

TARTU ÜLIKOOL
Arvutiteaduse instituut
Informaatika õppekava

Michael Davõdovski

**Tarkvaraline ja riistvaraline lahendus
õhukvaliteedi jälgimiseks siseruumides**

Bakalaureusetöö (9 EAP)

Juhendaja: Alo Peets

Tartu 2020

Tarkvaraline ja riistvaraline lahendus õhukvaliteedi jälgimiseks siseruumides

Lühikokkuvõte:

Õhukvaliteedi hindamine kogub aina rohkem tähtsust tänapäeva maailmas, eriti kodudes või kontorites, mis integreerivad asjade interneti tooteid. Õhukvaliteedi hindamiseks eksisteerib mitmeid tooteid, mis asuvad väga erinevates hinnavahekes ning tunduvad kohati ülemäära kallid. Käesoleva töö käigus antakse ülevaade erinevatest turul pakutavatest toodetest ning luuakse nendele toodetele võimalikult odav, kuid konkurentsivõimeline alternatiiv. Loodud toode kasutab ESP32 plaati koos CJMCU-8128 sensoriga, mis saadab mõõdetud andmed veebiserveri kaudu MySQL andmebaasi. Valmivat alternatiivi võrreldakse turul pakutava lahendusega ning analüüsitakse lahenduse pädevust ning mastaapi.

Võtmesõnad: Õhukvaliteedi jälgimine, IoT, MySQL, ESP32, CJMCU-8128

CERCS: P175 Informaatika, süsteemiteooria

A Software and Hardware Air Quality Monitoring Solution

Abstract:

Air quality monitoring is gaining more and more importance in today's society, especially in Internet of Things solutions for both private homes and offices. On today's market there are multiple air quality monitoring solutions for offer in different price ranges, and sometimes it may seem like the price is not justifiable. During this thesis an overview of some products currently on the market will be given and a cheap, but competitive DIY solution will be created. The DIY solution uses an ESP32 chip with a CJMCU-8128 sensor, which sends the collected measurements to a MySQL database through a webserver. In addition to a scalability analysis, the alternative solution will be compared to a commercial product in terms of precision.

Keywords: Air quality monitoring, IoT, MySQL, ESP32, CJMCU-8128

CERCS: P175 Informatics, systems theory

Sisukord

1. Sissejuhatus	3
2. Valdkonna kirjeldus.....	4
2.1. Õhukvaliteedi mõõtmine	4
2.2. Varasemad uuringud ja tööd.....	5
2.3. Olemasolevad lahendused	7
3. Õhukvaliteedi mõõtmislahenduse disain	10
3.1. Tarkvaralised nõuded.....	10
3.2. Riistvaralised nõuded.....	10
4. Kasutatud tehnoloogiad	12
4.1. MySQL.....	12
4.2. Python Flask	12
4.3. Heroku.....	12
4.4. Arduino IDE	12
4.5. HTTP.....	13
4.6. TTGO ESP32 plaat	13
4.7. CJMCU-8128 sensor.....	14
5. Lahendus	16
5.1. Riistvara	16
5.2. Tarkvara	19
5.2.1. Heroku, Andmebaas ja veebierver	19
5.2.2. ESP32 mikrokontroller.....	20
6. Lahenduse testimine ja analüüs	23
6.1. Lahenduse testimine.....	23
6.2. Lahenduse võrdlus kommertslikult pakutud lahendusega	26
6.3. Lahenduse mastaapsuse analüüs.....	30
7. Kokkuvõte.....	32
8. Viited	33
Lisad	37

1. Sissejuhatus

Inimesed mõtleavad aina rohkem, kuidas saaks uuendada või täiustada enda kodusid ning teha end ümbritsev keskkond efektiivsemaks, keskkonna sõbralikumaks ja tervislikumaks. Seda väidet kinnitab ettevõtte Global Industry Analysts Inc. raport, mis prognoosib siseruumide õhukvaliteedi mõõtmisseadmete turu kasvu US\$2.6 ehk umbes €2.4 (1 USD = 0.922 EUR) miljardi võrra aastaks 2025 [33]. Selline prognoositud turu kasv on mõjutatud mitme erineva aspekti poolt. Üheks mõjuteguriks on kindlasti viimastel aastatel läbiviidud uuringud, mis kohati näitavad, et siseruumides olev õhk võib olla kordades hullem kui õhk tänavatel [34].

Al horr, Yousef et al. [35] toob välja enda artiklis, et õhukvaliteet siseruumides mõjutab erinevaid aspekte meie elust nagu näiteks tervis, unekvaliteet ning töövõimekus. Samas selleks, et parandada enda kodu õhukvaliteeti tuleb kõigepealt õhukvaliteedi olukorraga kodus tutvuda. Turul leiduvate õhukvaliteedi mõõtmisseadmete vahel valimine võib osutuda keeruliseks, sest kohati sääraسته seadmete võrdlemine võib olla keeruline. Lisaks sellele on taolised seadmed tihtipeale suhteliselt kallid.

Uurimistöö eesmärk on anda lühidalt ülevaade turul olemasolevatest õhukvaliteedi mõõtmisseadmetest ning luua turul pakutavatele toodetele tehniliselt sarnane, kuid odavam lahendus, mis oleks võimeline jälgima õhukvaliteeti mitmetoalises hoones, nagu näiteks suuremas korteris, majas või kontoril. Põhilised keskkonna parameetrid, millele käesoleva töö jooksul keskendutakse on CO₂ tase, LOÜ (loe: lenduvate orgaaniliste ühendite) sisalduvus õhus, õhutemperatuur ning õhuniiskus. Hooned, kus plaaniti loodavat lahendust testida olid IPF Digital AS kontor ning Tartu Ülikooli DELTA hoone, kuid COVID-19 leviku tõttu piirduti testimise osas ühe kolmetoalise korteriga.

Käesolev uurimistöö koosneb neljast põhilisest osast. Esialgu tutvustatakse valdkonda, olemasolevaid lahendusi ja varasemaid töid. Seejärel käsitletakse uurimistöö raames loodava lahenduse nõudeid ja tehnoloogiasid. Sellele järgneb lahenduse tarkvaralise ja riistvaralise poole kirjeldus. Lõpuks loodud lahendust testitakse ning võrreldakse ühe turul pakutava kommertsliku lahendusega ja analüüsitakse, kas valminud lahendus vastab sätestatud eesmärkidele ja on kasutatav laialdasemalt.

2. Valdkonna kirjeldus

Käesolev peatükk esialgu tutvustab õhukvaliteedi parameetreid. Seejärel tutvustatakse eelnevaid uuringuid ja projekte ning lõpuks tutvustatakse mõningaid turul pakutud lahendusi.

2.1. Õhukvaliteedi mõõtmine

Käesoleva töö raames valmiv lahendus on mõeldud odavaks õhukvaliteedi jälgimiseks siseruumides. Siseruumide õhukvaliteedi jälgimist teostatakse tihti nutikodudes. Kohati on sellised rakendused ühenduses ventilatsioonisüsteemiga automaatseks õhukvaliteedi reguleerimiseks [1][3]. Olles ühenduses ventilatsioonisüsteemiga, saab reguleerida hapniku taset, õhutemperatuuri ja lenduvate orgaaniliste ühendite kontsentratsiooni siseruumides.

Õhukvaliteedi jälgimisseadmed ja seadmete poolt jälgitavad parameetrid on tihti erinevad ja sõltuvad tootjatest. Turul pakutavate seadmete seas osutusid populaarseteks 4 õhukvaliteedi parameetrit [4][5]. Nendeks on CO₂, lenduvad orgaanilised ühendid, õhutemperatuur ja õhuniiskus.

CO₂ taset mõõdetakse tavaliselt miljondikosades ning mõõtühikut tähistatakse tähisega ppm (ingl. keeles: *parts per million*) [4][5]. Kui me sooviks teada protsentuaalset CO₂ sisalduvust õhus, siis me peaksime jagama ppm-i arvu kümne tuhandega. Näiteks 650 ppm CO₂-te tähendab, et CO₂ sisalduvus õhus on 0.065%. Käesoleva töö raames mõõdetakse CO₂ taset miljondikosakestes.

Õhutemperatuur on õhuparameeter, mida mõõdetakse tihti nii kodudes kui ka kontorites. Õhutemperatuuri on võimalik mõõta tänapäeval suhteliselt täpselt ja odavalt. Seetõttu on õhutemperatuuri mõõtmine levinud automatiseeritud kütte- ja ventilatsioonisüsteemides. Käesoleva töö raames, nii nagu ka mujal Eestis ja Euroopas, mõõdetakse õhutemperatuuri Celsius-e skaalal.

Õhuniiskus on õhus oleva veeauru sisaldus. Enamus seadmed mõõdavad suhtelist ehk relatiivset õhuniiskust. Suhteline õhuniiskus on, kindla õhutemperatuuri ja õhurõhu juures, protsentuaalne osa maksimaalsest veeauru mahutavusest õhus [6]. Kui suhteline õhuniiskus jõuab 100 protsendini ehk maksimaalse veeauru mahutavuseni, siis toimub kondenseerumine. Käesolevas töös mõõdetakse relatiivset ehk suhtelist õhuniiskust.

Lenduvad orgaanilised ühendid on orgaanilised kemikaalid, millel on väga madal keemispunkt. Enamus lõhnad, mida me tunneme tulevad lenduvatest orgaanilistest ühenditest, seega neid eksisteerib nii looduslikul kui ka tehnilikul kujul. Siseruumide õhukvaliteedi mõõtmise puhul

on lenduvate orgaaniliste ühendite jälgimine tähtis, sest lenduvad orgaanilised ühendid võivad põhjustada mitmeid erinevaid haigusi või tervise probleeme [7][8]. Terviseprobleemid algavad silmade või nina limaskestast ärritusest lõpetades maksa- ja neerupuudulikkusega. Lisaks lenduvate orgaaniliste ühenditega seotud haiguste uuringutele on tehtud uuringuid teemadel, millal ja millistes tingimustes on lenduvate orgaaniliste ühendite kontsentratsioon eriti kõrge. Siseruumides on tavaliselt lenduvate orgaaniliste ühendite kontsentratsioon 2 kuni 5 korda kõrgem kui värske õhu käes, kuid ehituse jooksul või eriti äsja pärast ehitustegevust võib ühendite tase olla kuni 1000 korda suurem kui ta on väljas, värske õhu käes.

Lenduvaid orgaanilisi ühendeid mõõdetakse ppm ehk *parts per million* [4] ja ppb ehk *parts per billion* [5] ühikuid kasutades. Käesoleva töö käigus kasutatakse lenduvate orgaaniliste ühendite mõõtmiseks ppb ühikut kuna lahenduse disainimisprotsessi jooksul valiti sensor, mis annab LOÜ väljundit ppb ühikuna.

2.2. Varasemad uuringud ja tööd

Käesolev peatükk käsitleb kahte teadustööd ja ühte aktiivset projekti. Nii teadustööd kui ka projekt puudutavad õhukvaliteedi mõõtmist, kuid käsitletavate tööde sihtmärgid või uurimisküsimused on erinevad. Uurimistööde sihid on tulekahjude tuvastamine ja ventilatsioonisüsteemi automatiseerimine ning projekti eesmärk on soodustada energia säästlikumat käitumist.

2017. aastal esitleti käesoleva töö raames valmiva lahendusega sarnast lahendust Hiina ITOEC konverentsil. Konverentsil esitatud töö teemanimetus on „Nutika siseruumi õhukvaliteedi jälgimise ja puhastamise süsteemi disain“ [1]. Lahenduse juhtkeskuseks kasutati ühekiibilist mikroarvutit nimega STC12C5A60S2. Õhukvaliteedi andmete kogumiseks kasutati optilist õhukvaliteedi andurimoodulit nimega GP2Y1010AU0F MQ138 ja andurmoodulit DHT11. Lahendus tuvastas formaldehüüdi gaasi ning mõõtis õhutemperatuuri ja õhuniiskust. Juhtkeskuse ja andurmoodulite vaheliseks suhtluseks kasutati NRF24L01 nimelist transiiverit, mis töötab 2.4 GHz WiFi võrgu kaudu. Viimaks oli kirjutatud juhtkeskuse riistvarale tarkvara, mis teeks mikroarvutist juhtkeskuse. Loodud lahendus oli võrdlemisi primitiivne. Tarkvaraline lahendus luges andmed õhukvaliteedi anduritest ning vastavalt anduritest saadud näitudele käivitati või seisati õhupuhastussüsteem.

Lisaks töövahendite valimisele on tähtis ka töökeskkond. Eelnevalt mainitud teadustöö töökeskkonnaga sarnaneb ühe 2019. aasta kevadel kirjutatud teadustöö keskkond. Teadustöö teemaks oli „Madalahinnalise õhukvaliteedi sensorite paketi ja siseruumide õhukvaliteedi

jäljimisüsteemi arendamine California keskkoolile kaugete metsatulekahjude tuvastamiseks“ [2]. Kuigi teadustöö pealkirjas mainitakse, et tegu on madalahinnalise lahendusega, siis tegelikkuses selle lahenduse juhtkeskuseks kasutatav Raspberry Pi 3 B+ kompuuter on kordades kallim kui see, mida kasutati eelnevas Hiina ITOEC-i konverentsi teadustöös.

