



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Saulės elektrinės Klaipėdoje optimalaus išdėstymo techninė- ekonominė analizė

Baigiamasis bakalauro projektas

Edvinas Lisauskas

Projekto autorius

Lekt. Eimantas Neniškis

Vadovas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Saulės elektrinės Klaipėdoje optimalaus išdėstymo techninė- ekonominė analizė

Baigiamasis bakalauro projektas

Atsinaujinančioji energetika (612E33001)

Edvinas Lisauskas

Projekto autorius

Lekt. Eimantas Neniškis

Vadovas

Dokt. Mantas Zelba

Recenzentas

Kaunas, 2020

TVIRTINU:

KTU Elektros ir elektronikos fakulteto
Elektros energetikos sistemų katedros vedėjas
Prof. dr. Saulius Gudžius
2020 05 27

BAKALAURO BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS

Išduota studentui: **Edvinui Lisauskui**

Grupė **EAE-6gr.**

1. Darbo tema:

Lietuvių kalba: ***Saulės elektrinės Klaipėdoje optimalaus išdėstymo techninė-ekonominė analizė***

Anglų kalba: ***Technical-Economic Analysis of the Optimal Layout of the Solar Power Plant in Klaipėda***

Patvirtinta 2020__ m. gegužės mėn. 06 d. dekanų potvarkiu Nr. V25-03-7

2. Darbo tikslas:

Įvertinti saulės elektrinės modulių pasvirimo ir atstumo tarp eilių įtaką ekonominiams rodikliams bei įvertinti ekonomiškai optimaliausių elektrinės išdėstymą Klaipėdoje esančiame sklype.

3. Reikalavimai ir sąlygos:

Bakalauro baigiamasis projektas turi atitikti "Baigiamųjų projektų rengimo ir gynimo metodinius nurodymus", patvirtintus KTU Elektros ir elektronikos fakulteto dekanų

4. Projekto struktūra. Turinys konkretizuojamas kartu su vadovu, atsižvelgiant į BBP pobūdį, pateiktą Metodinių reikalavimų 14 ir 15 punktuose.

Santrauka

Įvadas. Tyrimo objektas, tikslas, aktualumas bei uždaviniai.

Apžvalginė dalis. Lietuvoje ir užsienyje atliktų tyrimų, susijusių su optimaliu saulės elektrinių išdėstymu, apžvalga.

Metodinė dalis:

- Saulės fotomodulių, įtampos keitiklių, kabelių ir kitų elektrinės komponentų parinkimas. Elektros energijos generacijos saulės elektrinėje apskaičiavimas pagal modulio pasvirimo kampą ir saulės padėtį. Elektros generavimo nuostolių dėl šešėliavimo ir jų priklausomybės nuo atstumo tarp saulės elektrinės eilių įvertinimas. Temperatūrinių bei nuostolių dėl modulių senėjimo įvertinimas. Pagaminamo elektros energijos kiekio apskaičiavimas.*
- Saulės elektrinės įrengimo ir eksploatacinių kaštų nustatymas. Elektrinės projekto grynosios dabartinės vertės ir vidinės grąžos normos apskaičiavimas esant skirtingiems tarpams tarp elektrinės eilių. Ekonomiškai optimalaus elektrinės išdėstymo nustatymas. Valstybės paramos saulės elektrinės projektui įvertinimas.*

Rezultatai

Išvados

5. Ekonominė dalis. Jei reikia ekonominio pagrindimo; turinys ir apimtis konkretizuojama darbo eigoje kartu su vadovu.

6. Grafinė dalis. Jei reikia, pateikiama schemas, algoritmai ir surinkimo brėžiniai; turinys ir apimtis konkretizuojama darbo eigoje kartu su vadovu.

