

TARTU ÜLIKOOL
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Füüsika instituut

Markus Kivimägi

SATELLIITIDELT JA MAAPEALSETEST VAATLUSJAAMADEST
SAADUD SUMMAARSE KIIRGUSE VÕRDLUS EESTI ALAL

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Juhendaja: PhD Piia Post

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja: _____

Tartu 2020

SISUKORD

| | |
|--|----|
| INFOLEHT..... | 3 |
| KASUTATUD LÜHENDID..... | 4 |
| SISSEJUHATUS..... | 5 |
| 1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE..... | 6 |
| 1.1 Summaarse päikesekiirguse olemus..... | 6 |
| 1.2 Maapealsed mõõtmised..... | 7 |
| 1.3 Satelliitmõõtmised..... | 8 |
| 2. ANDMED..... | 11 |
| 2.1 Vaatlusjaamade andmed..... | 11 |
| 2.2 Satelliitandmed..... | 13 |
| 2.3 Vaatlusjaamade pilvisuse ja lume andmed..... | 17 |
| 3. MEETODID..... | 18 |
| 3.1 Andmete ettevalmistus analüüsiks..... | 18 |
| 3.2 Statistike arvutamine..... | 21 |
| 4. TULEMUSED JA ARUTELU..... | 22 |
| 4.1 Üldine keskmiste võrdlus..... | 22 |
| 4.2 Aastasisene võrdlus..... | 25 |
| 4.3 Aastatevaheline muutlikkus..... | 28 |
| 4.4 Võrdlus ilmastikunähtuste järgi..... | 30 |
| KOKKUVÕTE..... | 32 |
| SUMMARY..... | 34 |
| KASUTATUD ALLIKATE LOETELU..... | 36 |
| TÄNUAVALDUSED..... | 39 |
| LISAD..... | 40 |
| Lisa 1. Vaatlusjaamade mõõtetehnika..... | 40 |
| Lisa 2. Summaarse kiirguse hajvusdiagrammid päevaandmete põhjal perioodil 2005 kuni 2017..... | 40 |

INFOLEHT

Satelliitidelt ja maapealsetest vaatlusjaamadest saadud summaarse kiirguse võrdlus Eesti alal

Summaarsel kiirgusel on oluline osa kliima kujundamises ja taimestik, sisend füüsikalistes mudelites ja päikeseelektrijaamades. Selle ruumiliselt kvaliteetseks määramiseks on loodud satelliitandmestike, mille täpsust Eesti ala puhul on vähe uuritud. Antud töös võrreldi SARA 2.1 andmestiku Eesti alal oleva viie vaatlusjaamaga summaarse kiirguse päeva ja kuu keskmiste väärtuste osas ajavahemikul 2005 kuni 2017. Töö tulemusena leiti, et üldine erinevus on väike, aga esineb märkimisväärsed kõrvalekaldeid lühemal ajaskaalal. Kõige suuremad lahknevused esinesid märtsis ja aprillis. Lisaks anti ülevaade pilvede ja lumikatte olemasolu häiringust satelliitmõõtmistele.

Märksõnad: summaarne kiirgus, SARA 2.1, satelliitandmed, Eesti, aktinomeetria.

CERCS: T181 Kaugseire.

Comparison between satellite and ground station gathered total solar radiation data in the area of Estonia

Total solar radiation has an important role in shaping climate and vegetation. It is used in physical models and solar energy parks. Many satellite datasets have been created for getting high quality spatial information about its values. There has been little study about their accuracy in the area of Estonia. In this work SARA 2.1 dataset about total solar radiation daily and monthly values have been compared to five ground station gathered data in Estonia from 2005-2017. Results indicate that the overall difference is small, but notable differences appear in shorter timescale. Biggest differences are in March and April. In addition, overview of cloud and snow cover influence on satellite measuring precision is given.

Keywords: total solar radiation, SARA 2.1, satellite data, Estonia, actinometry.

CERCS: T181 Remote sensing.

KASUTATUD LÜHENDID

BSRN - Põhistandardi Pinnakiirguse Võrgustik (Baseline Surface Radiation Network)

GEBA - Globaalne Energiabilansi Arhiiv (Global Energy Balance Archive)

WRDC - Maailma Kiirguse Andmekeskus (The World Radiation Data Centre)

EUMETSAT - Meteoroloogiasatelliitide Kasutamise Organisatsioon (The European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites)

CM SAF - Kliimaseire Satelliidirakenduse Teenus (Satellite Application Facility on Climate Monitoring)

WMO - Maailma Meteoroloogiaorganisatsioon (World Meteorological Organization)

SARAH - maapinna päikesekiirguse andmestik (Surface Solar Radiation Data Set)

NetCDF - võrgu üldine andmevorm (Network Common Data Form)

CSV - komaga eraldatud väärtused (Comma-separated values)

NASA - USA kosmoseagentuur (National Aeronautics and Space Administration)

MVIRI - Meteosat'i nähtava ja infrapunakiirguse tuvastaja (Meteosat Visible Infrared Imager)

SEVIRI - pöörlev täiustatud nähtava ja infrapunakiirguse tuvastaja (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager)

SIS - maapinnale saabuv päikesekiirgus (Surface Incoming Solar Radiation)

UTC - maailmaaeg (Coordinated Universal Time)

SISSEJUHATUS

Päikesekiirgusel on oluline osa kliimasüsteemi kujundamises. Selleks, et aru saada muutustest keskkonnas on paratamatult vajalik uurida päikesega seonduvaid parameetreid nagu summaarne kiirgus. Seetõttu on ta sisend füüsikalistele mudelitele, mis uurivad erinevaid ilmastiku tingimusi ja muutusi. Päikesega seonduvate faktorite täpse selguse puudumise korral võidakse saada vigane arusaam keskkonnas toimuvatest protsessidest. Lisaks on see oluline suurus, mille kaudu saab planeerida ühiskonda efektiivsema tuleviku poole. Päikesekiirguse ruumilise ja ajalise varieeruvuse teadmine aitab valida päikesest elektrit tootvate jaamade optimaalseid asukohti, hinnata nende võimsust ja võimalusi. Nende rajamine on aja jooksul kasvanud ja tõenäoliselt on trend jätkuv, kuna seatud kliimanetraalsuse saavutamisel on tegemist tähtsa komponendiga. Taimestiku uurimise, põllumajanduse ja arhitektuuri vaatest on samuti tegemist olulise suurusega. Seetõttu on summaarse kiirguse võimalikult täpne määramine sotsiaal-majandusliku tähtsusega.

Summaarse kiirguse väärtuste kohta on aastakümneid kogutud andmeid maapealsetest jaamadest, aga kogu Eesti ala korraga võimaldavad vaadelda ainult satelliitmõõtmistest koostatud andmestikud. Viimaste usaldusväärsus on kehvem, aga tehnoloogia areng ja teadustöö tulemusel neid pidevalt parandatakse. Üks selline on SARAH, mida peetakse summaarse kiirguse osas üheks parimaks lahutusvõime ja täpsuse poolest. Eesti kohal on seda andmestikku vähe uuritud, aga teada olevate vaatlusjaamadega võrreldes on võimalik anda hinnang andmebaasi kvaliteedile. Varasemalt on sarnase analüüsi koostanud Epp Juust [1]. Vahepeal on välja töötatud andmebaasi uus versioon 2.1, mida on eelnevaga võrreldes täiendatud ja selle kohta uuringud puuduvad.

Antud töö võrdleb Eesti alalt saadud vaatlusjaamade summaarseid kiirguseid SARAH 2.1 andmestikus esinevaga. Selleks on antud ülevaade uuritavast suurusest, varasematest töödest ja andmete kogumise meetoditest. Seejärel on teostatud statistiline analüüs, mille tulemus on kvantitatiivne hinnang SARAH ja Eesti vaatlusjaamade väärtuste erinevustele. Kahel meetodil saadud suurusi on uuritud perioodil 2005 kuni 2017. Hinnang on antud lahkevusele kogu perioodil, eri kuudel ja aegadel. Lisaks on uuritud erinevust pilvisuse ja lume olemasolul korral, et saada üldine arusaam selliste ilmastikunähtuste mõjust satelliitmõõtmise täpsusele summaarse kiirguse osas.

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1 Summaarse päikesekiirguse olemus

Antud töös kasutatakse päikesekiirguse iseloomustamisel kiirgustihedust, mis näitab kiirgusvoo võimsust vastuvõtva pinnühiku kohta ja selle ühik on W/m^2 .

Päikesel toimuvate protsesside tagajärjel eraldub kosmosesse elektromagnetlaine ja väikeste aineosakestena pidevalt kiirgust, millest osa meie planeedi poole on suunatud. Enne Maani jõudmist päikesekiirguse väärtus oluliselt ei nõrgene, kuna kosmoses on aineosakeste jaotus väga hõre. Atmosfääri ülakihi kiirtega risti jõudes on tema aasta keskmine väärtus ligikaudu $1367 W/m^2$. See suurus on defineeritud kui solaarkonstant. Tegemist ei ole siiski rangelt võttes konstandiga, kuna antud väärtus sõltub Päikese aktiivsusest. Maa ja Päikese vaheline kaugus muutub aasta jooksul, seepärast on atmosfääri ülapiirile jõudev kiirgus juuni alguses ligikaudu 3,4% väiksem ja jaanuaris vastupidiselt 3,3% suurem keskmisest väärtusest [2].

Peale Maa ülakihi jõudmist tungib päikesekiirgus läbi atmosfääri, mille koostises on erinevad aineosakesed. Sõltuvalt aine koostisest ja faasist on ühenditel erinevad valgust hajutavad ja neelavad omadused. Seetõttu hakkab päikesekiirguse väärtus atmosfääri läbides langema. Kuna atmosfääri koostis on ajaliselt ja ruumiliselt muutuv, siis ei ole selle mõju päikesekiirgusele püsivalt sama. Osoon, pilved, veeaur ja aerosool on mõned tähtsamatest teadaolevatest komponentidest, mis maapinnani jõudva kiirguse väärtust enim mõjutavad [2].

Eristatakse kahte maapinnani jõudva päikesekiirguse komponenti. Otsene kiirgus, mis jõuab paralleelsete kiirte kimbuna ja hajuskiirgus, mis jõuab pärast õhu osakestel hajumist [2]. Antud töös uuritakse summaarse kiirguse ehk eelneva kahe väärtuse summat.

Atmosfääri tingimused määravad otsese ja hajuskiirguse osakaalu summaarses kiirguses. Otsese kiirguse osa suureneb pilvitu taeva, atmosfääri hea läbipaistvuse ja Päikese suurte kõrguste korral ehk valdavalt suvel. Hajuskiirguse osakaal suureneb talvel, kui on enamasti ülekaalus täispilvisus, sume taevast ja aluspinnast peegeldumise võime ehk albedo kõrge tänu lumikattele. Pilvisuse kasvades ei kahane ilmingimata summaarse kiirguse väärtus. Määrav on pilvede tüüp, hulk ja asukoht. Näiteks pilved, mis ei asetse päikesekehta ees võivad antud asukohas summaarset kiirgust hoopis suurendada, kuna hajuskiirgus suureneb ja otsene kiirgus jääb samaks. Kiirguse hajumine võib toimuda mitmeid kordi ja samuti peegeldub osa maapinnani jõudvast päikesekiirgusest tagasi atmosfääri. Seal saab see omakorda hajuda

tagasi maapinna suunas. On täheldatud, et pilvede mõju summaarsele kiirgusele on kõige suurem novembrist jaanuarini. Summaarse kiirguse suurimad väärtused esinevad kõrge Päikese ja läbipaistva atmosfääri korral. Seega on kõige väiksemad summaarse kiirguse väärtused reeglina detsembris ja suurimad juunis. Suurimat väärtuste varieeruvust on näha talvekuudel, mis on seotud maapinna lumikatte olemasolu ja muutlikusega [2].

Eesti geograafilise asetuse tõttu peetakse kõige olulisemaks teguriks summaarse päikesekiirguse väärtuste mõjutamises pilvisust. Eelkõige optiliselt paksud madalpilved, millel on tugev kiirgust hajutav mõju. Sesoonselt toovad kõrgeid pilvisusi Atlandi ookeanilt saabuvad tsüklonid ja samuti mõjutab kõrval asuv Läänemeri. Pilvede puudumise korral on suurem roll kiirguse hajutamisel veeauru ja aerosooli osakestel. Nende osakaalu pikaajalisi kõikumisi atmosfääris on seostatud inimtegevusega. Ebatavaliselt suuri ja lühiajalisi väärtuste kõrvalekaldeid on sageli seostatud vulkaani pursete või ulatuslikkude metsatulekahjudega, mille tagajärjel õhus olev aerosool vähendab atmosfääri läbipaistvust oluliselt [3].

