

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Infotehnoloogia teaduskond

Karl Karjamaa 154886IABB

**NUTITELEFONIDEGA MÕÕDETAVATE
TERVISEANDMETE VÕRDLEMINE
MEDITSIINILISTE KALIBREERITUD
SEADMETEGA**

bakalaureusetöö

Juhendaja: Gunnar Piho
Doktorikraad
Dotsent

Kaasjuhendaja: Peeter Ross
Doktorikraad
Professor

Tallinn 2019

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: Karl Karjamaa

20.05.2019

Annotatsioon

Töö eesmärgiks on võrrelda nutitefonidega mõõdetavaid terviseandmeid meditsiiniliste kalibreeritud seadmetega ja uurida välja kui suured erinevused tekivad nutitelefoni ja meditsiinilise seadme vahel ning selgitada välja, kas tekivad erinevused erinevate tootjate telefonide ja/või erinevate rakenduste lõikes. Töö käigus on uurimise all kolm parameetrit: pulss, südame löögisageduse muutlikkus (HRV) ja hapniku kontsentratsioon veres (SpO₂).

Töö tulemusena selgus, et nutitefonid mõõdavad pulssi ja hapniku kontsentratsiooni veres usaldusväärselt. Südame löögisageduse muutlikkus jäi vajalike meditsiiniliste seadmete puudumise tõttu mõõtmata. Erinevate nutitefonide tootjate vahel märkimisväärseid erinevusi ei tekkinud. Kõik kõrgelt hinnatud ja/või suure installimise arvuga rakendused mõõtsid pulssi usaldusväärselt ehk nende keskmine absoluutne viga jäi alla 3 bpm. Kõik madalalt hinnatud ja/või väikse installimise arvuga rakendused mõõtsid pulssi mitteusaldusväärselt ehk nende keskmine absoluutne viga jäi üle 3 bpm. Mõlemad rakendused, millega mõõdeti hapniku kontsentratsiooni veres, mõõtsid SpO₂ taset usaldusväärselt ehk nende keskmine absoluutne viga jäi alla 1 protsendi.

Edaspidi tasub antud teemat põhjalikumalt uurida ning lisaks selgitada välja, kas tekib erinevus odavama klassi telefonide ja tippmudelite vahel. Veel tasub uurida, kas rakenduste mõõtmistäpsus jääb samaks, kui mõõtmised on tehtud peale füüsilist aktiivsust.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 34 leheküljel, 5 peatükki, 3 joonist, 19 tabelit.

Abstract

Comparing Smartphone Measured Health Data with Medical Calibrated Equipment

The purpose of the thesis is to compare the health data measured with smartphones with medical calibrated equipment. The aim is to find out how much the data measured with smartphones differs from the data measured with medical equipment and to find out whether there are differences between different smartphones and different applications. The three examined parameters are: pulse, heart rate variability (HRV) and blood oxygen saturation (SpO₂).

The results proved that smartphones measure pulse and blood oxygen saturation reliably. Heart rate variability could not be measured due to lack of medical equipment. Various smartphones did not produce any notable differences between themselves. All the applications with high rating and/or high install count measured pulse reliably (mean absolute error was less than 3). All the applications with low rating and/or low install count measured pulse unreliably (mean absolute error was more than 3). Both the applications used to measure blood oxygen saturation measured SpO₂ levels reliably (mean absolute error was less than 1 percent).

More research studies should be conducted to give an in-depth evaluation on this topic. Further studies should find out whether the applications measuring accuracy remains the same when the measurements are taken after physical activity. Also, it is worth finding out whether there are differences between flagship phones and cheaper phones.

The thesis is in Estonian and contains 34 pages of text, 5 chapters, 3 figures, 19 tables.

Lühendite ja mõistete sõnastik

ITK	Ida-Tallinna Keskhaigla
ECG/EKG	Südame bioelektrilisi elektrokardiograafia abil registreeritud muutusi kujutav kõver [1]
PPG	<i>Photoplethysmography</i> Fotopletüsmograafia
Smartphone	Nutitelefon
Flagship phone	Konkreetselt tootja tippmudel
OP- süsteem	Operatsioonisüsteem
Android	Google'i arendatud mobiil-operatsioonisüsteem [2]
IOS	Apple'i arendatud mobiil-operatsioonisüsteem [3]
Google Play	Android seadmete ametlik rakenduste pood
App Store	IOS seadmete ametlik rakenduste pood
Mobile app(lication)	Rakendus, mis on mõeldud töötamiseks mobiilis
Pulss	Südamevatsakese süstolist algav ning piki artereid leviv rõhulaine [1]
Heart Rate	Südame löögisagedus. Südamekoonete kokkutõmmete hulk ühes minutis [1]
HRV	<i>Heart rate variability</i> Südame löögisageduse muutlikkus
SpO ₂	Hapniku kontsentratsioon veres
Pulssoksümeetria	Verevärvniku hapnikuküllastuse mõõtmine [1]
Bpm	<i>Beats per minute</i> Südame löökide arv minutis
Ms	Millisekund
MAE	<i>Mean absolute error</i> Keskmine Absoluutne viga

Sisukord

1 Sissejuhatus	9
1.1 Probleem	11
1.2 Eesmärk	11
1.3 Tööstruktuur.....	11
2 Metoodika.....	13
2.1 Kasutatavad seadmed ja rakendused	14
2.1.1 Telefonid	14
2.1.2 Meditsiinilised seadmed	15
2.1.3 Rakendused	15
2.2 Mõõdetavad meditsiinilised näidud	18
2.3 Töö protsess	19
3 Tulemused	21
3.1 Pulsi mõõtmine	21
3.1.1 Pulss erinevate rakenduste lõikes (samade telefonidega).....	21
3.1.2 Pulss erinevate telefonide lõikes (samade rakendustega).....	26
3.2 Südame löögisageduse muutlikkuse mõõtmine	31
3.3 Hapniku kontsentratsiooni mõõtmine	31
4 Analüüs ja Järeldused.....	34
4.1 Pulsi mõõtetulemuste analüüs.....	34
4.2 Südame löögisageduse muutlikkuse mõõtetulemuste analüüs	37
4.3 Hapniku kontsentratsiooni mõõtetulemuste analüüs.....	38
4.4 Võrdlus publitseeritud materjalidega	38
4.5 Järeldused	39
5 Kokkuvõte	41
Kasutatud kirjandus	43
Lisa – T-testi väljundtabelid.....	45

Jooniste loetelu

Joonis 1. Huawei P20 Pro mõõtmiste vahede absoluutväärtuste jaotus Instant Heart Rate: HR Monitor & Pulse Checker rakendusega.	35
Joonis 2. Google Pixel 3 mõõtmiste vahede absoluutväärtuste jaotus Runtastic Heart Rate Monitor & Pulse Checker rakendusega.....	36
Joonis 3. Huawei P20 Pro mõõtmiste vahede absoluutväärtuste jaotus Heart Rate Monitor NITI rakendusega.	37

Tabelite loetelu

Tabel 1. Kasutatavad nutitelefonid.	15
Tabel 2. Pulsi mõõtmiseks Android telefonides valitud rakendused Google Play poes.	16
Tabel 3. Pulsi mõõtmiseks IOS telefonides valitud rakendused APP Store poes	16
Tabel 4. Südame löögisageduse muutlikkuse mõõtmiseks valitud rakendused.	17
Tabel 5. Hapniku kontsentratsiooni mõõtmiseks valitud rakendused.	18
Tabel 6. HRV time-domain meetodi parameetrid	19
Tabel 7. Google Pixel 3 nutitelefoni tehtud pulsi mõõtmised	22
Tabel 8. Samsung Galaxy S9 nutitelefoni tehtud pulsi mõõtmised	23
Tabel 9. Huawei P20 Pro nutitelefoni tehtud pulsi mõõtmised	24
Tabel 10. Apple Iphone Xs nutitelefoni tehtud pulsi mõõtmised.	25
Tabel 11. Heart Rate Monitor Accurate rakendusega tehtud pulsi mõõtmised.	26
Tabel 12. Instant Heart Rate: HR Monitor & Pulse Checker rakendusega tehtud pulsi mõõtmised.	27
Tabel 13. Runtastic Heart Rate Monitor & Pulse Checker rakendusega tehtud pulsi mõõtmised.	28
Tabel 14. Samsung Health rakendusega tehtud pulsi mõõtmised.	29
Tabel 15. Cardiio: Heart Rate Monitor rakendusega tehtud pulsi mõõtmised.	29
Tabel 16. Heart Rate Monitor NITI rakendusega tehtud pulsi mõõtmised.	30
Tabel 17. Heart Rate Monitor: Pulse BPM rakendusega tehtud pulsi mõõtmised.	31
Tabel 18. Samsung Galaxy S9 nutitelefoni tehtud SpO2 mõõtmised Samsung Health rakendusega	32
Tabel 19. Apple Iphone Xs nutitelefoni tehtud SpO2 mõõtmised Pulse Oximeter Heart Rate and Oxygen Monitor App rakendusega.....	33

1 Sissejuhatus

Nutitelefonid on muutunud tänapäeval lahutamatuks osaks meie igapäeva elus. Telefon kui vahend helistamiseks ja sõnumite saatmiseks on jäämas ajalukku. Arvatakse, et maailmas on üle 5 miljardi nutitelefoniga kasutaja [4], [5]. See on üle 65% kogu maailma rahvaarvust.

Nutitelefonid hakkasid inimeste seas huvi äratama 1994. aastal, kui IBM tõi turule esimese telefoni, mida võib kategoriseerida nutitelefonide alla. See kandis nimetust IBM Simon Personal Communicator [6], [7]. Tänapäevaste nutitelefonidega see välimuselt ei sarnanenud. Simon Personal Communicator meenutas suurt musta risttahuka kujulist klotsi, millel oli puutetundlik ekraan ja väike antenn. Sellest hoolimata oli temaga võimalik saata e-maile, fakse ja sõnumeid. Lisaks oli sellel sees kalender, kalkulaator, märkmik, aadressi raamat ja mõni kasulik rakendus veel [7]. Simonile järgnesid Nokia, Ericsson, Microsoft ja Qualcomm sarnaste toodetega. Aastal 1999 tõi NTT DoCoMo Jaapanis turule i-mode'i - uue mobiilse interneti teenuse. Sellest kujunes palju suurem fenomen kui eelkäijatest. 2001. aasta lõpuks oli teenusel üle 40 miljoni üleriigilise kasutaja. Samal ajal saavutasid mujal maailmas suure edu Blackberry ja Nokia. Enamik telefonide omanikest olid ärimehed või muul moel ärivaldkonna inimesed. Siiski ei olnud tegu tänapäeva mõistes nutitelefonidega, vaid nende eelkäijatega. Tõeline läbimurre saabus, kui Apple tõi 2007. aastal turule esimese Iphone. See seadis uue standardi nutitelefonide maailmas ning seda võis esimest korda nimetada tänapäeva mõistes nutitelefoniks. Veel samal aastal andis Google teada, et nad toovad turule Android mobiilse operatsiooni süsteemi, mida võivad kõik telefonitootjad tasuta kasutada ja selles teatud muudatusi teha. Aastal 2008 tõi HTC turule esimese Android telefoni, mis kandis nime HTC Dream [8], [9]. Alanud oli nutitelefonide ajastu, millest tänaseks on küpsuse saavutanud ja valdava turuosa hõivanud justnimelt Apple (IOS operatsioonisüsteem) ning Android. 2019. märtsi seisuga kuulus Apple'ile 22,4 % ja Androidile 75,33% mobiilse operatsiooniga seadmete turust [10].

