



TALLINNA TEHNICAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**VALGA VALLA KINNISTUTEL PÄIKESEPARGI
LAHENDUSTE MODELLEERIMINE NING
OPTIMAALSE LAHENDUSE LEIDMINE**

**MODELING SOLAR PARK SOLUTIONS AND FINDING
THE OPTIMAL SOLUTION FOR PROPERTIES IN VALGA
MUNICIPALITY**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Robin Andreas Kiil

Üliõpilaskood: 206390EAAB

Juhendaja: Taavi Raadik, Vanemteadur
Reeli Kuhi-Thalfeldt, Vanemlektor

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad,

kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." 20.....

Autor: Robin Andreas Kiil

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 20.....

Juhendaja: Taavi Raadik

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Robin Andreas Kiil

Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
Valga Valla Kinnistutel Päikesepargi modelleerimine ning optimaalse lahenduse leidmine

mille juhendaja on Taavi Raadik,

reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

13.05.2024

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

ELEKTROENERGEETIKA JA MEHATROONIKA INSTITUUD

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Robin Andreas Kiil, 206390EAAB
Õppekava, peeriala: EAAB 16/17, Elektroenergeetika ja mehhatroonika
Juhendaja(d): Taavi Raadik, vanemteadur, Reeli Kuhi-Thalfeldt, vanemlektor
Konsultant: Siim Paist, Arendusjuht, Sunly AS, siim.paist@sunly.ee

Lõputöö teema:

Valga Valla Kinnistutel Päikesepargi Modelleerimine ning Optimaalse Lahenduse Leidmine

Modeling Solar Park Solutions and Finding The Optimal Solution for Properties in Valga Municipality

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Võrrelda erinevaid päikeseparkide paigaldamise tehnoloogiaid
2. Analüüsida erinevate tehnoloogiate energiatoodangu tulemusi
3. Analüüsida erinevate tehnoloogiate majanduslikke näitajaid

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Lõputöö lähteülesande esitamine	05.02.24
2.	Lähteandmete kogumine ja modelleerimise teostamine	29.02.24
3.	Teooria osa kirjutamine ja tulemuste analüüs	31.03.24
4.	Tervikliku töö esitamine ja eelkaitsmine	24.04.24
5.	Lõputöö esitamine	13.05.24

Töö keel: Eesti **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 13.05.2024

Üliõpilane: ".....".....20.....a
/allkiri/

Juhendaja: ".....".....20.....a
/allkiri/

Konsultant: ".....".....20.....a
/allkiri/

Programmijuht: ".....".....20.....a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

SISUKORD	5
EESSÕNA	6
Lühendite ja tähiste loetelu	7
SISSEJUHATUS	8
1. PÄIKESEENERGEETIKA	9
1.1 Päikesepaneeli ehitus	10
1.2 Päikesepaneeli tööd mõjutavad tegurid	15
1.2.1 Varjud	16
1.2.2 Päikesekiirgus	18
1.2.3 Taimestik	19
1.2.4 Loomastik	20
1.2.5 Temperatuur	21
1.3 Inverterid	22
1.4 Installeerimistehnoloogiad	23
2. PÄIKESEPARGI MUDEL	27
2.1 Piirangud ja kitsendused	28
2.2 Kasutatud tehnoloogiad	30
2.3 Päikesepargi lahendused	31
2.3.1 Fikseeritud kaldenurk 35°	32
2.3.2 Fikseeritud kaldenurk 40°	34
2.3.3 <i>Tracker</i> süsteem	36
2.3.4 Simulatsioonide võrdlus	38
3. MAJANDUSLIKUD NÄITAJAD	41
3.1 LCOE	41
3.2 Majanduslik analüüs	43
4. KOKKUVÕTE	45
5. SUMMARY	46
KASUTATUD KIRJANDUS	47

EESSÕNA

Käesolev töö koostati ettevõtte Sunly AS algatusel tänu nende soovile potentsiaalse tööstusliku päikesepargi rajamisele. Peamiseks kontaktideks antud ettevõttes olid Arendusjuht Siim Paist ja projektijuht Mirko Nõmmsalu, kelle käest saadi tööks vajalikud andmed ning kellega konsulteeriti lahenduste valimisel. Tööstuslike päikeseparkide rajamiseks on eelnevalt vaja teostada uuringud ning arvutused, et kontrollida nende sobivust ja majanduslikku kasumlikkust. Antud töös koostatakse Valga vallas asuvatel kinnistutel erinevad päikesepargi lahendused, teostatakse modelleeringud arvutitarkvara WindPRO vahendusel ja arvutatakse ka kõikide variantide majanduslik sobivus, et leida parim lahendus antud töös kasutatud päikesepargi variantide hulgast.

Lühendite ja tähiste loetelu

CdTe – Kaadmium telluriid (*Cadmium Telluride*)

CIGS – Vask, indium, gallium, seleniid (*Copper, Indium, Gallium, Selenide*)

DSC – Värvitundlik päikesepatarei (*Dye-sensitized cell*)

CPV – Fotogalvaaniline kontsentraator (*Concentrator Photovoltaic*)

PERC – Passiveeritud emitter ja tagumine kontakt (*Passivated Emitter and Rear Contact*)

EVA – Etüleenvinüülatsetaat (*Ethylene Vinyl Acetate*)

STC – Standard katsetingimused (*Standart Test Conditions*)

PTC – PVUSA katsetingimused (*PVUSA Test Conditions*)

LCoE – Nominaalne elektritootmise hind (*Levelized Cost of Electricity/Energy*)

SISSEJUHATUS

Päikeseenergia on tänapäeval üks kiiremini kasvavaid taastuvenergia allikaid. Päikesest tulenev energia on elu aluseks Maal, mille kaudu toimivad erinevad protsessid nagu näiteks fotosüntees. Päikeseenergia kasutamine inimkonna energiavajaduste rahuldamiseks on keskkonnasäästlik ja vähem kahjulik loodusele kui siiani kasutusel olevad meetodid. Päikeseenergia püüdmiseks ja energiaks muundamiseks kasutatakse päikesepaneele ning nendest koosnevaid suuri päikeseparke. Päikeseparkide arendamine ja optimeerimine on oluline osa päikesest tuleneva energia efektiivseks kasutamiseks ning keskkonnasõbraliku ja jätkusuutliku elektrienergia tootmiseks.

Käesoleva töö sisend saadi ettevõtte Sunly AS käest ning hõlmab Valga vallas olevatel kinnistutel tööstusliku päikesepargi simuleerimist. Töö eesmärgiks oli antud aladel erinevate päikeseparkide lahenduste simuleerimine ning võrdlemine parima lahenduse leidmiseks. Simulatsioonide läbiviimiseks kasutati WindPRO arvutitarkvara, mis võimaldas efektiivselt uurida erinevate päikeseparkide lahenduste variante. Simulatsioonide läbiviimine võimaldab hinnata erinevate päikeseparkide konfiguratsioonide energiatootlikust ning kulutõhusust. Erinevate lahenduste uurimine võimaldab analüüsida kõiki mõjutatavaid aspekte, mis erinevad kasutatud päikeseparkide lahendustel. Muutuvateks teguriteks simulatsioonidel olid eelkõige installeerimisviisid ja päikesepaneelide kaldenurgad. Samuti on oluline päikesepaneelide paigutus ja suund võttes arvesse päikese liikumise teekonda Eesti riigi aladel.

Antud töö koosneb kolmest peamisest osast. Esimeses osas kirjeldatakse kõiki päikeseparkidega seonduvaid teemasid alustades päikeseenergeetika ajaloost. Antakse ka ülevaade päikesepaneelide ehitusest, materjalides, tehnoloogiatest, toimimisest ning integreerimisest süsteemi saadava energia kasutamiseks. Töö teises osas kirjeldatakse simuleeritava päikesepargi mudelit ning analüüsitakse saadud tulemusi. Antakse ülevaade kasutatud aladest ning nendel olevatest takistustest ja kirjeldatakse kõikide simuleeritavate lahenduste eripärasid ning muudatusi. Kolmandas osas analüüsitakse päikesepargi erinevate lahenduste majanduslikku poolt. Arvutatakse välja lahenduste elektritootmise omahinnad ning potentsiaalsed teenitavad tulud ja kasumid. Erinevate simulatsioonide tulemusi analüüsitakse ning võrreldakse.

1. PÄIKESEENERGEETIKA

Päikesest tuleneva energia kasutamise võimalust täheldati esmakordselt 1839. aastal noore prantsuse teadlase Edmond Becquereli poolt, kes jõudis arusaamale, et valguse kokkupuutel teatud materjalid ergastuvad elektronid, mis vabalt liikudes antud materjalid genereerivad voolu. Fotogalvaanilist efekti märkas Becquerel olles ainult 19 aasta vanune. Edasine areng toimus 1860ndatel, kui prantsuse matemaatik Augustin Mouchot hakkas patenteerima päikeseenergia toimivaid mootoreid, mille jaoks ta sai inspiratsiooni Becquereli poolt vaadeldust. Ameerika Ühendriikidesse jõudsid päikeseenergia töötavad seadmed 1888. aastal, mis omakorda olid inspireeritud Mouchot poolt esitatud patentidest. [1]

Esimene päikesepaneel loodi aastal 1883 New Yorkis ameerika leiutaja Charles Frittsi poolt ning loodud paneelid paigaldati 1884. aastal ühe New Yorkis asuva maja katusele. Frittsi loodud esimene päikesepaneel koosnes õhukesest kullaga kaetud seleeni kihist, mis suutis genereerida energiat 1-2% kasuteguriga. Vaatamata madalale kasutegurile pidas Fritts enda loodud paneeli revolutsiooniliseks ning mõistis päikeseenergia kaudu energia genereerimise olulisust tuleviku vaatest. Järgnevatel aastatel esitati uusi patente erinevate päikeseenergia seonduvate tehnoloogiate kohta ja 1888. aastal valmistas vene teadlane Aleksandr Stoletov esimese fotoelektrilisel efektil põhineva päikeseptareid. Fotoelektriline efekt ja fotogalvaaniline efekt väikeste erinevuste poolest eristatavad. Kuigi mõlemad efektid on seotud materjalide reageerimisega päikesevalgusele elektriliste efektide saamiseks, vabanevad fotoelektrilise efekti korral elektronid mõjutatud materjalist ja fotogalvaanilise efekti korral tekitab kokkupuude päikesevalgusega voolu mõjutatud materjalid. [2], [3]

Edasine areng päikeseenergiast liikus aeglaselt ja lisajõudu andis alale Albert Einstein poolt aastal 1905 kirjutatud töö päikeseenergia ja valgusosakeste kohta, mille eest lõpuks ta ka aastal 1922 Nobeli preemia võitis. Järgmine suurem samm paneelide efektiivsuse suurendamisel toimus 1950ndate keskel kui *Bell Laboratories* leiti, et seleeni asemel on paremaid materjale, millega pooljuhte valmistada. Leiutajad Daryl Chapin, Calvin Fuller ja Gerald Pearson olid esimesed, kes kasutasid seleeni asemel päikesepaneelides räni ning valmistasid esimese ränil põhineva päikeseptareid, mille efektiivsuseks saavutati 6%. Vaatamata edusammudele olid avalikuks müügiks antud ptareid ja paneelid valmistamine liiga kulukas.[1], [3]

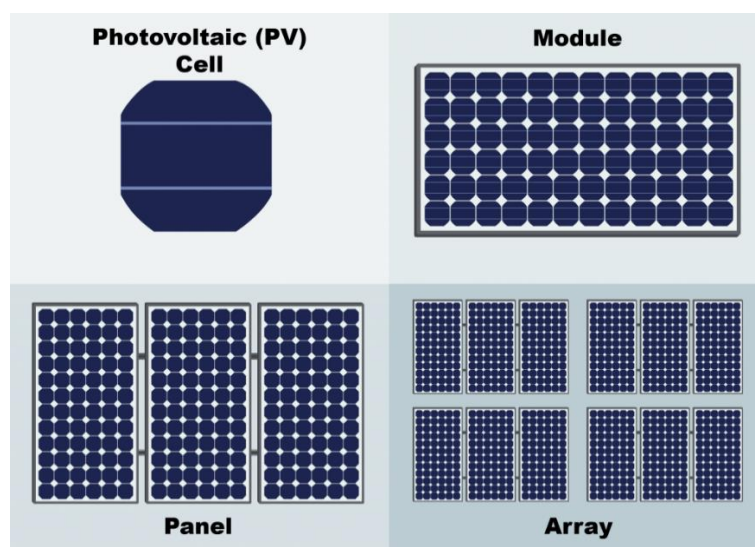
1973. aastal loodi esimene päikeseenergia integreeritud katusega hoone Delaweri ülikoolis Ameerika Ühendriikides, mille nimetuseks sai *Solar One*. Järgneval aastal valmistati USA valitsuse poolt akt päikeseenergia uuringuks ja arenguks eesmärgiga

muuta päikeseenergia kasutatavaks ja taskukohaseks avalikkuse jaoks tänu sellel ajal kestvale energiakriisile. Edaspidine areng oli siiski aeglane põhiliselt päikeseplatade maksumuse tõttu. [2], [3]

Tänapäeval on päikeseenergia kasutamine laialdaselt levinud ja kasutegur tõusnud kuni 23%. Päikesepaneelide hinnad on viimastel aastatel aina langenud ja 2023. aastaks oli päikeseenergia installeeritud võimsus 1 552.3 GW [3]. Jätkuvad arengud päikeseenergia kasutamise efektiivsuse ja tehnoloogiate alal aitavad tõsta päikeseenergia olulisust ning jõudmist maailmas paika pandud taastuvenergia eesmärkideni. [3], [4]

1.1 Päikesepaneeli ehitus

Tähtsaimaks osaks päikesepaneelis on päikeseelement ehk *solar cell*. Päikeseelementid muundavad päikesekiirguse elektrienergiaks. Valgusosakeste ehk footonite langedes elementidele neelduvad nad selles, andes ära oma energia materjalis olevatele elektronidele. Selle tulemusena elektronid vabanevad ning tekitatakse augud, kus sisemise elektrivälja tõttu sunnitakse elektronid ühele päikeseelementi kontaktile ning augud teisele ning ühendades seade välisahelasse tekib seal elektrivool. Levinum kasutusel olev päikeseelementi materjal on räni. Räni on maapinnas laialdaselt levinud, mille tõttu on maailmas kasutusel olevatest päikesepaneelidest ligi 90% valmistatud just ränist. Mitmetest päikeseelementidest pannakse kokku päikeseplatamoodul, mitmetest moodulitest pannakse kokku päikesepaneelide jada ja mitmetest jadadest moodustub lõpuks päikeseпарк.