1.2 Maapealsed mõõtmised

Aktinomeetria ehk päikesekiirguse leviku uurimine Maa atmosfääris ja aluspinnas sai Eestis alguse eelmisel sajandil. Esimesena alustati mõõtmistega 1930-ndatel Tartu Ülikooli meteoroloogia observatooriumis, mis asus Liivi tänaval Tartus. Teise maailmasõja ajal mõõtmised katkesid seadme hävinemise tõttu. Uuringud said uue alguse pärast sõda 1950. aastal, kui alustas tööd aktinomeetria jaam Tartu linna servas. 1965 viidi jaam üle ligi 20 km kaugusel asuvasse Tõravere alevikku. Teisena alustas tööd aastal 1956 Tiirikoja järvejaam, mis asub Peipsi järve läänekaldal. Mõlemas jaamas toimuvad päikesekiirguse mõõtmised tänapäevani ja sellega on antud suur panus kiirguskliima andmestiku loomisel, mis on võimaldanud uurida klimatoloogilisi trende [4]. Alates aastast 2005 on mõõtmisi teostatud lisaks Tallinn-Harkus, Vilsandil, Narvas, Pärnu-Saugal. Viimaste hulka on lisandunud Roomassaare (2008) ja Haapsalu (2011). Kliima uurimise seisukohalt on siiski vajalikud pikkade aegridade olemasolu ja seega jääb loota, et jätkub pidev mõõtmine tulevikus. Satelliitandmete valideerimise puhul aegridade pikkus sellist tähtsust ei oma, kuna ei uurita trendi, vaid teostatakse võrdlus.

Kiirgusjaamades mõõdetakse päikesekiirgust maapinna punktist ehk uuritava koha vahetus läheduses. Seetõttu annavad nad kvaliteetset informatsiooni ainult kindlas kohas ja nende

ruumiline mõõteala on väga väike. Kiirgusjaamade usaldusväarsus võib kõikuda ja jaamadevaheliselt varieeruda. Seda põhjustab tehnika, tehnoloogia, hoolduse, kalibreerimise ja ümbritsevate maamärkide erinevused. Nendest teguritest tingitud määramatusi on sageli raske täpselt määrata [5].

Kõige kvaliteetsemad maapealse mõõtmise andmeid summaarse kiirguse kohta on kogunud kiirgusbaasjaamade võrk lühendnimega BSRN [6]. Kahjuks kuulub sinna ligikaudu ainult 50 jaama üle maailma ja seega toimuvad mõõtmised väga hajutatult. Aastast 1999 liitus võrguga samuti Tartu-Tõravere jaam. Selleks, et sinna kuuluda peavad andmed olema väga usaldusväärselt kogutud ja seega on jaamadele kehtestatud kõrged nõuded. Seadmed peavad omama kvaliteetset sensorit, mida tuleb perioodiliselt hooldada ja kalibreerida. Lisaks peab mõõtmiste kõrvalt olema teostatud kvaliteedikontroll [7]. Tartu-Tõravere jaamas on kriteeriumite ja kvaliteedi tagamiseks kohapealne spetsialist, kes kontrollib automatiseeritud süsteemide mõõtmiste õigsust. Baasjaamade võrgu andmeid on kasutatud hulgalistes teadustöodes üle maailma [8, 9]. Lisaks on teisigi kiirgusjaamade andmebaase nagu globaalne energiabilansi arhiiv GEBA ja maailma kiirgusandmete baas WRDC. Tartu-Tõravere jaam kuulub mõlemasse [10].

Praegu tegeleb Eestis meteoroloogiliste vaatlusandmete kogumise ja korrastamisega Keskkonnaagentuuri alla kuuluv Riigi Ilmateenistus. Andmete kogumisel lähtutakse Maailma meteoroloogiaorganisatsiooni WMO nõuetest, juhistest ja standarditest. Eesti on WMO liige alates aastast 1992 [11].

1.3 Satelliitmõõtmised

Tänapäeval on satelliitandmete kasutamine laialt levinud erinevates valdkondades, kuna need võimaldavad reaajas vaadelda väga suurt osa Maast ja on head info edasikandjad. Satelliitidel paiknevad sensorid mõõdavad Maalt tulevat erineva lainepikkusega kiirgust. Mõõdetavat kiirgust uurides ja teades seda mõjutavaid karakteristikuid on võimalik teha järeldusi, mis aitavad Maal toimuvatest protsessidest paremini aru saada. Samuti kasutatakse satelliite päikesekiirguse uurimises. See võimaldab saada andmeid alade kohta, kus maapealseid mõõtejaamu ei esine ja mis on raskesti ligipääsetavad (nagu näiteks ookeanid ja mäestikud). Analüüsitakse mõõdetud kiirguse varieerumist ja käib pidev töö andmete

korrastamises, et panna üha täpsemalt paika seda mõjutavate tegurite osakaal ja suurendada andmete usaldusväärsust [12].

Euroopas haldab meteoroloogiliste satelliitide süsteeme EUMETSAT, mille liikmesriikide hulka kuulub 30 riiki. 2013. aastast on nende seas Eesti, mida esindab Riigi ilmteenistus. Kliima seirega satelliitidelt ja sealhulgas maapinna summaarse kiirguse andmete tagamisega tegeleb organisatsiooni haru CM SAF, mis tegutseb aastast 1999. Institutsiooni eesmärk on monitoorida ja tuvastada kliima muutusi. Täpsemalt tegeldakse satelliitsüsteemide kaudu saadud kliimaandmete kogumise, korrigeerimise ja avaldamisega. Tööd juhib Saksamaa ilmteenistus ja partnerite alla kuuluvad liikmesriikide ilmteenistused või kliima uurimisega seotud institutsioonid [13].

Esimene Euroopa satelliit ilmastiku tegurite uurimise eesmärgil Meteosat-1 saadeti geostatsionaarsele orbiidile aastal 1977. Sealt edasi on järjepidevalt töötatud andmete kogumise, korrastamise ja kvaliteedi kõrgendamisega. Satelliitidel paiknevaid instrumente on aja jooksul uuendatud ja vahetatud, et tagada täpsemad tulemused. Tänapäevaks on orbiidile saadetud 11 satelliiti, millest 4 on töökorras ja koguvad andmeid. Nendest kaks Meteosat satelliiti asuvad geostatsionaarsel ja kaks Metop satelliiti polaarsel orbiidil. Esimesed asuvad ligikaudu 36 000 km kaugusel maapinna ekvaatorist ja tiirlevad koos Maa pöörlemise nurkkiirusega. See võimaldab vaadelda suurt maa-ala ühtlase ruumi ulatuses. Asukoha tõttu jäävad mõõtmisalast välja polaaralad. Neid alasid registreerivad polaarorbitaalsed satelliidid, mis asuvad Maale palju lähemal (enamasti alla 1000 km kõrgusel) ja liiguvad üle pooluste tehes päevas ligikaudu 14 orbiiti ümber Maa. Seetõttu on nende resolutsioon parem, aga vaatlusalala väiksem ja ajas erinev. Seega mõlemal satelliidi tüübil esineb puudusi ja nad täiendavad teineteist [13].

Satelliidid mõõdavad maa-alade keskmisi väärtusi, mille suurused sõltuvad pardal oleva seadme lahutusvõimest. See-eest maapealsetes vaatlusjaamades toimuvad mõõtmised kindlas punktis, mis katab väga väikest ala. Lisaks on satelliitide usaldusväärsus piiratud, kuna mõõtmine toimub eemalt. Mõõtmiskoha ja uuritava ala vahele jääb atmosfäär, mis ei ole homogeense koostisega ja muutub ruumis ka ilmastikunähtuste tõttu. Kuna summaarse päikesekiirguse arvutamisel võetakse arvesse pilvede albedo, siis pilvede eristamata jätmine või heleda maapinna arvestamine pilvedena alandab meetodi tundlikkust [14]. Täpsemalt on leitud, et satelliitidelt teostatavad mõõtmised ei pruugi alati eristada pilvi heledast maapinnast, mis on kaetud näiteks lume, jää või teatud taimedega [7].

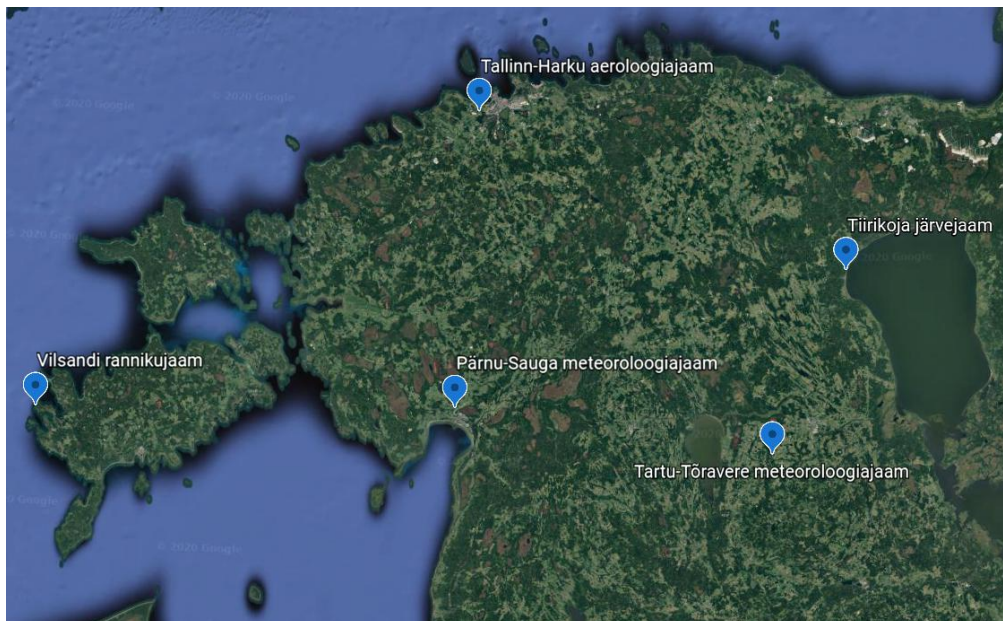
Lisaks on tuvastatud, et suuremad määramatused esinevad rannikualadel ja kõrgematel laiuskraadidel [15,16]. Seda kinnitab samuti tähelepanek, et Tartu-Tõravere jaama kõrvalekalded on suuremad kui lõunapoolsemate BSRN jaamade kõrvalekalle satelliitmõõtmistest [17]. Üks põhjus seisneb geostatsionaarsete satelliitide puhul asukohas. Kuna liikumistrajektor asub ekvaatoril, siis jäävad poolused satelliidi registreerimisalast välja. Kõrgematelt laiuskraadidelt tulev signaal peab läbima pikema tee atmosfääris ja seetõttu on atmosfääri olekut polaaraladele lähemal raskem määrata. Eriti oluline on see pilvede puhul, mille ruumiline varieeruvus võib olla kõrge. Selge taeva korral peaks mõõtetäpsus hoopis paranema laiuskraadi suurenemisega, kuna esineb vähem kiirgusväärtusi mõjutavat aerosooli. Intensiivsema aurumise tagajärjel on veeauru ja atmosfääri aerosooli kontsentratsioon suurim ekvaatoril ja väheneb pooluste poole liikudes.

Üldine arusaam on, et maapealsetel päikesekiirguse mõõtmistel saadud andmed on täpsemad kui kaudsed meetodid nagu satelliitidelt mõõtmine, kuna mõõtmine toimub uuritava koha vahetus läheduses [18]. Samas on maapealsete jaamade võrk hõre ja andmete ruumiliste jaotuste tegemine raske. Jaamadevahelise kauguse suurenemisel süveneb ilmastikunähtuste erinevuste tõenäosus, millest omakorda on sõltuvad kiirguste väärtused. Satelliitandmed seejuures annavad ruumiliselt tervikliku ülevaate, mille täpsust on võimalik hinnata võttes arvesse jaamade ja satelliitmõõtmiste väärtuste erinevusi.

2. ANDMED

2.1 Vaatlusjaamade andmed

Töös kasutatakse Keskkonnaagentuuri hallatava viie vaatlusjaama kogutud summaarse kiirguse andmeid. Jaamad asuvad Harkus, Vilsandil, Saugal, Tõraveres ja Tiirikojal. Jaamade nimed ja asukohad on toodud joonisel 2.1. Uuritav ajavahemik on alates 2005. aasta algusest kuni 2017. aasta lõpuni (01.01.2005 - 31.12.2017). Jaamad valiti selliselt, et oleksid olemas järjepidevalt teostatud mõõtmised antud ajavahemikul. Täpsed asukohtade koordinaadid ja kõrgused merepinnast on esitatud Tabelis 2.2.



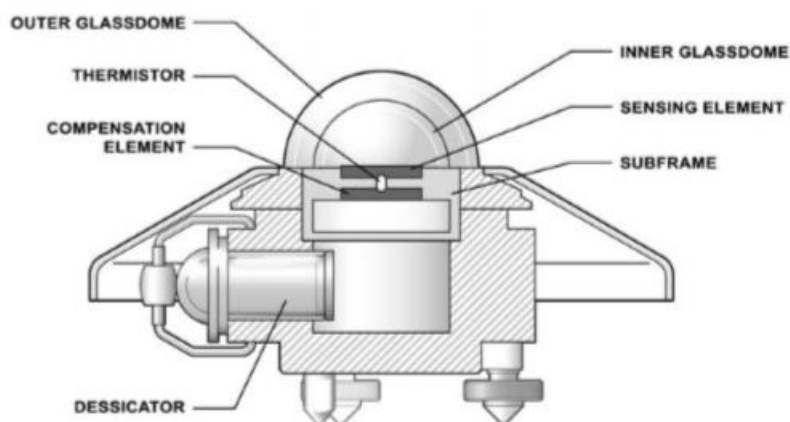
Joonis 2.1. Kasutatud jaamade nimed ja asukohad Eestis.

