



**Cristo Loit**

# **PÄIKESEENERGIA TOOTLIKKUS KODUMAJAPIDAMISES JA SEDA MÕJUTAVAD TEGURID**

LÕPUTÖÖ

Tehnoloogia ja ringmajanduse instituut  
Keskkonnatehnoloogia ja -juhtimine  
Juhendajad: Aadu Paist, *PhD*, Erki Lember *PhD*

Tallinn 2025

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Cristo Loit

annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Päikeseenergia tootlikkus kodumajapidamises ja seda mõjutavad tegurid

- 1) reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada ja teha üldsusele kättesaadavaks Tallinna Tehnikakõrgkooli digiarhiivi DSpace kaudu;
- 2) reprodutseerimiseks pärast piirangu lõppu juhul, kui instituudi direktori korraldusega on kehtestatud lõputöö avaldamisele tähtajaline piirang.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi.

### **Autorideklaratsioon**

Mina, Cristo Loit

tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja ja iseenda varasematele teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autorile ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

*(allkirjastatud digitaalselt)*

Juhendaja Erki Lember

Töö vastab lõputööle esitatavatele nõuetele.

*(allkirjastatud digitaalselt)*

Lõputöö on kaitsmisele lubatud instituudi direktori korraldusega.

*(allkirjastatud digitaalselt)*

*(kuupäevad digiallkirjades)*

# SISUKORD

SISSEJUHATUS .....	4
1. PÄIKESEENERGIA JA PANEELIDE AJALUGU.....	5
2. PÄIKESEPANEELID PV-PARGIS .....	7
2.1. Erinevad paigutamise variandid päikesepaneelidel .....	8
2.2. PV süsteemide lahendused .....	11
2.2.1. Inverterid ja akud paneelidele .....	13
3. PANEELIDE TOOTLIKUSE MÕJUTEGURID.....	17
3.1. Päikese kiirguse hulk .....	17
3.2. Mustus ja varjud .....	18
3.3. Temperatuuri mõjud .....	19
4. PÄIKESE PARKIDE MÕJU ÖKOSÜSTEEMILE.....	21
4.1. Päikeseпаркide mõju elupaikadele .....	21
4.2. Päikeseпаркide mõju liigirühmadele .....	23
4.3. Päikeseпаркide planeerimine, rajamine ja hooldus .....	24
4.3.1. Päikesepargi rajamise ettepanekud .....	26
5. VAHI 1 MW PÄIKESEPARK.....	28
6. METOODIKA.....	32
7. TULEMUSED .....	33
7.1. Kodumajapidamise aastane elektri kulu ja pargi dimensioneerimine .....	33
KOKKUVÕTE .....	39
SUMMARY.....	41
VIIDATUD ALLIKAD.....	42
LISA 1. KRISTALSETE ELEMENTIDE SUURIMAD SAAVUTATUD EFEKTIIVSUSED AASTAST 1976-2024. AASTANI. ....	44
LISA 2. ELEMENDI TEHNOLOOGIA ARENG JÄLGIKES EFEKTIIVSUSE KASVU 1976-2024. AASTANI. ....	45
LISA 3. VAHI PV TOOTLIKKUS AJAVAHEMIKUS 01.10.2023-30.09.2024 .....	46
LISA 4. 10 KW JA 220 KW PV-PARK DIMENSIONEERITUD KODUMAJAPIDAMISELE .....	47

# SISSEJUHATUS

Uuenevate taastuvenergiaallikate kasutamine tuleviku energiaressursina on pälvinud ülemaailmselt suurt tähelepanu [1]. ÜRO on väljatöötanud säästva arengu ja kasvu saavutamiseks tegevuskava, kus on kirjas 17 erinevat säästva arengu eesmärki (SDG-17). Üks peamistest eesmärkidest (SDG-17) on pakkuda elanikkonnale puhast ja taskukohast energiat. Seetõttu julgustatakse ja toetatakse taastuvenergia tootmist tugevalt nii tehnoloogiaarenduse, kui ka valitsuse poolelt, et tagada tulevikus jätkusuutlik energia haldamine. Seepärast on jätkusuutlik alternatiiv ja energia haldusstrateegia maksimeerida päikese fotogalvaanilise (PV-*photovoltaic*-fotogalvaaniline) süsteemi toodetud energia kasutamist [2]. Olles üks tuleviku energiaressurssidest on selle panus maailma elektri tootmisesse veel üsna madal. Kuid sellegi poolest on see tänapäeval üks tuntumaid ja populaarsemaid elektri tootmis viise. Taastuvenergia tehnoloogiate seas moodustas päikeseenergia 2022. aastal peaaegu 31% kogu paigaldatud taastuvenergia võimsustest, olles seeläbi teine enim paigaldatud taastuvenergia allikas pärast hüdroenergiat [1]. Järgmise 30 aasta jooksul võib päikeseenergia PV valdkond areneda teiseks kõige suuremaks elektritootmisallikaks, ehitades rohkem päikeseparke, mis võimaldaks riikidel toota umbes 25% maailma energia vajadusest aastaks 2050 [1].

Päikeseenergia on ammendamatu allikas, mida inimestel ei ole võimalik vähendada. Päikeseenergia muudetakse elektrienergiaks PV-paneelide abil, kus kiirte kogumisel ei tekitata kasvuhoonegaaside heitmeid. 2023. aasta seisuga moodustas Eesti energeetikasektorist 47% fossiilkütustest toodetud energia ning elektrituru kõikumise tõttu puudub kindlus piisava varustuse osas. Eesti eesmärk on jõuda aastaks 2030 taastuvenergia osakaaluga 65%-ni, sh päikeseenergia. Kuna Eesti ei asub geograafiliselt optimaalses piirkonnas, kus toota päikeseenergiat on oluline välja selgitada, kui palju energiat PV-süsteem toodab. Probleemist lähtuvalt püstitati eesmärk: välja selgitada, kui suur peaks olema rajatava päikesepargi võimsus ühele kodumajapidamisele.[2],[3],[4]

Eesmärgi saavutamiseks püstitati järgnevad uurimisülesanded:

- töödelda ja analüüsida PV-pargi tootlikkuse andmeid;
- töödelda ja analüüsida kodumajapidamise tarbimise andmeid;
- pargi dimensioneerimine kodumajapidamisele, et leida kõige optimaalsem PV-pargi võimsus.

Käesolev lõputöö jaguneb kaheks osaks, kus esimeses osas tehakse teoreetiline ülevaade päikeseenergia arengust, tänapäeval kasutatavatest süsteemidest ja paneelide mõju teguritest. Samuti kirjeldatakse päikeseparkide mõju ökosüsteemile ja selle rajamis meetmeid. Teises osas dimensioneeritakse kodumajapidamisele päikeseпарк, jälgides püstitatud uurimisülesandeid ja eesmärki.

# 1. PÄIKESEENERGIA JA PANEELIDE AJALUGU

Päikese tahtliku kasutamist alustati osade andmete põhjal 3...7. saj e.m.a. Kus kasutati päikest kui süüte vahendit, kas siis lõkke põlema panemiseks või siis tõrvikute süütamiseks. Päikeseenergiat, kui tootlikku ressursi hakati kasutama alates 1839. aastast, kui Prantsuse teadlane Edmond Becquerel avastas fotogalvaanilise efekti. Efekti tulemusel loodi olukord, kus elektrolüütilise seadme tootlikkust suudeti kasvatada sõltuvalt valguse tugevusest. Esimene fotogalvaaniline element valmistati 1883. aastal leiutaja Charles Frittsi poolt, kus kasutati pooljuhina seleeni kattes selle õhukese kulla kihiga. Füüsikateoreetik Albert Einstein avaldas 1905. aastal tulemused fotoelektrilise elemendi olemusest ja 1921. aastal sai ta selle eest Nobeli preemia füüsikas.[5],[6]

Uurimisinstituudis *Bell Laboratories* töötanud füüsik Russel Ohl avastas 1940. aastal räni *pn*-siirde ning 1946. aastal patenteeris räni kasutatava päikeseplatari [5]. Räni võeti kasutusele 1953. aastal ja sellega suurendati fotoelementi efektiivsust 6%-le. Efektiivsus näitab, kui suurel hulgal päikese kiirgust suudetakse muuta elektriks [5]. Räni tehnoloogial põhinevad päikesepaneelid tulid jaemüüki 1956. aastal. Järgnes kiire arengu periood, kus tehnikat parandati ja tuldi välja uuemate lahendustega (1956-1960). 1960. aastal suudeti parandada fotoelemendi efektiivsust koguni 14%-ni. 1975. aastal maksis 1 W toodetud elektrienergiat umbes 100 \$.[6]

Austraalias suudeti 1985. aastal saavutada 20% efektiivsus ränist tehtud päikesepaneeliga. Üheksa aastat hiljem 1994. aastal suudeti USA-s saavutada 30% efektiivsus. Hetkeseisuga on labori tingimustes suudetud saavutada 47,6% efektiivsus, mis saavutati Saksamaal *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems* poolt [7]. Tänapäeva turul on enim levinud monokristalsed, polükristalsed ja amorfse kilega päikesepaneelid [8].[6]

Tänapäeval on paneelide jaoks kasutatavaid elektroonsete ja optiliste omadustega pooljuhtmaterjale sadu. Esimene materjal, millel olid sobivad omadused, oli seleen. Räni sobivus leiti koos transistorite arendamisega. Transistor on kolme väljaulatuva metall kontaktiga pooljuhtseadeldis, mille levinum loomis materjal on räni. Paneelide pidev areng ja efektiivsuse suurenemine muutis paneelide tootmise heaks investeerimis kohaks. Lõpuks hakati päikesepaneeli massiliselt tootma ja tänu sellele hakkas ka neilt toodetav energia ennast ära tasuma tavainimestele. 2000. aastatel oli maailmas kokku installeeritud 1 GW võimsuse suurusega päikesepaneelid. 2012. aastal suudeti päikesepaneelidega kokku toota 35 GWh elektrienergiat, mis võrreldes teiste elektritootmis võimalustega oli 0,5% kogu maailma toodangust. Päikesepaneelide paigaldamine muutus nii populaarseks, et juba 2013. aasta esimeses pooles oli maailmas päikesepaneelide koguvõimsus kasvanud

100 GW-ni. Kõige esimesed riigid, kes päikesepaneelid endale paigaldasid olid Saksamaa, Jaapan ja Itaalia. Järgmise kolme aastaga suurenes tootlikkus kogu maailmas 3 kordselt, kuna 2016. aastal küündis see ligi 300 GW-ni. Tänapäeval on maailmas kõige suurimad elektrienergia tootjad Hiina, ületades järgmise riigi tootlikkuse ligi viiekordselt (Tabel 1) ning vastutab ligi kahekolmandiku päikeseenergia globaalsest kogutoodangust. Hiina, kelle riigisisene päikesepaneelide võimsus on 609 MW, USA 139 MW ja Jaapani 87 MW [9].[10],[5]

Tabel 1. Suurima päikeseenergia tootlikkusega riigid 2023. aastal [9]

Järjestus	Riik	Päikeseenergia, MW (kumulatiivne)
1	Hiina	609
2	USA	139
3	Jaapan	87
4	Saksamaa	81
5	India	73
<b>Kogu päikeseenergia kokku</b>		<b>989</b>

Euroopas on kõige kauem päikeseenergiaga tegelenud Saksamaa ja nagu eelnevalt mainitud oli ta üks esimesi riike maailmas, kes päikeseenergia tootmisega tegelema hakkas. Hiina alustas päikeseenergia tootmisega hiljem, kuid on suutnud teistest suur tootjatest 4 kordselt mööda minna.[9]

## 2. PÄIKESEPANEELID PV-PARGIS

PV paneelide tööpõhimõte on ära kasutada fotoelektrilisi omadusi, mida pakkuvad erinevad pooljuhid, nende abil muundatakse päikeseenergia elektrienergiaks. Päikesepaneelid on ühed kindlamad taastuvenergia tootmise allikaid ja paneelide hooldus kulud on minimaalsed [11, p. 113]. Päikesepaneel koosneb oma ehituselt viiest kihist, mis on kokku pressitud ja asetatud metallraami sisse [11, p. 113],[8].

Nendeks kihtideks on [8], [11, p. 120]:

- pinnatöötlemisega klaas, mis vähendab peegeldust;
- kilematerjal (polümeerist);
- päikeseplatari elemendid, mis on omavahel ühendatud;
- polümeerkile ja kaitsekile;
- alusmaterjal, milleks enamasti kasutatakse alumiiniumit.

Paneelide hooldamisel ja puhastustöödel tuleb ettevaatlik olla, kuna kui niiskus satub elementide vahele, rikub see elektrilised ühendused ja paneel kaotab osa oma efektiivsusest või üldse enam ei tööta. Enamasti kasutatakse ränist tehtud PV-paneele, kas siis amorfseid (*a-SI*), polü(multi)kristalseid (*poly(mc)-SI*) või monokristalseid (*c-SI*). Sellest tulenevalt on turul saadaval eri liike päikesepaneele: mono-, multi- ja polükristalseid [11, p. 113].

Amorfse kilega päikesepaneeli (*amorphous thin film panels*) efektiivsus on väike ja hinna poolest odav. Neid saab kasutada erinevatel materjalidel ja on võimalik muuta painduvaks. Arvestada tuleks sellega, et paneelide paigaldamisel peaks olema kaks korda rohkem vaba pinda, kui tahetakse saavutada sama tootlikkus mis teiste paneelidega [12].

Kõige efektiivsemad on monokristallilised päikesepaneelid (*monocrystal solar panels*), miinus nende paneelide juures on tootmise kallidus, sest paneel koosneb suurtest räni kristallidest. Kõige esimene täheldatud efektiivsus monokristalli tehnoloogiat kasutades oli 13,9%, mis saavutati 1977. aastal Mobi Solari poolt ja peale seda on efektiivsuse tõstmisele panustanud erinevad ettevõtted ja ülikoolid (Lisa 1). Otstarbekas on kasutada neid paneele siis, kui paigalduspinda on vähe [12]. Vältida nende paigaldamist kohtadesse, kus temperatuurid võivad olla kõrgemad kui tavaliselt, sest siis kaotavad monokristalsed paneelid kõige rohkem tootlikkust. Paneelide efektiivsus jääb 20% juurde.