Joonis 1.1 Päikeseelement, -moodul, -paneel, -парк [39]

Päikeseelementide valmistamiseks kasutatakse erinevaid materjale, millest levinuim on räni nagu eelnevalt mainitud. Räni populaarsus tuleneb tema laialdasest kättesaadavusest. Räni on teine kõige levinum element Maa pöues. Päikeseenergeetika alal on räniga töötamisel üle 70 aasta kogemusi ning uuringuid. Ränist valmistatud päikeseelemente on ka erinevaid tüüpe nagu näiteks monokristalliline räni, mis on valmistatud ühest puhtast räni monokristallist, millest lõigatakse õhukese lehed, ja polükristalliline räni, mis on valmistatud erinevates räni kristallidest, mis sulatatakse kokku ning valatakse päikeseelementide kujulistesse vormidesse. [5]

Teiseks oluliseks päikeseelementide valmistamise tehnoloogiaks on õhukeselehelised päikeseelementid. Õhukeselehelised päikeseelementid valmistatakse asetades ühe või mitmed õhukese fotogalvaanilisest materjalist kihid klaasile, metallile või plastikule. Õhukeselehelised päikesepaneelid on moodsamad lahendused kui tavalised ränist paneelid ning esimesed variandid loodi 1970ndatel aastatel. Õhukeselehelisi päikeseelemente valmistatakse erinevatest materjalidest:

1. Esimene levinuim õhukeseleheliste päikesepaneelide valmistamise materjaliks on samuti räni. Õhukeseleheliste elementide valmistamisel kasutatav räni aga erineb eelpool mainitud paneelides kasutatavast ränist. Õhukeseleheliste elementide valmistamiseks kasutatakse amorfset räni, kuid eelpool mainitud elementide valmistamiseks kristallilist räni. Kristallilisest ränist valmistatud paneelid tagavad parema kasuteguri ja stabiilsuse. Amorfne räni on odavam ning pakub materjali suuremat elastsust, mis võimaldab materjali kasutamist õhukeste kiledena. Amorfsest ränist valmistatud päikeseplatadeid on aga üldiselt madalama efektiivsusega ja degradeeruvad kiiremini kui kristallilisest ränist valmistatud variandid. [6]
2. Teine levinuim õhukeseleheliste päikeseelementide valmistamise tehnoloogia põhineb kaadmiumtelluriidil (CdTe). CdTe-st valmistatud päikesepaneelid on teine kõige levinuim kasutusel olev materjal pärast kristallilist räni. Kaadmiumtelluriidi suur eelis on võime valmistada toorainest valmis moodulid mõne tunni jooksul. Teiseks eeliseks on kaadmiumtelluriidi materjali keelutsooni tüüp. Kristalliline räni on kaudse keelutsooniga materjal ja CdTe on otsese keelutsooniga, mille eeliseks on parem töövõimekus aladel, kus valguse neeldumine on oluline. Kaudse keelutsooniga materjalides ei ole neeldumine nii efektiivne kui otsese keelutsooniga materjalides, mille tõttu on vajalik kasutada oluliselt paksemat pooljuhi kihti. [7]
3. Kolmandaks levinud õhukeselehelise päikeseelementide valmistamise materjaliks on CIGS (*copper, indium, gallium, selenide*), mis on segu vasest, indiumist,

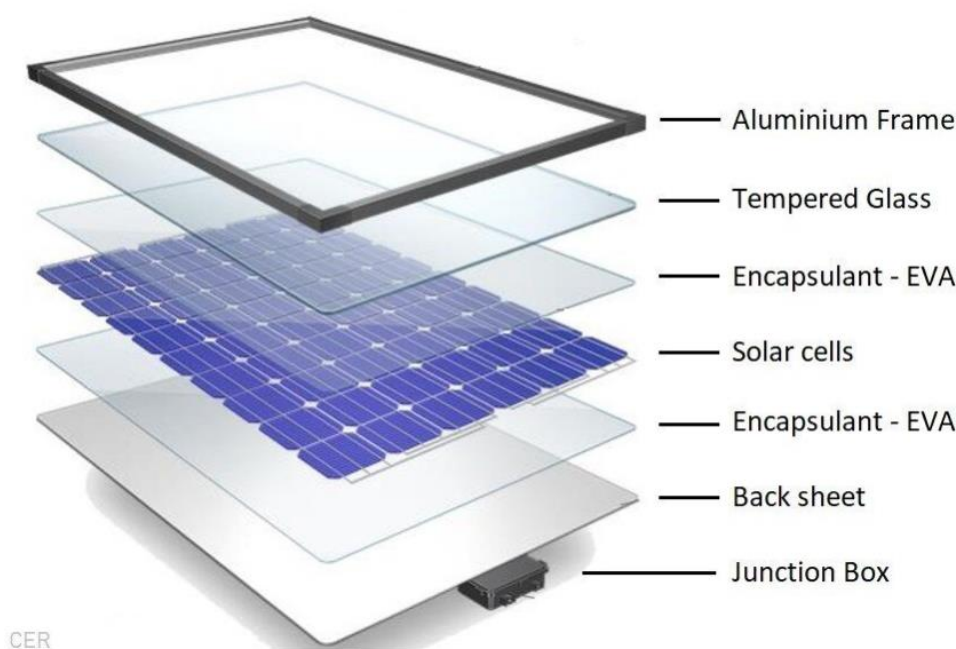
galliumist ja seleenist. CIGS elemendi valmistamine hõlmab nende materjalide kindla segu sadestamist juhtivale pinnale, mis erineb täiesti ränist paneeli valmistamise viisist. Suurim erinevus räni elementide ja CIGS elementide vahel on CIGS materjali parem valgustundlikkus, mille tõttu suudab sama võimsusega CIGS paneel toota 10-20% rohkem energiat aastas kui ränist valmistatud paneel [8]. Lisaks toodangule on CIGS elemendi eeliseks ka parem elastsus ja vastupidavus, tänu sellele, et antud päikeseelemente ei valmistata kasutades õhukesi räni lehti, millesse võivad tekkida praod või võivad täielikult murduda.[8]

4. Õhukesekileliste päikeseelementide hulka kuulub ka DSC (*dye-sensitized cell*). DSC paneelides toimub päikesevalguse muundamine elektrienergiaks läbi fotoelektrokeemilise protsessi. DSC paneeli pooljuhtivast materjalist fotoelektrood kaetakse valgust neelava värvi molekulidega, mis neelavad footoneid päikesevalgusest ja suunavad elektronid fotoelektroodi. DSC paneelide eelised on paindlikkus, mis võimaldab neid kasutada erinevates lahendustes näiteks maja katusesse integreerituna. DSC paneelide valmistamisel kasutatakse madalate hindadega materjale ja lihtsaid tehnikaid, mis võivad potentsiaalselt muuta antud paneelide valmistamistasud soodsaks. DSC paneelidel on ka parem töövõimekus madalamate valgustega tingimustes, mis tähendab, et paneelid suudavad paremini toota pilvistel päevadel ja ka mitte otsese päikesevalguse käes. [9]

Lisaks populaarsematele lahendustele on tänapäevaks välja arenenud ka mitmed erinevad päikeseelementide lahendused. Nendeks on näiteks PERC paneelid, mis kasutavad elemendi tagaküljele paigutatud passiivset kihti, mis peegeldab päikesekiirgust tagasi elemendile tõstes efektiivsust, *bifacial* paneelid, mis suudavad mõlemalt elemendi poolelt päikesevalgust püüda, *concentrator photovoltaic* ehk CPV paneelid, mis kasutavad peegleid ja läätsesid, et suunata päikesevalgust ühele kindlale elemendile, tõstes peale langevad valguse intensiivsust. Lisaks on veel kasutusele võetud hoonete seinade ja katuste sisse integreeritud päikesepaneelid, hübriid paneelid ja ka *tandem* paneelid, mis koosnevad mitmetest elementide kihtidest, millest erinevad kihid püüavad erinevaid päikesevalguse spektri osasid. [11]

Päikesepaneel tervikuna koosneb rohkematest komponentidest, kui ainult valgust neelavast päikeseelemendist. Suurimaks osaks päikesepaneelist kujuneb hoopis klaas, mis katab päikeseelementid ning kaitseb neid ilmastiku ja muu prahi eest, mis võib elemendile langeda. Päikesepaneelil kasutatav klaas on ka päikeseplatari tugistruktuuriks. Päikesepaneelil on alumiiniumist raam, mis annab paneelile lisakaitset ning võimekuse tema paigaldamiseks. Päikeseelementid ümbritsetakse koostamise

käigus EVA kilega, mis on väga vastupidav ja kõrgeid temperatuure taluv ning aitab tõsta paneeli eluiga kaitstes paneeli niiskuse ja muu prügi eest. Paneeli tagumine külg on kaetud teatud polümeridest või plastikutest kihiga, mis samuti pakuvad lisakaitset paneeli tagaküljele. Eelpool mainitud *bifacial* paneelidel on aga tagumine külg klaasist, sest paneel vajab, et valgus paneeli mõlemalt poolt päikeseelementideni jõuaks. Viimase osana on päikesepaneelil ühenduskarp ja spetsiaalsete otsikutega ühendused, mis võimaldavad paneele omavahel ühendada ning lõpuks ka inverteriga ühendada, et toodetud energiat saaks kasutada. [10]



Joonis 1.2 Päikesepaneeli komponendid [10]

Iga paneeli valmides peavad tootjad testimata valmisatud paneeli talitlust ja korrasolekut. Selleks, et erinevad tootjad ja tulevased kliendid saaksid paneelide töövõimet omavahel võrrelda on paika pandud kindlad katsetingimused, mille all tootjad oma paneele testivad. Antud tingimusi nimetatakse standardseteks katsetingimusteks ehk STC. Nendeks tingimusteks on päikeseikiirus 1000 W/m^2 , paneeli tempertuur 25° C ja õhumassi indeks AM1.5. Need tingimused seadistatakse üles laboratooriumis väga täpselt, et tagada täpsed tulemused. Standard tingimuste all katsetamine annab hea võimaluse paneelide võrdlemiseks, kuid saadud tulemused on tehtud ideaalsete tingimuste all laboris ning tulemustel puudub päriseluline komponent, mis paneelide töövõimet mõjutab kui nad on installeeritud väliskeskkonnas. Puudujääkide eemaldamiseks tehakse vahel paneelidele ka PTC tingimuste all katsetamist, mis annavad parema arusaama paneelide töötamisest päriseluliste tingimuste juures kui STC rohkem laboratoorsete katsete puhul. PTC tingimused töötasid välja PVUSA ehk

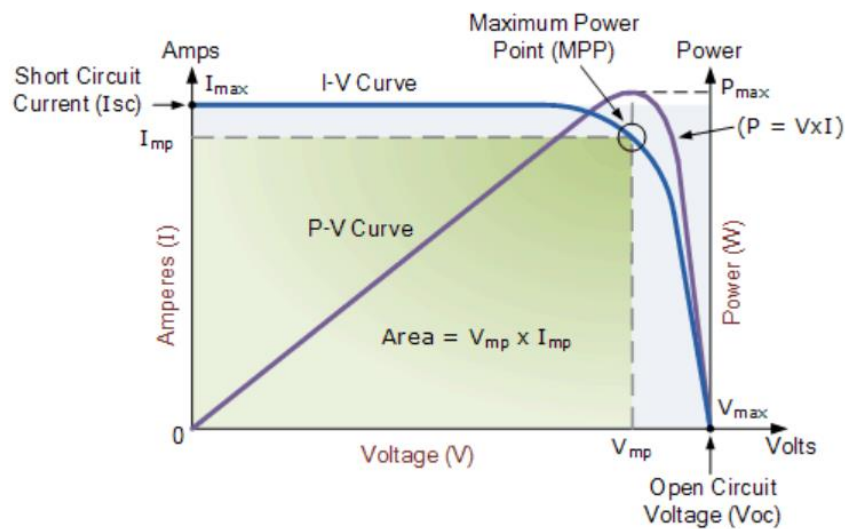
Photovoltaics for Utility Scale Operations, mis oli grupp USA energeetika ministeeriumi ja erinevate päikeseenergeetika ettevõtete vahel. Antud katsetingimuste all jäetakse kiirgusehulk ja õhumassi indeks samaks, kuid teisi parameetreid muudetakse. Päriseluliste tingimuste jäljendamiseks muudetakse õhutemperatuur 20° C peale, paneel ise soojendatakse realistlikuma töötamistemperatuurini, milleks on 45° C, ja paneelide katsetamise ajal hoitakse laboratooriumis õhu liikumise kiirus ~ 1 m/s. [12],[13]

STC tingimuste all testimise käigus leitakse päikesepaneeli vastav I-V kõver (Joonis 1.1.3). I-V kõver leitakse pingestades päikesepaneeli erinevate koormuste juures ja mõõtes tulenevat voolu. Päikesepaneeli I-V kõver näitab kindla paneeli voolu ja pinge suhet. Kõver näitab detailselt paneeli päikeseenergia muundamise võimet ja efektiivsust. Selle kõvera pealt saab leida kõik vajalikud näitajad, mida päikeseparkide rajajad vajavad:

- I_{sc} ehk lühisvool on maksimaalne vool, mis paneelist tuleb kui paneeli otsad on omavahel kokku ühendatud ehk lühistatud. I_{sc} järgi on võimalik päikesepargi rajajatel paika panna vooluparameetrid süsteemile, mis omakorda aitavad süsteemi töökindlust tõsta ja paneeli kaitsta ülevoolusid tekitavate olukordade eest. Lühisvoolu järgi saadakse valida ka korrektsed juhtmed, inverterid ja muud olulised komponendid.
- V_{oc} ehk avatud vooluahela pinge on maksimaalne pinge, mida päikesepaneel annab välja olukorras, kus paneeli külge koormust ei ole ühendatud. Selle kaudu on võimalik valida vastavad seadmed pargile, mis taluvad paneelide poolt tekitatud pingeid. Samuti saab selle kaudu jälgida ka paneelide tööd. Muutused pinges võivad anda märkud paneelide kahjustamisest ja kulumisest.
- MPP (*Maximum Power Point*) ehk maksimaalse võimsuse punkt on kõveral punkt, kus paneel toodab maksimaalselt võimsust koormusega ühendatult. Antud punkti juures on kõveralt leitav vool ja pinge, mille juures paneel toodab maksimaalset võimsust ja neid tähistatakse vastavalt I_{MPP} ja U_{MPP} . Nende väärtuste juures on potentsiaalne ideaalne töötamise punkt paneeli jaoks.
- FF (*fill factor*) ehk täituvusaste on väärtus, mille kaudu saab näidata kui hästi päikesepaneel muudab päikesevalgust elektriks. Seda arvutatakse kasutades maksimaalse võimsuse punkti voolu ja pinge korrutist ning jagatakse see lühisvoolu ja avatud vooluahela pinge korrutisega. Antud näitajat saab kasutada

paneeli väljundvõimsuse optimeerimiseks ning selle kaudu suurema süsteemi efektiivsuse suurendamiseks.

- Efektiivsus η on paneeli poolt välja antava võimsuse ja sissetuleva päikesekiirguse suhe, mida üldiselt väljendatakse protsentides. Efektiivsuse näitaja suurendamine on kõige olulisemaks osaks päikesepaneelide valmistamisel, sest selle suurendamine võimaldab päikesest tulenevat energiat maksimaalselt kasutada. Lisaks pingete ja voolude optimeerimisele sõltub paneeli efektiivsus ka paneeli materjalist ja teistest näitajatest. [13]



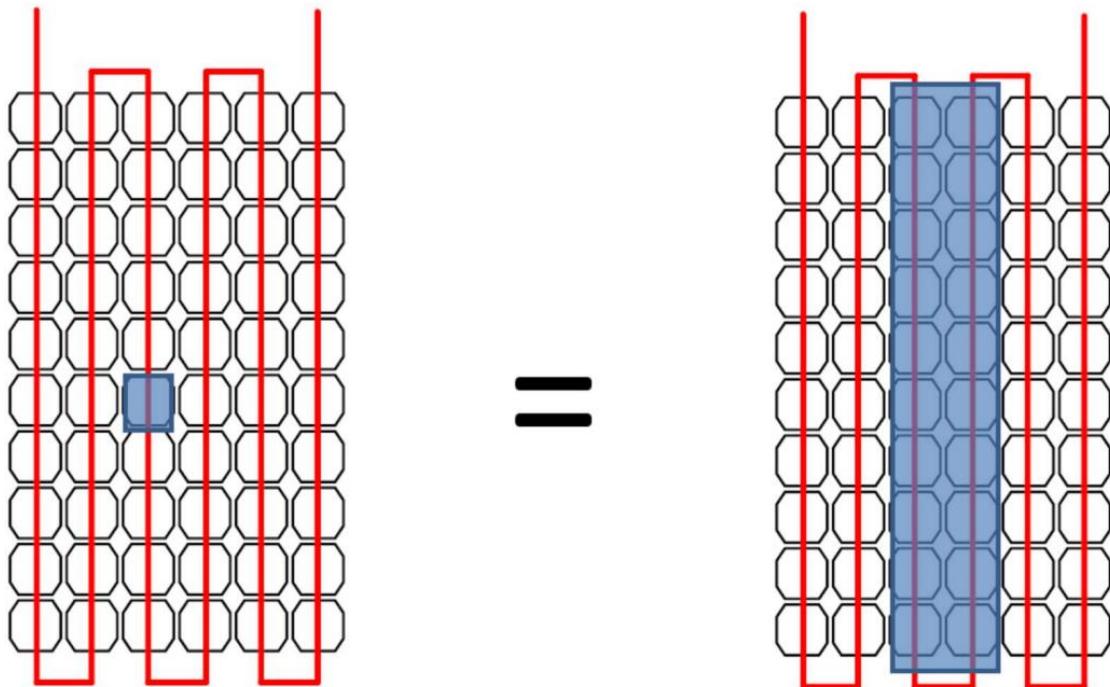
Joonis 1.3 Päikesepaneeli I-V kõver [14]

1.2 Päikesepaneeli tööd mõjutavad tegurid

Päikesepaneeli töö ja võimekus energiat toota sõltub mitmetest erinevatest teguritest, millega päikesepargi rajamisel tuleb arvestada. Erinevad tegurid võivad vähendada paneelide töövõimet või peatada selle täielikult. Päikesepaneelide rajamise planeerimisel arvestatakse esmaselt erinevate varjusid tekitavate elementidega. Varjudest sõltub suurel määral paneeli töövõime. Olenevalt paneeli elementide ühendusviisist võib väikese osa katmine või varjutamine muuta terve paneeli töövõime. Kindlasti sõltub paneeli töö ka saadaval olevast päikesekiirgusest ja kui efektiivselt olemasolevat kiirgust suudetakse kasutada. Lisaks mõjutavad ka päikesepaneeli tööd ka erinevad looduslikud tegurid.

