās, kur novērojama mazāk intensīva satiksme un salīdzinoši tuvu izvietotas zaļās zonas, piesārņojuma līmenis ir būtiski zemāks, piemēram sēra dioksīda piesārņojums Dzirnavu ielā 91.



25.attēls. Cieto daļiņu (PM_1 , $PM_{2.5}$, PM_{10}) mērījumu rezultāti sensoru stacijā Kr.Valdemāra ielā 18, 25.10.-25.11.2018.

4.4.Sensoru mērījumu rezultātu un meteoroloģisko parametru mainības izvērtējums

Relatīvais mitrums un temperatūra, citi meteoroloģiskie parametri, saskaņā ar citu autoru pētījumiem var ietekmēt sensoru mērījumus, tādēļ veikts savstarpējās ietekmes būtiskums, pamatojoties uz sensoru mērījumu rezultātiem un meteoroloģiskajiem novērojumiem meteoroloģiskajā stacijā Rīga-Universitāte, kura izvietota pilsētas centrā (Raiņa bulvārī 19). Meteoroloģiskā stacijā mērījumi tiek iegūti, izmantojot kalibrētas iekārtas, un tos veic Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs. Korelāciju analīze sniedz pietiekami labu priekšstatu par parametru savstarpējo saistību, rezultātu apkopojums dots 4.tabulā.

4. Tabula. Korelāciju analīzes rezultāti meteoroloģisko parametru ietekmes novērtējumam

	Temp	RelMitr	Rad	Nokr	Spied	WSp	Wdir
SO2_Lib2	-.132**	.036	-.012	-.010	-.075	-.015	.082*
SO2_Lib3	.753**	.326**	.091*	.106**	-.044	.046	.159**
O3_Lib3	-.173**	-.514**	.119**	-.044	.114**	-.154**	.066
CO_Lib4	-.303**	-.220**	-.109*	.028	.092	-.010	-.014
NO2_Lib4	.110**	-.073	-.090*	-.086*	.056	.349**	.008
O3_Lib4	-.003	.365**	-.256**	.052	-.016	.187**	-.025
PM1_Lib4	.438**	.470**	-.148**	-.008	-.041	.321**	-.053
PM2.5_Lib4	.439**	.463**	-.143**	-.006	-.045	.325**	-.052
PM10_Lib4	.420**	.470**	-.141**	-.012	-.019	.281**	-.027

p < 0,01
 p < 0,05

Saskaņā ar iegūtajiem rezultātiem:

- 1) Gandrīz visos gadījumos vērojama statistiski būtiska ($p < 0,01$) saistība ar temperatūru, kas ir loģiska, jo gāzveida vielām koncentrāciju pārrēķins no “ppm” uz “ug/m³” veikts izmantojot temperatūras mērījumus, arī elektroķīmisko sensoru tehniskā speciālskācijā teikts, ka zemas temperatūras (t.sk. nepietiekamas uzsildīšanas) gadījumā sagaidāms, ka sensoru pretestība ir augsts, kas var samazināt sensora darbības efektivitāti;
- 2) Līdzīga situācija vērojama ar relatīvo mitrumu, - palielinoties relatīvajam mitrumam, palielinās sensora jutība;
- 3) Lai arī statistiski būtiska, tomēr vāja saistība konstatēta starp saules radiāciju, vēja ātrumu un piesārņojošo vielu koncentrācijām;
- 4) Saskaņā ar analīzi, redzams, ka atmosfēras spiedienam, vēja virzienam un nokrišņu daudzumam praktiski nekādas saistības ar piesārņojošo vielu koncentrācijām nav.

4.5. Testa vietne sensoru mērījumu rezultātu attēlošanai tiešsaistē

Pastāvīgai veikto mērījumu attēlošanai tiešsaistē ieteicams izstrādāt interneta vietni sabiedrības informēšanai. Projekta ietvaros šāda vietne testa nolūkiem tika izveidota.

Pastāvīgai mērījumu datu attēlošanai tiešsaistē ieteicams veidot grafikus katrai mērāmajai vielai. Datu salīdzinājums katrai vielai tiek veikts 10 minūšu mērījumiem, kuri vidējoti vienas stundas periodā.

Lietotājam sākotnējā logā izvēloties kādu no sarakstā redzamajām mērījumu veikšanas vietām, būtu iespēja apskatīt visu mērāmo vielu grafikus vai nu vienas diennakts griezumā ar sadalījumu pa stundu vidējotām vērtībām, vai arī kalendāra mēneša griezumā ar katras diennakts 24 stundu vidējoto vērtību.

Izstrādātās interneta vietnes ekrānšāviņā redzams grafiks ar diennakts 24 stundu vērtībām 6 dienu periodam (26.attēls zemāk).

Testa lapa gaisa kvalitātes mērījumu attēlošanai reālajā laikā

Stacija:

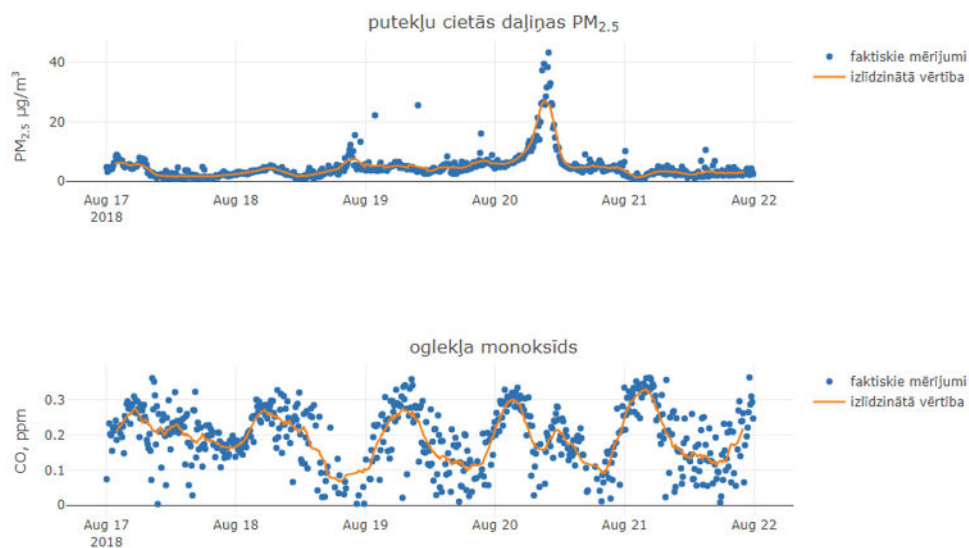
Brīvības iela 73

Dzirnavu iela 91

Lāčplēša iela 3

Valdemāra iela 18

Aspazijas bulvāris 5



26.attēls. Putekļu cieto daļiņu (PM_{2.5}) un oglekļa monoksīda (CO) mērījumu rezultāti Brīvības ielā 73, periods: 17. 08.2018.-22.08.2018.

Secinājumi

Iegūtie mērījumu rezultāti liecina par augstu sensoru izmantošanas potenciālu, paplašinot monitoringa tīklu, iegūstot augstas precizitātes un temporālās izšķirtspējas mērījumus.

Galvenie secinājumi:

- (1) Iegūtie sensoru mērījumi ir statistiski būtiski, tie korelē ar references mērījumiem.
- (2) Augstākās korelācijas iegūtas cietajam daļiņām stundas un diennakts vērtībām PM_{10} ($r = 0,63-0,76$ attiecīgi, $p < 0,01$) un NO_2 ($r = 0,6$, $p < 0,01$), lai arī sensoru mērījumi tika iegūti netieši, indikatīvā ceļā novērtējot pamatojoties uz regresiju analīzē sagatavotu algoritmu.
- (3) Zema, bieži statistiski nebūtiska korelācija konstatēta O_3 mērījumiem;
- (4) Vērojama izteikta šķērselektivitāte O_3 un SO_2 mērījumiem, kas nozīmē, ka nepieciešama signāla papildus apstrāde.
- (5) Gadījumos, ja NO_2 koncentrācijas ir ļoti zemas un gaisa temperatūra augsta, koncentrāciju aprēķiniem iespējams izmantot regresijas modeli, kas balstīts uz temperatūras izmaiņām.
- (6) Gaisa temperatūras mērījumiem līdztekus koncentrāciju mērījumiem ir būtiska nozīme, piemēram, jo NO_2 gadījumā temperatūra izmantojama kā prekursors, bet citu vielu koncentrāciju pārrēķiniem no ppm uz $\mu g/m^3$ nepieciešami temperatūras mērījumu rezultāti.
- (7) Pētījumā izmantotā sensoru sistēma spēj stabili darboties lauka apstākļos autonomā režīmā, veikt kvalitatīvus gaisa kvalitātes mērījumus un nodrošināt datu pārsūtīšanu reālajā laikā, izmantojot bezvadu tīklu.
- (8) Sarežģīti bija novērtēt CO mērījumu rezultātu ticamību, tomēr var apgalvot, ka mērījumu rezultātu vērtības, kuras variē robežās no 100 līdz $1100 \mu g/m^3$, ir uzskatāmas par relatīvi ticamām; pēdējie 2016. gadā iegūtie CO mērījumi Kr.Valdemāra ielā ($n = 50,7\%$), kas gan ir indikatīvi nepietiekamā projektīvā seguma dēļ, liecina, ka Rīgas centrā gada vidējās CO vērtības ir $330 \mu g/m^3$, bet maksimālā stundas vērtība nepārsniedz $690 \mu g/m^3$. Tomēr, ņemot vērā 2018. gada vasaras perioda specifiku, faktiski šis periods būtu salīdzināms ar 2012.-2013. gada situāciju, kad CO vērtības Rīgas centrā sasniedza $1100-1300 \mu g/m^3$.
- (9) Kopumā iegūtie sensoru mērījumi sniedz ļoti labu priekšstatu par atmosfēras piesārņojumu Rīgas centrā:
 - a. Atmosfēras piesārņojumu ietekmē meteoroloģiskie apstākļi (gaisa temperatūra, vēja režīms);
 - b. Vērojama būtiska koncentrāciju sezonālā mainība;
 - c. Zaļo zonu ietekme (attiecība pret pašreizējām stacijām) vērtējama kā vērā ņemama, piemēram, Aspazijas bulvārī tika novērotas zemākās SO_2 koncentrācijas, kas noteiktos meteoroloģiskos apstākļos ir līdzvērtīgas pilsētas fona mērījumiem.