Inimesed hoolivad järjest rohkem oma tervisest ning üldine terviseteadlikkus on tõusu teel. See on kandunud üle ka nutitelefonide maailma. Aastal 2018 oli kogu installitud rakendustest 4-5% kategoorias *medical* ja *health & fitness* nii Google Play poes kui ka App Store poes [11], [12]. Erinevad telefonide tootjad on välja tulnud ka oma

rakendustega, mis on suunatud inimeste tervisele ja tervise jälgimisele. Google tõi turule Google Fit'i, Samsungil on varasemalt juba Samsung Health, Huaweiil on Huawei Health ja Apple'i rakendus kannab lihtsalt nime Health.

Järjest rohkem kasutatakse nutitelefone, et oma elu lihtsamaks ja paremaks muuta. Samuti muutuvad nutitefonid aina võimsamaks ja võimekamaks ning nende funktsionaalsus on järjest laienev. Lisaks telefoni põhifunktsionaalsusele, milleks on helistamine ja sõnumite saatmine, saab nutitefoniga kasutada GPS-ssi, brausida Internetti, saata e-maile, kuulata muusikat, vaadata videoid, pildistada, filmida, kasutada miljoneid erinevaid rakendusi, luua ühendusi teiste seadmetega, mõõta tervise andmeid jpm. Sisuliselt on tegu väikese arvutiga, millega on võimalik helistada. Terviseandmed, mida nutitefonidega tänapäeval mõõta saab on pulss, südame löögisageduse muutlikkus (HRV) ja hapniku kontsentratsioon veres (SpO₂).

Nutitefonidega saab ka siduda mitmeid lisaseadmeid (kellad, sõrmused, pulsivööd), mis omakorda mõõdavad inimese terviseandmeid, kuid käesolev töö keskendub eranditult ainult nutitefonidega mõõdetavatele andmetele.

Nutitefonid kasutavad pulsi, südame löögisageduse muutlikkuse ja hapniku kontsentratsiooni mõõtmiseks fotopletüsmograafilist (PPG) meetodit. See on optiline meetod, millega saab registreerida vere hulga muutust mikrovaskulaarses koes ja arterites. Fotopletüsmograafia on mitteinvasiivne, odav ja lihtsasti kasutatav meetod, mis lisaks nutitefonidele on laialdaselt kasutusel erinevates meditsiini seadmetes nagu pulssoksümeeter ja pulsisageduse mõõtja. Üldine idee PPG tehnoloogia taga seisneb nahka/kudesid läbistaval valgusallikal ning detektoril/sensoril. Valgusallikana kasutatakse valgusdioode, valgus suunatakse naha pinnalt kudedesse ja registreeritakse tagasipeegeldunud signaal või registreeritakse kudesid läbivat valgustugevuse muutust. Detekteeritud valgustugevuse muutus ajas on enamasti pulseeriv ning sünkroonis südame tööga. Selline PPG signaali pulseeriv lainekuju on seotud arterites leviva pulsilainega ehk pulsiga. Nutitefoni ja meditsiinilise seadme vahe on selles, et meditsiinis kasutatakse valgusallikana tavaliselt punases või lähi-infrapunases piirkonnas töötavaid valgusdioode [13]. Nutitefonid kasutavad valgusallikana kaamera välku, milleks on valge valgus ning sensorina nutitefoni kaamerat.

1.1 Probleem

Paljud inimesed (k.a töö autor) kasutavad erinevaid rakendusi, et oma terviseandmeid nutitelefonidega mõõta. Teadmata, kui reaalse andmetega tegelikkuses tegu on. Sellest ka idee võrrelda nutitelefonidega mõõdetavaid terviseandmeid erinevate telefonide ja rakenduste lõikes meditsiiniliste kalibreeritud seadmetega. Töö teema pakkus autorile huvi ja ta soovib sellega ka tulevikus edasi tegeleda.

1.2 Eesmärk

Käesoleva bakalaureuse töö eesmärgiks on võrrelda nutitelefonidega mõõdetavaid terviseandmeid meditsiiniliste kalibreeritud seadmetega. Selgitada välja, kui palju erinevad nutitelefonidega mõõdetavad andmed reaalsest andmetest, mis on mõõdetud haigla tingimustes kalibreeritud seadmetega. Uurida välja, kas tekivad erinevused erinevate tootjate telefonide vahel ja/või erinevate rakenduste lõikes. Uurimise all on kolm eraldi parameetrit: pulss, HRV ja SpO₂.

Töös püstitatakse 4 hüpoteesi:

- Nutitelefonid on 95% tõenäosusega statistiliselt usaldusväärsed. See tähendab, et nutitelefonide ja kalibreeritud seadmete vahel ei teki statistiliselt olulist erinevust.
- Nutitelefonide lõikes erinevusi ei teki.
- Kõrgelt hinnatud ja/või suure installimise arvuga rakenduste vahel ei teki erinevusi.
- Kõrgelt hinnatud ja/või suure installimise arvuga rakenduste ja madalalt hinnatud ja/või väikse installimise arvuga rakenduste vahel tekib erinevus.

1.3 Tööstruktuur

Käesolev bakalaureuse töö koosneb sissejuhatusest, kolmest sisupeatükist ja kokkuvõttest, mille struktuur on järgnev. Teises peatükis kirjeldatakse ära bakalaureuse töö metoodika. Selgitatakse milliste seadmetega, telefonidega ja rakendustega mõõtmised tehti ning põhjendatakse valikut. Kirjeldatakse testimismetoodikat ning kuidas tulemusi

võrreldakse. Antakse ülevaade milliste meditsiiniliste parameetritega tegeletakse ning kirjeldatakse töö protsessi.

Kolmandas peatükis esitatakse lõputöö käigus saadud tulemused. Tulemused esitatakse tabelitena ning tabelite juurde kuuluva tekstina.

Neljandas peatükis analüüsitakse lõputöö käigus kogutud andmeid ja saadud tulemusi. Esitatakse samal teemal eelnevalt publitseeritud töödest ülevaade ja esitatakse järeldused.

Viimases peatükis esitatakse kokkuvõtte, kus on välja toodud püstitatud eesmärkide ja hüpoteeside tulemused ning bakalaureuse lõputöö järeldused.

2 Metoodika

Töö käigus on kasutatud 4 erinevat nutitelefoni, 12 nutitelefoni rakendust ja 3 meditsiinilist seadet. Nutitelefonideks on valitud 2018. aasta *flagship* telefonid ehk 2018. aasta erinevate tootjate tippudelid. Rakendused on testimiseks valitud Google Play poest (Android) ja APP Store poest (IOS).

Töö autor suhtles aktsiaselts Telia Eesti meediasuhete juhi Raigo Neudorfiga, et laenata lõputöö eksperimentaalseks osaks lisaks 2 nutitelefoni- Huawei P20 Pro ja Samsung Galaxy S9.

Töö autor tegi koostööd ITK-ga (Ida-Tallinna Keskhaigla), et saaks paralleelselt nutitelefonidega mõõta terviseandmeid meditsiinilise kalibreeritud seadmega. Autor sai Ida-Tallinna Keskhaigla Teaduskonna juhataja käest meditsiinitehnika insener Karel Kristi kontaktid. Karel Krist oli töö autoril abiks ITK-s meditsiiniliste seadmetega mõõtmiste tegemisel.

Lõputöös kasutatakse andmete omavaheliseks võrdlemiseks ja tulemuste olulisuse kontrollimiseks kahte erinevat arvutusmeetodit ning andmeanalüüs viidi läbi kasutades programmi Microsoft Excel. Esmalt on esitatud keskmine absoluutne viga (MAE), mis näitab kui palju keskmiselt nutitelefoni mõõdetud tulemus erineb meditsiinilise kalibreeritud seadme näidust ehk reaalsest näidust. Teisalt kontrollitakse, kas erinevate seadmetega mõõdetud mõõtmistulemustes esineb statistiliselt oluline erinevus. Selleks kasutatakse sõltuvate valimite T-testi, kuna tegemist on sama objekti kahekordse mõõtmisega. See tähendab, et mõõtmistulemustes esineb iga objekti jaoks kaks väärtust [14]. Sõltuvate valimite T-testil on 4 eeldust :

1. Sõltuv muutuja peab olema arvuline tunnus;
2. Muutuja väärtus koosneb seotud arvupaarist;
3. Seotud paaride tulemuste vahel ei tohi olla märkimisväärset erinevust;
4. Seotud paaride tulemuste vahe peab ligikaudu järgima normaaljaotuse printsiipi [15].

Rääkides T-testi eelduste täitmisest, siis mida väiksem on valim, seda tundlikum on T-test eelduste mittetäitmise suhtes. Kuna antud töös kasutatavad valimid on väga väikesed (6-10 ühikut) ning mõnedel juhtudel on eeldus (3) ja (4) mittetäidetud, siis tõlgendati T-testi tulemusi äärmise ettevaatlikkusega. Juhul kui T-test ei andnud töös adekvaatselt tõlgendatavat tulemust, siis märgiti see eraldi ära töö analüüsi osas (Ptk 4). Kõik töös märgitud statistiliselt olulised erinevused on leitud olulisuse nivool 0,05. Kõik T-testi tulemused on esitatud peatükis Tulemused ning Exceli väljundtabelid, on esitatud töö osas Lisa.

Lõputöö eksperimentaalne osa viidi läbi kahe patsiendi peal. Kõik andmed on kogutud patsientidelt puhkeolekus. Patsientide vanus jäi vahemikku 20-25 aastat ning esindatud olid mõlemad sugupooled. Pulsi mõõtmisi tehti iga patsiendi peal kolm korda ning hapniku kontsentratsiooni mõõtmisi viis korda. Vastavalt sellele, on töö Tulemuste osas esitatud tabelites kolm esimest pulsi mõõtu patsient A omad ning kolm viimast pulsi mõõtu patsient B omad. Sama loogika kordub ka hapniku kontsentratsiooni osas, kus viis esimest mõõtu vastavad patsient A-le ja viis viimast mõõtu patsient B-le.

2.1 Kasutatavad seadmed ja rakendused

2.1.1 Telefonid

Lõputöös on testimiseks valitud 4 telefoni. Valim on koostatud nii, et eestlaste seas kolm kõige populaarsemat telefonitootjat oleksid esindatud [16], [17]. Kõikide telefonide puhul on tegu erinevate tootjate *flagship* telefonidega ehk tippmudelitega, mis on välja tulnud 2018. aastal. Telefonide tootjad on Apple, Samsung, Huawei, Google. Täpsemalt on esitatud tabelis telefoni tootja, mudel ja väljalaske aasta (tabel 1).

Tabel 1. Kasutatavad nutitelefonid.

Tootja	Mudel	Aasta
Google	Pixel 3	2018
Samsung	Galaxy S9	2018
Apple	Iphone Xs	2018
Huawei	P20 Pro	2018

2.1.2 Meditsiinilised seadmed

Lõputöös on nutitelefonidega mõõdetavate andmete kontrollimiseks valitud patsiendimonitor Philips Intellivue MP20, kuna selle seadmega saab samaaegselt mõõta südamelöögi sagedust, pulssi ja hapniku kontsentratsiooni veres.