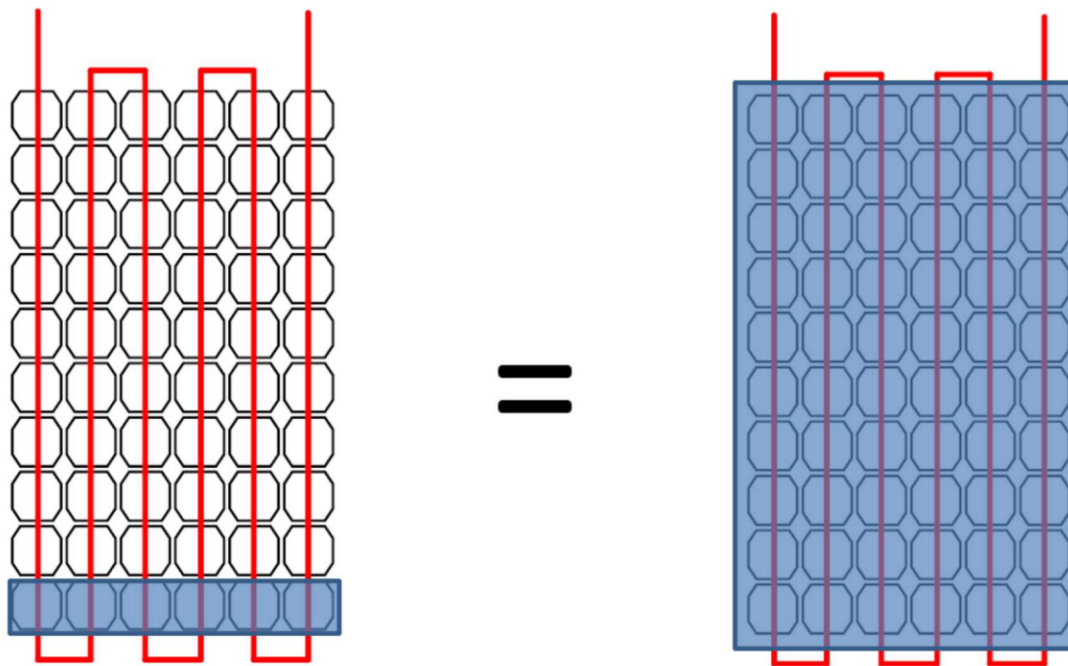
1.2.1 Varjud

Päikesepaneelidel varjude vähendamine on üks põhilisi väljakutseid nii maaparkide kui ka katuseparkide rajamisel. Varjusid võivad tekitada erinevad katusekujud, katuse suund, puud ja muud päikesevalgust blokeerivad objektid. Varju langemine päikesepaneeli peale mõjutab rohkem kui ainult varjuga kaetud koha töövõimet. Olenevalt varjude paigutusest paneeli peal võib terve paneel energia tootmise võimekuse kaotada. Päikesepaneeli elemendid on omavahel jadamisi ühenduses, mis tähendab, et ühe elemendi varjutamine selles jadas muudab terve elementide jada kasutuks. [15]



Joonis 1.4 Ühe päikeseelemendi varjutamine [16]

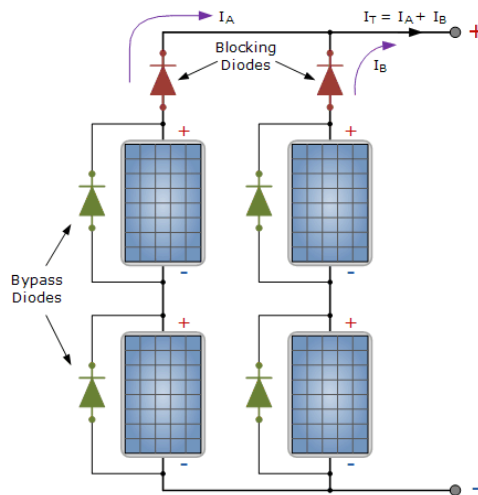
Joonisel 1.2.1.1 on välja toodud ühe päikeseelemendi varjutamise tagajärg paneeli tööle. Antud näite korral kaotab paneel kolmandiku oma võimsusest tänu ainult ühe elemendi varjutamisele. Tänu päikeseelementide ühendusviisile võib väikse varjutamise korral kaotada paneel kogu oma võimsuse.



Joonis 1.5 Alumiste päikeseelementide varjutamine [16]

Varjutamise esmane mõju on paneeli võimsuse ja toodangu langus, kuid paneeli varjutamisega võivad kaasneda ka teised päikesepaneelide tööd mõjutavad probleemid. Üheks kujunevaks probleemiks on kuumade punktide tekkimine. Päikesepaneeli mõne elemendi varjutamise korral hakkab varjutatud element käituma takistina. Selle tulemusena võib varjutatud elemendi vool läheneda lühisvoolule ja suurema voolu tõttu hakkab varjutatud kohas temperatuur tõusma. Lühisvooluni jõudes muutub varjutatud element vastupidiseks teiste elementide pinge genereerimise võimekusega, mis viib kuumade punktide tekkimisele ehk varjutatud element hakkab võimsuse tootmise asemel hoopis võimsust tarbima. Kuumad punktid võivad tekitada päikesepaneelile pöördumatuid kahjustusi nagu näiteks paneeli katva klaasi mõranemist, päikeseelementide purunemist ja jootmispunktide sulamist. Halvimatel juhtudel on ka kuumade punktide tõttu päikesepaneelid maha põlenud. [18], [16]

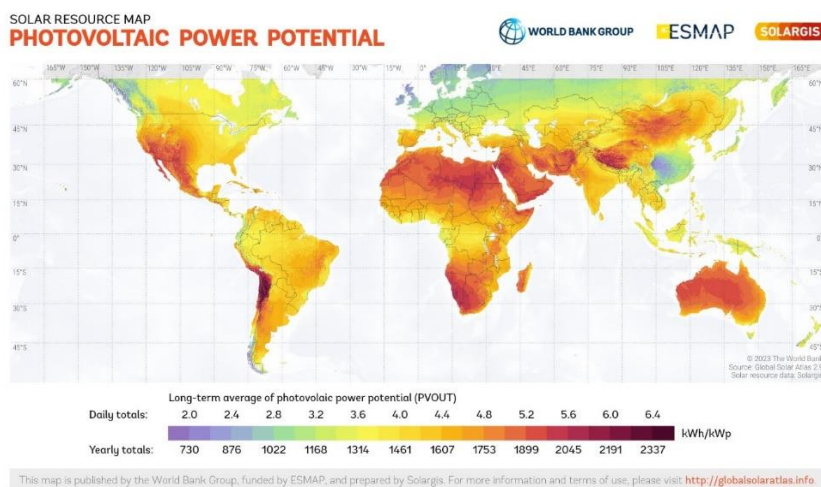
Varjutamise ennetamiseks kasutatakse mitmeid erinevaid meetodeid. Esiteks uuritakse ümbritsevat keskkonda ning planeeritakse päikeseпарк vastavalt ümbruses olevatele varjusid põhjustatavatele objektidele. Teiseks kasutatakse modernsetes päikesepaneelides *bypass diode*-e ehk kõrvalejuhtimisdiode, mis eelkõige aitavad vähendada kuumade punktide formuleerumist. Kuuma punkti tekkimisel muutub varjutatud elemendi pinge negatiivseks ja selle juhtudes suunatakse vool läbi nende diodide. Diodidest voolu läbi juhtimise punkt on paneeliti erinev, kuid üldiselt on vaja 20% erinevust valguse jõudmises elemendini, et vool hakkaks läbi diodide voolama. [19]



Joonis 1.6 Kõrvalejuhtimisdioodid päikesepaneelidel [39]

1.2.2 Päikesekiirus

Päikesekiirus on eelduseks päikesepaneeli tööle, ilma milleta päikesepaneel ei suudaks elektrienergiat toota. Päikesepaneeli võime toota energiat on otseselt seotud paneelile langevast kiirgushulgast. Erinevates kohtades maakeral on maapinnale langeva kiirguse hulk erinev, mille tõttu suurema langeva kiirgushulgaga riikides suudavad päikesepaneelid toota rohkem energiat kui madalama kiirgusega riikides. *Global Solar Atlas*-e andmetel on Eestis keskmine kiirgushulk 1200 kWh/m² aastas optimaalse paneeli kaldenurga all, mis on alla keskmise maailma erinevate asukohtade vaatest. Optimaalne paneeli kaldenurk Eesti aladel jääb 40° juurde suunaga lõunasse. Suurima kiirgushulgaga riigiks on Sudaan, kus keskmine kiirgushulk jääb vahemikku 2400-2500 kWh/m² aastas. Paneelile langevat kiirgushulka mõjutavad lisaks asukohale mitmed erinevad tegurid, mille tulemusena võib paneeli poolt välja antav võimsus ja elektrienergia langeda.



Joonis 1.7 Päikesekiirguse hulk Maal [20]

Peamiseks kiirgushulga mõjutajaks on ilmastiku poolt põhjustatavad muutujad, millest põhiliseks on pilved. Ilusa ilmaga päeval on päikesevalgusel võimalik otse paneeli peale langeda vaba teed pidi ilma takistusteta. Pilvisel päeval on aga päikesevalguse teekond takistatud. Pilvedele langev päikesevalgus hajutatakse, mille tulemusena langeb paneelide tootlikkus. Pilved samuti blokeerivad osa päikeselt tulenevast kiirgusest. Erinevatel kõrgustel olevad pilved aga mõjutavad Maale jõudvat päikesekiirgust erinevalt. Kõrgemal atmosfääris olevad pilved peegeldavad tagasi vähem päikesekiirgust kui madalamal maapinna lähedal olevad pilved. [21]

Päikeselt maale jõudev kiirguse hulk varieerub ka vastaval aastaajale. Kevad- ja suvekuudel on maapinnale jõudev kiirgushulk suurem kui talvekuudel. See on tingitud päikese nurgast Maa suunas ja pikematest päevadest. Suvekuudel on päike kõrgemal ja paistab pikemalt, mille tõttu on ka võimalus päikesekiirgusel paremini ja pikemat aega maapinnale jõuda.

1.2.3 Taimestik

Taimestik on muutuja, millega päikesepargi projekteerijad peavad samuti arvestama. Katuseparkide puhul on põhiliseks takistajaks hoonete ja eramajade läheduses kasvavad suuremad puud. Näiteks maja paiknemisel tihedama metsaga aladel võib muuta katuse kõlbmatuks päikesepargi rajamiseks tänu pidevale varjutusele olenemata päikese asukohast. Maaparkide puhul on suureks mõjutajaks muru ja hein, mis paneelide all kasvavad. Suuremad maapargid vajavad pidevat hooldust kuudel, kus taimestik pidevalt kasvab ja muutub. Paneelide all kasvava muru kasvamist peab jälgima ja hooldama, et muru ei kasvaks sellise pikkuseni, kus ta hakkab paneelide peale varjusid tekitama. Nagu varem mainitud võib ka väike osaline varjutus oluliselt mõjutada päikesepaneeli poolt väljaantavat energiakogust. Taimestik ja täpsemalt selle aluse pinnasega peavad samuti projekteerijad arvestama. Olenevalt pinnasest on vaja päikesepargi rajajatel valida vastavad raamid, mis antud pinnasel vastu peavad, ning planeerida muud vajaminevad tööd päikesepargi optimaalse töökorra saavutamiseks.

Tänapäeval kasutatakse päikeseparkide alust taimestikku ka positiivsete tegevuste raames. Suured maapargid võtavad üldjuhul enda alla suures koguse põllumaad, mis vähendavad kohaliku põllutööstuse jaoks saadaval olevaid maid. Põllutööstusega koostöös on leidnud päikesepargi alused pinnad kahekordset kasutust. Päikesepargi alustel maadel on samaaegselt kasvatatud vilja ning peetud kariloomi. Loomade karjatamine paneelide alusel pinnal annab ka lisaväärtust päikesepargi ülalpidamisele läbi loomade toitumise. Paneelide all kasvatatavad loomad söövad kasvavat muru, mis omakorda aeglustab taimestiku kasvamist kõrgusele, kus ta hakkab paneele varjama ja selle kaudu vähendab ka päikesepargi omaniku hoolduskulusid. Ameerika Ühendriikides

läbiviidud uuringute kohaselt hõlmavad paneelid ainult 40% päikesepargi toimimiseks vajalikust alast. Põllumaadele päikeseparkide rajamine annab ka võimaluse pidevalt külvatud maapinnal taastuda. Kokkulepetel põllumajandusettevõtetega rajatakse pargid selliselt, et oma eluaja lõppedes on pargi alune maapind taastunud ning kõlbulik uuesti põllumajandustegevuse jätkamiseks. [22]



Joonis 1.8 Põllumajandustegevus päikesepargi all [40]

1.2.4 Loomastik

Päikesepargi ümbruses elavad metsloomad ja linnud võivad negatiivselt mõjutada päikesepargi tööd. Katusele paigaldatud päikeseparkidele avaldavad loomad vähem mõju kui suurematele tööstuslikele päikeseparkidele eelkõige ligipääsu tõttu. Katuseparkidele tekitavad enamasti probleeme linnud, kes soojade paneelide alla pesasid rajavad ja peegelduva klaasi tõttu paneelidesse lendavad ning nende purunemist põhjustavad. Samuti võivad linnud oma väljeheidet paneelidele lasta nendest üle lennates, mis põhjustava kuumade punktide teket ja lõpuks paneeli töövõime kaotamist. Maaparkide rajamisega peab aga lisaks lindudele arvestama ka metsloomadega. Üldjuhul vajab suuremat maaparkide rajamine väga suurt maa-ala, mis paratamatult mõjutab sellel alal elavate loomade igapäevast elu. Suuremad loomad võivad rajatud päikesepargi aladele sisenedes kahjustada paneele ning ühendusi, mis pargi toimimiseks loodud on. Juhtmetele ja ühendustele suuremat kahju võivad tekitada väiksema loomad ja närilised, kes võivad juba uudishimust hakata kaableid närima. Sarnaselt lindudega võivad ka väiksemad loomad paneelide aluses soojas endale pesasid rajada.

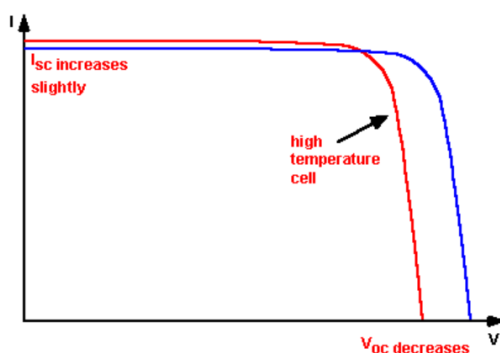
Loomade poolt päikesepargile tekitatud probleemid on aga väiksemad kui päikesepargi rajamise poolt põhjustatud muudatused nende loomade eluviisides. Päikeseparkide rajamine ja ehitus võivad eemaldada kindlate liikide elumaid, segada nende paljunemist ja halvimatel juhtudel viia ka mõnede liikide väljasuremiseni pargi rajamise piirkonnas. [23]



Joonis 1.9 Loomade karjatamine päikesepargi aladel [41]

1.2.5 Temperatuur

Temperatuur mõjutab otseselt päikesepaneeli efektiivsust. Optimaalne temperatuur päikesepaneeli tööks on 25°C , mille tõttu on ka see temperatuur võetud STC katsetamise jaoks. Antud suurusel kõrgemad temperatuurid hakkavad paneeli tööd mõjutama läbi pinge ja voolu. Temperatuuri tõustes suureneb takistus, mille tulemusena langeb paneeli pinge ja tänu sellele ka paneeli võime muuta päikesevalgust elektrienergiaks. Sarnaselt mõjub ka liigne temperatuuri langus paneelidele halvasti. Külmemate kliimadega kaasneb üldjuhul ka lumi, mis võib paneelid katta ja nende efektiivset tööd takistada. Jäätumine ja ka temperatuuride kõikumine paneelide töötamisel külmal ajal võivad põhjustada probleeme tulenevalt sulamisest ning niiskuse tekkimisest. Päikeseparkide rajajad peavad arvestama temperatuuri langemisest sõltuva pinge kasvuga maksimaalse paneelide arvu jadasse lülitamisel, et see ei ületaks paneeli maksimaalset talutavat pinget. Sõltuvalt paneelidest jääb antud suurus vahemikku 1000 – 1500 V.



Joonis 1.10 Temperatuuri mõju pingele ja voolule [24]

Päikesepaneel kaotab osa oma energiast ka soojuskadudele, kui paneeli komponentide temperatuurid tõusevad. Vastavalt suurenevad ka soojuskadude suurused, mida rohkem temperatuur tõuseb.

Temperatuuri mõju paneelile on võimalik hinnata läbi temperatuuri koefitsiendi. Temperatuuri koefitsient on leitav iga tootja päikesepaneelide mudelite andmelehel ning väljendatakse seda protsentides. Koefitsient näitab mitu protsenti langeb paneeli väljundvõimsus ühe kraadi soojenemise käigus. Koefitsiendi kaudu on võimalik näha paneeli efektiivsuse langust temperatuuri tõustes, kuid ka paneeli efektiivsuse tõusmist temperatuuri langedes.