Optimalaus saulės elektrinės modulių išdėstymo ir jungimo planas

5. Ši užduotis yra neatskiriama bakalauro baigiamojo projekto dalis

6. Projekto pateikimo gynimui kvalifikacinėje komisijoje terminas

Užduotį gavau: Edvinas Lisauskas

(studento vardas, pavardė, parašas)

Vadovas: Lekt. Eimantas Neniškis

(pareigos, vardas, pavardė, parašas)

iki 2020-05-27

(data)

2020-03-20

(data)

2020-03-20

(data)



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Edvinas Lisauskas

Saulės elektrinės Klaipėdoje optimalaus išdėstymo techninė- ekonominė analizė

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Edvino Lisausko, baigiamasis projektas tema „Saulės elektrinės Klaipėdoje optimalaus išdėstymo techninė-ekonominė analizė“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Lisauskas, Edvinas. Saulės elektrinės Klaipėdoje optimalaus išdėstymo techninė-ekonominė analizė. Bakalauro baigiamasis projektas / vadovas lekt. Neniškis Eimantas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): energijos inžinerija, technologijos mokslai (inžinerija).

Reikšminiai žodžiai: Atsinaujinanti energetika; saulės elektrinės išdėstymas; ekonominis įvertinimas

Kaunas, 2020. 47 p.

Santrauka

Šiame darbe nustatomas optimalus saulės fotovoltinių modulių elektrinės išdėstymas, parenkant fotomodulių pasvirimo kampą ir atstumą tarp eilių. Nustatant šiuos parametrus, buvo analizuojama saulės elektrinės generuojamas elektros energijos kiekis įvertinant susidariusius temperatūros, senėjimo bei šešėliavimo nuostolius. Įvertinus saulės elektrinės generuojamo elektros energijos kiekį, buvo pritaikyti vidinės gražos norma, investicijų gražos rodiklį bei dabartinės grynosios vertės ekonominiai skaičiavimai, kurių pagalba buvo nustatytas optimalus elektrinės išdėstymas. Nustačius optimalų saulės elektrinės išdėstymą buvo paskaičiuoti subsidijavimo variantai, kurie galėtų padidinti saulės elektrinių plėtrą Lietuvoje.

Lisauskas, Edvinas. Technical-Economic Analysis of the Optimal Layout of the Solar Power Plant in Klaipėda. Bachelor's Final Degree Project / supervisor lec. Neniškis Eimantas; Faculty of Electrical and Electronics Engineering , Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Power engineering, technological science (engineering)

Keywords: Renewable energy; Optimal layout of the Solar Power Plant; economic evaluation.

Kaunas, 2020. 47p.

Summary

This work determines the optimal layout of solar power plant by selecting the tilt angle of the photovoltaic modules and estimating distance between rows. During calculations of the solar power plant's yield, the following parameters such as: temperature, aging, and shading, were determined. After evaluating the efficiency of PV plant, economic calculations were made, such as average rates of return and return off investment, which helped to optimize the layout of the PV plant. When the optimal layout of the solar power plant was determined, there was calculated subsidy options that will increase the development of the solar power plants in Lithuania.

