

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Infotehnoloogia teaduskond

Sergei Pavlov 204387IABM

**NB-IoT sidetehnoloogial põhineva maa-aluste
jäätmemahutite jälgimissüsteemi välja
töötamine**

Magistritöö

Juhendaja: Alar Kuusik
vanemteadur

Tallinn 2022

Autorideklaratsioon

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Sergei Pavlov

13.05.2022

Annotatsioon

Jäätmekäitlus on tänapäeval aktuaalne teema, sest see on seotud erinevate valdkondadega: majandus, säästlik keskkond, loodushoid jne. Selle optimeerimine on ülesanne, mis vajab lahendusi. Selles töös on välja pakutud IoT tehnoloogial baseeruv kontseptuaalne mudel, mis võib aidata lahendada jäätmekäitluse põhiprobleeme, nagu näiteks jäätmemahutite ületäituvus, tühisõidud, mitteoptimeeritud marsruudid, sorteerimata jäätmete suur maht, suur kütusekulu jne. Selleks saame kasutada nüüdisaegseid pilve-, raadiosidetehnoloogiaid, andureid ja arendusplatvorme. Töös on tehtud võrdlusanalüüs erinevate sensortehnoloogiate osas, st testitud ultraheli- ja valguskaugusandureid. Valitud andurid demonstreerisid head mõõtetäpsust, aga mõõteala nurk on suur ja seega ei sobi need kõigis maa-alustes jäätmemahutites jäätmete taseme mõõtmiseks. Töös loodi mõõteseadme esialgne prototüüp ja sidelahendus pilveplatvormiga andmete edastamiseks ja visualiseerimiseks, kasutades NB-IoT raadiosidet. On välja toodud majanduslikud aspektid, mis viivad nutika lahenduse realiseerimiseni.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 67 leheküljel, 5 peatükki, 31 joonist, 7 tabelit.

Abstract

Development of the NB-IoT network based monitoring system for underground garbage containers

Waste management is a topical issue today, as it relates to various areas: economy, sustainable environment, nature conservation, etc. Optimizing it is a task that needs solutions. This work proposes a conceptual model based on IoT technology that can help solve the main problems of waste management, such as overflowing of waste tanks, empty journeys, non-optimised routes, high volume of unsorted waste, high fuel consumption, etc. To this end, we can use modern cloud, radio communication technologies, sensors and development platforms. Comparison analysis has been carried out on various sensor technologies, i.e. tested ultrasonic and light distance sensors. The selected sensors demonstrated good measuring accuracy, but the angle of the measuring area is large and therefore they are not suitable for measuring the level of waste in all underground waste containers. The work created the initial prototype of the measuring device and the communication solution with the cloud platform for data transmission and visualization using NB-IoT radio communication. Economic aspects have been identified that lead to the realisation of a smart solution.

The thesis is in Estonian and contains 67 pages of text, 5 chapters, 31 figures, 7 tables.

Lühendite ja mõistete sõnastik

LoRaWAN	<i>Long Range Wide Area Network</i>
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
PSM	<i>Power Saving Mode</i>
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Networks</i>
AWS	<i>Amazon Web Services</i>
RFID	<i>radio-frequency identification</i>
PaaS	<i>Platform as a Service</i>
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project (of mobile communication)</i>
LTE	<i>Long-Term Evolution</i>
eDRx	<i>Extended Discontinuous Reception</i>
SDK	<i>Software Development Kit</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
CoAP	<i>Constrained Application Protocol</i>
DDS	<i>Digital Data Storage</i>
REST	<i>Representational state transfer</i>
UL	<i>Upload</i>
DL	<i>Download</i>
NB	<i>Narrowband</i>
ToF	<i>Time of Flight</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
ID	<i>identifier</i>
SQL	<i>Structured Query Language</i>
PHP	<i>Hypertext preprocessor (general-purpose scripting language)</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
AIM	<i>Aktive Idle Mode</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>

WBAN	<i>Wireless body area network</i>
UV	<i>Ultraviolet</i>
EDGE	<i>Enhanced Data rates for GSM Evolution</i>
FOG COMPUTING	<i>Architecture that uses edge devices</i>
CLOUD COMPUTING	<i>Pilvandmetöötlus</i>
NoSQL	<i>Not only SQL</i>
LoRa	<i>Long Range</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
XMPP	<i>Extensible Messaging and Presence Protocol</i>
SF	<i>Spreading factor</i>
HTTPS	<i>Hypertext Transfer Protocol Secure</i>
SSL	<i>Secure Sockets Layer</i>
AMQP	<i>Advanced Message Queuing Protocol</i>
AT	<i>Hayes command set</i>
Data Bucket	<i>Virtual storage for time series information</i>
Data Storage	<i>Hardware or software for recording data</i>
EGPRS	<i>Enhanced GPRS</i>
SIM	<i>Subscriber Identification Module</i>
KPI	<i>Key performance indicator</i>

Sisukord

1 Sissejuhatus	12
1.1 Töö valdkonna kirjeldus	12
1.2 Motivatsioon.....	12
1.3 Probleemipüstitus	13
1.4 Töö struktuur	13
2 Jäätmete monitooringu süsteemi struktuuri ülevaade.....	15
2.1 Süsteemi ülesehitus ja tööspsifikatsioonid	15
2.2 <i>IoT</i> arhitektuurid	16
2.3 Kauguse mõõtmise andurid	18
2.3.1 Ultraheliandur	18
2.3.2 <i>ToF</i> valguskaugusmõõtja.....	20
2.3.3 Mikrolaineandur (<i>Radar</i>).....	20
2.3.4 <i>LIDAR</i>	21
2.3.5 Andurite võrdlus	21
2.4 <i>LPWAN</i> tehnoloogiad	22
2.4.1 <i>LoRaWAN</i>	22
2.4.2 <i>Sigfox</i>	23
2.4.3 <i>NB-IoT</i> mobiilside	24
2.4.4 <i>LPWAN</i> tehnoloogiate võrdlus	25
2.5 <i>IoT</i> pilveplatvormid ja nende võrdlus.....	27
2.5.1 Amazon Web Services (<i>AWS</i>)	29
2.5.2 <i>Azure IoT Hub</i>	29
2.5.3 <i>Cumulocity IoT</i>	29
2.5.4 <i>Thingier.io</i>	30
2.5.5 <i>Ubidots</i>	31
2.5.6 Pilveplatvormide võrdlus.....	31
2.6 Olemasolevate jäätmekonteinerite monitooringlahenduste ülevaade.....	33
3 <i>IoT</i> süsteemi projekteerimine	35
3.1 Samal teemal arenduste ülevaade	35

3.2	Uurimise objekt	36
3.3	Uurimisobjekti planeeritav <i>IoT</i> süsteemi arhitektuur	38
3.4	Riistvara valimine (arendusplatvorm ja protsessor)	42
3.4.1	<i>Ublox Sara –R4</i>	42
3.4.2	<i>Quectel BG96</i>	43
3.4.3	<i>Nordic Semiconductor nRF-9160</i>	43
3.4.4	<i>Sequans Monarch SiP</i>	43
3.4.5	Arendusplatvormide võrdlus	44
3.5	Andurite testimine	44
3.5.1	Andurite mõõtediapasooni ja -täpsuse määramine.....	45
3.5.2	Andurite töönurga määramine	48
3.5.3	Andurite energiatarbe mõõtmine.....	50
3.6	Andmete edastamise testimine	51
3.7	Testimise kokkuvõte.....	55
4	Majanduslik põhjendus.....	56
4.1	<i>IoT</i> süsteemi arenduse kasulikkus	57
4.2	<i>IoT</i> süsteemi arendamise planeeritud tegevused ja eeldatav maksumus	58
5	Kokkuvõte ja edasiarengud	63
	Kasutatud kirjandus	64
	Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks	67

Jooniste loetelu

Joonis 1 Viiekihiline <i>IoT</i> lahenduse arhitektuur [2]	18
Joonis 2 Ultraheli kaugusandur [6].....	18
Joonis 3 <i>NB-IoT</i> kanalite paiknemine LTE mobiilsidesagedustel [18]	25
Joonis 4 <i>Sigfox</i> -i leviala Eestis [19].....	26
Joonis 5 Juhtivad <i>IoT</i> platvormid täielikkuse poolest [20].....	28
Joonis 6 <i>Thinker.io</i> platvormi arhitektuur [24]	30
Joonis 7 <i>Dragino</i> andur [26].....	33
Joonis 8 <i>NETOP NB-IoT</i> andur [27].....	33
Joonis 9 <i>Sensoneo</i> ultraheliandur [28].....	34
Joonis 10 <i>Nordsense 3D ToF</i> andur [29].....	34
Joonis 11 Maa-aluse jäätmemahutite suurused [50].....	37
Joonis 12 Maa-aluse jäätmemahuti metallkarkass.....	37
Joonis 13 Kohtla-Järve Järve linnaosa maa-aluse jäätmemahutite jaotus	38
Joonis 14 Kohtla-Järve Ahtme linnaosa maa-aluse jäätmemahutite jaotus.....	38
Joonis 15 <i>IoT</i> süsteemi kontseptuaalne mudel	39
Joonis 16 <i>IoT</i> -põhine prügikonteiner.....	40
Joonis 17 Jäätmekätluse rakenduse kasutaja osa	41
Joonis 18 Jäätmekätluse rakenduse serveri osa	42
Joonis 19 <i>ToF</i> valgusmõõtja <i>M5STACK</i> (vasakul) ja <i>AJ-SR04M</i> ultraheliandur (paremal) [48].....	45
Joonis 20 Katsesend – süvamahuti kott.....	46
Joonis 21 Anduri pagaldamise koht	46
Joonis 22 Tundlikkuse nurga määramine	49
Joonis 23 Prügikoti vaade jäätmekonteineris	49
Joonis 24 Akustiline toru [49]	50
Joonis 25 <i>AJ-SR04</i> koos 360 k Ω	50
Joonis 26 <i>Arduino MKR NB 1500</i> koos antenniga ja anduriga.	52
Joonis 27 <i>CUMULOCITY</i> registreeritud seadme vaade	53
Joonis 28 <i>CUMULOCITY</i> alam seadme (<i>CHILD</i>) vaade.....	54

Joonis 29 <i>CUMULOCITY Dashboard</i>	54
Joonis 30 <i>CUMULOCITY</i> reaajas andmete visualiseerimine.....	55
Joonis 31 <i>Ubidots</i> pilvteenused [25]	59

Tabelite loetelu

Tabel 1 Andurite võrdlus.....	21
Tabel 2 <i>LPWAN</i> tehnoloogiate võrdlus	26
Tabel 3 Pilveplatvormide võrdlus.....	32
Tabel 4 Arendusplatvormide võrdlus	44
Tabel 5 Ultraheli ja <i>ToF</i> valguse anduri mõõtmiste tulemused.....	48
Tabel 6 Pilveplatvormide teenuse maksumus	60
Tabel 7 Rahvusvaheliste ettevõtete andurite hinnad ja teenustasud.....	61

1 Sissejuhatus

1.1 Töö valdkonna kirjeldus

Magistritöö uurimisobjekt on *IoT* süsteem koos andmete visualiseerimisega maa-alustes konteinerites, et jälgida jäätmete taset reaalajas. See teema on üsna aktuaalne, sest jäätmete maht kasvab igal aastal ja tekib probleeme jäätmekonteinerite ületäituvusega kogu Eestis. Prügikonteinerid tühjendatakse graafiku järgi, mis ei ole tänapäeval tõhus, sest ei arvestata täituvuse kõikumist. Tühisõitude korral võivad prügiveofirmadel tekkida täiendavad kütusekulud. Tarbija tasub igal juhul teenuse eest, mida ei ole tehtud täies mahus (konteineri täituvusest sõltumata). Lisaks sellele ei ole linna- või vallavalitsustel üldist ülevaadet jäätmeveost ja jäätmekonteinerite seisundist reaalajas. See talv näitas, et võib tekkida kriitiline olukord, kui halva ilma tõttu on paljud konteinerid üle täitunud (nt Jõhvis ja Kohtla-Järvel).

Antud töös esitatud asjade interneti (*IoT*) lahendus pakub lõppkasutajatele (jäätmeveoteenuse osutajatele, korteriühistutele, eraomanikele, linna- ja vallavalitsustele) võimaluse optimeerida jäätmete vedu (nt marsruudi planeerimine, iga jäätmeliigi mahu arvestamine, prognoositav täituvus) ja saada reaalajas andmeid, mida on võimalik analüüsiks kasutada. Kuna VKG OÜ ja Kiviõli Keemiatööstus kavatsevad ehitada tehase plastjäätmete ümbertöötlemiseks, saab prügi sorteerimine ja tõhus plastjäätmete kogumine *IoT* süsteemide abil tuua igasse huvigrupi lisakasumit.

Arendustöös kasutatakse pilveteenust ja sensorseadmeid, mis on finantseeritud ETAG projektist PRG667.

1.2 Motivatsioon

Töö kirjutamise motivatsiooniks oli Eestis avatud *IoT* nutika jäätmekäitlussüsteemi puudumine, mille baasil oleks võimalik teha erinevaid uuringuid, rakendada oma projekte (nt uusi andurisüsteeme), rakendada masinõppe algoritme sündmuste prognoosimiseks ja

protsessi optimeerimiseks ning seeläbi kiirendada ühe või teise jäätmeprobleemi lahendamise protsessi.

1.3 Probleemipüstitus

Arvestades seda, et maa-alused jäätmemahutid on erilised (erinevad suurused, suur sügavus, pehme ja pikk prügikott) ning jäätmete liigid on erinevad, on töö eesmärk uurida, millised tehnoloogiad ja meetodid sobivad paremini jäätmete taseme mõõtmiseks konteineris ja millist andmesidetehnoloogiat kasutada, et tagada andmete edastamiseks stabiilne võrk. Samas süsteem peab olema ka energiasäästlik, et ta saaks töötada autonoomselt vähemalt ühe aasta jooksul. Võttes arvesse kõiki loodava *IoT* süsteemi nõudeid, tuleb lahendada järgmised ülesanded:

- 1) valida võrdlemise teel sobiv andur, mis annab parima mõõtetäpsuse sõltumata konteineri jäätmeliikidest;
- 2) valida võrdlemise teel sobiv raadioside tehnoloogia, mille baasil *IoT* andmehõivesüsteemi ehitada ja mis on võimeline jäätmete taseme andmeid suurele kaugusele edastama;
- 3) valida võrdlemise teel *IoT* arendusplatvorm, võttes arvesse funktsionaalsust, energiatarbimist;
- 4) valida sobiv *IoT* andmete kogumise platvorm ja piloteerida andmete edastamine ja visualiseerimine;
- 5) koostada projekti majanduslik põhjendus.

1.4 Töö struktuur

Peatükk 2. Jäätmete monitooringu süsteemi struktuuri ülevaade, milles räägitakse planeeritava süsteemi spetsifikatsioonidest ja ülesehitusest, *IoT* erinevatest arhitektuuridest, kirjeldatakse erinevaid *IoT* süsteemi osi (andurid, raadioside tehnoloogiad, pilveplatvormid) ja võrreldakse neid.

Peatükk 3. *IoT* süsteemi projekteerimine, kus antakse ülevaade olemasolevatest *IoT* tehnoloogiatel põhinevatest lahendustest, pakutakse *IoT* süsteemi kontseptuaalne mudel,

valitakse *IoT* süsteemi riistvara (andur, arendusplatvorm) ning esitatakse andurite testimise tulemused (voolutarve, töönurk, kauguse mõõtmise täpsus). On realiseeritud andmete edastamine valitud pilveplatvormile ja korraldatud andmete visualiseerimine.

Peatükk 4. Majanduslik põhjendus, milles hinnatakse *IoT* lahenduse vajalikkust, kasumlikkust ja kasulikkust eri huvirühmade jaoks.

2 Jäätmete monitooringu süsteemi struktuuri ülevaade

Selles peatükis on esitatud ülevaade antud töö teemavaldkonnaga seotud materjalidest ja uuringutest. Töö autor annab ülevaate olemasolevatest tehnilistest ja *IoT* pilvelahendusest ning pilveplatvormidest.

2.1 Süsteemi ülesehitus ja tööpetsifikatsioonid

Enne kui jätkata erinevate tehnoloogiate võrdlemist ja hindamist, on oluline kehtestada selle süsteemi jaoks mõned ülesehituse- ja tööpetsifikatsioonid. Sellised spetsifikatsioonid pakuvad võrdlusraamistikku nende tehnoloogiate võrdlemiseks ja nende kohta objektiivsetest aspektidest sisuliste järelduste tegemiseks. Tulevikusüsteem peab vastama järgmistele kriteeriumidele:

- 1) Kui konteinerid asuvad väljas, peab valitud anduri töö olema stabiilne ja kontaktivaba;
- 2) Mõõtetäpsus on vähemalt ± 3 cm;
- 3) Minimaalne töökaugus on 2,5 meetrit;
- 4) Seadme tarbitav võimsus peab olema minimaalne, et pikendada vooluallika tööiga, seadme minimaalne tööiga on 2-3 aastat;
- 5) Keskkonnatingimused (valgus, tolm, niiskus, müra) ei tohi oluliselt mõjutada mõõtmistulemust konteineri sees ega väljaspool;
- 6) Traadita ja energiasäästliku kommunikatsioonitehnoloogia (*LPWAN*) kasutamine andmete turvaliseks edastamiseks andmebaasi või pilveteenusesse;
- 7) Andmed peavad olema kättesaadavad analüüsiks ja visualiseerimiseks (veebi- või mobiilirakendus).

2.2 *IoT* arhitektuurid

Asjade internet (*IoT*) on tänapäeval kiiresti arenev valdkond ja kasutusala on piiramatud, eriti kui räägime tarkadest süsteemidest, kus on vaja panna nutiseadmed suhtlema ja traadita koguma ning edastama andmebaasi andmeid analüüsimiseks ja visualiseerimiseks.

Teadus- ja tehnoloogiamaaailm on viimastel aastatel väga huvitatud asjade interneti tehnoloogiast. Prognositi, et aastaks 2030 on 100 miljardit seadet internetiga ühendatud [1]. Asjade interneti tehnoloogia arengut soodustab ka see, et võimaldab traadita andmete edastamist keskkonna, tervise, liikuvuse kohta, mida saab kasutada erinevate prognooside koostamisel linna liikumise planeerimiseks, terviseohtude ärahoidmiseks, põllumajanduse tõhususe suurendamiseks. Meditsiini puhul on võimalik kasutada kehal kantavate sensorite süsteeme (*wearable body area network, WBAN*), mis võimaldavad jälgida inimese füsioloogilisi parameetreid: kehatemperatuuri, südamerütmi, elektrokardiogrammi. Kui me räägime keskkonnast, eriti tööstuslikest keskkondadest, on väga oluline korraldada parameetrite seiret, et tagada ohutusnõuete täitmine, näiteks CO₂, CO, UV, müra, niiskus, O₂, õhutemperatuur [1]. Tööstuses saab asjade internetti kasutada objektide positsioneerimiseks, objektide tuvastamiseks (*RFID*), seadmete parameetrite jälgimiseks (energiatarbimine, vibratsioonid, kasutusaeg, alarmid), detailide ladustamiseks [2].