TEMPERATURE RATINGS

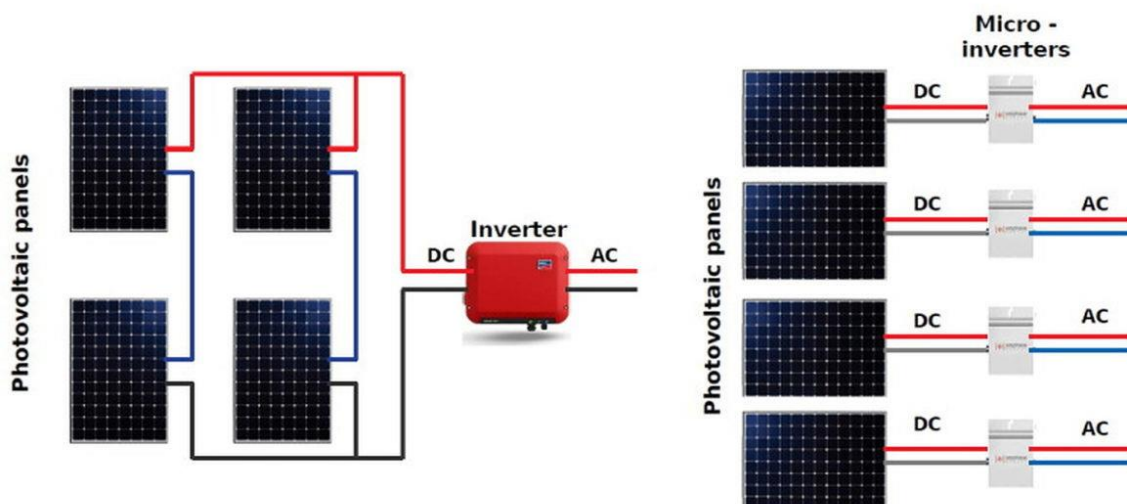
NOCT (Nominal Operating Cell Temperature)	43°C (±2°C)
Temperature Coefficient of P _{MAX}	- 0.30%/°C
Temperature Coefficient of Voc	- 0.24%/°C
Temperature Coefficient of I _{sc}	0.04%/°C

Joonis 1.11 Trina Vertex 700W päikesepaneeli koefitsiendid [35]

1.3 Inverterid

Inverterid on oluline osa päikesepargist ilma milleta ei oleks võimalik paneelide poolt toodetavat elektrienergiat tavatarbimiseks kasutada. Inverterite põhiline ülesanne on päikesepaneelide poolt toodetud alalisvoolu muundamine vahelduvvooluks, et toodetud energiat oleks võimalik võrku anda. Esimesed valmistatud inverterid olid mehaanilised ja kasutasid pöörlevaid mootoreid, et vahetada alalisvoolu suunda moodustades vahelduvvoolu. Modernsed inverterid töötavad ilma liikuvate osadeta ja koosnevad erinevatest elektroonilistest osadest ning muudavad alalisvoolu suunda elektriliste signaalide põhjal. [25]

Tänapäeval on kasutusel mitmeid erinevaid inverterite tüüpe. Levinuimaks inverteritüübiks on string inverterid. Neid kasutatakse põhiliselt katuseparkides ja nagu nimi ütleb on ühe inverteri külge ühendatud mitmed paneelid ehk string. String inverterid on lihtsad ja vastupidavad ning leiavad laialdast kasutust. String inverterite asemel kasutatakse vahel katuseparkides ka mikroinvertereid. Mikroinverterid paigaldatakse igale paneelile individuaalselt. Mikroinverterite eelised string inverterite üle on võimekus optimeerida iga paneeli väljundit ja jälgida ka iga paneeli individuaalset tööd. Samuti annavad nad eelise paneelide varjutamise korral.



Joonis 1.12 Mikro ja string inverterite võrdlus [38]

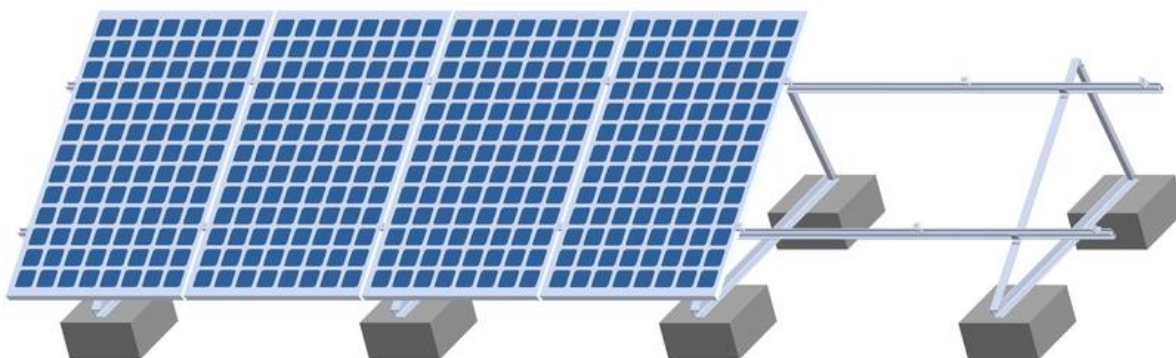
Suurtel tööstuslikel päikeseparkidel on kasutusel suured tsentraalsed inverterid. Tsentraalsed inverterid on suure võimsusega ja koosnevad tavaliselt mitmetest moodulitest. Tsentraalsed inverterid on disainitud ka lihtsaks laiendamiseks kui peaks tekkima tulevikus tööstusliku päikesepargi suurendamine. Samuti on inverteri hooldamine tehtud lihtsaks ligipääsetavusega kõikidele olulistele inverteri komponentidele.

Aina rohkem kasutust leiavad ka hübriid inverterid ja nutikad inverterid. Hübriid inverterid kombineerivad endas inverteri võimekuse ja energiasalvestuse. Üleliigne energia salvestatakse akudesse ja kasutatakse seda optimaalsel hetkel. Hübriid inverterid aitavad maksimeerida päikeseparkide toodangu kasutamist ja suurendada kodude energia iseseisvust. Smart inverterid pakuvad lisaks voolu muundamisele mitmeid erinevaid funktsioone, mis aitavad päikesepargi tööd parandada. Smart inverterid on võimelised reguleerima pinget ja sagedust, reguleerima reaktiivenergiat, pakkuma kaugjuhtimist ja pargi töö jälgimist ning funktsioone, mis aitavad stabiliseerida ühendust päikesepargi ja võrgu vahel. [26], [27]

1.4 Installeerimistehnoloogiad

Päikeseparkide projekteerimiseks ja valmistamiseks kasutatakse mitmeid erinevaid tehnoloogiaid. Igal erineval installeerimisviisil on omad tugevused ja puudused, millega projekteerija peab arvestama. Installeerimistehnoloogia valikud olenevad ka kliimast ja asukohtadest, kuhu päikesepark planeeritakse rajada.

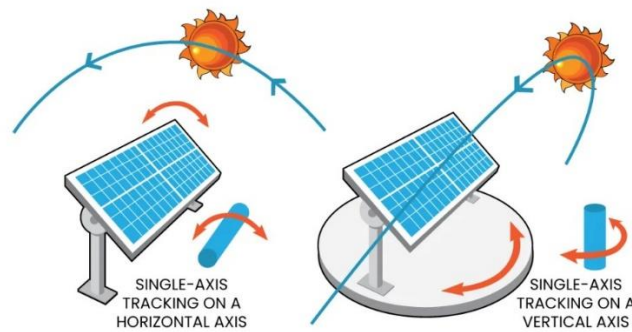
Kõige levinum paneelide installeerimistehnoloogia on fikseeritud kaldenurgaga süsteem. Fikseeritud süsteem koosneb raamist ja paneelidest, mis kindla nurga alla raamile pannakse. Paneeli kaldenurk valitakse vastavalt päikesepargi asukohale ja asukoha spetsiifilisele päikese teekonnale. Asukohtades, kus päikese teekond on kõrgemal, on kasulikum paneelid paigaldada madalama nurgaga ja vastupidiselt madalama teekonnaga asukohtades suurema nurgaga. Eestis on optimaalseks kaldenurgaks 35° kuni 40° aga kui park oleks ehitatud täpselt ekvaatori alla oleks optimaalne kaldenurk paneelide jaoks 0° ehk lamedalt paigaldatud. Vastavalt ka Maa poolkerale on optimaalne paneelide paigaldamise suund erinev. Lõunapoolkeral paigaldatakse paneelid suunaga põhja ja põhjapoolkeral suunaga lõunasse. Fikseeritud süsteemi kasutatakse nii katuseparkides kui ka suurtes tööstuslikes päikeseparkides. Fikseeritud süsteemi eeliseks on tema lihtsus ja väikesm maksumus võrreldes teiste installeerimistehnoloogiatega, mis teeb temast tööstuslike parkide eelistatud tehnoloogiaks, kus üldiseks eesmärgiks on kasumit teenida. Samuti puuduvad fikseeritud süsteemil liikuvad osad, mis muudavad antud tehnoloogia hooldamise lihtsamaks ja kogu süsteemi vastupidavamaks. [28]



Joonis 1.13 Fikseeritud kaldenurgaga süsteem [29]

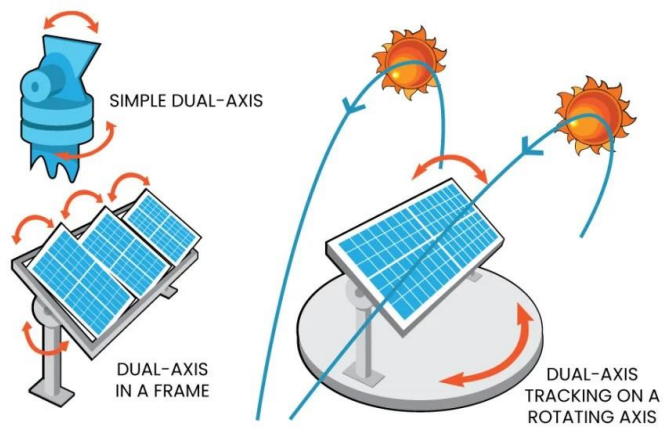
Teiseks installeerimistehnoloogiaks on moodsam *tracker* süsteem ehk päikest jälgiv süsteem. Jälgiv süsteem on võimeline liigutama paneeli vastavalt päikese asukohale päeva jooksul, mille tulemusena antud süsteemiga on võimalik püüda rohkem energiat ja seda ka tundidel, kus fikseeritud süsteem selleks võimeline ei ole. Päikest jälgivad süsteemid on kallimad, kuid omavad potentsiaali suuremateks kasumiteks päikesepargi ehitajate jaoks. Jälgivad süsteemid on hetkel enamusest kasutuses tööstuslikes maaparkides tänu nende hinnale, suurusele ja ka raskusele, mis võivad takistuseks tulla selle süsteemi katuseparkides kasutamisel. Päikest jälgivaid süsteeme on kahte tüüpi:

- Esimeseks tüübiks on *single-axis tracker* ehk süsteem, mis liigub mööda ühte telge. Mööda horisontaalset telge liikuv süsteem suudab järgida päikese liikumist idast läände ehk kaldenurka maksimeerides päikesetundide arvu päevas ja koos sellega ka energiatoodangut. Mööda vertikaaltelge liikuv süsteem paneeli kaldenurka ei muuda, vaid hoopis keerab paneele päikese kõrguse järgi. Vertikaalteljel liikuv variant on vähem levinud ja kasutatakse enamasti asukohtades, kus päikese kõrguse muutumine on suurem. Vertikaalteljel liikuv süsteem on keerukama ehitusega ja vajab lisakomponente, mille tõttu on ka selle rajamine kallim kui horisontaalteljel liikuv süsteem. [30], [31]



Joonis 1.14 Ühe teljega *tracker* süsteem [31]

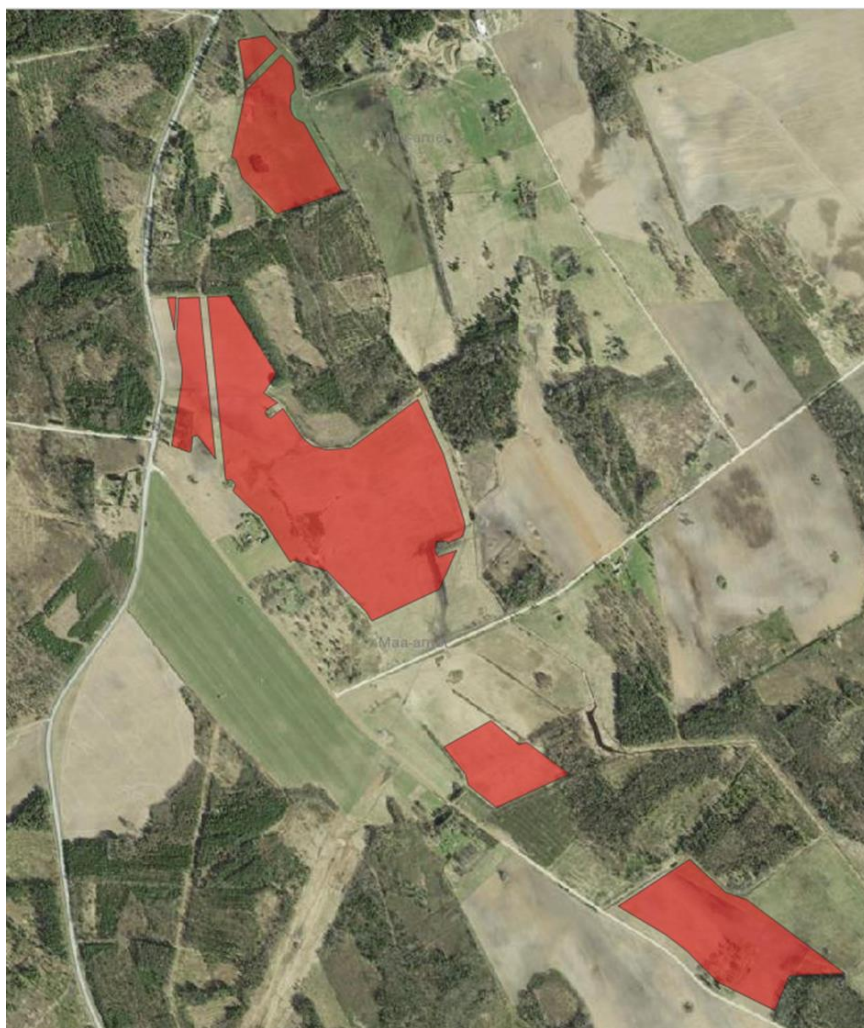
- Teiseks tüübiks on *dual-axis tracker* ehk süsteem, mis suudab paneele liigutada nii horisontaal- kui ka vertikaalteljel. *Dual-axis* süsteem annab maksimaalse energiatoodangu ja hõlmab endas horisontaaltelje ning vertikaaltelje süsteemide positiivsed küljed. Selle tõttu on aga süsteem ka palju keerukam ja kallim. Mitmete liikuvate osade tõttu vajab ka antud süsteem rohkem jälgimist ja hooldust, et optimaalne talitus säilitada. Antud süsteemi valmistatakse nii manuaalset varianti kui ka automaatset. Manuaalse pööramise korral on palgatud töötajad, kes päeva jooksul käivad käsitsi pööramas paneele, et paneelid oleks suunatud päikese poole ja toodang oleks maksimeeritud. Automaatsel süsteemil on sensorid, mis annavad süsteemile märku päikese positsioonist, elektrilised mootorid, mis sensorite informatsiooni põhjal paneelide suunda muudavad. [30], [32]



Joonis 1.15 Kahel teljel liikuv *tracker* süsteem [32]

2. PÄIKESEPARGI MUDEL

Käesoleva töö eesmärgiks oli Valga valla aladel läbi simuleerida erinevad päikesepargi lahendused kasutades erinevaid päikeseparkide installeerimistehnoloogiaid. Modelleeritakse kahte fikseeritud kaldenurgaga süsteemi ja ühte päikest jälgivat süsteemi ning võrreldakse nende energiatoodangut ühe võimsusühiku kohta. Modelleeritav päikeseпарк hõlmab enda all Valga valla kinnistuid. Päikesepargi rajamiseks on saadud 9 erinevat kinnistut, mille peale paneelid paigaldatakse. Kinnistutest 6 kuuluvad Killinge küla alla, 2 Õlatu küla alla ja 1 kuulub Lota küla alla. Kokku hõlmavad need kinnistud 214,9 ha maapinda, kuid paneelid sellele alale täies ulatuses ei rajata. Algse plaani alusel oli päikesepargi planeeritavaks alaks 105,5 ha aga tänu potentsiaalsetele keskkondlikele mõjudele taandus hetkeseisuga paneelide alune pind 60,7 ha peale, mille alusel antud töös modelleerimised on läbi viidud. Potentsiaalselt on võimalik algse suurusega maapinnale park rajada, kuid selleks on vaja läbi viia detailsemad keskkonnauuringud.