Õhu sensorid jagunevad tavaliselt kahte hinnaklassi: prototüüpimiseks mõeldud odavad andurid ja kallid tööstuslikud andurid, mida kasutatakse kommertslikes lahendustes. Tööstuslikud sensorid on tavaliselt täpsemad ning väikse veamarginaaliga. Prototüüpimiseks mõeldud sensorid on suhteliselt suure veamarginaaliga. Käsitletavas töös olid kasutusel odavamad sensorid, mis oli mõeldud ennekõike prototüüpimiseks [2]. Õhusensoriteks oli võetud kokku 3 erinevat sensorit. Esimene kasutusel olev sensor on BOSCH-i BMP280 nimeline sensor, mis mõõdab õhutemperatuuri, õhurõhku ja õhuniiskust. Järgmisena kasutatakse PMS7003 sensorit tahkete osakeste mõõtmiseks õhus. Viimasena kasutatakse MH-Z19 sensorit CO₂ taseme mõõtmiseks. Teadustöös märgati, et CO₂ tase tõusis väga äkiliselt, kui õpilased olid vahetunnilt klassiruumi naasnud. Pärast õppetöö lõppemist ja õpilaste lahkumist hakkas CO₂ tase tasapisi langema normaaltasemele. Lisaks CO₂ taseme muutusele märgati õhus tahkete osakeste arvu suurenemist. Tahkete osakeste arvu suurenemist õhus omistati metsatulekahjule, mis põles umbes 200 kilomeetri kaugusel koolist. Teadustöös tehti mitu järeldust, mis puudutasid nii õhukvaliteeti ennast kui ka loodud lahenduse praktilisust. Õhukvaliteedi taseme alusel järeldati, et ventilatsioonisüsteem ei ole piisavalt võimas, kuna päeva lõpuks on CO₂ kontsentratsioon klassiruumides liiga kõrge. Teiseks järeldati, et koolis paigaldatud ventilatsioon MERV 8 filtritega ei suuda välja filtreerida väikseid tahkeid osakesi põlengust. Seejuures mainiti, et otseselt MERV 8 filtrite tööd selle tööga hinnata ei üritatud. Viimaks järeldati, et taoline madalahinnaline lahendus on õhukvaliteedi mõõtmiseks koolidele sobilik. Hoolimata sellest selgus uuringust, et sellist lahendust ei saaks koolides rakendada, kuna seda piiraks seadus või kindlustus tulenevalt töökindlama lahenduse nõudest.

Sarnaselt eelnevalt kirjeldatud töödele, mis keskenduvad ventilatsiooni süsteemide kontrollimisele või pädevuse analüüsile, on SmartEnCity projekti raames Tartus hetkel kasutatud õhukvaliteedi mõõtmisseadmeid ventilatsioonisüsteemide automatiseerimiseks [3]. Projekti raames paigaldatakse kindlatele korteritele õhukvaliteedi jäljimiseadmed, mis on ühenduses ventilatsiooniga. Põhiliselt mõõdetakse valitud kodudes CO₂ kontsentratsiooni ja õhutemperatuuri. CO₂ anduri poolt mõõdetud andmete alusel süsteem automaatselt ventileerib kodu, et vähendada CO₂ gaasi kontsentratsiooni. Samuti õhutemperatuuri anduri poolt mõõdetud andmete alusel jahutatakse või soojendatakse korterit. Kahjuks projekti kirjelduses

ei ole täpselt välja toodud, mis andureid projekt kasutab. Projekti infos on välja toodud, et projekti varustab andurite ja tehnoloogiaga Telia. Koguinvesteeringu summaks on märgitud umbes €400 000. SmartEnCity projekti üldine eesmärk on vähendada energiaarveid, suurendada energia kasutegurit, anda paremat kontrolli kodude sisemise kliima üle, muuta inimeste käitumist säästlikumaks energiatarbimise suhtes ja anda teenusepakkujatele parem ülevaade nende teenuste kasutamisest.

2.3. Olemasolevad lahendused

Tänapäeva turul, kus nutiseadmed ja nutilahendused on populaarsed, on olemas kümneid nutikaid kommertslike lahendusi õhukvaliteedi mõõtmiseks. Õhukvaliteedimõõtmist pakutakse erinevates hinnaklassides ning neid lahendusi eksisteerib nii kodudele ja kontoritele kui ka suurtele tehastele. Selles peatükis tutvustatakse ja võrreldakse kolme kommertsliku lahendust õhukvaliteedi mõõtmiseks kodus. Analüüsitavad mõõtmisseadmed on toodetud järgnevate ettevõtete poolt: Netatmo, Airthinx, Awair. Ettevõtted Awair ja Airthinx toodavad puhtalt õhukvaliteediga seonduvaid tooteid, kuid Netatmo toodab lisaks õhukvaliteedi ja ilmastiku hindamistoodetele ka turvalisussüsteeme ja automaatseid kliimaseadmeid.

Netatmo tootevalikust valiti *Weather Station* toode [9] kuna see oli ainuke toode, mis sisaldab endas siseruumide õhukvaliteedi mõõtmisseadet. *Weather Station* tootega tuleb kaasa kaks moodulit: siseruumimoodul ning õuemoodul. Käesoleva töö raames analüüsitakse siseruumimoodulit. Siseruumimoodul on suuruselt 155 mm x 45 mm x 45 mm [10] ja mõõdab järgnevaid parameetreid: õhutemperatuur, õhuniiskus, süsinikdioksiidi, õhurõhk ja helitugevus. Seade saab voolu USB juhtmest, mida saab ühendada pistikusse kaasa antud adapteri abil või sama juhtmega akupanga külge, et mõõta õhukvaliteeti mõnes pistikuta kohas. Seadmega tuleb kaasa ka veebi- ja mobiilirakendus, millega saab jooksvalt jälgida kõiki mõõdetavaid parameetreid ning saada üldist õhukvaliteedi hinnangut näiliselt lahtri värvi näol. Rakenduses muutub õhukvaliteedi hinnangu lahter värvi vastavalt õhu kvaliteedile. Lahter on roheline kui õhukvaliteet on hea, oranž kui on keskmine ja punane kui on halb. Lisaks saab jooksvalt üldist õhukvaliteedi hinnangut värvi kujul näha vajutades füüsilise mooduli peal asuvale nupule. Netatmo kogub andmeid nii lokaalselt seadmes kui ka pilves. Pilveteenuse tõttu vajab *Weather Station* funktsioneerimiseks 2.4 GHz Wifi võrku. Vajadusel on võimalik säilitatud andmed alla laadida CSV või XLS faili kujul. Netatmo *Weather Station*-i komplekt maksab Netatmo netipoes €169.99 [11]. Juhul kui tegu on suurema korteriga, siis on võimalik soetada ka lisa siseruumimoduleid hinnaga €69.99 tükk. Neid moduleid ei ole võimalik kasutada ilma esialgse *Weather Station*-i komplektita.

Netatmo *Weather Station* jälgib suuremat osa tähtsatest õhukvaliteedi parameetritest, kuid arvestades seadme hinda, siis lahendus oleks võinud mõõta ka näiteks orgaanilisi või tahkeid ühendeid õhus. Seejuures tänu odavamatele lisamoodulitele on võimalik raha kokku hoida juhul kui on soov mõõta õhukvaliteeti erinevates ruumides korraga. Samuti on heaks boonuseks keskmise kasutaja jaoks nii veebi- kui ka mobiilserakenduse olemasolu, mis annavad hea ülevaate kõigi sensorite poolt kogutud andmetest.

Järgmisena on analüüsitud Airthinx-i poolt loodud IAQ lahendus [4]. Airthinx-i IAQ lahendus on mõõtudes 110 mm x 66 mm x 30 mm. Selles seadmes on olemas mitu erinevat õhukvaliteedi mõõtmisensorit. IAQ sensorid mõõdavad järgnevaid ühendeid õhus: süsinikdioksiid, tahked osakesed (3 sensorit erinevate osakeste suuruste jaoks: PM1, PM2.5, PM10), õhutemperatuur, niiskus, õhurõhk, formaldehüüd ja lenduvad orgaanilised ühendid. Sensorite kogus ja mõõdetavate parameetrite hulk annavad väga täpse ülevaate õhukvaliteedist hoones. Lisaks sensoritele on seadmel olemas WiFi, GPS ja Bluetooth-i moodulid ning on olemas ka 4G võrgu kasutamiseks SIM kaardi port. Kuna seade ühendatakse elektrivooluvõrguga USB juhtme ja adapteri abil, siis on võimalik ühendada IAQ seada akupanga või mõne muu vooluallika külge ning selle abil jälgida õhukvaliteeti kohtades, kus ei ole läheduses pistikut. Komplekt sisaldab ka seinakinnitust, arvuti rakendust ning telefoni rakendust. Kõik andmed, mis IAQ seade kogub salvestatakse Airthinx-i poolt pakutud pilveteenusesse, kust saab neile ligi eelnevalt mainitud rakenduste kaudu. Lisaks statistilistele näitudele on võimalik IAQ seadme ümbriselt näha üldist õhukvaliteedi hinnangut. IAQ seadme äär on sinist värvi kui õhukvaliteet on hea, kollane kui on keskmine ja punane kui on halb. Üks IAQ seade maksab US\$699 või umbes €645 [12].

Üldiselt on Airthinx-i IAQ lahendus sobilik väiksematele kodudele või üksikute ruumide õhukvaliteedi mõõtmiseks, sest tegu on suhteliselt kasutaja sõbraliku ja mitmekülgse lahendusega. Kasutades ühte IAQ moodulit on võimalik saada väga hea ülevaade õhukvaliteedist toas või väiksemas hoones. Nii kõrge hinna tõttu oleks kulukas soetada mitut IAQ moodulit, et mõõta õhukvaliteeti mitmes toas korraga.

Viimasena on analüüsitud Awair-i toode nimega Element. Awair-i toode Element on suuruselt 154 mm x 84.7 mm x 45 mm [5]. Awair Element maksab US\$149 [13], või umbes €137, ja jälgib viite erinevat parameetrit õhus. Nendeks on: õhutemperatuur, õhuniiskus, süsinikdioksiid, lenduvad orgaanilised ühendid ja tahked osakesed suuruses PM2.5 [5]. Element saab voolu tavalisest pistikust. Sarnaselt Airthinx-i IAQ-le näitab Awair Element tasuta mobiilirakendusest õhukvaliteedi hinnangut skoori kujul, mis on skaalal 1-100-ni. Mobiilirakendusega on võimalik ühendada mitut Awairi toodet korraga, mis võimaldab jälgida

õhukvaliteeti erinevates maja osades või tubades. Element-il on lisaks olemas 2.4 GHz Wifi ja Bluetooth-i moodulid.

Kokkuvõttes on Netatmo *Weather Station* kallim kui Awair-i Element ja mõõdab vähem parameetreid, kuid Netatmo lisamoodulid on odavamaga kui esialgne toode, mis võimaldab odavamalt mõõta mitme toa õhukvaliteeti korraga. Airthinx-i IAQ kõige suuremaks miinuseks on toote hind, mis on pea 4 korda kõrgem kui Netatmo *Weather Station*-il, kuid samas IAQ mõõdab kõige rohkem parameetreid. Awair-i Element on kolmest tootest odavaim ning on sensorite arvult teine.

Tabel 1. Õhukvaliteedi mõõtmisseadmed, seadmete andurid täpsustega, seadme koguhind.

	Netatmo Weather Station	Airthinx IAQ	Awair Element
Õhutemperatuur	0 – 50 °C ± 0.3 °C	0 kuni 99°C (32 kuni 210.2°F) ± 0.5°C	-40 kuni 125°C (-40 kuni 257°F) ± 0.2°C
Lenduvad orgaanilised ühendid	-	1 – 30ppm	0 – 60ppm ± 10%
Õhuniiskus	0 – 100% ± 3%	0% kuni 99%RH ± 2%RH	0% kuni 100%RH ± 2%RH
Süsinikdioksiid	0 – 5,000 ppm ± 50 ppm @ 0 – 1000 ppm / 5% @ 1000 – 5000 ppm	0 – 3,000ppm ± 50ppm	400 – 5,000ppm ± 75ppm
Õhurõhk	260 – 1260 mbar ± 1 mbar	300 – 1100 hPa ± 1.3 Pa	-
Hind	€169.99	US\$699 €645	US\$149 €137

Tabelis 1 on välja toodud uurimistöö suhtes relevantseid seadmete andurid ja andurite täpsused ning lisaks kogu seadme hind koos kõigi relevantsete lisadega.