Polükristalsed paneelid on loodud väiksematest räni kristallidest olles väiksema kasuteguriga ja odavamad, kui monokristalsed paneelid. Suuremate temperatuuride juures suudavad paneelid tootlikkust hoida ja on vastupidavamad päikesekiirguse vastu [12]. Efektiivsus jääb paneelil 17% juurde. Paneeli testimise jaoks on vaja kasutada

standardtingimusi (*STC, standard test conditions*), kus päikese kiirgus on  $1000 \text{ W/m}^2$ , paneeli temperatuur on  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  ja õhumassi indeks on 1,5 AM [13].[8],[11, p. 114]

Kõige aktiivsemalt on panustanud monokristalli tehnoloogia uuringutesse UNSW (*University of New South Wales*) ülikool. Hetkel on kõige suurem efektiivsus 26,1%, mis saavutati 2018. aastal Saksamaal ISFH (*Institute for Solar Energy Research in Hamelin*) poolt. 2000. aastate alguses hakati uurima uut tehnoloogiat silikoon heterostruktuurid (HIT). Esimene saadud efektiivsus oli 21,2%, Jaapanis tegutsenud elektroonika firma poolt Sanyo. Nüüdseks on suudetud tehnoloogia efektiivsust parandada 6,4% võrra. Maailma üks juhtivaid PV-firmasid Hiinas, LONGi saavutas 2023. aastal 27,6% efektiivsuse HIT tehnoloogiat kasutades.[14]

Mitme ühendusega ehk polü(multi)kristalne tehnoloogia võib tulevikus osutada mõistlikuks investeerimis otsuseks ka majanduslikult. Kuid hetkel on saavutatud tulemused võimalikud ainult laboritingimustes (Lisa 2). Kõige esimene mitme ühendusega elementide tehnoloogia efektiivsus 27,6% saadi 1989. aastal Ameerikas Varian firma poolt. Suuresti on selle tehnoloogia arengule panustanud NREL (*National Renewable Energy Laboratory*), kuna tegutseb kõikide mitme ühendus elementide tehnoloogia ala liikidega. Kahes tehnoloogias on NREL juhtival kohal saavutades kõige kõrgemaid efektiivsuse tulemusi. Kahe ühendusega elemendi (mitte kontsentreeritud) tehnoloogiaga saavutati 2020. aastal 32,9% efektiivsus. Kolme ühenduse või rohkemaga (mitte kontsentreeritud) on suudetud saavutada 39,5% efektiivsus, mis saavutati 2021. aastal.[14]

1976. aastal olid kõige efektiivsemad sadestatud kilega (*thin film*) päikesepaneelid, mis tänapäeval on väikese kasuteguriga ja odavad. Kõige rohkem levinud ja kasutatud kristalsed räni paneelid on hinna ja saadava efektiivsuse (umbes 25%) poole pealt kõige kasutajasõbralikumad. Viimaste 20 aastaga on juurde lisandunud palju uusi tehnoloogiaid, kus proovitakse taaskasutada materjale või kasutada orgaanilisi materjale. Kõrgeima efektiivsuse on saavutanud mitme ühendusega paneelid, kus saavutati 47% efektiivsus.[14]

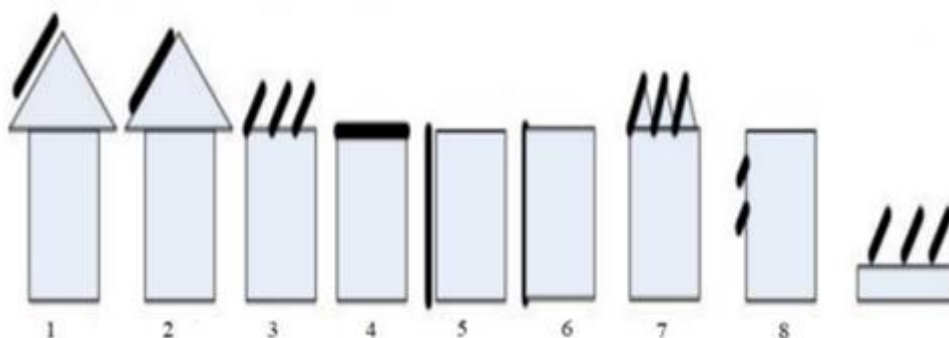
## **2.1. Erinevad paigutamise variandid päikesepaneelidel**

Tänapäeval võib päikesepaneeli leida erinevatelt pindadelt ja eri suurustes. Siiski on olenevalt olukorrast paneelidel välja arvatud kõige efektiivsemad parameetrid, mida tuleks jälgida ühe paneeli paigaldamisel. Enamasti soovitatakse paneelid paigaldada maapinnale, kuna nende paigaldamine ja hooldamine on kõige lihtsam ja tootlikkus kasutoovam. Nüüdseks ajaks on välja mõeldud erinevaid paigaldusviise ja -süsteeme, et paneeli saaks kasutada igal pool ja tootmine oleks võimalikult efektiivne ja kauakestev. Näiteks on olemas paneelid, mis suudavad päikeseenergiat koguda mõlema küljega. Tänu

sellele saab paneeli pinnaühiku kohta rohkem energiat muundada, kuna kasutatakse keskkonna peegeldumisvõimet. Kahjuks ei ole see tehnoloogia veel piisavalt arenenud, et see suudaks konkureerida teiste turul olevate paneelidega.[12],[13]

PV paneele pannakse kokku kasutades erinevaid meetodeid, need saavad olla jadamisi, mis suurendab pinget, või paralleelselt, kus suurendatakse voolu. Enamasti kasutatakse paneeli ühendus kombinatsioone, et saavutada suurem tootlikkus. Kuid neid kombinatsioone kasutatakse eelkõige suuremates süsteemides, kus luuakse jada-paralleelseid, ristseotud või siis mitme stringiga paneele. Paneelidele ühendatakse külge harukarbid, mis koosnevad diodidest ja kaabelühendustest. Selle abil saab paneele omavahel ühendada ja siis ühendada omakorda inverteritega.[13]

Paneele on võimalik paigutada alusraamidele, et paigaldada need hoonetele või siis maapinnale [13]. Maapinnale paneelide paigaldamiseks on vaja ehitada kandekonstruktsioon, mis suurendab päikesepargi kulusid, kuid tagavad ligipääsu paneelidele, et teostada hooldustöid. Enamasti ei ole inimestel nii palju vaba maad, et sellist suurt ettevõtmist endale lubada. Selle asemel on võimalus ära kasutada oma hoonet ja paigaldada paneelid hoonele või integreerida võimalusel hoonesse. [12] Raami ülesanne on anda PV paneelidele kaldenurk ja suund. Eestis on arvutuste kohaselt kõige efektiivsem suund lõuna ja kaldenurk  $40^\circ$ , kuid sõltuvalt asukohast ja aastasest tootlikkusest pole sellel väga vahet, kuna kui kaldenurk jääb  $30-45^\circ$  vahele võib see saavutada sama tootlikkuse. PV paneelid mis on paigaldatud lõuna suunas  $40^\circ$  all võrreldes teiste ilmakaartega, tekitab tootlikkuse kadu vastavalt kagu või edela suunal ca 5% ja ida või lääne suunal ca 20%. Sõltuvalt hoone tüübist või maa olemasolust on võimalik päikesepaneele paigutada igale poole (Joonis 1) [12],[13],[8]



Joonis 1. Võimalikud variandid, mida kasutada paneelide paigaldamisel, kus numbrid 1-2 on kaldkatusele, 3-4 lamekatusele, 5-6 fassaadile, 7-8 päikesevarjuna ja kõige parempoolne maapinnale.[12]

Kaldkatusega majale on võimalik paneele paigaldada katuse peale või siis integreerida katusekattega, kuid võrreldes maapinnale paigaldatud paneelidega ( $40^\circ$ ) väheneb

tootlikkus ca 1% (paneeli kalle on 30° või 50°). Paneelide kaldenurk on oluline ka sellepärast, et talvel tuleb lumi paneelidelt kergemini maha. Väiksema kaldenurgaga paneelide puhul võib tootlikkus langeda kuni 8%. Paneelide paigaldamisel katusele tuleb tagada ka tuleohutus, sellepärast jäetakse katuse ja paneelide vahele vähemalt 10 cm vahe. See aitab kaasa ka PV paneelide tootlikkuse tõstmisele, kuna paneelidel on parem jahutus. Olemas on süsteemid, mida saab paigaldada katusel ilma alusraamita, kuid üldjuhul on tegemist *OFF-grid* lahendusega. Enamasti kasutatakse paneelide kinnitamiseks alumiiniumprofiilist alusraamistikku, kuhu paneelid kinnitatakse, kuid kui tahetakse integreeritud lahendusega paneele siis suureneks ka paigaldamise maksumus ja on vaja tagada ilmastikukindlus. Enamus kaldkatused on kõik ehitatud juba optimaalse kaldega paneelide jaoks.[12],[8]

Lamekatuse puhul on ka võimalik PV paneele integreerida katusekattega, kuid tootlikkuse poole pealt ei oleks see kõige parem lahendus. Lamekatusele paigaldatakse paneelid enamasti 18–25° kaldenurgaga, et vältida tuule poolt tekkida võivat kahju. Paneelid kinnitatakse katusele ankrutega. Lamekatuse puhul vähendab tootlikkust kindlasti lumi, kuna paneelidel ei saa väga suurt kallet olla. Lamekatuse miinuseks on see, et katusel võivad tekkida lihtsamini varjud, mis vähendavad samuti tootlikkust. Enamasti võib Eestis selliseid lahendusi näha ainult linnades, kas siis mõne suurema kaubanduskeskuse või tootmishoone katusel.[12]

Päikesepaneelide paigaldamine fassaadile toob kaasa endaga 20-40% efektiivsuse kao, kuid novembrist veebruarini on fassaadile paigaldatud paneelide tootlikkus ca 7% suurem, kui 40° nurga all. Suur pluss vertikaalselt paigaldatud paneelidel on see, et talvel ei kata lumi paneeli ära ja seepärast ei mõjuta see tootlikkust [12],[8]. Kui paneele tahetakse paigutada vertikaalselt oleks mõistlik kasutada paneele fassaadimaterjalina. Päikesepaneele saab kasutada ka akende katmiseks, mille abil toodavad paneelid elektrit ja suvel hoiavad hoone jahedana. Kindlasti tuleks enne hoone planeerimist arvestada paneelide paigutamise lahendustega, kuna siis saab muuta tootlikkust paremaks.[12]

Tänapäeval on olemas jälgimissüsteemiga PV-paneelide variant, mis võimaldab järgida päikese liikumist. Funktsionaalsuse poolest on tegemist erinevate aktiivsete süsteemidega, kus päikese sensorite kasutamine võimaldab süsteemil paneelide kallet ja asimuuti muuta. Passiivsed süsteemid põhinevad vedeliku ja gaasi paisumisel, pool-passiivses süsteemis kasutatakse heliostaati ja Fresneli läätse. Passiivsete süsteemide hulka kuuluvad samuti manuaalne süsteem ja kronoloogiline. Manuaalsel süsteemil peab vajadusel paneelide asentit ise liigutama ja kronoloogiline süsteem, töötab etteantud ajalisel väärtusel. Enamasti kasutatakse rohkem just aktiivseid süsteeme. Suurimad eelised nende lahenduste juures on see, et paneele saab liigutada sõltuvat päikese asendist. Kahjuks on

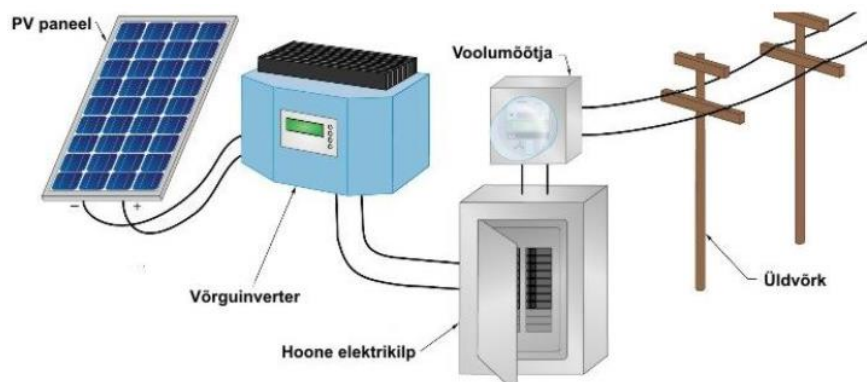
Eestis hajutatud kiirguse osakaal üsna suur ja sellepärast ei saa olla kindel kas jälgimissüsteem ennast ära tasub. Süsteemi soetamine on isegi tänapäeval kallis ja sellepärast proovitakse tootlikkust tõsta paneelide arvelt, mis on kokkuvõtvalt odavam, kui päikest jälgiv süsteem.[8],[13],[12]

## 2.2. PV süsteemide lahendused

PV-paneelide toodetud elektrienergiat saab kasutada erinevalt, esimene võimalus on (*ON-grid system*) kasutada toodetud energiat oma kodus ja üle jäänud osa saata üldelektrivõrku. Teine võimalus on (*OFF-grid system*) salvestada saadud elektrit akupankadesse ja seda sealt vajadusel kasutada, selle süsteemi korral ei ole PV-pargi omanikul ühendust üldvõrguga. Kolmas võimalus on kasutada hübriidsüsteemi, kus on olemas ühendus üldvõrguga ja elektri salvestamise jaoks salvestid. Sobiva süsteemi valimiseks tuleb teada enda võimalusi ja uurida süsteemide plusse ja miinuseid sõltuvalt asukohast.[8],[12]

Elektrivõrku ühendatud süsteem koosneb peamiselt PV-paneelidest, võrguinverterist ja arvestist. PV-paneelidega ühendatud süsteemi puhul on elektrivõrk ise akumulaator. Tänu sellele ei ole vaja teha lisakulutusi salvestite peale ja hoolduskulud on ka väiksemad. Paneelidega toodetud energia, mida majapidamises ise ära ei kasutata on võimalik elektrivõrku maha müüa.[11, p. 110],[8],[12]

*ON-grid* süsteemi eeliseks võrreldes teiste süsteemidega on see, et puudu jääva elektri saab võtta üldisest vooluvõrgust (Joonis 2). Selline olukord võib tavaliselt tekkida talve kuudel, kus päikese kiirgust paneelidele jõuab vähem. Plussiks on süsteemi juures ka väiksem hooldus kulu. Teistes süsteemides vajalikud salvestid on kallid ja keskkonda reostavad seega on see süsteem odavam ja keskkonna sõbralikum.[8]

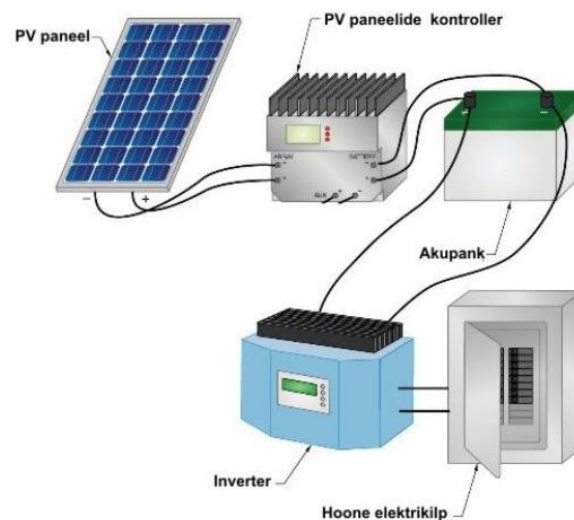


Joonis 2. ON-grid süsteemi skeem [8]

Süsteemis on näidatud põhikomponendid, mis on PV-paneelid, inverter, elektrikilp, voolumõõtja ja üldvõrk. Toodetud alalispinge muundatakse inverteris vahelduvpingeks,

mida saab tavamajapidamises kasutada. Selliste süsteemide kasutamisel on oluline, et kasutaja registreeriks ennast elektritootjaks läbi kohaliku võrguettevõtte näiteks Elektrilevi. Kindlasti peab tutvuma, millised seadmed on võrguettevõtte poolt lubatud. Eriti tähtis on see inverterite puhul, kus peab jälgima, et inverteril on EVS-EN 50438-1:2019 sertifikaat.[8],[15],[11, pp. 110–111]

*OFF-grid* süsteemid on täiesti sõltumatud, mis tähendab, et neil puudub ühendus üldise vooluvõrguga (Joonis 3). Süsteem koosneb PV-paneelidest olles majapidamisele energiaallika eest, laadimiskontrolleritest, akudest, mis saadud energiat salvestab ja inverterist.[11, p. 110]

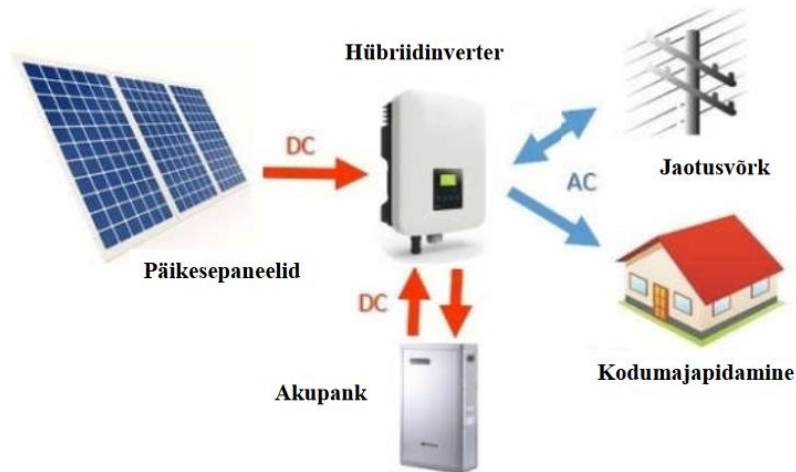


Joonis 3. Lihtsustatud variant võrguühenduseta süsteemist [8]