Asjade interneti tehnoloogial on juhtiv roll, sest see aitab jälgida liikumist (*GPS*), ühistranspordi planeerimist, keskkonna reostumist, olmejäätmete kogumist ja ümbertöötlemist, päästetöid, inimeste aktiivsuse suurenemist (spordiobjekti ehitamine), inimeste liikumise reguleerimist.[3]

Kõik arhitektuurid on võimalik jagada tasemete olemasolu järgi: 3-, 4-, 5-tasemeline.

Alates esimesest *IoT*-alase uurimistöo tegemisest, on kolmetasemeline arhitektuur (andur, sidevõrk, rakendus) olnud asjade interneti rakenduste domineeriv mudel. Esimese kihi moodustavad andurid (temperatuur, suhteline niiskus, *UV*, süsinikdioksiid *CO*₂). See kiht vastutab andmete genereerimise ja kogumise eest. Täiturid, mis mõjutavad oma keskkonda, on samuti selles arhitektuurikihis.

Teine kiht (võrgukiht) vastutab anduritevahelise kommunikatsiooni eest. Selleks kasutatakse erinevaid andmete edastamise protokolle nagu *ZigBee*, *WiFi*, *3G*, *4G/LTE*, *5G*, *Ethernet*, *CanBus*, *ProfiBus*, *LoRa*. See kiht ühendab erinevad seadmed ja saadab andmed vastavatesse taustateenustesse (*back-end services*).

Kolmandas kihis (*application*) toimub andmete ettevalmistamine interpretatsiooniks. Siin sorteeritakse ja filtreeritakse andmeid. Viimases kihis toimub juba andmete analüüs, kus andmete põhjal tehakse tulemuste interpretatsioone, andmete graafilist esitamist, ennustusi.

Teine viis asjade interneti lahenduse arhitektuuri kirjeldamiseks on neljakihilise lähenemisviisi kasutamine. See arhitektuur kirjeldab erinevaid ehitusplokke, mis moodustavad *IoT* lahenduse. Selle stsenaariumi puhul on rohkem rõhku pandud servade andmetöötlemisele.

Seadmed (*device*): võivad olla tajukihi andurid või täiturmehhanismid. Need seadmed genereerivad andmeid (andurite puhul) või mõjutavad nende keskkonda (täiturmehhanismide puhul). Kui kriitilist otsust ei ole vaja teha, saadetakse andmed tavaliselt töötlemata kujul järgmise etappi seadmete enda piiratud ressurside tõttu.

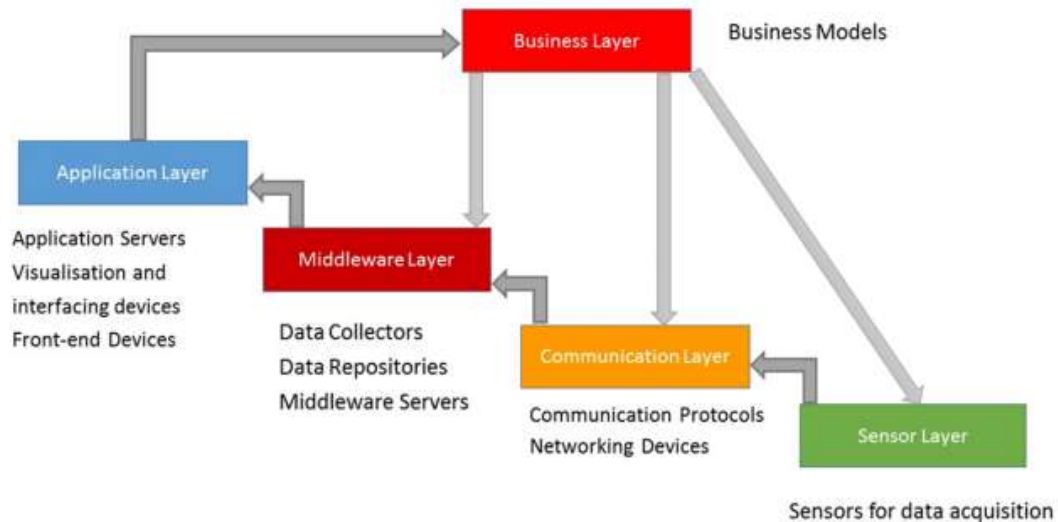
Interneti-lüüsid (*gateway*): Interneti-lüüsi etapp võtab seadmetelt vastu algandmed ja eeltöötleb neid enne pilve saatmist. Interneti-lüüs võib olla füüsiliselt ühendatud seadmega või eraldiseisva seadmega, mis suudab anduritega suhelda väikese võimsusega võrkude kaudu ja edastada andmeid Interneti.[4]

Serva- või uduandmetöötlus (*EDGE*, *FOG computing*): on vajalik andmete võimalikult kiireks töötlemiseks ja andmeside mahu vähendamiseks. See võimaldab andmeid kiiresti analüüsida ja kindlaks teha, kas miski vajab kohest tähelepanu. See kiht on tavaliselt seotud ainult hiljutiste andmetega, mis on vajalikud kriitilisteks toiminguteks. Selles etapis võib teha ka eeltöötlemist, et piirata lõpuks pilve kantavaid andmeid.[4]

Pilv või andmekeskus (*CLOUD*): selles viimases etapis salvestatakse andmed hilisemaks töötlemiseks. Selles etapis viiakse läbi põhjalik analüüs või ressursimahukad toimingud, nagu masinõpe või reaalaajas jälgimine.[4]

Viiekihiline arhitektuur omab lisaks eespool nimetatud arhitektuurile ka ärikihti (*Business Layer*) ning Networki kihi asemel omab transpordi- ja protsessikihti

(*Middleware Layer*), kus toimub vastavalt andmete hoiustamine ja säilitamine *SQL/NoSQL*, päringute tegemine ja ärianalüüs, planeerimine, arengutendentside arendamine, mis põhinevad nendel andmetel (vt Joonis 1).[2]



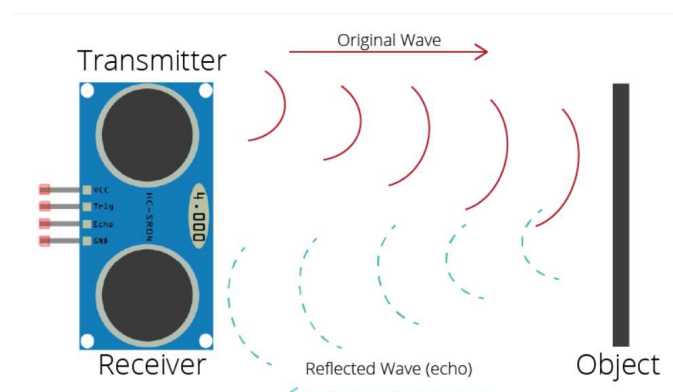
Joonis 1 Viiekihiline *IoT* lahenduse arhitektuur [2]

2.3 Kauguse mõõtmise andurid

Kaugusandureid kasutatakse objekti kauguse määramiseks teisest objektist või takistusest. Antud rakendusse sobivad kontaktivabad kaugusandurid.

2.3.1 Ultraheliandur

Ultraheli andur on kahtlemata kõige levinum kauguse mõõtmise andur, mida tuntakse ka sonarina (vt Joonis 2).



Joonis 2 Ultraheli kaugusandur [6]

Ultraheliandur kiirgab sihtobjekti suunas kõrgsageduslikke helilaineid (20 kHz-200kHz). Sihtobjekt peegeldab helilaineid tagasi anduri suunas. Andur võtab vastu peegeldunud laine ja mõõdab signaali hilistumist. Et määrata läbitud vahemaa, kasutatakse järgmist valemit (1) :

$$Kaugus = \frac{vt}{2} \quad (1)$$

kus v on heli kiirus õhus ja t on aeg saadetud ja vastuvõetud impulsside vahel.

Ultraheli andurite eelised on järgmised:

- objekti värv ja läbipaistvus ei mõjuta;
- töötab hästi hämarates kohtades;
- tarbivad vähe voolu/võimsust (tüüpiliselt 1-50 mA);
- mitu liidese valikut mikrokontrolleriga sidumiseks.

Ultraheliandurite puudused on:

- piiratud tuvastusulatus kuni 6 meetrit;
- madal eraldusvõime ja aeglane värskendussagedus, mis ei sobi kiiresti liikuvatele sihtmärkidele;
- ei ole võimalik mõõta teatud tekstuuride/pindadega objektide kaugust: pehmed materjalid (kangad) võivad neelata helilaineid;
- helikiirus sõltub ka levimiskeskonna temperatuurist ja niiskusest.

Erinevatel ultrahelianduritel võib olla erinev mõõtmisvahemik, täpsus ja energiatarve. Uudsed on muutuva sagedusega (*chirp*) pulssi kiirgavad ultraheliandurid, millel on võrreldes ühesageduslike anduritega oluliselt väiksem energiatarve. Kõige madalama energiatarbimisega andur turul on hetkel *TDK CH201* (14 μ A), kui mõõdab kaugusel 5 meetrit kord sekundis. Loomulikult sõltub tarbimine ka mõõtmiste sagedusest (nt 25 mõõtmist sekundis 5 meetri kaugusel – 247 μ A).[7] Anduri maksumus on ca 10 eurot Artiklis [8] on kirjeldatud tarka prügikasti, kus kasutatakse ultraheliandurit *SR04M*.

JA-SR04M võib mõõta kaugust kuni 8 meetrit ja tarbib ainult 2 mA ooterežiimil, kui on veel kuni 40 μ A säästurežiim. [9] Anduri maksumus on ca 2-5 eurot.

2.3.2 *ToF* valguskaugusmõõtja

Kauguse mõõtmiseks võib helilainete asemel kasutada valguskiirgust ja mõõta peegeldunud valgusimpulsi hilistumist või pideva signaali korral faasinihet. Valguskiirgust kasutavaid kaugusandureid nimetatakse sageli *Time-of-Flight (ToF)* anduriteks, tavaliselt kasutatakse infrapunavalgust (850-940 nm). Võrreldes ultrahelianduriga pakub see palju suuremat ulatust (üle 10 meetri), kiiremat näitu ja suuremat täpsust, säilitades samas väikese suuruse, väikese kaalu ja madala energiatarbimise. *ToF*-i kaugusandurid kasutavad punktide vahelise kauguse arvutamiseks aega, mis kulub footonitel kahe punkti vahel liikumiseks. Kauguse arvutamiseks kasutame sama valemit (1), asendades helikiiruse valguskiirusega.

Kuna lennuajal põhinevad tehnoloogiad põhinevad oma valguse peegelduste kiirgamisel ja vastuvõtmisel, võivad need loomulikus keskkonnas (nt päikese käes) halvasti toimida. Põhjus on selles, et muude valgusallikate kiirgavad lained häirivad seadme valgust. Samamoodi on ka teisi tegureid, mis raskendavad *ToF*-andurite nõuetekohast tööd, näiteks "läikivad" pinnad (mis peegeldavad valgust erinevates suundades) või nurgad (mis tekitavad mitu peegeldust) jne. Aga sobivad *3D* objekti loomiseks. Anduri maksumus on ca 5 eurot.

Sellised andurid võtavad rohkem voolu, aga täpsus on suurem.

2.3.3 Mikrolaineandur (*Radar*)

Mikrolaineanduritel on sarnased tööpõhimõtted nagu ultrahelianduritel või *ToF* valgusanduritel, ainus erinevus on kiirataivate impulsside sagedused, näiteks *Acconeer AI* anduri sagedus on 60 GHz [10]. Mikrolaineanduri mõõtmised põhinevad samuti "lennuaja" põhimõttel, kuid need kiirgavad elektromagnetlaineid, mille kiirus on palju suurem kui heli kiirus. Turul on mitmesuguseid mikrolaineandureid, millel on erinevad jõudlusomadused ja võimsus- reitingud. Tavaliselt võib nendel anduritel mõõtmise ajal olla väga suur voolutarve (kümned milliamprit). Lisaks on andur võimeline säilitama ühtlase jõudluse isegi karmides tingimustes töötades ja läbima enamikku mittemetalsetest materjalidest, tolmu, suitsu ja udu jne. Veelgi enam, seda saab kasutada materjalide ja mitme sihtmärgi kauguse kindlakstegemiseks. Anduri hind on umbes 10 eurot.

2.3.4 LIDAR

LiDAR on laserkaugusandur, mis mõõdab kaugust mitmest punktist (2D või 3D kauguse mõõtmise) ühe või mitme laserkiire abil. See mõõdab sihtmärkide ulatust raadio- või helilainete asemel laseri valguslainete kaudu. Objekti suunas kiirgavat laserkiirt ja hajutatud kiirt koguvad *LiDAR*-moodulis asuvad andurid. Erinevused laseri saadetud ja vastu võetud aja ja lainepikkuse vahel annavad teavet objekti kohta, et luua sihtmärgist digitaalne 3D esitus.

LiDAR on parandanud seire täpsust võrreldes traditsiooniliste kaugseiretehnoloogiatega, nagu *Radar* (raadiolained) ja *Sonar* (helilained). Selle laseri täpsus võimaldab kaardistada objekti või keskkonna omadusi punktivilvena, mis kuvatakse ekraanil kui tahked füüsilised objektid. See kasutab objektide pildistamiseks erinevaid lainepikkusi alates infrapunast (10 mikromeetrit) kuni ultraviolettkiirguseni (250 nanomeetrit). Kuna tegemist on laserkiirgusega, siis on vaja rakendada 1. klassi laseri ohutusnõudeid. *LiDAR*-i eelis on võimalus mõõta kaugust mitmetest punktidest. Puuduseks on füüsilise anduri kõrge hind (vähemalt kümned eurod) ja suur energiatarbimine mõõtmisrežiimis (kümned kuni sajad milliamprid).

2.3.5 Andurite võrdlus

Tuginedes andurite tehnilisest dokumentatsioonist ja varasematest uurimustest saadud teabele, on võimalik kasutada kõiki kaugmõõtmistehnikaid jääkainete konteinerites mõõtmiseks. Võrdluse tulemused on esitatud tabelis 1.

Tabel 1 Andurite võrdlus

Anduri tüüp ja hind	Ultraheliandur 2-10 €	ToF valguskaugus mõõtja > 5 €	Mikrolaine andur (Radar) > 10 €	LiDAR > 30 €
Kaugus	Kuni 8 meetrit	2 meetrit	Kuni 10 m	Kuni 40 m
Voolu tarbimine	Kuni 0,2 mA, (TDK CH201)-30 mA	Alates 2 mA	Alates 5mA	Alates 85 mA
Mõõtmise täpsus	±1 cm	±5mm	±1%	±2mm
Mõõtmise tüüp	Helilained 20 -200 kHz	Valguskiirgus 850-940 nm	Elektromagne tlained	Laserkiir 905 nm

			3,10,24,60G Hz	
Tundlikkus eritingimustele	Temperatuur ja niiskus	Valgus	Raadiointerfe rents	Valgus
Lugemise sagedus	madal	kõrge	kõrge	kõrge
Tundlikkus materjalide osas	on	ei ole	ei ole	ei ole

2.4 LPWAN tehnoloogiad

Monitoorimissüsteemile on vaja valida sobiv raadiosidetehnoloogia. Valiku põhikriteeriumiks on madal energiatarve piisava töökauguse (>2km) korral.

LoRa, *Sigfox* ja *NB-IoT* on kolm konkureerivat hetkel levinud LPWAN-tehnoloogiat.

LPWAN-tehnoloogiad tagavad tavaliselt väikese energiatarbimise kuni 10 aastat ja kauem [1]. Olenevalt tehnoloogiast pakuvad nad tavaliselt kuni 10- 40 km sideulatust maapiirkondades ja 1-5 km linnapiirkonnas. Raadiokiibi maksumus on alla 2 € ja ühe seadme sidekulu on 1 € aastas [5]. Eestis on võimalik tellida NB võrgu kasutamist keskmiselt 1,49 €/kuus (nt Elisa pakkumine äriklientidele).

Andmeedastuskiirus varieerub sõltuvalt tehnoloogiast. Mõned tegutsevad litsentsitud ja teised litsentsimata sagedustes.

2.4.1 LoRaWAN

LoRaWAN on sideprotokoll, mille on välja töötanud LoRa allianss LoRa raadiosidelahenduse ümber. *LoRaWAN* koosneb kolmest olulisest komponendist, nagu lõppseadmed, lüüsid ja võrguserver. Lõppseadmed vastutavad andmete kogumise eest ja on võrguserveriga ühendatud lüüside (Gateway-de) kaudu. Lüüsid edastavad andmeid lõppseadme ja võrguserveri (NS) vahel. *LoRa* töötab litsentseerimata ISM (*Industrial, Scientific, Medical*) sagedusalades (nt 433 ja 868 MHz Euroopas, 915 MHz Põhja-Ameerikas ja 433 MHz Aasias). *LoRa* pakub andmeedastuskiirust vahemikus 300 bit/s kuni 50 kbit/s sõltuvalt hajutusteguritest (*spreading factor, SF*) ja raadiokanali ribalaiusest (125-500 kHz) [12]. Maksimaalne andmepaketi maht on 243 baiti ja nii üleslaadimisel kui ka allalaadimisel, edastatavate sõnumite arv päevas on piiramatult [11]. Lõppseadmete aku eluiga võib ületada 10 aastat sõltuvalt andmete edastamise perioodist ja kasutatava anduri energiatarbest. *LoRaWAN*-i võrgu korral kasutatakse tavaliselt

tähttopoloogiat, kuid tehnoloogiliselt on toetatud ka andmeid edastavad sõlmed (retransmissioon). Käesoleva rakenduse puhul sobib tähttopoloogia.

Kui lõppseade on aktiveeritud, liitub see *LoRaWAN*-võrguga ja saab suhelda võrguserveriga. *LoRaWAN* toetab kahe-suunalist sidet, st *UL* (üleslaadimine) ja *DL* (allalaadimine). *UL*-side on sõnumid, mille lõppseadmed saadavad võrguserverile, mida edastab üks või mitu lüüsi. Kõik lõppseadmete saadetud sõnumid võtavad vastu kõik edastuspiirkonnas asuvad lüüsid. Lüüsid saadavad vastuvõetud andmed võrguserverile, võrguserver kontrollib andmete terviklikkust, eemaldab üleliigsed vastuvõetud sõnumid ning lõpuks tuvastab vastava rakendusserveri ja edastab sellele andmed. *DL*-side vastab andmetele, mille rakendusserverid saadavad lõppseadmetele. Need andmed võivad olla kinnitus või konkreetne sõnum, mille rakendusserver peab lõppseadmetele saatma.