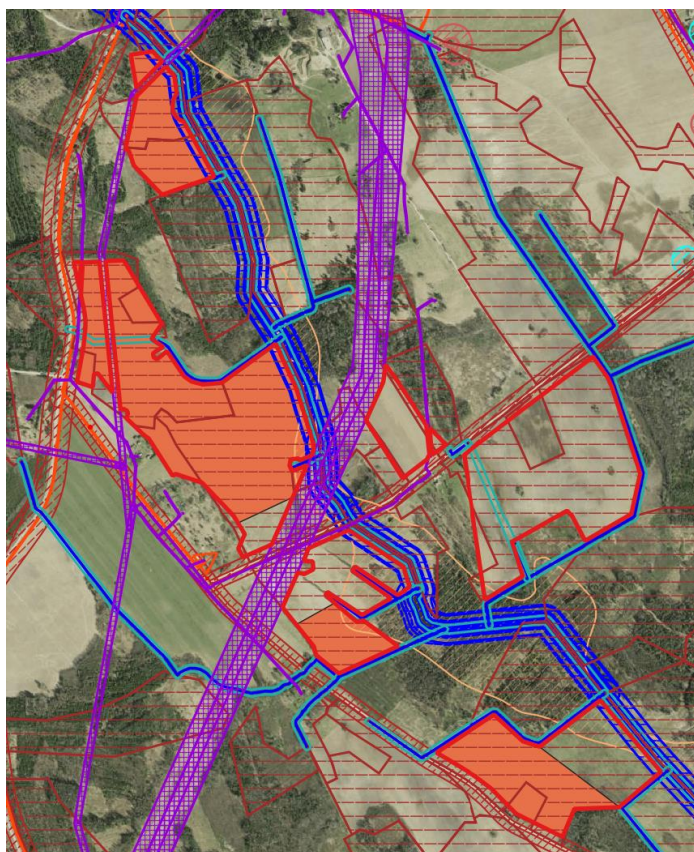


Joonis 2.1. Päikesepargi asendiplaan 01.03.2024 seisuga

2.1 Piirangud ja kitsendused

Päikesepargi planeerimisel tuleb arvestada mitmete ettenähtud kitsenduste ja piirangutega. Piirangute arvestamise teeb lihtsaks maa-ameti netiportaal, kus on võimalik alla laadida kitsenduste kaart, mida on võimalik kasutada kihina kaarditarkvaras QGIS. QGIS tarkvara kasutati antud töös planeeritava päikesepargi alade kindlaks tegemises vastavalt maa-ameti kaardi piirangutele ja kitsendustele.

Planeeritavatel aladel on põhilisteks kaardilt leitavateks piiranguteks kinnistuid läbivad elektriliinid, kinnistut läbiv Lota oja ja kinnistute ääres olevad liiklusteed. Maa-ameti kitsenduste kaardilt on näha nende piirangute vööndid, millega peab arvestama päikesepargi aluse pinna välja joonistamisel.



Joonis 2.2 Piirangud ja kitsendused päikesepargi aladel

Maa-ameti kitsenduste kaardi põhjal on hea algne planeeritav ala välja joonistada, kuid suuremahuliste tööstuslike päikeseparkide rajamisel tuleb arvestada ka erinevate piirangutega, mida sellel kaardil näha ei ole. Nende piirangute leidmiseks koostatakse või tellitakse keskkonnamõju hindmise eelhinnang ja maastikuanalüüs. See on suur dokument, kus koostajad uurivad ja analüüsivad detailselt kõiki aspekte, mis võivad olla mõjutatud suure päikesepargi rajamisest, ning määratakse täiemahulise keskkonnamõju hinnangu koostamise vajadus.

Planeeritavade alade kohta on läbiviidud eelhinnang, milles on välja toodud päikesepargi mõju prognoos eeldatavatele aladele. Teemad, mida on eelhinnangus käsitletud on maakasutus ja maastik, märgalad ja jõeäärsed alad, veestik, õhk ja kliima, maavarade ja ressursikasutus, looduslik mitmekesisus ja mõju elanikkonnale.

Maakasutusele ja maastikule päikesepargi rajamine suuremat kahju ei tee. Kõik tegevused seotud maapinna muutmisega ei ole pöördumatud ning pärast päikesepargi eluea lõppu on võimalik taastada maa-alade algne kasutusala. Ainuke heitmete mõju pinnasele võib tekkida ehitustegevuse käigus ja kui järgitakse keskkonnakaitse tingimusi, ei ole vaja lisameetmeid kasutada. Muutus päikesepargi rajamisega seisneb kasutatava maa-ala sihtotstarbe muutmisega, mis on võimalik algse otstarbe juurde taastada päikesepargi eluea lõppedes. Ainuke paneelide eemaldamist vajav ala on kahte kinnistut läbiv miljöövärtuslik ala, mille tulemusena lõigatakse ära 8,67 ha päikesepaneelide alust pinda.

Veestikule ja jõeäärsetele aladele päikesepargi rajamine mõju ei avalda. Planeeritavat ala läbib Lota oja, millel on 50 m laiune piiranguvöönd ja 25 m laiune ehituskeeluvöönd. Planeeritava pargi alade joonistamisel on nendega arvestatud ja mõju neile aladele ei avalda. Päikesepark jääb küll suhteliselt kaitstud põhjaveega aladele, kuid tänu heitmete puudumisele ja ehitustegevusel tekkivate potentsiaalsete heitmete lühiajalisele mõjule ei ole vaja ka sellega seoses lisameetmeid kasutusele võtta. Pargi aladel on ka maaparandussüsteem, mille toimimine peab olema tagatud.

Õhule ja kliimale päikesepark mõju ei avalda tänu päikesepargi töö heitmete puudumisele. Maavarade kasutusele samuti mõju ei avaldata, sest päikesepargi rajamise käigus säilitatakse mullastiku koostis. Ressursikasutuse koha pealt samuti mõju ei avaldu kui kõiki tekkivaid jäätmeid käsitletakse nõuetekohaselt.

Loodustikuga seoses kaasnevad mõningad mõjud loomastikule ja taimestikule, mida tuleb vähendada. Planeeritav päikesepark on plaanis ümbritseda 1,5 m kõrguse piirdeaiaga, mis piirab loomade ligipääsu antud aladele. Piirdeaeda tuleb rajada 20 cm kõrgused läbipääsud, et loomad, kelle toitumisalad kattuvad päikesepargi aladega, saaksid aia alt läbi liikuda. Päikesepargi aladel leidub ka 1. kaitsekategooriasse kuuluva väike-konnakotka pesitsus- ja toitumisalasid. Väike-konnakotka kodupiirkonnaks peetakse 2 km raadiusega ala tema pesitsuspaigast, mis hõlmab kogu planeeritava päikesepargi ala. Liigi seisundi säilitamiseks on ette nähtud meetmed, mis tagavad nende elupaikade kaitse, häirimise vähendamise ja toitumisalade säilitamise. Esialgse plaani alusel kattis päikesepark 15% konnakotka toidualadest ja pärast alade vähendamist 10%, mis tähendab, et kotkale jääb piisavalt toitumisalasid. Keskkonnaametiga suheldes saadi juhised 2 lisaala eemaldamisega Lota oja kaldal, mis

on kõige olulisemad konnakotka toitumisalad. Väike-konnakotkas on ka müratundlik lind, mille tõttu on vaja ehitustegevust planeerida vastavalt kotka pesitsemisajale.

Elanikkonnale ja nende heaolule ning varale suuremat mõju ei avaldu. Ühe kinnistu raames asub kultuuripärandi objekt, mis tuleb pargi rajamise ja töötamise käigus säilitada. Ainukeseks müra tekitavaks päikesepargi osaks on inverterid. Suuremat müra nad ei tekita, kuid lähim asustatud ala asub päikesepargist vaid 53 m kaugusel, mille tõttu on antud soovitusel inverterite paigutamise kohta. Tänu suurte inverterite kasutamisele on võimalik nende asukohta paremini valida vastavuses müranormidega kui paneelide küljes kasutatavatel inverteritel. Sellega seoses on soovitatud antud elamust inverterid paigaldada maksimaalsele kaugusele, mis on tehniliselt võimalik, et tagada ka öised müranormid antud elamu juures.

2.2 Kasutatud tehnoloogiad

Modelleeritud päikesepargis arvestati kolme põhilise muutujaga tehnoloogiate osas, milleks olid paneelid, inverterid ja paigaldussüsteem. Kõikides päikesepargi mudelites kasutati ühte kindlat paneeli, mis on töö teema pakkunud ettevõttes peamiseks kasutatavaks paneeliks. Inverterite suuruseks valiti 350 kW, mille suurus saadi samuti ettevõtte käest, ning paigaldussüsteemidest kasutati kahte, milleks olid fikseeritud nurgaga paneelide raamid ja jälgiva süsteemi raamid, mis liiguvad mööda horisontaalset telge.

Modelleeringutes kasutatud paneeliks oli *Vertex N-type bifacial 700W*. Paneeli tootja on Hiina päritoluga päikeseenergia ettevõtte nimega *Trina Solar*. Antud paneeli mudelit on võimalik saada vahemikus 675 – 700 W ja on N tüüpi monokristalliline paneel. Paneeli andmelehel välja toodud maksimaalne efektiivsus on 22,5%, mis on saavutatav ainult 700 W võimsusega paneeli korral. Paneeli andmeleht on lihtasti leitav internetis ja andmelehel on välja toodud kõik vajalik informatsioon, mille põhjal on ostjal võimalik teha informeeritud otsus paneeli sobivuse kohta planeeritavate päikeseparkide jaoks.

ELECTRICAL DATA (STC & NOCT)

Testing Condition	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Peak Power Watts- P_{MAX} (Wp)*	675	514	680	517	685	521	690	526	695	530	700	534
Power Tolerance- P_{MAX} (W)	0 ~ +5											
Maximum Power Voltage- V_{MPP} (V)	39.4	37.0	39.6	37.2	39.8	37.3	40.1	37.7	40.3	37.8	40.5	38.0
Maximum Power Current- I_{MPP} (A)	17.12	13.89	17.16	13.91	17.19	13.94	17.23	13.96	17.25	14.02	17.29	14.05
Open Circuit Voltage- V_{oc} (V)	47.2	44.7	47.4	44.9	47.7	45.2	47.9	45.4	48.3	45.8	48.6	46.0
Short Circuit Current- I_{sc} (A)	18.14	14.62	18.18	14.65	18.21	14.67	18.25	14.71	18.28	14.73	18.32	14.76
Module Efficiency η_m (%)	21.7		21.9		22.1		22.2		22.4		22.5	

STC: Irradiance 1000W/m², Cell Temperature 25°C, Air Mass AM1.5. NOCT: Irradiance at 800W/m², Ambient Temperature 20°C, Wind Speed 1m/s. *Measuring tolerance: ±3%.

Joonis 2.3 STC ja NOCT elektrilised andmed [33]

Modelleeringutes kasutatud inverteriks oli SG350HX 350 kW inverter, mille tootjaks on Huawei, mis on samuti Hiina päritoluga ettevõtte. Kasutatav inverter toetab kuni 12 päikesepatareiga jada maksimaalse 1500 V paneelide sisendpingega ja 20 A voolutugevusega. Inverteril on mitmed funktsioonid, mis aitavad optimeerida selle tööd nagu näiteks erinevad andmete analüüsimise ja teiste süsteemiosadega kommunikeerimise võimekused, I-V kõvera pidev diagnostika ning aktiiv- ja reaktiivvõimsuse kontrollimine. Inverteri andmelehel on välja toodud eraldi maksimaalne efektiivsus ja Euroopa efektiivsus, mis on vastavalt 99% ja 98,8%. Inverter on õhkjahutusega ja ühilduv globaalsete elektrivõrkudega. [34]

Input (DC)	
Max. PV input voltage	1500 V
Min. PV input voltage / Startup input voltage	500 V / 550 V
Nominal PV input voltage	1080 V
MPP voltage range	500 V – 1500 V
No. of independent MPP inputs	12 (Optional: 14 / 16)
Max. number of input connector per MPPT	2
Max. PV input current	12 * 40 A (Optional: 14 * 30 A / 16 * 30 A)
Max. DC short-circuit current per MPPT	60 A
Output (AC)	
AC output power	352 kVA @ 30°C / 320 kVA @ 40 °C / 295 kVA @ 50°C
Max. AC output current	254 A
Nominal AC voltage	3 / PE, 800 V
AC voltage range	640 – 920 V
Nominal grid frequency / Grid frequency range	50 Hz / 45 – 55 Hz, 60 Hz / 55 – 65 Hz
THD	< 3 % (at nominal power)
DC current injection	< 0.5 % In
Power factor at nominal power / Adjustable power factor	> 0.99 / 0.8 leading – 0.8 lagging
Feed-in phases / Connection phases	3 / 3
Efficiency	
Max. efficiency / European efficiency	99.02 % / 98.8 %

Joonis 2.4 SG350HX inverteri põhiandmed [34]

Päikesepargi mudelites kasutati 2 erinevate tüüpi raame. Nendeks olid fikseeritud kaldenurgaga paneelide raam ja jälgiva süsteemiga ühilduv raam. Modelleeringute jaoks kasutatud programmis pannakse vaikimisi raamid paika ja neid iseseisvalt muuta ei saa, mille tõttu spetsiifilisi mudeleid ei ole arvestatud. Fikseeritud raami puhul kasutatakse vertikaalselt paigutatud paneele ja ka kahe kaupa. Mõlema süsteemi puhul mahub ühele raamile 27 paneeli horisontaalselt, mis tähendab, et fikseeritud süsteemis oli ühe raami peal 58 paneeli. Päikest jälgiva süsteemi raami peal on 27 paneeli ja põhiliseks erinevuseks fikseeritud raamiga on paneele liigutavate mootorite olemasolu. Jälgiva süsteemi üks mootor on võimeline liigutama 3 paneelide raamistikku.

2.3 Päikesepargi lahendused

Päikeseparki simuleerides katsetati läbi kolme erineva konfiguratsiooniga, kus põhilisteks muutujateks olid paneelide kaldenurk ja reavahe. Kolmest simulatsioonist kahel kasutati fikseeritud kaldenurgaga lahendust ja viimasel kasutati jälgivat süsteemi. Kokku tehti 9 modelleeringut ehk iga konfiguratsiooni kohta arvutati kolme erineva

reavahega variant. Kõikides modelleeringutes arvestas programm 20 aastast vahemikku 2000 – 2020 aastate andmetega ja samuti ka paneelide vananemist, mis programm arvestab keskmiselt 0,5% aastas.

2.3.1 Fikseeritud kaldenurk 35°

Fikseeritud 35° kaldenurgaga viidi läbi 3 simulatsiooni erinevate paneelide reavahedega, milleks olid 12 m, 11 m ja 10 m. Reavahed valiti kombinatsioonina ettevõttes varem kasutatust ja varjutuse suuruse sobilikusest. Modelleeringu tarkvaras arvestatakse reavahet esimese paneeli alumisest äärest järgneva paneeli alumise ääreni. See tähendab, et paneelide otste vaheline kaugus on väiksem paneeli pikkuse võrra antud nurga all. Olemasolevale 60,7 ha maapinnale mahutati vastavalt 48,8 MW, 53,2 MW ja 58,4 MW. Antud paneelide kaldenurgaga modelleeringute põhitulemused on nähtavad järgnevas tabelis. 35° paneelide kaldenurk on töö pakkunud ettevõttes kasutatav kaldenurk ja selle tõttu esimesed modelleeringud sellise kaldenurgaga tehti.

Tabel 2.1. Fikseeritud 35° kaldenurgaga modelleeringute põhitulemused

PÕHITULEMUSED (35°)			
Reavahe	12 m	11 m	10 m
Maa-ala	60,7	60,7	60,7
Võimsus DC (kW)	48764,8	53233,6	58368,8
Võimsus AC (kW)	37800,0	40950,0	44800,0
DC/AC suhe	0,78	0,77	0,77
Paneelide arv	69664	76048	83384
Inverterite arv	108	117	128
Perf. Ratio 1. a (%)	76,4	75,8	75,2
Net. toodang 1y (MWh/a)	51255,4	55517,5	60340,0
Net. toodang 20y (MWh/a)	49078,1	53183,0	57805,9

12 m reavahega variandil mahutati saadavale maa-alale 69664 paneeli, mis võrdub 48,8 MW võimsusega. See võimsus on aga paneelide poolt toodetud alalisvoolu näol ja tegelik võimsus, mida tarbija saab kasutada, on 37,8 MW võimsust vahelduvvoolu näol. AC võimsus saavutatakse inverterite kaudu. Nende võimsuste vahet iseloomustab DC/AC suhe, mis antud ettevõttes standardina pannakse 0,75 peale modelleeringute läbiviimisel. Alati ei ole võimalik täpselt 0,75 DC/AC suhteks saada nagu on näha nendest modelleeringutest. See on tingitud inverterite arvust ja paigaldatud võimsusest, mille tulemusena võib täpselt 0,75 suhte saavutamiseks vaja kasutada näiteks 0,5

inverterit, mida ei ole võimalik teha. Antud variandis kujunes inverterite arvuks 108. 12 m reavahega toodeti esimesel tööaastal 51255 MWh/a elektrienergiat ja kogu modelleeringu perioodi keskmiseks aastaseks toodanguks kujunes 49078 MWh/a. Toodangu andmed on antud WindPRO programmis net väärtustena, mis tähendab, et antud toodangu numbrist on maha lahutatud kõik kaod. 12 m reavahega variandis oli varjutuse suuruseks 3,58%. Teised kaod, mida kasutatud programm arvestab, on seotud inverterite tööga. Päikesepargi 1. tööaasta kogukaod olid 15,9% ja 20 aasta keskmine oli 19,6%. Kasutatud programmis arvutatakse kaod maha päikesepargi brutotoodangust, mis antud simulatsiooni puhul oli 61004 MWh/a. Modelleeringu aruandes on välja toodud ka kuude tunnipõhised keskmised toodangud kogu simulatsiooni perioodi jaoks, kust on kõik kaod maha arvestatud.