Philips Intellivue MP20 patsiendi monitoril teostati 2 erineva simulaatoriga kontroll, et veenduda tulemuste õigsuses. Kasutusel oli Pronk Technologies Ox Sim Flex simulaator, millega veenduti hapniku kontsentratsiooni ja pulsi õigsuses ja Fluke Biomedical PS410 ECG Simulator, millega kontrolliti südamelöökide sageduse õigsust.

2.1.3 Rakendused

Lõputöös on kasutatud 12 erinevat rakendust terviseandmete mõõtmiseks. Seitse rakendust pulsi mõõtmiseks, kolm rakendust südame löögisageduse muutlikkuse mõõtmiseks ja kaks rakendust hapniku kontsentratsiooni mõõtmiseks. Tabelites esinev väärtus „, puudub “ tähendab, et rakenduste hinnanguid ei kuvata. Väärtus „, – “ tähendab, et konkreetne tabeli veerg ei käi selle rea kohta (Android rakendusel ei saa olla hinnangut App Store poes ja vastupidi).

Pulsi mõõtmiseks on väga palju erinevaid rakendusi nii Android OP-süsteemiga telefonidele, kui ka IOS OP-süsteemiga telefonidele. Rakendused on valitud Google Play Poes *ratingu* e hinnangu järgi ja installimiste arvu järgi (tabel 2). App Store'ist on rakendused valitud ainult hinnete järgi, kuna App Store ei kuva tavakasutajale installimiste arvu (tabel 3). Veel on arvesse võetud, et kaks rakendust oleks olemas

mõlemal platvormil- Androidil kui ka IOS-il. Lisaks kõrgelt hinnatud ja/või suure installimiste arvuga rakendusele on valitud ka 1 madalalt hinnatud ja/või väikse installimise arvuga rakendus.

Tabel 2. Pulsi mõõtmiseks Android telefonides valitud rakendused Google Play poes

Platvorm	Nimetus	Hinnang	Installimiste arv
Android	Heart Rate Monitor Accurate	4,6	1 000 000+
Android/IOS	Instant Heart Rate: HR Monitor & Pulse Checker	4,3	300 000+
Android/IOS	Runtastic Heart Rate Monitor & Pulse Checker	4,3	5 000 000+
Android (Samsung)	Samsung Health	4,3	500 000 000+ ¹
Android	Heart Rate Monitor NITI	2,3	100+

Tabel 3. Pulsi mõõtmiseks IOS telefonides valitud rakendused APP Store poes

Platvorm	Nimetus	Hinnang
IOS/Android	Instant Heart Rate: HR Monitor	4,8
IOS/Android	Runtastic Heart Rate Monitor	puudub
IOS	Cardio: Heart Rate Monitor	4,9
IOS	Heart Rate Monitor: Pulse BPM	puudub

Selleks, et selgelt ja arusaadavalt eristada pulsi mõõtmise rakendusi on nad jagatud platvormist sõltumatult kahte kategooriasse. Kategooria 1 rakendused on kõrge hinnanguga ja/või suure installimise arvuga (Heart Rate Monitor Accurate; Instant Heart Rate: HR Monitor; Runtastic Heart Rate Monitor; Samsung Health; Cardio: Heart Rate

¹ Installimiste arv on teistest nii palju suurem kuna Samsung Health on Samsungi telefonidesse tehasest sisse installitud

Monitor). Kategooria 2 rakendused on madala hinnanguga ja/või väikse installimise arvuga (Heart Rate Monitor NITI; Heart Rate Monitor: Pulse BPM).

Südame löögisageduse muutlikkuse mõõtmiseks on rakendusi mõlemal platvormil väga vähe. Enamik rakendusi on mõeldud koos pulsikella või *fitness-trackeriga* kasutamiseks. Nendest vähestest rakendustest, mis ilma lisaseadmeteta HRV-d mõõdavad osutusid valituks kõige populaarsemad rakendused. Android OP-süsteemiga telefonil on kolm rakendust ja IOS OP-süsteemiga telefonil kaks rakendust. Ka siin on rakenduste valikul arvesse võetud, et rakendused oleksid arendatud mõlemale platvormile (tabel 4).

Tabel 4. Südame löögisageduse muutlikkuse mõõtmiseks valitud rakendused.

Platvorm	Nimetus	Hinnang Play Poes	Installimiste arv Play Poes	Hinnang App Store'is
Android/IOS	Welltory	4,3	100 000+	4,6
Android/IOS	HRV4Training	4,4	10 000+	puudub
Android	Heart Rate Variability HRV Camera	puudub ¹	10 000+	-

Hapniku kontsentratsiooni mõõtmiseks veres on rakendusi veel vähem kui HRV mõõtmiseks. Enamik rakendusi on ka siin mõeldud koos pulsikella või *fitness-trackeriga* kasutamiseks. Android OP-süsteemiga telefonidest saab hapniku kontsentratsiooni veres mõõta ainult Samsungi telefonidega ja Samsung Health rakendusega. Samsungi telefonidel on selleks eraldi sensor, mis kasutab PPG tehnoloogiat. IOS OP-süsteemiga telefonid mõõdavad hapniku kontsentratsiooni veres kaameraga (ja valguga), kuid kasutavad ka PPG tehnoloogiat. IOS OP-süsteemiga telefonil on rakenduseks valitud

¹ Rakendusele on *early access* e varajane juurdepääs, mis tähendab, et rakenduse hinnanguid ei ole võimalik näha.

Pulse Oximeter Heart Rate and Oxygen Monitor App, kuna see oli kõige populaarsem (tabel 5).

Tabel 5. Hapniku kontsentratsiooni mõõtmiseks valitud rakendused.

Platvorm	Nimetus	Hinnang Play Poes	Installimiste arv Play Poes	Hinnang App Store'is
Android (Samsung)	Samsung Health	4,3	500 000 000+ ¹	-
IOS	Pulse Oximeter Heart Rate and Oxygen Monitor App	-	-	puudub

2.2 Mõõdetavad meditsiinilised näidud

Lõputöös käsitletavat andmed on meditsiinilised parameetrid. Pulsu mõõtmiseks kasutatakse peamiselt minutis tehtavate südamelöökide arvu ehk bpm (beats per minute). Inimese normaalne südamelöökide arv on 60 - 100 lööki minutis [18].

Südame löögisageduse muutlikkus (HRV) on ajaline kõikumine järjestikuste südamelöökide vahel [19]. Terve süda ei ole metronoom, mis lööb kindla intervalli tagant. Südame töö on kompleksne ja mittelineaarne. Terve südame löökidevahelisi kõikumisi saab kõige paremini kirjeldada kui matemaatilist kaost [20].

HRV jaguneb kolmeks: 24h, lühiajaline (~5 min) ja ultra-lühiajaline (<5min) südamelöökide varieeruvus. HRV kirjeldamiseks saab kasutada muutujana AEGA (*time-domain*), SAGEDUST (*frequency-domain*) ja mittelineaarseid mõõte. Lühiajalised ja ultra-lühiajalised mõõdud ei ole kahekümne nelja tunnise mõõduga võrreldavad. Lõputöös on vaatlemise alla võetud ultra-lühiajaline HRV kasutades muutujana AEGA (*time-domain*), kuna nutitelefoniid kasutavad sama meetodikat. *Time-domain* meetodis kasutatakse 9 parameetrit (tabel 6) [20].

¹ Installimiste arv on teistest nii palju suurem kuna Samsung Health on Samsungi telefonidesse tehasest sisse installitud

Tabel 6. HRV time-domain meetodi parameetrid

Parameeter	Ühik	Kirjeldus
SDNN	ms	EKG joonistatud NN-intervallide standard hälve
SDRR	ms	EKG joonistatud RR-intervallide standard hälve
SDANN	ms	EKG joonistatud keskmiste NN-intervallide standard hälve iga 5 minutilise segmendi jaoks 24-tunnise mõõteperioodi vältel
SDNNI	ms	EKG joonistatud NN-intervallide standard hälvete keskmine iga 5 minutilise segmendi jaoks 24-tunnise mõõteperioodi vältel
pNN50	%	EKG joonistatud järjestikuste RR-intervallide protsent, mis erinevad rohkem kui 50 ms
HR Max – HR Min	bpm	Kõrgeima ja madalaima südame löögisageduse keskmine vahe igas hingamistsüklis
RMSSD	ms	EKG joonistatud järjestikuste RR-intervallide erinevuste ruutkeskmine
HRV triangular index	-	EKG joonistatud RR-intervallide histogrammi tiheduse integraal jagatud tema kõrgusega
TINN	ms	EKG joonistatud RR- intervalli histogrammi alusjoone laius

Hapniku kontsentratsioon veres näitab hapnikuga rikastatud hemoglobiini molekulide protsenti arteriaalses veres. Seda tähistatakse SaO_2 . Näidud võivad olla 0% kuni 100%. Terve inimese näidud jäävad aga 94% kuni 100% vahemikku. SpO_2 tähendab pulssoksümeetriaga mõõdetud SaO_2 näitu. [21]

2.3 Töö protsess

Lõputöö käigus mõõdeti pulssi ja hapniku kontsentratsiooni veres nutitelefonidega ja paralleelselt meditsiinilise kalibreeritud seadmega. Vajalike meditsiiniliste seadmete puudumise tõttu jäi südame löögisageduse muutlikkus (HRV) mõõtmata. Mõõtmised viidi läbi Ida-Tallinna Keskhaiglas. Andmeid koguti kahelt erinevalt patsiendilt 3-5 kordusmõõtmise käigus. Kõik mõõtmised kahe patsiendiga toimusid istudes ning puhkeolekus. Inimese pulss, südame löögisageduse muutlikkus ja hapniku kontsentratsioon veres ei ole konstantsed parameetrid. See tähendab, et on väga oluline, et mõõtmised toimuksid mõlema seadmega paralleelselt samal ajal, et tulemused oleksid võrreldavad ja võimalikult täpsed. Selleks ühendati patsient Philips Intellivue MP20

patsiendi monitoriga. Järgmisena kinnitati EKG ühendused ning pulssoksümeeter ning pulsisageduse mõõtja. Pulssoksümeeter ja pulsisageduse mõõtja kinnitati patsiendi vasakule sõrmele ning nutitelefoni sensor asetati paremale sõrmele. Seejärel mõõdeti erinevate nutitelefonidega ja erinevate rakendustega patsiendi pulssi. Samal ajal mõõtis patsiendi monitor Philips Intellivue MP20 koguaeg patsiendi pulssi. Samasugust protseduuri korraldati hapniku kontsentratsiooni määramiseks veres. Erinevate nutitelefonidega ja erinevate rakendustega mõõdeti patsiendi hapniku kontsentratsiooni veres. Samal ajal mõõtis patsiendi monitor Philips Intellivue MP20 patsiendi hapniku kontsentratsiooni veres. Kõik tulemused dokumenteeriti, et hiljem analüüsida.