Selliseid süsteeme kasutatakse piirkonnas, kus puudub ühendus üldelektri võrguga või elatakse piirkonnas, kuhu elektrivõrgu rajamine on liiga kallis. Selline lahendus on kallim võrreldes teiste olemasolevate lahendustega, kuna vajalikud akud maksavad palju ja üle jäävat energiat ei ole võimalik kuhugi suunata, vaid tuleb ära kasutada. Võrguühenduseta süsteemi plussiks on sõltumatus üldvõrgust. Miinuseks on süsteemil see, et sügis-talve perioodidel toodavad paneelid vähem elektrit. Seega on mõistlik investeerida ka varu generaatorisse, kuna see tagab akude laadimise ja elektri olemasolu aastaringelt. Generaatorid on stabiilse väljavoolu hulgaga ja genereerivad nii palju elektrit kui vaja, kuid teised väljundpinged kõiguvad üsna suures ulatuses. Laadimiskontrolleri ülesanne on stabiliseerida pingeid ja aidata akul laadida ja vältida ülekoormuse tekkimist. [12],[11, pp. 111–112]

Hübriidsüsteem on *ON-grid* ja *OFF-grid* süsteemi kombinatsioon, kus on olemas mõlema eelneva süsteemi omadused (Joonis 4, lk 14). Olemas on akupank elektri salvestamiseks ja vajadusel saab üldelektri võrgust elektrit juurde võtta või toodetud elekter maha müüa. See loob võimalusi mängida elektri hinnaga ja otsustada ise, millal kasutada salvestatud

energiat ja millal mitte. Hübriidlahenduse hind on odavam *OFF-grid* omast, kuna salvesti mahutavus ei pea olema nii suur. Pigem on salvesti olemas eesmärgiga katta ära mõni tund, kui elekter on kallid või elekter on ära. Selline lahendus sobib ideaalselt tavainimesele, kelle tipptarbimine toimub enamasti öhtul.[6]



Joonis 4. Hübriidsüsteemi lihtsustatud näidis DC-alalisvool, AC-vahelduvvool [6]

Eestis pole hübriid-päikesejaama lahendused kõige levinumad ja neile sobivaid sertifitseeritud inverteerid leida on raske. Samuti on päikeseenergia populaarsuse tõttu hakatud vähendama antavaid toetusi energia tootjatele. Madalama tarbimisperioodiga ajal tekib olukord, kus paneelid toodavad rohkem ja see muudab elektrivõrgu ebastabiilseks. Näiteks Hispaanias on PV-paneelijaamadele peale pandud ranged regulatsioonid, et ülejäänud energia saadetakse üldvõrku tasuta, kuna tarbijaid ei ole nii palju, kui paneelid on tootnud.[6]

### 2.2.1. Inverterid ja akud paneelidele

PV-parkide üks olulisemaid komponente on inverter, mille töö kvaliteet otsustab, kas PV-pargis toimub pidev energia tootmine või tekib tööseisakuid. Varasemalt kasutati PV-parkides trafosid, mis takistas DC voolu lekkimist AC võrku. Selle tulemusel võisid tekkida võrgu häired. Tänapäeval kasutatakse trafode asemel rohkem inverteerid, kuna on odavamad ja efektiivsemad, saavutades sellega suurema tootlikkuse.[13]

Paneelidele ühendatakse külge harukarbid, mis koosnevad diodidest ja kaabelühendustest. Selle abil saab omavahel ühendada paneele ja siis omakorda inverteerid. Ülekuumenemise ja DC voolu lekke vältimiseks kasutatakse möödaviigu ja blokeerivaid diode. Need on ühendatud rööbiti ja tagavad, et vool liiguks paneelidest välja. Paneelide väljundvool ja võimsus on proportsionaalselt seotud neile langeva päikese kiirgusega ning neil esineb mittelineaarne seos nende voolu-pinge kõveras ja võimsuspinge suhtes. Paneeli efektiivsust mõjutavad nad vaid konkreetsel ajahetkel ja neil

on ära määratud väärtused, mis sõltuvad kiirgustasemest ja temperatuurist. *Maximum Power Point* on maksimaalne võimsuse väärtus, mis muutub, kui kiirgustase või temperatuur muutuvad. Sellepärast on oluline neid karakteristikuid jälgida läbi kontrolleri. Neid väärtuseid saab tänapäeval jälgida kasutades *Maximum power point tracker*-it. Tegemist on muunduritega ja impulsigeneraatoritega [11],[13]. Impulsigeneraatorid genereerivad impulsse, mis jälgivad paneeli pinget ja see läbi lasevad neil töötada maksimaalsel võimsusel. Tavaliselt ei ole vaja ise midagi teha ja töötsükleid ainult jälgitakse, aga mõnikord on vaja ka ise sekkuda, kuna eesmärk on voolupinge suhte hoidmine. PV-paneelide vahel ühenduste tegemiseks tuleb kasutada spetsiaalseid PV kaableid. Tänapäeval on inverterid varustatud nn. jääkvoolu kontrollsüsteemiga, mis lülitab süsteemi 300 ms jooksul välja, kui süsteem tuvastab lekkevoolu, mis on suurem kui 300 mA.[13]

Üldiselt kasutatakse PV-parkides seitset tüüpi inverteersüsteeme [16]:

- keskne inverter;
- *string*-inverter;
- *string*-inverter koos jõudluse optimeerijaga;
- mikroinverter;
- hübriid-inverter;
- inverter koos laadijaga;
- lihtsa süsteemiga inverter.

Inverteri töö kulgeb läbi mitme-astmeliste protsesside, kus paneelist tulev madal DC pinget muundatakse kõrgeks DC pingeks ja lõpuks saavutatakse nõutav sagedus, millega muundub elekter AC pingeks. Inverterid on ühendatud otse elektrivõrku, kus jõuelektroonika kaasabil toimub galvaaniline isolatsioon PV süsteemi.[13]

Keskseid inverteersüsteeme iseloomustab nende suur võimsus, kuni 4 MW. Seda tüüpi inverteersüsteeme kasutatakse *ON-grid* süsteemides. Päikesepargis kasutatakse ühte keskset inverterit, kuhu on ühendatud kõik päikesepaneelide jadad, et muundada alalispinge vahelduvpingeks. Suuremahulise päikesepargi rajamisel on sellise süsteemi kasutamine lihtne ja odav. Miinuseks süsteemi korral on see, et hooldust on raske teha, rikke korral lülitub terve park välja, kui just ei ole ühendatud lisa inverterit. Ühe paneelirea tootlikkuse vähenemine mõjutab kogu pargi elektri tootmise efektiivsust.[16]

String-inverteril on madalam hind ja seda on lihtsam hooldada võrreldes keskse inverteersüsteemiga, mistõttu on see eelistatud valik enamikes võrku ühendatud päikeseenergia süsteemides. Kuid üheks puuduseks on see, et kui üks paneel jadast jääb varju, väheneb kogu jada toodetav elektrienergia. Seetõttu tuleb tagada, et paneelid oleks üksteistest piisavalt kaugel.[16]

String-inverter süsteem koos jõudluse optimeerijaga eeldab, et iga päikesepaneel on ühendatud võimsuse parandamise seadmega, mis tõstab paneelist genereeritud alalispinget ja töötab kasutades MPPT-tehnikat (maksimaalse võimsuspunkti jälgimine). Varju langemine või ühe paneeli töövõime langus ei mõjuta ülejäänud paneelide jõudlust, kuna paneelid ei ole omavahel ühendatud.[16]

Mikroinverteri kasutamisel on need ühendatud iga paneeliga, mis muundab paneelist genereeritud pideva pinge alalispingeks ilma et, paneelid saaksid üksteist mõjutada, kuna need ei ole omavahel ühendatud. Seda tüüpi inverter töötab võrku ühendatud süsteemiga, kuid suurtes päikeseparkides muutub süsteem kalliks, mistõttu kasutatakse seda tüüpi invertereid väikestes parkides, kus on kasutuses väiksem arv paneele.[16]

Hübriid-inverteris kasutatakse kahte tüüpi energiaallikaid päikesepaneele ja akusid, kus inverterisse on ühendatud päikesepaneelide ja akude jada. Inverter täidab sellega mitmeid funktsioone näiteks muundab paneelidest genereeritud pinge vahelduvpingeks. Laeb akusid päikesepaneelide abil ja kui päikesepaneelidest genereeritud energia ei ole akude laadimiseks piisav, laeb inverter akusid põhivõrgust, muutes vahelduvpinge alalispingeks. Varustab parki elektrivooluga, kui põhivõrgus tekib elektrikatkestus. Kui põhivõrk varustab majapidamist elektriga, suunab inverter päikesepaneelidest genereeritud amprid põhivõrku.[16]

Inverter koos laadimisregulaatoriga suudab reguleerida akude laadimist ja muutab alalispinge vahelduvpingeks, et seda saaks kasutada majapidamises. Võimalik on kasutada ka lihtsamaid invertereid, mille ülesanne on muundada alalisvool vahelduvvooluks. Sellisel juhul tuleb lisaks kasutusele võtta ka laadimisregulaator. Tavaliselt kasutatakse selliseid lahendusi *OFF-grid* päikeseparkides.[16]

Eramaja jaoks loodud PV-pargis tuleks kasutada süvatsükliakusid, kuna taluvad pikaajalist tühjaklaadimist ja võivad pikemat aega tühjana seista. Kõik süvatsükliakud ei ole sobivad päikesepargi loomisel näiteks UPS akud on mõeldud varuenergia saamiseks ja võivad saada 100% tühjak, kuid nende laadimistsükli arv jääb 300–500 vahele, mis tähendab, et akud kaotavad oma võime salvestada elektrit paari aastaga. Tavaliselt kasutatakse koduelektri jaamades kõige enam avatud süvatsükli plii-happeakusid ja suletud VRLA-akusid. VRLA-akud (*Valve Regulated Lead-acid Battery*) on suletud ehitusega, kus tekivad vesiniku ja hapniku gaasid, mis muutuvad uuesti veeks. VRLA-akude mahutavus on 20% väiksem teistest akudest. Samuti on tööiga võrreldes happeakudega lühem. Akud on väga tundlikud valesti kasutamisel, kuid on ohutumad ja neid saab kasutada erinevades asendites. Nende isetühjenemine on aeglasem ja väiksemate kadudega, võrreldes teiste akudega. Süvatsükli avatud happeakude isetühjenemine on 4% nädalas +25 °C juures, sellepärast peaks akusid laadima iga 2 kuu tagant. Täielikult laetud aku on külmumiskindel,

samas tühjana hoitud aku võib külmuda juba  $-7\text{ °C}$  juures ja rikkuda aku. Mäluefekti puudumise tõttu sobivad plii-happeakud väga hästi eramaja energiaallikaks, sest neid ei pea peale täislaadimist täielikult tühjendama.[11, pp. 131–132]

### 3. PANEELIDE TOOTLIKUSE MÕJUTEGURID

Päikesepaneeli tootlikkust mõjutavad mitmed tegurid: kaldenurk, asimuut, kiirguse hulk, tolmu, varjud ja temperatuur on ühed olulisemad. Paneelide paigaldamisel on oluline teada kõige optimaalsemat kaldenurka ja ilmakaart, kuhu poole paneel suunata. Eestis on kõige optimaalsem kaldenurk 40° maapinnale rajatud paneelide jaoks. Kõige efektiivsemalt saab paneel päikesekiirgust endasse koguda, kui ta on suunatud lõuna poole.[6]

Võimalusel saab rajada PV-pargi, kus paneelid jälgivad ise päikese liikumise suunda ja kaldenurka, ehk nad suudavad toota võimalikult palju elektrit. Võimalik on kaldenurki ka ise muuta, tavaliselt on suvel mõistlik kasutada 30–40° kaldenurka. Hilissügisest kuni hilistalveni on mõttekas paneelid paigutada 90° nurga alla, kuna see tagab kõige suurema tootlikkuse.[6]

#### 3.1. Päikese kiirguse hulk

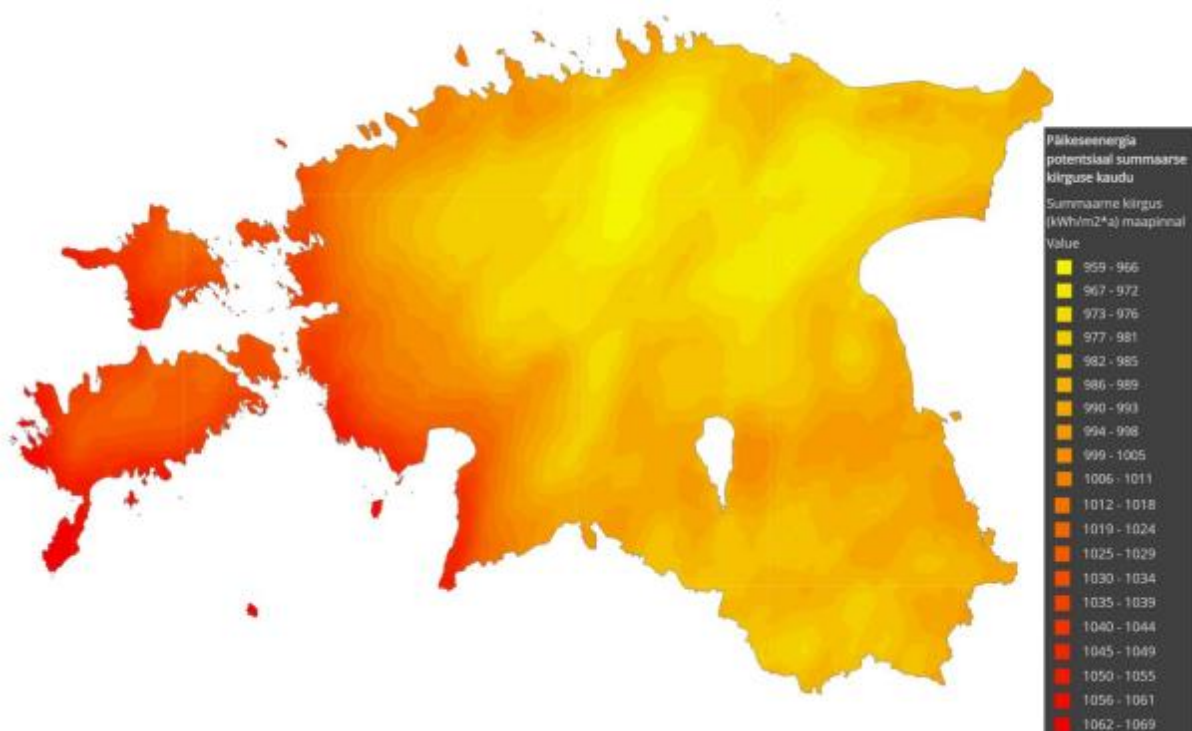
Päikesekiirguse hulk, mida tuntakse kui päikesekiirgustihedust, on oluline tegur päikesepaneelide (PV) süsteemide jõudluse määramisel. Päikesekiirgus varieerub geograafilise asukoha, kellaaja ja ilmastikutingimuste järgi. Seda mõõdetakse tavaliselt kilovatt-tundides ruutmeetri kohta päevas (kWh/m<sup>2</sup>/päevas) ja kõrgem kiirgustihedus toob kaasa suurema energiatootmise efektiivsuse päikesepaneelide süsteemides. Eestis paistis päike 2023. aastal kõige rohkem Lääne-Eesti saartel, kus päike paistis 2132 tundi see mõõtmise tehti Vilsandi ilmajaamas (Tabel 2).[17],[18]

Tabel 2. 2023. aasta päikesepaiste kestuse summad kokkuvõtlikult ja kuude kaupa (tundides) [18]

Jaamad:	Kuusiku	Pärnu	Tallinn-Harku	Tartu-Tõravere	Tiirikoja	Vilsandi	Võru
Päikesepaiste aastas	1949	2051	2069	1769	1827	2132	1861
Jaanuar	19	19	18	22	20	35	18
Veebruar	43	48	44	49	50	57	43
Märts	127	133	137	94	100	130	92
Aprill	272	254	296	218	226	290	226
Mai	364	378	388	325	325	410	345
Juuni	391	385	427	348	343	417	358
Juuli	241	314	268	244	256	327	257
August	174	195	183	172	209	162	197
September	188	212	188	196	184	187	226
Oktoober	90	94	79	69	89	84	65
November	26	17	30	21	12	29	23
Detsember	16	4	12	13	13	6	11

2023. aasta kõige päikesepaistelisem kuu oli juuni, kus Tallinn-Harku ilmajaamas mõõdeti 427 tundi päikesepaistet. Detsembrist-veebruarini olid päikesepaistete tunnid kõige väiksemad, kus päike paistis keskmiselt 27 tundi. Kõige päikesepaistelisem kevade kuu oli mai, kus paistis päike keskmiselt 362 tundi. Kõige päikesepaistelisem sügis kuu oli september, kus paistis päike keskmiselt 197 tundi.[18]

Päikesekiirguse prognoosimise meetod PV jaamade jaoks hõlmab päikesekiirguse prognoosi sarnasuse meetodit, mis arvutab päikesekiirguse prognoose järgmiseks päevaks (**Error! Reference source not found.**).