2.4.2 *Sigfox*

Sigfox raadiosidelahenduse patenteeris ettevõtte *Sigfox*, mis on nii ettevõtte kui ka võrguoperaator. See turustab oma lahendusi paljudes riikides ja töötab samuti litsentseerimata *ISM* sagedusalas (nt 433, 868 MHz Euroopas, 433 MHz Aasias ja 915 MHz Põhja-Ameerikas). *Sigfox* seadmed kasutavad binaarset faasimodulatsiooni (*D-BPSK*) ja ülikitsast sagedusriba (100 Hz). Ülikitsa sagedusriba kasutamine võimaldab *Sigfox*-il *ISM* sagedusala tõhusalt ära kasutada ja tagab väga madala mürataseme, mis viib väikese energiatarbimiseni ja vastuvõtja kõrge tundlikkuseni [13]. Maksimaalne andmeedastuskiirus on 100 bit/s. *Sigfox* toetab oma hilisemas versioonis nii *UL*- kui ka *DL*-sidet 140 sõnumiga päevas üleslaadimiseks ja 4 sõnumiga päevas allalaadimiseks. Seetõttu näeme, et kõigil *UL*-i sõnumitel pole kinnitust (peamiselt ühesuunaline side). Seega, tagamaks, et kõik sõnumid jõuavad vastuvõtjateni, kasutab *Sigfox* aja/sageduse mitmekesisust ja kordussaatmisi. Teisisõnu, iga *Sigfox ED*-i saadetud sõnum saadetakse uuesti kolm korda kolmel juhuslikul kandesagedusel. *Sigfox*-i tugijaamad on võimelised sõnumeid vastu võtma samal ajal kõigi saadaolevate kanalite kaudu. Iga *DL*-sõnumi maksimaalne kasulik maht on 8 baiti, samas kui *UL*-side puhul on see kasulik maht 12 baiti. *Sigfox* lõppseadmete akude eluiga võib ulatuda 10 aastani. Nagu *LoRaWAN*-võrk, kasutab ka *Sigfox*-i võrk tähttopoloogiat, kus lõppseadmed on ühendatud *Sigfox*-i pilvega *Sigfox*-i tugijaamade kaudu. *Sigfox* võrku omab mingis piirkonnas reeglina üks võrgupakkaja, mis tegutseb telekomiooperaatorina.

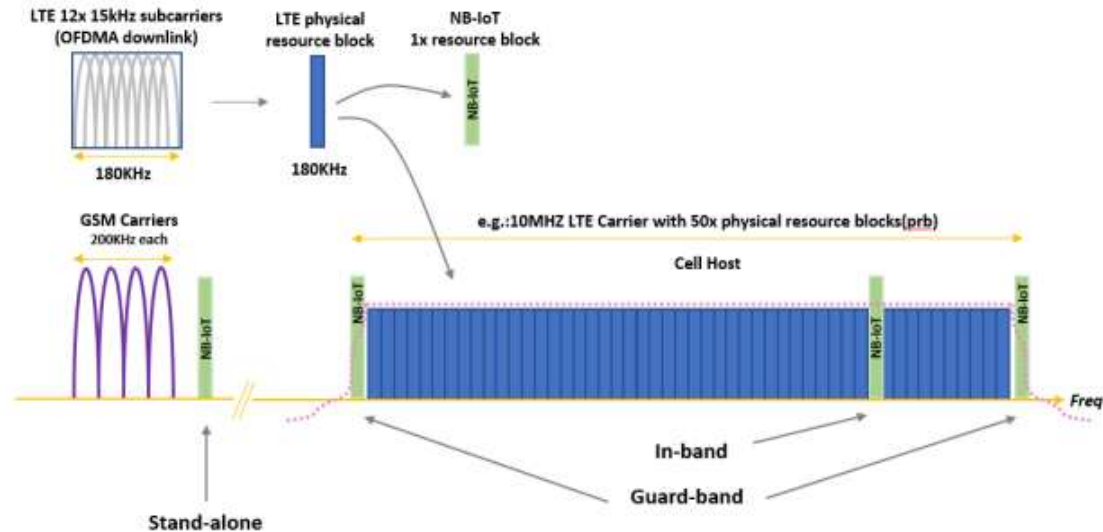
2.4.3 NB-IoT mobiilside

NB-IoT võrku tutvustas 3GPP (3rd Partnership Project) ning aastal 2015 alustati esimeste katsetustega Euroopas, mis olid läbi viidud mobiilside firma Vodafone poolt. Aastal 2016 oli valmis NB-IoT tehnoloogial põhinev võrk.

NB-IoT-l on konkurentsieelis teiste LPWAN-i juhtmevaba telekommunikatsiooni ees tänu unikaalsetele funktsioonidele, nagu energiatõhusus, kahesuunalisus, usaldusväärne side karmides tingimustes, suure hulga ühendatud seadmete toetamine ja standardite pakutav kõrge turvalisus. NB-IoT eksisteerib koos teiste 5G komponentidega [14] ja GSMA [15] on pidanud NB-IoT-d 5G perekonna osaks. NB-IoT on kõige soovitatavam viivitust taluvate rakenduste jaoks, kuid võimaldab suurema ulatusega sidet, võimaldades nimelt täiturmehhanismi juhtimist, kaugseiret ja asukoha jälgimist[16].

Kitsaribaline IoT (NB-IoT), mida nimetatakse ka LTE Cat NB1-ks või LTE Cat NB2-ks, ühendab olemasolevaid mobiilsidevõrgu operaatoreid, kasutades kuni 100 000 lõppseadet.

See pakub aku kasutusaega 8–10 aastat, suurt katvust, madalat hinda ja kõrget võrguturvalisust [17]. NB-IoT kasutab GSM- ja LTE-edastuses ühele füüsilisele ressursiplokile vastavat sagedusriba 200 KHz [17]. 200 KHz sagedusribalaiusega on NB-IoT jaoks kolm võimalikku töörežiimi, nimelt: eraldi toimimine (*Stand alone*), kus eraldatakse kanal ainult NB-IoT võrgu jaoks suurusega 200kHz (vähendab intereferentsi), kaitseriba toimimine (*Guardband*) ja ribasisene töö (*In-Band*), kus eraldatakse ressursi LTE kandja sees, kuid NB-IoT kandjal on suurendatud võimsus +6dB võrreldes LTE plokkidega (vt Joonis 3).



Joonis 3 *NB-IoT* kanalite paiknemine LTE mobiilsidesagedustel [18]

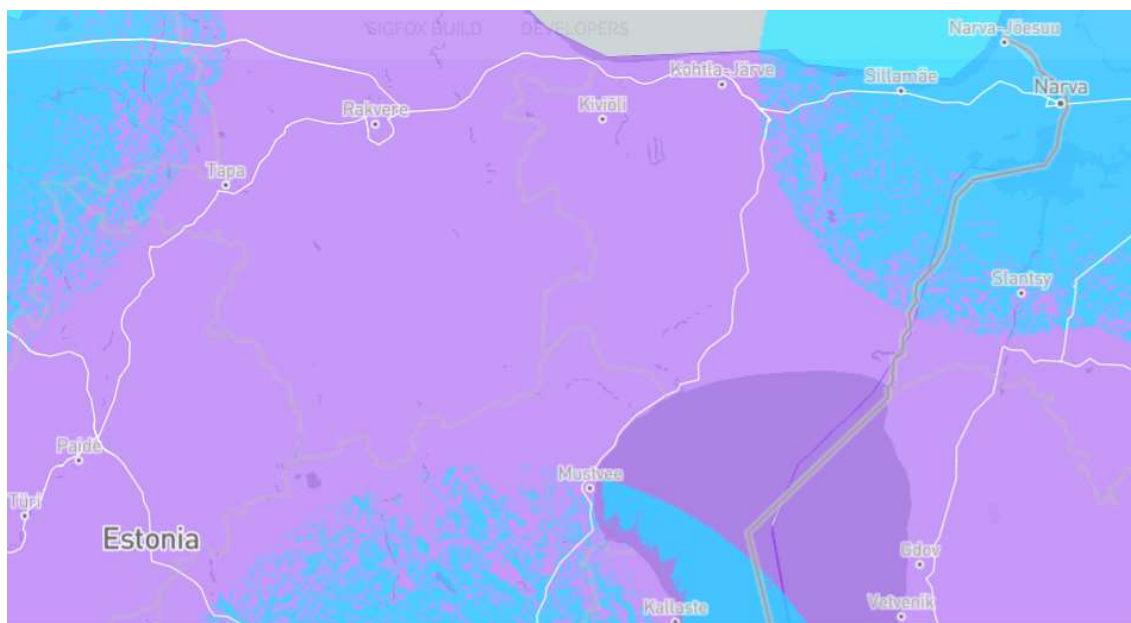
NB-IoT kasutab mitmeid *LTE* funktsioone ja kohandab neid vastavalt *IoT* rakenduste nõuetele. *NB-IoT* kasutab *LTE* (4G või 5G) mobiilsidevõrku, et edastada sõnumeid lõppseadmetele. Andmeedastuskiirus on vastavalt 200 kbit/s ja 20 kbit/s *UL*- ja *DL*-side puhul. Iga sõnumi maksimaalne kasulik andmemaht on 1600 baiti.

NB-IoT töötab mobiilsideoperaatoritele litsentseeritud sagedustel. See standard määratles toetatud loendi *NB-IoT* jaoks ja Euroopas peamised toetatud sagedusalad on *B3* (1800 MHz), *B8* (900 MHz) ja *B20* (800 MHz)).

NB-IoT-d kasutatakse peamiselt akudega töötavates lõppsõlmedes ja see võimaldab funktsioone akude energia säästmiseks, näiteks sügav energiasäästurežiim (*PSM*), pikendatud ooteajaga vastuvõtturežiim (*eDRx*), mis võimaldavad akut kasutada üle kümne aasta olenevalt kasutusjuhtumist.

2.4.4 *LPWAN* tehnoloogiate võrdlus

Arvestades, millised on loodava süsteemi nõuded, võime öelda, et kõige vähem sobib *Sigfox*, sest tema edastatavate andmete maht on vaid 12 baiti, mis võib olla kriitiline parameetrite edastamiseks, kui neid ei ole ainult üks ja neid on vaja saata ühe sõnumiga. Kui me räägime Ida-Virumaast, eriti Kohtla-Järvest, näeme, et *Sigfox*-i leviala on nõrk või puudub. Samal ajal on odavam kasutada litsentsimata sagedusi ja selle ulatus on üsna hea (vt Joonis 4).



Joonis 4 Sigfox-i leviala Eestis [19]

LoRa sobib samuti hästi, sest on võimalik reguleerida energia tarbimist, ulatus on hea, aga linnatingimustes on probleemiks vabakasutusega sagedusalale iseloomulik raadiointerferents. Seetõttu on vaja rohkem signaale vastuvõtvaid lüüse, eriti kui objektid on jaotatud suurematele kaugustele (prügikonteinerid), mis tõstab süsteemi ehitamise kulu. *NB-IoT* sobib hästi, kuna kasutab olemasolevat *LTE* mobiilsidevõrku, kuid on natuke kallim, kui kasutab litsentseeritud sagedusi (rakenduvad mobiilsideoperaatorite teenustasud). Ulatus on hea ja interferents on nullilähedane. Saame reguleerida energia tarbimist, kasutades energiasäästlikku režiimi (*PSM* või *eDRx*). Projekti jaoks on valitud *NB-IOT*.

LPWAN tehnoloogiate võrdlustabel on toodud tabelis 2.

Tabel 2 *LPWAN* tehnoloogiate võrdlus

<i>LPWAN</i> tehnoloogia nimetus	<i>LoRa</i>	<i>Sigfox</i>	<i>NB-IoT</i>
Sagedus	Litsentseerimata <i>ISM</i> 433 MHz, 868 MHz	Litsentseerimata <i>ISM</i> band 433 MHz, 868 MHz	Litsentseeritud <i>LTE</i> mobiilsidesagedused (800-850 MHz)
Ulatus	5 km (linn) 10 km (maa)	10 km (linn) 40 km (maa)	1 km (linn) 10 km (maa)
Paketi andmemaht	243 baiti	Üleslaadimine: 12 baiti, allalaadimine: 8 baiti	1600 baiti

Andmeedastuskiirus	50 kbit/s	100 bit/s	200 kbit/s
Võrgu topoloogia	tähtede täht	täht	täht
Modulatsioon	<i>Chirp</i> modulatsioon	Ultra-NarrowBand Faasimodulatsioon, ülikitsaribaline raadio	LTE modulatsioonid
Seadmete arv ühe tugijaama kohta	10000	100000	100 000
Turvalisus	<i>AES</i>	Ei ole sisseehitatud	<i>3GPP</i> (128-256 biti)
Latentsus	madal (C tüüpi seadmed)	kõrge	madal
Raadioressursi jagamise algoritm	<i>ALOHA</i>	<i>ALOHA</i>	<i>LTE</i>

2.5 *IoT* pilveplatvormid ja nende võrdlus.

IoT platvorm - tarkvara, mis on loodud asjade interneti (andurid, kontrollid ja muud seadmed) ühendamiseks pilvega ja neile kaugjuurdepääsuks. Esindab vahepealset taset riistvarataseme (anduri taseme) ja rakenduse taseme vahel.

IoT arenduse tehnoloogiliste ja tehniliste aspektide osas on praegu selgelt eristatud riist- ja tarkvaraplatvormid seadmete ühendamiseks ning enamik nendest on tarkvara *IoT* platvormid. *IoT* platvormid pakuvad erinevate riistvarade sujuvat integreerimist, kasutades sideprotokolle, erinevat tüüpi topoloogiat (otsene ühendus või lüüs) ja kasutades vajadusel *SDK*-d jne.

Samuti on võimalik kogutud *IoT* andmeid edastada teatud andmeanalüüsi ja -salvestussüsteemidesse, samuti edastada andmeid ühendatud seadmetesse (konfiguratsioon, teatised) või nende vahel (juhtelemendid, sündmused), kasutades erinevat tüüpi kasutajarakendusi.

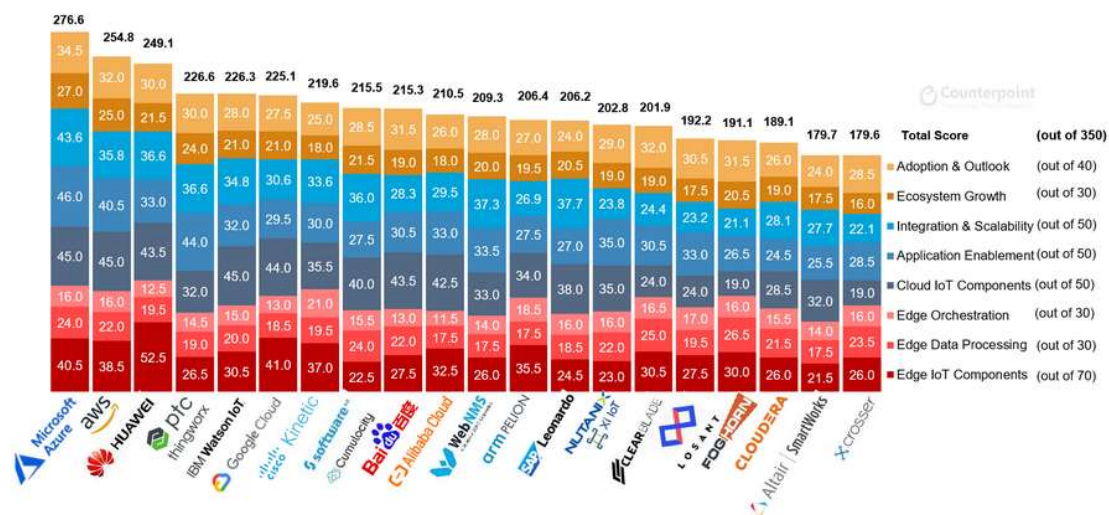
Kõige populaarsemad tarkvara *IoT* platvormid on: *Microsoft Azure IoT*, *Amazon Web Services (AWS) IoT*, *Google Cloud*, *ThingWorx IoT*, *Cumulocity IoT*, *IBM Watson*, *Artik by Samsung Electronics*, *Cisco IoT Cloud Connect*, *Salesforce IoT Cloud*, *Baidu AIoT*, *Cumulocity IoT*, *WebNMS IoT*, *SAP Leonardo*, *ARM Pelion*, *Losant IoT*, *ClearBlade IoT*, *FogHorn IoT*, *Nutanix Xi IoT*, *Altair Smartworks*, *Cisco Kinect IoT*. *Thinger.io* ja paljud teised.

Tarkvara *IoT* platvormide üksteisest eristamise kriteeriumid on järgmised:

- mastaapsus – lõppseadmete arv, mis saavad platvormiga ühendust luua, sealhulgas tõhus serveri koormuse tasakaalustamine;
- kasutusmugavus – API integreerimise paindlikkus ja lähtekoodi haldamise lihtsus;
- juurutamise võimalused - avalik või privaatne pilv;
- turvalisus – andmekaitse krüptimise kaudu, kasutaja juurdepääsukontroll jne.
- andmebaas - võimalus seadmetest saadud andmete salvestamiseks, hübriidpilveandmebaaside olemasolu jne.

IoT platvormide poolt kasutatavatest protokollidest on populaarseimad *MQTT*, *CoAP*, *HTTP/HTTPS*, *AMQP*, *XMPP*, *DDS*.

2020. aastal nimetas analüütikute firma *Counterpoint Research* parimad asjade interneti (*IoT*) platvormid, mis põhinevad küpsusastmel (võime täita klientide vajadusi algusest lõpuni) ja paljudel muudel parameetritel (vt Joonis 5). Kõige täiuslikum platvorm on analüütikute hinnangul *Microsoft Azure*, millele järgneb *Amazon Web Services (AWS)*. Kolmandal kohal on *Huawei OceanConnect*, neljandal *PTC ThingWorx*. Esiviisiku lõpetab *IBM Watson*. [20]



Joonis 5 Juhtivad *IoT* platvormid täielikkuse poolest [20]

Lõpphinnangus võttis *Counterpoint* arvesse 8 sammu: levitamine ja väljavaated, kasvutempo, integratsioon ja skaleeritavus, rakenduste tugi, pilvekomponendid, servade orkestreerimine, servade töötlemine ja servakomponendid.