Izmantotās literatūras saraksts

- Artursson, T., Eklov, T., Lundström, I., Mårtensson, P., Sjöström, M., Holmberg, M. 2000. Drift correction for gas sensors using multivariate methods. *Journal of Chemometrics*, Special Issue: Proceedings of the SSC6. 14(5-6), 711-723.
- Bene, R., Perczel, I.V., Reti, F., Meyer, F.A., Fleisher, M., Meixner, H. 2000. Chemical reactions in the detection of acetone and NO by a CeO₂ thin film. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 71(1-2), 36-41. Brattoli et al., 2011).
- Borrego, C., Costa, A.M., Ginja, J., Amorim, M., Coutinho, M., Karatzas, K., Sioumis, T., Katsifarakis, N., Konstantinidis, K., De Vito, S., Esposito, E., Smith, P., André, N., Gérard, P., Francis, L.A., Castell, N., Schneider, P., Viana, M., Minguillón, M.C., Reimringer, W., Otjes, R.P., von Sicard, O., Pohle, R., Elen, B., Suriano, D., Pfister, V., Prato, M., Dipinto, S., Penza, M., 2016. Assessment of air quality microsensors versus reference methods: The EuNetAir joint exercise. *Atmospheric Environment* 147, 246–263. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.050>
- Brienza, S., Galli, A., Anastasi, G., Bruschi, P., 2015. A Low-Cost Sensing System for Cooperative Air Quality Monitoring in Urban Areas. *Sensors* 15, 12242–12259. <https://doi.org/10.3390/s150612242>
- Castell, N., Dauge, F.R., Schneider, P., Vogt, M., Lerner, U., Fishbain, B., Broday, D., Bartonova, A., 2017. Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? *Environment International* 99, 293–302. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.12.007>
- Comon, P. 1994. Independent component analysis-a new concept?, *Signal Process.* 36(3), 287-314.
- Cordero, J.M., Borge, R., Narros, A., 2018. Using statistical methods to carry out in field calibrations of low cost air quality sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical* 267, 245–254. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.04.021>
- Deville Cavellin, L., Weichenthal, S., Tack, R., Ragettli, M.S., Smargiassi, A., Hatzopoulou, M., 2016. Investigating the Use Of Portable Air Pollution Sensors to Capture the Spatial Variability Of Traffic-Related Air Pollution. *Environmental Science & Technology* 50, 313–320. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04235>

- Di Carlo, S., Falasconi, M., Sanchez, E., Scionti, A., Squillero, G., Tonda, A. 2011. Increasing pattern recognition accuracy for chemical sensing by evolutionary based drift compensation. *Pattern Recognition Letters*. 32(13), 1594-1603.
- Di Natale, C., Martinelli, E. & D'Amico, A. 2002. Counteraction of environmental disturbances of electronic nose data by independent component analysis. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 82(2-3), 158-165.
- Fine, G.F., Cavanagh, L.M., Afonja, A., Binions, R. 2010. Metal oxide semi-conductor gas sensors in environmental monitoring. *Sensors*. 10(6), 5469-5502.
- Fryder, M., Holmberg, M., Winqvist, F., L ndstrom, I. 1995. A calibration technique for an electronic noses. *The 8th International Conference on Solid-state Sensors and Actuators and Eurosensors IX*. Stockholm, Sweden, 683-686.
- Gardner, J.W., Bartlett, P.N. 1994. A brief history of electronic noses. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 18-19, 211-220.
- Haugen, J.E., Tomic, O., Kvaal, K. 2000. A calibration method for handling the temporal drift of solid state gas-sensors. *Analytica Chimica Acta*. 407(1-2), 23-39.
- Hsueh, T.J., Hsu, C.L., Chang, S.J., Chen, I.C. 2007. Laterally grown ZnO nanowire ethanol gas sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 126(1), 473-477.
- Janata, J. 2009. *Principles of Chemical Sensors*, Second Edition. New York, Springer.
- Kanan, S.M., El-Kadri, O.M., Abu-Yousef, I.A., Kanan, M.C. 2009. Semiconducting metal oxide based sensors for selective gas pollutant detection. *Sensors*. 9(10), 8158-8196.
- Lin, C., Gillespie, J., Schuder, M.D., Duberstein, W., Beverland, I.J., Heal, M.R., 2015. Evaluation and calibration of Aeroqual series 500 portable gas sensors for accurate measurement of ambient ozone and nitrogen dioxide. *Atmospheric Environment* 100, 111–116. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.11.002>
- Mead, M.I., Popoola, O.A.M., Stewart, G.B., Landshoff, P., Calleja, M., Hayes, M., Baldovi, J.J., McLeod, M.W., Hodgson, T.F., Dicks, J., Lewis, A., Cohen, J., Baron, R., Saffell, J.R., Jones, R.L., 2013. The use of electrochemical sensors for monitoring urban air quality in low-cost, high-density networks. *Atmospheric Environment* 70, 186–203. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.060>
- Rai, A.C., Kumar, P., Pilla, F., Skouloudis, A.N., Di Sabatino, S., Ratti, C., Yasar, A., Rickerby, D., 2017. End-user perspective of low-cost sensors for outdoor air pollution monitoring. *Science of The Total Environment* 607–608, 691–705. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.266>

- Salit, M. & Turk, G. 1998. A drift correction procedure. *Analytical Chemistry*. 70(15), 3184-3190.
- Sberveglieri, G. 1992. Classical and novel techniques for the preparation of SnO_2 thin-film gas sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 6(1-3), 239-247.
- Spinelle, L., Gerboles, M., Villani, M.G., Aleixandre, M., Bonavitacola, F., 2015. Field calibration of a cluster of low-cost available sensors for air quality monitoring. Part A: Ozone and nitrogen dioxide. *Sensors and Actuators B: Chemical* 215, 249–257. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.03.031>
- Spinelle, L., Gerboles, M., Villani, M.G., Aleixandre, M., Bonavitacola, F., 2017. Field calibration of a cluster of low-cost commercially available sensors for air quality monitoring. Part B: NO, CO and CO₂. *Sensors and Actuators B: Chemical* 238, 706–715. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.07.036>
- Sun, L., Wong, K., Wei, P., Ye, S., Huang, H., Yang, F., Westerdahl, D., Louie, P., Luk, C., Ning, Z., 2016. Development and Application of a Next Generation Air Sensor Network for the Hong Kong Marathon 2015 Air Quality Monitoring. *Sensors* 16, 211. <https://doi.org/10.3390/s16020211>
- Yang, Z., Huang, Y., Chen, G., Guo, Z., Cheng, S. 2009. Ethanol gas sensor based on Al-doped ZnO nanomaterial with many gas diffusing channels. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 140(2), 549-556.
- Wallgren, K., Sotiropoulos, S. 2009. A Nafion based co-planar electrode amperometric sensor for methanol determination in the gas phase. *Journal of Chemical Sciences*. 121(5), 703-709.
- Wold, S., Albano, C., Dunn, W., Edlund, U., Esbensen, K., Geladi, P., Helberg, S., Johansson, E., Lindberg, W. & Sjostrom, M. 1984. Dependencies between variables: multiple regression (MR), partial least square modeling with latent variables (PLS) and PARC levels 3 and 4. In: Kowalski, B.R. (eds.) *Chemometrics: Mathematics and Statistics in Chemistry*. Seattle, Springer Science+Business Media, B.V, 61-74.