11 m reavahega variandi puhul mahutati saadavale maa-alale 76048 paneeli, mis andsid pargi võimsuseks 53,2 MW. AC võimsuseks kujunes 40,9 MW ja DC/AC suhteks 0,77. Inverterite arv tõusis 117 peale. Antud reavahega kujunes päikesepargi 1. aasta toodanguks 55517 MWh/a ja 20 aasta keskmiseks toodanguks 53183 MWh/a. Tänu vähenenud reavahele on mahutatav võimsus suurem, kuid selle arvelt on ka varjutus suurem, mille suuruseks kujunes 4,24%. Selle tulemusena on ka kogu süsteemi kaod suuremad. Kogu kadude suuruseks oli 1. tööaastal 16,6% ja 20 aasta keskmine oli 20,1% arvestades brutotoodangust. 11 m reavahega variandi brutotoodanguks kujunes 66594 MWh/a.

Viimases reavaheks oli 10 m, mille puhul tõusis mahutatavate paneelide arv 83384 peale. 10 meetrisest reavahest madalamaks ei mindud tänu varjutuse liigsele suurenemisele. Antud päikesepargi võimsuseks saadi 58,4 MW DC ja 44,8 MW AC. DC/AC vaheliseks suhteks oli samuti 0,77 nagu ka eelmises modelleeringu variandis. Suurenenud paneelide arvuga tõusis ka vaja minevate inverterite all, mis tõusis 128 inverteri peale. Variandi 1. aasta toodanguks kujunes 60340 MWh/a ja 20 aasta keskmiseks toodanguks 57805 MWh/a. Lähima paneelide vahelise kauguse tõttu on antud variandi varjutamise protsent ka kõige suurem. Antud variandil kujunes varjutuseks 4,96%. Samuti suurenesid varjutuse arvelt süsteemi kogukaod, milleks 1. tööaastal oli 17,4% ja 20 aasta keskmine 20,8%. Kadude eelseks toodanguks ehk brutotoodanguks kujunes 10 m reavahega variandil 73018 MWh/a.

Variantide omavaheliseks võrdlemiseks on parim viis uurida nende energiatoodangu suurust installeeritud võimsusega. Jagades omavahel installeeritud DC võimsuse kogu päikesepargi eluea keskmiste aastaste toodangutega saadakse energiatoodangu kogus installeeritud 1 MW kohta.

Tabel 2.2. Energiatoodang 1 MW kohta

Reavahe	12 m	11 m	10 m
Installeeritud võimsus (MW)	48,7648	53,2336	58,3688
20 a keskmine toodang (MWh/a)	49078,1	53183	57805,9
MWh/MW	1006,425	999,0495	990,3561

Suurima reavahega variandil kujunes aastas toodang 1 MW kohta 1006 MWh. Reavahe vähendades langesid tulemused mõlemal variandil vastavalt 999 MWh ja 990 MWh peale, seoses varjutusega. Nende tulemuste pealt saab väita, et võimsuse suurendamisega ei suudeta nii efektiivselt päikesekiirgust elektrienergiaks muuta kui suurima reavahega variandil, mis tähendab, et vähendab päikesepargi efektiivsust kuigi aastane toodangunumber võib olla suurem.

2.3.2 Fikseeritud kaldenurk 40°

Teise variandina modelleeriti läbi fikseeritud 40° paneelide kaldenurgaga variandid. Sarnaselt eelneva konfiguratsiooniga viidi läbi 3 modelleeringut ja ka samade reavahe suurustega. Antud variandi kaldenurk valiti *Global Solar Atlase* andmete põhjal, mis andis optimaalseks kaldenurgaks pargi asukohas 40°. Paneelide alune pind ei muutunud ja samuti ei muutunud installeeritud võimsuste suurused, sest modelleeringutarkvaras arvestatakse raamide suurused samaks, mille tõttu maa-alale mahtuvate paneelide ridade arv on sama.

Tabel 2.3. Fikseeritud 40° kaldenurgaga simulatsioonide põhitulemused

PÕHITULEMUSED (40°)			
Reavahe	12 m	11 m	10 m
Maa-ala	60,7	60,7	60,7
Võimsus DC (kW)	48764,8	53233,6	58368,8
Võimsus AC (kW)	37800,0	40950,0	44800,0
DC/AC suhe	0,78	0,77	0,77
Panelide arv	69664	76048	83384
Inverterite arv	108	117	128
Perf, Ratio (%)	75,3	74,8	73,9
Net, toodang 1y (MWh/a)	51199,2	55512,9	60099
Net, toodang 20y (MWh/a)	49061,4	53217,9	57592,5

Põhilised erinevused 35° kaldenurgaga variantidega on eelkõige muutused energiatoodangus ja ka varjutamise suuruses. Tänu paneelide järsemale nurgale on ka paneelide vertikaalne kõrgus suurem. Selle tulemusena on olenevalt päikese positsioonist suurem osa tagumiste ridade varjutamise protsent suurem.

12 m reavahega variandis kujunes 1. aasta toodanguks 51199 MWh/a ja 20 aasta keskmiseks toodanguks 49061 MWh/a. Paneelide kaod varjude tõttu olid 4,5% ja kogukaod 1. tööaastal 16,9% ning 20 aasta keskmiselt 20,5%. 11 m reavahega variandil oli toodanguteks 55512 MWh/a ja 53217 MWh/a. Kadudeks kujunesid varjutuse puhul 5% ja kogukaod 17,6% ning 20,9%. 10 m reavahega variandil oli toodanguteks 60099 MWh/a ja 57592 MWh/a. Kadudeks kujunesid varjutamise tagajärjel 6,2% ja kogukaod vastavalt 18,6% ning 21,9%.

Võrreldes 35° kaldenurgaga variantidega olid muutused energiatoodangus marginaalsed, kuid siiski väiksemad. Ainuke suurenenud toodangu number oli 20 aasta keskmises toodangus 11 m reavahega variandil. Selle tulemusena langes ka 40° kaldenurgaga modelleeringute variantide *performance ratio* ehk teoreetilise maksimaalse ideaalsete tingimuste energiatoodangu ja tegeliku energiatoodangu suhe.

Tabel 2.4. 35° ja 40° modelleeringute toodangute erinevused, MWh/a

1. AASTA TOODANG		
35°	40°	VAHE
51255,4	51199,2	-56,20
55517,5	55512,9	-4,6
60340	60099	-241
20 AASTA KESKMINE TOODANG		
35°	40°	VAHE
49078,1	49061,4	-16,7
53183,0	53217,9	34,9
57805,9	57592,5	-210,4

Toodangu langus antud variandis on tingitud paneelide järsemast kaldenurgast põhjustatud varjutamise suurenemisest. Muutused inverterite tööga seotud kadudes olid minimaalsed ja olulist mõju tulemustele ei avaldanud. Seega on kogukadude suurenemine põhiliselt tingitud varjutamisega seotud kadude tõusmisest.

Tabel 2.5. 35° ja 40° modelleeringute varjutuskadude erinevused, %

35°	40°	VAHE
3,58	4,46	0,88
4,24	5,02	0,78
4,96	6,16	1,2

Puhtalt toodangut arvestades oleks optimaalseimaks variandiks 35° kaldenurgaga 10 m reavahega variant. Antud variandi 1. tööaasta kui ka 20 aasta keskmine energiatoodang on suurim ning võrreldes sama reavahega 40° kaldenurgaga variandiga ka varjutuskaod 1,2% madalamad, mille tõttu ka suurem toodang antud variandil.

2.3.3 Tracker süsteem

Kolmas modelleeringute konfiguratsioon tehti päikest jälgiva süsteemiga. Jälgivate süsteemide tehnoloogiate arengu ja kasvava populaarsuse tõttu on oluline võrrelda seda fikseeritud kaldenurgaga süsteemide vastu. Antud variandil valiti reavahedeks 6,5 m, 6 m ja 5,5 m. Fikseeritud kaldenurgaga süsteemidel on reavahede põhiliseks määrajaks varjude tekkimine, kuid jälgivatel süsteemidel ei ole see põhiline otsustaja. Jälgivatel süsteemidel on kasutusel üks paneel vertikaalselt ja tänu paneelide liikumise võimele on varjutused palju väiksemad kui fikseeritud raamiga süsteemil. Jälgiva süsteemi oluliseimaks muutujaks on kindlaks tegemine, et paneelid üksteise pihta ei läheks nende töö käigus. Kasutatud paneelide suuruse tõttu on tootja öelnud, et alla 5 m reavahe ei tohi minna, sest sellise distantsi puhul kahe paneelirea vahel tekib oht, et paneelide ääred puutuvad kokku kui nad on maapinnaga horisontaalses positsioonis ehk 0° nurga all. Päikest jälgivad süsteemid on paigutatud suunaga idast läände ehk 90° vastu fikseeritud süsteemile, mis on paigutatud lõunasse ehk 180°. Jälgiva süsteemi paneelid jälgivad päikest idast läände suunal.

Tabel 2.6. Päikest jälgiva süsteemi modelleeringute põhitulemused

PÕHITULEMUSED (TRACKER)			
Reavahe	6,5 m	6 m	5,5 m
Maa-ala	60,7	60,7	60,7
Võimsus DC (kW)	46020,8	49842,8	54350,8
Võimsus AC (kW)	35700,0	38500,0	42000,0
DC/AC suhe	0,78	0,77	0,77
Paneelide arv	65744	71204	77644
Inverterite arv	102	110	120

Tabel 2.6. Jätk

Perf, Ratio (%)	77,4	77,5	77,8
Net, toodang 1y (MWh/a)	54252,1	57982,7	62208,2
Net, toodang 20y (MWh/a)	51905,2	55446,2	59453,6

Jälgivate süsteemide puhul paigaldatakse vertikaalselt ainult 1 paneel vastu fikseeritud süsteemi 2 paneelile, kuid see võimaldab kasutada väiksemaid reavaheid. Tänu sellele on mahutatavad võimsused üsna sarnased. 6,5 m reavahega variandi korral mahtus DC võimsust 46, MW ja AC võimsust 35,7 MW. Paneelide arvuks antud variandil kujunes 65744 ja inverterite arvuks 102. 1. tööaastal oli 6,5 m reavahega simulatsiooni toodanguks 54252 MWh/a ja 20 aasta keskmiseks toodanguks 519052 MWh/a. Antud variandi aastaseks brutotoodanguks oli 62311 MWh. Päikest jälgivate süsteemide üheks eeliseks on väikesed varjutuskaod, mis antud modelleeringute korral olid ainult 0,7%. Tänu madalale varjutuskadude suurusele on selle võrra ka süsteemi kogukaod väiksemad. 1. tööaasta kogukadudeks oli 12,9% brutotoodangust ja 20 aasta keskmised kogukaod olid 16,7%. 20 aasta keskmised kogukaod olid võrreldes 40° kaldenurgaga suurima 12 m reavahega variandiga 3,8% väiksemad. See number ei tundu kuigi suur, kuid arvestades tööstuslike parkide suurusi võib ligikaudu 4 % vähem kadusid märkimisväärselt mõjutada aastast energiatoodangut ja läbi selle ka pargi tasuvust.

6 m reavahega variandil saadi DC võimsuseks 49,8 MW ja AC võimsuseks 38,5 MW. Vähendatud reavahe tõttu kasvas nii paneelide kui ka inverterite arv. Paneelide arvuks kujunes 71204 ja inverterite arvuks 110. 6 m reavahega variandi 1.tööaasta toodanguks saadi 57983 MWh/a ja 20 aasta keskmiseks toodanguks 55446 MWh/a. Vähendatud reavahega aga suurenevad kaod. Varjutuskadudeks kujunes 0,7%, 1. tööaasta kogukadudeks 12,9% ja 20 aasta keskmiseks kogukadudeks 16,7%. Võrreldes 11 m reavahega fikseeritud kaldenurgaga süsteemi varianti on kaod samuti vähenenud 4,3%, mis kajastub ka väiksema võimsuse suuremas energiatootlikuses. 1. tööaasta ja 20 aasta keskmised toodangud suurenesid jälgivat süsteemi kasutades vastavalt 2860 MWh/a ja 2228 MWh/a. Suurem tootlikkus on jälgivate süsteemide puhul tingitud nende põhieelisest fikseeritud kaldenurgaga süsteemide ees, milleks on võimekus püüda hommikust ja õhtust päikest ning selle kauda lisaenergiat, mis fikseeritud raamiga süsteemidel läheb kaduma.

Väikseimaiks reavaheks jälgivate süsteemide modelleeringute puhul valiti 5,5 m. Selline reavahe jääb veel lubatud piiridesse ning võimaldab paigaldada maksimaalselt võimsust olemasolevale alale. Antud variandi puhul paigaldati 77644 päikesepaneeli ja nende katmiseks installeeriti 120 inverterit. 5,5 m reavahega variandil kujunes päikesepargi DC võimsuseks 54,4 MW ja AC võimsuseks 42 MW. Tänu suurimale jälgiva süsteemi variandi võimsusele olid ka aastased toodangute suurused kõige suuremad. 1. tööaasta toodanguks kujunes 62208 MWh/a ja 20 aasta keskmiseks toodanguks kujunes 59454 MWh/a. Vähima reavahe tõttu on ka kaod kõige suuremad. 5,5 m reavahega variandil saadi varjutuskadude suuruseks 0,8%. 1. tööaasta kogukadudeks kujunes 12,8% ja 20 aasta keskmiseks kogukadude suuruseks 16,7%. Võrreldes vähima reavahega fikseeritud kaldenurgaga variantidega on kogukadude vahe tõusnud 5,3% juurde. Kadudest tingitud energiatootluse erinevus fikseeritud süsteemi variandiga on 1. tööaastal 2109 MWh/a ja 20 aasta keskmisel toodangul 1862 MWh/a.

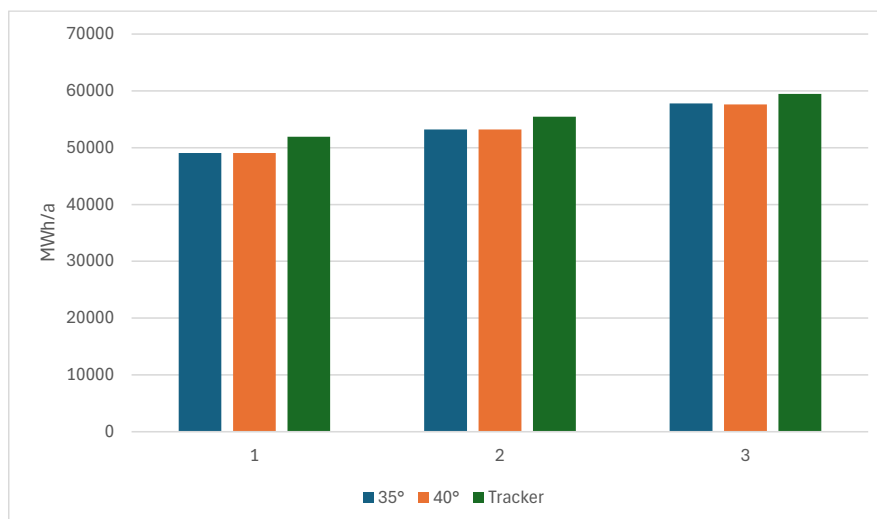
Tabel 2.2. Energiatoodang 1 MW kohta

Reavahe	6,5 m	6 m	5,5 m
Installeeritud võimsus (MW)	46,0608	49,8428	54,3508
20 a keskmine toodang (MWh/a)	51905,2	55446,2	59453,6
MWh/MW	1126,884	1112,421	1093,886

Päikest jälgival süsteemil on 1 MW energiatoodangu tulemused sarnased fikseeritud süsteemi omadega aspektis, et võimsuse suurendamine vähendab päikesepargi kui terviku efektiivsust. Tänu aga suuremale võimekusele päikesekiirgust püüda on jälgiva süsteemi tulemused paremad väiksemate installeeritud võimsuste korral.

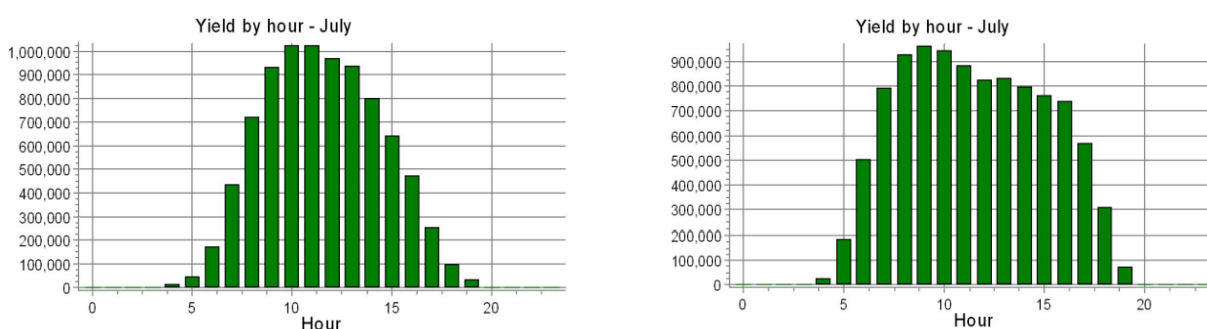
2.3.4 Simulatsioonide võrdlus

Parima lahenduse leidmiseks on oluline võrrelda kõikide modelleeringute variantide tulemusi. Päikeseparkide modelleeringute tulemustest on võimalik põhiliselt võrrelda ainult energiatoodangu tulemusi, sest mudelis majanduslikku poolt ei arvestata. Maksimaalse energiatoodangu saavutamine on oluline, kuid kui see eesmärk saavutatakse ebarealistlike suurustega, siis pargi tasuvus muutub kättesaadamatuks.