Joonis 5. Päikeseenergia aastane kiirgus [19]

See meetod on kasulik PV-jaamade omanikele, et planeerida energiatootmise sisendit võrku ja tagada võrgu stabiilsus ja saades täpsem prognoos päikesepaneelide toodangule. 2016. aasta ELME projektis kaardistati päikeseenergia pikaajaline aastane potentsiaal.[17],[19]

### 3.2. Mustus ja varjud

Tolmu kogunemine avaldab olulist mõju päikesepaneelide (PV) jõudlusele, vähendades energiatootmise efektiivsust. Tolmu ladestumise põhjustatud energiatootmise kaod võivad varieeruda vahemikus 2,8% kuni 50% päevas olenevalt tolmu tihedusest. See mõju on kõige märgatavam piirkondades nagu Lähis-Ida, Aasia ja Austraalia, kus tolmu kogunemine on tavapärane. Lisaks võib tolm põhjustada majanduslikke kahjusid

vahemikus 0,0011 kuni 22,43 \$ ruutmeetri kohta, peamiselt tingituna sagedase puhastamise vajadusest optimaalse jõudluse säilitamiseks. [20]

Tolmust tingitud kahjude vähendamiseks on uuritud mitmeid puhastustehnikaid. Kuigi veepõhised puhastussüsteemid on laialdaselt kasutusel, on need piirkondades, kus veevarud on piiratud, ebaotstarbekad. Sellisel juhul soovitatakse alternatiive nagu robotpuhastus ja elektrostaatiline tolmueemaldus. Igal meetodil on omad väljakutsed: robotisüsteemide on keeruline hallata ning elektrostaatilised meetodid ei ole veel laialdaselt kasutusel. Tolm avaldab märkimisväärset mõju nii päikesepaneelide efektiivsusele ja hoolduskuludele. Tõhusa puhastusstrateegia valimine ja kohaliku keskkonnaga arvestamine on oluline päikeseenergia paneelide jõudluse optimeerimiseks.[20]

Varjude tekkimine paneelidele vähendab samuti PV-paneelide tootlikkust. Vahelduvad aastaajad mängivad selles suurt rolli, kuna aastaegade vaheldumisega muutuvad ka varjude pikkused. Varjude tekkimist peab vältima, kuna iga varju jäänud paneel vähendab tootlikkust märgatavalt. Kui paneeli pinda varjata vähemalt 2% ulatuses võib tootmisvõimsus väheneda kuni 70%. Eriti suur tootlikkuse kadu tekib siis, kui paneelid on üksteisega ühendatud järjest. Sellisel juhul mõjutab ühe varju jäänud paneeli tootlikkus tervet pargi efektiivsust.[6]

### **3.3. Temperatuuri mõjud**

Tavaliselt muundatakse alla 20% neelatud päikeseenergiast elektrienergiaks, ülejäänud energia muutub soojuseks. PV-pargid koosnevad erinevatest seadmetest, mis kõik on tundlikud soojusele. See soojus tõstab PV-paneeli töötemperatuuri, mis avaldab negatiivset mõju nii selle efektiivsusele, kui ka elueale. Paneelide efektiivsus sõltub temperatuurist, jahedam temperatuur vähendab pooljuhi takistust ja tõstab omakorda pinget. Soojema ilma korral paneelide pooljuhi takistus on suur, mis langetab pinget. See tähendab, et soojema temperatuuri korral on paneelide tootlikkus väiksem.[21],[6]

Hinnanguliselt vähendab 1 °C tõus PV-elementi temperatuuris võimsuse väljundit 0,65–0,85% võrra. Seepärast on väljamõeldud mitmeid erinevaid tehnoloogiaid, mis suurendaks paneelide efektiivsust. Üks paljutöötavatest meetoditest on faasimuutusmaterjalide (*PCM*) kasutamine, mis märkimisväärselt vähendavad paneelide temperatuure. *PCM*-id neelavad üleliigset soojust, muutes oma faasi (nt tahkest vedelaks) ilma temperatuuri tõstmata, aidates seega päikesepaneeli jahutada. Jahutussüsteemi kasutamisel suurendaks see paneelide tootlikkust 35,8%, eriti kuumades piirkondades, kus ümbritseva keskkonna temperatuur ulatub 40 °C-ni ja päikesekiirguse tase ületab 1000 W/m<sup>2</sup>. See passiivne jahutussüsteem ei vaja töötamiseks välist energiat, muutes selle väga tõhusaks. See pikendab PV-paneelide eluiga ja parandab igapäevast elektritootmist, hallates üleliigset

soojust, mis muidu vähendaks paneelide efektiivsust. PV-paneelide jahutamine loomuliku õhu- või veekonveksiooni abil on lihtsaim ja odavaim meetod, mida rakendada. Hoonetesse integreeritud fotogalvaanika on lahendus, mis muudab tavalised hooned nullenergiahooneteks. PV-paneelide temperatuuri saab vähendada, luues looduslik õhu konveksiooni kanali, mis asub PV-paneelide taga. See suudab vähendada ka päikesepatarei temperatuuri. Selliste kanalite loomine toob kaasa märkimisväärse temperatuuri languse ja suurendab PV-paneelide võimsust hoonete seinte ja katuste jaoks. Eestis saadakse suurim tootlikkus just varakevadel või hilissügisel, kus päike on intensiivne, kuid temperatuur on madalam. Ideaalseks kohaks rajada päikeseparke Eestis on rannikualad ja saared, kuna seal on keskmisest tuulisem, mis omakorda hoiab paneelide seadmetel temperatuurid madalal. Samuti on rannikualadel vähem pilvi, kui mandril. Päikeseparkide rajamisel on oluline nende paigaldusviis, mis võib suurendada paneelide jahutust, seega tootmis efektiivsust.[21],[22],[6]

## 4. PÄIKESE PARKIDE MÕJU ÖKOSÜSTEEMILE

Taastuenergia tootmine kogub ülemaailmselt populaarsust kliimamuutustega võitlemiseks, ilma et oleks vaja drastiliselt vähendada inimeste energiatarbimist. Päikeseenergia pakub kõige kiiremini arenevat lahendust. Kuid maapinnale paigaldatud päikesepaneelid nõuavad palju maad, mis tekitab konflikte teiste maakasutustüüpidega, eriti põllumajanduse ja elurikkuse säilitamise valdkonnas. Kõige suuremas ohus on kõrge liigirikkuse ja elurikkusega alad. Kindel ökosüsteemi muutev tegevus on PV-parkide rajamine, kuna sellega võivad kaasneda häiringud ja ära võivad kaduda elupaigad. Teatavad piirkonnad maailmas, kus on suured energiavajadused, nagu Euroopa, Jaapan ja India peavad pühendama 0,5–5% oma maast päikeseparkidele aastaks 2050. Sellepärast on päikeseenergiasse investeerimine elujõuline valik, kuna see on ammendamatu ja selle ülemaailmne kättesaadav hulk, hinnanguliselt on umbes 2500 TW, mis ületab inimeste ära kasutatava energia nõudluse tunduvalt.[23]

### 4.1. Päikeseparkide mõju elupaikadele

Kõige suurema keskkonnamõjuga etapp on päikesepargi rajamine. Üldjuhul on pargi rajamisel tekkivad mõjud siiski üsna väikesed ja sõltuvad asukohast. Tekkivaid mõjusid elupaikadele on vaja hinnata juhtumipõhiselt, selleks on vaja välja mõelda võimalikud leevendusmeetmed. Õnneks on uusi leevendusmeetmeid üsna detailselt ja täpselt kirjeldatud ja tänu sellele saab mõjutegurite ulatust vähendada. Lõpuks on kõige tähtsam elurikkuse kasvatamine ja koosluse seisundi parandamine. Kirjeldatakse 5 ökosüsteemi sobivust PV-parkide rajamisel ja sellega tekkivaid mõjusid.[19]

Neile kolmele erinevale elupaigale PV- jaamu üldiselt ei rajata [19]:

- metsaökosüsteemidesse;
- soodesse, veekogudele ja nende lähedusse;
- pärandniitudele.

Metsaökosüsteemidesse päikeseparke ei rajata, kuna eeldab väga suurt majanduslikku kulu ja ökosüsteemi häiringut. Tekib väga tugev negatiivne mõju keskkonnale, mullale ja elustikule. Soistele aladele PV-jaamu ei rajata, kuna seal olev pinnas on pehme ja rasked masinad upuksid ära. Pärandniidud on väga liigirikkad alad ja vajavad palju valgust, paneelid tekitavad maapinnale varjusid, mis tõttu see paljudele liikidele elupaigana ei sobi. Potentsiaalse päikeseenergia jaama rajamine pärandniidule on suure riski ja mõjuga, samuti on nad üleeuroopalise tähtsusega elupaigad. Euroopas asuvad päikesepargid enamasti põllumaadel ja rohumaal ning need kujutavad endast märkimisväärset maakasutuse muutust, arvestades nende suhteliselt madalat energiatihedust.

Ühendkuningriigis, Euroopas ja kogu maailmas oli maapinnale paigaldatud päikeseparkide maakasutuse muutus 2013. aastal ligikaudu vastavalt 15–79 km<sup>2</sup>, 204–1019 km<sup>2</sup> ja 554–2772 km<sup>2</sup>.<sup>[24],[19]</sup>

Veekogudele ja nende lähedusse üldiselt PV-jaamasid ei rajata, kuid see lahendus on kogumas populaarsust ja uusi lahendusi arendatakse. Veepinnale paigutatud päikeseenergiajaamal on ka häid külgi, nt ei kulu väärtuslikku maapinda ja veepind töötab paneelide jaoks nagu jahutusüsteem, samuti väheneb aurumine veepinnalt. Negatiivsed mõjud sellisel pargil on, et hapniku jõuab vähem vette ja takistatakse vee segunemist. Kui veekogu on kaetud kuni 20% ulatuses paneelidega ei tekita see veekogule ja selle elustikule väga olulist mõju. Paneelid võivad vee-elustikule kasulikud olla, kuna pakuvad varju ja taimed saavad kinnituda paneelide külge. Eestis saaks kaaluda PV-jaama rajamist ainult tehiskule veekogule, kuna seal oleks mõju loodusele väiksem. Looduslikele veekogudele rajamist tuleks kaaluda ainult erijuhtudel.<sup>[19]</sup>

Kultuur-rohumaadele on võimalik rajada PV-jaamu, kuna seal on liigirikkus väiksem, kui pärandniitudel ja võimalik tekkiv kahju on väiksem. Kui kasutada sobivaid hooldamise meetodeid on võimalik tekkivat kahju minimaliseerida. Sobilik oleks üldjuhul suurendada paneeliridade vahelisi kauguseid või siis tõsta paneelid piisavalt kõrgele, et oleks võimalik paneelide vahel paremini liikuda. Jaamade ehitamisel nendele aladele peab jälgima, et liigirikkust taastatakse külvamisega.<sup>[19]</sup>

Agroökosüsteemidele päikeseparkide rajamine on kõige mõistlikum, kuna maapind on nendel aladel rohkem degradeerunud. Eelistada tuleks siiski kohti, kus toimub vähem põllumajandustegevust ja vältida tuleks olukordi, kus proovitakse selle arvelt põllumaid suurendada. Päikeseenergiajaamade lähedusse võiks lisada nt mesitarusid, mis soodustaks tolmeldamist. Hea lahendus oleks integreerida päikeseenergia tootmine põllumajandustegevustega. Sellega saaks suurendada pinnaühikult saadavat tulu ja tekitada põllumeestele lisa sissetulekut, mis omakorda vähendaks kulusid elektritarbeld.<sup>[19]</sup>

Suured päikeseenergiajaamade rajamise projektid võivad põhjustada inimeste vastuseisu. Sellepärast on oluline, et kohalikud inimesed kaasataks protsessi kohe alguses. Pargi ehitamisel tekkiv müra, vibratsioon ja tolm on suured häirivad aspektid, mida peaks võimalikult madala hoidma. Need aspektid on õnneks ainult lühiajalised, kuid pikemaajaline on visuaalne reostus, mis ehituse lõpuks järgi jääb. Ühiskonnale tekitab pargi lammutamine ja rajamine töökohti, mis loob positiivset mõju majanduslikult. Seepärast on oluline, et pargi rajamisel palgataks eksperte ja hooldamisel kohalikku tööjõudu.<sup>[19]</sup>

Mõju PV-jaamade rajamisega on siiski märgatav, kuna vähenevad elupaigad maastikualadel ja sellega vähenevad avamaastikega seotud liikide arvukus. Kui jaamade rajamine edukalt planeerida suudetaks osadele liikidele elupaigad taasluua. Visuaalse reostuse leevendamiseks võib proovida päikesepargi ümber istutada puid ja põõsaid, mis ei varjaks paneele. Samuti on võimalik ehitada parkide ümber piirdeaedu, et need katta ronitaimedega, mis vähendaks visuaalset mõju. PV-jaamade hooldusel kasutatakse vett paneelide pesemiseks, kuid Eestis tehakse sellist hooldust ainult maapinnale rajatud PV-jaamadel.[19]

## **4.2. Päikeseparkide mõju liigirühmadele**

Päikesepargid pakuvad liikidele keskkonda, millel pole looduses samaväärset. Päikesepaneelid muudavad mikrokliima tingimusi, valgusrežiimi, hüdroloogiat ja mulla hingamiskiirust, nende kasutusaeg tekitab häiringuid iga 20–30. aasta järel ning nad loovad erilisi elektromagnetvälju, millel võib olla mõju organismidele. Seetõttu võib päikeseparke pidada uueks ökosüsteemiks, mida võivad asustada ümbritsevast liikide kooslusest pärit alamgrupid, järgides uusi koosluse tekkemehhanisme.[23]