1. Pielikums. Publikācija.

VALIDATION OF LOW-COST SENSOR MEASUREMENTS IN URBAN TERRITORY FOR AIR POLLUTION MONITORING. RIGA CITY EXAMPLE

Assoc. Prof. Dr. Iveta Steinberga¹

MSc Janis Bikse Jr¹

MSc Janis Bikse²

Dr. Janis Kleperis³

¹ University of Latvia, Faculty of Geography and Earth Sciences, **Latvia**

² Vidzeme University of Applied Sciences, **Latvia**

³ Institute of Solid State Physics, **Latvia**

ABSTRACT

Low-cost sensors, either electrochemical, optical or light scatter based and piezoelectric, due to low price and performance explainability are becoming more available for monitoring, studying and explaining urban air quality. This paper explores low-cost sensor technology applicability for air quality measurements in urban territory. At least two month long monitoring campaigns were conducted during summer 2018 in Riga (Latvia). For validation purposes different monitoring sites were selected in order to assess influence of human activities, meteorological and morphological aspects, e.g. traffic flow and structure, street cleaning, architecture, accessibility of green zones. Site validation for sensor measurements was set up by parallel measurements of sensor outputs and reference measurements by OPSIS DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) for gaseous pollutants analysis and OPSIS SM200 beta attenuation particle gravimetric analyzer for particle measurements. Sensor matrix was set-up to measure carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO₂), sulphur dioxide (SO₂), ozone (O₃), particulate matter – PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁; additionally relative humidity and air temperature were measured. Obtained results show practical applicability of low-cost sensors for air pollution spatial and temporal assessment, sensors show moderate to high correlations with reference site within averaging of 1-hour and 24-hour periods, e.g. Pearson correlation factor for PM₁₀ varies from 0.63 - 0.76 accordingly ($p < 0.01$).

Keywords: low-cost sensors, air quality monitoring, air pollution sensing, urban network

INTRODUCTION

Over the last ten years air pollution sensing technology using low-cost sensors has become more available and magnitude of usage show incredible increase in its use - personal interest within scientists and people to establish municipal environmental monitoring network in order to control, analyse and manage air quality. Such success could be explained by several aspects: (1) equipment cost is up to three times lower than reference instruments [1]; (2) operational costs are insignificant; (3) usage of the instrument is clear and signal processing is rapid giving wide temporal and spatial data for further analysis. Despite positive aspects, some problems for end-users still exist, - crossselectivity, replicability, dependence of “*fitness-for-purpose*” monitoring, “*state-of-the-art*” for signal analysis and data post-processing including data storage, cloud services, processing and dissemination. Overall, results of different scientific projects (e.g. CITI-SENSE, EuNetAir) approve that low-cost sensor methodologies could be successfully applied as supplementary air quality routine network expanding informative services for various interest groups/levels – citizens, planners and municipality [2].

This research was conducted in order to explore application possibility of low-cost sensor technology for air quality measurements in urban territory of Riga city (Latvia). Initially two month long parallel reference and sensor method monitoring campaign was organized during summer 2018 where gaseous (NO_2 , CO , SO_2 , O_3) and aerosol (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, PM_1) measurements for traffic site were collected, additionally four nearby sensor measurement sites were conducted.

MONITORING NETWORK

National and municipal continuous air quality monitoring stations in Riga are located and operated according to the Directive 2008/50/EC and Directive 2004/107/EC air quality assessment and management general criteria and on the basis of monitoring results from previous years. In 2018 national level measurements are conducted in three city background measurement stations and in one traffic pollution station, additionally measurements are maintained in one industrial pollution assessment station owned by municipality and two operator owned stations with particular interest to particulate matter monitoring because of industrial activities such as coal handling and processing. Sensor systems were deployed in five places in the Riga city center and nearby. Equipment was attached to the facade of buildings or placed at existing monitoring stations (sensor systems No. 1 and No. 4). Detailed description of monitoring sites are given in Table 1, spatial placement is shown in Figure 1.

Sensor measurements are made at approximate interval of 10 minutes. All electrochemical sensors are powered continuously thus reducing the risk of insufficient sensor heating before each measurement. All sensors for measuring SO_2 , NO_2 , CO and O_3 are electrochemical type and has accuracy from 0.1 ppm to 0.2 ppm in ideal conditions (20°C , 101.3 kPa). Nominal ranges for sensors are 0-20 ppm for SO_2 and NO_2 , 0-25 ppm for CO and 0-18 ppm for O_3 . However, the best accuracy is maintained during the first 6 months after sensor is made and calibrated. All sensors used in this research were brand new and within the age of 6 months during the whole measurement period. Particulate matter sensor uses laser diffraction to count particles in the air. The sensor is running and counting particulates every 5 seconds for each measurement. PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ and PM_1 are measured from light scattered by individual particles carried in a sample air stream through a laser beam where particle size is related to Mie scattering theory. Concentration values are calculated by integrated algorithm that involves particulate classification into 16 size classes, histogram creation and the calculation that includes also air temperature and pressure, maximum coincidence probability is 0.91 % at 10 particles/L and 0.24 % at 500 particles/L.