3. Õhukvaliteedi mõõtmislahenduse disain

Enne lahenduse loomist tuli koostada nii funktsionaalsed kui ka mittefunktsionaalsed nõuded nii loodava lahenduse tarkvarale kui ka riistvarale. Nõuete puudumisel võib lõplik lahendus olla kohati puudulik.

3.1. Tarkvaralised nõuded

Käesolevas peatükis tutvustatakse töö käigus valmiva lahenduse tarkvaralisi funktsionaalseid ja mittefunktsionaalseid nõudeid. Tarkvaralised nõuded on vajalikud selleks, et loodava lahenduse tarkvaraline pool oleks loodud korrektselt ning suuremate puudujääkideta.

Tabel 2. Tarkvaralised funktsionaalsed nõuded

Nr	Nõue
1	Seadmelt andmete edastus serverisse peaks toimima HTTP POST päringu abil.
2	Andmed peaksid olema salvestatud Interneti kaudu ligipääsetavas andmebaasis.
3	Andmete salvestus andmebaasi peab käima läbi veebiserveri funktsionaalsuse.
4	Veebiserver peab olema 24/7 kättesaadav internetis.
5	Andmebaas peab olema 24/7 kättesaadav internetis.
6	Seade peaks näitama visuaalselt, pärast andmete kogumist ja andmebaasi saatmist, kasutajale praegust õhukvaliteedi hinnangut.

Tabel 3. Tarkvaralised mittefunktsionaalsed nõuded

Nr	Nõue
1	Seadmest saadetud andmed peaksid salvestuma kuni 2 sekundi jooksul andmebaasi.
2	Tarkvaraline lahendus peaks ladustama kuni kolme sensori 7 päevaga kogutud andmehulka.

Ülevalolevates tabelites 2 ja 3 on kirjeldatud kõige tähtsamaid nõudeid. Lõplik funktsionaalsuse loend võib olla suurem.

3.2. Riistvaralised nõuded

Käesolevas peatükis tutvustatakse töö käigus valmiva lahenduse riistvaralisi funktsionaalseid ja mittefunktsionaalseid nõudeid. Riistvaralised nõuded on vajalikud selleks, et loodav lahendus mõõdaks kõiki vajalikke õhukvaliteedi parameetreid kindlates tingimustes ning kindla aja vältel.

Tabel 4. Riistvaralised funktsionaalsed nõuded

Nr	Nõue
1	Seadmel peaks olema võimalus töötada akutoitel.
2	Seade peaks olema võimeline ühenduma WiFi võrguga.
3	Seadmel peab olema võimalus lisada/ühendada sensoreid.
4	Seade peab suutma lugeda andmeid lisatud/ühendatud sensoritelt.
5	Seade peab suutma jälgida järgnevaid õhukvaliteedi parameetreid: LOÜ, CO ₂ , õhutemperatuur ja õhuniiskus.
6	Seadmel peab olema 3 eri värviga LED pirn või mõni muu ekraan, kus oleks võimalik kuvada kolme erinevat olekut.
7	Seadmel peab olema arvuti USB portiga ühendamise võimalus.
8	Seade peab olema programmeeritav või suuteline jooksutama kompileeritud koodi.

Tabel 5. Riistvaralised mittefunktsionaalsed nõuded

Nr	Nõue
1	Seade peaks töötama akutoitel vähemalt 12 tundi.
2	Seade peaks täitma kõiki eelnevalt mainitud funktsionaalseid nõudeid toatemperatuuril.

Ülevalolevates tabelites 4 ja 5 on kirjeldatud kõige tähtsamaid nõudeid. Lõplik funktsionaalsuse loend võib olla suurem.

4. Kasutatud tehnoloogiad

Tehnoloogia peatükk käsitleb erinevaid tehnoloogiasid, mida kasutatakse käesoleva töö raames valmiva rakenduse loomiseks. Käsitletakse nii tarkvara poolel kasutatavaid tehnoloogiasid kui ka riistvaralise poole tehnoloogiasid.

4.1. MySQL

Tarkvaralise osa raames kasutatakse andmete ladustamiseks MySQL andmebaasi. MySQL andmebaas on relatsioonilise andmebaasi haldamise süsteem [14][15]. MySQL on üks kõige populaarsemaid andmebaasi valikuid veebirakenduste puhul. Käesoleva projekti raames salvestatakse ja hoitakse MySQL andmebaasis õhukvaliteedi mõõtmisi erinevatelt sensoritelt.

MySQL andmebaas kasutab päringute esitamiseks SQL (*Structured Query Language*) keelt. SQL keel on tänapäeval kõige populaarsem keel andmebaasidega suhtlemiseks kuna see on kiire ja suhteliselt kergelt arusaadava süntaksiga.

4.2. Python Flask

Flask on kergekaaluline WSGI (*Web Server Gateway Interface*) veebirakenduse raamistik, mis on loodud Python-i programmeerimiskeeles [16]. Käesoleva projekti raames on veebiserver loodud Flask-i raamistiku abil. Kergekaalulise raamistiku all on mõeldud seda, et Flask-i raamistik on liberaalne projekti paigutuse ja sõltuvuste suhtes. Põhimõtteliselt teeb Flask-i raamistik ainult nii öelda soovitusi projekti paigutuse suhtes. Tänu sellele liberaalsusele on suhteliselt lihtne Flask-i projektiga alustada.

4.3. Heroku

Heroku on pilvepõhine PaaS (*Platform as a service*) teenus ehk teenus, mis võimaldab hostida enda rakendust veebis [17]. Heroku-s rakenduse hostimine aitab rakendust tutvustada vajadusel teistele osapooltele ning annab parema võimaluse rakenduse testimiseks. Käesoleva projekti puhul on MySQL andmebaas ning Flask-il põhinev veebiserver üles sätestatud Heroku keskkonnas ning seetõttu on mõlemad teenused veebis pidevalt saadaval.

4.4. Arduino IDE

Arduino on avalik riistvaraline ja tarkvaraline elektroonika platvorm [18]. Põhiliselt kasutatakse Arduino riistvara ja tarkvara prototüüpide loomiseks ja testimiseks. Käesoleva projekti raames Arduino plaate ei kasutatud, kuna on leitud selle projekti jaoks sobilikum alternatiiv. Kasutatakse ainult Arduino tarkvara.

Arduino tarkvarast kasutatakse täpsemalt Arduino IDE-t (*Integrated Development Environment*), mille kaudu saab üleslaadida C keelset koodi plaatidele, alla laadida vajalike teeked, kirjutada C keelset koodi ning kontrollida koodi õigsust plaadil Arduino IDE sisse ehitatud *parser*-i abil.

4.5. HTTP

Hüpertexti edastusprotokoll ehk lühendatult HTTP on teabe edastamiseks ja vastuvõtmiseks loodud protokoll, millel põhineb tänapäeva veeb. HTTP kasutab kommunikatsiooni edastamiseks päringuid ja vasteid [19]. Näiteks, minnes veebilehele saadame me veebilehel hostile GET päringu veebilehe sisu saamiseks. Veebilehe server saadab selle meile vastu juhul kui meil on õigus näha päritava veebilehe sisu. Samamoodi kasutatakse käesoleva projekti puhul HTTP-d, et edastada plaadilt, interneti kaudu, õhukvaliteedi andmed meie veebiserverisse POST päringu abil.

4.6. TTGO ESP32 plaat

ESP32 plaadid on odavad ja väikese energiakasutusega mikrokontrollerid erinevate lisadega [20]. Käesoleva töö raames kasutatud LilyGO TTGO ESP32 plaadil on WiFi ja Bluetooth moodulid. Mooduli südamik koosneb ESP32-D0WDQ kiibist, mis sisaldab kahte Xtensa 32-bit LX6 mikroprotsessorit. Mikroprotsessorite kellasagedused on 240 MHz. Antud projekti raames kasutatud plaadil on 4MB mälu. ESP32 plaadid tavaliselt saavad oma elektrienergia töötamiseks juhtme kaudu arvutist või seinast, kuid antud projektis kasutatava plaadi puhul on võimalik kasutada 18650 tüüpi akut, et moodul töötaks juhtmeta. Antud projekti raames kasutatud ESP32 plaadi puhul on akut võimalik laadida otse plaadi kaudu.

Interaktiivsetest osadest on plaadil ON/OFF lüliti ja 2 nuppu: EN ja BOOT [21]. EN nupp on mõeldud plaadi tegevuse taastamiseks ning BOOT nupp on mõeldud püsivara vahetamiseks. Lisaks on plaadil ka OLED ekraan ja 2 LED pirni, millest üks näitab aku laadimisprotsessi ning teine on lihtsalt programmeeritav pirn.

ESP32 plaadi ühendamiseks arvuti külge USB kaudu on tarvis CP210x USB -> UART Bridge VCP draiverid. Ilma nende draiveriteta ei ole võimalik üleslaadida koodi Arduino IDE kaudu moodulile. Lisaks USB porti draiveritele on vajalik ka ESP32 teek Arduino IDE jaoks. Teegi alla laadimisel on võimalik luua C programmeerimiskeeles tarkvara ESP32 plaatidele. Mooduli teegiga tulevad lisaks WiFi ühenduse teek ja I2C suhtlust siluv teek.

4.7. CJMCU-8128 sensor

CJMCU-8128 on kolme erinevat sensorit ühendav plaat. Antud sensorikogu ühendab järgnevaid sensoreid: BMP280, CCS811 ja HDC1080 [22].

BMP280 sensor mõõdab õhurõhku ja õhutemperatuuri [23]. Antud sensori puhul on õhurõhu veamarginaal ± 0.50 hPa ehk ± 0.0005 bar-i ja õhutemperatuuri puhul ± 0.2 °C. Andur mõõdab õhutemperatuuri vahemikus $-40 - 85$ °C. Õhurõhu mõõtmisvahemik on $300 - 1100$ hPa. BMP280 sensor on tarkvaralise poole pealt juhitud Adafruit-i BMP280 teegi abil, mis on saadaval Arduino IDE teegikogumis.

CCS811 sensor mõõdab lenduvaid orgaanilisi ühendeid ja õhutemperatuuri [24]. Kuigi CCS811 sensorit reklaamitakse CO₂ gaasi mõõtva sensorina, siis tegelikult CCS811 otseselt CO₂ gaasi ei mõõda. Moodulil paiknev MOX (loe: metall oksiid) sensor mõõdab LOÜ sisalduvust õhus ning vastavalt LOÜ kontsentratsioonile ning õhutemperatuurile arvutatakse eCO₂ ehk ekvivalente CO₂ kontsentratsiooni väärtus. LOÜ näit on võetud arvutuse aluseks sellepärast, et siseruumides on LOÜ põhilisteks allikateks inimtegevus (näiteks hingamine) ning ehitus või ehitusmaterjalidest eralduvad ühendid [32].

Õhutemperatuuri veamarginaaliks on CCS811 anduri puhul märgitud ± 0.2 °C. eCO₂ ja LOÜ mõõtude suhtes pole veamarginaali välja toodud [24]. eCO₂-te mõõdetakse vahemikus $400 - 8192$ ppm. Väärtused, mis jäävad antud vahemikust välja kärbitakse, et vältida vigaseid valelugemeid. LOÜ mõõdetakse vahemikus $0 - 1187$ ppb. Väärtused, mis jäävad antud vahemikust välja samuti kärbitakse. CCS811 sensor on tarkvaralise poole pealt juhitud Adafruit-i CCS811 teegi abil, mis on saadaval Arduino IDE teegikogumis.

HDC1080 sensor mõõdab suhtelist niiskust ja õhutemperatuuri [25]. Niiskuse mõõdu puhul on veamarginaaliks märgitud $\pm 2\%$ ja õhutemperatuuri mõõdu puhul ± 0.2 °C. Õhuniiskust mõõdetakse skaalal $0 - 100\%$ RH. Õhutemperatuuri mõõdab sensor vahemikus $-40 - 125$ °C. HDC1080 sensor on tarkvaralise poole pealt juhitud ClosedCube-i HDC1080 teegi abil, mis on saadaval Arduino IDE teegikogumis.

Käesoleva töö raames kasutatakse BMP280 sensorit, et mõõta õhutemperatuuri. BMP280 sensor näitas kolmest sensorist kõige stabiilsemaid andmeid lahenduse arenduse käigus. Lisaks lahutatakse BMP280 näidust 5 kraadi, et eemaldada plaadi poolt tekitatud soojuse mõju andmetele. Otsus lahutada konkreetselt 5 kraadi tuli testimisel võrdlusest toas asetseva kraadiklaasiga. CCS811 sensori poolt mõõdetud õhutemperatuuri ei kasutata, kuna lahenduse testimisel oli CCS811 sensori poolt mõõdetud õhutemperatuur kõikus rohkem kui BMP280

poolt mõõdetud õhutemperatuuri näit. Pikaajsete testide puhul selgus, et HDC1080 õhutemperatuuri andur ei ole stabiilne ning kohati lakkab töötamast umbes 30-ks minutiks väljastades samaaegselt maksimaalset temperatuuri näitu ehk 125 kraadi.