2.5.1 Amazon Web Services (AWS)

Nagu kõik *IoT* platvormid pakub *AWS* tasuta (*Free Tier*) võimalust kasutada ühe aasta jooksul oma ressursse. Vastavalt loodavale süsteemile on võimalik kasutada erinevaid mooduleid, näiteks Elastic Beanstalk rakenduse loomiseks, ja S3 salvestusruumi. Piiratud ajaks *AWS* pakub ka *SQL* andmebaasi kasutamist või alternatiivina võib kasutada *NoSQL* andmebaasi *DynamoDB* koos 25 GB salvestusruumiga. Tasuta pakettis on tagatud 250000 sõnumit kuus. Andmete saatmiseks võib kasutada *MQTT* või *HTTP*. *IoT* seadme jaoks on olemas arendustööriist (*AWS IoT Device SDK*), mis lihtsustab pilveteenusega suhtlemist. Ühtset autentimis- ja autoriseerimiskomponenti kasutatakse sõnumite vastuvõtmiseks. Edasi liiguvad sõnumid seadmete keskusele (*Device Gateway*), mis tõlgendab suhtlusprotokollide põhjal päringuid seadmete unikaalsed identifikaatorid asuvad seadmete registris. Teised *AWS* rakendused suhtlevad *AWS IoT*-iga läbi seadme pilvekoopia, mis hoiab viimast staatust.[21]

2.5.2 Azure IoT Hub

Azure pakub ka kaht võimalust kasutada tasuta resursse: *Free Tier* või *Free Account* koos 200 dollarilise krediidiga. *IoT hub* on tasuta, aga seadmete ja sõnumite arv on piiratud, mis võiks olla takistuseks projekti arendamiseks. Pakutakse ka 25 GB *CosmosDB* andmebaasi salvestusruumi. Sõltuvalt seadmete arvust antakse vastav sõnumite arv päevas. Seadet on vaja registreerida ja sellele antakse *ID* koos autentimise tüübiga. *SQL* andmebaas on tasuline. Andmete edastamiseks võib kasutada *MQTT* protokollit. [22]

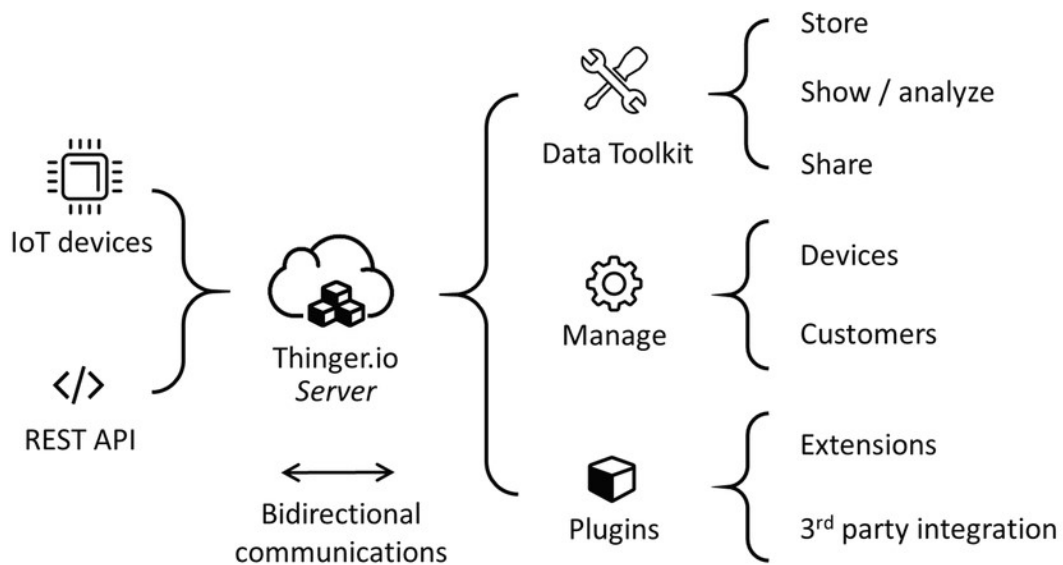
2.5.3 Cumulocity IoT

Cumulocity IoT töötab mis tahes võrguarhitektuuriga, kuid on spetsiaalselt loodud mobiilsidevõrkudega töötamiseks. *Cumulocity IoT* pakub laias valikus funktsioone *IoT* seadmete ja muude asjade internetiga seotud andmeallikate liidestamiseks *Cumulocity IoT* platvormiga. Antud platvorm pakub *C++* jaoks üldist klienditeeki, toetab *MQTT*-d ja *SmartREST2*. Need protokollid töötavad tänapäeval praktiliselt kõigi Interneti-ühendusega seadmetega. *Cumulocity IoT* toetab turvalisel viisil mis tahes tüüpi Interneti-ühendust. *Cumulocity IoT* saab soovi korral juhtida kaugjuhtimisseadmeid reaajas. *Cumulocity IoT* pakub täielikult sertifitseeritud seadmetele ulatuslikku seadmehaldust. Kasutajaliides kohandub automaatselt ühendatud seadmetega – konfiguratsiooni pole vaja. *Cumulocity IoT* paljastab oma täieliku funktsionaalsuse programmeerimisliideste (*API*) kaudu. Erinevalt paljudest teistest asjade interneti platvormidest kasutab

Cumulocity IoT kõikidel kasutusjuhtudel samu *API*-sid ja sama liidesetehnoloogiat. *Cumulocity IoT* kasutab *HTTP*-d ja *REST*-i, mis on tänapäeval kõige laialdasemalt kasutatav liidesetehnoloogia ja mis töötab kõikides Interneti-ühendusega seadmetes.[23]

2.5.4 *Thinger.io*

Thinger.io platvorm koosneb kahest põhitootest: *Backend* (mis on tegelik *IoT*-server) ja veebipõhine *Frontend*, mis hõlbustab kõigi funktsioonidega töötamist mis tahes arvuti või nutitelefoni abil (vt Joonis 6).



Joonis 6 *Thinger.io* platvormi arhitektuur [24]

Täielikult ühilduv igat tüüpi seadmetega, olenemata protsessorist, võrgust või tootjast. *Thinger.io* võimaldab luua kahesuunalist suhtlust *Linux*i, *Arduino*, *Raspberry Pi* või *MQTT* seadmetega ja isegi selliste kõrgtehnoloogiatega nagu *Sigfox* või *LoRaWAN* või muude Interneti-*API* andmeressurssidega. Kättesaadav on ka *Dashboard*, mis pakub võimalusi andmete visualiseerimiseks reaalajas. *Thinger.io* võimaldab ka andmete ja sündmuste triggerite seadistamist. Muudesse projektidesse integreerimiseks kasutatakse lisa rakenduspakette, mis ei kuulu tasuta paketti. [24].

2.5.5 Ubidots

Ubidots on rohkem *PaaS* platvorm (*Platform as aService*), mis võimaldab oma projekte väga kiiresti seadistada ja käivitada. Pakub nii staatilisi kui ka dünaamilisi ülevaateid (*Dashboard*).

Ubidotsi tasuta *STEM*-i pakett võimaldab koguda andmeid kuni kolmelt seadmelt, kasutada lihtsamaid hoiatussõnumeid ja jälgida andmeid nende platvormilt, kasutades rohkem kui 30 erinevat šablooni. Toetatakse nii *HTTP* kui ka *MQTT* andmesideprotokolle, on võimalik integreerida *MATLAB*-iga ja saada andmeid ka muudest *IoT* platvormidest, nagu *Azure IoT*. [25]

2.5.6 Pilveplatvormide võrdlus

Pilveplatvormide võrdlemiseks on võetud peamised kriteeriumid, millele pilveplatvorm peab vastama, et arendada välja tuleviku süsteem: saab koguda andmeid ja toetada erinevaid mikroprotsessoriga arendusplatvorme, salvestada ja säilitada andmeid ning omada visualiseerimisvahendeid.

Samal ajal peab pilveplatvorm vastama ka järgmistele kriteeriumidele:

- Kui mõõtmisi planeeritakse umbes 1 kord minutis (ühe seadme kohta), siis oleks võimalik teha päevas päringuid (~1500 sõnumit);
- On võimalik salvestada, eksportida vastu võetud sõnumeid ja hoida neid tasuta andmebaasis vähemalt pool aastat;
- Lubatud tasuta seadmete arv peab olema vähemalt 3;
- Peab olema hästi loetav ja arusaadav dokumentatsioon;
- Oma süsteemi integreerimine peab olema lihtne ja loodud süsteemi haldamine ei võta lisaressursse;
- Kasuks läheb tasuta *NoSQL* või *SQL* andmebaaside kasutamine;
- On võimalik luua atraktiivseid ja dünaamilisi ülevaateid (*Dashboard*);
- Teenuse hind oleks minimaalne (arendamise jaoks tasuta);
- Rakenduse loomiseks peab toetama selliseid keeli nagu *Python*, *Node.js*, *Java*;

- Võimaluse korral toetab ka *SSL*-i transpordikihi turbeprotokolli, mis tagab kommunikatsiooni turvalisuse.

Võttes arvesse kõiki kriteeriume saame võrrelda töös välja toodud pilveplatvorme (Tabel 3) nagu *Azure IoT*, *Ubidots*, *Cumulosity IoT*, *AWS IoT*, *Thinger.io*.

Tabel 3 Pilveplatvormide võrdlus

Pilveplatvorm	<i>AWS</i>	<i>Ubidots</i>	<i>Cumulosity</i>	<i>Thinger.io</i>	<i>Azure IoT</i>
Seadmete arv	3	3	Rohkem kui 2	Tasuta 2 seadet	Rohkem kui 2
Andmete salvestamine	olemas	olemas	olemas	olemas	olemas
Protokollid	<i>MQTT, HTTP, LoRaWAN</i>	<i>MQTT, HTTP</i>	<i>MQTT, Sigfox, Lora, HTTP</i>	<i>Thinger.io protocol(pson format), MQTT, HTTP</i>	<i>MQTT HTTP AMQP</i>
<i>NoSQL, SQL</i>	<i>Dynamo DB, MSQl</i>	<i>Data storage</i>	<i>DataHub</i>	<i>Data bucket</i>	<i>CosmoseDB</i>
<i>SSL</i>	olemas	olemas	olemas	olemas	olemas
<i>STEM</i> (tasuta), arendusvõimalus	olemas	olemas	olemas	olemas	olemas
Keelte tugi	<i>PHP, JAVA, Python, Node.js</i>	<i>Node.js, Java, PHP</i>	<i>Node.js, Java, C#</i>	<i>PHP, Node.JS, C++</i>	<i>PHP, JAVA, Python, Node.js</i>
Dokumentatsioon ja teegid	Olemas ja täielik	Olemas, aga ei ole täielik	Olemas, täielik	Olemas, aga ei ole täielik	Olemas ja täielik
<i>API</i>	<i>Amazon API Gateway</i>	<i>Ubidots API</i>	<i>Rest API</i>	<i>REST API</i>	<i>Azure API</i>
<i>Dashboard</i> (staatiline, dūnaamiline)	olemas	olemas	olemas	olemas	olemas

2.6 Olemasolevate jäätmekonteinerite monitooringlahenduste ülevaade

Kuna jäätmete kogumine, sorteerimine ja utiliseerimine on alati olnud aktuaalne teema, pakuvad paljud ettevõtted oma lahendusi turul. Töös on vaadeldud ainult *NB-IoT* toetavaid andureid, sest nagu varem mainitud, see sidetehnoloogia on kõige sobivam Eestis realiseeritavale projektile. Mõned firmad pakuvad ainult selliseid seadmeid nagu *Dragino* andur (70–100 eurot) (vt Joonis 7)



Joonis 7 *Dragino* andur [26]

või *NETOP NB-IoT Waste Bin Sensor* (180€) (vt Joonis 8).



Joonis 8 *NETOP NB-IoT* andur [27]

Teised firmad pakuvad juba täislahenduse koos pilvede (*Cloud*) rakendusega, nagu *Sensoneo* [28]. Nad pakuvad mitte ainult andureid, kuid ka pilveteenuseid nagu marsruudi planeerimine, jäätmete monitooring, pakuvad veebi- ja mobiilirakendusi elanikele, kohalikule omavalitsusele, mis baseerub *Azure Cloud*-l. Nad kasutavad ultraheliandurit, mis toetab *GPRS / NB-IoT / LoRaWAN / Sigfox* raadioside tehnoloogiat (vt Joonis 9).



Joonis 9 *Sensoneo* ultraheliandur [28]

Võrreldes eespool nimetatud anduritega kasutab *Nordsense* 16-punktilist *3D ToF* laserit/*LIDAR* andurit (~100 eurot), mis annab pildi jäätmete jaotusest prügikonteineris ja ei ole pimealaid (vt Joonis 10). Puuduseks on see, et nad töötavad ainult *4G (CAT MI/LTE M)* võrgus. Samuti on loodud rakendus, mis planeerib optimeeritud marsruuti ja arukat jäätmekäitlust, mis annab ülevaate jäätmete tasemest, näitab karti, prognoosib täituvust. [29]



Joonis 10 *Nordsense 3D ToF* andur [29]

3 IoT süsteemi projekteerimine

3.1 Samal teemal arenduste ülevaade

Jäätmekäitlus ja kogumissüsteem on mõlemad lahutamatud ja olulised osad linna ja äärelinna elus. Seega on see teadlaste tähelepanu juba äratanud. Suur töö käib prügikastide ja jäätmekogumissüsteemi täiustamise nimel. *Memon* pakkus välja nutika prügi jälgimise ja kogumise süsteemi, mis suudab jälgida prügi taset reaalajas [30]. See süsteem on üsna lihtne ja arusaadav. *WeMos DI* mini on kasutusel süsteemi peamise töötlemisüksusena. *Arduino* plaat on varustatud *HC-SR04* ultrahelianduriga, mis mõõdab jäätmetaset prügikastis. Kui mõni klient loob ühenduse määratud *IP*-ga, millele projektplaat on määratud, süsteem aktiveerub ning hakkab andmeid koguma ja avaldama. Vastasel juhul jääb süsteem unerežiimile ja säästab energiat. Kavandatavas süsteemis puudub prügitasemest teavitamise skeem. Lisaks ei salvesta andmeid andmebaasi, ja nende ajalugu ei ole kättesaadav. Samuti ei näidata selles süsteemis ühtegi jäätmete kogumise protseduuri. *Adam* ja kaasautorid pakkusid välja asjade interneti kasutava jäätmekäitlussüsteemi [31]. Prügikastid on varustatud ultrahelianduriga, *Arduino Uno* plaadiga ja *ESP 8266* mooduliga. Ultraheliandurid mõõdavad prügikastide täitmise tase, mis seejärel avaldatakse serverisse *TCP/IP* protokolliga kaudu. See süsteem näitab ka prügiveoautode marsruuti prügikastide juurde. *Chen* ja kaasautorid pakuvad välja jäätmekäitluseks asjade interneti-süsteemi, mis kasutab *MQTT* serverit andmete ülekandmiseks prügikastidest andmebaasi [32]. Sellel süsteemil on ka võimalus anda telefonikõnega teada, kui anduri andmed ületavad etteantud väärtust. Süsteem kasutab infrapunaandurit jäätmete taseme mõõtmiseks ja gaasiandurit ebameeldiva lõhna tuvastamiseks. See süsteem on kasutanud ka *Google Maps*-i, et luua veokile optimeeritud marsruudid jäätmete kogumiseks. Kasutatakse *LoRa*-d andmete ülekandmiseks jäätmekastist lüüsi, millel on tavaliselt lai katvus. Kuid seda piirab ka madal andmeedastuskiirus. *Susila* ja kaasautorid pakuvad välja nutika jäätmete kogumise ja käitlemise süsteemi, mis kasutab asjade interneti, kus süsteem saabab *GSM*-i kaudu määratud telefonile teate, kui prügikast on täis või jäetud üle kolme päeva tühendamata [33]. See võimaldab prügiveoautodel külastada ainult vajalikke prügikaste, mis vähendab oluliselt kütusekulu ja inimtööjõudu. Kuid sellel süsteemil puudub jäätmete kogumiseks marsruuti planeerimise süsteem. Lisaks ei salvesta see süsteem andmeid reaalajas. *Abdullah* ja kaasautorid pakuvad välja asjade internetil põhineva tõhustatud

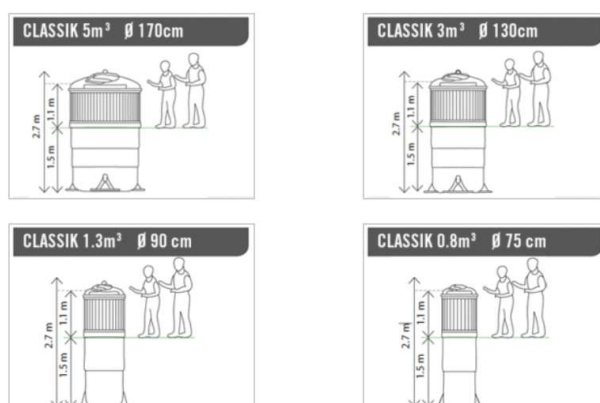
jäätmekäitluse arhitektuuri [34]. Siin on iga prügikast ühendatud pilvega *GSM-i* või *GPRS-i* kaudu ja saadab andmed jäätmeliigi, kaalu ja mahu kohta. Prügikastid saadavad teabe transpordisüsteemi aadressile, mis põhineb: a) mõõdetud maht on suurem kui määratletud väärtus ja b) mõõdetud kaal on suurem kui määratletud kaal. See meetod võimaldab kasutada ka erineva suurusega veokeid sõltuvalt jäätmete kogusest. Jäätmete maht ja kaal ei pruugi alati olla täidetud prügikasti täpsed määrajad. Mõned teadlased kasutavad pilve salvestamise võimalust, et koguda ja salvestada andmeid jäätmekäitlussüsteemi kaudu. Mikroprotsessor kogub andmeid ja laadib teabe varukoopia üles ja kasutab seda vajadusel [35, 36]. Samuti on välja pakutud süsteemid, kus kaamera saab määrata jäätmete taseme ja liigi, kasutades klassifitseerimise algoritmi [37].

Samuti on välja pakutud lahendused jäätmeveo planeerimisel [38], kus targa linna jaoks pakuti välja asjade interneti-põhine tahkete jäätmete käitlussüsteem. Nende uurimistöös ehitatakse prototüüp tavaliste ultrahelianduritega prügikastis jäätmete koguse mõõtmiseks. Nende andurite andmed aitavad ära hoida risustamist ja teenusepakkujad planeerivad jäätmeveo sõidud vastavalt sellele. Järgmises lähenemises [39], [40] pakuti välja automaatne nutikas prügikast või prügikoristusüsteem, mis keskendub asutustele, näiteks ettevõtetele või kohalikele omavalitsustele, et nad saaksid kontrollida jäätmete täielikku kõrvaldamist. Samuti pakutakse välja jäätmete kogumise mudel, et vähendada jäätmekohtade ja konteinerite koguarvu [41]. Antakse põhjalik ülevaade jäätmekäitluse võimalustest ja väljakutsetest *IoT*-ga targas linnas, kus autorid kirjeldasid linna praegust infrastruktuuri. See uuring pakub *IoT* tehnoloogiate võimalikke lahendusi ja võimalusi [42]. On olemas lahendused konkreetse linna jaoks, kus on välja pakutud välja nutikas prügisüsteem toidu raiskamise vähendamiseks [43]. Pakutud süsteemis jagavad akupõhised nutikad prügikastid traadita võrgu kaudu omavahel teavet ning ruuter ja server koguvad ja analüüsivad teenuse osutamise teavet.