Joonis 2.5 20 a. keskmiste toodangute võrdlus reavahede suuruste kaupa, MWh/a

Joonisel 2.5 on välja toodud kõikide variantide 20 aasta keskmiste toodangute võrdlused. Võrreldud on vähimast reavahest alustades 3 variandi tulemusi. Antud jooniselt on näha, et jälgivad süsteemid annavad iga variandi juures suurima tulemuse. See on peamiselt tingitud jälgiva süsteemi võimekusest püüda varahommikust ja hilisõhtust päikest, mida tavaline fikseeritud suunaga päikesepark ei suuda.

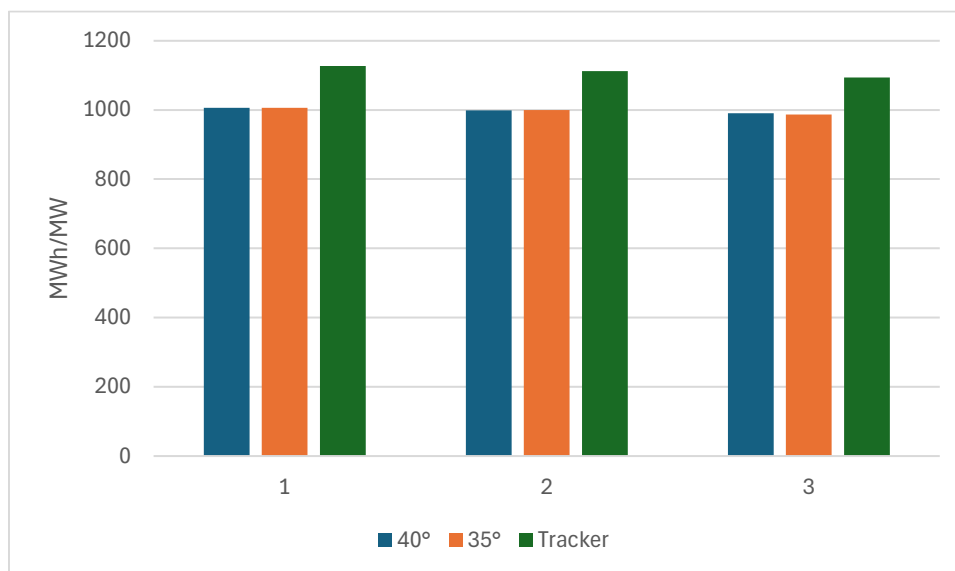


Joonis 2.6 Keskmised juuli tunnitoodangud fikseeritud vs jälgiv süsteem, kWh

Joonisel 2.6 on välja toodud modelleeringute aruannetes leitavad graafikud suurima toodanguga kuu jaoks. Võrdluseks on välja toodud 40° kaldenurgaga ja jälgiva süsteemi väikseima reavahega variantide tunnitoodangu graafikud. Vasakpoolne graafik on fikseeritud variandi kohta, kus on näha, et suurem energiatoodang algab kella 7 juures. Antud kellaaja juures on fikseeritud süsteemi toodang natukene üle 400000 kWh. Vaadates parempoolset jälgiva süsteemi graafikut on selleks kellaajaks toodang saavutanud ligi 800000 kWh. Kõrvuti võrreldes kahte graafikut on selgelt näha jälgiva süsteemi eeliseid energiatoodangu graafiku silumises. Fikseeritud kaldenurgaga süsteem küll toodab natukene rohkem energiatoodangu tipptundidel, kuid jälgiv süsteem hoiab kõrgemat energiatoodangut suuremal arvul tundidel. Fikseeritud süsteem toodab tipptundidel rohkem energiat tänu päikese positsioonile, mis ei ole Eestis täpselt vertikaalselt paneelide kohal nagu ta on ekvaatori all. Jaotunud toodang

aitab kaasa ka pargi tasuvuse vähendamisele tänu suuremal võrku müüdavale energiakogusele tundidel, kus tavaliselt elektri hinnad on kõrgemad ja konkureerivad päikesepargid, mis kasutavad fikseeritud kaldenurgaga tehnoloogiat, ei suuda seda toota.

Joonisel 2.7 on välja toodud võrdlused kõikide modelleeringute energiatoodangust 1 MW kohta. Võrreldud on kõikide konfiguratsioonide variantide reavahede järgi grupeeritud. Jooniselt on näha päikest jälgiva süsteemi variantide suurt eelist kõikides variantides, mis on tingitud varem väljatoodud jälgiva süsteemi päikese püüdmise tugevustele. 1 MW energiatoodang jälgivate süsteemide modelleeringutes on kõikidel variantidel ligikaudu 10% suurem, mis on päikesepargi suurust arvestades märkimisväärne vahe toodangus. Arvestades, et jälgivate süsteemide variantide installeeritud võimsus on väiksem fikseeritud süsteemide variantides, võib see vahe olla isegi suurem võrdsete võimsuste juures.



Joonis 2.7 1 MW energiatoodangute võrdlus reavahede suuruste kaupa

3. MAJANDUSLIKUD NÄITAJAD

Eelnevas peatükis võrreldi omavahel modelleeringute tehnilisi väljundeid, kus põhiliseks otsustavaks näitajaks oli päikesepargi energiatoodangu suurus. Kuigi energiatoodang on oluline aspekt päikesepargi planeerimisel, on tööstusliku päikesepargi põhieesmärgiks olla majanduslikult kasumlik lisaks kõikidele keskkonnasäästmise punktidele. Päikesepargi majanduslik tasuvuse saavutamiseks tuleb arvestada mitmete erinevate pargi osadega ja päikesepargi töökindluse pidamisega seotud ülesannetega. Üheks peamiseks vahendiks, mille kaudu on võimalik päikesepargi majanduslikku sobivust hinnata, on *LCoE* ehk *Levelized Cost of Electricity*, mis tõlgituna saab väljendada kui elektritootmise omahind.

3.1 LCOE

LCoE-d on majanduslik mõõtühik, mida kasutatakse erinevate energiatootmise meetodite võrdlemiseks. Antud töö raames võrreldakse ühese energiatootmise võimaluse erinevate variantide *LCoE*-sid. Antud mõõtühikut väljendatakse tavaliselt maksumusena toodetud energiaühiku kohta, milleks antud töös kasutatakse €/MWh. *LCoE* arvutamiseks on vajalik teada päikesepargi rajamise ja pidamise kulusid terve pargi eluea jooksul ning terve eluea jooksul toodetud elektrienergia kogust.

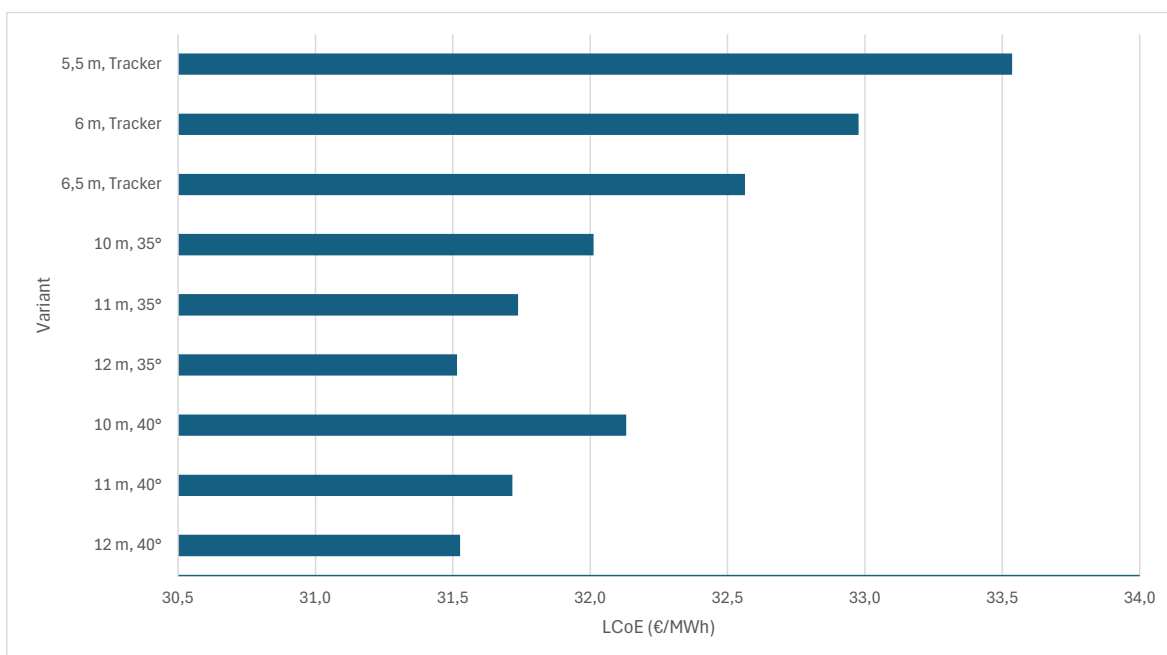
$$LCoE = \frac{NPV(\text{Pargi eluea kulud})}{\text{Pargi eluea elektritoodang}} \quad (3.1.1)$$

LCoE arvutamisel kasutatakse NPV väärtusi. NPV ehk nüüdispuhasväärtus on kõikide tulevaste rahavoogude väärtus kogu projekti eluea jooksul arvestades ka diskontomäära. NPV arvutamine on teine moodus, kuidas on võimalik hinnata projektide tasuvust.

Antud projekti variantide *LCoE*-de arvutamisel kasutati töö pakkunud ettevõtte käest saadud muutujaid. Kasutatud paneelid iga variandi juures olid samad ning nende hinnaks võeti 170000 €/MW. Kasutatud inverterite mudelid olid samuti ühtsed kõikides simulatsioonides ning nende hinnaks võeti 7000 €/MW. Erinevused esinesid raamide hindades tänu erinevate tehnoloogiate kasutamisele ja sellest tingitud opereerimiskulude erinevused. Fikseeritud kaldenurgaga süsteemi raamide hinnaks võeti 60000 €/MW ja päikest jälgiva süsteemi raamide hinnaks võeti 90000 €/MW. Paneelide, raamide ja inverterite hindadest arvutati esialgse investeeringu numbrid. *LCoE* arvutamiseks on vaja ka teada OPEX ehk opereerimiskulusid. Nendeks võeti fikseeritud kaldenurgaga süsteemide puhul 8000 €/MW aastas ja jälgivate süsteemide korral võeti selleks 10000 €/MW aastas. *LCoE* arvutamisel tuleb arvestada ka

diskontomäärä ning inflatsioonitegurit. *Lazard LCoE 2023* [35] aruannet uurides võeti keskmiseks diskontomäärä suuruseks 8%, mida antud arvutustes kasutati. Inflatsiooniteguriks võeti 2%, mille alusel arvutati jooksvalt aastased opereerimiskulud. Arvutuste lihtsustamiseks kasutati kõikide arvutuste korral modelleeringute aruannetes leitavaid 20 aasta keskmisi energiatoodangu arve iga aasta juures.

Esimesena arvutati fikseeritud 40° kaldenurgaga simulatsioonide väärtused. 12 m reavahe puhul saadi elektritootmise omahinnaks 31,5 €/MWh. 11 m reavahe korral 31,7 €/MWh ja 10 m reavahe korral 32,1 €/MWh. Järgnevalt arvutati välja elektritootmise omahinnad 35° kaldenurgaga simulatsioonidele. Varem mainitult on mõlema fikseeritud kaldenurgaga variantide installeeritud võimsused identsed tänu simulatsioonide jaoks kasutatud tarkvara kitsendustele, kuid kaldenurga erinevuse tõttu on energiatoodangu suurused erinevad. 12 m reavahe korral saadi omahinnaks 31,5 €/MWh, 11 m reavahe puhul 31,7 €/MWh ja 10 m reavahe korral 32,0 €/MWh. Viimasena arvutati välja jälgiva süsteemi variantide elektritootmise omahinnad. 6,5 m reavahe korral saadi omahinnaks 32,6 €/MWh, 6 m reavahe korral 33,0 €/MWh ja 5,5 m reavahe korral 33,5 €/MWh.



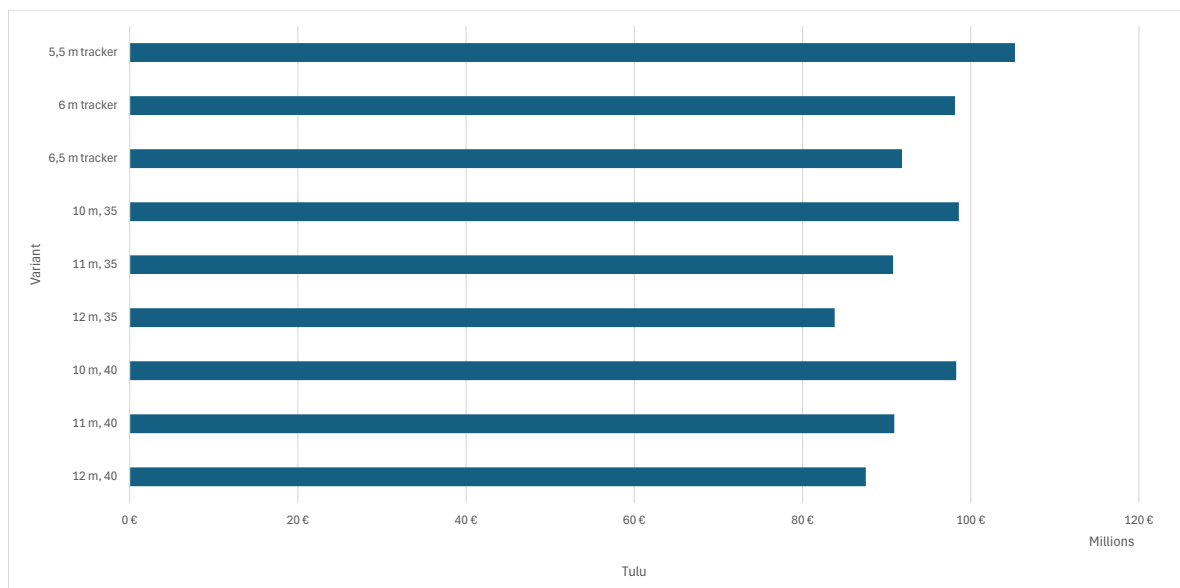
Joonis 3.1 Päikesepargi variantide *LCoE*-de võrdlus

LCoE-de põhjal kujunesid soodsaimaks variandiks suurima reavahega fikseeritud kaldenurgaga variandid tänu nende variantide madalaimale algsele investeeringule. Vaadates mitmeid komakohti on näha, et tegelikkuses on 35° kaldenurgaga variandi elektritootmise omahind marginaalselt soodsam tänu varem näidatud minimaalsele energiatootluse suurenemisele 40° kaldenurgaga variandiga võrreldes. Tänu energiatootlikkuse sarnasustele fikseeritud kaldenurgaga süsteemide modelleeringutes

kujunesid ka elektritootmise omahinnad põhimõtteliselt võrdseks. Päikest jälgiva süsteemi korral olid omahinnad kõrgemad tänu suuremale algsele investeeringule tingitud kallima ja keerukama tehnoloogia kasutamisest. Antud arvutuste alusel oleks soodsaim lahendus 35° kaldenurgaga 12 m reavahega variant, kuid tööstuslike päikeseparkide eesmärgiks on toodetud elektrienergiat võrku müüa ning sellega *LCoE* arvutamisel ei arvestata.

3.2 Majanduslik analüüs

Tööstuslike päikeseparkide rajamise eesmärk on toodetava elektrienergia võrku müümine tulu teenimiseks. Kuigi *LCoE* on hea näitaja elektrienergiat tootvate allikate võrdlemiseks, ei võta see arvesse teenitavat tulu elektrienergia müümisest. Päikeseparkide tasuvuse hindamiseks on vaja ka need arvutused läbi viia. Tulu arvutamiseks kasutati Eesti keskmisi kuude tunnipõhiseid elektri hindu 2023. aasta andmetel [36]. Antud arvutustel kasutati sama inflatsioonitegurit, mida kasutati *LCoE* arvutuste läbiviimisel. Kasutatud keskmiste elektri hindade ja ka toodangute tõttu võivad tulu arvutamise tulemused olla ebarealistlikud ning tegelikest päriselulistest tulemustest erineda. Tulu arvutamisel on eeldatud ka seda, et kogu toodetud elektrienergia läheb võrku müügiks. Tegelikkuses võib võrku müümist piirata võimsuste suurused võrgus ja ka liitumisvõimsuse suurus, mida antud päikeseparki projekti jaoks ei ole veel välja selgitatud tänu päikeseparki algse arengufaasis olemisele.