Turinys

Lentelių sąrašas	9
Paveikslų sąrašas	10
Santrumpų ir terminų sąrašas	11
Įvadas.....	12
1. Literatūros apžvalga	13
1.1. Atsinaujinančios energetikos perspektyva	13
1.2. Baltijos šalių energijos technologijų apžvalga	14
1.3. Saulės fotovoltinių elektrinių vystymosi apžvalga.....	15
1.4. Saulės fotovoltinių elektrinių išdėstymo projektavimo iššūkiai.....	15
1.5. Projektuojamos saulės fotovoltinės elektrinės apžvalga	16
1.5.1. Saulės fotovoltiniai moduliai.....	16
1.5.2. DC/AC įtampos keitiklių parinkimas	16
1.5.3. Nuolatinės ir kintamos srovės kabelių parinkimas	17
1.6. Skaičiavimų atlikimas	17
2. Technologiniai skaičiavimai	18
2.1. Saulės elektrinės kabelių parinkimas ir juose susidarančių nuostolių skaičiavimas	21
2.2. Saulės deklinacijos kampas	22
2.2.1. Valandinis kampas.....	23
2.2.2. Saulės pakilimo ir azimuto kampai	24
2.2.3. Saulės spindulių kritimo kampas.....	25
2.2.4. Tiesioginių saulės spindulių pasvirimo faktorius	26
2.3. Saulės fotovoltinių modulių eilių šešėliuojamo ploto skaičiavimas.....	26
2.3.1. Šešėlio aukščio ant modulių eilės skaičiavimas	27
2.3.2. Šešėlio pločio ant modulių eilės skaičiavimas	28
2.3.3. Šešėlio ploto ant modulių eilės skaičiavimas	29
2.3.4. Šešėlio ploto ant modulių eilės skaičiavimo pritaikymas ant projektuojamo sklypo.....	30
2.4. Saulės fotovoltinių modulių temperatūros galios nuostolių skaičiavimas saulės elektrinėje ...	32
2.5. Saulės fotovoltinių modulių senėjimo įvertinimas	32
2.6. Oro masės pataisos koeficientas	33
2.6.1. Saulės spindulių kritimo kampo pataisos koeficientai	34
2.7. Suminės saulės elektrinės elektros energijos generacijos skaičiavimas.....	35
3. Ekonominis saulės elektrinės įvertinimas	38
3.1. Elektros energijos kaina	38
3.2. Saulės elektrinės įrengimo, eksploatavimo ir sklypo kainos nustatymas.....	39
3.3. Diskonto normos nustatymas	39
3.4. Saulės elektrinės išdėstymas pagal investicijų grąžos ir vidinės grąžos normos rodiklius	39
3.5. Grynoji dabartinė vertė.....	41
3.6. Saulės elektrinės investavimo patrauklumo padidinimo skaičiavimas	42
Išvados	45
Literatūros sąrašas	46
Priedai.....	48
1 priedas. IRR, ROI, NPV ir kWh/kWp rezultatų lentelės.....	48
2 priedas. Saulės elektrinės sąmata optimaliam išdėstymui	58

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Saulės elektrinės dydžio priklausomybė nuo atstumo tarp saulės modulių eilių	17
2 lentelė. Naudojamos α_i konstantos monokristaliniam fotomoduliui.....	33
3 lentelė. Saulės elektrinės subsidijavimo paketų 1-5 rezultatai.....	42

Paveikslų sąrašas

1 pav. Saulės fotovoltinių elektrinių įrengtos galios kitimas 2018-2050 metais [7].....	15
2 pav. Saulės elektrinės blokas.....	20
3 pav. Žemės skriejimo ir pasvirimo apie Saulę grafikas [3].....	23
4 pav. Saulės judėjimo dangaus skliautu grafinis atvaizdavimas [3].....	24
5 pav. Rezultatai MATLAB programinėje įrangoje	25
6 pav. Tiesioginiai saulės spinduliai horizontaliame ir pasvirusiame paviršiuje [3]	26
7 pav. Šešėlio krentančio ant fotovoltinio modulio aukščio skaičiavimo schema.....	27
8 pav. Šešėlio pločio skaičiavimo schema. Dešinėje projekcija į žemės plokštumą iš viršaus.	28
9 pav. Užimamo šešėlio ploto ant modulių eilės Sketchup vizualizacija	29
10 pav. Sklypo situacija su išdėstyta saulės elektrine	30
11 pav. Projektuojamos saulės elektrinės šešėlio susidarymo vizualizacija Sketchup programinėje įrangoje	31
12 pav. Solitek Solid Pro 310 kWp modulio senėjimo grafikas[16].....	33
13 pav. Saulės elektrinės įrengto kilovato pagaminamos elektros energijos kiekio priklausomybė nuo atstumo tarp saulės modulių eilių.	37
14 pav. Vidutinė metinė elektros energijos kainos kitimo prognozė pagal 3 scenarijus	38
15 pav. Investicijų grąžos rodiklio priklausomybė nuo atstumo tarp saulės modulių eilių	40
16 pav. Vidinės grąžos normos priklausomybė nuo atstumo tarp eilių	41
17 pav. priedo išmokos nustatymo metodika pagal VERT [29]	44

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

ŠESD – šiltnamio efektą sukeliančios dujos;

APVA – Lietuvos Respublikos aplinkos ministerijos aplinkos projektų valdymo agentūra;

DC – nuolatinė srovė;

AC – kintama srovė;

MPPT – maksimalios galios sekimo įvadas keitiklyje;

ROI– investicijų grąžos rodiklis;

IRR – vidinė grąžos norma;

NPV – grynoji dabartinė vertė;

VERT – Valstybinė energetikos reguliavimo taryba.