Soontaimedele tekkivad mõjud tulenevad pargi rajamistegevustest, paneelide jaoks valitud hooldusrežiimist ja keskkonna ressursside või mõjurite ruumilisest ja ajalisest varieeruvusest. Parkide rajamisel on probleemiks maapinna hävitamine, kas siis herbitsiididega või mehaaniliselt. Suuremahulise häiringu tekitamisest taimestikule on vajalik valida maapinna taastamiseks parim meetod. Taastamisel kasutatakse mulda või seemneid, mis on samalt alalt kokku kogutud. Kohalike soontaimede taastamiseks on see kõige mõistlikum. PV-pargi täielik taastumine võib võtta aega aastaid või aastakümneid. Paneelide vahel ja all tekitatud tingimused erinevad, mis tähendab, et paneelide all olev taimestik on üldiselt liigivaesem ja paneelide ümbrus on tavaliselt liigirikkam. Samuti mõjutab taimestiku liigirikkust paneelidega tekkivad varjud. Sellist mõju taimestikule nähti ka Tšehhis, kus paneelide alt leiti üheaastaseid taimi ja paneelide vahelt rohkem kõrrelisi taimi. Valguskiirguse jõudmine taimedele on samuti oluline ja on leitud, et madala kiirte intensiivsuse korral toimub biomassi kahanemine, kõrgema kiirguse intensiivsuse korral kasvamine. Eestis on leitud, et parem taimekasv toimub paneelide all.[19]

Putukate ja tolmeldajate jaoks on PV-parkides kõige suuremaks mõjuks hooldusmeetmed, mida paneelide ümber tehakse, nt tihe niitmine või herbitsiidide kasutamine. Kui hooldust teha läbimõeldult ja teatud ajavahemike vahelt võib see putukate ja tolmeldajate tegevust soodustada. PV-jaamade piires on suurem liigirikkus liblikatel ja kimalastel. PV-paneelide ridade vahe on suureks mõjuks putukate arvukusel, kuna Saksamaal leiti 40% rohkem liike paneelide vahelt, mis olid paigutatud hõredamalt (vahe 5,5 m), kui tihedamalt

paigutatud paneelide vahelt (2 m). Üldiselt on Eestis paneelide ridade vahed, kuni 10 m. Tänu paneelidele, mis hoiavad osa taimi varjus võib juhtuda olukordi, kus taimede õitsemine toimub hiljem see tähendab, et tolmeldajad saavad pikemalt tegutseda ja ressursse juurde koguda. Veekogude lähedale paigutatud PV-pargid meelitavad liigi veeputukaid, keda tõmbab ligi paneelidelt peegelduv polariseeritud valgus. See võib olla olulise mõjuga, mõjutades putukate paljunemist.[19]

Mõjutegureid lindudele pole veel uurida jõutud, kuid linnud võivad ise olla mõjutegurid paneelidele, kuna kui nad paneelidele maanduvad, sinna prahti ja oma sööki toovad vähendab see paneelide tootlikkust. Lindude hukkumist PV-paneelide pärast ei ole täheldatud, kuid probleemiks võivad olla piirkonda ehitatud elektripostid, mille vastu võivad linnud lennata. Suurem mõju lindudele tekib siis, kui tegemist on suurema PV-pargiga, mis jäävad rändekoridoridesse või veekogude lähedale. Lindude mõjust pole palju uuritud sellepärast, et suurem osa infost on salastatud ja avaliku teaduslikku kokkuvõtet sellel teemal ei ole võimalik avalikustada. Veelinde arvatakse mõjutavat paneelide poolt peegelduv valgus, mis võib petta linde ja arvata, et tegu on veekoguga. Päikesepargid pakkuvad lindudele iste- või pesitsuskohti, enamasti väiksematele lindudele, kes tavaliselt pesitsevad tugistruktuuride vahel või maapinnal tihedas võsas. See loob väiksematele lindudele turvalise koha kaitstes neid röövlindude eest. Kui PV-jaam on piiratud aiaga pakub see lindudele veel turvalisemat elupaika, kuna kaitseb maismaal liikuvate kiskjate eest.[19]

Suureks probleemiks imetajatele on liikumisteede blokeerimine, eriti kui tegu on suuremate PV-parkide rajamisega. Piiratud ligipääsetavusega PV-jaamade alad on samuti negatiivse mõjuga imetajatele. Sellist negatiivset mõju saab õnneks üsna lihtsalt vältida. Võimalusel piiratakse aedadega ümber ainult teatud alad ja ülejäänud alad saab jätta liikumiskoridoridena, mis ei tohiks olla sõiduteede ääres.[19]

### **4.3. Päikeseparkide planeerimine, rajamine ja hooldus**

Päikeseenergia arenduse piisav planeerimine on võtmetähtsusega, et tagada selle areng maakasutusviiside kasutamisega, nagu põllumajandustootmise säilitamine või elurikkuse kaitse, arvelt. Kaitsealade planeerimise tööriistad, mis on algselt välja töötatud elurikkuse kaitse seisukohalt kõige väärtuslikumate alade määratlemiseks (nt kaitsealade loomine), võivad mängida olulist rolli ka uute taristu või muude objektide, sealhulgas PV-jaamade, rajamisel.[19],[25]

Päikesepargi planeerimise korral tuleb jälgida asukohavalikut, et hoiduda liigest keskkonnakahjust. Selleks on vaja jälgida, et ei rajataks piirkondadesse, kus on kõrge loodusväärtus või oluline kultuuriväärtus. Väiksemate süsteemide kasutamised võivad

sobida kaitsealadele, kuna siis välditakse suuremate parkide ehitamist. Selliseid süsteeme saab kasutada elektricarjustel või parklates, ilma et oleks vaja ühendust suurema keskuse vooluvõrguga. Tuleb jälgida, et päikeseenergia süsteemi ei rajataks liiga lähedale kaitstavale alale, kuna see võib ohustada liikide elupaiku. Enamasti on kõige mõttekam rajada PV-park rajatiste lähedale (katused, õuealad, tootmishoone ümbrused) nii on kindel, et ulatusliku mõju elupaikadele ei tekki.[19]

Planeerimisel peab tihedalt koostööd tegema kohalike kogukondadega, et leida kõigile sobilik lahendus ja vältida arusaamatusi. Keskmisi ja suuri päikeseparke võib rajada rohevõrgustiku koridoridesse juhul, kui see rajatakse põllumajandusmaale või ökoloogiliselt degradeerunud aladele. Hetkel on juba kasutatud piiranguid, mis ei luba ehitada nt veekogude-, maanteede piiranguvööndis ja kõrgepingeliinide alla. PV-parkide rajamisel ja planeerimisel peavad kehtima põhimõtted ja juhised, mis ei laseks kahjustada loodust. Selle vältimiseks tuleb kasutada projektides eksperte ja teha koostööd keskkonnaorganisatsioonidega. Päikeseenergia arenduse asjakohane planeerimine, piirates EU poolt kaitstavate liikide ja elupaikade jaoks oluliste asukohtade valikut, on parim leevendusmeede elurikkusele avalduva mõju vältimiseks või minimeerimiseks.[19],[25]

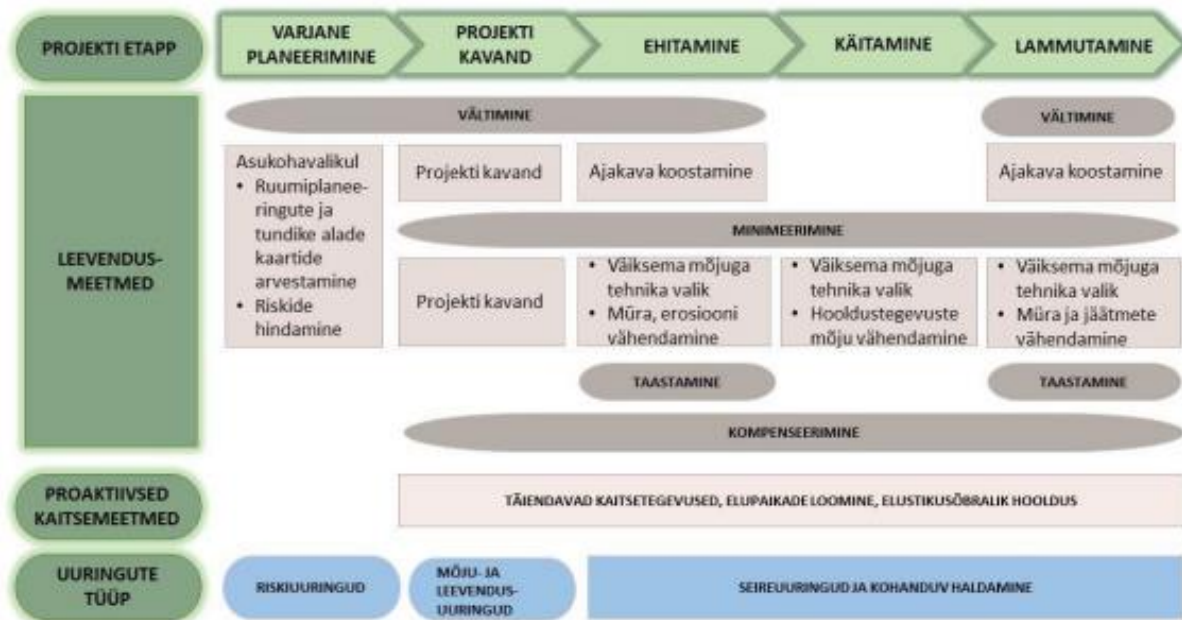
Võimalike kohti PV-jaamade rajamiseks on palju, enamasti on kasulik neid rajada katustele, fassaadidele, parklatesse või tööstuspiirkondadesse. Linnapiirkondades on võimalike arendusi palju, nt on paneele paigaldatud raudteerööbaste vahele, maanteede kohale ja maantee sisse. Paljud Euroopa riigid on võtnud sellised arendused enda riiklikesse arenduskavadesse. Samuti on võimalik ära kasutada alasid, mis on inimtegevuste mõju all olnud. Euroopa praeguste ja endiste söekaevanduste kohta on tehtud uuringud, mis väidavad, et nendel alade PV-jaama püstitamisel on tootlikkus sama suur, kui praegu söest on saadud.[19]

Parkide rajamisel tuleks arvestada järgmiste punktidega [19]:

- elurikkuse säilitamine ja taastamine, mis algaks juba planeerimisetapis;
- jälgida tuleks leevendusmeetmeid;
- arvestada kohalike õiguste ja vajadustega;
- PV-parkide projekteerimisel läbi viia uuringuid ja küsitlusi, et teada saada võimalikud riskid;
- kaasata spetsialiste ja keskkonnaasutusi.

Maastikule vajalikud leevendusmeetmed sõltuvad kõik sealsest keskkonnast ja ajaloost, ning see tuleb läbi rääkida ekspertidega (Joonis 6, lk 27). Enne suuremahuliste projektide tegemist tuleks teha uuringuid ümbritseva ala kohta, et oleks teada mõju maastikule, liikidele ja elupaikadele. Selle järgi saab koostada hoolduskavad, kus tuuakse välja

vajalikud eesmärgid elurikkuse säilitamiseks. Peale ehitust on vajalik ka selle järgne seire, mis on kohustuslik kõikide tehtud suur projektide puhul. Järeelseire abil saab kontrollida maastiku taastumist ja sealse keskkonna elurikkust. Vajadusel saab täiendada leevendusmeetmeid elurikkuse säilitamiseks ja parandamiseks.[19]



Joonis 6. Projekti etappide kaupa loodud leevendusmeetmete hierarhia [19]

Päikeseenergia elektri jaama maakasutus on oluline tegur, eriti kui planeeritakse suuri päikeseparke, mis väldib taristu kordamist ja energiavoogude haldamist. Päikeseparkide maa katmisest tulenevad välismõjud jagunevad keskkonna- ja sotsiaalseteks aspektideks koos muutustega mikrokliimaatilistes tingimustes. Sellepärast on vaja igas leevendusmeetmete etapis kaaluda negatiivsete faktorite mõju.[19],[26]

#### 4.3.1. Päikesepargi rajamise ettepanekud

Päikeseenergiajaama ehitamisel tuleb eelistada integreeritud jaama lahendusi vähendades sellega mõju keskkonnale. Paneelide paigutamisel tuleb jätta reavahe ruumi vähemalt 10 m, et valgus jõuaks paneelide all olevate taimedeni ja liigirikkus püsiks tasakaalus. Eestis on parem jätta suuremad paneelide reavahed ka sellepärast, et päike liigub üsna madalal jättes pikemaid varje. Kindlasti peab pargi rajamisel jälgima liikide tundlikke perioode, mis võib tähendada pargi projekteerimise edasi lükkumist. Päikeseparkide rajamisel peab mõtlema vajalike puhvertsoonide peale, mis ei oleks mõjutatud PV-pargist. Puhvertsoone luuakse tavaliselt veekogude ümber, vanade metsade serva, ümber kaitstavate objektide ja ümber üksikute puude, mis on olulise tähtsusega. Kaablite kogused PV-parkides võivad ulatuda sadade kilomeetriteni seepärast on oluline, et kaablid enamasti maa alla kaevataks. Juhul kui kaableid on vaja vedada läbi õhuliinide oleks tähtis, et need

oleksid märgistatud. Ehituse ajal peab vältima liigset valgusreostust ja prügi tekkimist, peale projekti lõppemist ei tohiks pargi aladel mingeid ehitusjätmeid olla.[19]

Aia ehitamisel PV-parki tuleks jälgida, et see oleks maapinnast 10–30 cm kõrgusel. See loob võimaluse väikse ja keskmise suurusega loomadel läbi liikuda. Aed peab olema loomadele hästi nähtav ja ei tohi olla ohtlike orasid, mis loomi vigastada võiksid. Enamasti PV-parkide ümber aedu ei rajatagi, kuna see on lisakulutus ja halvimal juhul ka probleemiks liikidele. Aedade mõte on üldjuhul visuaalse reostuse ära peitmine ja väiksematele liikidele kaitsekoha pakkumine. Niita soovitatakse PV-parkides 1–2 korda aastas ja pigem hiljem ja mitmekesisemalt. Aladele tuleks jätta maatükke, kuhu loomad saaksid liikuda peale niitmist. Niitmine on kasulik elurikkuse hoidmiseks ja varjude ära hoidmiseks paneelidelt.[19]

## 5. VAHI 1 MW PÄIKESEPARTK

Saadud päikeseпарк asub Vahi alevikus, Tartu vallas ja on projekteeritud Sunly Solar OÜ poolt. Päikesepargi kogu võimsus on 1 MW, kus on 2916 paneeli ära jaotatud 9 inverteri peale (Tabel 3). Kogu parki pindala on 5,52 ha, aga rajatud parki pindala on 2,4 ha (Joonis 7). Päikesepargis on paneelid suunatud lõunasse 40° nurga all, mis on kõige efektiivsem paigaldus päikesepargile Eesti tingimustes.