5. Lahendus

Käesolev peatükk tutvustab lahenduse riistvaralist ning tarkvaralist poolt. Esialgu on kirjeldatud töö riistvaraline osa, kus on selgitatud lahenduse riistvaralised valikud. Sellele järgneb tarkvaraline osa, mis koosneb põhiliselt programmide ja kindlate koodijuppide kirjeldustest.

5.1. Riistvara

Riistvara valimisele eelnevalt tuli sätestada eelarve selleks, et lahenduse hind ei oleks ülemäära suur. Loodava lahenduse juures moodustab finantsilist kulu ainult riistvara, kuna tarkvaralisel poolel kasutatakse ainult vabavara või rakenduste tasuta versioone ning tööaega ei ole arvestatud kuluna. Turul olemasolevate lahenduste peatükis selgus, et kolmest tootest oli kõige odavam Awair-i poolt loodud Element, mis maksis €137. Selleks, et loodav rakendus tuleks märkimisväärselt odavam turul pakutavatest toodetest on ühe loodava toote ühiku (ühe sensori) eelarveks sätestatud 1/3 Awair Element-i maksumusest ehk ümardatult €45.

Esmalt oli eesmärk leida andurid ning seejärel vastavalt anduritele saaks valida nendega ühilduva ja võimalikult odava platvormi. Sensori leidmise puhul ei olnud väga palju valikuid kuna otsides kindlate õhuparameetrite järgi sensoreid tulidki välja, kas juba valmis lahendused nende parameetrite jälgimiseks, kallimad tööstuslikud sensorid või prototüüpimiseks mõeldud sensorid.

Võrreldes veebikeskkondades erinevaid andureid osutus hinna ja funktsionaalsuse osas kõige mõistlikumaks CJMCU-8128 sensorikogu. CJMCU-8128 sensorikogu sisaldas endas kolme sensorit: BMP280, CCS811 ja HDC1080. Kolme sensori abiga sai mõõta kokku viit õhukvaliteedi parameetrit: õhutemperatuuri, lenduvaid orgaanilisi ühendeid, süsinikdioksiidi ekvivalenti, suhtelist õhuniiskust ja õhurõhku. Lõplik seade otsustati tellida „Banggood.com“ veebilehelt, kus seadme hinnaks osutus €14.51 koos transportiga.

CJMCU-8128 sensori valik jättis eelarvesse veel ümardatult €30. Platvormivaliku puhul tuli arvestada aku ja selle laadija maksumusega, kuna üheks riistvaraliseks nõudeks on töövõime akutoitel. Lisakuludest tuli arvestada täiendavate ühendusjuhtmete hinnaga. Juhtmed olid vajalikud sensorikogu ja platvormi ühendamiseks. CJMCU-8128 sensoril oli 8 isast *dupont* ühendust, seega tuli arvestada maksimaalselt 8 juhtmega üksuse kohta.

Esialgsete otsingutulemuste põhjal osutusid platvormikandidaatideks kaks Raspberry Pi toodet: Raspberry Pi 4 ning Raspberry Pi Zero W. Raspberry Pi 4 on krediitkaardi suurune miniarvuti,

mis on disainitud olema maksimaalselt võimas oma väikese suuruse kohta. Raspberry Pi 4 85mm lai ja 49mm kõrge, kuid samas on varustatud 4 tuumalise Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit protsessoriga ning kuni 4 GB SDRAM-iga [26]. Lisaks SDRAM-i kogusele ja protsessorile on Pi 4-l mitmeid porte (Tabel 6. Raspberry Pi 4-l on samuti olemas WiFi moodul ja Ethernet port. Versioon, mis sisaldab 2GB SDRAM-i maksab €45.00 - €46.00 vahemikus ilma transpordikuluta.

Raspberry Pi Zero W on Pi 4-ja odavam ja riistvaraliselt nõrgem versioon. Pi Zero W kasutab ühetuumalist protsessorit ja omab 512MB RAM-i [27]. Raspberry toodab Pi Zero mikroarvuti ilma Wifi moodulita, kuid Pi Zero W puhul tähendab tootenimes esinev W täht wifit mooduli olemasolu. Hinnavahe on kahel tootel sellest tingitud ümardatult €3. Tavaliselt saab Pi Zero W toidet microUSB porti kaudu, kuid Pi Zero W-le on võimalik osta ka aku kinnitus, mis teeb toote hinnaks sarnaselt Pi 4-le ümardatult €47 ilma transpordita.

Kuna Raspberry tooted olid kahjuks liiga kallid käesoleva projekti jaoks, siis oli otsustatud leida odav mikrokontrollerit. Otsingute tulemuseks osutus LilyGo TTGO ESP32 mikrokontroller. Leitud mikrokontroller on Arduino IDE-ga lihtsasti programmeeritav, omab OLED kuvarit, mahutab 18650 tüüpi akut ning seda on võimalik ühendada micro-USB kaudu arvuti külge. Samuti on sellel isased *dupont* ühendused, mille abil on võimalik ühendada CJMCU-8128 antud mikrokontrolleri külge. Ühe ühiku hinnaks kujunes koos transportiga €10.43. Lisaks olid valitud akud, mis maksid €3.73 koos transportiga. Koos emane-emane juhtmetega, mis maksavad keskmiselt €1 10 juhtme kohta, ja akuga tuli mikrokontrolleri üksuse hinnaks €15.16. LilyGO TTGO ESP32 mikrokontrolleri ja CJMCU-8128 sensorikogu valimise tagajärjena osutus netohinnaks üksuse kohta €29.67. Allpoolses tabelis on väljatoodud kolme mikroarvuti konkurendi tehnilised andmed parema ülevaate andmiseks.

Tabel 6. Ülevaade kolmest kõige tõenäolisemast platvormi konkurendist.

	LilyGO TTGO ESP32	Raspberry Pi 4	Raspberry Pi Zero W
Protsessor	2x Xtensa 32-bit LX6 240 MHz microprocessor	Broadcom BCM2711, Quad core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC @ 1.5GHz microprocessor	ARM1176JZF-S Single-core 1 GHz microprocessor
RAM	4 MB	1GB/2GB/4GB	512 MB
Wifi & Bluetooth?	Mõlemad	Mõlemad	Ainult Wifi
Maketeerimis-ühenduste olemasolu?	Jah	Jah	Jah
Aku ühendamise võimalus?	Jah, integreeritud	Jah, USB-C ühenduse näol	Jah, lisatasu eest
Kuvar?	Jah, integreeritud	Ei	Ei
USB ühenduse võimalus?	Jah, microUSB	Jah, 2x USB 3.0, 2x USB 2.0	Jah, microUSB x2
Lisa pordid	-	2x micro-HDMI, MIPI DSI display port, MIPI CSI camera port, Gigabit Ethernet, micro SD	Mini HDMI, micro SD
Ühiku hind transportiga	€10.43	€52.45	€16.49
Hind lisadega kokku	€15.16	€52.45	€52.18

Kokkuvõttes olid Raspberry pakutud tooted palju võimsamad ja tegelikult paremad, kuid olid ka seetõttu palju kallimad. Käesoleva töö raames loodava lahenduse jaoks sobib nii võimekuselt kui ka hinnalt LilyGO TTGO ESP32 plaat kõige paremini.

5.2. Tarkvara

Tarkvaralise poole arenduse alguses oli otsustatud alustada projekti infrastruktuuri loomisega. Antud kontekstis on mõeldud infrastruktuuri all veebiserverit ning andmebaasi.

5.2.1. Heroku, Andmebaas ja veebierver

Peatükis „Olemasolevad lahendused“ kõik analüüsitud tooted kasutasid pilvepõhiseid või pilvelahendustele väga sarnaseid viise andmete ladustamiseks. Sellest tulenevalt olid püstitatud tarkvaralised nõuded „4. Veebiserver peab olema 24/7 kättesaadav internetis“ ja „5. Andmebaas peab olema 24/7 kättesaadav internetis“. Nende nõuete tagamiseks on käesoleva töö raames kasutatud Heroku-t. Heroku täidab mõlemad nõuded ning tagab ligipääsetavuse veebiserverile ja andmebaasile igal hetkel, millal mikrokontrolleril oleks seda vaja.

Andmed on ladustatud samuti Heroku keskkonna abiga. Andmebaasiks on MySQL andmebaas, mis koosneb ühest tabelist. Kuna andmebaas on hostitud Heroku serverites, siis *timestamp*, mis tekib *created* parameetri alla on GMT ajast. Andmebaasis kasutatud tabel on loodud järgneva SQL koodi abil:

```
1. CREATE TABLE sensor_data (  
2. ID int NOT NULL AUTO_INCREMENT,  
3. board_ID int DEFAULT NULL,  
4. created DATETIME NOT NULL DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP,  
5. temp DOUBLE DEFAULT 0.0,  
6. voc DOUBLE DEFAULT 0.0,  
7. hum DOUBLE DEFAULT 0.0,  
8. CO2 DOUBLE DEFAULT 0.0,  
9. PRIMARY KEY (ID));  
10.  
11. ALTER TABLE sensor_data MODIFY COLUMN pres double DEFAULT 0.0;
```

Joonis 1. „sensor_data“ nimelise tabeli loomis ja modifitseerimis SQL kood.

Käesolevaks projektiks loodud veebiserver on kirjutatud Python-i keeles ning kasutab Flask raamistikku funktsionaalsuse loomiseks. Veebiserveri kood koosneb kolmest põhimeetodist: andmebaasiühenduse loomismeetod *getDBConnection()*, 404 vea käsitlemismeetod *not_found()* ja POST päringu käsitlemismeetod *post_data()*.

Andmebaasiühenduse loomismeetod on staatiline sisendita meetod, mis kasutab Python-i teeki *PyMySQL*, et luua ühendus MySQL andmebaasiga. Ühenduse objekt on antud meetodi väljund ning antud ühenduse objektiga saab saata päringuid andmebaasi.

POST päringu käsitlemismeetod on üks kahest meetodist, mis tegeleb veebist sooritatud päringute käsitlemisega. Käsitlemismeetod on rakendatud juhul kui /data indeksile on

sooritatud POST päring. Täpsemalt ootab meetod plaintext sisu kaasa POST päringuga ning POST päringu saabumisel esimese asjana dekodeeritakse sisu UTF-8 formaadis Python-i *String*-iks. Saadud *String* sisaldab endas komadega eraldatud sensorite andmeid. Järgmisena luuakse dekodeerimise käigus saadud *String*-i põhjal massiiv ning seejärel luuakse andmebaasi ühendus vastava meetodiga. POST päringu käsitlemismeetod on ainuke meetod, kus luuakse ühendus andmebaasiga vastava abimeetodi abil. Viimasena saadetakse läbi andmebaasi ühendusobjekti *INSERT* päring sensoriandmetega andmebaasi ning suletakse ühendus.

Kokkuvõttes on tegu veebiserveriga, mis võtab vastu ühte tüüpi POST päringut ja salvestab POST päringu poolt antud andmed andmebaasi. Kui loodud lahendus on analüüsi lõpuks peetud konkurentsivõimeliseks, siis oleks kindlasti vaja lisada veebiserverile turvalisust, näiteks autenditud POST päringute näol, et kellelgi kõrvalisel ei oleks võimalik andmeid solkida. Õnneks ei ole võimalik läbi veebiserveri andmetele ligi pääseda kuna veebiserver ei soorita *SELECT* päringuid andmebaasi. Ainuke teoreetiline võimalus oleks SQL injection, kuid praeguse veebiserveri disaini juures on sellega arvestatud ning selle võimalus POST päringu töötlemismeetodis elimineeritud.

5.2.2. ESP32 mikrokontroller

Mikrokontrolleri juhtkood on kirjutatud C keeles Arduino IDE abil ning on täies mahus kättesaadav Github-ist (vt Lisa 1). Mikrokontrolleri juhtkood koosneb kokku viiest meetodist, millest 2 meetodit *setup()* ja *loop()* on meetodid, mida Arduino vaikimisi jooksub. Esialgu käivitatakse *setup()* meetod ning seejärel jääb lõpmatus tsüklis käivituma *loop()* meetod. Ülejäänud kolm meetodit on lisameetodid, mis on loodud parema koodi arusaama moodustamiseks. Nendeks on: post päringu saatmismeetod *post()*, õhukvaliteedi reitingu väljastamismeetod *rateAirQuality()* ja mõõtude ekraanile väljastamismeetod *displayData()*.