Tabel 2.2. Uurimuses kasutatud vaatlusjaamade ruumiandmed (Saadud Riigi Ilmateenistusest ja Keskkonnaministri määrusest nr 50)

| Nimi | Laius | Pikkus | Kõrgus merepinnast |
|----------------------------------|--------------|--------------|--------------------|
| Pärnu-Sauga meteoroloogiajaam | N 58°25'11'' | E 24°28'10'' | - |
| Tallinn-Harku aeroloogiajaam | N 59°23'53'' | E 24°36'10'' | 33.16 meetrit |
| Tartu-Tõravere meteoroloogiajaam | N 58°15'51' | E 26°27'41'' | 70.17 meetrit |
| Tiirikoja järvejaam | N 58°51'55'' | E 26°57'08'' | 32.59 meetrit |
| Vilsandi rannikujaam | N 58°22'58'' | E 21°48'51'' | 5.73 meetrit |

Valitud jaamades kasutatakse summaarse päikesekiirguse mõõtmiseks tootja Kipp & Zonen kvaliteetseid püranomeetri mudeleid CM21, CMP21, CM11 ja SMP21 [11]. Täpsemalt on mõõteriistade kasutamise ajad ja asukohad toodud Lisas 1. Ettevõtte Kipp & Zonen on tootnud püranomeetreid alates 1927. aastast ja on saavutanud turuliidri positsiooni. Tänu seadmete täpsusele kasutatakse neid samuti teaduslikul eesmärgil aktinomeetrias. Kõikidele mudelitele on omistatud ISO 9060:1990 kõrgeima klassi standardid ja kestavad keskmiselt üle kümne aasta enne, kui neid peab välja vahetama. Seadmete tegelik täpsus on paratamatult varieeruv, kuna sõltub erinevatest ilmastiku teguritest, nagu näiteks temperatuur ja kiirguse intensiivsus. Nimetatud standardi järgi eeldab WMO seadmetelt maksimaalselt 3% määramatust kiirguse tunni kogusummadelt ja 2% päeva kogusummadelt, usaldusnivooga 95%. Seadmed on võimelised tuvastama kiirgust spektrivahemikus 0,3 μm kuni 3 μm [19, 20, 21].

Esile toodud püranomeetrid on termoelektrilise tööpõhimõttega ehk seadmes olev tasapind neelab pealelangeva kiirguse, mille tagajärjel toimub materjali temperatuuri tõus. Seda muutust registreerib sensor, mis saadab edasi elektrisignaali. Seadme detektorit kaitseb poolsfäärilise topeltkihilise klaaskuppel, mis aitab lisaks murda ja suunata saabuvat päikesekiirgust mõõtekoha peale. Niimoodi on seade võimeline registreerima kiirgust ka madala päikese korral, mis asub horisondi lähedal. Seadme konstruktsioon on toodud joonisel 2.3. Mudelid on sarnase väljanägemisega ja erinevused esinevad väikestes modifikatsioonides. Näiteks CMP seeriad ei vaja eraldi vooluallikat, kuna on võimelised tootma toimimiseks vajamineva energia päikesekiirgusest. Seadme kiirguse mõõtmise meetod on kõikidel mudelitel sama [22].



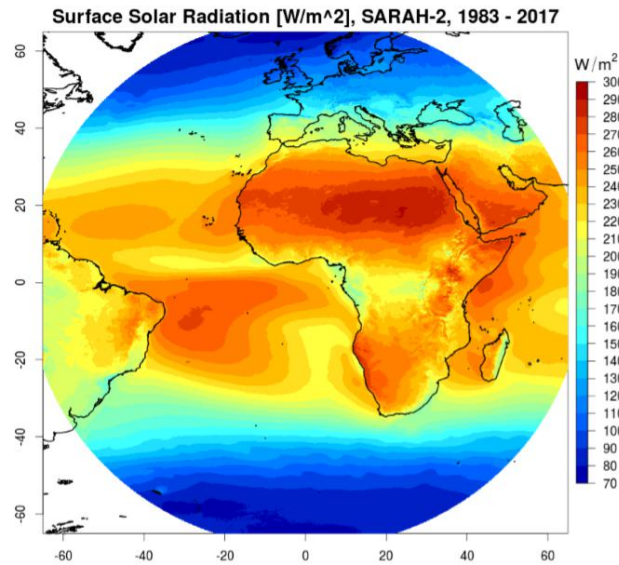
Joonis 2.3. Püranomeetri ehitus

Seadmetele on soovituslik lisada juurde ventilaator andmete usalduse tõstmiseks. Selle puudumine võib tekitada nullnihke kuumadel päevadel või temperatuuride kõikumistel. Õhuringluse tagamine aitab hoida klaaskupli ühtlaselt läbipaistvana vähendades pinnale tekkivat määrdumist ja kondensatsiooni. Lisaks hooldab seade niimoodi ennast ise ja ei ole vajalik sagedane manuaalne hooldus [22]. Kõikides jaamades on ventilaator olnud kasutusel perioodil 2005-2018 välja arvatud Vilsandi rannikujaamas enne 2014. aastat.

Püranomeetrilt tulev signaal registreeritakse vaatlusjaamas minuti sagedusega ja andmed salvestatakse. Minutiandmetest arvutatakse iga tunni kohta keskmine, maksimum- ja miinimumväärtused. Igal täistunnil saadab automaatjaam tunniandmed CLIDATA kliimainfosüsteemi. Andmete kvaliteedikontroll toimub Keskkonnaagentuuri spetsialistide poolt. Tartu-Tõravere meteoroloogiajaamas toimub kiirgusandmete salvestamine minutiandmete tasandil, kus töödeldakse ja kontrollitakse mõõtmisandmed soovitud kujule kohapeal töötava spetsialisti poolt. Sealt edastatakse minutiandmed igakuiselt rahvusvahelisse kiirgusjaamade BSRN võrku, tunniandmed ilmasteenistuse infosüsteemi CLIDATA ja rahvusvahelisse WRDC ning GEBA andmebaasi. Antud töö jaoks on CLIDATA infosüsteemist saadud tunniandmete koondsummad ühikus MJ/m² tekstifailidena [1]

2.2 Satelliitandmed

Töös kasutatud satelliitandmed on võetud CM SAF maapinna päikesekiirguse andmete registrist SARAH (versioon 2.1) NetCDF failidena, kuhu on koondatud 35 aasta (1983-2017) jagu andmeid 0.05x0.05 kraadi võrgustikuna (WSG 84) [23]. Sealt on võetud maapinnale saabuva päikesekiirguse (SIS) päeva ja kuu keskmised väärtused ajavahemikul 2005 kuni 2017. Failidest on seejärel eraldatud eelmises peatükis mainitud vaatlusjaamade koordinaatide alusel viis erinevat aegrida. Selleks on kasutatud programmeerimiskeelt R ja CM SAF poolt koostatud tarkvara, mis eraldab andmed sisestava koordinaadi lähima andmepunkti kaudu [24]. Järgnevalt on NetCDF failid üle viidud CSV formaadile kasutades NASA poolt arendatud programmi Panoply [25]. Joonisel 2.4 on toodud SIS produkti klimatoloogilise keskmise ruumiline jaotus. Valgete alade kohta puuduvad registris andmed.



Joonis 2.4. SARA-H 2 klimatoloogiline keskmine SIS.

Uuritav ajavahemik koondab endas nii esimese, kui teise põlvkonna Meteosat geostatsionaarsete satelliitide andmeid. Satelliidid, mille andmeid on kasutatud, on toodud koos ajaperioodidega tabelis 2.5. Satelliidid asuvad ligikaudu 36 000 km kaugusel Maast ja nende orbiit kulgeb mööda ekvaatorit [26]. Nähtava ala ring ulatub ligikaudu -60° kuni 60° nii laiuses, kui pikkuses. Meteosat-7 on esimese ja ülejäänud teise põlvkonna satelliidid. See tähendab, et pardal olevad seadmeid on vahepeal uuendatud ja välja vahetatud. Esimene generatsioon on varustatud MVIRI ja teine generatsioon SEVIRI radiomeetriga [27].

Tabel 2.5. SARA-H andmebaasi teostamisel kasutatud satelliidid ja nende ajavahemikud ajaperioodil 2005-2017.

| Satelliit | Ajavahemik |
|-------------|-----------------------|
| Meteosat-7 | 01.01.2005-31.12.2005 |
| Meteosat-8 | 01.01.2006-10.04.2007 |
| Meteosat-9 | 11.04.2007-20.01.2013 |
| Meteosat-10 | 21.01.2013-31.12.2017 |

MVIRI radiomeetri spektrivahemik on $0,4-1,1 \mu\text{m}$ ja see koosneb kolmest erinevast kanalist. Ruumiline lahutusvõime on minimaalselt 5 km nadiiris ja seade teostab mõõtmist 30-minutiliste vahedega. SEVIRI radiomeetril on see-eest 12 erineva spektrivahemikuga kanalit, mille omavaheline kombineerimine võimaldab uurida erinevaid aluspindu ja tegureid täpsemalt. Nendest kolm (VIS-1, VIS-2, VIS-3) on spetsiaalselt päikesekiirguse uurimiseks, mis asuvad $0,6 \mu\text{m}$, $0,8 \mu\text{m}$ ja $1,6 \mu\text{m}$ juures. Seadme ruumiline lahutusvõime on minimaalselt

3 km nadiiris, välja arvatud nähtava kiirguse kõrgresolutsiooni kanal (1 km). Pooluste poole liikudes instrumentide ruumiline lahutusvõime kahaneb. Teise generatsiooni satelliit sooritab ligikaudu sada pööret minutis suunaga idast läände ja skaneerimisel kasutatakse peeglit, mille tulemusena salvestatakse pildid põhjast lõunasse 3750 pika ribana. Täispildi kuvamine võtab aega ligikaudu 12 minutit, seejärel toimub kalibreerimine ja algasendisse naasmine ehk seade on võimeline mõõtma iga 15 minuti tagant. Satelliitidelt saadud pildid kogutakse maapealsetes keskustes, kus andmetöötluse tagajärjel saadakse valmis produktid [28]. Selleks, et mõlema instrumendilt saadud väärtused oleksid andmebaasis ühtsed kasutatakse SEVIRI VIS-1 ja VIS-2 kanaleid ja lineaarset kombineerimismudelit [29]. Samuti on ajaline samm valitud vanema seadme järgi 30 minutit. Homogeensuse analüüsid näitavad, et SEVIRI poolt saadud andmeid võib kasutada eelnevate aegridade pikendamisel [30].

SIS on defineeritud kui maapinnale jõudev kiirgusvoog vahemikus 0.2 μm kuni 4 μm ja seda väljendatakse ühikuna W/m^2 . Selle arvutamine toimub kasutades Heliosat meetodit [27]:

$$SIS = SIS_{CLS} \cdot (1 - CAL) \quad (1)$$

Siin on:

SIS_{CLS} - maapinnale langev päikesekiirgus selge taeva korral;

CAL - efektiivne pilvede albeedo.

Kiirguse väärtused selge taeva korral leitakse kasutades kiirgusmudelit, mille sisendiks on atmosfääri oleku parameetrid, nagu näiteks veeaur, osoon, aerosool ja pinnase albeedo. Andmed saadakse Euroopa Keskpikkade Ilmaennustuste Keskusest (ECMWF), erinevatest järelanalüüsides ja tabelitest. Vahepealsete lünkade täitmisel kasutatakse interpoleerimist. Efektiivne pilvisuse albeedo leitakse see-eest ainult satelliitmõõtmiste kaudu. See on peegeldunud kiirguse suhe peegeldunud kiirgusesse selge taeva korral, mis on normaliseeritud maksimaalse pilve peegeldumisega [27]:

$$CAL = \frac{R - R_{sfc}}{R_{max} - R_{sfc}} \quad (2)$$

Tähised on:

R - mõõdetud kiirgusvoog;

R_{sfc} - peegeldunud kiirgusvoog selge taeva korral;

R_{max} - maksimaalne pilvedelt peegeldunud kiirgusvoog.

Nimetatutest näitajatest viimased kaks leitakse mõõdetud kiirguse kaudu kasutades statistilisi meetodeid. Seega kogu arvutuskäik tugineb ainult satelliidilt mõõdetud kiirgusele. Peegeldunud kiirguse väärtuste tundlikkus selge taeva korral sõltub pilvitute mõõtmiste arvust kuus. Igas regioonis ja aastaajal ei ole see alati võimalik ja seetõttu registreeritakse tegelikust väiksemad efektiivse pilvisuse väärtused. Seega regioonides ja perioodidel, kus asetsevad pilved pikka aega ja konstantselt, on mõõtmiste määramatus suurem. Valdavalt on tegemist talvel teostatud mõõtmistega laiuskraadidel üle +/- 60 kraadi, mis jäävad vaatevälja äärealadesse. Kui efektiivne pilvede albeedo tuvastatakse olevat suurem kui 0.8 või väiksem kui -0.2, siis võetakse arvesse optiliselt paksude pilvede omadusi ja korrigeeritakse tulemust eelnevate mõõtmiste põhjal [27].