3 Tulemused

Kolmandas peatükis on esitatud lõputöö käigus tehtud mõõtmiste tulemused. Tulemuste korrektseks ja visuaalselt paremaks esitamiseks on defineeritud tabelites esinevad nimetused järgnevalt:

T1 – Google Pixel 3

T2 – Samsung Galaxy S9

T3 – Huawei P20 Pro

T4 – Apple Iphone Xs

R1 - Heart Rate Monitor Accurate

R2 - Instant Heart Rate: HR Monitor & Pulse Checker

R3 – Runtastic Heart Rate Monitor & Pulse Checker

R4 - Heart Rate Monitor NITI

R5 – Samsung Health

R6 – Cardiio: Heart Rate Monitor

R7 - Heart Rate Monitor: Pulse BPM

R8 - Pulse Oximeter Heart Rate and Oxygen Monitor App

M – Meditsiinilise kalibreeritud seadmega mõõdetud parameeter

d - mõõtmiste vahe absoluutväärtus

\bar{d} – mõõtmiste vahede absoluutväärtuste keskmine ehk keskmine absoluutne viga (MAE)

3.1 Pulsi mõõtmine

Pulsi mõõtmise tulemused on esitatud kahe erineva alapeatükina. Esimeses kirjeldatakse pulssi erinevate rakenduste lõikes samade telefonidega ning teises kirjeldatakse pulssi erinevate telefonide lõikes samade rakendustega. Kõikidele arvudele tabelis vastab ühik bpm ehk minutis tehtavate südamelöökide arv.

3.1.1 Pulss erinevate rakenduste lõikes (samade telefonidega)

Selles peatükis on esitatud pulsi mõõtmised samade telefonide lõikes erinevate rakendustega.

Google Pixel 3 (T1) nutitelefoni teatud pulsi mõõtmiste tulemused esitatuna ühtse tabelina (tabel 7).

Tabel 7. Google Pixel 3 nutitelefoni teatud pulsi mõõtmised

R1	M	d	R2	M	d	R3	M	d	R4	M	d
58	60	2	60	61	1	63	64	1	65	61	4
54	56	2	56	57	1	56	58	2	79	57	22
56	56	0	58	58	0	57	59	2	75	57	18
64	66	2	62	64	2	61	64	3	73	63	10
67	70	3	66	68	2	64	67	3	63	65	2
64	66	2	66	65	1	58	61	3	75	68	7
\bar{d}		1,833			1,167			2,333			10,500

Heart Rate Monitor Accurate (R1) rakendusega oli keskmine absoluutne viga 1,833 bpm. T-testi põhjal esineb mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt oluline erinevus ($t(5) = -4,568$; $p = 0,006$).

Instant Heart Rate: HR Monitor & Pulse Checker (R2) rakendusega oli keskmine absoluutne viga 1,167 bpm. T-testi põhjal ei esine mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt olulist erinevust ($t(5) = -1,746$; $p = 0,141$).

Runtastic Heart Rate Monitor & Pulse Checker (R3) rakendusega oli keskmine absoluutne viga 2,333 bpm. T-testi põhjal esineb mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt oluline erinevus ($t(5) = -7$; $p = 0,001$).

Heart Rate Monitor NITI (R4) rakendusega oli keskmine absoluutne viga 10,500 bpm. T-testi põhjal esineb mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt oluline erinevus ($t(5) = 2,704$; $p = 0,043$).

Samsung Galaxy S9 (T2) nutitelefoni tehtud pulsi mõõtmiste tulemused esitatuna ühtse tabelina (tabel 8).

Tabel 8. Samsung Galaxy S9 nutitelefoni tehtud pulsi mõõtmised

R1	M	d	R2	M	d	R3	M	d	R5	M	d	R4	M	d
61	61	0	65	66	1	68	66	2	63	63	0	74	64	10
56	56	0	60	60	0	59	58	1	62	63	1	67	58	9
58	58	0	64	65	1	57	59	2	61	61	0	81	65	16
68	69	1	69	71	2	69	70	1	68	70	2	97	71	26
68	70	2	69	70	1	68	70	2	78	74	4	95	70	25
66	71	5	73	72	1	73	77	4	65	69	4	91	70	21
\bar{d}		1,333			1,000			2,000			1,833			17,833

Heart Rate Monitor Accurate (R1) rakendusega oli keskmine absoluutne viga 1,333 bpm. T-testi põhjal ei esine mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt olulist erinevust ($t(5) = -1,661$; $p = 0,158$).

Instant Heart Rate: HR Monitor & Pulse Checker (R2) rakendusega oli keskmine absoluutne viga 1,000 bpm. T-testi põhjal ei esine mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt olulist erinevust ($t(5) = -1,581$; $p = 0,175$).

Runtastic Heart Rate Monitor & Pulse Checker (R3) rakendusega oli keskmine absoluutne viga 2,000 bpm. T-testi põhjal ei esine mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt olulist erinevust ($t(5) = -1,118$; $p = 0,314$).

Samsung Health (R5) rakendusega oli keskmine absoluutne viga 1,833 bpm. T-testi põhjal ei esine mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt olulist erinevust ($t(5) = -0,460$; $p = 0,665$).

Heart Rate Monitor NITI (R4) rakendusega oli keskmine absoluutne viga 17,833 bmp. T-testi põhjal esineb mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt oluline erinevus ($t(5) = 5,935$; $p = 0,002$).

Huawei P20 Pro (T3) nutitelefoni tehtud pulsi mõõtmiste tulemused esitatuna ühtse tabelina (tabel 9).

Tabel 9. Huawei P20 Pro nutitelefoni tehtud pulsi mõõtmised

R1	M	d	R2	M	d	R3	M	d	R4	M	d	
63	63	0	66	66	0	65	67	2	51	58	7	
57	57	0	55	57	2	62	61	1	71	61	10	
58	57	1	57	57	0	56	58	2	79	63	16	
65	71	6	68	71	3	66	70	4	77	64	13	
62	63	1	61	62	1	63	62	1	85	69	16	
61	63	2	67	70	3	66	64	2	75	69	6	
\bar{d}		1,667				1,500				2,000		

Heart Rate Monitor Accurate (R1) rakendusega oli keskmine absoluutne viga 1,667 bpm. T-testi põhjal ei esine mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt olulist erinevust ($t(5) = -1,305$; $p = 0,249$).

Instant Heart Rate: HR Monitor & Pulse Checker (R2) rakendusega oli keskmine absoluutne viga 1,500 bpm. T-testi põhjal esineb mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt oluline erinevus ($t(5) = -2,666$; $p = 0,045$).

Runtastic Heart Rate Monitor & Pulse Checker (R3) rakendusega oli keskmine absoluutne viga 2,000 bpm. T-testi põhjal ei esine mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt olulist erinevust ($t(5) = -0,698$; $p = 0,516$).

Heart Rate Monitor NITI (R4) rakendusega oli keskmine absoluutne viga 11,333 bmp. T-testi põhjal ei esine mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt olulist erinevust ($t(5) = 2,529$; $p = 0,053$).

Apple Iphone Xs (T4) nutitelefoni tehtud pulsi mõõtmiste tulemused esitatuna ühtse tabelina (tabel 10).

Tabel 10. Apple Iphone Xs nutitelefoni tehtud pulsi mõõtmised.

R2	M	d	R3	M	d	R6	M	d	R7	M	d	
63	63	0	64	62	2	66	66	0	56	55	1	
62	60	2	65	65	0	57	57	0	57	62	5	
59	59	0	57	58	1	60	60	0	57	62	5	
68	68	0	65	73	8	63	65	2	62	65	3	
71	66	5	66	67	1	65	65	0	62	71	9	
63	64	1	67	70	3	63	61	2	62	65	3	
\bar{d}		1,333				2,500				0,667		

Instant Heart Rate: HR Monitor & Pulse Checker (R2) rakendusega oli keskmine absoluutne viga 1,333 bpm. T-testi põhjal ei esine mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt olulist erinevust ($t(5) = 1,118$; $p = 0,314$).

Runtastic Heart Rate Monitor & Pulse Checker (R3) rakendusega oli keskmine absoluutne viga 2,500 bpm. T-testi põhjal ei esine mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt olulist erinevust ($t(5) = -1,309$; $p = 0,247$).

Cardio: Heart Rate Monitor (R6) rakendusega oli keskmine absoluutne viga 0,667 bpm. T-testi põhjal ei esine mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt olulist erinevust ($t(5) = 0$; $p = 1,000$).

Heart Rate Monitor: Pulse BPM (R7) rakendusega oli keskmine absoluutne viga 4,333 bpm. T-testi põhjal esineb mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt oluline erinevus ($t(5) = -2,981$; $p = 0,031$).

3.1.2 Pulss erinevate telefonide lõikes (samade rakendustega)

Selles peatükis on esitatud pulsi mõõtmised samade rakenduste lõikes erinevate telefonidega.

Heart Rate Monitor Accurate (R1) rakendusega tehtud pulsi mõõtmiste tulemused esitatuna ühtse tabelina (tabel 11).

Tabel 11. Heart Rate Monitor Accurate rakendusega tehtud pulsi mõõtmised.

T1	M	d	T2	M	d	T3	M	d	
58	60	2	61	61	0	63	63	0	
54	56	2	56	56	0	57	57	0	
56	56	0	58	58	0	58	57	1	
64	66	2	68	69	1	65	71	6	
67	70	3	68	70	2	62	63	1	
64	66	2	66	71	5	61	63	2	
\bar{d}		1,833				1,333			1,667

Google Pixel 3 (T1) nutitefoniga oli keskmine absoluutne viga 1,833 bpm. T-testi põhjal esineb mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt oluline erinevus ($t(5) = -4,568$; $p = 0,006$).

Samsung Galaxy S9 (T2) nutitefoniga oli keskmine absoluutne viga 1,333 bpm. T-testi põhjal ei esine mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt olulist erinevust ($t(5) = -1,661$; $p = 0,158$).

Huawei P20 Pro (T3) nutitefoniga oli keskmine absoluutne viga 1,667 bpm. T-testi põhjal ei esine mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt olulist erinevust ($t(5) = -1,305$; $p = 0,249$).

Instant Heart Rate: HR Monitor & Pulse Checker (R2) rakendusega tehtud pulsi mõõtmiste tulemused esitatuna ühtse tabelina (tabel 12).

Tabel 12. Instant Heart Rate: HR Monitor & Pulse Checker rakendusega tehtud pulsi mõõtmised.

T1	M	d	T2	M	d	T3	M	d	T4	M	d		
60	61	1	65	66	1	66	66	0	63	63	0		
56	57	1	60	60	0	55	57	2	62	60	2		
58	58	0	64	65	1	57	57	0	59	59	0		
62	64	2	69	71	2	68	71	3	68	68	0		
66	68	2	69	70	1	61	62	1	71	66	5		
66	65	1	73	72	1	67	70	3	63	64	1		
\bar{d}		1,167				1,000				1,500			1,333

Google Pixel 3 (T1) nutitelefoni oli keskmine absoluutne viga 1,167 bpm. T-testi põhjal ei esine mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt olulist erinevust ($t(5) = -1,746$; $p = 0,141$).

Samsung Galaxy S9 (T2) nutitelefoni oli keskmine absoluutne viga 1,000 bpm. T-testi põhjal ei esine mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt olulist erinevust ($t(5) = -1,581$; $p = 0,175$).

Huawei P20 Pro (T3) nutitelefoni oli keskmine absoluutne viga 1,500 bpm. T-testi põhjal esineb mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt oluline erinevus ($t(5) = -2,666$; $p = 0,045$).

Apple iPhone Xs (T4) nutitelefoni oli keskmine absoluutne viga 1,333 bpm. T-testi põhjal ei esine mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt olulist erinevust ($t(5) = 1,118$; $p = 0,314$).