Setup meetod ei kasuta lisameetodeid ning seal toimub põhiliselt nõuete kontroll. Nimelt esialgu ühendatakse mikrokontroller Wifi võrku *Wifi.h* teegi abil. Sellele järgneb sensoritega ühendusobjektide loomine, nende sensori ühendusobjektide kalibreerimine ja displei käivitus. Täpsemalt vajab nii-öelda kalibreerimist CCS811 sensori teek. Selleks, et sensor LOÜ-d ja eCO₂-te korralikult näitama hakkaks on vaja teha sensorile mitu päringut. *Setup* meetodis, väikeste vahedega, on tehtud 3 päringut LOÜ ja eCO₂-e järgi ning selle abiga on esimene tegelik mõõtmine täpsem.

Loop meetodisse on paigutatud skripti tuumik. Tsükli iteratsioonide vahel on alati paus. Töö käigus kasutati pausipikkusena 300000 millisekundit ehk 5 minutit. Esimesena *loop* meetodis

võetakse mõõdud kõikide parameetrite kohta. Enamus õhukvaliteedi mõõtudest on väljastatud korrektses formaadis, kuid mõned mõõdud on konverteeritud ümber sobilikemaks ühikuteks või mõnevõrra korrigeeritud. Kõigepealt on konverteeritud BMP280 sensorist tulenev õhurõhunäit hektopaskalist bar-iks jagades sensoriväljundit 1000-ga. Kuigi õhutemperatuuri mõõdavad kõik 3 sensorit, siis BMP280 õhutemperatuuri sensor on mitme testi jooksul olnud töökindlam kui HDC1080 ja CCS811 õhutemperatuuri sensorid. Lisaks sellele oli avastatud, et CJMCU sensoriplaat saab ise märkimisväärselt kuumaks kui ta töötab üle 30 minuti ning seetõttu lahutatakse temperatuurinäidikust 5 kraadi, et näit oleks lähedasem reaalsusele. Otsus lahutada konkreetselt 5 kraadi tuli võrdlusest toas asetseva kraadiklaasiga. Sellise näidikumanipulatsiooni tõttu võivad esimesed mõõtmised näidata valet õhutemperatuuri ja erineda tegelikkusest. Kahjuks on selline manipulatsioon vajalik, et säilitada korrektseid andmed edaspidi.

Pärast andmete kogumist käivitatakse *rateAirQuality* meetod, millega saavutatakse õhukvaliteedi reiting. Reitingut ei salvestata andmebaasi ning see on mõeldud rohkem kasutajale, kes ei tea lahenduse tehnilist poolt sügavalt ja tahaks lihtsalt teada saada, kas tema õhuga on kõik korras või ei. Reitingu vormistamisel kasutatakse 4 õhukvaliteedi parameetrit: õhutemperatuuri, lendavaid orgaanilisi ühendeid, eCO₂ kogust ja õhuniiskust. Õhukvaliteedi reiting on 100 palli skaalal ning iga parameeter saab panustada sellesse maksimaalselt 25 palli. Igal parameetril on alumine ehk halb piir ja ülemine ehk hea piir, mille järgi jagatakse punkte. Nimelt kui näiteks eCO₂ näidik ületab halba piiri, siis eCO₂ panustab lõppreitingusse 0 punkti, kuid kui näiteks eCO₂ näidik ületab head piiri, siis eCO₂ panustab lõppreitingusse 25 punkti. Kui näidik jääb selle kahe piiri vahel olevasse vahemikku, siis punktiskoori saamiseks rakendatakse talle allolevat valemit:

Y = Sisend ehk näit

X1 = parima piir

X2 = halvima piir

$$R = \lceil 25 - \left(25 * \frac{|(Y - X1)|}{|(X2 - X1)|} \right) \rceil$$

Näide eCO₂ reitingu moodustumisest kui eCO₂ mõõdetud näit on 490 ppm:

Y = 490 ppm

X1 = 350

$$X2 = 5000$$

$$R = \left\lceil 25 - \left(25 * \frac{(490 - 350)}{(5000 - 350)} \right) \right\rceil = 24$$

Ülalmainitud valemis kasutatakse absoluutväärtust selleks juhuks kui õhutemperatuur peaks olema 20 ja 18 kraadi vahel. Sellisel juhul on halvim piir 18 ja parim piir 20 ehk nii murru alla kui ka üles tuleb negatiivne väärtus. Kõigi parameetrite piirid on kirjeldatud järgmises tabelis:

Tabel 7. Õhukvaliteedi reitingu loomiseks kasutatud parameetripiirid.

Parameeter	Parima näidu piir	Halvima näidu piir
eCO ₂	350 ppm [29]	5000 ppm [29]
LOÜ	1 ppb	108 ppb [28]
Õhuniiskus	50% RH [30]	60% RH [30]
Õhutemperatuur	20 °C / 26 °C [31]	18 °C / 28 °C

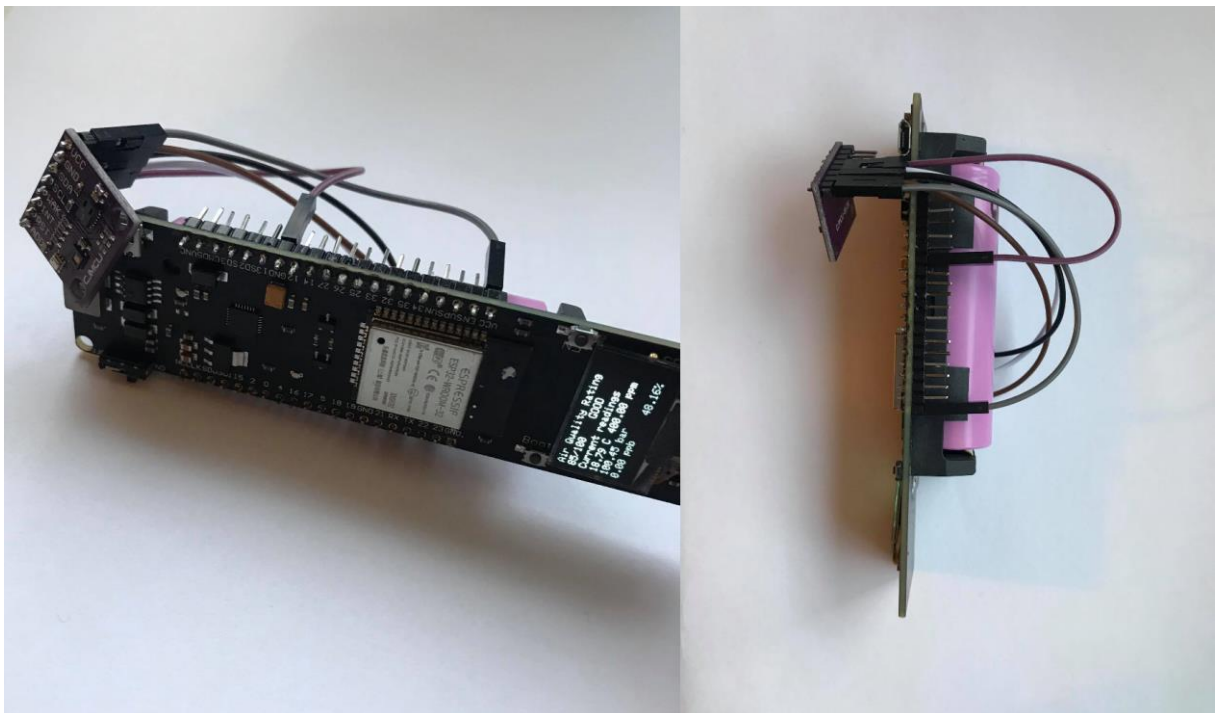
Pärast igale parameetrile reitingu andmist liidetakse kõikide parameetrite reitingud kokku ning väljastatakse õhukvaliteedihinnang 0 – 100ni skaalal. Vastavalt numbrilisele reitingule määratakse ka sõnaline reiting inglise keeles. Kui reiting on alla 50, siis kuvatakse displeile sõna „BAD“, kui reiting on alla 75, aga 50 või suurem, siis sellisel juhul kuvatakse displeile sõna „AVERAGE“ ning kui reiting on 75+, siis kuvatakse displeile sõna „GOOD“. Kõik displeile kuvatud info kuvatakse läbi *displayData* meetodi, kus kuvatakse lisaks numbrilisele ja sõnalisele õhukvaliteedi reitingule kõik äsja võetud mõõdud.

Kõige viimasena *loop* meetodis esineb *post* meetod, mis saadab POST päringu Heroku-s hostitud veebiserverisse. POST päringuga on kaasa antud *String*, mis sisaldab komaga eraldatud kujul andmeid järgnevas formaadis: plaadi ID, õhutemperatuur, õhurõhk, LOÜ, eCO₂, õhuniiskus.

6. Lahenduse testimine ja analüüs

Käesoleva peatüki jooksul analüüsitakse loodud lahenduse täpsust ning pädevust. Esialgu tutvustatakse esimese testi andmeid ning analüüsitakse, kuidas muutused keskkonnas otseselt mõjutavad anduri mõõtmisi. Sellele järgneb käesoleva töö raames loodud lahenduse võrdlus Netatmo *Weather Station* lahendusega. Peatüki lõpus analüüsitakse loodud lahenduse mastaapsust.

6.1. Lahenduse testimine



Joonis 2. Käesoleva töö raames loodud lahendus.

Loodud lahendust saab COVID-19-st tingitud keeldudest ja liikumispääsudest katsetada väga limiteeritud tingimustes. Esialgne plaan nägi ette esialgset andmete kogumist ja testimist kodus, seejärel IPF Digital AS kontoril ning viimaks Tartu Ülikooli DELTA hoones. Viiruseleviku peatamiseks on käesoleva töö kirjutamise hetkel nii IPF Digital AS kontor kui ka Tartu Ülikooli DELTA hoone suletud avalikkusele k.a tudengitele.

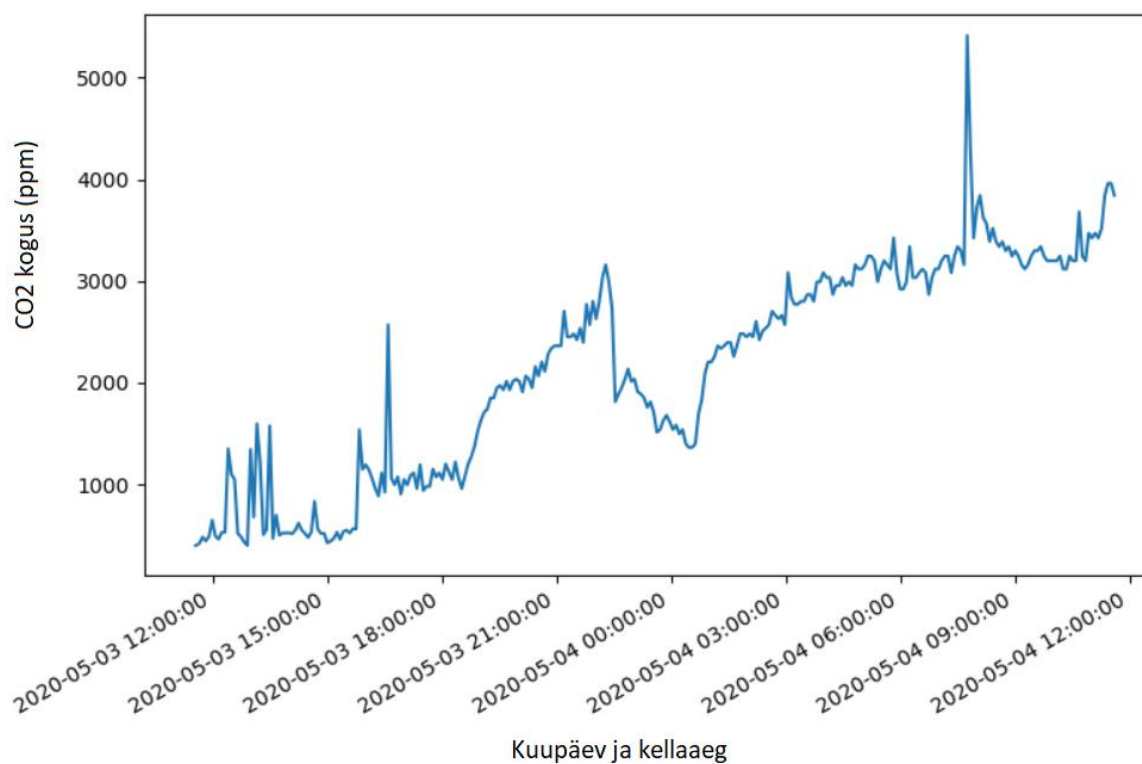
Lahenduse esialgseks testimiseks mõõdeti õhukvaliteeti umbes 24 tunni (± 3 min) vältel kella 11:33-st kuni 11:36-ni magamistoas. Magamistoas pindala on 10.73 m² ja laekõrgus 2.46m. Magamistoas ööbis 1 inimene suletud akna ning uksega. Ventilatsioon käesolevas toas täielikult puudub. Andur asetati silma järgi toa keskpunkti ning kõrgusele 0.74 m. Kogutud andmed on

saadaval täies mahus Lisa 1 all. Järgnev tabel ja graafikud illustreerivad eelnevalt mainitud perioodil kogutud andmeid:

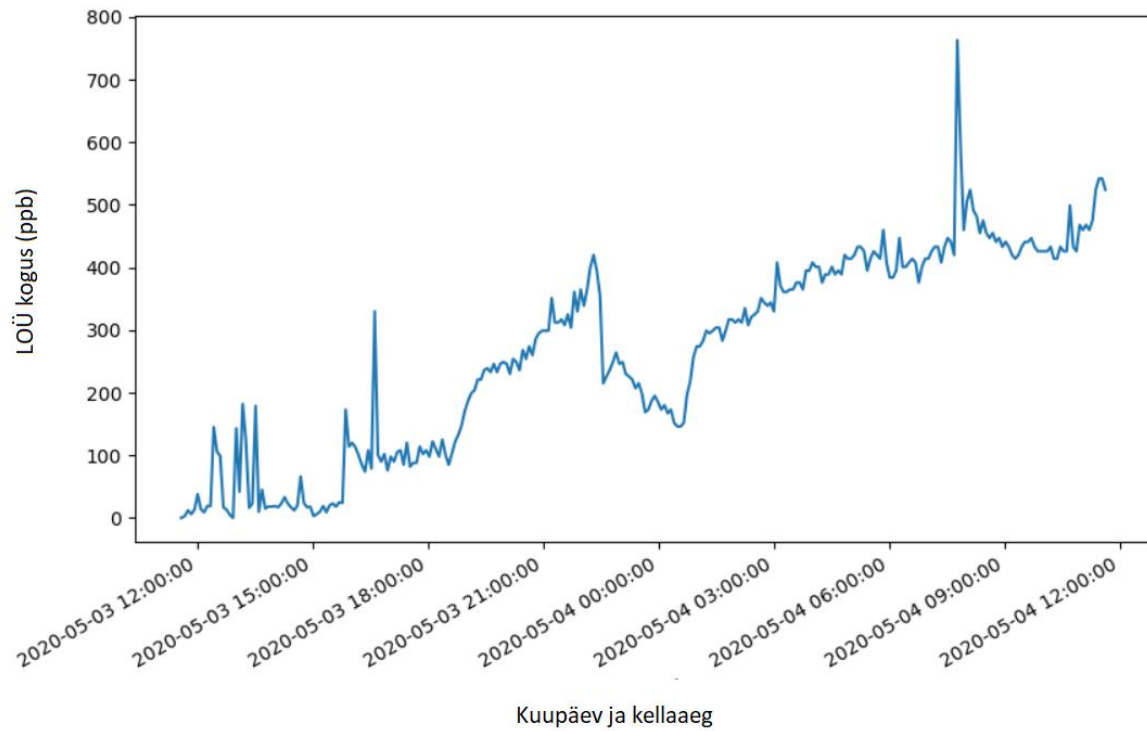
Tabel 8. Kogutud tulemuste statistika.

	eCO ₂	LOÜ	Õhutemperatuur	Õhuniiskus	Õhurõhk
Keskmine	2134.18 ppm	263.74 ppb	22.38 °C	36.8% RH	100.78 bar
Standardhälve	1048.94 ppm	159.81 ppb	0.44 °C	2.18% RH	0.16 bar
Suurim väärtus	5414 ppm	763 ppb	23.41 °C	42.19% RH	101.11 bar
Vähim väärtus	400 ppm	0 ppb	21.06 °C	33.47% RH	100.45 bar

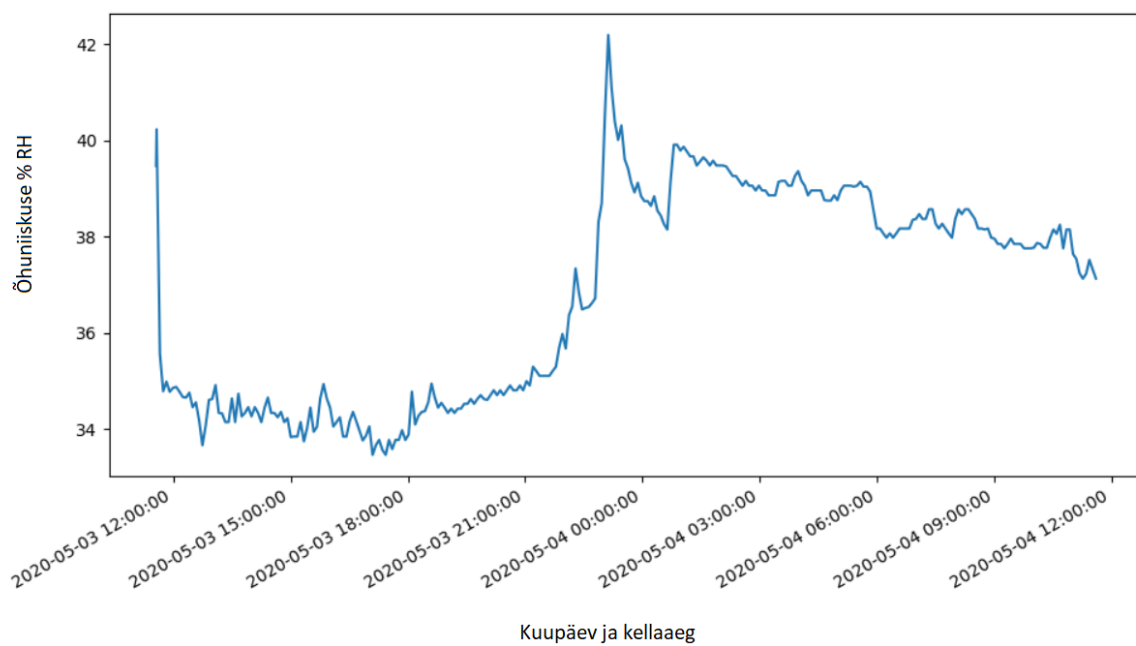
Tähtsaimaid andmeid illustreerivad graafikud:



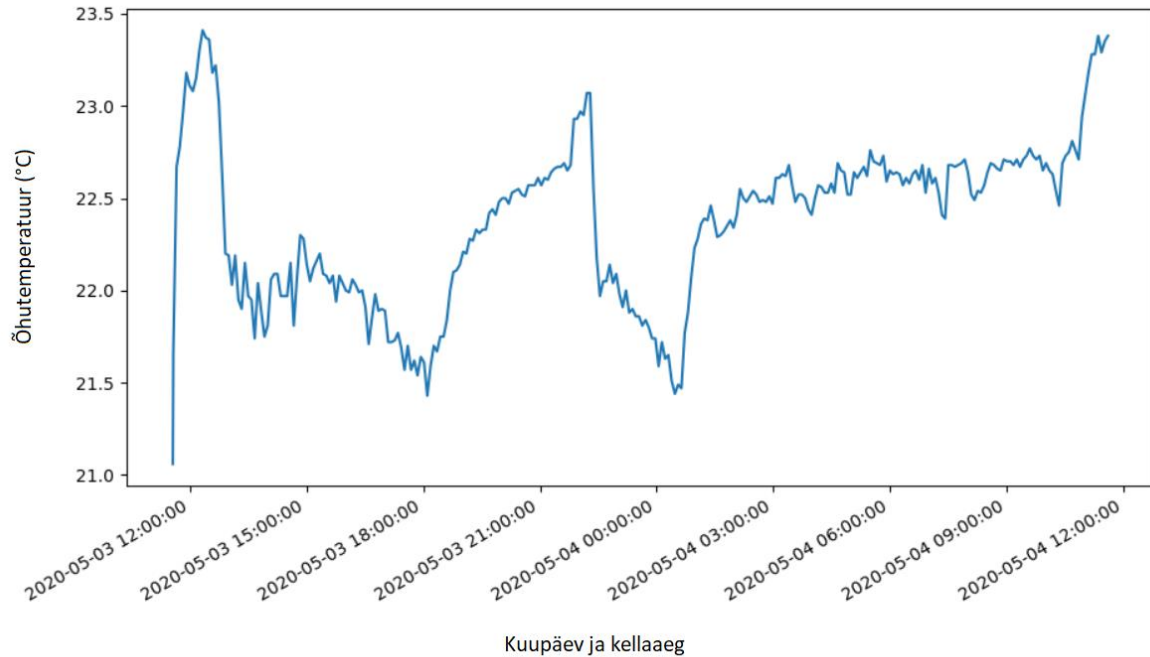
Graafik 1. eCO₂ graafik.



Graafik 2. LOÜ graafik.



Graafik 3. Öhuniiskuse graafik.



Graafik 4. Õhutemperatuuri graafik.

Kõik graafikud viitavad sellele, kuidas õhk hakkab saastuma kinnises ventileerimata ruumis, kus viibib terve päeva ja öö vältel inimene. Graafikud näitavad stabiilset näitude tõusutrendi hetkeni, kus avatakse aknad. Aknad avati kell pool 1 päeval ja kella 10 paiku õhtul ja hoiti avatuna vastavalt kella 6-ni päeval ja 1-ni öösel. eCO₂ graafik teeb kohati äkilisi hüppeid eCO₂ kontsentratsioonile. Antud hüpped võisid olla tingitud sensorile mittetahtlikust otsesest peale hingamisest.

Kui vaadata LOÜ ja eCO₂ graafikuid (graafik 1 ja graafik 2), siis on näha, et graafikud on põhimõtteliselt identsed. Sellest võib järeldada, et CCS811 MOX ehk LOÜ andur eeldab, et valdav enamus lenduvaid orgaanilisi ühendeid õhus on inimeste toodetud CO₂ ja arvutab vastavalt LOÜ kontsentratsioonile eCO₂ kontsentratsiooni. Seetõttu võib CCS811 väljastatud eCO₂ näit drastiliselt erineda mõnest täpsemast sensorist, mis on CO₂ mõõtmisele pühendunud.

Graafikud ning arvutused on tehtud Python-i skripti abiga, mis kasutab teeki *pandas* ja *matplotlib* andmete struktureerimiseks, arvutusteks ning graafikute loomiseks. Skript on täies mahus saadaval Lisa 1 all.

6.2. Lahenduse võrdlus kommertslikult pakutud lahendusega

Selleks, et kindlaks teha, et eelmises peatükis kogutud andmed on õiged ja usaldusväärsed tuleb võrrelda käesoleva töö raames loodud lahendust mõne kommertsliku lahendusega. Parasjagu ei olnud võimalik selle töö raames soetada ei Airthinx-i andurit ega Awair Element andurit.

Eelnevalt mainitud kahe lahenduse asemel on võetud töö raames loodud lahenduse konkurendiks Netatmo lahendus.

Netatmo *Weather Station*-i on pikemalt kirjeldatud varasemas „Olemasolevad lahendused“ peatükis. Käesoleva töö raames loodud lahendus mõõdab rohkem parameetreid kui Netatmo, kuid samu parameetreid mõõtvate sensorite võrdlus on väljatoodud Tabel 10-s.

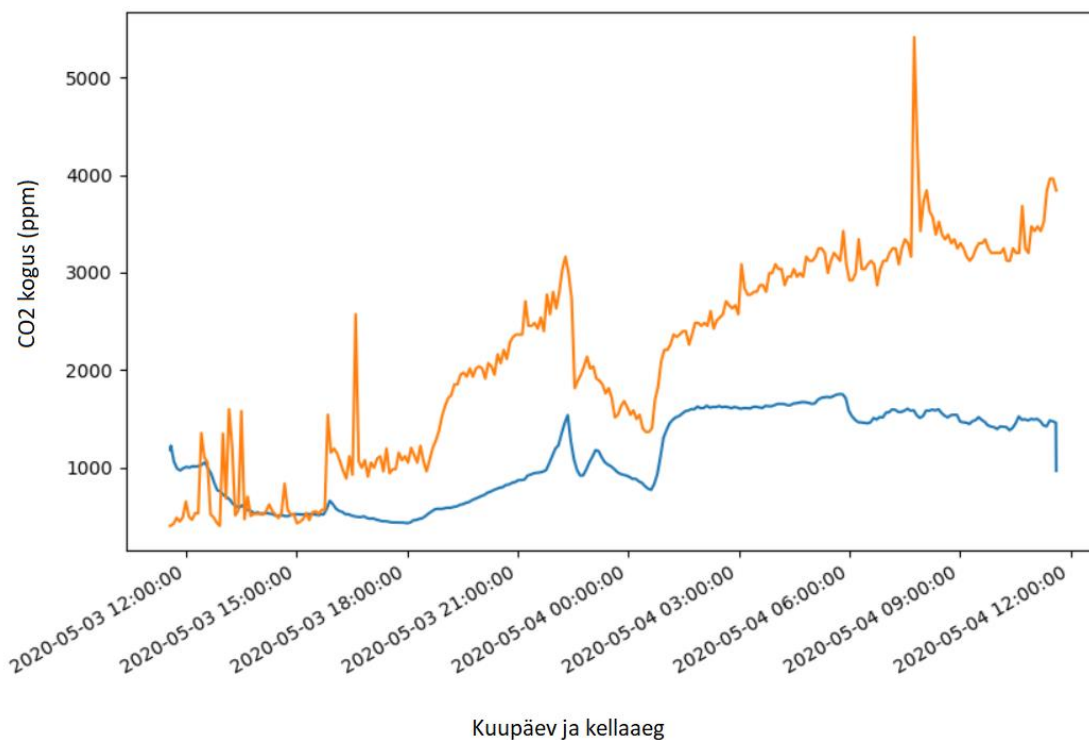
Tabel 10. CJMCU-8128 ja Netatmo sensorite tehniliste andmete ning hinna võrdlus.