Päeva ja kuu keskmisi kiirguse väärtusi arvutatakse [31]:

$$SIS_{DA} = SIS_{CLSDA} \frac{\sum_{i=1}^n SIS_i}{\sum_{i=1}^n SIS_{CLS_i}} \quad (3)$$

Siin on:

SIS_{DA} - päeva/kuu keskmine SIS;

SIS_{CLSDA} - päeva/kuu keskmine SIS selge taeva korral;

SIS_i - SIS satelliitpildi i korral;

SIS_{CLS_i} - selge taeva SIS satelliitpildi i korral;

n - mõõtmiste arv antud päeval/kuul.

Päeva keskmised võetakse ööpäevaste tsüklikena ja nende arvutamise eelduseks on vähemalt 3 mõõtmist päeva kohta. Vastasel juhul jääb väärtus selle piksli kohal arvutamata. Kuu keskmised arvutatakse omakorda päeva keskmiste aritmeetilise keskmisena. Siin on miinimumnõue vähemalt 20 eksisteerivat päeva keskmist piksli kohta. Informatsioon, kui mitut mõõtmist keskmise arvutamisel kasutati on NetCDF failis lisa kihina [27].

CM SAF on BSRN jaamadega (sh Tartu-Tõravere) valideerimisel arvutanud SIS päeva ja kuu keskmistele erinevusele statistikud. Samu on kasutatud töö tulemuste leidmisel ja neid kirjeldatakse järgnevas meetodite peatükis. Nende saadud tulemused on toodud tabelis 2.6. Lisaks on pandud valideerimise ülemiseks läveks 13 W/m² kuu ja 20 W/m² päeva andmete absoluutse kõrvalekalde analüüsiks. Kuu keskmiste puhul ületati seda 5,5% ja päeva keskmiste korral 16.8% juhtudest. Siia pole juurde arvestatud maapealsete jaamade määramatust, mida hinnatakse 5 W/m² BSRN jaamadele standardi järgi. Kõige optimaalsemaks täpsuseks hinnatakse ainuüksi SARAH meetodile 5 W/m² kuu ja 12 W/m² päeva keskmistele [32].

Tabel 2.6 SARAH 2.1 SIS valideerimisel BSRN jaamade andmetega saadud statistikud [32].

| Statistik/ Andmetüüp | Keskmine kõrvalekalle [W/m ²] | Keskmine absoluutne kõrvalekalle [W/m ²] | Standardhälve [W/m ²] |
|-------------------------|--|---|--------------------------------------|
| Kuu keskmine | 1,59 | 5,19 | 6,96 |
| Päeva keskmine | 1,51 | 11,70 | 17,20 |

2.3 Vaatlusjaamade pilvisuse ja lume andmed

Kahest eelnevalt mainitud andmestikust on filtreerimiseks kasutatud pilvisuse ja lume olemasolu andmeid. Selleks on kasutatud samade vaatlusjaamade kogutud informatsiooni nende ilmastikunähtuste kohta.

Pilvisuse andmed on saadud inimvaatlustena, mis toimusid päevas kaheksal korral. Vaatlused on salvestatud täistundidel kell 6, 9, 12, 15, 18, 21, 00 ja 03 (UTC ajavöönd). Töös kasutatud üldpilvisus näitab pilvede hulga üldist hetkeseisu kümne palli skaalal ehk null tähendab täiesti pilvitut ja kümme lauspilvisust. Väärtusega 13 on kirjeldatud udu, mille korral polnud võimalik pilvisust määrata. Siinkohal on välja jäetud Pärnu-Sauga ja Tiirikoja, kuna andmete kogumise meetodid olid vahepeal muutunud.

Lumikatte olemasolu kohta on andmed saadud Tartu-Tõravere vaatlusjaamast perioodi 2005 kuni 2013 kohta. Antud jaamas toimub lumikatte paksuse mõõtmine iga päev kell 6 (UTC ajavöönd). Päev loetakse lumikatte olemasolu alla, kui vähemalt pool vaatlusväljakust on lumega kaetud ja selle paksus on vähemalt 1 cm [33].

3. MEETODID

3.1 Andmete ettevalmistus analüüsiks

Andmete ettevalmistus, arvutused ja analüüs on teostatud kasutades programmeerimiskeelt Python. Samuti on seda kasutades muudetud ajavöönd kohaliku päikese järgi. See tähendab, et maapealsete jaamade andmed, mis olid esitatud Maailmaajas viidi üle Ida-Euroopa ajavööndisse.

Maapealsete jaamade summaarse kiirguse tunniandmete põhjal on arvatud päeva ja kuu keskmised kiirguste väärtused, et need oleksid samas formaadis satelliitandmetega. Selleks on tunniandmete põhjal tehtud arvutusi. Vaatlusjaamadest saadud kiirguse andmed olid esitud ühikus MJ/m² ehk tunni koondväärtustena. Teostati teisendus ühikusse W/m² ehk arvutati iga tunni kohta aritmeetiline keskmine;

$$M_p = \frac{M_E * 10^6}{3600} \quad (4)$$

Tähised on:

M_p - tunni keskmine summaarne kiirgus (W/m²);

M_E - tunni summaarse kiirguse summa (MJ/m²).

Järgnevalt arvutati saadud tunni keskmiste põhjal aritmeetilise keskmise väärtused iga ööpäeva kohta ja nende põhjal omakorda aritmeetilise keskmise väärtused iga kuu kohta;

$$M_{DA} = \sum_{i=1}^n M_{PD_i} \quad (5)$$

Siin on:

M_{DA} - päeva/kuu keskmine summaarne kiirgus;

M_{PD_i} - tunni/päeva keskmine summaarne kiirgus;

i - tunni/päeva indeks;

n - kasutatud andmete hulk antud päeval/kuul.

Sarnaselt on CM SAF kasutanud BSRN jaamade kiirgusandmeid SARAHI andmete valideerimisel, aga neil olid väiksema ajasammuga eristatavad andmed. Nimelt arvutati minuti andmetest 15 minuti keskmised ja nende põhjal päeva keskmised väärtused [31]. Päeva ja eriti kuude keskmiste puhul ei tohiks pikem ajasamm oluliselt väärtuseid mõjutada.

Maapealsete jaamade ja SARAHI andmeid kontrolliti selleks, et eemaldada vigased väärtused, mis analüüsi mõjutama hakkaksid. Päevad, kus esines vähemalt üks puudu olev tunni väärtus, jäeti analüüsist välja. Kuu keskmiste arvutamise eelduseks maapealsete andmete põhjal oli miinimumnõue, et vähemalt 20 päeva andmed on olemas. Vastasel korral jäeti kuu analüüsist välja. Nagu eelnevalt mainitud lähtutakse nii ka SARAHI andmete koostamisel. Puuduvad väärtused maapealsete jaamade andmetes eemaldati satelliitandmetest ja vastupidi, et aegread oleksid ühtsed ja võrreldavad.

Kõigepealt eraldati puuduvad tunniväärtused, mis on registreeritud vaatlusjaamades lünkadena. Antud probleem esines ainult Vilsandi jaama mõõdetud väärtustes ja 310 korral. Peamised lüngad on 2009. ja 2010. aasta mai ja juuni kuus. Lisaks veel 2014. aasta oktoobris.

Järgnevalt eemaldati satelliitmõõtmiste päevade andmed väärtusega -999. Seda esines kõikides vaatlusjaamade kohal võrdselt ja samadel aegadel. Puudu on ainult 8 üksikut päeva keskmist.

Viimaks eraldati päeva keskmised väärtused 0, mida esines ainult maapealsete jaamade andmetes. Kuna Eestis ei eksisteeri polaarööd, siis ei ole sellised väärtused mõistetavad ja registreeritud on tegelikult väiksem või mõõtmine on jäetud teostamata. Nullväärtused on kõikides jaamades välja arvatud Tartu-Tõraveres, mis on arvatavasti tingitud kõrgemal tasemel olevas andmete kontrollist. See probleem on näha ainult novembris, detsembris ja jaanuaris. Tegemist on kõige pimedamate kuudega. Ei ole välistatud, et jaamad on mõõtnud tegelikult väiksemaid väärtuseid ka teistel aastaaegadel, aga selle kontrollimiseks taoline lihtne meetod puudub. Kõige rohkem nullväärtusega päevi on registreerinud Tallinn-Harku (26). Järgneb Vilsandi (14), Pärnu-Sauga (4) ja Tiirikoja (1). Enamasti on sellised väärtused uuritava perioodi varasemas pooles ehk enne aastat 2012.

Kokku esines puuduvaid kuu andmeid ainult Vilsandi puhul ja seda kolmel kuul. Puudu olevate päeva andmete koondülevaade on esitatud tabelis 3.1.

Tabel 3.1. Puuduvad andmed summaarse kiirguse jaamade andmetes.

| Asukoht ja andme liik | Puuduvate päevade arv |
|-------------------------------|-----------------------|
| Tartu-Tõravere <i>in situ</i> | 0 |
| Tartu-Tõravere satelliit | 8 |
| Tiirikoja <i>in situ</i> | 1 |
| Tiirikoja satelliit | 8 |
| Vilsandi <i>in situ</i> | 60 |
| Vilsandi satelliit | 8 |
| Pärnu-Sauga <i>in situ</i> | 4 |
| Pärnu-Sauga satelliit | 8 |
| Tallinn-Harku <i>in situ</i> | 26 |
| Tallinn-Harku satelliit | 8 |

Tartu-Tõravere, Tallinn-Harku ja Vilsandi jaamadele arvutati pilvisuse andmetest päeva keskmised väärtused samuti vastavalt valemile 5, aga siin on väärtused pilvisuse mitte summaarse kiirguse kohta. Vaatluse alt jäeti välja pime aeg, mis antud töö kontekstis pole oluline. Selleks eraldati ainult mõõtmise andmed vahemikus kella 6:00 kuni 18:00 ehk 5 vaatlust päeva kohta. Väärtused, mille puhul oli märgitud, et määramine polnud võimalik udu tõttu, asendati 10 palli väärtusega. Päeva keskmiste väärtuse järgi jaotati päevad kolme gruppi.

1. Pilvitud päevad (üldpilvisuse päeva keskmine väärtus alla 2 palli);
2. Lauspilves päevad (üldpilvisuse päeva keskmine väärtus 10 palli);
3. Ülejäänud keskmiste väärtustega esinevad päevad (antud töös kasutamist ei leidnud).

Pilvisuse päeva keskmiste väärtuste alusel eraldati SARAH ja maapealsete jaamade summaarse kiirguse andmestikest pilvitud ja lauspilves päevad. Lisaks võeti ainult Tartu-Tõravere puhul välja päevad, kui esines lumikate.

3.2 Statistike arvutamine

Maapealsete ja satelliidilt saadud andmete võrdluseks on valitud statistilised näitajad CM SAF enda valideerimisraporti ja eelnevate uurimuste järgi [16, 26, 32]:

$$\text{Bias (keskmine kõrvalekalle)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (SIS_i - M_i); \quad (6)$$

$$\text{MAD (keskmine absoluutne vahe)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |SIS_i - M_i|; \quad (7)$$

$$\text{SD (standardhälve)} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(SIS_i - M_i) - (\overline{SIS} - \overline{M})]^2}. \quad (8)$$

Valemites kajastuvad tegurid on:

n - vaatluste arv;

i - vaatluse indeks

SIS - satelliitandme kiirguse väärtus;

M - maapealse jaama kiirguse väärtus.

Keskmine vahe näitab andmetevahelist keskmist erinevust ja annab aimdust, kas satelliitandmed registreerivad kõrgemaid või madalamaid väärtusi võrreldes maapealsete jaamadega. Keskmine absoluutne vahe seevastu näitab keskmist erinevuste absoluutväärtust ja satelliitandmete üldist kõrvalekallet võrreldes maapealsete jaamadega. Standardhälve iseloomustab satelliidi ja maapealsete jaamade andmete lahknevuste hajuvust keskmise erinevuse ümber.

Lisaks on arvutatud korrelatsiooni koefitsendid (r^2) kasutades Pearson meetodit, mis näitab satelliit ja maapealsete andmete vahelist seost [34]:

$$r^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n [(SIS_i - \overline{SIS})(M_i - \overline{M})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [(SIS_i - \overline{SIS})^2 (M_i - \overline{M})^2]}} \right)^2 \quad (9)$$

4. TULEMUSED JA ARUTELU

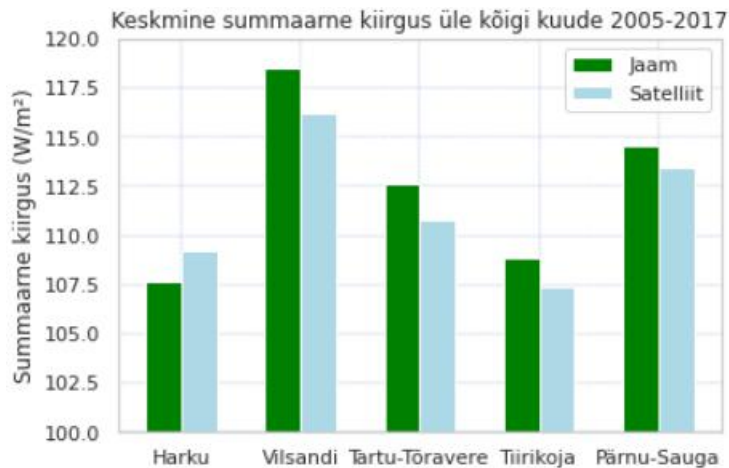
4.1 Üldine keskmiste võrdlus

Andmete võrdlusel uuritud näitajate tulemused on välja toodud tabelis 4.1. Kasutatud on kõikides jaamades kogu perioodi kuu andmeid (n), välja arvatud Vilsandi, kus puudusid andmed kolme kuu kohta. Päeva andmete põhjal on toodud tulemused sulgudes. Nende puhul esineb kõikides jaamades lünkasid, aga vähemalt 98% kogu perioodist on kaetud. Vilsandi korral on taaskord kasutatud vähim päeva keskmisi väärtusi. Tartu-Tõravere puhul kõige rohkem.