Runtastic Heart Rate Monitor & Pulse Checker (R3) rakendusega tehtud pulsi mõõtmiste tulemused esitatuna ühtse tabelina (tabel 13).

Tabel 13. Runtastic Heart Rate Monitor & Pulse Checker rakendusega tehtud pulsi mõõtmised.

T1	M	d	T2	M	d	T3	M	d	T4	M	d	
63	64	1	68	66	2	65	67	2	64	62	2	
56	58	2	59	58	1	62	61	1	65	65	0	
57	59	2	57	59	2	56	58	2	57	58	1	
61	64	3	69	70	1	66	70	4	65	73	8	
64	67	3	68	70	2	63	62	1	66	67	1	
58	61	3	73	77	4	66	64	2	67	70	3	
\bar{d}		2,333				2,000				2,000		

Google Pixel 3 (T1) nutitelefoni oli keskmine absoluutne viga 2,333 bpm. T-testi põhjal esineb mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt oluline erinevus ($t(5) = -7$; $p = 0,001$).

Samsung Galaxy S9 (T2) nutitelefoni oli keskmine absoluutne viga 2,000 bpm. T-testi põhjal ei esine mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt olulist erinevust ($t(5) = -1,118$; $p = 0,314$).

Huawei P20 Pro (T3) nutitelefoni oli keskmine absoluutne viga 2,000 bpm. T-testi põhjal ei esine mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt olulist erinevust ($t(5) = -0,698$; $p = 0,516$).

Apple Iphone Xs (T4) nutitelefoni oli keskmine absoluutne viga 2,500 bpm. T-testi põhjal ei esine mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt olulist erinevust ($t(5) = -1,746$; $p = 0,247$).

Samsung Health (R5) rakendusega tehtud pulsi mõõtmiste tulemused esitatuna ühtse tabelina (tabel 14).

Tabel 14. Samsung Health rakendusega tehtud pulsi mõõtmised.

T2	M	d
63	63	0
62	63	1
61	61	0
68	70	2
78	74	4
65	69	4
\bar{d}		1,833

Samsung Galaxy S9 (T2) nutitefoniga oli keskmine absoluutne viga 1,833 bpm. T-testi põhjal ei esine mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt olulist erinevust ($t(5) = -0,460$; $p = 0,665$).

Cardio: Heart Rate Monitor (R6) rakendusega tehtud pulsi mõõtmiste tulemused esitatuna ühtse tabelina (tabel 15).

Tabel 15. Cardio: Heart Rate Monitor rakendusega tehtud pulsi mõõtmised.

T4	M	d
66	66	0
57	57	0
60	60	0
63	65	2
65	65	0
63	61	2
\bar{d}		0,667

Apple Iphone Xs (T4) nutitefoniga oli keskmine absoluutne viga 0,667 bpm. T-testi põhjal ei esine mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt olulist erinevust ($t(5) = 0$; $p = 1,000$).

Heart Rate Monitor NITI (R4) rakendusega tehtud pulsi mõõtmiste tulemused esitatuna ühtse tabelina (tabel 16).

Tabel 16. Heart Rate Monitor NITI rakendusega tehtud pulsi mõõtmised.

T1	M	d	T2	M	d	T3	M	d	
65	61	4	74	64	10	51	58	7	
79	57	22	67	58	9	71	61	10	
75	57	18	81	65	16	79	63	16	
73	63	10	97	71	26	77	64	13	
63	65	2	95	70	25	85	69	16	
75	68	7	91	70	21	75	69	6	
\bar{d}		10,500				17,833			11,333

Google Pixel 3 (T1) nutitelefoni oli keskmine absoluutne viga 10,500 bpm. T-testi põhjal esineb mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt oluline erinevus ($t(5) = 2,704$; $p = 0,043$).

Samsung Galaxy S9 (T2) nutitelefoni oli keskmine absoluutne viga 17,833 bpm. T-testi põhjal esineb mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt oluline erinevus ($t(5) = 5,935$; $p = 0,002$).

Huawei P20 Pro (T3) nutitelefoni oli keskmine absoluutne viga 11,333 bpm. T-testi põhjal ei esine mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt olulist erinevust ($t(5) = 2,529$; $p = 0,053$).

Heart Rate Monitor: Pulse BPM (R7) rakendusega tehtud pulsi mõõtmiste tulemused esitatuna ühtse tabelina (tabel 17).

Tabel 17. Heart Rate Monitor: Pulse BPM rakendusega tehtud pulsi mõõtmised.

T4	M	d
56	55	1
57	62	5
57	62	5
62	65	3
62	71	9
62	65	3
\bar{d}		4,333

Apple Iphone Xs (T4) nutitelefoniga oli keskmine absoluutne viga 4,333 bpm. T-testi põhjal esineb mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt oluline erinevus ($t(5) = -2,981$; $p = 0,031$).

3.2 Südame löögisageduse muutlikkuse mõõtmine

Südame löögisageduse muutlikkust (HRV) ei õnnestunud mõõta. Põhjendused on välja toodud analüüsi osas (Ptk 4.2).

3.3 Hapniku kontsentratsiooni mõõtmine

Selles peatükis on esitatud hapniku kontsentratsiooni mõõtmiste tulemused erinevate telefonide ja rakenduste lõikes. Kõikidele arvudele tabelis vastab ühik % ehk hapniku kontsentratsioon veres protsentuaalselt.

Samsung Health (R5) rakendusega tehtud vere hapniku kontsentratsiooni mõõtmiste tulemused esitatuna ühtse tabelina (tabel 18).

Tabel 18. Samsung Galaxy S9 nutitelefoni tehtud SpO₂ mõõtmised Samsung Health rakendusega

R5	M	d
99	98	1
99	98	1
100	99	1
100	99	1
100	100	0
99	99	0
99	99	0
100	99	1
100	99	1
98	99	1
\bar{d}		0,7

Samsung Health (R5) rakendusega oli keskmine absoluutne viga 0,7 protsenti. T-testi põhjal ei esine mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt olulist erinevust ($t(9) = 2,236$; $p = 0,052$).

Pulse Oximeter Heart Rate and Oxygen Monitor App (R8) rakendusega tehtud vere hapniku kontsentratsiooni mõõtmiste tulemused esitatuna ühtse tabelina (tabel 19).

Tabel 19. Apple Iphone Xs nutitelefoniaga tehtud SpO₂ mõõtmised Pulse Oximeter Heart Rate and Oxygen Monitor App rakendusega

R8	M	d
100	98	2
100	100	0
100	100	0
100	99	1
99	99	0
98	99	1
99	99	0
98	99	1
100	99	1
98	99	1
\bar{d}		0,7

Pulse Oximeter (R8) rakendusega oli keskmine absoluutne viga 0,7 protsenti. T-testi põhjal ei esine mobiilirakenduse ja meditsiinilise kalibreeritud seadme mõõtmistulemuste vahel statistiliselt olulist erinevust ($t(9) = 0,318$; $p = 0,758$).

4 Analüüs ja Järeldused

Neljandas peatükis esitatakse lõputöö käigus kogutud andmete ja tulemuste analüüs. Antakse samal teemal eelnevalt publitseeritud töödest ülevaade ja esitatakse järeldused.

4.1 Pulsi mõõtetulemuste analüüs

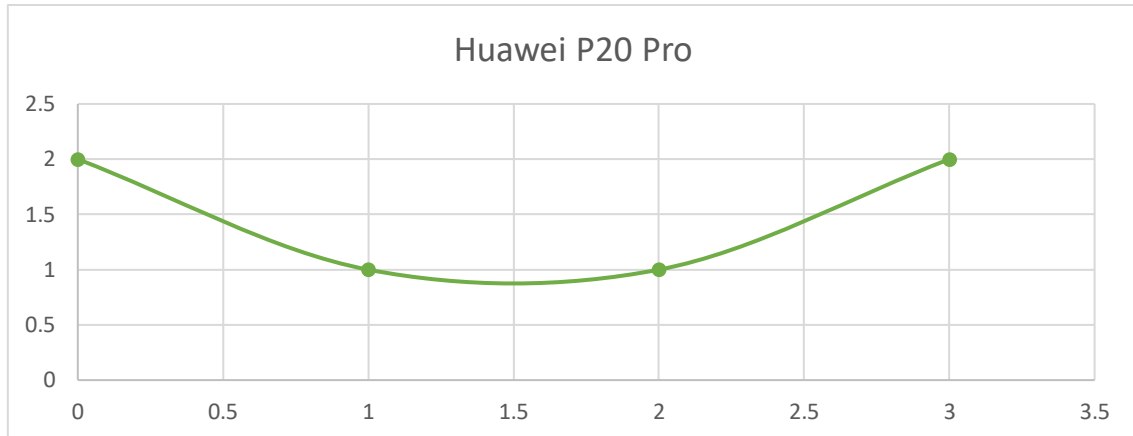
Lõputöö tulemusena selgus, et rakendused mõõdavad pulssi suhteliselt täpselt, kuid mitte identselt meditsiiniliste kalibreeritud seadmetega. Selleks, et hinnata rakenduste kasutatavust reaalses elus püstitatakse järgmine väide: Kui mõõtetulemuste keskmine absoluutne viga jääb **alla** 3 pulsilöögi on rakendus tavainimese jaoks piisavalt täpne, et teda usaldusväärseks nimetada (see tähendab, et inimese jaoks ei ole sisuliselt vahet, kas ta pulss on 62 või 65). Selleks, et hinnata mõõtetulemuste relevantsust, on kasutatud T-testi, et selgitada välja, kas tulemused on statistiliselt usaldusväärsed. Tähele tuleb panna, et edaspidi on juttu usaldusväärsusest ja statistilisest usaldusväärsusest erinevates kontekstides.

Mõõtmistulemused kinnitavad, et kõik kategooria 1 rakendused (ehk kõrgelt hinnatud ja suure installimise arvuga rakendused) **mõõdavad** pulssi usaldusväärselt. See tähendab, et kõikide nende rakenduste keskmine absoluutne viga jääb **alla** 3 pulsilöögi minutis. Seda kinnitab ka T-test (v.a 3 raskesti tõlgendatavat juhtumit).

Heart Rate Monitor Accurate (R1) rakendusega tehtud mõõtmised näitavad, et kõik keskmised absoluutsed vead jäävad **alla** 3 bpm (Google Pixel 3 – 1,833 bpm; Samsung Galaxy S9 – 1,333 bpm; Huawei P20Pro - 1,667 bpm). Järelikult mõõdab rakendus pulssi usaldusväärselt. Seda fakti kinnitab ka Samsung Galaxy S9 ja Huawei P20 Pro kohta T-test ehk rakendus on ka statistiliselt usaldusväärne. Google Pixel 3 puhul tekkis statistiliselt oluline erinevus, kuid keskmise absoluutse vea põhjal on rakendus ikkagi usaldusväärne.