	ESP32 + CJMCU-8128	Netatmo
CO ₂	400 – 8192 ppm ± ?	0 – 5000 ppm ± 50 ppm @ 0 – 1000 ppm / 5% @ 1000 – 5000 ppm
Õhuniiskus	0 – 100% RH ± 2%	0 – 100% ± 3%
Õhutemperatuur	HDC1080 -40 – 125 °C ± 0.2 °C BMP280 -40 – 85 °C ± 0.2 °C	0 – 50 °C ± 0.3 °C
Hind (lahendus tervikuna)	€15.16	€169.99

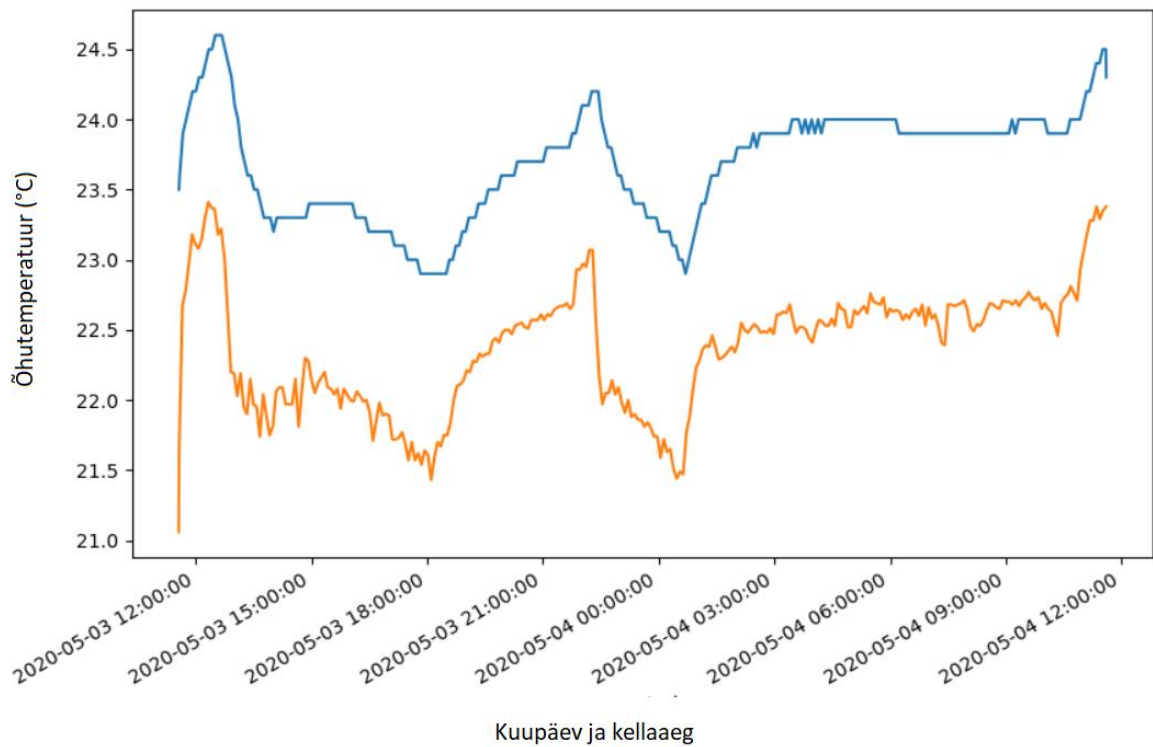
Loodud lahenduse kompetentsi kontrollimiseks mõõdeti õhukvaliteeti kahe lahenduse poolt samaaegselt 24 tunni vältel. Katsetusalana kasutati eelmises peatükis kirjeldatud tuba. Statistika võrdlus iga parameetri kohta on nähtav tabelis 11.

Tabel 11. Statistika võrdlus kahe lahenduse vahel.

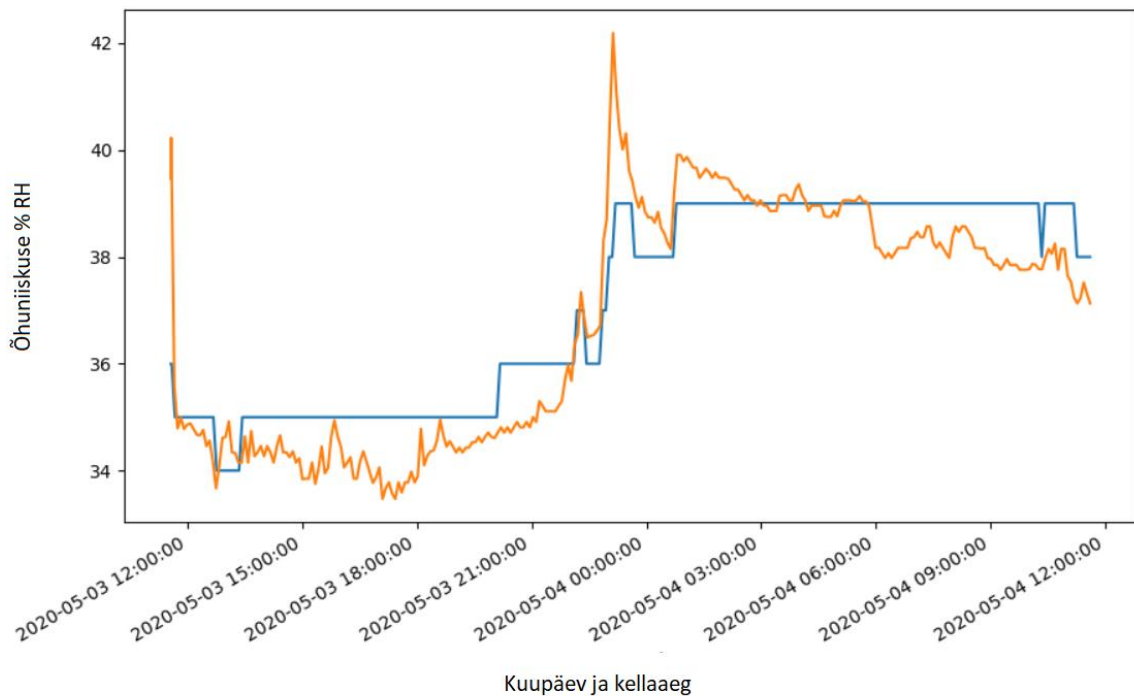
CO ₂	ESP32 + CJMCU-8128	Netatmo
Keskmine	2134.18 ppm	1103.38 ppm
Standardhälve	1048.94 ppm	449.58 ppm
Suurim väärtus	5414 ppm	1752 ppm
Vähim väärtus	400 ppm	428 ppm
Õhutemperatuur		
Keskmine	22.38 °C	23.69 °C
Standardhälve	0.44 °C	0.39 °C
Suurim väärtus	23.41 °C	24.6 °C
Vähim väärtus	21.06 °C	22.9°C
Õhuniiskus		
Keskmine	36.8% RH	37.13% RH
Standardhälve	2.18% RH	1.87% RH
Suurim väärtus	42.19% RH	39% RH
Vähim väärtus	33.47% RH	34% RH



Graafik 5. CO₂ graafik. ORANŽ – Loodud lahendus ehk eCO₂ näit, SININE – Netatmo ehk CO₂ näit.



Graafik 6. Õhutemperatuuri graafik. ORANŽ – Loodud lahendus, SININE – Netatmo.



Graafik 7. Õhuniiskuse graafik. ORANŽ – Loodud lahendus, SININE – Netatmo.

Vaadates graafikuid ja statistilist võrdlus on märgatav, et kõige rohkem erinevad eCO₂ parameetri näidud (graafik 5). Samas on märgata, et mõlemad kõverad jälgivad samasuguseid tõusu- ja langustrende. Toetudes Tabel 11 andmetele võib väita, et loodud lahenduse eCO₂ andmed erinevad Netatmo andmetest märgatavalt. Andmete erinevus on arvatavasti tingitud erinevatest mõõtetehnikatest. CCS811 andur tegelikkuses ei mõõda otseselt CO₂ gaasi sisalduvust õhus, vaid antud andur ennustab CO₂ kontsentratsiooni õhus MOX ehk LOÜ anduri andmete põhjal. Kuna suure tõenäosusega pole ainukesed LOÜ osakesed toas CO₂ gaasi molekulid, siis seetõttu arvutab CCS811 sensor eCO₂ kogust märgatavalt valesti.

Õhutemperatuuri graafikut (graafik 6) vaadates on näha, et nii Netatmo kui ka loodud lahenduse kõverad on väga sarnased, kuid on üksteise suhtes nihkes. Nihet põhjustab kindlasti loodud lahenduse kood, kus lahutatakse 5 kraadi võetud näidult. Juhul kui 5 kraadi asemel oleks lahutatud 3.5 kraadi, siis oleksid graafikud väga sarnased.

Õhuniiskuse graafiku (graafik 7) puhul jälgivad jällegi mõlemad mõõtmised samu tõusu- ja langustrende. Netatmo õhuniiskuse graafik näeb kohati lineaarsem välja selletõttu, et õhuniiskus muutub suhteliselt vähe võrreldes näiteks CO₂ kontsentratsiooniga. Lisaks sellele Netatmo andur väljastab õhuniiskust täisarvuna.

Üldiselt selle töö raames loodud lahendus annab arusaama õhukvaliteedist ruumis. Parasjagu eCO₂ andmete erinevus on liialt suur ning seetõttu ei saa nimetada selle parameetri tõttu lahendust täielikult usaldusväärseks. Loodud lahenduse täpsuse paremaks hindamiseks oleks vaja võrrelda LOÜ mõõtmisi mõne teise lahendusega, mis mõõdab samuti LOÜ sisalduvust õhus. Õhutemperatuuri ning õhuniiskuse mõõtmistega sai loodud lahendus kompetentselt hakkama, kuid õhutemperatuuri näit vajab usaldusväärsemaks tööks natukene kalibreerimist.

6.3. Lahenduse mastaapsuse analüüs

Hetkese seisuga kasutades Heroku tasuta hosti on IgniteDB poolt pakutud 5 megabaiti tasuta andmeladustusmahtu ning andmebaasis saab olla kuni 10 aktiivset ühendust korraga. Ühenduste arvu piirangud ei mõjuta käesolevat lahendust, kuid paraku andmemahut võib üks hetk otsa saada. Praeguse andmebaasi ainsas tabelis on 8 veergu, millest 5 on *double* tüüpi, 1 on *datetime* tüüpi ning 2 on *integer* tüüpi. *Double*- ja *datetime* tüüpi väljad saavad võtta maksimaalselt 8 baiti ruumi veeru kohta ning *integer* tüüpi väljad maksimaalselt 4 baiti veeru kohta. Sellest järeldame, et maksimaalselt saab ühe rea suurus olla 56 baiti. Jagades 5 megabaiti (5242880 baiti) ühe rea maksimaalse suurusega saame, et maksimaalselt saame lubada 93622 maksimaalse suurusega rida enne kui andmebaas täis saab.

Nüüd kui on teada eeldatav maksimaalne ridade arv, mida meie andmebaas praeguse konfiguratsiooni juures lubab on vaja teada saada, mitu rida andmeid see tähendab päeva kohta. Käesoleva töö raames valminud lahendus on programmeeritud tegema ühe POST päringu veebiserverisse iga 5 minuti jooksul. See tähendab 12 rida tunnis ning 288 rida 24 tunni jooksul, mis on maksimaalselt 5376 baiti 24 tunni jooksul. Jagades maksimaalset ridade arvu (eeldades seda, et iga rea suurus on 56 baiti), ehk 93622, 24 tunnise reamahuga, ehk 288-ga saame teada, et üks sensor saab vahet pidamata salvestada andmeid kuni 325 päeva enne kui andmebaasi maht on otsas. Järelikult kolm sensorit saavad seda teha umbes 108 päeva enne kui andmebaasi maht on otsas.