Tabel 4.1. SARA 2.1 SIS produkti maapealsete jaamade andmetega võrdlevad näitajad ajavahemikul 01.01.2005 kuni 31.12.2017.

| Asukoht | Bias [W/m^2] | MAD [W/m^2] | SD [W/m^2] | n [kuu (päev)] | r^2 |
|-----------------|----------------------|--------------------|---------------------|----------------|--------------------|
| Tallinn-Harku | 1,55 (1,54) | 6,30 (11,33) | 8,95 (16,61) | 156 (4714) | 0,99 (0,97) |
| Vilsandi | -0,60 (-0,51) | 4,75 (8,27) | 6,49 (12,12) | 153 (4680) | 0,99 (0,99) |
| Tartu-Tõravere | -1,93 (-2,00) | 3,91 (9,35) | 6,30 (13,97) | 156 (4740) | 0,99 (0,98) |
| Tiirikoja | -1,49 (-1,52) | 4,14 (10,11) | 6,42 (15,18) | 156 (4739) | 0,99 (0,98) |
| Pärnu-Sauga | -1,10 (-1,07) | 4,90 (10,79) | 8,16 (16,49) | 156 (4736) | 0,99 (0,97) |
| Keskmine | -0,71 (-0,71) | 4,80 (9,97) | 7,26 (14,87) | | 0,99 (0,98) |

Kuu andmete keskmine kõrvalekalle (Bias) on üle kõikide jaamade keskmisena on -0,71, mis sama suur kui päeva andmete keskmine kõrvalekalle. Üldiselt kipub satelliit alahindama kiirguste väärtusi mõne ühiku võrra antud perioodil. Kõige rohkem ehk ligikaudu $2 W/m^2$ registreeris SARA vähem Tartu-Tõravere puhul. Üllatavalt eristuvad väärtused Tallinn-Harku kohal, kus toimub vastupidiselt ülehindamine. Tegemist on kokkuvõttes siiski väga väikeste erinevustega. Täpsemalt on toodud summaarse kiirguse keskmised väärtused iga jaama kohal joonisel 4.2. Suurimad kiirgused on tuvastatud edelarannikul Vilsandil ja vähimad väärtused põhjapoolseimates punktides Tallinn-Harkus ja Tiirikojas.

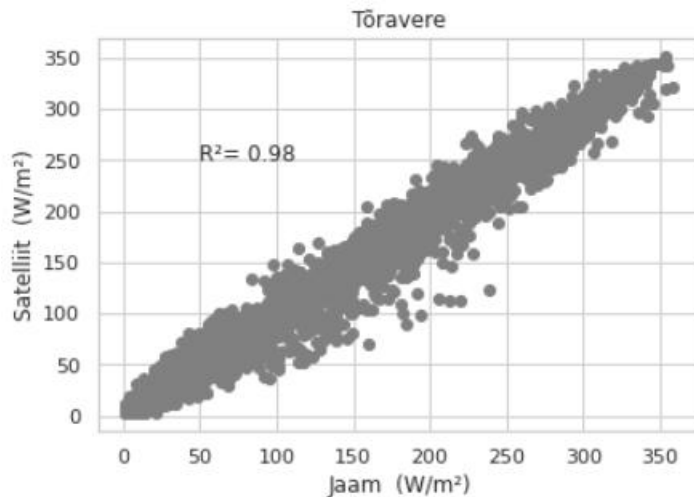


Joonis 4.2. Summaarse kiirguse kuuandmete keskmised väärtused vaatlusjaamades ja SARAH 2.1 registris ajavahemikul 01.01.2005 kuni 31.12.2017.

Keskmise absoluutse kõrvalekalde (MAD) puhul on üheselt märgata arvude suurenemist, kuna siin ei ole vahed üksteist välja taandanud. Samuti on näha, et nüüd on päeva väärtused ligikaudu kaks või rohkem korda kõrgemad kui kuude omad. Taaskord jääb silma Harku, kus esineb suurim lahknevus satelliidi ja mõõtejaama puhul nii kuu-, kui päevaandmete osas. Erinevus on vastavalt 6,3 W/m² ja 11,33 W/m². Jaamadest kõige väiksem MAD väärtus on kuuandmete põhjal Tartu-Tõraveres 3,91 W/m² ja päevaandmete põhjal Vilsandil 8,27 W/m².

Standardhälvete puhul on näha samasugust suuruste jaotust asukohtade vahel ehk kõige hajutatumalt esineb erinevusi Harkus ja vähim Tartu-Tõraveres ning Vilsandil. Kuuandmete korral on see keskmiselt ligikaudu 7 W/m² ja päevandmetel 14 W/m².

Hajuvusdiagrammid näitavad kogu perioodi kohta väga tugevat positiivset korrelatsiooni kõikide jaamade puhul. Korrelatsiooni koefitsent on kuuandmete võrdluses üheselt 0,99 ja päevaandmete puhul vahemikus 0,97 (Tallinn-Harku ja Pärnu-Sauga) kuni 0,99 (Vilsandi). Joonisel 4.3 on näha Tartu-Tõravere päeva andmete hajuvusdiagrammi. Ülejäänud diagrammid teiste jaamade päeva andmete kohta on toodud lisas 2.



Joonis 4.3 Summaarse kiirguse hajuvusdiagramm satelliit ja maapealsete päeva andmete vahel Tatu-Tõraveres.

Võrreldes keskmisi statistikuid varasema CM SAF teostatud valideerimisel (Tabel 2.6) on näha väga sarnased tulemusi. Arvestada tuleb, et varasem valideerimine on teostatud palju pikema perioodi ulatuses ja kasutatud on üle maailma saadud BSRN jaamade andmeid. MAD on Eesti kohal natukene väiksem. Kuu keskmiste korral on erinevus $0,39 \text{ W/m}^2$ ja päeva keskmiste korral $1,73 \text{ W/m}^2$. Ainult standardhälbe puhul ületavad leitud väärtused natuke varasema valideerimise omasid ja seda ainult kuu keskmiste puhul (erinevus $0,3 \text{ W/m}^2$). Päeva keskmiste puhul on arv jällegi väiksem (erinevus $2,33 \text{ W/m}^2$).

Järgnevalt on uuritud eraldi kõikid kuude ja päevade absoluutseid kõrvalekaldeid varasemas valideerimises kasutatud lävendite alusel [32]. Kuu keskmiste puhul on pandud piir 13 W/m^2 ja päeva keskmistele 20 W/m^2 . Tabelis 4.4 on näha lävendeid ületanud päevade osakaalu kogu periood mõõdetud päevadest. Taaskord on sulgudes toodud informatsioon päevaste andmete alusel. Kõige rohkem üle lävendi väärtusi esines Tallinn-Harkus. Kõige vähem kuu andmete põhjal Tiirikojal ja päeva keskmiste põhjal Vilsandil. Varasemad tulemused näitavad, et 5,5% kuu ja 16,8% päeva keskmistest väärtustest ületavad lävendeid. Mõlemad osakaalud on kõrgemad Tallinn-Harkus. Pärnu-Sauga puhul on väärtused samuti kõrgemad, aga ainult kuu keskmiste kohta. Ülejäänud vaatlusjaamade puhul on üle lävendi päevade ja kuude osakaalude arv väiksem kui varasemalt valideeritud.

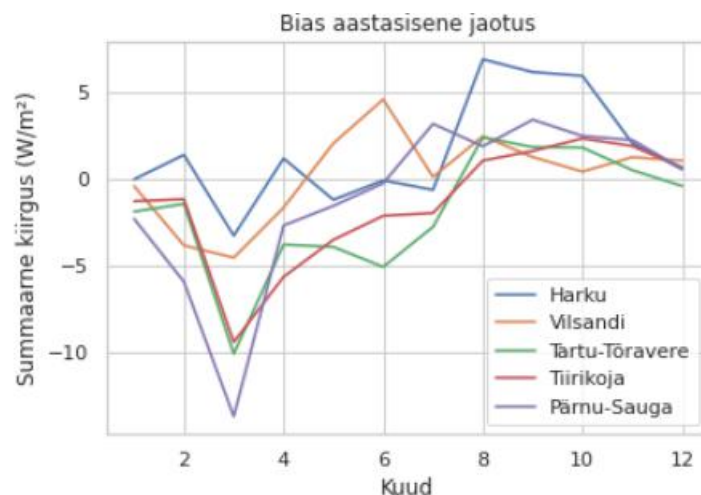
Tabel 4.4. SARA 2.1 vaatluste osakaal, kus absoluutne erinevus summaarses kiirguses ületab lävendeid.

| Asukoht | Vaatluste MAD üle lävendi [%] |
|----------------|-------------------------------|
| Tallinn-Harku | 13,5 (17,6) |
| Vilsandi | 4,6 (8,8) |
| Tartu-Tõravere | 4,5 (11,3) |
| Tiirikoja | 3,8 (14,1) |
| Pärnu-Sauga | 7,1 (14,9) |

4.2 Aastasisene võrdlus

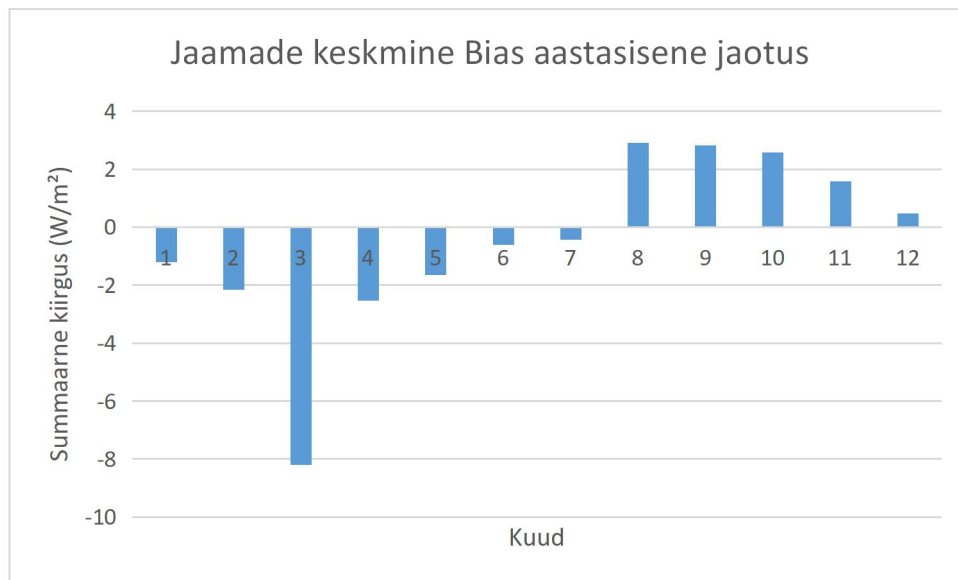
Antud peatükis on arvatatud statistikud kõigi kuude jaoks ajal igul 2005 kuni 2017. Aluseks on võetud igas punktis esialgu ainult kuude keskmiste andmed.

Keskmiist kõrvalekallet (Bias) aastasisese jaotusena näitab joonis 4.5. Enamjaolt alahindab SARA summaarse kiirguse v rtusi aasta esimeses pooles.  htmoodi eristub kõikide jaamade juures märtsi kuu, kus on näha teravat langust keskmises erinevuses ja esinevad madalamad v rtused. Kõige suurem alahindamine toimub Pärnu-Saugal $-13,7 \text{ W/m}^2$. August kuni detsember on märgata vastupidist - ülehindamist, mis on küll vähesemal m aral. Kõige suurem v rtus $6,9 \text{ W/m}^2$ esineb Tallinn-Harkus augustis.