Sensor system device is powered by internal rechargeable battery and solar panel. Readings from sensors are not stored in the device itself but instead sent to the server in real time. LoRaWAN network was selected for data transmission because of low power consumption and good network coverage in the city of Riga.

Table 1. Description of monitoring sites

No.	Address	Site type	Latitude	Longitude	Height, meters above ground, m	Measured substances
(R)	Maskavas str. 165	Background	56.9359 N	24.1565E	7.0	NO ₂ , O ₃
(R)	Raina blvd. 19	Background	56.9506 N	24.1159 E	8.5	SO ₂ , NO ₂ , O ₃
(R)	Kronvalda blvd.	Background	56.9548 N	24.1048 E	6.0	PM _{2.5} , PM ₁₀
(R)	Brivibas str. 73	Traffic	56.9588 N	24.1257 E	2.5-11.0	SO ₂ , NO ₂ , O ₃ , PM ₁₀
(S)					2.1	NO ₂ , CO, SO ₂ , O ₃ , PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM ₁
(S)	Dzirnavu str. 91	Traffic	56.9524N	24.1224 E	2.5	NO ₂ , CO, SO ₂ , O ₃ , PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM ₁
(S)	Lacplesa str. 3	Traffic	56.9582 N	24.1179 E	2.5	
(S)	Valdemara str. 18	Traffic	56.9576 N	24.1160 E	2.2	
(S)	Aspazijas blvd. 5	Traffic	56.9472 N	24.1153 E	3.0	

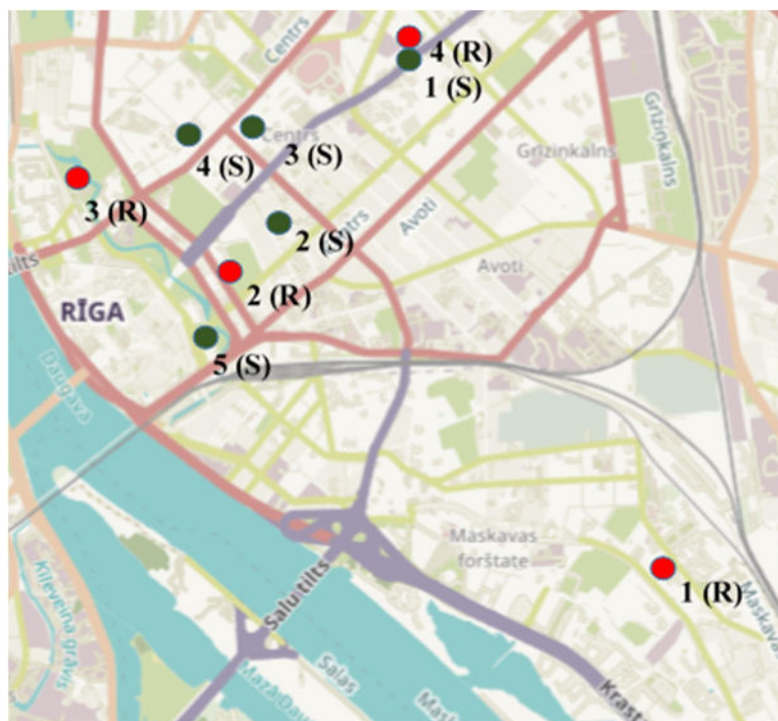


Figure 1. Map of the sampling sites (sites are identified as reference (R) and sensor sites (S) according to Table 1; map layer: www.openstreetmap.org).

Sensor measurements were done using commercially available device Waspnote Plug and Sense (model Smart Environment Pro) from Libelium (*Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L.*).

Reference measurements for gaseous pollutants were done by OPSIS DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) and OPSIS SM200 beta attenuation particle gravimetric analyzer for particle measurements.

The city of Riga is a coastal city, located in the central part of Latvia (56.9460 N, 24.1059 E), with around 641 thousand inhabitants and a total area of approximately 307 km². Riga has a moderate sea climate with relatively cool winters and mild summers, with an annual average temperature of around + 6.2 °C (absolute maximum + 33.3 °C, absolute minimum -34.8 °C), and daily temperature amplitude between + 4.4 °C and + 12.2 °C depending on season. The annual average of relative humidity is 79 %, daily varying amplitude from 3 % to 28 %. This study (from June to August, 2018) belong to summer season and in this year some specific climatic conditions were observed: (1) monthly average air temperature in Riga was 0.5 – 1.8 °C above climatic norm (2) monthly average precipitation in Riga was 5.6 - 6.7 % below climatic norm according Latvian Environment, Geology and Meteorology Centre data (www.meteo.lv).

Road traffic is the most significant source of emissions in the city center, daily traffic flow varies depending on season, day of the week and hour of the day, but on average in some commuter roads daily traffic intensity could exceed 42000 vehicles per day. Structurally, about 50 % of vehicles are using diesel fuel, and more than 70 % of light traffic units are more than 10 years old. There are just 2 - 3 % of heavy vehicles due to municipality restrictions, and this small fraction mainly belongs to local public transport (buses).

Reference air quality measurements in Riga city from traffic monitoring site (site 4 (R) accordingly to Table 1) from the national air quality network for 2017, point to annual average values of 1.8 ug/m³ for SO₂, 41.2 ug/m³ for NO₂, 43.7 ug/m³ for O₃ and 31.6 ug/m³ for PM₁₀.