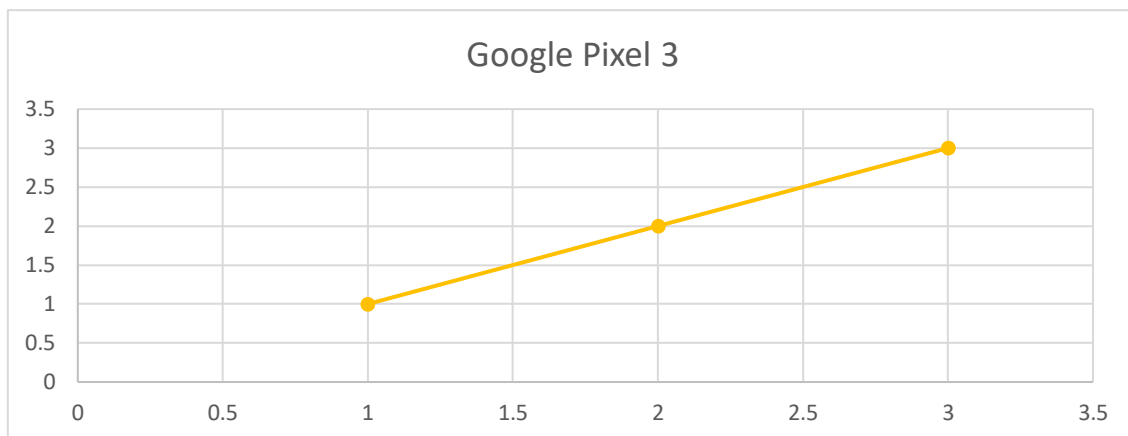
Instant Heart Rate: HR Monitor & Pulse Checker (R2) rakendusega tehtud mõõtmised näitavad, et kõik keskmised absoluutsed vead jäävad **alla** 3 bpm (Google Pixel 3 – 1,167 bpm; Samsung Galaxy S9 – 1,000 bpm; Huawei P20Pro - 1,500 bpm; Apple Iphone Xs – 1,333 bpm). Järelikult mõõdab rakendus pulssi usaldusväärselt. Seda fakti kinnitab ka Google Pixel 3, Samsung Galaxy S9 ja Apple Iphone Xs kohta T-test ehk rakendus on ka

statistiliselt usaldusväärne. Huawei P20 Pro puhul andis T-test raskesti tõlgendatava tulemuse, mis on ilmselt põhjustatud sellest, et andmed ei järginud ligikaudselt normaaljaotuse printsiipi (joonis 1) ehk ühte T-testi eeldust.



Joonis 1. Huawei P20 Pro mõõtmiste vahede absoluutväärtuste jaotus Instant Heart Rate: HR Monitor & Pulse Checker rakendusega.

Runtastic Heart Rate Monitor & Pulse Checker (R3) rakendusega tehtud mõõtmised näitavad, et kõik keskmised absoluutsed vead jäävad **alla** 3 bpm (Google Pixel 3 – 2,333 bpm; Samsung Galaxy S9 – 2,000 bpm; Huawei P20Pro – 2,000 bpm; Apple Iphone Xs – 2,500 bpm). Järelikult mõõdab rakendus pulssi usaldusväärset. Seda kinnitab ka Samsung Galaxy S9, Huawei P20 Pro ja Apple Iphone Xs kohta T-test ehk rakendus on ka statistiliselt usaldusväärne. Google Pixel 3 puhul andis T-test raskesti tõlgendatava tulemuse, mis on ilmselt põhjustatud sellest, et andmed ei järginud ligikaudselt normaaljaotuse printsiipi (joonis 2) ehk ühte T-testi eeldust.



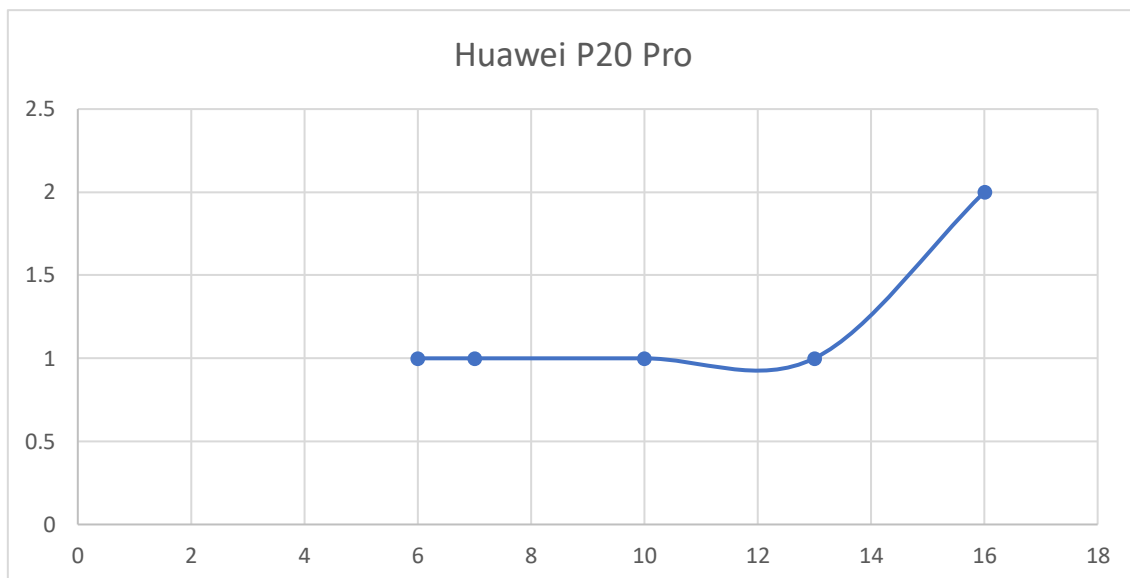
Joonis 2. Google Pixel 3 mõõtmiste vahede absoluutväärtuste jaotus Runtastic Heart Rate Monitor & Pulse Checker rakendusega.

Samsung Health (R5) rakendusega tehtud mõõtmised näitavad, et keskmine absoluutne viga jääb **alla** 3 bpm (Samsung Galaxy S9 – 1,833 bpm). Järelikult mõõdab rakendus pulssi usaldusväärset. Seda kinnitab ka T-test, ehk rakendus on ka statistiliselt usaldusväärne.

Cardio: Heart Rate Monitor (R6) rakendusega tehtud mõõtmised näitavad, et keskmine absoluutne viga jääb **alla** 3 bpm (Apple Iphone Xs– 0,667 bpm). Järelikult mõõdab rakendus pulssi usaldusväärset. Seda kinnitab ka T-test, ehk rakendus on ka statistiliselt usaldusväärne.

Mõõtmistulemused kinnitavad, et kategooria 2 rakendused (ehk madalalt hinnatud ja väikse installimise arvuga rakendused) **ei mõõda** pulssi usaldusväärset. See tähendab, et kõikide nende rakenduste keskmised absoluutsed vead jäävad **üle** 3 pulsilöögi minutis.

Heart Rate Monitor NITI (R4) rakendusega tehtud mõõtmised näitavad, et kõik keskmised absoluutsed vead jäävad **üle** 3 bpm (Google Pixel 3 – 10,500 bpm; Samsung Galaxy S9 – 17,833 bpm; Huawei P20Pro – 11,333 bpm). Järelikult ei mõõda rakendus pulssi usaldusväärset. Seda kinnitab ka Google Pixel 3 ja Samsung Galaxy S9 kohta T-test ehk rakendus ei ole ka statistiliselt usaldusväärne. Huawei P20 Pro puhul andis T-test raskesti tõlgendatava tulemuse, mis on ilmselt põhjustatud sellest, et seotud paaride tulemuste vahel oli märkimisväärne erinevus ning andmed ei järginud ligikaudselt normaaljaotuse printsiipi (joonis 3) ehk T-testi eeldused (3) ja (4) olid täitmata.



Joonis 3. Huawei P20 Pro mõõtmiste vahede absoluutväärtuste jaotus Heart Rate Monitor NITI rakendusega.

Free Heart Rate (R7) rakendusega tehtud mõõtmised näitavad, et keskmine absoluutne viga jääb **üle** 3 bpm (Apple Iphone Xs– 4,333 bpm). Järelikult ei ole rakendus usaldusväärne. Seda kinnitab ka T-test, ehk rakendus ei ole ka statistiliselt usaldusväärne.

Lisaks kinnitavad mõõtmistulemused, et telefonide lõikes ei teki erinevusi. Kõik telefonid mõõtsid Kategooria 1 rakendustega (ehk kõrgelt hinnatud ja suure installimise arvuga rakendustega) pulssi usaldusväärsetl. See tähendab, et keskmine absoluutne viga jäi kõikide telefonidega **alla** 3 bpm. Samuti mõõtsid kõik telefonid kategooria 2 rakendustega (ehk madalalt hinnatud ja väikese installimise arvuga rakendustega) pulssi mitte usaldusväärsetl. See tähendab, et keskmine absoluutne viga jäi **üle** 3 bpm.

4.2 Südame löögisageduse muutlikkuse mõõtetulemuste analüüs

Südame löögisageduse muutlikkust ei õnnestunud lõputöö käigus mõõta. Põhjuseks oli haiglates vajalike seadmete puudumine. Töö autor tegi pulsi ja hapniku kontsentratsiooni mõõtmisel koostööd Ida-Tallinna Keskhaiglaga, kuid seal ei olnud võimalik südame löögisageduse muutlikkust mõõta. Lisaks suhtles töö autor Regionaalhaiglaga ning ka seal selgus, et südame löögisageduse muutlikkust ei ole võimalik Regionaalhaiglas mõõta. Lääne-Tallinna Keskhaiglast ei saanud autor HRV mõõtmise kohta vastust.

4.3 Hapniku kontsentratsiooni mõõtetulemuste analüüs

Lõputöö tulemustest selgus, et rakendused mõõdavad hapniku kontsentratsiooni veres vägagi täpselt, kuid mitte identselt meditsiiniliste kalibreeritud seadmega. Selleks, et hinnata rakenduste kasutatavust reaalses elus püstitatakse järgmine väide: Kui keskmine absoluutne viga jääb **alla** 1 protsendi on rakendus tavainimese jaoks piisavalt täpne, et teda usaldusväärseks nimetada. See suurus on võetud nii väike, kuna terve inimese hapniku kontsentratsioon veres jääb 94% kuni 100% vahemikku. Mõlema patsiendi tervislik seisund oli samuti hea. Selleks, et hinnata mõõtetulemuste relevantsust, on kasutatud T-testi, et selgitada välja, kas tulemused on statistiliselt usaldusväärsed. Tähele tuleb panna, et ka siin on edaspidi juttu usaldusväärsusest ja statistilisest usaldusväärsusest erinevates kontekstides.

Samsung Health (R5) rakendusega tehtud mõõtmised näitavad, et keskmine absoluutne viga jääb **alla** 1 protsendi (Samsung Galaxy S9 – 0,7%). Järelikult mõõdab rakendus hapniku kontsentratsiooni veres usaldusväärset. Seda kinnitab ka T-test, ehk rakendus on ka statistiliselt usaldusväärne.

Pulse Oximeter (R8) rakendusega tehtud mõõtmised näitavad, et keskmine absoluutne viga jääb **alla** 1 protsendi (Apple Iphone Xs – 0,7%). Järelikult mõõdab rakendus hapniku kontsentratsiooni veres usaldusväärset. Seda kinnitab ka T-test, ehk rakendus on ka statistiliselt usaldusväärne.