Sellest võib järeldada, et IgniteDB tasuta plaan, 5 megabaidise mahuga, sobib täielikult mõne 3-toalise korteri õhukvaliteedi jälgimiseks kasutades käesoleva töö raames valminud lahendust. Juhul kui on soov ladustada suuremat kogust andmeid on võimalik veebiserverit edasi arendada, et seda oleks võimalik teha ka tasuta IgniteDB plaani kasutades. Nimelt oleks võimalik pärast iga POST päringu saamist jälgida andmebaasi mahtu ning juhul kui maht hakkab otsa saama salvestada kogu andmebaas csv failina näiteks Google drive-i ning seejärel andmebaas ise tühjendada.

7. Kokkuvõte

Käesoleva bakalaureuse töö eesmärk oli anda ülevaade turul olemasolevatest õhukvaliteedi mõõtmisseadmetest ning luua turul pakutavatest valmistoodetest odavam, kuid tehniliselt sarnane õhukvaliteedi mõõtmislahendus. Samuti oli eesmärgiks võrrelda loodud lahendust turul pakutavate toodetega.

Töö käigus valmis õhukvaliteedi mõõtmislahenduse prototüüp, mis mõõdab kokku viit erinevat õhukvaliteedi parameetrit. Parameetriteks on: õhutemperatuur, õhuniiskus, lenduvad orgaanilised ühendid, süsinikdioksiidi ekvivalents ning õhurõhk. Loodud lahendus võtab mõõtmisi iga 5 minuti tagant ning edastab need Heroku-s hostitud veebiserverile. Veebiserver omakorda ladustab saadud andmed MySQL andmebaasis, mis on samuti hostitud Heroku keskkonnas. Lisaks sellele, igakord pärast näitude mõõtmist kuvab rakendus äsja mõõdetud andmed koos õhukvaliteedi reitinguga displeile. Displeil kuvatud andmete abil saab kasutaja kiire ülevaate praegusest õhukvaliteedist toas.

Loodud prototüüp täidab osaliselt esialgu püsitatud eesmärgid. Kuigi loodud prototüüp mõõdab kõiki vajalike andmeid ning kõik need andmed on automaatselt ladustatud hilisemaks analüüsiks, siis tekib kahtlusi CCS811 anduri täpsus. Nimelt võrdluses Netatmo *Weather Station* lahendusega selgus, et CO₂ parameetri näidud erinevad umbes 2 korda ning see paneb loodud lahenduse poolt mõõdetud eCO₂ näidu tõesuse suure küsimärgi alla. Samas nii õhutemperatuuri kui ka õhuniiskuse mõõtmised olid mõlema lahenduse puhul sarnased, mis tähendab seda, et tehniline lahendus on funktsioneeriv, kuid ei ole täies ulatuses täpne.

Valminud lahendust on võimalik kindlasti täiendada mitmel erineval viisil. Selleks, et paremini veenduda CJMCU-8128 sensorikoguga tulevate andurite töökindluses oleks vaja teha pikemaid teste mitme anduriga korraga. Säärase testimise käigus saab näha, kas andurite mõõtmised on omavahel järjepidevad. Sellele lisaks peaks testimiseks CCS811 andurit mõne teise, kallima, LOÜ mõõtvast seadme vastu, et veenduda LOÜ mõõtmiste täpsuses. Samuti saab investeerida suurema summa selleks, et saada pühendunud CO₂ sensor ning rohkem andmebaasi mahtu Heroku-s. Investeerides andmebaasi mahutavusse saab sooritada mõõtmisi tihedamalt ning suurema seadmete kogusega korraga. Lisaks oleks võimalik luua veebiserverile andmete alla laadimise võimalus ning teha veebiserver turvalisemaks autentimise lisamisega.

8. Viited

- [1] Li, Yangjun, and Juan He. "Design of an Intelligent Indoor Air Quality Monitoring and Purification Device." *IEEE Xplore Digital Library*, IEEE, 1. detsember 2017, <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.utlib.ut.ee/document/8122535>. Külastatud 3. detsember 2019.
- [2] Kaduwela, Amal P., et al. "Development of a Low-Cost Air Sensor Package and Indoor Air Quality Monitoring in a California Middle School: Detection of a Distant Wildfire." Taylor & Francis Online, TAYLOR & FRANCIS INC, 17. juuli 2019, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10962247.2019.1629362>. Külastatud 3. detsember 2019.
- [3] Eelma, Tõnis, and Raivo Raestik. "Smart Home Solution (Tartu) / SmartEnCity.eu." *SmartEnCity*, <https://www.smartencity.eu/about/solutions/smart-home-solution-tartu/>. Külastatud 7. mai 2020.
- [4] "Airthinx IAQ Monitoring Device." *Airthinx*, Airthinx, Inc., <https://airthinx.io/iaq/>. Külastatud 22. märts 2020.
- [5] "Awair Element." *Awair*, Awair, Inc., <https://getawair.com/pages/awair-element>. Külastatud 22. märts 2020.
- [6] Nave, Rod. "Relative Humidity." *HyperPhysics*, Georgia State University, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>. Külastatud 23. märts 2020.
- [7] "Technical Overview of Volatile Organic Compounds." *EPA*, Environmental Protection Agency, 12. aprill 2017, <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/technical-overview-volatile-organic-compounds>. Külastatud 22. märts 2020.
- [8] "Volatile Organic Compounds' Impact on Indoor Air Quality." *EPA*, Environmental Protection Agency, 6. november 2017, <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/volatile-organic-compounds-impact-indoor-air-quality>. Külastatud 22. märts 2020.
- [9] "Smart Weather Station Indoor Outdoor." *Netatmo*, Netatmo®, <https://www.netatmo.com/en-us/weather/weatherstation>. Külastatud 28. aprill 2020.
- [10] "Full Specifications for the Weather Station." *Netatmo*, Netatmo®, <https://www.netatmo.com/en-us/weather/weatherstation/specifications>. Külastatud 28. aprill 2020.
- [11] "Smart Home Weather Station." *Smart Home Weather Station*, Netatmo®, https://shop.netatmo.com/eur_en/weatherstation.html. Külastatud 28. aprill 2020.

- [12] “Airthinx Smart Indoor Air Quality Meter.” *TruTech Tools, Ltd*, <https://www.trutechtools.com/Airthinx-Smart-Indoor-Air-Quality-Meter>. Külastatud 22. m rts 2020.
- [13] “Awair Element.” *Awair*, <https://getawair.com/products/awair-element>. Külastatud 22. m rts 2020.
- [14] “MySQL System Properties.” *DB-Engines*, <https://db-engines.com/en/system/MySQL>. Külastatud 4. mai 2020.
- [15] “MySQL 8.0 Reference Manual :: 1.3.1 What Is MySQL?” *MySQL*, Oracle Corporation, <https://dev.mysql.com/doc/refman/8.0/en/what-is-mysql.html>. Külastatud 4. mai 2020.
- [16] “Flask.” *Pallets*, <https://palletsprojects.com/p/flask/>. Külastatud 4. mai 2020.
- [17] “Heroku: Salesforce Developers.” *Heroku | Salesforce Developers*, <https://developer.salesforce.com/platform/heroku>. Külastatud 26. m rts 2020.
- [18] “Introduction.” *Arduino*, <https://www.arduino.cc/en/guide/introduction>. Külastatud 26. m rts 2020.
- [19] “What Is HTTP?” *W3Schools*, https://www.w3schools.com/whatis/whatis_http.asp. Külastatud 26. m rts 2020.
- [20] “ESP32-WROOM-32 Datasheet”. *Espressif*, Espressif, https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf. Külastatud 4. mai 2020.
- [21] “LILYGO® TTGO ESP32 WiFi Bluetooth 18650 Battery Protection Board 0.96 Inch OLED Development Tool Module Board from Electronics on Banggood.com.” *Banggood*, https://www.banggood.com/LILYGO-TTGO-ESP32-WiFi-bluetooth-18650-Battery-Protection-Board-0_96-Inch-OLED-Development-Tool-p-1213497.html?cur_warehouse=CN. Külastatud 26. m rts 2020.
- [22] “CJMCU-8128 CCS811 SI7021 BMP280 Carbon Dioxide CO₂ VOCs Temperature Humidity Gas Pressure Sensor Module Board from Electronics on Banggood.com.” *Banggood*, [https://www.banggood.com/CJMCU-8128-CCS811-SI7021-BMP280-Carbon-Dioxide-CO₂-VOCs-Temperature-Humidity-Gas-Pressure-Sensor-p-1167432.html?rmmds=search&cur_warehouse=CN](https://www.banggood.com/CJMCU-8128-CCS811-SI7021-BMP280-Carbon-Dioxide-CO2-VOCs-Temperature-Humidity-Gas-Pressure-Sensor-p-1167432.html?rmmds=search&cur_warehouse=CN). Külastatud 26. m rts 2020.
- [23] “BMP280 Digital Pressure Sensor.” *Adafruit*, <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST-BMP280-DS001-11.pdf>. Külastatud 26. m rts 2020.

- [24] “CCS811Ultra-Low Power Digital Gas Sensor for Monitoring Indoor Air Quality.” *Sparkfun*, https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/1/4/3/CCS811_Datasheet-DS000459.pdf. Külastatud 26. m rts 2020.
- [25] “HDC1080 Low Power, High Accuracy Digital Humidity Sensor with Temperature Sensor.” *Texas Instruments*, <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/hdc1080.pdf>. Külastatud 26. m rts 2020.
- [26] “Raspberry Pi 4 Model B Specifications – Raspberry Pi.” *Raspberry Pi 4 Model B Specifications – Raspberry Pi*, <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-4-model-b/specifications/>. Külastatud 4. mai 2020.
- [27] “Buy a Raspberry Pi Zero W – Raspberry Pi.” *Buy a Raspberry Pi Zero W – Raspberry Pi*, <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-zero-w/>. Külastatud 4. mai 2020.
- [28] Jia, Chunrong, et al. “Variability of Total Volatile Organic Compounds (TVOC) in the Indoor Air of Retail Stores.” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, MDPI, 21. november 2019, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6926805/>. Külastatud 26. m rts 2020.
- [29] Bonino, Steve. “Carbon Dioxide Detection and Indoor Air Quality Control.” *Occupational Health & Safety*, 1 Apr. 2016, <https://ohsonline.com/Articles/2016/04/01/Carbon-Dioxide-Detection-and-Indoor-Air-Quality-Control.aspx?Page=1>. Külastatud 20. aprill 2020.
- [30] “Fundamentals of Indoor Air Quality in Buildings.” *EPA*, Environmental Protection Agency, 1. august 2018, <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/fundamentals-indoor-air-quality-buildings>. Külastatud 20. aprill 2020.
- [31] “Fundamentals of Indoor Air Quality in Buildings.” *EPA*, Environmental Protection Agency, , <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/fundamentals-indoor-air-quality-buildings>. Külastatud 20. aprill 2020.
- [32] R ffer, Daniel, et al. “New Digital Metal-Oxide (MOx) Sensor Platform.” *Sensors (Basel, Switzerland)*, MDPI, 31. m rts 2018, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5948493/>. Külastatud 7. mai 2020.
- [33] “Indoor Air Quality Monitor - Market Analysis, Trends, and Forecasts.” *Research and Markets - Market Research Reports*, veebruar 2020, https://www.researchandmarkets.com/reports/4805488/indoor-air-quality-monitor-market-analysis?utm_source=dynamic&utm_medium=BW&utm_code=mhfhzg&utm_campaign=1360562+-

[+Global+Indoor+Air+Quality+Monitor+Market+Analysis,+Trends,+and+Forecasts+2019-2025&utm_exec=anwr281bwd](#). Külastatud 7. mai 2020.

- [34] “Indoor Air Quality.” *European Environment Agency*, EEA, 15. aprill 2013, Muudetud 10. mai 2019, <https://www.eea.europa.eu/signals/signals-2013/articles/indoor-air-quality>. Külastatud 7. mai 2020.
- [35] Al horr, Yousef, et al. “Impact of Indoor Environmental Quality on Occupant Well-Being and Comfort: A Review of the Literature.” *International Journal of Sustainable Built Environment*, Elsevier, 1. aprill 2016, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212609016300140>. Külastatud 7. mai 2020.

Lisad

Lisa 1 – Repositoorium

Repositooriumi link: <https://github.com/5deags/airMonitor>

Viidatud repositoorium sisaldab endas järgnevaid faile:

1. *boardCode.ino* – ESP32 moodulile loodud tarkvara.
2. *flaskRest.py* – Veebiserveri kood Python-i programmeerimiskeeles.
3. *24h5min_data.xlsx* – Käesoleva töö jooksul loodud lahenduse poolt mõõdetud andmed.
4. *Smart Home Paab_5_5_2020.xls* – Netatmo poolt mõõdetud andmed.
5. *thesis_graph.py* – Kogutud statistika analüüsimiseks ja graafikute genereerimiseks loodud Python-i programmeerimiskeeles loodud skript.

Lisa 2 – Litsents

Mina, Michael Davõdovski,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose Tarkvaraline ja riistvaraline lahendus õhukvaliteedi jälgimiseks siseruumides, mille juhendaja on Alo Peets, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Michael Davõdovski

08.05.2020