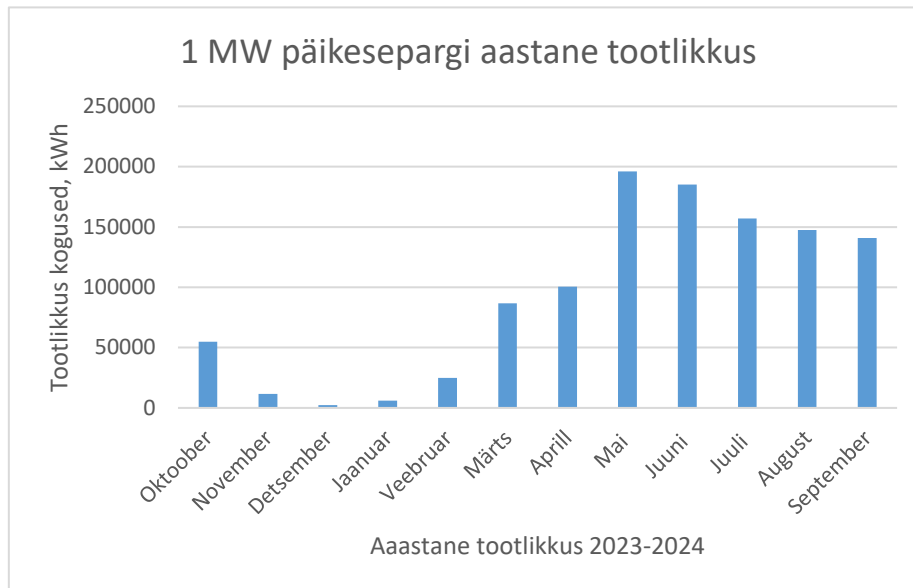
Joonis 7. Vahi PV paneelidega täidetud pindala [27]

Vahi PV on rajatud haljasasulasse katastri number on 79401:006:1244 ja sinisega piiratud ala suurus on 5,52 ha. Projekteeritud alal on võimalik parki tootlikkust veelgi suurendada. (Sunly Solar OÜ informatsioon)

Tabel 3. 1 MW tootlikkusega päikesepargi andmed (Sunly Solar OÜ informatsioon)

<b>Nimi</b>	Vahi PV
<b>Paneeli mudel</b>	Jinko Solar Cheetah JKM400M-72H
<b>Paneelide kogus, tk</b>	2916
<b>Paneelide tootmis võime, kW</b>	1166
<b>Inverteri mudel</b>	Sungrow SG110CX
<b>Inverterite kogus, tk</b>	9
<b>Inverterite kogu maht, kW</b>	990

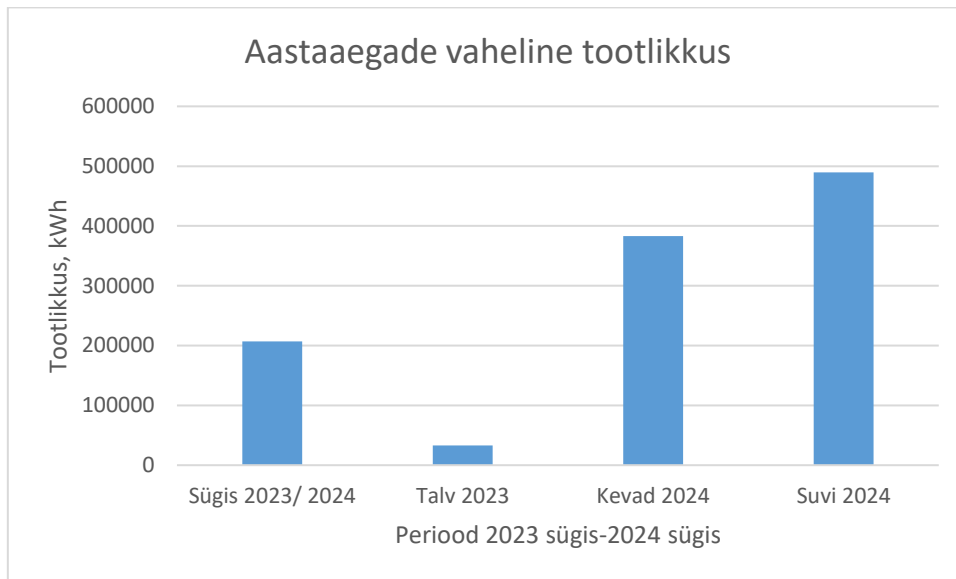
Terve aasta jooksul tootis Vahi PV 1113406 kWh elektrit (Joonis 8),(Lisa 3). (Sunly Solar OÜ informatsioon)



Joonis 8. Vahi 1 MW päikesepargi tootlikkus vahemikus 01.10.2023-30.09.2024 (Sunly Solar OÜ informatsioon)

Novembri, detsembri, jaanuari ja veebruari kuu tootlikkus on keskmisest tootlikkusest madalam 88 %. Tootlikkuse vähesus talve ja sügis kuudel on tavaline, kuna päikese kiirgust on vähe või ei ole üldse. Seepärast on kõige madalama tootlikkusega kuu detsember, kus toodeti 2334 kWh energiat. Kõige kõrgema tootlikkusega kuu oli mai, kus toodeti 196006 kWh energiat. Saadud tulemus on ootus pärane, vaadates eelmise aasta mai kuu päikese paistet tundides (362 tundi keskmiselt) (Tabel 2, lk 18). Teine kõige kõrgema tootlikkusega kuu on juuni, kus toodeti 185241 kWh energiat. Aastane tulemus näitab, et hiliskevadel ja varasuvel on kõige kõrgem tootlikkus Vahi PV jaamas. Stabiilseid tootlikkus tulemusi saab näha juulist-septembrini, kus toodetud energia vahemik jäi 157027–140731 kWh-ni. (Sunly Solar OÜ informatsioon)

Vahi PV (Joonis 9) on näha, et kõige vähem päikese kiirgust jõuab paneelidele talvel 33087 kWh (Tabel 4, lk 35). (Sunly Solar OÜ informatsioon)



Joonis 9. Vahi PV energia tootlikkus sõltuvalt aastaegadest (Sunly Solar OÜ informatsioon)

Eelmisel (Joonis 8, lk 30) graafikul saime teada, et kõige rohkem on toodetud elektrit mais. Kevad perioodil toodetud elektri kogused on siiski teisel kohal. Üldiselt teeb suve ja kevad perioodil toodetud energia, aastasest kogu tootlikkusest ligi kaudu 78,4%. (Sunly Solar OÜ informatsioon)

Paneel, mida kasutatakse Vahi PV päikesepargis on Jinko Solar Cheetah JKM400M-72H (Joonis 10). Paneelid sobivad erinevate päikeseenergia süsteemidega, sealhulgas võrguühendusega ja võrguvabade lahendustega. Koduomanikud saavad neid paneele kasutada ka koos energiasalvestuslahendustega, et salvestada üle jäävat energiat, mida saab kasutada tipptundidel või elektrikatkestuste korral.[28]



Joonis 10. Jinko Solar Cheetah JKM400M-72H paneel [28]

JKM400M-72H päikesepaneelide nimivõimsus on 400 Wp (*Watt peak*), paneeli päikese tootlikkuse efektiivsus 19,88%, paneel on see pärast ideaalsed just tavakasutajatele, kes

soovivad päikeseenergiat oma kodule toota ja energiakulusid vähendada. Paneeli maksimaalne süsteemipinge on 1500 V ja temperatuurikoefitsient on  $-0,35\%/^{\circ}\text{C}$ . See lubab neid päikesepaneele kasutada optimaalselt isegi keerulistemas ilmastikutingimustes.[28]

Vahi PV pargis kasutati string inverterit koos jõudluse optimeerijaga nimega Sungrow SG110CX (Joonis 11). Tavakasutuses olevad *string* inverterid muudavad vahelduva vool alalisvooluks ja jälgivad paneelide tootlikkust.[29]



Joonis 11. Sungrow SG110CX inverter [29]

Inverterid, kus on olemas jõudluse optimeerija aitab see PV-pargi tootlikkust hoida isegi, kui midagi peaks juhtuma paneelidega. Inverteri peab paigaldama varjulisse kohta, kus ta oleks kaitstud päikese kiirguse, vihma ja lume eest. Inverteril peab säilima hea ventilatsioon.[29]

## 6. METOODIKA

Käesolevas lõputöös uuriti Eesti kodumajapidamise elektritarbimist 2023-2024. aastal. Kodumajapidamise elektritarbimine võeti autori kodumajapidamisest. Kodumajapidamise parameetritena võeti aluseks üks Eesti neljaliikmeline perekond (2 täiskasvanut ja 2 last), kes elavad hajaasustuses B-kategooria energiatõhususega eramajas (kõetava pinna suurus 150 m<sup>2</sup>) ja dimensioneeriti sellele majapidamisele päikeseelektrijaam (võimaliku päikesepargi rajamis maa-ala suurus on 0,7 ha), mis suudaks ära katta terve aastase elektritarbimise. Samuti võtame arvesse pargi rajamisel tekkivad mõjud ökosüsteemile. Töös on eeldatud, et eramaja paikneb põhja suunal ja hoonet ümbritsevad puud, mistõttu pole katusele paneelide paigaldamine otstarbekas. Kodumajapidamise elektri hind kujuneb börsi hinnast. Päikesepargi dimensioneerimiseks võeti aluseks Sunly Solar OÜ poolt rajatud 1 MW päikesepark ja sealt saadud tootlikkuse andmed perioodil 01.10.2023-01.10.2024 (Lisa 3). Nendest andmetest tehakse kuude kaupa kokkuvõtte, kui palju üks 1 MW päikesepark energiat toodab. Saadud päikesepark oli rajatud võrguühendusega. Tootlikkuse andmed ja kodumajapidamise tarbimise andmete kuvamiseks ja töötlemiseks kasutati *Excel*-i programmi.

Andmete analüüsimiseks kasutatakse kvantitatiivseid meetodeid, kus tulemused esitatakse tabelite ja joonistena. Kodumajapidamise jaoks päikesepargi andmed saadi Sunly Solar OÜ-lt. Allikatena kasutati ka elektrifirmade aruandeid ja riiklike andmebaase. Valitud allikate hulka kuuluvad lõputööd, mis on tehtud 2015–2024. aasta vahemikus. Internetist saadud teadusartiklid on leitud, kasutades *Google Scholar*-it, *ScienceDirect*, *ResearchGate* andmebaase. Dimensioneeritud maa-ala esitlemiseks kasutati Maa-ameti Eesti kaarti ja Qgis programmi. Samuti on töös kasutatud firmade poolt koostatud aruanded ja aastakokkuvõtted samuti riiklike ja rahvusvahelisi andmebaase. Allikatena on kasutatud ka raamatuid internetist ja füüsilises vormis. Seega on lõputöös kasutatud allikaid usaldusväärsed ja tõesed. Päikesepargi kohta saadud andmete seas ei ole tundlikke andmeid, mida peaks kaitsma. Päikesepargi kohta saadud andmed säilitati koduarvutis ja ainult lõputöö autoril oli ligipääs andmetele. Saadud andmed hävitati peale lõputöö kaitsmist 17.01.2025, kuid on kättesaadavad firma ühendust võttes.

## 7. TULEMUSED

### 7.1. Kodumajapidamise aastane elektri kulu ja pargi dimensioneerimine

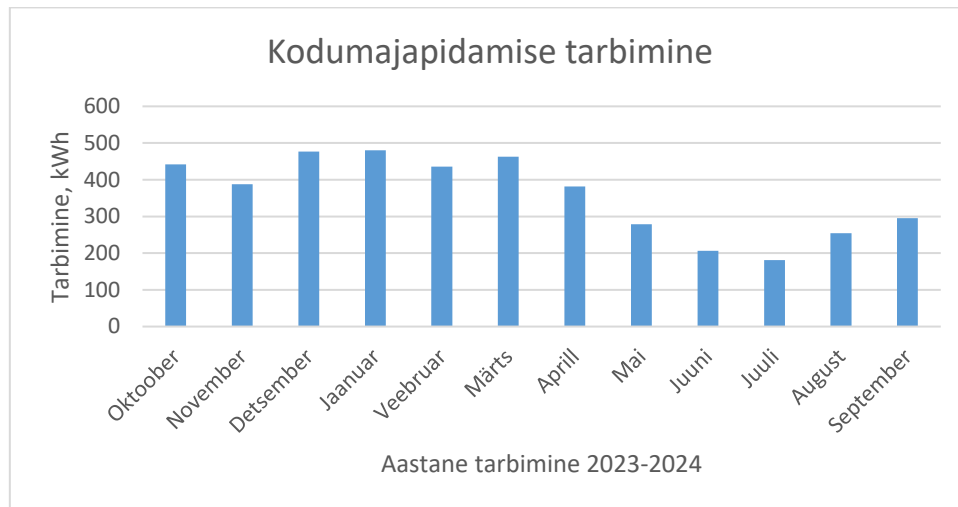
Üheks kõige suuremaks probleemiks Eestisse rajatud päikeseparkide juures on nende sõltuvus päikese liikumisest. Sellepärast on oluline uurida pargi tootlikkuse sõltuvust (Tabel 4) aastaegadest.

Tabel 4. Päikesepargi tootlikkus sõltudes aastaegadest

Aastaajad	kWh
Sügis 2023/ 2024	207224
Talv 2023	33087
Kevad 2024	383315
Suvi 2024	489781

Talve periood teeb terve aasta vältel toodetud energiast ligi kaudu 3%. Mis tähendab seda, et kui tahetakse talvist perioodi üle elada nii, et sõltutakse ainult paneelide poolt toodetud elektrist on vaja kasutusele võtta salvestid. Kui raha ei ole probleem saaks päikeseparki üledimensioneerida nii palju, et talvel toodetakse piisavalt elektrit. Suve perioodil on elektri tootlikkus, aasta kogu tootlikkusest ligi kaudu 44%.

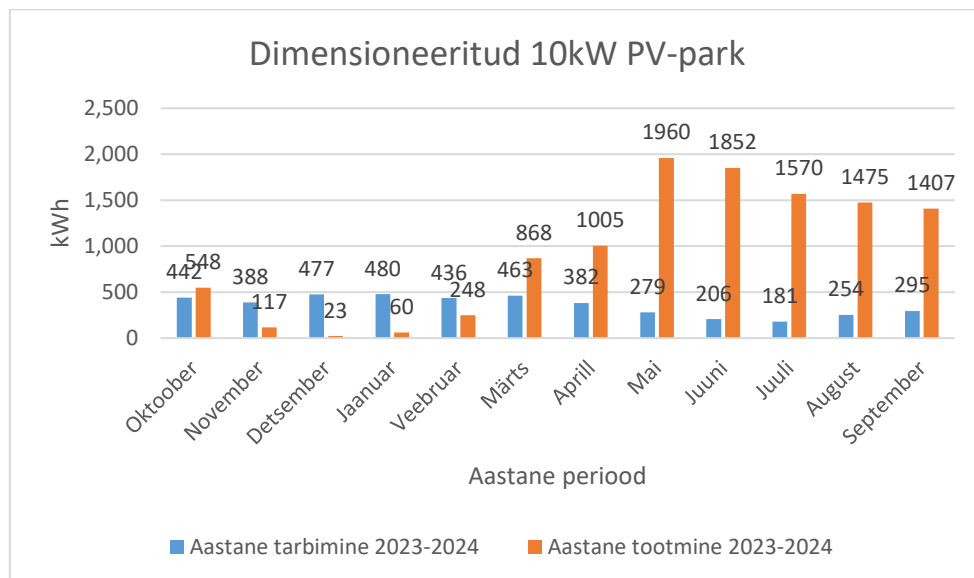
Kodumajapidamise tarbimise andmed on võetud isiklikust kodumajapidamisest ja dimensioneerimiseks andmeid töödeldi (Joonis 12).



Joonis 12. Kodumajapidamise tarbimine vahemikus 2023–2024

Kõige suuremad tarbimised jäävad talve kuudesse, kus kõige rohkem tarbimist toimus jaanuaris 480 kWh. Talve kuude keskmine tarbimine on 464 kWh, mis on suve kuude tarbimisest 2 korda suurem. Suve kuuldel tarbiti keskmiselt 214 kWh elektrit. Kevadel ja Sügisel tarbiti keskmiselt sama palju elektrit 375 kWh. Detsembrist kuni märtsini toimus kõige ühtlasem tarbimine siis jäi see vahemiku 436–480 kWh. Terve aasta peale tarbis kodumajapidamine 4283 kWh elektrit.