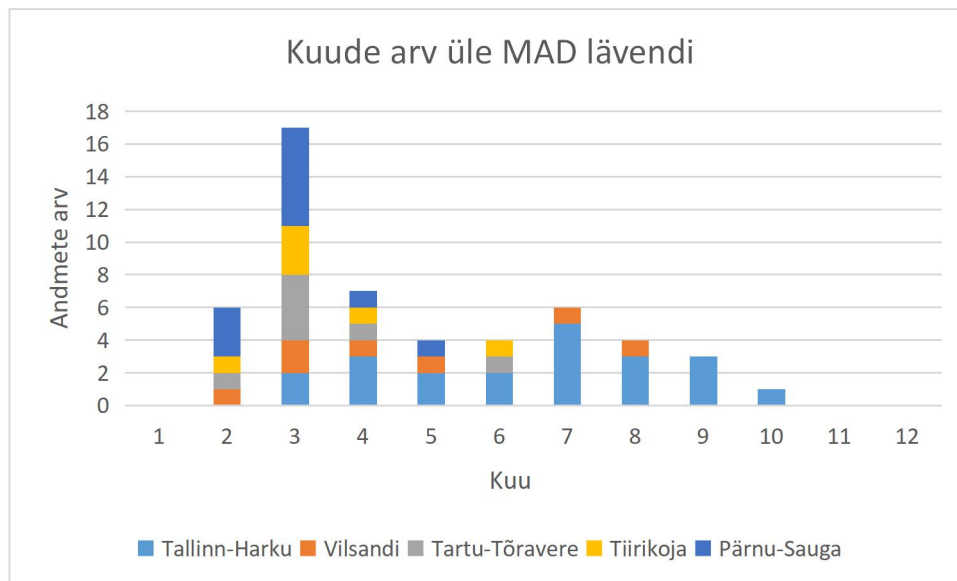
Joonis 4.5. Kuuandmete keskmise kõrvalekalde aastane k ik 2005 kuni 2017

Asukohtade keskmisena on vahed toodud joonisel 4.6. Eristub jälle alahindamine aasta esimeses pooles ja vastupidine nähtus aasta lõpus. Märkata on miinimumpunkti märtsis ja maksimumpunkti augustis. Nende vahele jääb lahknevuse astmeline stabiliseerumine ja ei eristu teisi ebaharilikke kõrvalekaldeid.



Joonis 4.6. Üle jaamade keskmistatud summaarse kiirguse kõrvalekald aastane käik 2005-2017.

Joonisel 4.7 on toodud absoluutsele erinevusele (MAD) seatud lävendit ületanud kuude arv. Märkata on, et novembrist jaanuarini ei ületanud SIS lävendit. Tegemist on talvise perioodiga, kus lumi peaks just alandama mõõtmiste täpsust ja suurendama seeläbi absoluutset erinevust. Antud juhul on näha, et mõõtmised jäävad ikkagi seatud kvaliteedi piiridesse. Siin tuleb arvestada, et tegemist on pimedama ajaga, kus kiirguse väärtused on kõige madalamad. Detsembris on kuukeskmised summaarsed kiirgused lausa alla seatud lävendit ja seega on üpris võimatu seda ületada. Samas on selgelt näha, et erinevused ei sõltu ainult kiirguse hulgast, kuna päiksulisemal perioodil (maist juunini) ei ole enim üle lävendi väärtusi. Siin on erandiks Tallinn-Harku, kus on ainukesena näha juulis ja septembris üle piiri erinevusi. Lisaks on oktoober keskmiselt kõrgemate summaarse kiirguste väärtustega kui veebruar. Veebruaris on tuvastatud neljas jaamas viiest üle lävendi kuid ja oktoobris seevastu ainult Tallinn-Harkus.



Joonis 4.7. SARAH 2.1 kuukeskmiste arv aastase jaotusena, kus esines absoluutne vahe üle seatud lävendi võrreldes maapealsete andmetega ajavahemikul 2005-2017.

Eristuvad jälle märts ja aprill, kus kõikide jaamade juures on vähemalt üks kuukeskmise väärtus olnud alla seatud kvaliteedi. Tegemist on üleminekuajastajaga, kus toimuvad tavaliselt kiirguse suured muutused. Temperatuur ületab püsivalt 0°C ja tekib suurvesi. Sellele järgneb kliimaatiline kevad ja algab vegetatsiooniperiood. Mõlemad nähtused võivad aluspinnal albedo väärtusi järsult langetada ja tekivad väga erinevate omadustega kohad. Satelliidilt ei pruugi neid muutusi albeedosis õigesti hinnata ja registreeritakse see hoopis päikesekiirguse muutusena. Varasemate SARAH versioonide puhul on samuti märgatud aastaegade vahetumise ajal kõrgemaid erinevusi [5]. Probleemi tekitab summaarse kiirguse arvutamine efektiivse pilvisuse kaudu ja pilvede eristamata jätmine maapinnast. Kõige rohkem on üle lävendi väärtusi Pärnu-Saugal märtsis. Seal lähedal asuv Pärnu jõgi on tuntud põhjustama suurimaid üleujutusi suurvee tõttu ja võib olla üks tegur erinevuste põhjustajana.

Järgnevalt on uuritud korrelatsiooni koefitsiente (r^2) päeva keskmiste andmete põhjal. Väärtused asuvad tabelis 4.8, kus on lisaks värvidega eristatud suuruste vahemikud. Kasutatud on värve tumeroheline üle 0.9, heleroheline üle 0.8, kollane üle 0.7, oranž üle 0.6, helepunane üle 0.5 ja tumepunane alla 0.5. Mida suurem on korrelatsiooni koefitsent, seda väiksem on hajuvus SARAH ja maapealsete andmete vahel. Väga kõrge seos on aprillist oktoobrini, kus väärtused jäävad enamasti üle 0.9. Eristub seekord detsember kõige madalamate tulemuste poolest. Samuti on märgata väiksemaid arve jaanuaris ja novembris, mis eelnevas analüüsis väikeste kiirgusväärtuste tõttu välja jäid. Taaskord on märtsis suurem

lahknevus, kuid siin sarnanevad väärtused veebruari omadega ja jäävad üldise keskmise lähedale.

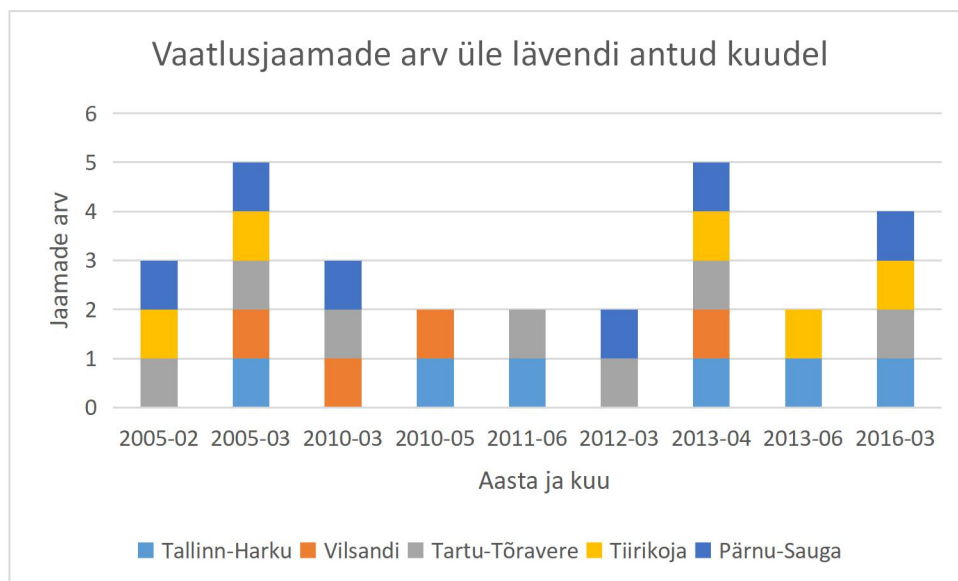
Tabel 4.8 Korrelatsiooni koefitsendid (r^2) uuritavates jaamades kuude kaupa. Aluseks on võetud SARAH ja maapealsete jaamade summaarse kiirguse päevased keskmised.

| Asukoht/ Kuu | Vilsandi | Tartu- Tõravere | Tiirikoja | Pärnu- Sauga | Tallinn- Harku | Keskmine |
|-----------------|----------|--------------------|-----------|-----------------|-------------------|----------|
| Jaanuar | 0.71 | 0.68 | 0.61 | 0.55 | 0.70 | 0.65 |
| Veebruar | 0.80 | 0.84 | 0.75 | 0.73 | 0.81 | 0.79 |
| Märts | 0.86 | 0.79 | 0.78 | 0.73 | 0.85 | 0.80 |
| Aprill | 0.97 | 0.92 | 0.89 | 0.90 | 0.91 | 0.92 |
| Mai | 0.97 | 0.97 | 0.95 | 0.95 | 0.93 | 0.95 |
| Juuni | 0.97 | 0.95 | 0.94 | 0.97 | 0.92 | 0.95 |
| Juuli | 0.96 | 0.94 | 0.93 | 0.92 | 0.89 | 0.93 |
| August | 0.95 | 0.95 | 0.93 | 0.94 | 0.92 | 0.94 |
| September | 0.96 | 0.95 | 0.95 | 0.95 | 0.92 | 0.95 |
| Oktoober | 0.94 | 0.93 | 0.93 | 0.94 | 0.92 | 0.93 |
| November | 0.84 | 0.84 | 0.88 | 0.87 | 0.76 | 0.84 |
| Detsember | 0.64 | 0.47 | 0.55 | 0.56 | 0.46 | 0.54 |
| Keskmine | 0.88 | 0.85 | 0.84 | 0.83 | 0.83 | 0.85 |

4.3 Aastatevaheline muutlikkus

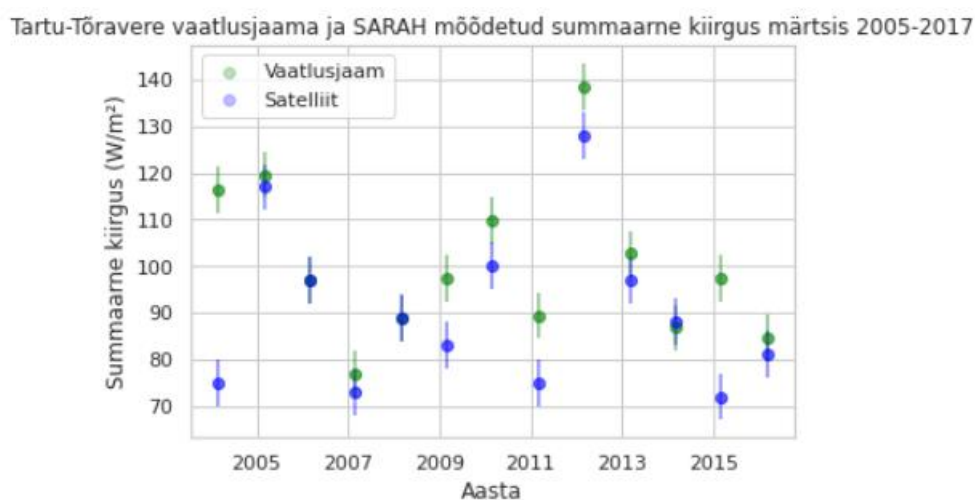
Antud peatükis on andmestike kuude keskmiste erinevusi uuritud aastatevaheliselt.

Joonisel 4.9 on toodud üle MAD lävendi esinevad vaatlusjaamad kuudel, kui esines üle lävendi väärtusi vähemalt kahes jaamas korraga. Kõikide vaatlusjaamade puhul on kuu keskmine absoluutne kõrvalekalle üle seatud lävendi 2005. aasta märtsis ja 2013. aasta aprillis. 2005 on mõõtmised teostatud vanema seadmega, mis võib olla ühtse suure erinevuse põhjustaja. 2013 oli märts ebatavaliselt külm, olles jahedam isegi talvekuudest ja terve Eesti oli lumega kaetud. Aprillis järgnes väga kiire temperatuuri tõus ja sula [35]. Selline järsk ilmastikumuutus võib olla üheks suure erinevuse põhjustajaks.



Joonis 4.9 Vaatusjaamade arv kuudel, kui absoluutne keskmine kõrvalekalle ületas seatud lävendi.

Järgnevalt on vaadatud aegreana kõige suurema keskmise kõrvalekaldega kuud ehk märtsi. Joonisel 4.10 on näha Tartu-Tõravere märtsi keskmisi summaarseid kiirguseid vaatusjaamas ja SARAH andmestikus. Väärtuste juures on vertikaalsete joontena näha mõõtmiste määramatust, mis on nii BRSN jaamadele, kui SARAH 2.1 optimaalseks täpsuseks hinnatud 5 W/m² [32]. 2005. aastal on järjekordselt näha väga kõrget päikesekiirguse alahindamist SARAH poolt. Samuti toimub see 2016. aastal. Ei esine ühtegi aastat, kus oleks vaatusjaamades märtsis vastupidiselt satelliitandmetest rohkem mõõdetud. 2006 kuni 2009, 2014 kuni 2015 ja 2017 langevad mõlema allika väärtused kokku. Seega ei saa öelda, et märts oleks alati suure keskmise kõrvalekaldega.



Joonis 4.10. Tartu-Tõravere märtsi keskmine summaarne kiirgus SARAH ja vaatusjaama andmetes perioodil 2005-2017.

4.4 Võrdlus ilmastikunähtuste järgi

Antud peatükis on püütud leida SARAHI ja maapealsete andmete lahknevuse erinevuse põhjusi pilvisuse ja lumekatte esinemisel, et saada aimdust satelliitidelt saadud väärtuste usaldusväärsusest nendest ilmastikunähtustest sõltuvalt.

Välja on võetud summaarse kiirguse andmetestikest lauspilves ja pilvitud päevad. Tabelis 4.11 on toodud Tallinn-Harku, Vilsandi ja Tartu-Tõravere jaamade keskmised statistikud pilvitutel, lauspilvistel ja kõikidel päevadel. Üldine tähendab keskmisi üle kogu perioodi nagu peatükis 4.1, kuid siin on võetud ainult vaatluse all oleva kolme jaama andmed.