3.2 Uurimise objekt

Uuringu objektiks on Eesti-Vene piiriprojekti raames Kohtla-Järve Ahtme ja Järve linnaosades, mis asuvad 12 km kaugusel teineteisest, koolide, lasteaedade, kultuuri- ja spordikeskuste (kokku 100 tk) juurde paigaldatud *Molok-u* all (sügavmahutid) prügikonteinerid: pakendite, olmejäätmete, biojäätmete ja paberi jaoks. Need on erineva

suurusega: 75 cm, 90 cm, 130 cm välisdiameetriga ja 65 cm, 75 cm ja 110 cm sisediameetriga (koti läbimõõt). Paigaldaja ja teenindaja on *Ragn Sells AS*. Süvamahuti jäätmekottide kasulik sügavus on 2,30 meetrit, mille jäätmemahut ei ületa 3 m³ (130 cm läbimõõduga). Tühjendamine toimub jäätmeveokiga spetsiaalse kraanaga altpoolt. Süvamahuti materjal on plastmassist metallkarkassiga (vt Joonis 11,12).

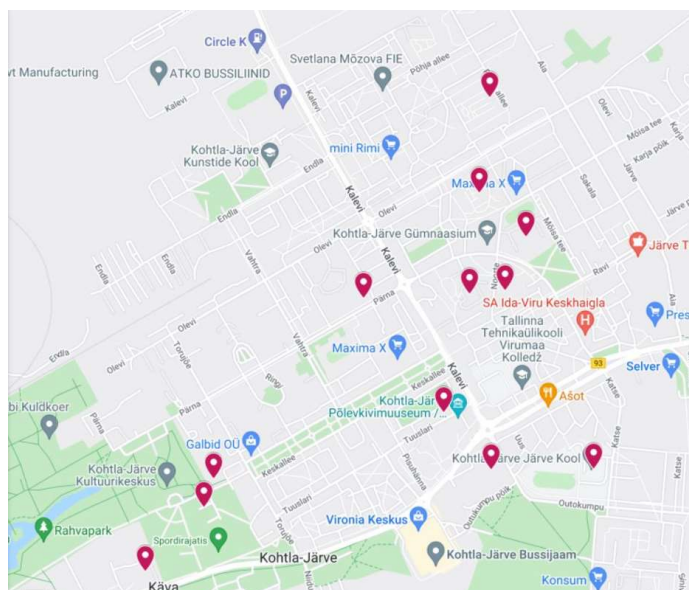


Joonis 11 Maa-aluse jäätmemahutite suurused [50]

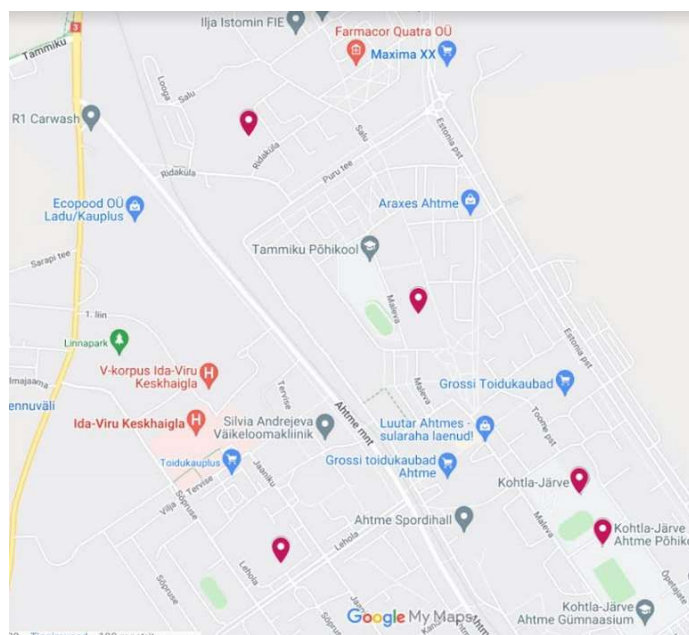


Joonis 12 Maa-aluse jäätmemahuti metallkarkass

Konteinerite asukoht kahes linnaosas on märgitud *Google* kaardil punasega. Konteinerite üksteisest eemaldumine ja vajadus eritranspordi järele nõuab prügiveofirmalt selle protsessi optimeerimist ja planeerimist. Praegu toimub prügiveodu graafiku järgi ja eeldatakse, et selleks ajaks (graafiku tähtaeg) on konteiner täis, kuid praktika näitab, et selleks ajaks võivad konteinerid olla osaliselt täidetud või üle täidetud. Viimase juhtumi korral inimesed on sunnitud heitma prügi teistesse konteineritesse, mis ei ole ette nähtud selle prügi jaoks (vt Joonis 13, 14).



Joonis 13 Kohtla-Järve Järve linnaosa maa-aluse jäätmemahutite jaotus



Joonis 14 Kohtla-Järve Ahtme linnaosa maa-aluse jäätmemahutite jaotus

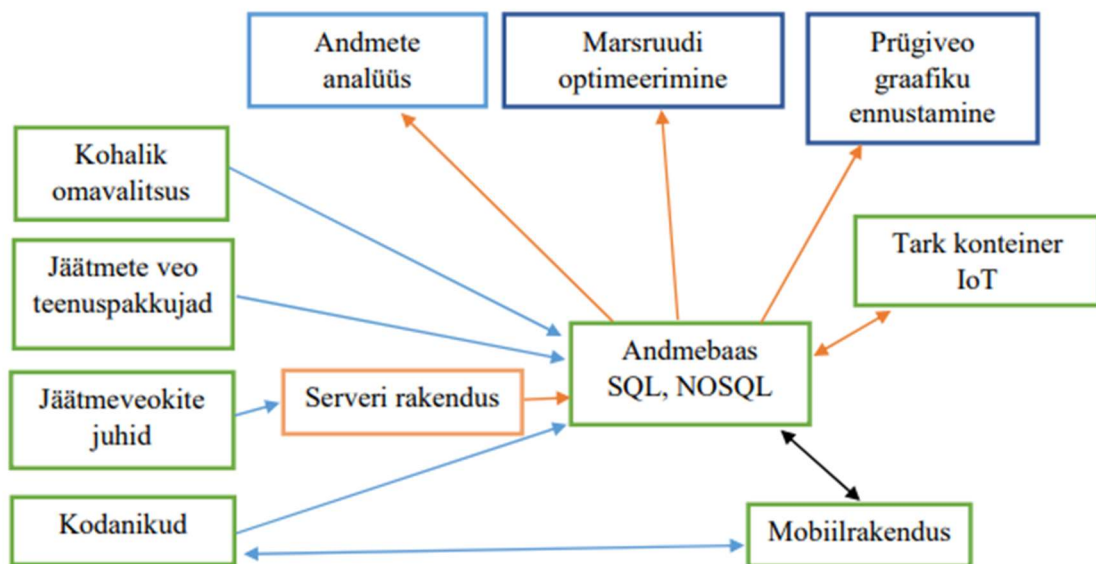
3.3 Uurimisobjekti planeeritav *IoT* süsteemi arhitektuur

Selles peatükis pakutakse välja kontseptuaalne mudel praeguste infrastruktuuri probleemide lahendamiseks.

Alljärgnevalt pakun välja asjade internetil põhineva nutika ja säästva tahkete jäätmete käitlussüsteemi kontseptuaalse mudeli. Mudel pakub Kohtla-Järve Linnavalitsusele

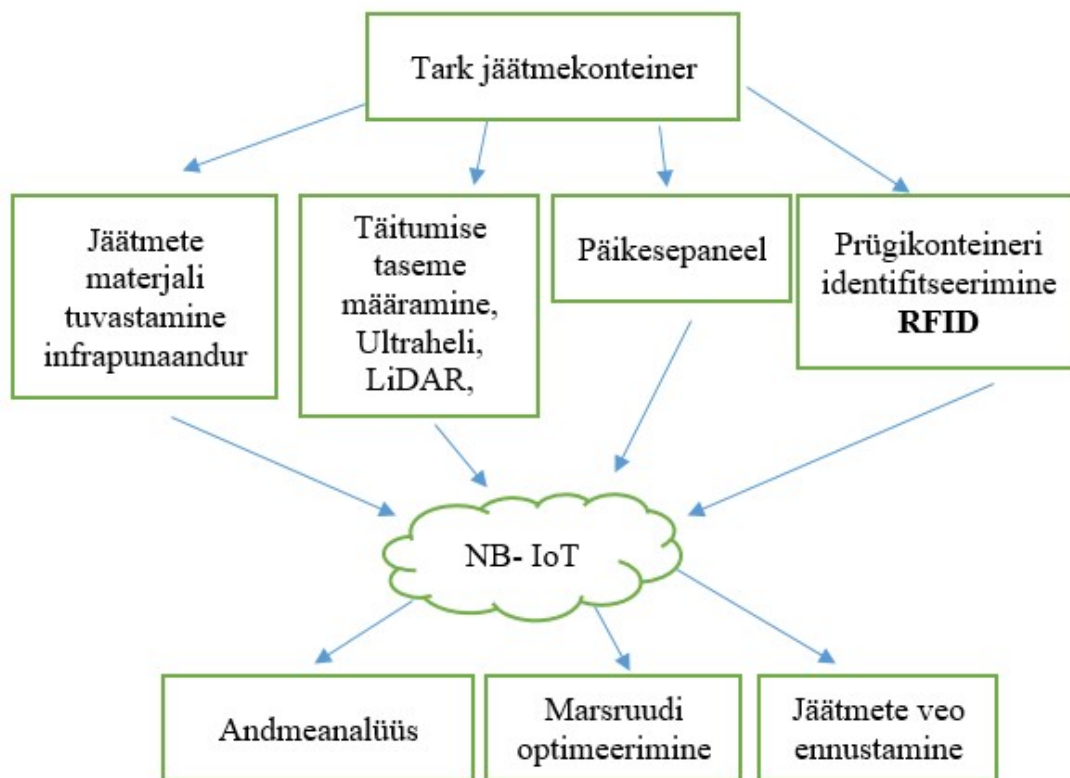
tulevase süsteemikavandi, mida saab hõlpsasti integreerida linnavalitsuse olemasoleva infrastruktuuriga. See illustreerib kõiki tegureid, mida on vaja nutika ja jätkusuutliku asjade interneti-põhise jäätmekäitlussüsteemi väljatöötamiseks. Sellesse mudelisse on kaasatud mitmed huvirühmad, näiteks omavalitsused, teenusepakkujad, jäätmeveoautojuhid ja kodanikud.

Huvirühmadele soovitatakse kasutada andmeedastustehnoloogiat, nagu *NB-IoT*, koos andmebaasiga. Mis puudutab elanikke, siis neil on võimalus jälgida konteineri täituvust mobiilirakenduse abil. Teenust osutavatel ettevõtetel on olemas otsejuurdepääs andmebaasile, et saada vajalikke andmeid oma äriplaneerimise jaoks. Kõik need huvirühmad suhtlevad sama platvormi kaudu, mis muudab suhtluse nutikamaks ja tõhusamaks. Praeguse praktika peamiseks väljakutseks on veokijuhtide töötamine ilma optimaalsete lahendusteta. Pärast pakutud asjade interneti-põhise süsteemi rakendamist saab selle probleemi lahendada, kasutades aktiivselt andurite võimalusi koos *KPI*-de ja optimeerimisalgoritmide kasutamisega, et vähendada kulusid, vahemaad ja aega. Kontseptuaalse mudeli rakendamise ilmselge tagajärg on *CO₂* ja muude gaaside heitkoguste vähenemine atmosfääris (vt Joonis 15).



Joonis 15 *IoT* süsteemi kontseptuaalne mudel

Anduripõhiste prügikonteineritega esineb mitmeid probleeme, sest erinevad teenusepakkujad pakuvad andmeedastuseks ja andmetöötluseks erinevaid süsteeme. Probleem on aku kehvas tööeas. Joonis 16 illustreerib, kuidas *IoT*-l põhinevaid nutikaid prügikonteinereid saab kujundada nii, et need suudaksid praegusest probleemist üle saada. Kavandatavad lahendused ühendavad ultraheliandureid, infrapunaandureid (kui on vaja määrata ka jäätmete liiki), päikesepatareid (pikendada akude elu), *RFID*-i (jäätmete konteineri identifitseerimiseks) ja *IoT* kommunikatsiooni seadmeid andmete edastamiseks. Tulevikus saab masinaõppe tehnikaid kasutada prügikasti täituvuse prognoosimiseks. Kasutada võib optimeerimisalgoritme, et leida veokijuhtide jaoks parimad marsruudid, võttes arvesse kogu jäätmekäitlust (vt Joonis 16).



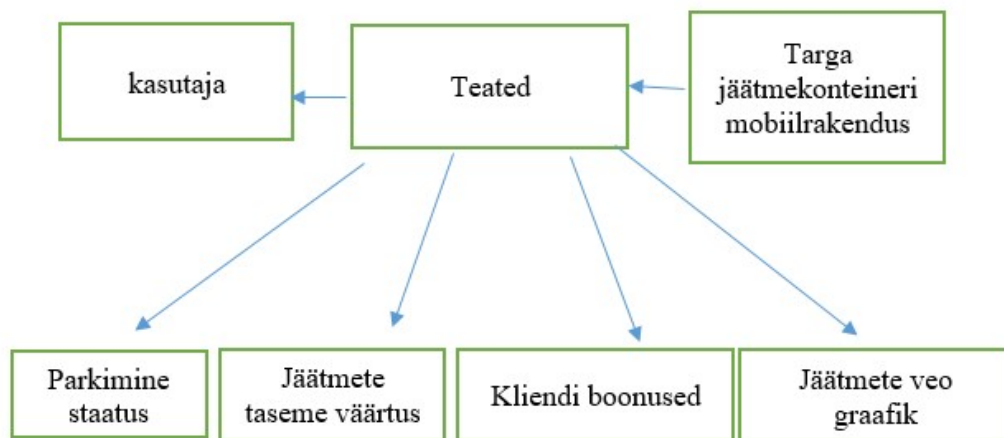
Joonis 16 *IoT*-põhine prügikonteiner

Kavandatavasse asjade interneti-põhise nutika prügikasti mudelisse kuuluvad sisse ehitatud ultraheliandurid ja infrapunaandurid, mis tuvastavad prügikastides leiduva jäätmekoguse ja -liigi. *RFID* tuvastab prügikastide asukoha. Need andurid aitavad saavutada õige sorteerimise ja suurendavad vastavalt teenusepakkuja tulu. Kuna asjade interneti-põhiste seadmete aku eluaeg on peamine takistus nende laialdasele levikule,

pakutakse alternatiivse lahendusena päikesepatareid. Seda tüüpi akude arendused pakuvad sobivat energiat väga säästval viisil kõigi seadme tegevuste jaoks. Lisaks on vaja arendada vähese energiatarbimisega riistvara ja kavandada unerežiim kavandatud jäätmekäitlussüsteemi jaoks. Nagu paljudes elektroonikaseadmetes, on ka unerežiim sisse ehitatud, et võimaldada energiasäästu, kui andmeid ei mõõdeta, töödeldakse ega saadeta.

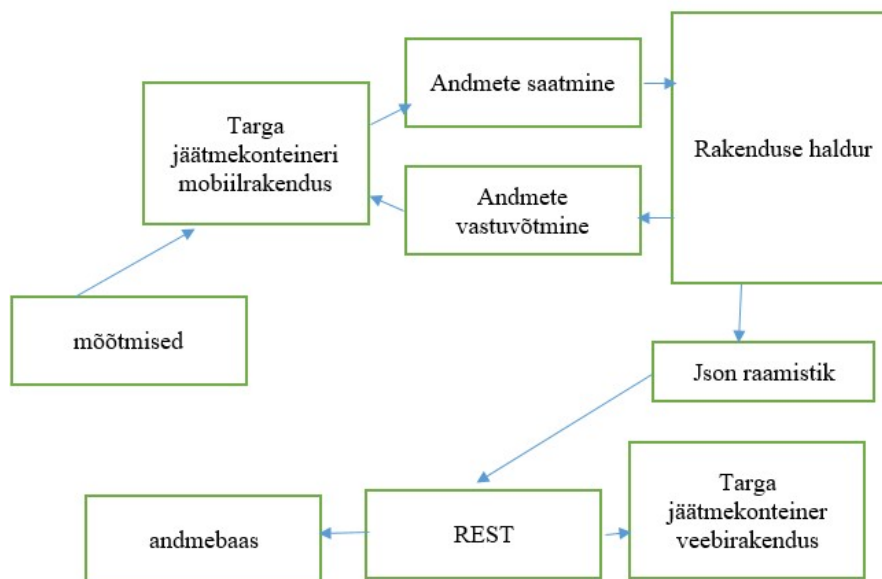
Tark jäätmekäitluse rakendus jaguneb kaheks osaks: kasutaja ja server. Kasutajal (kodanik, veojuht jne) on võimalik (vt Joonis 17):

- saada teateid konteinerite täituvuse kohta, et otsustada, millal prügi ära visata;
- saada teateid selle kohta, millal tuleb jäätmeauto, et saaks konteineri õigel ajal välja panna;
- teavitada, kui jäätmekonteiner on täis;
- boonuseid sorteerimise eest.



Joonis 17 Jäätmekäitluse rakenduse kasutaja osa

Serveril toimub andmete salvestamine, hoidmine, analüüs ja prognoosimine (vt Joonis 18).



Joonis 18 Jäätmekätluse rakenduse serveri osa

3.4 Riistvara valimine (arendusplatvorm ja protsessor)

NB-IoT arendamiseks on olemas erinevad platvormid. Neid on võimalik eristada konfiguratsiooni, modemi, tarkvaralise toe, energiatarbimise, hinna järgi. Turul on palju erinevaid arendusplatvorme, mis kasutavad samu modemikiipe. Vaatame kõige levinumaid modemikiipe *uBlox SARA-R4*, *Quectel BG96*, *Nordic Semiconductor nRF-9160*, *Sequans Monarch 2* ja nende baasil ehitatud arendusplatvorme.

3.4.1 *Ublox Sara –R4*

SARA-R4 on *NB-IoT*, *CAT-M1* ja *EGPRS* moodulite seeria, mille on välja töötanud *uBlox* erinevate *LTE* sagedusalade toetamiseks erinevate geograafiliste piirkondade jaoks. Modemi kiibid on 96 kontaktiga *LGA* pakendis füüsiliste mõõtmetega 16,0 mm x 26,0 mm x 2,5 mm, mis võimaldab riistvaradisaineritel neid erinevate kiibikomplektidega integreerida. Sellise integratsiooni näide on *Arduino MKR NB 1500*; kombineerides *Arm Cortex-M0* 32-bitine koos *uBlox SARA-R410M-02B* sidemodemiga. *Ublox* vajab integreerimist teise protsessoriga ja toob kaasa suurema voolutarbimise. Integreerimisel on võimalik kasutada täielikku dokumentatsiooni ja teeke, mis on kättesaadavad *Arduino.CC* veebiportaalis. *SARA-R4* seeria on loodud energiasäästu silmas pidades ja toetades *NB-IoT* energiasäästukonfiguratsioone, nagu *eDRX* ja *PSM*. Nende tüüpiline voolutarbimine *PSM*-režiimis on 8 μ A andmelehel ja *AIM* (*Active Idle Mode*) on 2 mA.