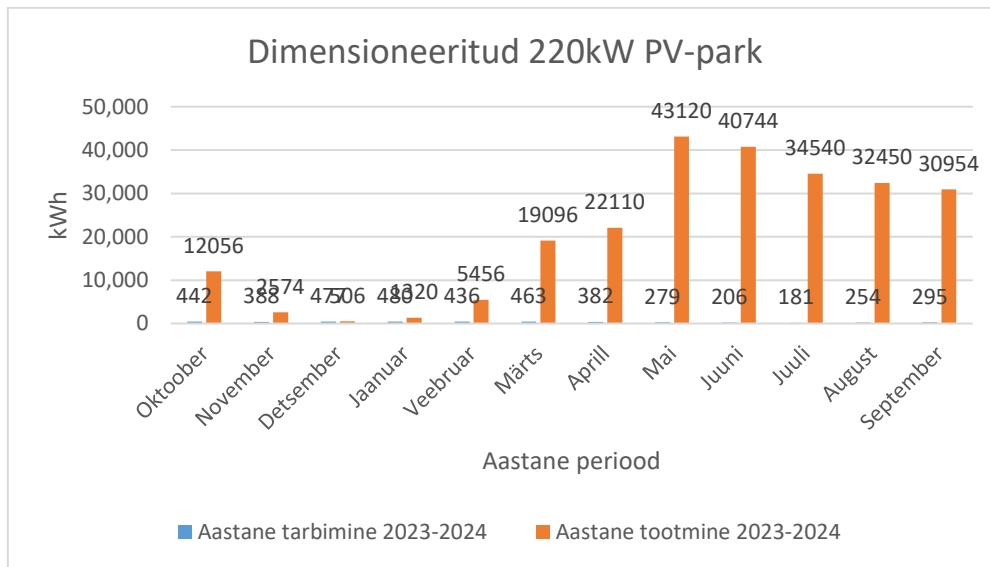
Saadud tootlikkuse ja tarbimise andmeid hakati analüüsima ja dimensioneerima, et leida ühele kodumajapidamisele kõige sobivam pargi suurus. Esiteks dimensioneeriti 1 MW park 10 kW pargiks (Joonis 13) ehk jagati tootlikkuse andmed kõik 100-ga. Seda oli vaja teha, kuna 1 MW pargi tootlikkus ühele majapidamisele on liiga suur ja saadavast graafikust ei suudaks midagi järeldada.



Joonis 13. 10 kW päikesepark dimensioneeritud

Järgnevalt graafikult on näha, et 10 kW PV-park ei tooda piisavalt elektrit, et ära täita terve aastane elektrivajadus (Lisa 4). Tootlikkust jääb puudu novembrist- veebruarini, kus see on kõige madalam ja teeb vaja minevast ehk tarbitavast elektrist keskmiselt 26,1%. Märtsist-septembrini ja oktoobris toodetakse päikesepargi poolt rohkem elektrit, kui seda suudetakse tarbida. Keskmiselt toodetakse nende kuude peale üle 500% rohkem energiat.

Aastaringelt on kõik kuud tootlikkusest suuremad, kui tarbimiselt (Lisa 4).



Joonis 14. PV-park, mis katab ära terve aastase tootlikkuse kodumajapidamises

Ideaalis saaks sellise pargi ehitada, kui raha probleeme ei ole ja kõik toodetud elekter müüakse tagasi üldvõrku (Joonis 14). Peaaegu kõikide kuude tootmine ületab tarbimist vähemalt 3 kordselt. Pargi dimensioneerimisel jälgiti kõige väiksema tootlikkusega kuud, milleks on detsember, mis 220 kW pargiga toodab 506 kWh energiat.

Pargi rajamiseks otsiti lagedat ala, kus ei peaks langetama puid. PV-park jäetakse sõiduteest piisavalt kaugemale, et sealt tekkiv tolmu ei mõjutaks paneele. Paneelid paigaldatakse lõuna suunda kalde nurgaga 40°. Samuti jälgitakse pargi asetust kodumajapidamise suhtes, et sinna oleks kõige väiksem vahemaa. Dimensioneeritava PV-pargi oletatav maa-ala on umbes 0,7 ha, see on piiritletud punase joonega (Joonis 15).



Joonis 15. Dimensioneeritava PV-pargi maa-ala [27]

PV pargi rajamisel võetakse arvesse tekkivaid ökoloogilisi mõjusid ja pargi rajamisse kaasatakse oma ala spetsialiste, omavalitsust ja vajadusel kohalikke. Tegemist on maatulundusmaaga, kuhu on planeeritud rajada päikeseпарк, mille tootlikkus on 10 kW. PV-pargi suurus on umbes 375 m<sup>2</sup>, mis on piiritletud helesinise joonega. Kahes reas on 13 paneeli (rida katab 54 m<sup>2</sup> ehk 2x26 m) ja nende vahele jääb 1 inverter. 10 kW pargi rajamisel on vaja salvestit, et leevendada sügise ja talvise tarbimis perioodi, seepärast kasutatakse pargis ka 1 liitiumraudfosfaat salvestit.

See tähendab, et enne pargi rajamist on vaja täita järgmised nõuded:

- ehitusteatis (ehitusluba/kasutusluba);
- liitumistaotlus Elektrilevile mikrotootja 639 €;
- liitumisleping;
- võrguleping (lisada korraline/erakorraline auditi ja seadistamise protokoll);
- elektri müügileping.

Kui järgnevaid nõuded ei ole täidetud ei saa pargi rajamisega alustada eriti oluline on saada ehitusluba. Dimensioneeritud pargis oletame, et saadud nõuded on täidetud ja pargi saab antud (Joonis 15, lk 39) alale rajada. Pargi rajamisel võetakse kasutusele kõik võimalikud leevendus meetmed. Viiakse rajatud pargi lähedale mesilastarusid ja jäetakse paneelide vahele piisavalt ruumi (10 m). Proovitakse maapinda võimalikult vähe kahjustada, kui kahjustatakse siis külvatakse sama maa-ala seemneid, et vältida liikide liigset muutumist ja kadumist.

Saadud tulemused näitasid, et ühele kodumajapidamisele on võimalik rajada PV-parki, kuid terve aastase tarbimise ära katmiseks peab antud PV-park olema 220 kW võimsusega (Joonis 14, lk 38). Selline lahendus ühele kodumajapidamisele ei ole väärt sellist ruumi, aja ja raha kulu. Kuid lõputöö probleemi silmas pidades, pidi selle võimalikust näitama. Oletades, et raha ei ole probleem on selline lahendus võimalik.

Dimensioneeriti PV-park võimsusega 10 kW, mille tootlikkuse ja tarbimise tulemused (Joonis 13, lk 37) on analüüsimiseks sobivad. Sealt kujuneb välja probleem, mida 220 kW PV-pargi graafiku pealt näha ei saanud. Novembrist-veebruari on pargi tootlikkus väiksem, kui kuine elektri tarbimine. Ainuke võimalik lahendus on muretseda pargile juurde salvesti, mida saab täita üle jäänud kuude tootlikkuse pealt välja arvatud oktoober. Oktoobris võib tekkida olukord, kus on vaja sammuti elektrit salvestist saada.

Lõputöö autor otsustas, et mõistlik oleks rajada 10 kW päikesepark, mille suurus oleks umbes 375 m<sup>2</sup> ja kasutada samasid paneele ja inverterit, mida Vahi PV-s kasutati (Tabel 5). Päikesepargile lisandub juurde liitiumraudfosfaat aku, kuhu saab energiat salvestada.

Tabel 5. Vaja minevad seadmed 10 kW pargi rajamisel [30]

<b>Nimi</b>	PV 1
<b>Paneeli mudel</b>	Jinko Solar Cheetah JKM400M-72H
<b>Paneelide kogus, tk</b>	26,0
<b>Paneelide tootmis võime, kW</b>	10,4
<b>Inverteri mudel</b>	Sungrow SG110CX
<b>Inverterite kogus, tk</b>	1,0
<b>Inverterite kogu maht, kW</b>	110,0
<b>Salvesti mudel</b>	Panasonic Evervolt Home battery
<b>Salvesti kogus, tk</b>	1,0
<b>Salvesti maht, kWh</b>	9-18

## KOKKUVÕTE

Tänapäeval on loodussõbralike energiaallikate kasutamine üsna populaarseks saanud ja nende kasutusele võtmist julgustatakse laialdaselt. Sellepärast prooviti lõputöös leida lahendus järgmisele probleemile, kui suur peab olema PV park, et selle tootlikkus kattaks ära terve aastase kodumajapidamise elektritarbimise ja mida päikeseparki rajamisel jälgida. Probleemile püstitati eesmärk, kus saadi teada päikesepargi võimsus, millega saab kodumajapidamine terve aasta vältel hakkama. Lõputöö alguses kirjeldati päikesepaneelide arengut läbi ajaloo. Päikesepaneelid jõudsid jaemüüki alates 1953. aastast, kus kasutati räni põhjal tehtud paneele. Tänapäeval kasutatakse paneele kõikides hoonetes, kus tahetakse olla keskkonna sõbralikumad ja säästa energiat. Enamasti kasutatakse kolme erinevat liiki paneele, kus kõige efektiivsemad on monokristalsed paneelid. Kõigil kolmel on omad miinused, näiteks monokristalse paneeli tootmine on kallis, mis viib ka turu hinna ülesse.

Paneele saab paigutada erinevatesse kohtadesse, peamiselt maapinnale ja katusele, kus saadakse nende efektiivsust kõige paremini esile tuua. Paneelide tootlikkust mõjutab suuresti nende paigaldatud suund ja kalde nurk. Tavaliselt paigaldatakse paneelid lõuna suunda, 40°kraadise nurga all, paneelide paigaldamisel katusele peab jälgima, et paigaldatud paneelid ei jääks varju ja saaksid kõige efektiivsemalt energiat toota. Kaldkatuse korral on paneelide kalde nurk fikseeritud, kuid lame katuse korral jäetakse kaldenurgaks enamasti 25° kraadi, mis vähendab paneelidele tekkivat kahju. Peamised süsteemid, mida päikeseparkide juures kasutatakse on voolu ühendusega lahendus, voolu ühenduseta lahendus ja hübriid lahendus. Linnas ja selle ümbruses kasutatakse enamasti voolu ühendusega PV-parke. Kus vajaminev elekter võetakse üldvõrgust, kuid osa tarbitud elektrit kaetakse paneelide toodetud elektriga. Voolu ühenduseta PV-parke rajatakse piirkondadesse, kus puudub ühendus üldvõrgu elektriliinidega või selle rajamine piirkonda oleks kallis. Päikese pargis toodetud elekter tarbitakse ja vajadusel salvestatakse akudesse, kuid enamasti seda varianti ei kasutata, kuna süsteemi rajamine on liiga kulukas. Lõpuks on viimane süsteem, kus kasutatakse mõlemat eelnevalt mainitud süsteemide segu. PV- park toodab elektrit ja seda saab salvestada akudesse, kuid enamasti saadakse elekter üldvõrgust.

Lõputöös käsitleti sammuti paneelidele tekkivaid mõjutegureid. Neli olulist mõjutegurit on päikese kiirguse hulk, mustus, varjud ja temperatuur. Päikese kiirguse hulk on Eesti erikohtades erinev, seega ei saa päikese paneelide poolt toodetud energiat täpselt ennustada. Kuid võib öelda, et kõige rohkem päikselisi tunde on Eesti saartel. Paneele on oluline hooldada vähemalt korda aastas sõltuvalt paneelide paigaldus viisist. Enamasti kasutatakse paneelide hoolduseks vett. Kaldkatusele kinnitatud paneele näiteks ei pea

hooldama. Kindlasti on oluline jälgida, et paneelid ei jääks aasta jooksul varju, kuna see vähendab PV-pargi tootlikkust vähemalt 70 %. Paneelide rajamisel peab jätma ruumi õhutamiseks, kuna suvel võib päikese poolt tekitatud kuumus tootlikkust vähendada.

PV-parkide rajamisel on oluline jälgida mõju ökosüsteemile, kuna kõikidesse ökosüsteemidesse ei ole parkide rajamine mõttekas. See kahjustab sealset liigirikkust, võib olla liigselt kulukas, rikkuda pinnast ja põhjavett. Enamasti sobib PV-parke rajada põllumaade äärde, kus paneelid ei jää ette põllutöödele. Teine võimalus on rajada PV-parke kultuurrohumaaadele, kus liigirikkus ja tekkiv kahju on väiksem. Päikeseparkide rajamisel tuleks kaasata eksperte, omavalitsust ja vajadusel kohalike inimesi, suuremate parkide korral ka keskkonnaorganisatsioone. PV-parkide rajamisel on eelkõige oluline liigirikkuse hoidmine, näiteks on võimalik parkide lähedusse tuua mesilastarusid ja kasutada ära sama pinnast, mis on eemaldatud. Visuaalse reostuse leevendamiseks on võimalik istutada põõsaid ja puid paneelide lähedusse

Lõputöös kasutati 1 MW PV-pargi tootlikkuse andmeid aasta jooksul, mille abil saadi dimesioneerida ühele kodumajapidamisele PV-park. Eesmärgiga teha kodumajapidamine sõltuvaks ainult PV-pargis toodetud energiast. Saadud tulemuste kohaselt peab PV-pargi suurus olema 220 kW, mis realselt on võimalik, kuid on väga kulukas. Seega dimesioneeriti ühele kodumajapidamisele 10 kW PV-park, mis ei katta täielikult terve aastast tarbimist, isegi kui kasutada salvestit. Kodumajapidamise aastane tarbimine saadi autori kodumajapidamisest sama perioodi jooksul. Saadud tulemustest võib järeldada, et selline ettevõtmine sõltudes ainult PV-pargi tootlikkusest on kulukas ja mõttekas on mõelda hübriid tootmis süsteemile, näiteks kasutada päikese paneele ja tuulikuid.

## SUMMARY

This graduation thesis was written on the subject "Solar Energy Productivity in the Household and Affecting Factors". One of the United Nations Sustainable Development goals is to ensure clean and affordable energy for all, which requires active promotion of renewable energy in this case solar power. Utilizing photovoltaic (PV) systems is sustainable energy management. The goal of this thesis was to determine the required PV park productivity to cover the annual electricity consumption of a single household in Estonia.

The author examined various solar panel technologies and their prevalence in Estonia, factors affecting PV park productivity, different types of PV systems and their characteristics. Additionally, the conditions for establishing a PV park were analyzed to minimize its negative impact on ecosystems. The study focused on the productivity data of a 1 MW PV park provided by Sunly Solar OÜ, which was compared to the annual electricity consumption of the author's household. The data was analyzed and processed using Excel to identify the required PV park size.

The results indicated that a PV park with a productivity of 220 kW would be needed to meet the annual electricity demand of a household. However, this solution is very expensive and economically unviable. As an alternative, it was found that the same result could be almost achieved with a 10 kW PV park when combined with energy storage battery. This solution is more cost-effective and could become a viable long-term investment.