Tabel 4.11 Statistike keskmised väärtused selge, lauspilves ja kogu perioodi korral.

| Statistik / Nähtus | Bias [W/m ²] | MAD [W/m ²] | r ² |
|--------------------|--------------------------|-------------------------|----------------|
| Pilvitu | -2.61 | 10.68 | 0.98 |
| Lauspilves | 3.80 | 7.25 | 0.94 |
| Üldine | -0.32 | 9.65 | 0.98 |

Näeme, et pilvitute päevade korral alahindab satelliit summaarse kiirguse väärtusi keskmiselt 2.61 W/m². Lauspilves päevadel toimub ülehindamine 3.8 W/m². Absoluutne kõrvalekalle (MAD) on selge taeva korral suurem ja lauspilvisuse korral väiksem kui üldiselt tuvastatu. Seevastu on hajuvus (r²) lauspilvisuse korral hoopis suurem ja pilvitute päevade korral sama, kui on üldiselt esinenud. Selline statistike suuruste varieeruvus näitab, et pilvitu taeva korral on SARAHI meetod üldiselt parema kvaliteediga kui lauspilves ilma korral, aga esinevad mõned päevad, kus maapealsete jaamadega võrreldes on suured erinevused. Nende päevade tõttu tuleb suurem keskmine absoluutne kõrvalekalle. Lauspilves päevadel on täpsus konstantsemalt madalam kui üldiselt, aga suure erinevusega päevi on vähem.

Tabelis 4.10 on toodud Tartu-Tõravere statistikud pilvitutel päevadel, kui oli lisaks maas ka lumikate ja võrdluseks üldine ehk kogu perioodi omad. Puuduvate lumeandmete tõttu on siin vaatluse all vaid periood kuni 2013 aasta lõpp. Taolisi päevi oli antud perioodil 70 ja SARAHI hindab neil päevil summaarse päikesekiirguse väärtuse keskmiselt 17.63 W/m² maapealsest väiksemaks. Absoluutne keskmine kõrvalekalle on peaaegu sama ehk vastupidist alahindamist toimus väga vähe. Korrelatsiooni koefitsient osutus samuti madalamaks kui üldine. See annab aimdust, et SARAHI andmed on suuresti mõjutatavad lumikatte poolt. Tõenäoliselt arvatakse lume kõrge albedo pilvede sekka ja seetõttu registreeritakse väiksem SIS.

Tabel 4.10. Tartu-Tõravere statistikud pilvitu ja lumikattega päevadel võrreldes kogu perioodiga 2005-2013.

| Statistik / Nähtus | Bias [W/m ²] | MAD [W/m ²] | r ² | Päevade arv |
|--------------------|--------------------------|-------------------------|----------------|-------------|
| Lumi + pilvitu | -17.63 | 17.88 | 0.93 | 70 |
| Üldine | -2.29 | 9.55 | 0.99 | 3280 |

KOKKUVÕTE

Antud töös uuriti satelliitidelt ja maapealsetest vaatlusjaamades saadud summaarse kiirguse väärtusi perioodil 2005 kuni 2017. Võrreldi viie Eesti meteoroloogiajaama ja SARAH 2.1 admeid nende jaamade koordinaatidel. Arvutati üldised statistilised erinevused ja analüüsiti nende varieeruvust erinevatel kuudel. Lisaks uuriti statistikuid pilvisuse ja lumikatte alusel.

Tehtud tööst selgub, et kogu perioodi ulatuses registreeris SARAH summaarse kiirguse väärtused ligikaudu 1 W/m^2 väiksemad, kui vaatlusjaamad ja seda nii päeva kui ka kuu keskmiste põhjal. Kõige rohkem alahinnati kiirgusvooge Tartu-Tõraveres, ligikaudu 2 W/m^2 ja ainukesena jaamadest ülehinnati Tallinn-Harkus (sama palju). Keskmise absoluutne erinevus oli kuu keskmiste korral ligikaudu 5 W/m^2 ja päeva keskmiste korral 10 W/m^2 . Jaamadevahelised erinevused keskmisest jäid siinkohal maksimaalselt 2 W/m^2 ümber. Kogu perioodil üldisena esineb tugev korrelatsioon satelliidi ja jaamade andmete vahel ehk minimaalselt korrelatsiooni koefitsendiga 0,97.

Aastasisene võrdlus näitas, et märtsi kuus mõõdab SARAH kõikide jaamade kohal vaatlusjaamadega võrreldes oluliselt väiksemad kiirguse väärtused (keskmiselt 8 W/m^2 kuu andmete põhjal). Üldiselt toimub alahindamine jaanuarist juulini ja ülehindamine augustist detsembrini. Kõige rohkem ülehinnatakse augustis - keskmiselt 3 W/m^2 kuu keskmisena. Kuude keskmistele seatud absoluutse kõrvalekalde lävendeid (13 W/m^2) ületati samuti enim märtsis. Päeva andmete järgi esines kõige väiksem korrelatsioon hoopis detsembris, jaanuaris ja veebruaris, aga antud kuud on kõige väiksemate summaarse kiirguste väärtustega ja seega ei ole eksimuste väärtused suured. Ülejäänud kuudel oli korrelatsioon kõrge (märts ja november) või väga kõrge (aprill kuni oktoober). Suurte eksimustena eristusid 2005. aasta aprill ja 2013. aasta märts, mille arvatavaks põhjuseks on 2005. aastal mõõtmisi teostanud vanem seade ja 2013. aastal esinenud ebatavaliselt lühike kevad. Tartu-Tõraveres märtsi kuude lähedasem uurimine aegreana näitas, et esineb ka aastaid kus SARAH on hinnanud kuu keskmised summaarse kiirguse väärtused võrdseks vaatlusjaamas mõõdetuga ja seega ei saa üldistada suuri eksimusi ainult kuu põhjal.

Päevade keskmiste kiirguste erinevuste analüüsimine eraldi selgete ilmade korral näitas, et hajuvust sellised ilmad ei mõjuta, aga keskmiselt mõõdetakse ligi 2 W/m^2 vähem kui kogu perioodil muidu. Lauspilvistel päevadel see-eest esines palju suurte kõrvalekalletega päevi, mil vastupidiselt tavapärasele ülehinnati päeva keskmisi väärtusi ligikaudu 4 W/m^2 . Selgetel

ja lumistel päevadel oli Tartu-Tõravere andmest lähtudes näha suurt langust SARAH kvaliteedis. Nimelt alahinnati päeva väärtusi kogu perioodi keskmisega võrreldes koguni 15 W/m² rohkem ja absoluutne kõrvalekalle oli kaks korda kõrgem üldisest ehk ligi 18 W/m². Seetõttu leidis kinnitust, et lumikattel ja pilvisusel on oluline mõju SARAH täpsusele.

Varasema CM SAF enda poolt koostatud valideerimisega võrreldes [32] on Eesti puhul saadud üldised tulemused väga sarnased ja üllatavalt on need kohati isegi paremad, aga maksimaalselt ligikaudu ainult 2 W/m². Lähemalt vaadates esines siiski Tallinn-Harkus ja Pärnu-Saugas rohkem kuid üle seatud piiri absoluutse erinevuse osas kui BSRN jaamade puhul valideeritud. Tallinn-Harkus oli see samuti suurem päeva keskmiste osas.

Varasema SARAH versiooni uuringuga võrdlemine, mis on samuti teostatud Eesti alal [1] näitab, et uuem versioon mõõdab täpsemalt summaarsete kiirguse väärtusi. Antud tööga uuriti näitajate varieeruvusi täpsemalt kui seda varasemalt oli teostatud ja lisati juurde analüüs pilvisuse ja lume olemasolu alusel.

Tehtud töö puhul ei saa siiski kindlalt väita, kas Tallinn-Harku ja Pärnu-Sauga puhul esinenud kohatised suured kõrvalekalded on tingitud SARAH meetoditest või hoopis probleemidest vaatlusjaamade mõõtmistes. Märkida tuleb, et töös kasutatud neli jaama viiest ei kuulu BSRN jaamade hulka ja seega pole nende mõõtmiste kvaliteet nii kontrollitud. Juurde tuleks arvestada vaatlusjaamade mõõtmiste määramatused

Tulevastes sarnastes töödes oleks mõistlik eristada kiirguse väärtusi selge taeva koefitsendi järgi ja mitte pilvisuse vaatluste põhjal, kuna summaarne kiirgus on lühilaineline, siis tähtis on ka pilvede optiline paksus. Seda antud töö ei käsitletud ja seega pilvisuse analüüs annab ainult ligikaudse ja üldisema hinnangu. Lisaks oleks mõistlik vaadelda erinevusi mingite kindlate ilmastikutingimuste korral ja mitte lihtsa aegreana, kuna aastad ei ole vennad. Veel täpsemalt oleks huvitav uurida kiirete ilmastikumuutuste korral erinevusi (näiteks eristada järsu temperatuuri tõusu kaudu). Täpsuse parandamise puhul tuleks püüelda pigem suunas, et kuidas parandada neid päevi ja kuid, kus esinesid väga suured erinevused. See tähendab, et vaatluse alla tuleks võtta eelkõige kevadise perioodi (märts-aprill), pilvede ja lumikatte korral metodoloogia parandamine.

SUMMARY

The aim of this thesis was to compare total surface incoming solar radiation from SARA 2.1 satellite product with ground measurement stations in Estonia. In order to do that, data from five different meteorological station sites was taken for the time period of 2005-2017. For SARA, SIS data was taken from the closest coordinates to these sites. General statistical differences were calculated and analyzed inter-annually and by annual breakdown. In addition, same statistics were investigated based on cloud and snow data.

Finished work shows that throughout the whole investigated period SARA SIS values were approximately 1 W/m^2 lower than measured on ground stations. This value was seen both from daily and monthly mean data. Highest underestimation was done above Tartu-Tõravere, which was approximately 2 W/m^2 . The only station where values were overestimated by SARA was above Tallinn-Harku (by the same amount). Mean absolute difference was approximately 5 W/m^2 for monthly and 10 W/m^2 for daily means. Between stations this value differed by the maximum of 2 W/m^2 . Overall, high correlation between satellite and ground measurements was determined. Minimal correlation coefficient for single ground station was 0.97.

Annual breakdown comparison showed that in March SARA measures significantly lower solar radiation values than ground stations (on average 8 W/m^2 based on monthly data). Underestimation was determined usually from January til July and overestimation from August til December. August was overestimated the most - on average 3 W/m^2 from monthly data. Target value set for monthly absolute difference (13 W/m^2) was most exceeded in March. However, lowest correlation based on daily data was seen in December, January and February. These months are also with the lowest total solar radiation values and thus the differences were not high. For other months the correlation was high (March and November) or very high (from April til October). Extensive differences were determined in April 2005 and in March 2013. This was caused presumably by older equipment used in 2005 and unusually short spring in 2013.

Inter-annual analysis of Tartu-Tõravere March values showed that there are years when SARA measures same values as the ground station. Therefore, big differences cannot be differentiated solely by months. Distinguishing daily total solar radiation values by weather conditions revealed that correlation did not change from overall when values of only clear sky

conditions were compared. However, on average SARA_H registered approximately 2 W/m² less in these conditions than overall. On full cloud cover, SARA_H performance was a bit lower because many daily mean values were with high difference. On those days the average value was 4 W/m² higher than ground stations recorded. Extensive quality drop above Tartu-Tõravere was determined on days that had snow cover and few clouds. On those days the mean value was underestimated by 15 W/m² more and also the absolute difference was two times higher than usual. This indicates the high impact of clouds and snow cover to the efficiency of SARA_H measurements.

Results gained in this work are very similar than gained from the earlier study done by CM SAF [32]. It can be said that SARA_H performs even better in Estonia than validated across other sites. However, the difference was only 2 W/m² maximum. Though, closer look revealed that there are more months over the target accuracy set on absolute difference in Tallinn-Harku and Pärnu-Sauga. In Tallinn-Harku that was also higher on daily means.

Completed study indicates that the new version of SARA_H performs better in Estonia than the older version [1]. In addition, current study analyses variability more thoroughly than the previous study and adds analysis based on cloud and snow data.

It must be said that the bigger differences marked in Tallinn-Harku and Pärnu-Sauga cannot be solely blamed on the SARA_H methods because it can be related to problems in ground station measurements. Only one station used in this study is among BSRN stations and the other ones do not have the same guarantee on quality standards. Ground station uncertainties must be added for full understanding overall uncertainty.

Future similar studies are recommended to differentiate total solar radiation values based on clear sky coefficient and not only by human cloud observations as done here. Total solar radiation is low frequency and thus it is needed to also include the optical thickness of the clouds and thus this study gives only the approximate assessment of the importance of clouds to measuring precision of total solar radiation from satellites. In addition, it is advised to analyze differences by certain weather conditions such as fast changes in temperatures for example. To improve the precision of SARA_H measurements above Estonia it is recommended to refine the methodology on days where high differences occurred - like the spring (especially March and April), cloudy periods and seasons with snow cover.