Turvalisuse tagamiseks võib pilveplatvormiga ühendamiseks lisada ka sertifikaadi. *Ublox Sara -R4* toetab erinevaid protokolle nagu *HTTP, MQTT, TCP/IP*. [44]

3.4.2 Quectel BG96

Quectel BG96 on laialdaselt kasutatav *LTE* moodul, mis toetab ka *NB-IoT, CAT-M1* ja *EGPRS*-iga. Ta on kompaktne (26,5 mm x 22,5 mm x 2,3 mm) ja LGA korpuses. *Quectel*-il on palju kogemusi mitmesuguste mobiilsete toodete ja nende riistvara ehitamisel, kasutusjuhendid ja rakenduste võimalused on väga hästi lahti kirjutatud. *BG96* on optimeeritud madalama energiatarbimise jaoks ja toetab *NB-IoT* energiasäästlikke konfiguratsioone - *eDRX* ja *PSM*. *PSM* režiimis tarbib ta ainult 10 μ A. *BG96* vajab ka teist mikroprotsessorit, mis suurendab energiatarbimist. *Quectel BG96* toetab protokolle *MQTT, HTTP(s), CoAP* ja teisi. Ka *Quectel BG96* sidemoodulile on tarvis lisaks rakendustarkvara mikrokontrollerit. [45]

3.4.3 Nordic Semiconductor nRF-9160

Nordic Semiconductor nRF-9160 toetab *NB-IoT/CAT-M1* võrke. See moodul sisaldab ka rakendustarkvara protsessorit *ARM Cortex-M33* [46] ja toetab efektiivset energiatarbimise reguleerimist. Modemi mõõtmed on võrreldes teiste modemitega *BG96* ja *uBlox* märkimisväärsed –ainult 10x16x1.04 mm (*LGA*). *Nordic Semiconductor nRF-9160* võib olla programmeeritud ning tagab *LTE* kommunikatsiooni.

Tootja pakub ka täieliku dokumentatsiooni koos realiseerimise näitega ning on olemas ka mõnede andurite teeke, mida saab kasutada oma projektide loomiseks. *NB-IOT PSM* režiimis tarbib ainult 2,7 μ A ja *Idle* režiimis tarbib 9 μ A.[46] On olemas arendusplatvormid nagu *Nordic Thingy:91* ja *nRF9160 DK*. Programmeerimiseks on olemas ka vastav tarkvara ja pilverakendus. *nRF 9160 SiP* suurim eelis on see, et see ei vaja rakendustarkvara jaoks välist kontrollit.

3.4.4 Sequans Monarch SiP

Sequans moodul toetab *NB- IoT* võrke. Kui protsessor ja modem on samas korpuses, tagab madala energiatarbimise *PSM 1* μ A. Korpuse mõõtmed on 8.8 x 10.8 x 0.95 mm. On olemas oma arendusplatvormid, üks nendest on *Nektar Evaluation Kit*, nagu teisedki toetab *AT* käske.[47] *Sequans Monarch SiP* pakub ka oma pilve kasutamist ja varustatud dokumentatsiooniga. *Sequans* toodetega puudub Tallinna Tehnikaülikoolil kogemus.

3.4.5 Arendusplatvormide võrdlus

Vaadeldud platvormide võrdlus on esitatud tabelis 4.

Tabel 4 Arendusplatvormide võrdlus

Kiibid	<i>Ublox Sara-4</i>	<i>QuectelBG 96</i>	<i>Nordic Semiconductor nRF-9160</i>	<i>Sequans Monarch Sip</i>
Välis kontrollid	jah	jah	ei	ei
PSM	8 μ A (modem + rakendusprotsessor)	10 μ A (ainult modem)	2,7 μ A (modem + rakendusprotsessor)	1 μ A (ainult modem)
Mõõtmed	16.0 mm x 26.0 mm x 2.4 mm	26.5 mm x 22.5 mm x 2.3 mm	10 mm x 16 mm x 1 mm	8.8 x 10.8 x 0.95 mm
Protokoll	<i>HTTP, MQTT</i>	<i>HTTP, MQTT</i>	<i>HTTP, MQTT</i>	<i>HTTP.MQTT</i>
Hind (1 tk) (mouser.com)	55,55 €	39,42€	24,56 €	15,96 €
Platvorm DK	<i>Arduino MKR NB 1500</i>	<i>BG 96</i>	<i>nRF 9160 DK Thingy:91</i>	<i>Nektar Evaluation Kit</i>
Platvormi hind	73,15€	210 \$ (umbes 201,77 €) (top-electronicsusa.com)	124 €	140,58 €

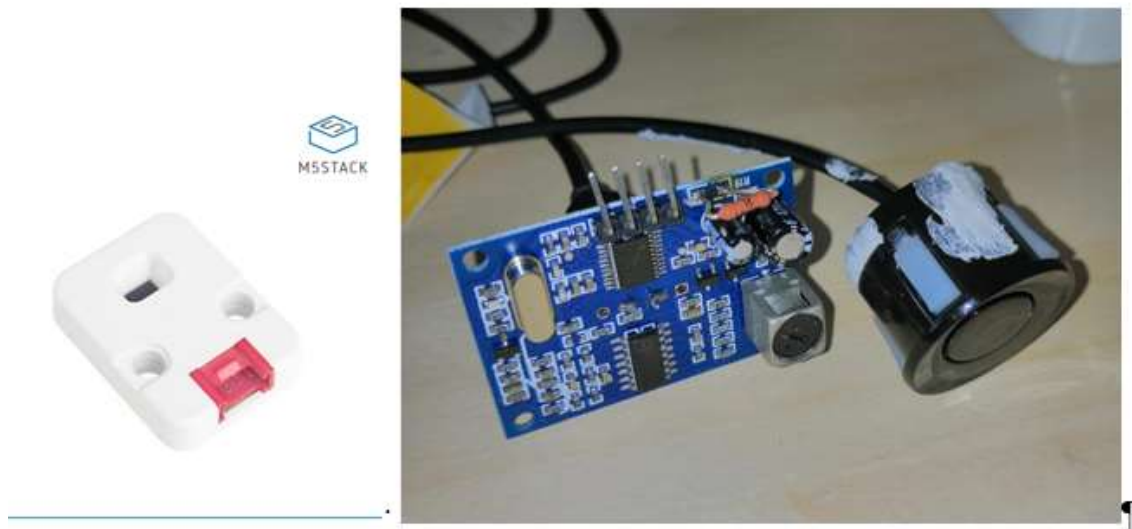
Kui võtta arvesse kõiki modemite parameetreid ja toetust, on parem valik *nRF9160*. Testimiseks on aga valitud *Arduino MKR 1500 uBlox* modemiga, kuna tarkvaraarendus *Arduino* keskkonnas on oluliselt lihtsam võrreldes *nRF 9160 Zephyr Segger* arenduskeskkonnaga.

3.5 Andurite testimine

Testimiseks olid valitud kaks andurit: *ToF* ultraheliandur *AJ-SR04M* ja valguse *ToF* (*Time of Flight*) *M5Stack VL53L0X* baseeruv moodul.

3.5.1 Andurite mõõtediapasooni ja -täpsuse määramine

Testimise eesmärk on määrata kindlaks anduri energiatarbimine mõõtmisel ja ajal, mil mõõtmist ei toimu. Kui süvamahuti prügikotti max sügavus kuni 2,3 meetrit, see tähendab seda, et *AJ-SR04M* sobib väga hästi, kuna tema kauguse mõõtmise ulatus on kuni 6 meetrini ja valguse *ToF*-il on kuni 2,1 m (vt Joonis 19).



Joonis 19 *ToF* valgusmõõtja *M5STACK* (vasakul) ja *AJ-SR04M* ultraheliandur (paremal) [48]

Testimiseks oli loodud katsestend, mis imiteerib prügikotti, mille kõrgus ja läbimõõt võivad muutuda (kõrgus kuni 2,6 m ja läbimõõt kuni 65 cm). Samuti on võimalik simuleerida erineva jäätmete tüüpi jaotus konteineris, kuna reaalses olukorras prügi ei ole jaotatud ühtlaselt (vt Joonis 20).



Joonis 20 Katsesend – süvamahuti kott

Andurid on kinnitatud metallkonstruktsioonil täpselt keskel (vt Joonis 21).



Joonis 21 Anduri pagaldamise koht

Anduri kaugusmõõtmiste tulemuste kvaliteedi hindamiseks testiti prototüüpi laborikeskkonnas erineval kaugusel põhjast ja registreeriti mõõtmisandmed. Neid anduri mõõtmisi võrreldi mõõdulindilt võetud tegelike kauguse mõõtmistega ja arvutati viga. Keskmine, standardhälve ja standardviga arvutati iga kauguse kohta. Testimiseks kasutati *Arduino Uno* arendusplatvormi, kus pin 5 ja pin 6 olid kasutatud trigeriks (signaali saatmiseks) ja *Echo*-ks (signaali vastuvõtmiseks), st impulsiaja mõõtmiseks, et pärast seda kasutada kauguse arvutamisel. Valguse *ToF* ja ultraheliandur saavad töötada pingega 3,3 V. Mõõtmiseks loodi kood *Arduino IDE* tarkvaraga.

Absoluutse vea leidmiseks kasutame valemit (2):

$$\text{Absoluutne viga} = \text{Tõeline väärtus} - \text{Mõõdetud väärtus} \quad (2)$$

Keskmise arvutuseks kasutame valemit (3)

$$\text{Keskmine} = \frac{\text{Mõõdetud väärtuste summa}}{\text{Mõõtmiste arv}} \quad (3)$$

Standarthälbe arvutamiseks kasutame valemit (4):

$$\text{Standarthälve} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - x_{\text{keskmine}})^2}}{\sqrt{N}}, \text{ kus} \quad (4)$$

X_i – on mõõdetud väärtus,

X_{keskmine} on kogu mõõdetud väärtuste keskmine,

N - mõõtmiste arv

Standardvea arvutamiseks kasutame valemit (5)

$$\text{Standardviga} = \frac{\text{Standarthälve}}{\sqrt{N}}, \text{ kus} \quad (5)$$

N on mõõtmiste arv

Mõõtmiseks olid valitud 50 cm, 100 cm, 140 cm, 200 cm kaugused.

Mõõtmiste tulemused, kui demokonteiner on täidetud eri liiki jäätmetega (paber, plastmass, kilekotid, pudelid, pakendid), on välja toodud tabelis 5.

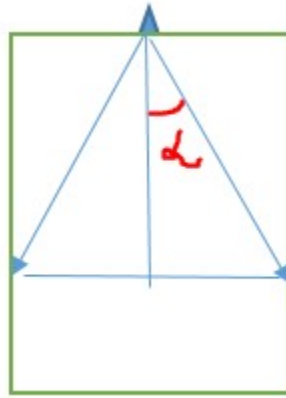
Tabel 5 Ultraheli ja *ToF* valguse anduri mõõtmiste tulemused

Kaugus, cm	50	100	140	200
Ultrasonic AJ-SR04M				
Keskmine, cm	49,4	101,1	139,43	200,46
Standarthälve, cm	1,101723	1,604949	1,695498	2,129163
Standardviga, cm	0,201146	0,293022	0,309554	0,38873
Valgus ToF				
Keskmine, cm	49,7	100,53	142,41	201,4
Standarthälve, cm	1,178836	1,795268	2,228344	2,415467
Standardviga, cm	0,215225	0,32776966	0,413793	0,441002

Kui vaadata mõõtmistulemusi, näeme ka standardhälbe suurenemist, mis tähendab, et mõõtmiste erinevus suureneb, kui kaugus suureneb. Kui *AJ-SR04* moodul suudab töötada ka madalamal pingel 3,3 V, siis olid katsed tehtud ka pingega, kuid see ei toonud kaasa suurt mõju.

3.5.2 Andurite töönurga määramine

Kui andurite tööruum on piiratud konteinerite diameetriga, mis varieerub 65 cm kuni 1,50 meetrini (*Molok*-i konteinerid), siis on väga oluline teada ka nurgatundlikkuse piirkonda. Dokumentatsioonis *AJ-SR04* on öeldud, et ultraheli levimisnurk on alla 55° . Kasutades sama katsestendi, oli see kaugus määratud, kui signaal peegeldub koti seinalt (vt Joonis 22).



Joonis 22 Tundlikkuse nurga määramine

Kui eksperimentaalse stendi diameeter on 110 cm, siis saime teada, et peegeldumine toimub juba kaugusel 183 cm seinalt. Nurga mõõtmiseks kasutame järgmist valemit (6):

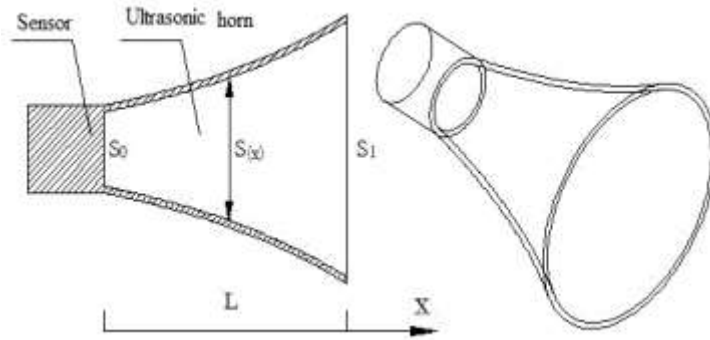
$$Nurk = 2 * \sin^{-1} \frac{\text{prügikoti raadius}}{\text{kaugus andurist seinani}} \quad (6)$$

Tulemisena saadi teada, et tundlikkuse nurk on 35° . See võib põhjustada probleemi konteineriga, kus prügikoti läbimõõt on vaid 65 cm. Antud anduriga ei ole võimalik mõõta kaugust (vt Joonis 23).



Joonis 23 Prügikoti vaade jäätmekonteineris

Üks lahendus võiks olla ühepunktilise laseranduri kasutamine või toru modelleerimine, et vähendada ultrahelianduri töönurka (vt Joonis 24)[49].

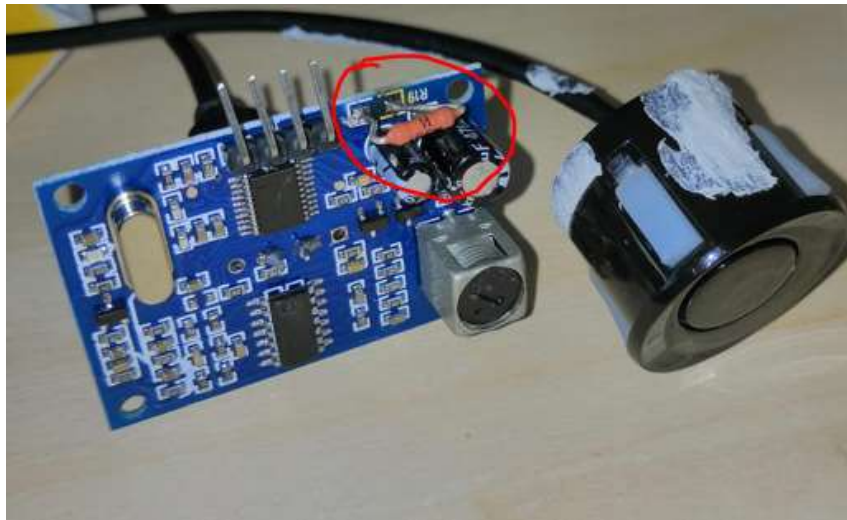


Joonis 24 Akustiline toru [49]

ToF M5 (VL53L0X) jaoks on saadud sama tingimustes nurga väärtus 28° .

3.5.3 Andurite energiatarbe mõõtmine

IoT süsteemide energiatarbimine on väga oluline, sest süsteem peab olema energiasäästlik ja iga komponent (andur, protsessor, modem) peab selle tagama. Töö käigus mõõdeti *ToF*-i valgusanduri ja *ToF*-i ultrahelianduri *AJ-SR04M* energiatarbimine. Kui *AJ-SR04M* toetab nelja töörežiimi, siis üks neist toetab madalamat energiatarbimist. Tavalises töörežiimis tarbib andur voolu 2mA, energiasäästurežiimis ainult 40 μ A. Selleks, et ta saaks töötada säästurežiimil, tuleb kasutada lisatakistust nimiväärtusega 360 k Ω (vt Joonis 25).



Joonis 25 AJ-SR04 koos 360 k Ω

Mõõtmised näitasid, et andur selles režiimis tarbib keskmiselt 40 μ A (ooterežiim) ja vastuvõtmisel (mõõtmisel) max kuni 100 μ A. Selles režiimis peab triger olema avatud 2 ms, võrreldes tavalise režiimiga, kus impulsi genereerimiseks on vaja 20 μ s. Tavalises režiimis (ooterežiimis) ta tarbib keskmiselt 1,5 mA ja mõõtmisel 6,5 mA. Keskmine

energiatarbimine säästurežiimis on 0,38 nAh (möödab keskmisel kaugusel 2,5 meetrit 14 ms). Kui ma eeldan, et mul on aku 2500 mAh ja ma kasutan andurit pidevalt (arvestan ainult anduri voolutarvet), saab aku töötada umbes 7,1 aastat. Kui tavalises režiimis tarbitakse 1,5 mA, siis aku tööaeg on ainult 2,4 kuud.

Tallinna Tehnikaülikoolis ETAG PRG667 projekti raames määrati *Nordic Semiconductor* modeemi voolutarvet. Üks mõõtmine võtab 18 s ja voolutarve on 14,5 mA. Uinavas olekus ta tarbib ainult 0.006 mA. Kui eeldame, et aku on 2400 mAh, ja mõõtmine toimub üks kord minutis, siis keskmine voolutarve on 4,35 mA ning aku töötab 23 päeva. Kui mõõdame 1 kord tunnis, siis keskmine voolutarve on 0,078 mA ja aku saab töötada 3,7 aastat. Mõõtmiste sagedus mõjutab voolutarvet. Lisaks tuleb uurida väliskeskkonna mõju akule, modemi ja anduri tööle.

Tof M5 (VL53L0X) valguse andur tarbib tavarežiimis keskmiselt 6 mA ja mõõtmisel 18 mA, vajalik mõõtmise aeg on 33 ms [48]. See tähendab et maksimaalne energiatarbimine mõõtmisel on 2,97 nAh.