4.4 Võrdlus publitseeritud materjalidega

European Journal of Preventive Cardiology avaldas 2017. aastal artikli pealkirjaga „Accuracy of smartphone apps for heart rate measurement“, kus võeti uurimise alla nutitelefonide rakendustega mõõdetava südame löögisageduse täpsus. Tehtud uuringust järeldus, et keskmine absoluutne viga oli Instant Heart Rate rakendusega 4,5 ning Heart Fitness rakendusega. Uuringus kasutati nutitelefoni sama meetodikat nagu käesolevas töös on kasutatud. Oluline aspekt uuringu juures on, et telefonidest oli kasutusel Iphone 4 ja Iphone 5, mis on vastavalt üheksa ja seitse aastat vanad mudelid (sel ajal olid vastavalt seitse ja viis aastat vanad mudelid). [22]

Journal of Medical Systems avaldas 2016. aastal artikli, mille pealkiri oli „A Pulse Rate Estimation Algorithm Using PPG and Smartphone Camera”. Uuringu tulemustest järeldus, et nutitelefoni mõõdetud pulss erines reaalsest pulsist maksimaalselt 3 bpm võrra. Seejuures on oluline, et kasutusel ei olnud mõni tavaline nutitelefoni rakendus, vaid autorite endi loodud algoritm. [23]

International Conference on Networking Systems and Security (NSysS) avaldas 2015 aastal uuringu pealkirjaga „Non-invasive heart rate measuring smartphone applications using on-board cameras: A short survey”. Uuringus oli kasutusel 5 rakendust, millest 2 langesid kokku käesolevas uurimistöös olnud rakendustega. Nendeks olid Instant Heart Rate ja Runtastic Heart Rate. Uuringust selgus, et rakenduste vahel ei tekkinud suurt erinevust. Tulemuste võrdlemiseks kasutati selles töös keskmist ruutviga. Sellest tulenevalt, ei ole tulemused otseselt võrreldavad käesoleva uurimistöoga. Küll aga tasub tähele panna, et rakenduste lõikes ei tekkinud suuri erinevusi. [24]

International Conference on Control, Instrumentation, Energy & Communication avaldas 2014. aastal uuringu pealkirjaga „Determination of SpO₂ and Heart-rate using Smartphone Camera“. Uuringu käigus arendati rakendus, mis mõõdab nutitelefoni kaameraga inimese hapniku kontsentratsiooni veres. Hiljem võrreldi nutitelefoni rakendusega tehtud mõõtmisi pulssoksümeetriaga. Tulemustest järeldus, et keskmiselt erines rakendusega mõõdetud SpO₂ 0,9 võrra pulssoksümeetriaga mõõdetud SpO₂-st. [25]

International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA) avaldas 2015. aastal uuringu pealkirjaga „Blood Oxygen Saturation Measurement By Smartphone Camera“, mille käigus mõõdeti nutitelefoni kaameraga inimese SPO₂ sisaldust veres. Tulemusi analüüsi ning võrreldi pulssoksümeetriaga ning keskmiselt erines nutitelefoni kaameraga mõõdetud hapniku kontsentratsioon veres 0,55 võrra pulssoksümeetriaga mõõdetud näidust. [26]

4.5 Järeldused

Lõputöö resultaatina selgus, et nutitelefoni valdkonnas on potentsiaali väga palju. Kõik kategooria 1 rakendused mõõtsid pulssi usaldusväärset. Samas kõik kategooria 2 rakendused mõõtsid pulssi mitte usaldusväärset. Kategooria 2 rakendused olidki lõputöösse valitud demonstreerimaks, et „populaarsete“ ja „mittepopulaarsete“

rakenduste vahel on erinevus. Mõlemad SpO₂ mõõtmise jaoks mõeldud rakendused mõõtsid hapniku kontsentratsiooni veres samuti usaldusväärset. Täieliku ja detailse ülevaate saamiseks tuleb antud teemat põhjalikumalt uurida. Käesolev lõputöö on annab hea algse ülevaate hetke olukorrast ning on hea lähtepunkt edasiste suuremahuliste uuringute jaoks. Edaspidi tasub uurida, kas tekib erinevus odavama klassi telefonide ja tippmudelite vahel. Ning kindlasti tasub uurida, kas rakenduste mõõtmistäpsus jääb samaks, kui mõõtmised ei ole tehtud puhkeolekus, vaid on mõõdetud peale füüsilist aktiivsust.

5 Kokkuvõte

Töö eesmärgiks oli võrrelda nutitefonidega mõõdetavaid terviseandmeid meditsiiniliste kalibreeritud seadmetega ja uurida välja kui suured erinevused tekivad nutitelefoni ja meditsiinilise seadme vahel ning selgitada välja, kas tekivad erinevused erinevate tootjate telefonide ja/või erinevate rakenduste lõikes.

Andmete omavaheliseks võrdlemiseks ja tulemuste olulisuse kontrollimiseks on kasutatud kahte erinevat arvutusmeetodit. Kõigepealt on esitatud keskmine absoluutne viga (MAE), mis näitab kui palju keskmiselt nutitelefoni mõõdetud tulemus erineb meditsiinilise kalibreeritud seadme näidust. Seejärel on kontrollitud, kas mõõtmistulemustes esineb statistiliselt oluline erinevus kasutades selleks sõltuvate valimite T-testi.

Töö tulemusena selgus, et nutitefonid mõõdavad pulssi ja hapniku kontsentratsiooni veres (SpO_2) usaldusväärselt, kuid mitte identselt meditsiinilise seadmega. Erinevate tootjate telefonide vahel märgatavaid erinevusi ei tekkinud. Kõik kategooria 1 (kõrgelt hinnatud ja/või suure installimise arvuga) rakendused mõõtsid pulssi usaldusväärselt ehk nende keskmine absoluutne viga jäi **alla** 3 bpm. Kõik kategooria 2 (madalalt hinnatud ja/või väikse installimise arvuga) rakendused mõõtsid pulssi mitteusaldusväärselt ehk nende keskmine absoluutne viga jäi **üle** 3 bpm. Mõlemad rakendused, mis olid kasutusel hapniku kontsentratsiooni mõõtmisel veres, mõõtsid SpO_2 taset usaldusväärselt ehk nende keskmine absoluutne viga jäi **alla** 1 protsendi. Vajalike meditsiiniliste seadmete puudumise tõttu jäi südame löögisageduse muutlikkus (HRV) mõõtmata. Töös avaldatud tulemused olid kooskõlas eelnevalt publitseeritud materjalidega.

Töös püstitatud hüpoteesidest said kinnitust 3. Erinevate tootjate telefonide lõikes tervisandmete mõõtmisel märkimisväärsed erinevusi ei tekkinud. Samuti ei tekkinud märgatavaid erinevusi erinevate kategooria 1 (kõrgelt hinnatud ja/või suure installimise arvuga) rakenduste vahel. Küll aga tekkisid erinevused kategooria 1 (kõrgelt hinnatud ja/või suure installimise arvuga) ja kategooria 2 (madalalt hinnatud ja/või väikse installimise arvuga) rakenduste vahel. Enamasti ei tekkinud ka nutitelefoni ja meditsiinilise seadme mõõtetulemuste vahel statistiliselt olulist erinevust, kuid väikse valimi tõttu ei andnud sõltuvate valimite T-test alati adekvaatselt tõlgendatavat tulemust.

Autor soovib tänada oma juhendajat Gunnar Pihot, kaasjuhendajat Peeter Rossi ja Kirsti Rummat, kes olid abiks lõputöö koostamisel. Samuti soovib autor tänada Raigo Neudorfi ja aktsiaselts Telia Eestit, Ida-Tallinna Keskhaiglat ja Karel Kristi ning rakenduse arendajaid, kes võimaldasid teaduslikuks tööks tasuta litsentsi.

Kasutatud kirjandus

- [1] Meditsiinisõnastik: eestikeelsed terminid koos seletuste ning ladina, inglise ja soome vastetega., Tallinn: Medicina, 2004.
- [2] P. Christensson, "Android Definition," 16.05.2016. [Võrgumaterjal]. Available: <https://techterms.com/definition/android>. [Kasutatud 01.04.2019].
- [3] P. Christensson, "iOS Definition," 22.10.2011. [Võrgumaterjal]. Available: <https://techterms.com/definition/ios>. [Kasutatud 01.04.2019].
- [4] K. Taylor ja L. Silver, „Smartphone Ownership Is Growing Rapidly Around the World, but Not Always Equally,“ Pew Research Center, 2019.
- [5] "HOW MANY PHONES ARE IN THE WORLD?," Bankmycell, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.bankmycell.com/blog/how-many-phones-are-in-the-world>. [Kasutatud 01.04.2019].
- [6] BBC, "World's first 'smartphone' celebrates 20 years," BBC, 15.08.2014. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.bbc.com/news/technology-28802053>. [Kasutatud 05.04.2019].
- [7] Spinfold, "History of first touchscreen phone," [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.spinfold.com/first-touchscreen-phone/>. [Kasutatud 06.04.2019].
- [8] A. Pothitos, "The History of the Smartphone," 31.10.2016. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.mobileindustryreview.com/2016/10/the-history-of-the-smartphone.html>. [Kasutatud 06.04.2016].
- [9] N. Islam and R. Want, "Smartphones: Past, Present, and Future," *IEEE Pervasive Computing*, vol. 4, no. 13, October 2014.
- [10] "Mobile Operating System Market Share Worldwide," Statcounter GlobalStats, March 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <http://gs.statcounter.com/os-market-share/mobile/worldwide>. [Kasutatud 20.03.2019].
- [11] Statista, "Most popular Google Play app categories as of 1st quarter 2018, by share of available apps," Statista, 18.04.2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.statista.com/statistics/279286/google-play-android-app-categories/>. [Kasutatud 22.04.2019].
- [12] Statista, "Most popular Apple App Store categories in May 2019, by share of available apps," Statista, May 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.statista.com/statistics/270291/popular-categories-in-the-app-store/>. [Kasutatud 10.05.2019].
- [13] K. Pilt, "Veresoonte optiline uurimine," *Studioosus*, p. 21, November 2011.
- [14] A. Sauga, Statistika õpik majanduseriala, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2017, p. 326.
- [15] Laerd Statistics, "Dependent T-Test using SPSS Statistics," Laerd Statistics, [Võrgumaterjal]. Available: <https://statistics.laerd.com/spss-tutorials/dependent-t-test-using-spss-statistics.php>. [Kasutatud 10.05.2019].
- [16] Elisa, "Uued lipulaevad andsid turule hoogu: mobiiltelefone osteti Eestis 10,6 miljoni euro eest," Geenius Meedia OÜ, 24.04.2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://digi.geenius.ee/blogi/elisa-blogi/uued-lipulaevad-andsid-turule-hoogu-mobiiltelefone-osteti-eestis-106-miljoni-euro-eest/>. [Kasutatud 27.04.2019].
- [17] S. Liiva, "Ülevaade: need olid mullu eestlaste seas kõige populaarsemad telefonid," Postimees, 24.01.2017. [Võrgumaterjal]. Available:

<https://tehnika.postimees.ee/3989875/ulevaade-need-olid-mullu-eestlaste-seas-koige-populaarsemad-telefonid>. [Kasutatud 11.04.2019].