DATA ANALYSIS AND PROCESSING

The 10 minute interval data was used to calculate hourly average data for gaseous pollutants, additionally daily values were calculated for particulate matter. Simple data quality control and assurance procedure was applied in order to exclude outliers, error reading values, also zero values are excluded from the analysis. Since measurement period was during summer 2018 when extremely high atmosphere temperatures occurred, due to photochemical conversion high O₃ values were recorded, but often NO₂ concentrations were under detection limit. For these cases indicative NO₂ pollution levels were calculated based on linear regression model what is built on reference and sensor site measurements. For better data interpretation Pearson correlation was applied, all the statistical analysis were carried out using IBM SPSS Statistics 22 software.

RESULTS

O₃ and NO₂ concentration correlation in urban areas, in particular, affected by vehicles, is well known. Although this relationship is described in various research works [3], the analysis show that it is often site specific and statistically significant variables could be set from some (temperature, relative humidity) up to the full range of meteorological factors and other gaseous pollutant concentrations. In order to calculate NO₂ concentrations, the multiple linear regression model was applied resulting in explicit dependence of type:

$$\text{NO}_2 = b_0 + b_1 X_1 + \dots + b_m X_m, \text{ where}$$

NO₂ – transformed/calculated NO₂ variable;

b₀, b₁, ... b_m – regression coefficients;

X₁, ... X_m - predictors (independent variables).

According to our analysis in Riga for summer conditions (i.e. when daily atmosphere temperature is stable and exceeds +19 °C) only atmosphere temperature ($p < 0.01$) could be set as NO_2 precursor, and regression equation is:

$$\text{NO}_2 = -2.468 + (1.347 \times T).$$

Variability of measurements could be analyzed in various ways, as an illustrative example measurement results for 1 day (08.08.2018.) are presented here. Hourly variations of particulate matter concentrations show some differences between reference and sensor measurements, and it should be noted that systematical underestimation of sensing results has been identified (Figure 2), while overall correlation between measurements is substantial ($p < 0.01$) and high - (Table 2, 3). Measurements of SO_2 are showing satisfactory coherence between reference and sensor measurements (Figure 3), however, only some specific measurements (periods) were recorded, because actual SO_2 concentrations more often were under detection limit of sensing devices.

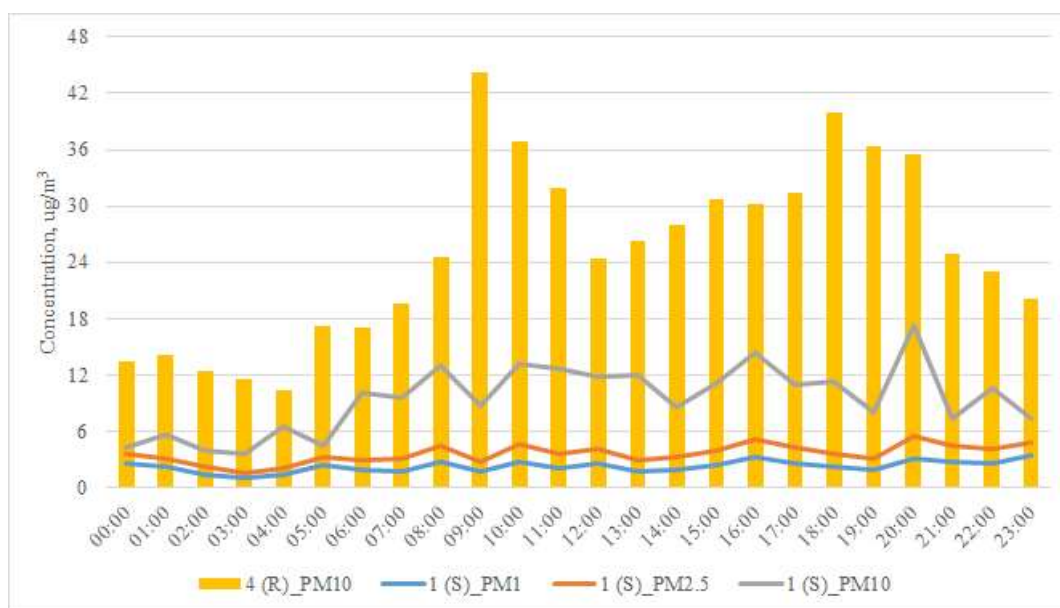


Figure 2. Hourly variations of particulate matter concentration in reference and sensor sites (sites are identified as reference (R) and sensor sites (S) accordingly to Table 1; date: 08.08.2018.).