Keskmine voolutarbimist mingi perioodi jooksul on võimalik arvutada valemi (7) järgi:

$$\text{keskmine voolutarve} = \frac{(I_{ootel} * t_{ootel}) + (I_{mõõtmisel} * t_{mõõtmisel})}{t_{ootel} + t_{mõõtmisel}} \quad (7),$$

kus

I_{ootel} –voolutugevus ooterežiimis,

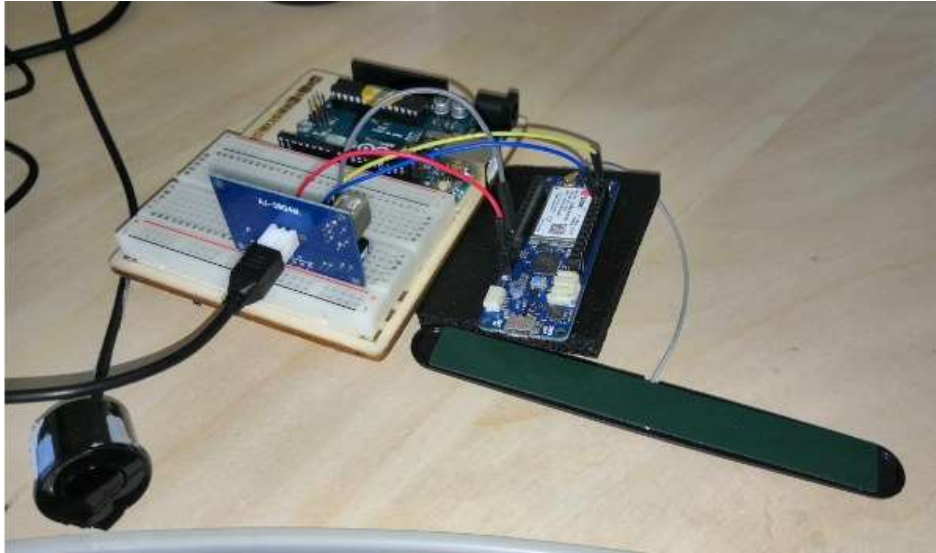
$I_{mõõtmisel}$ - voolutugevus mõõtmisel,

t_{ootel} –aeg ooterežiimis,

$t_{mõõtmisel}$ – mõõtmise aeg.

3.6 Andmete edastamise testimine

Andmete edastamise testimiseks oli koostatud süsteem (vt Joonis 26).



Joonis 26 *Arduino MKR NB 1500* koos antenniga ja anduriga.

Süsteemi platvormiks oli valitud *Arduino MKR NB 1500* koos *uBlox* kiibiga, mis toetab *LTE Cat1* ja *NB1* võrku, ja antenniga. Mobiilvõrgu pakkuja on Telia. Andurid võivad olla kas ultraheliandurid või *ToF* valguseandurid. See ei ole kõige energiasäästlikum kiip, kuid sobib prototüüpimiseks, kuna autoril on kogemusi *Arduino* platvormide kasutamise ja programmeerimisega. Ta toetab *MQTT* ja *HTTP* protokolle, mis on vajalikud pilvega ühenduse loomiseks. Lisaks on olemas dokumentatsioon platvormi ühendamiseks erinevate pilvelahendustega, näiteks *AWS*, *Azure IoT*, *Thingiverse* ja teised.

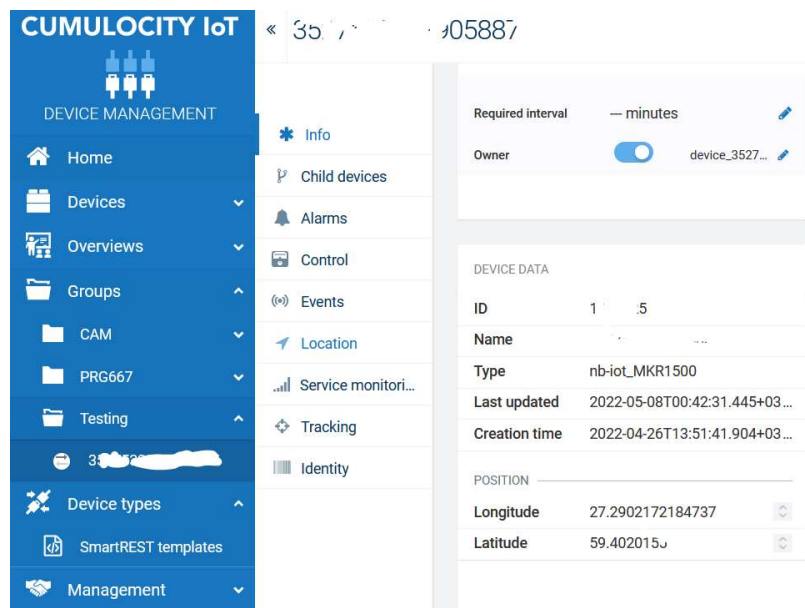
IoT platvormiks valiti *Cumulocity IoT*, kuna TalTech-il on admisteerimisõigused, mis lihtsustab seadistamist. Ja olemas kõik vajalikud komponendid, nagu dünaamiline *Dashboard*, kaart, kogu teave ühendatud seadmete kohta, sõnumite ajalugu. On olemas andmete salvestamine ja *API* (*Json* formaat) kasutamine.

Pilvega liitumiseks on vaja registreerida oma seade. Seadmete ühendamiseks kasutatakse *MQTT* protokolle. *Cumulocity IoT* toetab *MQTT*-d nii *TCP* kui ka *WebSockets* kaudu. Testimiseks valiti *TCP* ilma *SSL* pordita 1883. Suhtlemine *MQTT*-d kasutava *Cumulocity IoT*-ga toetab autentimist kahel viisil:

- Kasutajanimi ja parool. *MQTT* kasutajanimi peab sisaldama kasutaja *ID*-d ja kasutajanime vormingus `<kasutaja ID/kasutajanimi>`;
- Seadme sertifikaadid. Seadmed peavad sisaldama kogu sertifikaatide ahelat, mis viib usaldusväärse juursertifikaadini. Samuti peavad nad oma usaldussalves sisaldama serveri sertifikaati.

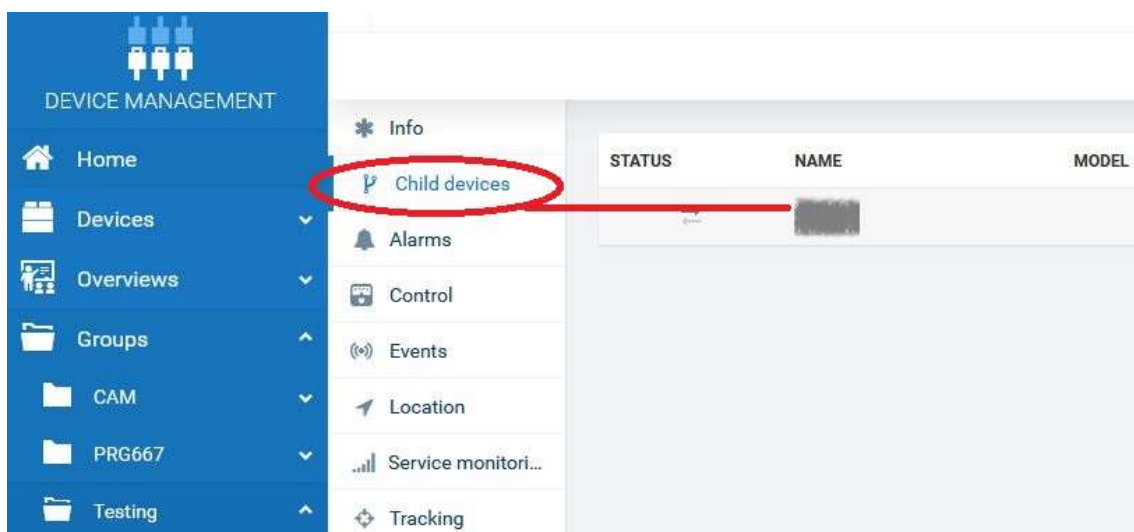
Valitud on esimene variant, mis lihtsustab ühendust ja registreerimist.

MQTT seansid on lingitud ühe seadmega, kuid sellel seadmel võib selle all olla vabalt konfigureeritav seadmete hierarhia (vt Joonis 27).



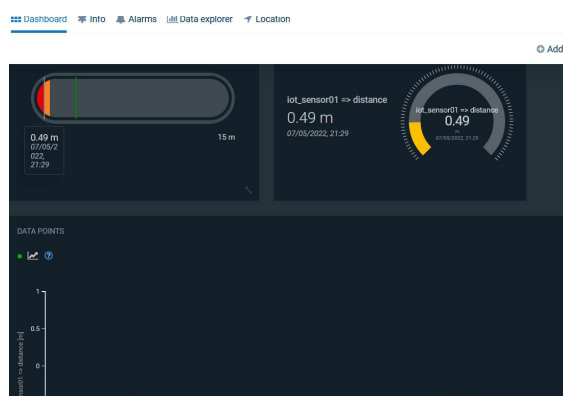
Joonis 27 CUMULOCITY registreeritud seadme vaade

Kõik allpool hierarhias asuvad seadmed (*CHILD*) vajavad seadme loomisel määratletud unikaalset *ID*-d. Soovitakse juureseadme kordumatut *ID*-d ja hierarhias ainulaadset *ID*-d. Juureseadme asemel iga järgmise all oleva seadmete andmete loomiseks lisatakse teemasse teise jaotisena all oleva seadme kordumatu *ID* (nt *s/us/myChildDeviceIdentifier*). Klient saab automaatselt toimingud iga hierarhias oleva all oleva seadme kohta, tellides vastav teema. Iga seadme jaoks ei ole vaja tellida. Iga vastuvõetud toiming sisaldab malli *ID*-d, millele järgneb seadme/all seadme *ID*, mille jaoks toiming loodi (millele järgnevad muud toiminguparameetrid) (vt Joonis 28).



Joonis 28 CUMULOCITY alam seadme (CHILD) vaade

Kui andmed lähevad juba pilve, on võimalik kindlaks määrata, millised andmed on visualiseeritavad, kasutades dünaamilist *Dashboard*-süsteemi, mille struktuuri haldab kasutaja (vt Joonis 29).



Joonis 29 CUMULOCITY Dashboard

Andmeid on võimalik jälgida reaalajas või võtta ajaloolisi andmeid (vt Joonis 30).



Joonis 30 CUMULOCITY reaalajas andmete visualiseerimine.

3.7 Testimise kokkuvõte

Testimise tulemused näitavad, et ultraheliandur *AJ-SR04* sobib jäätmete taseme mõõtmiseks, aga ainult konteinerite, mille raadius on suurem kui 110 cm. Mõõtmise täpsus väheneb kaugusega. Vastasel juhul ultrahelilaine peegeldub seinast. Selle anduri tundlikkuse nurk on 35° . Ultraheliandur toetab erinevaid režiime, sealhulgas energiasäästlikku režiimi. Selles režiimis anduri voolutarve on $40 \mu\text{A}$ ja mõõtmise puhul $100 \mu\text{A}$, mis sobib energiasäästlikuks lahenduseks. *ToF M5 (VL53L0X)* valgusanduri voolutarve on märkimisväärselt suurem. Mõõtmisel on voolutarve 18 mA ja ooterežiimis 6 mA . Tundlikkuse nurk on 28° ja maksimaalne kaugus, mida ta saab mõõta on 2 meetrit. See ei sobi ka väga hästi meie planeeritavaks lahenduseks. *Nordic Semiconductor nRF9160* seadme voolutarve 18 s mõõtmis- ja mobiilside tsükli jooksul on ainult $14,5 \text{ mA}$. Kui andur mõõdab 1 kord tunnis, saab ta töötada 3,7 aastat 2500 mAh aku puhul.

Loodud ühendus *Cumulocity* pilveplatvormiga oli stabiilne ja andmed olid edastatud *MQTT* protokolliga kaudu ja visualiseeritud.

4 Majanduslik põhjendus

Uue toote ja teenuse arendamisega tekib alati küsimusi selle kohta, miks see süsteem on vajalik, kellele on vaja, kas on juba olemas kommertslahendused ja millist lisandväärtust see toob. Nendele küsimustele vastamiseks on vaja jagada huvigrupid kaheks: arendajad ja lõppkasutajad, mis omakorda jagunevad kolmeks: jäätmeveoteenuse osutajad, linna- ja vallaavalitsused, kodanikud.

Vaadates praegusi kommertslahendusi, nagu eespool nimetatud *Senseno* ja *Nordsense*, võime leida nende lisaväärtusi.

Senseno on Slovakkia ettevõtte, mis pakub jäätmekäitluse täislahendust ja mille arendustulemused on järgmised:

- 1) on välja arendatud ultraheliandur, mida saab kasutada *Sigfox*, *LoRaWAN*, *NB-IoT*, vahetavad patareid, sisseehitatud temperatuuriandur. Seadistamine toimub *Bluetooth*-i kaudu;
- 2) on välja töötatud oma pilveplatvorm, mis võimaldab koguda ja analüüsida kõiki andmeid;
- 3) on olemas mobiilne rakendus jäätmeveoteenuste pakkujatele koos marsruudi optimeerimisega;
- 4) on olemas eraldi portaal kohalikele omavalitsustele ja kodanikele, kust nad saavad leida kogu vajaliku teabe jäätmekonteinerite kohta, näiteks kui palju jäätmeid nad toodavad jne;
- 5) on võimalik valida vajalik teenus;
- 6) on võimalik kasutada andmeid ka oma rakenduses.

Võrreldes *Senseneo*'ga *Nordsense* on rohkem suunatud ettevõtetele, kes tegelevad jäätmeveoga. Nad samuti pakuvad oma pilveplatvormi, mis on välja töötatud *Azure IoT* pilveplatvormi baasil. Nende lisaväärtus on uus *3D ToF* laserandur, millisel ei ole pimepiirkonda ja saab joonistada prügi jaotuse *3D* pildi.

Olemasolevate süsteemide puudused on see, et need on suletud, mis toob kaasa võimetuse juurutada sellesse süsteemi oma arendusi, toob kaasa täieliku sõltuvuse ettevõtte hinnapoliitikast. See võib suurendada selle lahenduse kasutamise kulusid. Teenusepakkuja turult lahkumise korral on suur risk kaotada investeeringud (füüsiliste seadmete kasutamise võimatus). Avatud süsteemi loomine universaalsete seadmetega minimeerib antud riske ning võimaldab erinevatel uurimisrühmadel katsetada oma lahendusi ja kiirendab süsteemi enda arengut.

Eestis on see teema praegu arengufaasis, Tallinna Tehnikaülikoolis hetkel tegeletakse riist- ja tarkvara arendamisega.

4.1 *IoT* süsteemi arenduse kasulikkus

Arendusprotsessis on alati vaja vastata küsimusele, milline on lisaväärtus lõppkasutajatele: jäätmeveoteenuse osutajatele, kohalikule omavalitsusele ja kodanikule.

Jäätmeveoteenuse osutajale pakub jäätmekäitluse *IoT* süsteem järgmist kasu:

- 1) graafiku järgi jäätmeveoteenusest loobumine ja tühisõitude vähendamine;
- 2) kütusekulu vähendamine;
- 3) sorteeritud jäätmete mahu suurendamine (inimesed üle täidetud konteineri puhul ei viska sorteeritud jäätmed mittedobiliku konteinerisse);
- 4) personalikulu vähendamine;
- 5) sorteeritud jäätmetest saadud tulu suurendamine;
- 6) optimeeritud marsruut, mis vähendab jäätmete kogumise aega ja läbitud teed;
- 7) olemasoleva jäätmeveoteenuste hinna- ja ärimudeli muutmine;
- 8) andmete põhjal (sorteeritud ja mitte sorteeritud jäätmete maht) eeldatava tulu ennustamine;
- 9) vajalike jäätmeveokite arvu prognoosimine.

Linna- ja vallavalitsusele pakub see süsteem järgmist kasu:

- 1) esteetiline välimus ja korrasolek;
- 2) infrastruktuuri arendamine andmete alusel (prügikonteinerite arv, maht, koht);
- 3) tühjendussõitude vähendamine parandab ohutust õuedes;
- 4) sorteeritud jäätmete mahu suurendamine ja jäätmeveo teenuse kulu vähendamine;
- 5) CO₂ ja teiste gaaside vähendamine;
- 6) teede lumest puhastamine planeerimine;
- 7) üldine ülevaade jäätmetasemest prügikonteinerites, kogutud jäätmete mahust;
- 8) informatsioon kahjustatud või ületäidetud konteineri kohta.

Kodanikule (korterühistule) pakub see süsteem järgmist kasu:

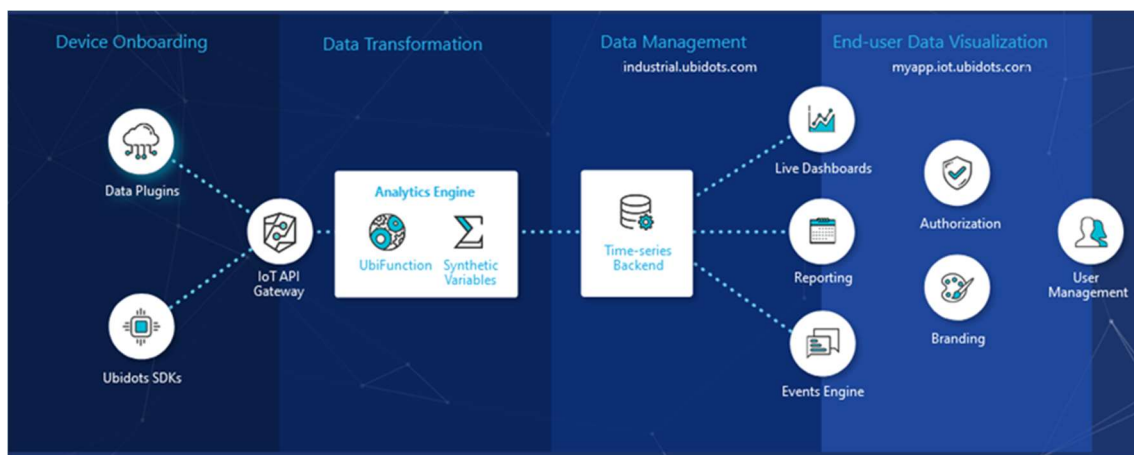
- 1) informatsioon jäätmekonteineri täituvuse kohta;
- 2) jäätmeveo teenuse kulu vähendamine (vedu ainult täitumise korral);
- 3) ei ole jäätmekonteinerite ületäituvust;
- 4) jäätmete sorteerimise motivatsiooni suurendamine;
- 5) ebameeldivate lõhnade tekkimise vähendamine;
- 6) üldine informatsioon jäätmete mahust.

4.2 *IoT* süsteemi arendamise planeeritud tegevused ja eeldatav maksumus

IoT süsteemi arendamise planeerimisel on vaja hinnata kasutatava tarkvara ja riistvara maksumust. See mõjutab lõppkasutajate teenuste hinda ja peab olema konkurentsivõimeline. Võttes arvesse süsteemi nõudeid, nagu seadmete arv, kasutatav protokoll, sõnumite lugemise arv päevas või tunnis, vajalikud lisarakendused, andmebaasi vajadus ja ruumi maht, integreerimise võimalus (*API* kaudu),

visualiseerimise pakett, arvutusvõimsus, masinõppe kasutamine prognoosimiseks või ennustamiseks, on võimalik arvutada eeldatava pilveteenuse maksumuse. *Azure* ja *AWS* pakuvad oma kalkulaatorit, kus kasutaja saab valida süsteemi jaoks erinevaid vajalikke komponente. Teised, nagu *Ubidots*, *Thingier.io*, pakuvad erinevaid pakette, mille igakuine hind sõltub seadmete arvust ja kasutatavast teenusest.