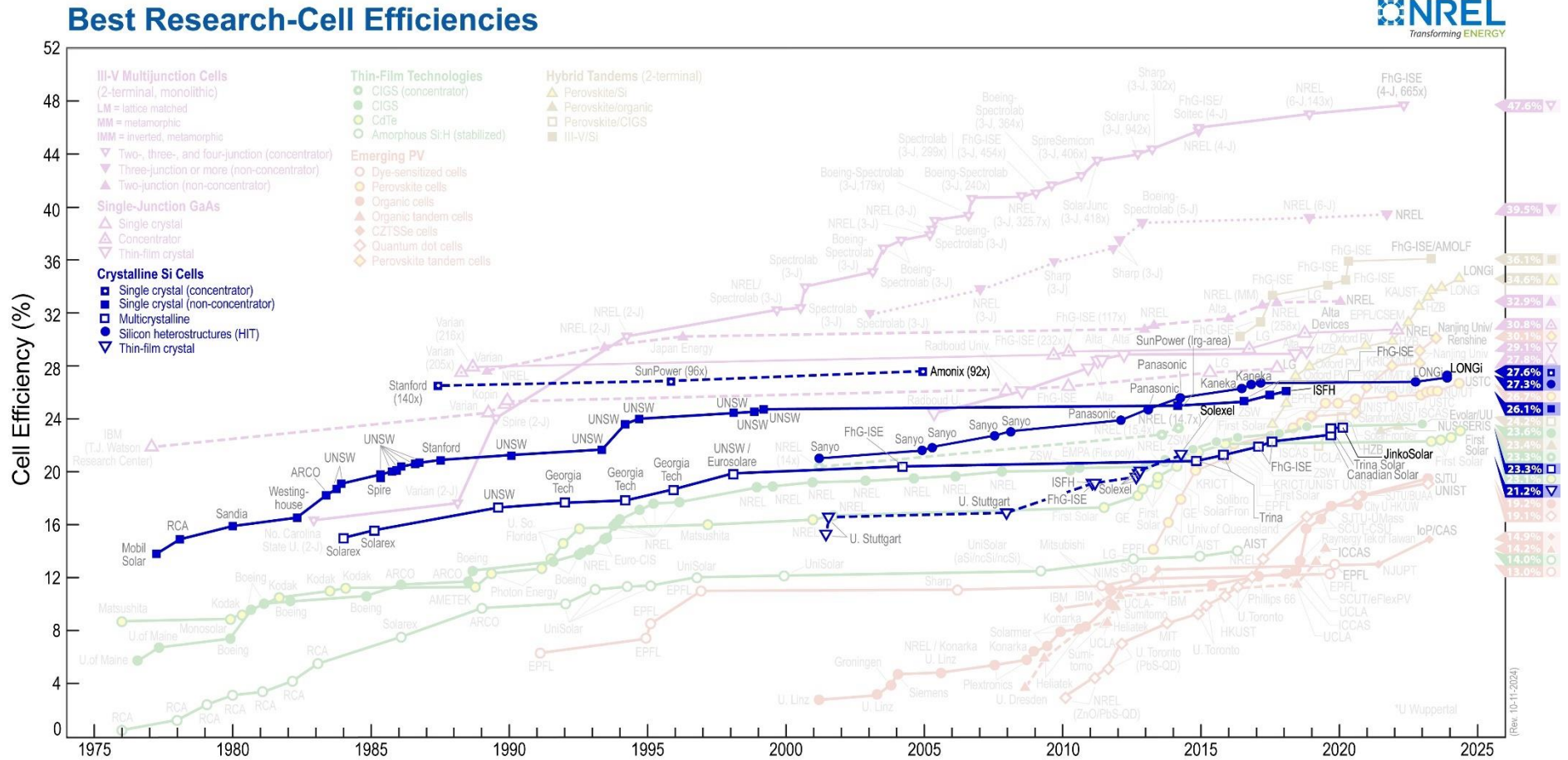
The author concluded that a large-scale PV park is not economically feasible for a single household. However, combined solutions, such as using 10 kW PV park with battery, could be a realistic alternative. It was also emphasized that, in addition to PV systems, wind energy should be considered to diversify energy sources and achieve greater independence from the grid. Further research could focus on hybrid solutions and the combination of different renewable energy sources to ensure maximum efficiency and sustainability.

## VIIDATUD ALLIKAD

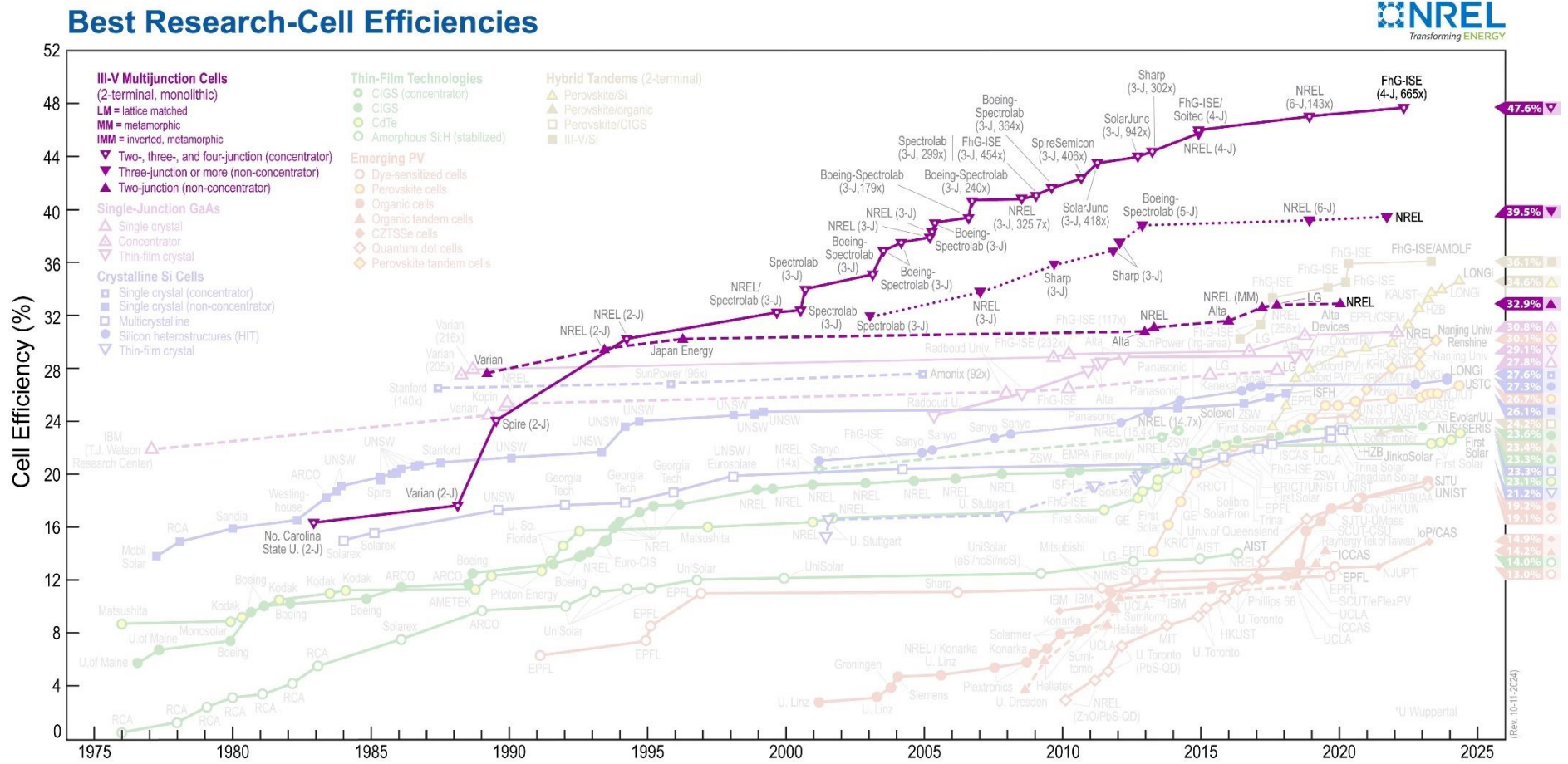
- [1] H. H. Pourasl, R. V. Barenji, and V. M. Khojastehnezhad, 'Solar energy status in the world: A comprehensive review', *Energy Rep.*, vol. 10, pp. 3474–3493, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.egy.2023.10.022.
- [2] M. Hatamian, B. Panigrahi, and C. K. Dehury, 'Location-aware green energy availability forecasting for multiple time frames in smart buildings: The case of Estonia', *Meas. Sens.*, vol. 25, p. 100644, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.measen.2022.100644.
- [3] Elering AS, 'Toodang ja prognoos | Elering'. Accessed: Dec. 12, 2024. [Online]. Available: <https://elering.ee/toodang-ja-prognoos>
- [4] Kliimaministeerium, 'Energeetika tulemusvaldkonna 2023. aasta tulemusaruanne'. 2024. Accessed: Dec. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.mkm.ee/sites/default/files/documents/2024-06/Energeetika%202023.%20aasta%20tulemusaruanne.pdf>
- [5] M. Rehepapp, 'Päikesepaneelide kasutamise majandusliku otstarbekuse võrdlus erinevatele tarbijatele Eestis', Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2018. Accessed: Sep. 20, 2024. [Online]. Available: <https://digikogu.taltech.ee/et/item/f38ac853-dd85-4371-ad96-06e885909ed4>
- [6] J. Särg, 'Teisaldatav päikeseelektrijaam', Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2018. Accessed: Sep. 20, 2024. [Online]. Available: <https://digikogu.taltech.ee/et/item/9fc6b7cc-f70a-4c95-8260-00d3a37653c8>
- [7] E. Bellini, 'NREL updates interactive chart of solar cell efficiency', *pv magazine International*. Accessed: Sep. 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.pv-magazine.com/2024/04/24/nrel-updates-interactive-chart-of-solar-cell-efficiency-2/>
- [8] S. Iljin, 'Küla elektrivarustus taastuvenergiaallikate baasil', Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2015. Accessed: Sep. 20, 2024. [Online]. Available: <https://digikogu.taltech.ee/et/item/dda4118c-d33a-4ff9-8691-f5c25bb0678d>
- [9] Energy Institute, 'Resources and data downloads', Statistical review of world energy. Accessed: Sep. 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.energyinst.org/statistical-review/resources-and-data-downloads>
- [10] M. Grossberg, 'Milleks meile uued päikesepaneelitehnoloogiad?', *Sirp*, Sep. 18, 2020. Accessed: Sep. 16, 2024. [Online]. Available: <https://sirp.ee/s1-artiklid/c21-teadus/milleks-meile-uued-paikesepaneelitehnoloogiad/>
- [11] M. Pinn, R. Pinn, and M. Piin, *ELEKTER PÄIKESEST JA TUULEST*. Tallinn: MTÜ Kolm Kobrast, 2012.
- [12] K. Kangro, 'PÄIKESEPANEELIDE ERINEVATE PAIGALDUSVIISIDE EELISED JA PUUDUSED', Eesti Maaülikool, Tartu, 2018. Accessed: Dec. 18, 2024. [Online]. Available: <https://dspace.emu.ee/items/00aa89f8-24e9-4715-8a88-0c65862f8057>
- [13] L. Kolberg, 'PÄIKESEELEKTRIJAAAMA DIMENSIONEERIMISE TEHNOLOOGILISED VÕIMALUSED JA MAJANDUSLIK', Eesti Maaülikool, Tartu, 2020. Accessed: Dec. 18, 2024. [Online]. Available: <https://dspace.emu.ee/items/47ecc1a6-f1e9-4109-85a6-c56f4b395124>
- [14] NREL, 'Best Research-Cell Efficiency Chart'. Accessed: Sep. 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- [15] Eesti standardimis- ja akredeerimiskeskus, 'EVS-EN 50549-1:2019', EVS. Accessed: Oct. 14, 2024. [Online]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-50549-1-2019>
- [16] S. S. Shukir, 'Solar System Inverters Types', *Iraak*, vol. 6, no. 3, p. 8, 2021.
- [17] A. Boilley, C. Thomas, M. Marchand, E. Wey, and P. Blanc, 'The Solar Forecast Similarity Method: A New Method to Compute Solar Radiation Forecasts for the Next Day', *Energy Procedia*, vol. 91, pp. 1018–1023, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.06.270.
- [18] Keskkonnaagentuur, 'Päikesepaiste kestus |', Keskkonnaagentuur | ILM. Accessed: Sep. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.ilmateenistus.ee/kliima/paikesepaiste-kestus/>

- [19] Krista Takkis and Aveliina Helm, 'Päikeseenergiajaamade mõjust olulisematele elupaikadele, ökosüsteemidele ja peamistele liigirühmadele ning Eestisse sobivad leevendusmeetmed.' Keskkonnaamet, 2023. Accessed: Oct. 28, 2024. [Online]. Available: [https://keskkonnaamet.ee/sites/default/files/documents/2023-01/Paikeseelektrijaamad\\_moju\\_loodusele\\_isbn.pdf](https://keskkonnaamet.ee/sites/default/files/documents/2023-01/Paikeseelektrijaamad_moju_loodusele_isbn.pdf)
- [20] S. Z. Said, S. Z. Islam, N. H. Radzi, C. W. Wekesa, M. Altimania, and J. Uddin, 'Dust impact on solar PV performance: A critical review of optimal cleaning techniques for yield enhancement across varied environmental conditions', *Energy Rep.*, vol. 12, pp. 1121–1141, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.egy.2024.06.024.
- [21] Y. Sheikh, M. Jasim, M. Qasim, A. Qaisieh, M. O. Hamdan, and F. Abed, 'Enhancing PV solar panel efficiency through integration with a passive Multi-layered PCMs cooling system: A numerical study', *Int. J. Thermofluids*, vol. 23, p. 100748, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.ijft.2024.100748.
- [22] A. Mahdavi, M. Farhadi, M. Gorji-Bandpy, and A. Mahmoudi, 'A review of passive cooling of photovoltaic devices', *Clean. Eng. Technol.*, vol. 11, p. 100579, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.clet.2022.100579.
- [23] C. Tölgyesi *et al.*, 'Ecovoltaics: Framework and future research directions to reconcile land-based solar power development with ecosystem conservation', *Biol. Conserv.*, vol. 285, p. 110242, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.biocon.2023.110242.
- [24] A. Armstrong, N. J. Ostle, and J. Whitaker, 'Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling', *Environ. Res. Lett.*, vol. 11, no. 7, p. 074016, Jul. 2016, doi: 10.1088/1748-9326/11/7/074016.
- [25] V. Hermoso, G. Bota, L. Brotons, and A. Morán-Ordóñez, 'Addressing the challenge of photovoltaic growth: Integrating multiple objectives towards sustainable green energy development', *Land Use Policy*, vol. 128, p. 106592, May 2023, doi: 10.1016/j.landusepol.2023.106592.
- [26] S. J. Thomas, S. Thomas, S. S. Sahoo, A. K. G, and M. M. Awad, 'Solar parks: A review on impacts, mitigation mechanism through agrivoltaics and techno-economic analysis', *Energy Nexus*, vol. 11, p. 100220, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.nexus.2023.100220.
- [27] Maa-amet, 'X-GIS 2.0 [maainfo]'. Accessed: Nov. 16, 2024. [Online]. Available: <https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/maainfo>
- [28] Jinko Solar, 'Jinko Solar Holding JKM400M-72H Solar Panel Specifications', EnergyPal. Accessed: Nov. 08, 2024. [Online]. Available: <https://energypal.com/best-solar-panels-for-homes/jinko-solar-holding/jkm400m-72h>
- [29] SUNGROW, 'SG110CX|Solar Inverter | PV Inverter from 450W to 8.8 MW-Sungrow'. Accessed: Nov. 08, 2024. [Online]. Available: <https://en.sungrowpower.com/productDetail/745/string-inverter-sg110cx>
- [30] Panasonic, 'EVERVOLT® Home Battery'. Accessed: Dec. 17, 2024. [Online]. Available: <https://solar.na.panasonic.com/battery-storage/evervolt-home-battery>

LISA 1. KRISTALSETE ELEMENTIDE SUURIMAD SAAVUTATUD EFEKTIIVSUSED AASTAST 1976-2024. AASTANI.[7]



# LISA 2. ELEMENDI TEHNOLOGIA ARENG JÄLGIKES EFEKTIIVSUSE KASVU 1976-2024. AASTANI.[7]



**LISA 3. VAHI PV TOOTLIKKUS AJAVAHEMIKUS 01.10.2023-30.09.2024**

Aastane tootmine 2023-2024	kWh
Oktoober	54828
November	11665
Detsember	2334
Jaanuar	5971
Veebruar	24781
Märts	86760
Aprill	100549
Mai	196006
Juuni	185241
Juuli	157027
August	147513
September	140731

**LISA 4. 10 KW JA 220 KW PV-PARK DIMESIONEERITUD KODUMAJAPIDAMISELE**

	Kodumajapidamine	10kW pargi tootlikkus	220kW pargi tootlikkus
Kuud	Aastane tarbimine 2023-2024, kWh	Aastane tootmine 2023-2024, kWh	Aastane tootmine 2023- 2024, kWh
Oktoober	442	548	12056
November	388	117	2574
Detsember	477	23	506
Jaanuar	480	60	1320
Veebruar	436	248	5456
Märts	463	868	19096
Aprill	382	1005	22110
Mai	279	1960	43120
Juuni	206	1852	40744
Juuli	181	1570	34540
August	254	1475	32450
September	295	1407	30954
Aasta kokku	4,283	11133	244926