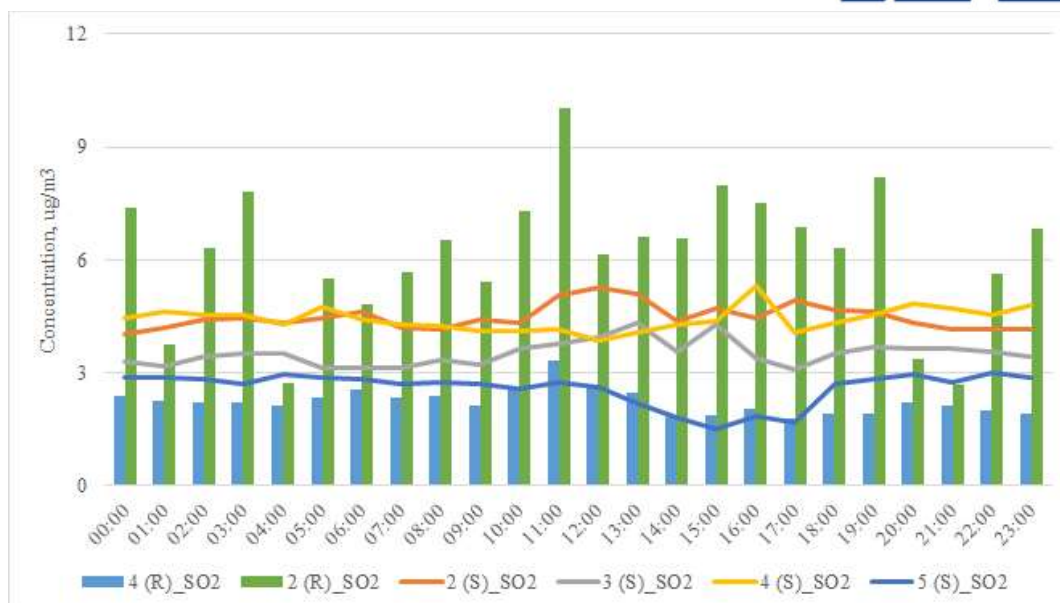


Figure 3. Hourly variations of SO₂ concentration in reference and sensor sites (sites are identified as reference (R) and sensor sites (S) accordingly to Table 1; date: 08.08.2018.).

Results of NO₂ measurements showing good response of indicative sensing measurements to reference results (Figure 4), even if they are calculated according to multivariate regression analysis. Hourly variations over the day show specific changes for traffic sites with peak values within 6:00 am to 7:00 pm.

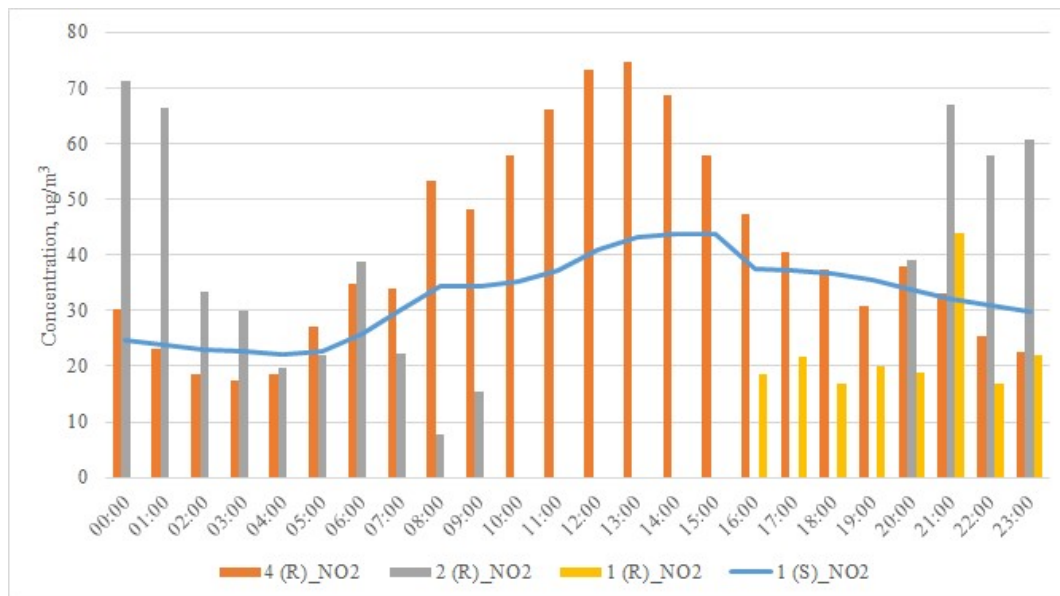


Figure 4. Hourly variations of NO₂ concentration in reference and sensor sites (sites are identified as reference (R) and sensor sites (S) accordingly to Table 1; date: 08.08.2018.).

Detailed analysis of two month (12.06. - 22.08.2018.) campaign measurement results from monitoring site at Brivibas street (1(S) and 4(R) stations) show that results are above indicated tendencies and strongest correlation between reference and sensor measurements were found for particulates. Complete correlation results are shown in Tables 2-3.

Table 2. Pearson correlation factors, calculated from hourly variables (S – sensor measurements, R – reference measurements; only statistically substantial, $p < 0.01$, variables were included)

	PM ₁₀ (S)	SO ₂ (S)	NO ₂ (S)	O ₃ (S)	PM ₁₀ (R)	NO ₂ (R)	O ₃ (R)	SO ₂ (R)
PM ₁₀ (S)	1				0.63		0.11	0.19
SO ₂ (S)		1		0.999				
NO ₂ (S)			1		0.24	0.6	0.32	0.08
O ₃ (S)				1				
PM ₁₀ (R)					1	0.22	0.15	0.17
NO ₂ (R)						1		0.07
O ₃ (R)							1	
SO ₂ (R)								1

Very high correlation between SO₂ and O₃ can be explained by crosselectivity, absence of correlation between sensor and reference SO₂ measurements is due to lack of data and very low concentrations below detection limit.

Table 3. Pearson correlation factors, calculated from daily variables (S – sensor measurements, R – reference measurements; only statistically substantial, $p < 0.01$, variables were included)

	PM ₁ (S)	PM _{2.5} (S)	PM ₁₀ (S)	PM ₁₀ (R)
PM ₁ (S)	1	0.84		0.42
PM _{2.5} (S)		1	0.69	0.73
PM ₁₀ (S)			1	0.76
PM ₁₀ (R)				1

Daily concentration results mostly show strong correlation between variables, particular interest was focused on particulate matter as daily limit is set to PM₁₀. According to fractional analysis, it was found practically applicable, - substantial part of PM₁ pollution comes from other sources, most likely as long range transport.