Ubidots pilvandmetöötuse pakett koosneb neljast põhikomponendist: seadmed (*API*, *SDK*), arvutused, andmehoidla ja andmete visualiseerimine (vt Joonis 31). Arvestades kavandatud süsteemi (Kohtla-Järve linna jaoks) seadmete arvu (rohkem kui 300), paketi hind on 499 \$/kuus (umbes 472,9 €)[25]



Joonis 31 *Ubidots* pilvteenused [25]

Thingier.io pakettide hind sõltub ka teenuste ja seadmete arvust ning arvutuste võimsusest. Sama *IoT* projekti jaoks sobib kõige parem pakett hinnaga 299\$/kuus (umbes 283,3 €) [24]

AWS (*Amazon Web Services*) kasutab kalkulaatorit teenuse lõpphinna arvutamiseks. Tellija sisestab seadmete arvu, soovitud andmete salvestamise mahu, päringu arvu, kasutaja arvu, visualiseerimise uuendamise arvu. See tähendab, et arendaja maksab ainult kasutatud ressursside ja nende kasutamise aja eest. Kui võtame kõik ressursid, mis on seotud sõnumite saatmisega (umbes 700 sõnumit kuus ja ühendus 24 tundi päevas) ja seadmete ühendusega (300 seadet), siis tasu suurus on vaid 12\$ kuus (umbes 11,4 €). Kui me soovime lisada analüütika koos andmehoidlaga, siis eelmisele summale lisandub 3,5 \$ (umbes 3,3 €) kuus.

Azure samuti pakub kalkulaatorit *IoT* teenuste hindade arvutamiseks. Andmebaasi kasutus 138 \$ (umbes 130,8 €), *API* haldamine 48 \$ (umbes 45,5 €), analüütika 80 \$ (umbes 75,8 €) ja piirimatute seadmete arv on 10 \$ (umbes 9,5 €), kokku saame 276\$/kuus (umbes 261,5 €).

Kokkuvõtteks, kommertslahenduse arendamisel mängib pilveplatvormi valimine olulist rolli, sest see mõjutab arendusele vajavat aega ja vajalike kompetentside kaasamist. Kui on vaja kiiret lahendust ja piiratud aja jooksul, siis soovitaksin kasutada selliseid pilvandmetöötlaste teenuse pakkujaid nagu *Ubidots* või *Thingier.io*, kuid sellisel juhul ei ole võimalik oma kulusid reguleerida. *AWS* ja *Azure* on paindlikumad süsteemid ning see on väga oluline aspekt ärimudeli loomisel, eriti kulude planeerimisel süsteemi laiendamiseks. Pilveplatvormide teenuse maksumus on toodud tabelis 6.

Tabel 6 Pilveplatvormide teenuse maksumus

Pilveplatvormi nimetus	<i>AWS</i>	<i>Ubidots</i>	<i>Azur</i>	<i>Thingier.io</i>
Tasumine	Tasumine kasutatud aja eest	Kuutasu	Tasumine kasutatud aja eest	Kuutasu
Kasutatavad ressursid	300 seadet 700 sõnumit päevas seadme kohta /24 h. Andmebaas Analüütika koos andmehoidlaga	Max 1000 seadet Andmebaas <i>API</i> Visualiseerimine	<i>API</i> Andmebaas Analüütika Piiratud seadmete arv Visualiseerimine	Piiratud seadmete arv Visualiseerimine Andmebaas <i>Data Buckets</i> Ja teised võimalused
Paketi maksumus	170,6 €	472,9 €	261,5 €	283,3 €

Kui me räägime seadmetest (andur, arendusplatvorm), siis olulisemad kriteeriumid nende valimisel on energiasäästlikus (saab töötada autonoomselt vähemalt 1 aasta), mõõtmise täpsus, mõõtmiseks sobilikus, raadioside kasutuse võimalus. Turul on praegu palju lahendusi, mille hind on alates 100 €. Eespool nimetatud *Nordsense* pakub oma andurit 150 € eest, mis on eelseadistatud nende pilveplatvormile ja kiirendab kasutuselevõttu. Oma *IoT* seadmete arendus on vajalik, kui teised lahendused ei vasta nõuetele, näiteks

madal energiasäästlikus või suur anduri ebatäpsus. Seadmete arendusprotsess vajab aega ja pädevust, mis on võimalik leida koostöös ülikoolidega. Esialgsed investeeringud on suured, kuid lõpptulemusena peab seadme hind olema konkurentsivõimeline ja lõppkasutajatele (nt kodanikule) vastuvõetav. Mobiiloperaatori *NB-IoT* teenustasu on alates 1.49 €/kuus (*Elisa* pakkumine ärikliendile). Algne maksumus on toodud tabelis 6.

Oma *IoT* avatud süsteemi loomise otstarbekuse võrdlemiseks ja kinnitamiseks küsiti erinevatelt rahvusvahelistelt ettevõtetelt hinnapakumisi, kes pakuvad *IoT* täislahendusi nutika jäätmekäitluse korraldamiseks. Lisaks eelpool mainitud ettevõtetele Senseneo ja *Nordsense* laekusid hinnapakumised ka Horvaatia ettevõttelt *EcoMobile* ja Hiina ettevõttelt *CNDINGTEK*. Kõik ettevõtted on esitanud hinnapakumise andurite ja nende hoolduse orienteeruva maksumuse kohta (vt Tabel 7).

Tabel 7 Rahvusvaheliste ettevõtete andurite hinnad ja teenustasud

Ettevõtte nimetus	Riik	Anduritiip	X10, €	X100, €	X1000, €	Teenustasu (1 andur), €
Senseneo	Slovakkia	Ultraheli	1 090	9 900	79 000	7
Nordsense	Taani	Laser	1 500	11 500	100 000	8
EcoMobile	Horvaatia	Ultraheli	1 700	16 000	140 000	10,50
CNDINGTEK	Hiina	Ultraheli	700	7 000	70 000	5

Kahjuks ei suutnud kõik ettevõtted pakkuda hinda kõigi kaasnevate teenuste kohta, kuid *EcoMobile*'i näitel võib hinnata selliste lahenduste ligikaudset maksumust. 1000 anduri tarkvara ja selle paigaldamine maksab 6700 eurot ja lisandub kuutasu 185 eurot. 300 anduri puhul maksab ainult hooldus $300 \cdot 10,50 + 185 = 3335$ €. Kõrge hind aga seab kahtluse alla sellise süsteemi kasutamise väikestes omavalitsustes.

Kokkuvõtteks võib märkida, et vajadus selliste *IoT* süsteemide järele on olemas. Esialgsed investeeringud võivad olla suured (seadmete arendamine, pilveplatvormi seadistamine, mobiil- ja veebirakenduse arendamine, marsruudi optimeerimise algoritmi rakendamine), kuid pikemas perspektiivis tasub see süsteem end ära ja toob igale huvigrupile kasumit ja/või kasu:

- 1) Mobiiloperaatoril on uued kliendid;

- 2) Kohalikud omavalitsusel on infrastruktuuri arendamiseks vajalikud andmed, väiksemad jäätmekäitluse kulud;
- 3) Jäätmeveo teenuse osutajatel on optimeeritud marsruut, suurem sorteeritud jäätmete maht ja sellest saadud tulu, väiksemad kütuse- ja tööjõukulud;
- 4) Kodanikel on puhas elukeskkond, väiksemad jäätmekäitluskulud, jäätmekonteinerite ületäituvuse puudumine.

5 Kokkuvõte ja edasiarengud

Käesolev töö käsitleb madala toitega *NB-IoT* sidetehnoloogial põhineva maa-aluse jäätmemahuti jälgimissüsteemi projekteerimise ja arendamise erinevaid aspekte.

Töös on välja pakutud kontseptuaalne *IoT* süsteemi mudel, kus kõik huvirühmad (kohalikud omavalitsused, kodanikud, jäätmeveoteenuse osutajad) on esindatud ja saavad kasutada kogu teavet jäätmekäitluse kohta. Praeguste *IoT* tehnoloogiate kohta on tehtud ülevaade ja võrdlusanalüüs: pilveteenus, raadioside, arendusplatvormid. Testitud ultraheli- ja valgusanduri mõõtmise täpsus, tundlikkuse nurk ja energiatarve. Loodud prototüüp on ühendatud *Cumulocity* pilveplatvormiga kaugusmõõtmise andmete edastamiseks ja visualiseerimiseks. *IoT* projekti majanduslik põhjendus on välja toodud.

Käesolevas töös on välja pakutud meetodid, mis põhinevad asjade interneti tehnoloogial, mitte ainult jäätmekäitlussüsteemi täiustamiseks, vaid ka kasumliku ärimudeli pakkumiseks jäätmeveoteenuse osutajatele.

Edasiseks arenguks on võimalik kindlaks määrata järgmised suunad:

- 1) optimeerimise algoritmide kasutamine marsruudi planeerimisel;
- 2) prognoositava analüüsi kasutamine jäätmetekke prognoosimiseks sõltuvalt erinevatest teguritest, nagu kodanike vanus, elutingimused, ilmateade, elanikkond jne;
- 3) masinõppe algoritmide kasutamine sorteerimise optimeerimiseks.

Kasutatud kirjandus

- [1] Fan Wu, Taiyang Wu, and Mehmed Rasit Yuce, “Design and Implementation of a wearable sensor network system for IoT-connected safety and Health Application, 2019
- [2] Alex Vakaloudis and Christian O’Leary, “A framework for rapid integration of IoT Systems with industrial environments, 2019
- [3] Preety Yadav and Sandeep Vishwakarma, “Application of Things and Big Data towards a Smart City”, 2018
- [4] What is IoT Architecture? [WWW]. Saadaval: <https://www.mongodb.com/cloud-explained/iot-architecture>)
- [5] Wael Ayoub, Abed Ellatif Samhat, Fabienne Nouvel, Mohamad Mroue, and Jean-Christophe Prevotet. Internet of mobile things: Overview of 4G-LTE, 5G, and NB-IoT in LPWAN standards and supported mobility. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018.
- [6] Complete Guide for Ultrasonic Sensor HC-SR04 with Arduino [WWW]. Saadaval: <https://randomnerdtutorials.com/complete-guide-for-ultrasonic-sensor-hc-sr04/>
- [7] Long-Range Ultrasonic Time-of-Flight Range Sensor [WWW]. Saadaval: <https://3cfeqx1hf82y3xcoull08ihx-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2022/04/DS-000379-CH201-v1.2.pdf>
- [8] Khandaker Foysal Haque, Rifat Zabin , Kumar Yelamarthi , Prasanth Yanambaka , Ahmed Abdelgawad. „An IoT Based Efficient Waste Collection System with Smart Bins „, 2020 IEEE 6th World Forum on Internet of Things (WF-IoT) , 2020.
- [9] JSN-SR04T-Datasheet.pdf (makerguides.com) [WWW]. Saadaval: <https://www.makerguides.com/wp-content/uploads/2019/02/JSN-SR04T-Datasheet.pdf>
- [10] A1 Radar Sensor [WWW]. Saadaval: <https://www.acconeer.com/products/>
- [11] Aloys Augustin, Jiazi Yi, Thomas Clausen, and William Mark Townsley. “ A study of lora: Long range & low power networks for the internet of things. Sensors, 16(9):1466, 2016.
- [12] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer, ‘A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment’, ICT Express, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.icte.2017.12.005.
- [13] Sarath Chandu Gaddam and Mritunjay Kumar Rai. A comparative study on various lpwan and cellular communication technologies for iot based smart applications. In 2018 International Conference on Emerging Trends and Innovations In Engineering And Technological Research (ICETIETR), pages 1–8. IEEE, 2018
- [14] G. T. 37.824, “3rd generation partnership project; technical specification group radio access network; nr and e-utra; coexistence between nb-iot and nr,” 2020.
- [15] GSMA, “Mobile iot in the 5g future,” 2018.
- [16] T. Durand, L. Visagie, and M. T. Booysen, “Evaluation of next generation low-power communication technology to replace gsm in iot applications,” IET Communications, p. 1, 07 2019

- [17] Rubbens Boisguene, Sheng-Chia Tseng, Chih-Wei Huang, and Phone Lin. A survey on nb-iot downlink scheduling: Issues and potential solutions. In 2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), pages 547–551. IEEE, 2017
- [18] Bruno Ferreira, Bruno Gaspar, Sofia Paiva, Antonio Santos, Jorge Cabral . Coverage and Deployment Analysis of NB-IoT Technology under Various Environment Scenarios. 2020 2nd International Conference on Societal Automation IEEE,2021
- [19] Sigfox leviala kaart.[WWW]. Saadaval: <https://www.sigfox.com/en/coverage>
- [20] Microsoft, Amazon & Huawei Lead the Overall IoT Platform Landscape in Completeness; ClearBlade & FogHorn Emerge as Leading Edge-Focused IoT Platforms [WWW]. Saadaval: <https://www.counterpointresearch.com/microsoft-amazon-clearblade-foghorn-emerge-leading-edge-focused-iot-platforms/>
- [21] Amazon Web Services (AWS) [WWW]. Saadaval: <https://aws.amazon.com>
- [22] Azure IoT Hub[WWW].Saadaval: <https://azure.microsoft.com/en-us/services/iot-hub/#overview>
- [23] Cumulocity IoT. [WWW]. Saadaval: <https://cumulocity.com/guides/concepts/introduction/>
- [24] Thinger.io [WWW]: Saadaval: <https://docs.thinger.io>
- [25] Ubidots [WWW]. Saadaval: <https://ubidots.com>
- [26] Dragino ultraheliandur [WWW]. Saadaval: https://www.dragino.com/downloads/downloads/NB-IoT/NDDS75/Datasheet_NDDS75_NB-IoT_Distance_Detection_Sensor.pdf
- [27] NETOP NB-IoT Waste Bin Sensor. [WWW]. Saadaval: <https://weiots.io/product/iot-sensors/waste-sensor>
- [28] Sensoneo [WWW]. Saadaval: <https://sensoneo.com/smart-waste-monitoring/>
- [29] Nordsense [WWW]. Saadaval: <https://nordsense.com/smart-bin-sensors>
- [30] S. K. Memon, F. K. Shaikh, N. A. Mahoto, and A. A. Memon, “Iot based smart garbage monitoring & collection system using wemos & ultrasonic sensors,” in 2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET). IEEE, 2019, pp. 1–6
- [31] M. Adam, M. E. Okasha, O. M. Tawfeeq, M. A. Margan, and B. Nasreldeen, “Waste management system using iot,” in 2018 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE). IEEE, 2018, pp. 1–4
- [32] W.-E. Chen, Y.-H. Wang, P.-C. Huang, Y.-Y. Huang, and M.-Y. Tsai, “A smart iot system for waste management,” in 2018 1st International Cognitive Cities Conference (IC3). IEEE, 2018, pp. 202–203
- [33] N. Susila, S. Anand, J. G. R. Elwin, and T. Sujatha, “Technology enabled smart waste collection and management system using iot,” International Journal of Pure and Applied Mathematics, vol. 119, no. 12, pp. 1283– 1295, 2018.
- [34] N. Abdullah, O. A. Alwesabi, and R. Abdullah, “Iot-based smart waste management system in a smart city,” in International Conference of Reliable Information and Communication Technology. Springer, 2018, pp. 364–371
- [35] R. Pramodhini, P. Kumar, B. Manjunatha, R. Manoraj and S. Nagabhushana, "Smart Bin Monitoring System using IOT", IJSTE - International Journal of Science Technology & Engineering, vol. 4, no. 12, pp. 149-152, 2018.

- [36] S. Mahajan, A. Kokane, A. Shewale, M. Shinde and S. Ingale, "Smart Waste Management System using IoT", Smart Waste Management System using IoT, vol. 4, no. 4, pp. 93-95, 2017.
- [37] Loo Chee Hin, Vazeerudeen Abdul Hameed, Hemalata Vasudavan, „An Intelligent Smart Bin for Waste Management“, 2021 IEEE Mysore Sub Section International Conference (MysuruCon), 2021
- [38] Nirde, K., Mulay, P.S., Chaskar, U.M., 2017. Iot based solid waste management system for smart city, in: 2017 International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), pp. 666–669.
- [39] Murugaanandam, S., Ganapathy, V., Balaji, R., 2018. Efficient iot based smart bin for clean environment, in: 2018 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP), pp. 0715–0720.
- [40] Lundin, A., Ozkil, A., Schuldt-Jensen, J., 2017. Smart cities: A case study in waste monitoring and management. doi:10.24251/HICSS.2017.167
- [41] Adeleke, O.J., Ali, M.M., 2020. An efficient model for locating solid waste collection sites in urban residential areas. International Journal of Production Research 0, 1–15. doi:10.1080/00207543.2019.1709670
- [42] Anagnostopoulos, T., Zaslavsky, A., Kolomvatsos, K., Medvedev, A., Amirian, P., Morley, J., Hadjieftymiades, S., 2017. Challenges and opportunities of waste management in iot-enabled smart cities: A survey. IEEE Transactions on Sustainable Computing 2, 275–289
- [43] Hong, I., Park, S., Lee, B., Lee, J., Jeong, D., Park, S., 2014. Iot-based smart garbage system for efficient food waste management. The Scientific World Journal 2014, 97 – 11
- [44] Ublox Sara-4 tehniline dokumentatsioon [WWW]. Saadaval: https://content.u-blox.com/sites/default/files/SARA-R4_ProductSummary_UBX-19049143.pdf
- [45] Quectel BG96 tehniline dokumentatsioon [WWW]. Saadaval: https://www.quectel.com/wp-content/uploads/2022/04/Quectel_Product_Brochure_EN_V7.0.pdf
- [46] Nordic Semiconductor nRF9160 tehniline dokumentatsioon [WWW]. Saadaval: https://www.nordicsemi.com/-/media/Software-and-other-downloads/Product-Briefs/nRF9160-SiP-product-brief.pdf?sc_trk=%7bDownload%20product%20brief%7d&la=en&hash=5C889507F72CE933BE712F9748D6FE19600C6746
- [47] SEQUANS Monarch SiP dokumentatsioon [WWW]. Saadaval: <https://www.sequans.com/products/monarch-sip/>
- [48] ToF valgusmõõtja M5STACK [WWW]. Saadaval: <https://shop.m5stack.com/products/tof-sensor-unit>
- [49] Ju Xiaotao, Gu Lichen, Dong Xinyuan , „Application and Research of Ultrasonic Horn in Ultrasonic Ranging System“, Sensors & Transducers, Vol. 170, Issue 5, May 2014, pp. 60-66, 2014
- [50] Ragn-Sells AS [WWW]. Saadaval: <https://www.ragnsells.ee/service/suvamahutid/>

Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Sergei Pavlov

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „NB-IoT sidetehnoloogial põhineva maa-aluste jäätmemahutite jälgimissüsteemi välja töötamine“, mille juhendaja on Alar Kuusik
 - 1.1. reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

11.05.2022

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtjaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.