KASUTATUD ALLIKATE LOETELU

- [1] - Juust, E. (2016) Summaarse kiirguse hindamine satelliitidelt Eesti alade jaoks, Magistritöö, Tallinna Tehnikaülikool, Meresüsteemide Instituut;
- [2] - Russak, V. ja Kallis A. (2003) *Eesti kiirguskliima teadmik*, Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut, Tallinn;
- [3] - Russak, V. (2009) Changes in solar radiation and their influence on temperature trend in Estonia (1955–2007), *J. Geophys. Res.*, 114;
- [4]- Ohvril, H. (2009) Global dimming and brightening versus atmospheric column transparency, Europe, 1906-2007, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114, D10;
- [5] - Palmer, D., Koubli, E., Cole, I., *et al.* (2018) Satellite or ground-based measurements for production of site specific hourly irradiance data: Which is most accurate and where?, *Solar Energy*, 165, 240-250;
- [6] - Ohmura, A., Dutton, E. G., Forgan, B., *et al.* (1998) Baseline Surface Radiation Network (BSRN/WCRP) New Precision Radiometry for Climate Research, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 10, 2115-2136;
- [7] - Vernay, C., Pitaval, S., Blanc, P., *et al.* (2013) Review of satellite-based surface solar irradiation databases for the engineering, the financing and the operating of photovoltaic systems, *Energy Procedia*, 57, 1383-1391;
- [8] - Wild, M. (2009) Global dimming and brightening: A review, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114, D10;
- [9] - Wild, M., Trüssel, B., Ohmura, A., *et al.* (2009) Global dimming and brightening: An update beyond 2000, *ournal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114, D10.
<https://doi.org/10.1029/2008JD011382>;
- [10] - Wild, M., Ohmura, A., Schär, C., *et al.* (2017) The Global Energy Balance Archive (GEBA) version 2017: A database for worldwide measured surface energy fluxes, *Earth System Science Data*, 9, 2, 601-613;
- [11] - Loodla, K., Tillmann E., Kallis, A., *et al.* (2019) Eesti meteoroloogia aastaraamat 2018, Keskkonnaagentuur, Tallinn;
- [12] - Huang, G., Li, Z., Li, X., *et al.* (2019) Estimating surface solar irradiance from satellites: Past, present, and future perspectives, *Remote Sensing of Environment*, 233;
- [13] - EUMETSAT kodulehekülg. (2020). Kasutatud 26.05.2020,
<https://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/>;
- [14] - He, T., Liang, S., Song, D. (2014). Analysis of global land surface albedo climatology and spatial-temporal variation during 1981-2010 from multiple satellite products, *Journal of Geophysical Research*, 119, 17. <https://doi.org/10.1002/2014JD021667>;

- [15] - Babar, B., Graversen, R., Boström, T. (2019) Solar radiation estimation at high latitudes: Assessment of the CMSAF databases, ASR and ERA5, *Solar Energy*, 182, 397-411. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.058>;
- [16] - Riihelä, A., Carlund, T., Trentmann, J. (2015) Validation of CM SAF Surface Solar Radiation Datasets over Finland and Sweden, *Remote Sensing*, 7, 6, 6663-6682. <https://doi.org/10.3390/rs70606663>;
- [17] - Posselt, R., Mueller, R., Stöckli, R., *et al.* (2011) Spatial and Temporal homogeneity of Solar Surface Irradiance across Satellite Generations, *Remote Sens.*, 3, 5, 1029-1046. <https://doi.org/10.3390/rs3051029>;
- [18] - Sengupta, M., Habte., A., Kurtz, S., *et al.* (2015) Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications, *Technical Report*. NREL/TP-5D00-63112;
- [19] - Kipp & Zonen (2000) Instruction manual (CM 11, CM 14). Kasutatud 26.05.2020, <https://www.kippzonen.com/Download/48/CM-11-Pyranometer-CM-14-Albedometer-Manual>;
- [20] - Kipp & Zonen (2004) Instruction manual (CM 21). Kasutatud 26.05.2020. <https://www.scribd.com/document/358246954/kipp-manual-cm21-1409-pdf>;
- [21] - Kipp & Zonen Instruction manual. Kasutatud 26.05.2020. <https://www.kippzonen.com/Download/670/Brochure-Pyranometers-CMP-series-Russian?ShowInfo=true>;
- [22] - Kipp & Zonen kodulehekülg (2015). Kasutatud 26.05.2020. <https://www.kippzonen.com/News/572/The-Working-Principle-of-a-Thermopile-Pyranometer#.XsQIzGhLhEZ>
- [23] - Pfeifroth, U., Kothe, S., Trentmann, J., *et al.* (2019), Surface Radiation Data Set - Heliosat (SARAH) - Edition 2.1, Satellite Application Facility on Climate Monitoring. https://doi.org/10.5676/EUM_SAF_CM/SARAH/V002_01;
- [24] - Kothe, S., Hollmann, R., Pfeifroth, U., *et al.* (2019), The CM SAF R Toolbox-a tool for the easy usage of satellite-based climate data in NetCDF format, *International Journal of Geo-Information*, 8, 3, 109. <https://doi.org/10.3390/ijgi8030109>
- [25] - NASA kodulehekülg (2020). Kasutatud 23.04.2020. <https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/>
- [26] - Müller, R., Pfeifroth, U., Träger-Chatterjee, C., *et al.* (2015), Digging the METEOSAT Treasure-3 Decades of Solar Surface Radiation, *Remote Sens.*, 7, 6, 8067-8101. <https://doi.org/10.3390/rs70608067>;
- [27] - EUMETSAT CM SAF (2019), SARAH-2.1 Product User Manual. Kasutatud 26.05.2020.

https://www.cmsaf.eu/SharedDocs/Literatur/document/2019/saf_cm_dwd_pum_meteosat_hel_sarah_2_4_pdf.pdf?__blob=publicationFile;

[28] - Schmetz, J., Pili, P., Tjemkes, S., *et al.* (2002), AN INTRODUCTION TO METEOSAT SECOND GENERATION (MSG).

[https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2002\)083<0977:AITMSG>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2002)083<0977:AITMSG>2.3.CO;2);

[29] - Cros, S., Albuissou, M., Wald, L. (2004), Simulating Meteosat-7 broadband radiances using two visible channels of Meteosat-8, *Solar Energy*, 80, 3, 361-367.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.01.012>;

[30] - Posselt, R., Mueller, R., Trentmann, J., *et al.* (2014), A surface radiation climatology across two Meteosat satellite generations, *Remote Sensing of Environment*, 142, 103-110.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.11.007>;

[31] - Möser, W. (1983) Globalstrahlung aus Satellitenmessungen. Mitteilungen aus dem Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln, Köln;

[32] - EUMETSAT CM SAF (2019), SARA-2.1 Validation Report. Kasutatud 26.05.2020.

https://www.cmsaf.eu/SharedDocs/Literatur/document/2019/saf_cm_dwd_val_meteosat_hel_sarah_2_3_pdf.pdf?__blob=publicationFile;

[33] - Viru, B. & Jaagus, J. (2020), Spatio-temporal variability and seasonal dynamics of snow cover regime in Estonia, *Theoretical and Applied Climatology*, 139, 759-771.

<https://doi.org/10.1007/s00704-019-03013-5>;

[34] - STUDENT (1908) PROBABLE ERROR OF A CORRELATION COEFFICIENT, *Biometrika*, 6, 2-3, 302-310. <https://doi.org/10.1093/biomet/6.2-3.302>;

[35] - Kallis, A., Rosin, K., Pärnpuu, P. (2019), 100 aastat Eesti ilma (teenistust), Keskkonnaagentuur, Tallinn, ISBN 978-9985-881-92-7.

TÄNUAVALDUSED

Autor tänab inimesi, kes aitasid teostada antud bakalaureusetööd võimaldades selleks andmeid ja aidates nõuga:

Piia Post

Marko Kaasik

Sirje Keevallik

Epp Juust

Riina Pärg

Hanno Ohvril

Velle Toll

Jaak Jaagus

Birgit Viru

EUMETSAT

Keskkonnaagentuur

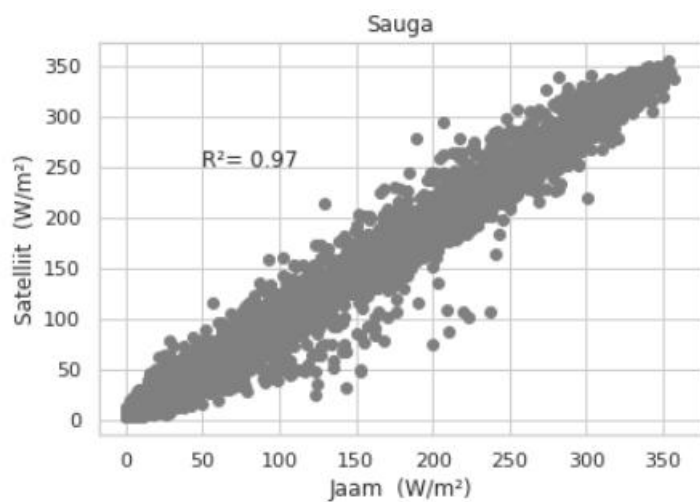
LISAD

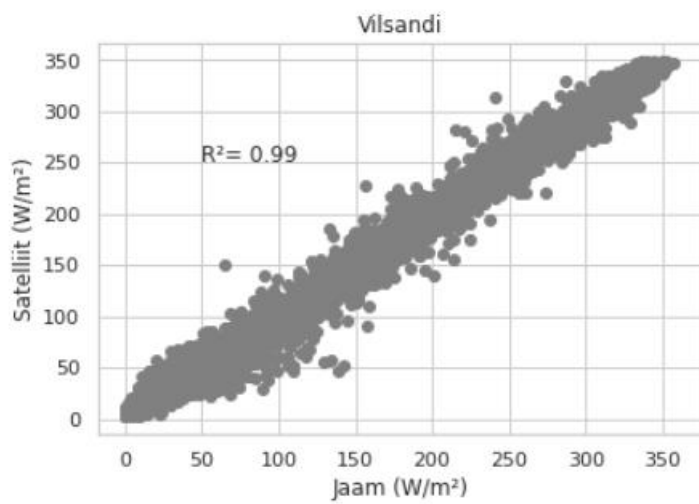
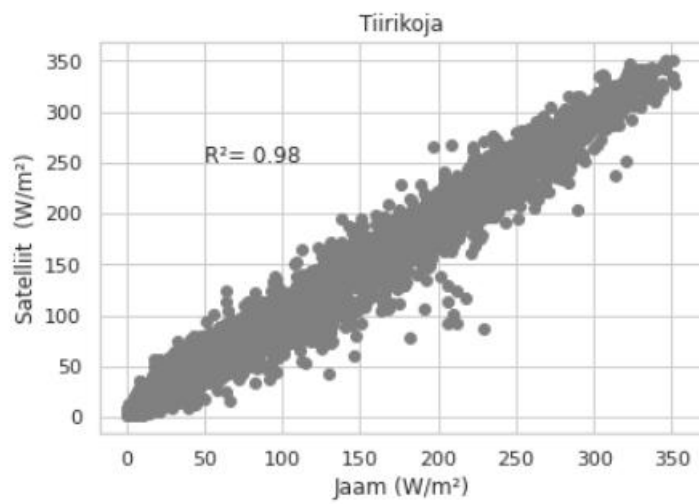
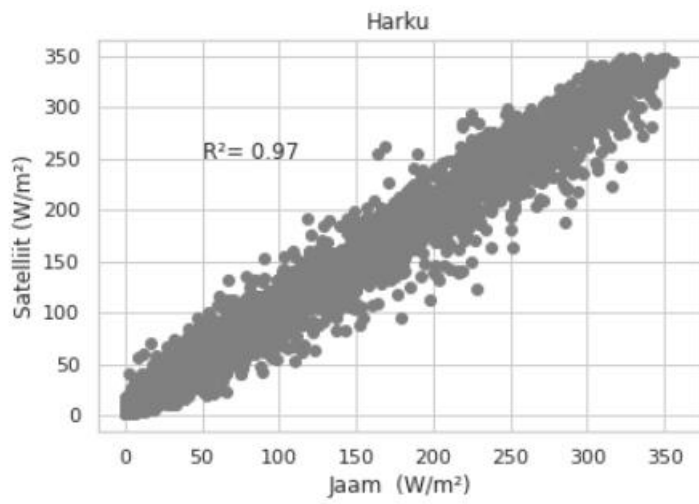
Lisa 1. Vaatlusjaamade mõõtetehnika

| Jaam | Mõõteriistad |
|----------------------------------|--|
| Pärnu-Sauga meteoroloogiajaam | CM21 + ventilaator |
| Tallinn-Harku aeroloogiajaam | CMP21 + ventilaator (alates 2015) CM11 + ventilaator |
| Tartu-Tõravere meteoroloogiajaam | CM21 + ventilaator ja CMP21+ventilaator (Alates 2017) CM21 + ventilaator (alates 2016) CMP21 + ventilaator (alates 2014) CM21 + ventilaator |
| Tiirikoja järvejaam | SMP21 + ventilaator (alates 2018) CM11 |
| Vilsandi rannikujaam | CMP21 + ventilaator (alates 2014) CM21 |

Vaatlusjaamade summaarse kiirguse mõõteriistad perioodil 2005-2018 (Andmed saadud Riigi Ilmateenistusest)

Lisa 2. Summaarse kiirguse hajuvusdiagrammid päevaandmete põhjal perioodil 2005 kuni 2017.





Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Markus Kivimägi

Annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose - „**Satelliitidelt ja maapealsetest vaatlusjaamadest saadud summaare kiirguse võrdlus Eesti alal**”, mille juhendaja on **Piia Post**, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Markus Kivimägi

01.06.2020