Overall results and performance of the sensors show that sensor network could be successfully operated as supplementary air quality network and some of the measurements are quite promising, similar research project results [4] found out that O₃ ($r = 0.35 - 0.88$), CO ($r = 0.73 - 0.93$) and NO₂ ($r = 0.14 - 0.94$) sensors show higher correlation with reference methods depending on the platform and on the sensors considered. Similarly to recent research poor performance with low correlation was identified also due to low ambient concentrations, indicating that in such specific conditions proper post processing is needed. Our research results show that comparatively good performance and results are obtained for particulate PM₁₀ measurements, unfortunately CO measurements couldn't be properly compared to reference measurements because of lack of them.

CONCLUSION

Results from this study about practical applicability of sensor technologies for air quality measurements in urban territory carried out during the summer of 2018 lead to the following general conclusions:

- (1) obtained results show practical applicability of low-cost sensors for air pollution spatial and temporal assessment, sensor measurements have statistically significant correlation with reference measurements varying from weak to high relation;
- (2) the highest correlations were identified for particulate matter PM_{10} both at hourly and daily estimations ($r = 0.63 - 0.76$ respectively, $p < 0.01$), and for NO_2 ($r = 0.6$, $p < 0.01$) hourly concentrations, however, sensor measurements are estimated in indicative way;
- (3) low, sometimes not significantly statistical, correlations observed for O_3 measurements, that could be explained by relatively low level of pollution below the detection threshold;
- (4) strong crosselectivity between O_3 un SO_2 measurements were detected, hence the extra signal processing is needed for further correct analyse of measurements;
- (5) in order to estimate relatively low (below sensor detection limit) NO_2 concentrations, the multiple linear regression model could be successfully applied; according to recent study for relatively hot summer conditions (when daily atmosphere temperature is stable and exceeds $+19\text{ }^{\circ}C$) in Riga city centre as NO_2 hourly precursor could be used only atmosphere temperature ($p < 0.01$);
- (6) besides pollutant concentrations, meteorological measurements, at least temperature, are very valuable and essential, as concentration precursors and independent variables for proper concentration conversion, e.g. from ppm to ug/m^3 .

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by Riga City Council. Additionally authors would like to thank to all volunteers for help and permission to mount and operate sensors.

REFERENCES

- [1] Morawska L. et al. Applications of low-cost sensing technologies or air quality monitoring and exposure assessment: How far have they gone? *Environment International*, vol. 116, pp 286-299, 2018.
- [2] Snyder E. G. et al. The changing paradigm of air pollution monitoring. *Environmental Science Technology*, vol. 47, pp 11369-11377, 2013.
- [3] Gocheva-Ilieva S. G., Ivanov A. V., Iliev I. P. Modeling of Air Pollutants and Ozone Concentration by Using Multivariate Analysis: Case Study of Dimitrovgrad, Bulgaria. *International Journal of Environmental Science and Development*, vol. 7, pp 1-8, 2016.
- [4] Borrego C. et al. Assessment of air quality microsensors versus reference methods: The EuNetAir joint exercise. *Atmospheric Environment*, vol. 147, 246-263, 2016.

2. Pielikums. Konferences ziņojuma kopsavilkums.



SGEM Vienna GREEN 2018

International Scientific Conference on

EARTH and GEO Sciences

sgemviennagreen.org

03 – 06 December, 2018, HOFBURG Vienna, Austria

Phone +43 (0)6 3709476, email hofburg@sgemviennagreen.org

**SGEM
GO GREEN**

CONFIRMATION LETTER

for Acceptance of Scientific Paper/s

SGEM18/C/31175/19.10.2018

ATTN: Assoc. Prof. Iveta Steinberga
Address: Jelgavas iela 1, Riga
Company: University of Latvia
Country: Latvia
Email: iveta.steinberga@lu.lv

Dear Assoc. Prof. Iveta Steinberga,

Regarding the submitted abstract/s under title/s:

1. VALIDATION OF LOW-COST SENSOR MEASUREMENTS IN URBAN TERRITORY FOR AIR POLLUTION MONITORING. RIGA CITY EXAMPLE (PAPER publishing)

Section: 7. Section Micro and Nano Technologies

Author/s: Steinberga Iveta, Bikse Janis Jr, Bikse Janis, Kleperis Janis

2. VARIABILITY AND CAUSALITY OF PARTICULATE MATTER HIGH AIR POLLUTION EPISODES IN URBAN TERRITORY (PAPER publishing)

Section: 6. Section Air Pollution and Climate Change

Author/s: Sustere Liene, Steinberga Iveta

The Review Committee came to a conclusion that the proposed theme/s is/are in the scope of the International Scientific Conferences on Earth & Geo Sciences - SGEM VIENNA GREEN SESSIONS 2018 and will be of a great interest to the SGEM VIENNA GREEN SESSIONS 2018 participants.

Therefore, you are kindly invited by the Scientific Committee of the SGEM2018 to prepare and submit your full paper/s via the conference web site (My Articles section). Completion of your registration on schedule, will be highly appreciated.

You are welcome to join the SGEM Scientific Society!

You are expected as a representative of the University of Latvia and a Publisher at SGEM VIENNA GREEN HOFBURG 2018! Looking forward to your upcoming participation!

Sincerely,

Programme Committee, SGEM International Scientific GeoConference,

SGEM Vienna GREEN, Hofburg 2018

NOTE: This Confirmation Letter is to be presented to the respective academic leadership!

THIS CONFIRMATION LETTER DOES NOT GUARANTEE THE PUBLISHING OF THE FULL PAPER/S INTO THE SGEM CONFERENCE PROCEEDINGS, in case of: missed full paper submission deadline, missed payment deadline, ignored Review Committee requirements or other irregularity.

International Scientific Conference on EARTH and GEO SCIENCES – Vienna Scientific Sessions 2018

E-mail: hofburg@sgemviennagreen.org URL: www.sgemviennagreen.org