- [18] American Heart Association, "All About Heart Rate (Pulse)," American Heart Association, 31.07.2015. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.heart.org/en/health-topics/high-blood-pressure/the-facts-about-high-blood-pressure/all-about-heart-rate-pulse>. [Kasutatud 03.04.2019].
- [19] R. Mccraty and F. Shaffer, "Heart Rate Variability: New Perspectives on Physiological Mechanisms, Assessment of Self-regulatory Capacity, and Health Risk," *Global Advances in Health and Medicine*, vol. 4, no. 1, pp. 46-61, January 2015.
- [20] F. Shaffer and J. P. Ginsberg, "An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms," *Frontiers in Public Health*, vol. 5, 28.09.2017.
- [21] Philips Medical Systems, "Understanding Pulse Oximetry," 28.01.2003. [Võrgumaterjal]. Available: http://incenter.medical.philips.com/doclib/enc/fetch/586262/586457/Understanding_Pulse_Oximetry.pdf%3Fnodeid%3D586458%26vernum%3D2. [Kasutatud 03.04.2019].
- [22] T. Coppetti, A. Brauchlin, S. Müggler, A. Attinger-Toller, C. Templin, F. Schönraht, J. Hellermann, T. F. Lüscher, P. Biaggi and C. A. Wyss, "Accuracy of smartphone apps for heart rate measurement," *European Journal of Preventive Cardiology*, vol. 24, no. 12, pp. 1287-1293, August 2017.
- [23] S. A. Siddiqui, Y. Zhang, Z. Feng and A. Kos, "A Pulse Rate Estimation Algorithm Using PPG and Smartphone Camera," *Journal of Medical Systems*, vol. 40, no. 5, p. 126, 11.04.2016.
- [24] M. T. I. Papon, I. Ahmad, N. Saquib and A. Rahman, "Non-invasive heart rate measuring smartphone applications using on-board cameras: A short survey," in *2015 International Conference on Networking Systems and Security (NSysS)*, Dhaka, 2015.
- [25] A. K. Kanva, C. J. Sharma and S. Deb, "Determination of SpO2 and heart-rate using smartphone camera," in *2014 International Conference on Control, Instrumentation, Energy and Communication (CIEC)*, Calcutta, 2014.
- [26] F. Lamonaca, D. L. Carni, D. Grimaldi, A. Nastro, M. Riccio and V. Spagnolo, "Blood oxygen saturation measurement by smartphone camera," in *2015 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA)*, Torino, 2015.

Lisa – T-testi väljundtabelid

Tabel 1. Google Pixel 3 T-testi väljundtabel Heart Rate Monitor Accurate (R1) rakenduse pulsi tulemuste kohta.

	<i>rakendus</i>	<i>meditsiiniline seade</i>
keskväärtus	60,500	62,333
dispersioon	27,100	34,267
vaatluste arv	6,000	6,000
vabadusastmete arv	5,000	
t statistik	-4,568	
olulisuse tõenäosus	0,006	
t kriitiline väärtus	2,571	

Tabel 2. Google Pixel 3 T-testi väljundtabel Instant Heart Rate: HR Monitor & Pulse Checker (R2) rakenduse pulsi tulemuste kohta.

	<i>rakendus</i>	<i>meditsiiniline seade</i>
keskväärtus	61,333	62,167
dispersioon	17,067	18,167
vaatluste arv	6,000	6,000
vabadusastmete arv	5,000	
t statistik	-1,746	
olulisuse tõenäosus	0,141	
t kriitiline väärtus	2,571	

Tabel 3. Google Pixel 3 T-testi väljundtabel Runtastic Heart Rate Monitor & Pulse Checker (R3) rakenduse pulsi tulemuste kohta.

	<i>rakendus</i>	<i>meditsiiniline seade</i>
keskväärtus	59,833	62,167
dispersioon	10,967	11,767
vaatluste arv	6,000	6,000
vabadusastmete arv	5,000	
t statistik	-7,000	
olulisuse tõenäosus	0,001	
t kriitiline väärtus	2,571	

Tabel 4. Google Pixel 3 T-testi väljundtabel Heart Rate Monitor NITI (R4) rakenduse pulsi tulemuste kohta.

	<i>rakendus</i>	<i>meditsiiniline seade</i>
keskväärtus	71,667	61,833
dispersioon	39,467	19,367
vaatluste arv	6,000	6,000
vabadusastmete arv	5,000	
t statistik	2,704	
olulisuse tõenäosus	0,043	
t kriitiline väärtus	2,571	

Tabel 5. Samsung Galaxy S9 T-testi väljundtabel Heart Rate Monitor Accurate (R1) rakenduse pulsi tulemuste kohta.

	<i>rakendus</i>	<i>meditsiiniline seade</i>
keskväärtus	62,833	64,167
dispersioon	27,367	43,767
vaatluste arv	6,000	6,000
vabadusastmete arv	5,000	
t statistik	-1,661	
olulisuse tõenäosus	0,158	
t kriitiline väärtus	2,571	

Tabel 6. Samsung Galaxy S9 T-testi väljundtabel Instant Heart Rate: HR Monitor & Pulse Checker (R2) rakenduse pulsi tulemuste kohta.

	<i>rakendus</i>	<i>meditsiiniline seade</i>
keskväärtus	66,667	67,333
dispersioon	21,067	20,667
vaatluste arv	6,000	6,000
vabadusastmete arv	5,000	
t statistik	-1,581	
olulisuse tõenäosus	0,175	
t kriitiline väärtus	2,571	

Tabel 7. Samsung Galaxy S9 T-testi väljundtabel Runtastic Heart Rate Monitor & Pulse Checker (R3) rakenduse pulsi tulemuste kohta.

	<i>rakendus</i>	<i>meditsiiniline seade</i>
keskväärtus	65,667	66,667
dispersioon	39,067	52,667
vaatluste arv	6,000	6,000
vabadusastmete arv	5,000	
t statistik	-1,118	
olulisuse tõenäosus	0,314	
t kriitiline väärtus	2,571	

Tabel 8. Samsung Galaxy S9 T-testi väljundtabel Samsung Health (R5) rakenduse pulsi tulemuste kohta.

	<i>rakendus</i>	<i>meditsiiniline seade</i>
keskväärtus	66,167	66,667
dispersioon	39,767	25,867
vaatluste arv	6,000	6,000
vabadusastmete arv	5,000	
t statistik	-0,460	
olulisuse tõenäosus	0,665	
t kriitiline väärtus	2,571	

Tabel 9. Samsung Galaxy S9 T-testi väljundtabel Heart Rate Monitor NITI (R4) rakenduse pulsi tulemuste kohta.

	<i>rakendus</i>	<i>meditsiiniline seade</i>
keskväärtus	84,167	66,333
dispersioon	147,367	25,067
vaatluste arv	6,000	6,000
vabadusastmete arv	5,000	
t statistik	5,935	
olulisuse tõenäosus	0,002	
t kriitiline väärtus	2,571	

Tabel 10. Huawei P20 Pro T-testi väljundtabel Heart Rate Monitor Accurate (R1) rakenduse pulsi tulemuste kohta.

	<i>rakendus</i>	<i>meditsiiniline seade</i>
keskväärtus	61,000	62,333
dispersioon	9,200	26,667
vaatluste arv	6,000	6,000
vabadusastmete arv	5,000	
t statistik	-1,305	
olulisuse tõenäosus	0,249	
t kriitiline väärtus	2,571	

Tabel 11. Huawei P20 Pro T-testi väljundtabel Instant Heart Rate: HR Monitor & Pulse Checker (R2) rakenduse pulsi tulemuste kohta.

	<i>rakendus</i>	<i>meditsiiniline seade</i>
keskväärtus	62,333	63,833
dispersioon	30,267	38,167
vaatluste arv	6,000	6,000
vabadusastmete arv	5,000	
t statistik	-2,666	
olulisuse tõenäosus	0,045	
t kriitiline väärtus	2,571	

Tabel 12. Huawei P20 Pro T-testi väljundtabel Runtastic Heart Rate Monitor & Pulse Checker (R3) rakenduse pulsi tulemuste kohta.

	<i>rakendus</i>	<i>meditsiiniline seade</i>
keskväärtus	63,000	63,667
dispersioon	14,400	18,667
vaatluste arv	6,000	6,000
vabadusastmete arv	5,000	
t statistik	-0,698	
olulisuse tõenäosus	0,516	
t kriitiline väärtus	2,571	

Tabel 13. Huawei P20 Pro T-testi väljundtabel Heart Rate Monitor NITI (R4) rakenduse pulsi tulemuste kohta.

	<i>rakendus</i>	<i>meditsiiniline seade</i>
keskväärtus	73,000	64,000
dispersioon	137,600	19,200
vaatluste arv	6,000	6,000
vabadusastmete arv	5,000	
t statistik	2,529	
olulisuse tõenäosus	0,053	
t kriitiline väärtus	2,571	

Tabel 14. Apple Iphone Xs T-testi väljundtabel Instant Heart Rate: HR Monitor & Pulse Checker (R2) rakenduse pulsi tulemuste kohta.

	<i>rakendus</i>	<i>meditsiiniline seade</i>
keskväärtus	64,333	63,333
dispersioon	19,067	11,867
vaatluste arv	6,000	6,000
vabadusastmete arv	5,000	
t statistik	1,118	
olulisuse tõenäosus	0,314	
t kriitiline väärtus	2,571	

Tabel 15. Apple Iphone Xs T-testi väljundtabel Runtastic Heart Rate Monitor & Pulse Checker (R3) rakenduse pulsi tulemuste kohta.

	<i>rakendus</i>	<i>meditsiiniline seade</i>
keskväärtus	64,000	65,833
dispersioon	12,800	29,367
vaatluste arv	6,000	6,000
vabadusastmete arv	5,000	
t statistik	-1,309	
olulisuse tõenäosus	0,247	
t kriitiline väärtus	2,571	

Tabel 16. Apple Iphone Xs T-testi väljundtabel Cardiio: Heart Rate Monitor (R6) rakenduse pulsi tulemuste kohta

	<i>rakendus</i>	<i>meditsiiniline seade</i>
keskväärtus	62,333	62,333
dispersioon	11,067	12,667
vaatluste arv	6,000	6,000
vabadusastmete arv	5,000	
t statistik	0,000	
olulisuse tõenäosus	1,000	
t kriitiline väärtus	2,571	

Tabel 17. Apple Iphone Xs T-testi väljundtabel Heart Rate Monitor: Pulse BPM (R7) rakenduse pulsi tulemuste kohta

	<i>rakendus</i>	<i>meditsiiniline seade</i>
keskväärtus	59,333	63,333
dispersioon	8,667	27,467
vaatluste arv	6,000	6,000
vabadusastmete arv	5,000	
t statistik	-2,981	
olulisuse tõenäosus	0,031	
t kriitiline väärtus	2,571	

Tabel 18. Samsung Galaxy S9 T-testi väljundtabel Samsung Health (R5) rakenduse SpO₂ tulemuste kohta.

	<i>rakendus</i>	<i>meditsiiniline seade</i>
keskväärtus	99,400	98,900
dispersioon	0,489	0,322
vaatluste arv	10,000	10,000
vabadusastmete arv	9,000	
t statistik	2,236	
olulisuse tõenäosus	0,052	
t kriitiline väärtus	2,262	

Tabel 19. Apple Iphone Xs T-testi väljundtabel Pulse Oximeter Heart Rate and Oxygen Monitor App (R8) rakenduse SpO₂ tulemuste kohta.

	<i>rakendus</i>	<i>meditsiiniline seade</i>
keskväärtus	99,200	99,100
dispersioon	0,844	0,322
vaatluste arv	10,000	10,000
vabadusastmete arv	9,000	
t statistik	0,318	
olulisuse tõenäosus	0,758	
t kriitiline väärtus	2,262	