Joonis 3.2 Variantide teenitud tulu 20 aastasel perioodil

Arvutuste läbiviimisel kasutati 1. tööaasta kuude tunnipõhiseid toodangunumbreid, mis on leitavad modelleeringutarkvarast saadavatest aruannetest. Tehtud arvutuste

tulemusena on fikseeritud 40° kaldenurgaga süsteemide tulud kahaneva reavahega vastavalt 86 mln €, 91 mln € ja 98 mln €. Fikseeritud 35° kaldenurgaga süsteemide tulud olid sarnased tänu nende energiatoodangu minimaalsele erinevusele. Tulemusteks tulid kahaneva reavahega 83 mln €, 90 mln € ja 99 mln €. Parimad numbrid olid aga jälgivatel süsteemidel tänu suuremale toodangule ja nende võimekusele püüda rohkem päikest. Päikest jälgivate süsteemide tulemusteks kujunesid 92 mln €, 98 mln € ja 105 mln €.

Nende lähendustega tehtud arvutuste kohaselt on kõikide variantide tasuvusaeg 4 aastat ehk 4. aasta lõpus hakkab päikesepark kasumit teenima. See ajavahemik on liiga optimistlik ja keskmiselt on tööstuslike päikeseparkide tasuvusaeg 5-10 aastat. Madal tasuvusaeg on jällegi tingitud tehtud lihtsustustest seoses liitumisvõimsusega ja kogu toodangu müümise arvestamisega. Kasumlikuks muutumise punktis ehk 4. tööaasta lõpul on suurima kasumiga 40° kaldenurgaga süsteem 12 m reavahega, millel on kasumit teenitud 3,93 mln €. Kogu 20 aastase eluea lõpuks kujuneb aga suurima kasumiga variandiks 5,5 m reavahega jälgiv süsteem, mille kogutulu arvatult on 105 mln € ja arvestades maha iga-aastased hoolduskulud ning algse investeeringu jääb 20 aastase perioodi peale kasumit 77 mln €. Iga konfiguratsiooni väikseima, keskmise ja suurima reavahega variantide võrdlemisel jäid päikesepargi eluea lõpuks kasumlikumaks alati päikest jälgiva süsteemiga variandid.

Tabel 3.1. Variantide kasumid tasuvusajaks ja eluea lõpuks

Variant	20 a. kasum	4 a. kasum
12 m, 40	66 081 245 €	3 926 580 €
11 m, 40	67 498 638 €	3 363 779 €
10 m, 40	72 603 306 €	3 408 548 €
12 m, 35	62 370 611 €	3 184 453 €
11 m, 35	67 358 103 €	3 335 672 €
10 m, 35	72 926 899 €	3 473 267 €
6,5 m tracker	67 957 482 €	3 773 141 €
6 m tracker	72 286 030 €	3 841 676 €
5,5 m tracker	77 090 871 €	3 842 243 €

4. KOKKUVÕTE

Modelleeringute omavaheliseks võrdlemiseks kasutati nii energiatoodangu analüüsi kui ka majanduslikku analüüsi. Analüüsides energiatoodanguid, nagu loogika dikteerib, saadi suurima toodanguga variantideks need mudelid, kus installeeritud võimsused olid suurimad. Suurima toodanguga variandiks kujunes 5,5 m reavahega jälgiva süsteemi variant, kuid parima toodanguga MW kohta oli hoopis 6,5 m reavahega variant. Energiatoodangu aspektis olid vähimate, keskmiste ja suurimate raevahedega variantidest parimad päikest jälgivat süsteemi kasutatavad päikesepargi lahendused.

Erinevate lahenduste majanduslikke külgi analüüsides kasutati kahte muutujat, milleks olid elektritootmise omahind ning teenitud tulu ja kasum. Omahinna tulemuste põhjal kujunesid soodsaimateks variantideks 12 m reavahega fikseeritud süsteemiga lahendused, mille korral kujunes elektritootmise omahinnkas 31,5 €/MWh. See on aga loogiline arvestades, et suurima reavahega variandi installeeritud võimsused olid kõige madalamad, mille tulemusena olid ka algse investeeringu ja hoolduskulude numbrid kõige madalamad. Päikest jälgivate süsteemide hinnad kujunesid sarnaselt energiatoodanguga kõrgeimaks tänu antud süsteemi kallimale hinnale ning suurematele hoolduskuludele. Modelleeringute tulu ja kasumit analüüsides olid aga samuti jälgiva süsteemiga lahendustel parimad tulemused terve päikesepargi eluiga arvestades. Suurima võimsusega päikest jälgiv süsteem suutis 20 aastase perioodi peale antud arvutuste kohaselt teenida 105 mln € tulu, millest kasumiks kujunes 77 mln €.

Arvestades päikesepargi olemust ning eesmärki on parimateks kasutatavateks lahendusteks jälgiva süsteemiga variandid. Tööstuslike päikeseparkide peamiseks eesmärgiks on siiski tulu ja kasumit teenida lisaks keskkonnasäästlikkusele ning jätkusuutlikkusele. Tööstuslike päikeseparkide planeerimisel mittekasumlikud pargid jäävad rajamata. Jälgivate süsteemide algsed investeeringud ja aastased opereerimiskulud on kõige suuremad, kuid lõpptulemusena saadakse parimad majanduslikud tulemused kasutades just seda päikesepargi tehnoloogiat. Päikest jälgivate süsteemide puhul tasub märkida nende võimekust toota hommikustel ja õhtustel tipptundidel, kus elektri hinnad on kallimad, mille tõttu võivad nad majanduslikult veelgi optimaalsemaks osutada.

5. SUMMARY

Both energy production analysis and economic analysis were used to compare the models. Analysing the energy outputs, as logic dictates, the models with the highest installed capacities were found to be the ones with the highest outputs. The variant with the highest production was the 5,5 m row spacing tracker, while the variant with the best production per MW was the 6,5 m row spacing tracker system. In terms of energy production, the best results from smallest, medium and largest row spacings were always the versions with solar tracking systems.

Two variables were used to analyse the economics of the different solutions, namely the cost price of electricity generation and the revenue and profit generated. Based on the results of the levelized cost of energy, the most favourable options were the fixed system solutions with a 12 m row spacing, which had a levelized cost of energy of 31.5 €/MWh. This is logical given that the highest row spacing option had the lowest installed capacities, resulting in the lowest initial investment and maintenance costs. The prices of the solar tracking systems were the highest, similar to the energy production, due to the higher price and maintenance costs of this system. However, when analysing the revenue and profit of the models, the solutions with tracking systems also had the best numbers over the lifetime of the solar farm. The solar tracking system with the highest capacity was able to generate a revenue of 105 million € over a 20-year period, of which a profit of 77 million € was generated.

Considering the nature and purpose of the solar park, the best solution to be used is the tracking system, considering that the main objective of industrial solar parks is to generate revenue and profit in addition to being environmentally friendly and sustainable. In the case of industrial solar parks, non-profitable parks are not planned or built. Tracking systems have the highest initial investment and annual operating costs, but in the end the best economic results are achieved by using this solar park technology. It is worth noting that solar tracking systems have the ability to produce during morning and evening peak hours, when electricity prices are higher, which can make them even more economically optimal.

KASUTATUD KIRJANDUS

[1] AE Solar, *History of solar modules*, [www] <https://ae-solar.com/history-of-solar-module/#:~:text=The%20solar%20era%20began%20in,an%20efficiency%20of%204%25%20only>. Kasutatud 06.02.2024

[2] E. Chu and D. Lawrence. *A Brief History of Solar Panels*. [www] <https://www.smithsonianmag.com/sponsored/brief-history-solar-panels-180972006/>. Kasutatud 06.02.2024.

[3] International Energy Agency. *Renewables 2023. Executive Summary*. [www] <https://www.iea.org/reports/renewables-2023/executive-summary>. Kasutatud 08.02.2024

[4] Massachusetts Institute of Technology Energy Initiative. *The Future of Solar energy*. [www] <https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2015/05/MITEI-The-Future-of-Solar-Energy.pdf>. Kasutatud 09.02.2024.

[5] Union of Concerned Scientists. C. Hoffs. *How Are Solar Panels Made*. [www] <https://blog.ucsusa.org/charlie-hoffs/how-are-solar-panels-made/#:~:text=By%20weight%2C%20the%20typical%20crystalline,the%20Institute%20for%20Sustainable%20Futures>. Kasutatud 09.02.2024.

[6] Massachusetts Institute of Technology News. *For cheaper solar cells, thinner really is better*. [www] <https://news.mit.edu/2020/cheaper-solar-cells-thinner-0127#:~:text=Currently%2C%2090%20percent%20of%20the,about%2030%20percent%20per%20year>. Kasutatud 09.02.2024.

[7] Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. *Cadmium Telluride*. [www] <https://www.energy.gov/eere/solar/cadmium-telluride>. Kasutatud 10.02.2024.

[8] Energy Excellence Partner Energig. *The difference between CIGS and Crystalline solar*. [www] <https://energig.com/guides/why-are-cigs-solar-cells-better-than-crystalline/>. Kasutatud 10.02.2024.

[9] Fyysika.ee. *Arengud odavate päikesepaneelide tehnoloogias*. [www] <https://www.fyysika.ee/?p=22306>. Kasutatud 11.02.2024.

- [10] Clean Energy Reviews. *Solar Panel Construction*. [www] <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction>. Kasutatud 12.02.2024.
- [11] Neuroject. *Solar Panel in Building; Everything You Need to Know in 2024*. [www] <https://neuroject.com/solar-panel-in-building/#:~:text=Solar%20panels%2C%20also%20referred%20to,sunlight%20into%20usable%20electrical%20power>. Kasutatud 12.02.2024
- [12] Intermountain Wind and Solar. *Solar Panel Efficiency – Understanding STC and PTC Ratings*. [www] [https://www.intermtnwindandsolar.com/solar-panel-efficiency-understanding-stc-and-ptc-ratings/#:~:text=Standard%20Test%20Conditions%20\(STC\)%20refers,be%20sold%20and%20used%20together](https://www.intermtnwindandsolar.com/solar-panel-efficiency-understanding-stc-and-ptc-ratings/#:~:text=Standard%20Test%20Conditions%20(STC)%20refers,be%20sold%20and%20used%20together). Kasutatud 13.02.2024
- [13] Alternative Energy Tutorials. *Standard test Conditions*. [www] <https://www.alternative-energy-tutorials.com/photovoltaics/standard-test-conditions.html>. Kasutatud 13.02.2024
- [14] Alternative Energy Tutorials. *Solar Cell I-V Characteristics*. [www] <https://www.alternative-energy-tutorials.com/photovoltaics/solar-cell-i-v-characteristic.html>. Kasutatud 13.02.2024
- [15] ARKA 360 Republic of Solar. *Effects of Shade on Solar Panels*. [www] <https://arka360.com/ros/effects-of-shade-on-solar-panels/>. Kasutatud 14.02.2024
- [16] Tallinna Tehnika Ülikool. (2023). Päikeseelektri Süsteemid. [Võrgumaterjal] Saadaval: <https://moodle.taltech.ee/course/view.php?id=30355>
- [17] AE Solar, *What are hot spots and how they affect solar panels*, [www] <https://ae-solar.com/what-are-hot-spots-and-how-they-affect-solar-panels/#:~:text=The%20primary%20cause%20of%20hot,formation%20of%20a%20hot%20spot>. Kasutatud 15.02.2024
- [18] ChemiTek Solar. *Hotspot Effect*. [www] <https://www.chemitek.pt/blog/hotspot-effect>. Kasutatud 16.02.2024
- [19] SolarEdge Technologies, Inc. *Technical Note Bypass Diode Effects in Shaded Conditions*. [www] https://knowledge-center.solaredge.com/sites/kc/files/se_technical_bypass_diode_effect_in_shading.pdf Kasutatud 16.02.2024

[20] SolarGIS. *Solar resource maps of World*. [www] <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/world>. Kasutatud 18.02.2024

[21] National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce. *How Do Clouds Affect Solar Energy?* [www] <https://scijinks.gov/solar-energy-and-clouds/>. Kasutatud 20.02.2024

[22] EDP Renewables, *Solar parks & land use*, [www] <https://www.edpr.com/north-america/sites/edprna/files/2023-10/Solar%20parks%20and%20land%20use.pdf>
Kasutatud 20.02.2024

[23] AKRA 360 Republic of Solar. *The Impact Of Solar Energy On Wildlife And Biodiversity*. [www] <https://arka360.com/ros/solar-energy-impact-wildlife-biodiversity-sustainability/#:~:text=Solar%20Farms%20And%20Wildlife&text=One%20of%20the%20main%20negative,and%20displacement%20of%20wildlife%20populations>.
Kasutatud 03.03.2024

[24] PV Education. *Effect of Temperature*. [www] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/effect-of-temperature>.
Kasutatud 03.03.2024

[25] Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. *Solar Integration: Inverters and Grid Services Basics*. [www] <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-integration-inverters-and-grid-services-basics#:~:text=An%20inverter%20is%20one%20of,which%20the%20electrical%20grid%20uses>. Kasutatud 03.03.2024

[26] Solar.com. *Solar Inverters: Types, Pros and Cons*. [www] <https://www.solar.com/learn/solar-inverter/>. Kasutatud 10.03.2024

[27] National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce. *How Do Clouds Affect Solar Energy?* [www] [https://energyknowledgebase.com/topics/smart-inverter.asp#:~:text=A%20smart%20inverter%20is%20an,direct%20current%20\(DC\)%20source](https://energyknowledgebase.com/topics/smart-inverter.asp#:~:text=A%20smart%20inverter%20is%20an,direct%20current%20(DC)%20source). Kasutatud 10.03.2024

[28] Xiamen Mibe New Energy Co. Ltd. *5 Things You Need to Know about Fixed-tilt Solar Racking*. [www] <https://www.mbt-energy.com/news/industry/2208161.html#:~:text=A%20fixed%20tilt%20system%20is,south%20to%20maximize%20sunlight%20exposure>. Kasutatud 10.03.2024

- [29] ENF Solar Ltd. *Fixed Tilt Solar Racking System*. [www] <https://www.ensolar.com/pv/mounting-system-datasheet/6016>. Kasutatud 12.03.2024
- [30] AKRA 360 Republic of Solar. *Solar Tracking Systems: Enhancing Energy Capture and Efficiency for Installers* [www] <https://arka360.com/ros/solar-tracking-systems-enhancing-efficiency/>. Kasutatud 12.03.2024
- [31] Sinovoltaics Group. *Single Axis Trackers*. [www] <https://sinovoltaics.com/learning-center/csp/single-axis-trackers/>. Kasutatud 15.03.2024
- [32] Sinovoltaics Group. *Dual Axis Trackers*. [www] <https://sinovoltaics.com/learning-center/csp/dual-axis-trackers/>. Kasutatud 15.03.2024
- [33] Trina Solar Co. Ltd. *Vertex N N-type i-ROPCon bifacial dual glass Monocrystalline module*. [www] https://static.trinasolar.com/sites/default/files/Vertex_NEG21C.20_EN_2023_APAC_C_web.pdf. Kasutatud 18.03.2024
- [34] Sungrow Power Supply Co. Ltd. *SG350HX Multi-MPPT String Inverter for 1500 Vdc System Datasheet*. [www] https://info-support.sungrowpower.com/application/pdf/2023/12/29/DS_20231208_SG350HX_Datasheet_V20_EN.pdf?fbclid=IwAR10AXMC3sa7mdUUtLvgExMN8Iv-1miuBHATZaQ2ljBW3bGFyucm3XqIPtU. Kasutatud 18.03.2024
- [35] Lazard Inc. *2023 Levelized Cost of Energy+*. [www] <https://www.lazard.com/research-insights/2023-levelized-cost-of-energyplus/>. Kasutatud 22.03.2024
- [36] Elering AS. *Börsihinnad (Eesti ajas, EET/EEST)*. [www] <https://dashboard.elering.ee/et/nps/price?period=days&show=table&interval=minute&start=2024-05-08T21:00:00.000Z&end=2024-05-09T20:59:59.999Z>. Kasutatud 22.03.2024
- [37] Electronics Tutorials. *Bypass Diodes in Solar Panels*. [www] <https://www.electronics-tutorials.ws/diode/bypass-diodes.html>. Kasutatud 29.03.2024
- [38] PV Magazine International. *Micro-inverters vs. string/central inverters*. [www] <https://www.pv-magazine.com/2021/11/29/micro-inverters-vs-string-central-inverters/>. Kasutatud 02.04.2024

[39] Florida Solar Energy Center, University of Florida. *Cells, Modules, Panels and Arrays*. [www] <https://energyresearch.ucf.edu/consumer/solar-technologies/solar-electricity-basics/cells-modules-panels-and-arrays/>. Kasutatud 05.04.2024

[40] Agritecture. *Largest farm to grow crops under solar panels prove to be a bumper crop for agrivoltaic land use*. [www] <https://www.agritecture.com/blog/2022/2/3/largest-farm-to-grow-crops-under-solar-panels-proves-to-be-a-bumper-crop-for-agrivoltaic-land-use>. Kasutatud 15.04.2024

[41] Solstice, Mitsui & Co. Ltd. *Animals and Solar Farms: a Natural Combination*. [www] <https://solstice.us/solstice-blog/animals-and-solar-farms/>. Kasutatud 23.04.2024