Terminai:

S&P 500 indeksas – tai yra JAV 500 didžiausių viešai parduodamų bendrovių rinkos vertės svertinis indeksas.

Atstumas tarp saulės elektrinės eilių (angl. „pitch“) – tai atstumas tarp vienos eilės priekinės kraštinės iki kitos eilės priekinės kraštinės, įskaitant ir vienos eilės plotį.

Ivadas

Atsinaujinančios energetikos plėtra yra neišvengiama dėl siekio suvaldyti klimato kaitą, technologinio vystymosi bei pagaminamos elektros energijos savikainos konkurencingumo didėjimo lyginant su tradicinio kuro rūšimis. Viena iš atsinaujinančios energetikos rūšių – tai saulės energetika. Saulės energetikos plėtra prognozuojama didžiausia lyginant su kitomis atsinaujinančios energetikos rūšimis, kaip: vėjo ar biokuro energetika. Vystantis saulės elektrinėms ir didėjant jų paklausai nepatyrę specialistai susiduria su tinkamo projektavimo ir įrengimo sprendinių parinkimo iššūkiais. Todėl šio darbo tema – saulės elektrinės Klaipėdoje optimalaus išdėstymo techninė-ekonominė analizė. Pagrindinis tikslas – įvertinti saulės elektrinės modulių pasvirimo ir atstumo tarp eilių įtaką ekonominiams rodikliams bei įvertinti ekonomiškai optimaliausią elektrinės išdėstymą Klaipėdoje esančiame sklype. Darbe išsikelti uždaviniai yra:

- Išnagrinėti atsinaujinančios energetikos perspektyvą;
- Parinkti saulės fotovoltinius modulius, įtampos keitiklius bei kabelius;
- Įvertinti elektros generavimo nuostolių dėl šešėliavimo ir jų priklausomybės nuo atstumo tarp saulės elektrinės eilių;
- Atlikti pagaminamos elektros energijos kiekio apskaičiavimas įvertinant šešėliavimo, temperatūrinių bei modulių senėjimo nuostolius, keičiant modulio pasvirimą ir atstumą tarp saulės elektrinės eilių;
- Apskaičiuoti elektrinės projekto grynąją dabartinę vertę ir vidinės gražos normą esant skirtingiems modulių pasvirimams bei tarpams tarp elektrinės eilių, ir pagal gautus rezultatus nustatyti ekonomiškai optimalų elektrinės išdėstymą;
- Įvertinti valstybės paramos įtaką saulės elektrinės ekonominiams rodikliams.

Įvykdyti šiuos tikslus, darbas buvo išskirstytas į 3 pagrindines dalis: literatūros apžvalga, technologinius skaičiavimus ir ekonominius skaičiavimus. Literatūros apžvalgoje yra aprašoma atsinaujinančios energetikos plėtros prognozės, išanalizuojama Baltijos šalių energijos technologijų scenarijai, kurių pagalba nustatomos elektros kainos kitimo tendencijos, parenkami projektuojamoje saulės elektrinėje naudojami fotovoltiniai moduliai, įtampos keitikliai bei nuolatinės ir kintamos srovės kabeliai. Technologinėje dalyje yra apskaičiuojami saulės modulių jungimo būdas, parenkami reikalingi kabelių skerspjūviai, detalai apskaičiuojama elektros energijos generacija atsižvelgiant į susidariusius nuostolius. Taip pat šioje dalyje nustatomi šešėliavimo nuostoliai. Ekonominėje dalyje pagrindiniai įvertinami parametrai yra: vidinė gražos norma ir investicijų gražos rodiklis. Šie rodikliai buvo naudojami nustatant optimalų saulės fotovoltinių modulių pasvirimo kampą ir atstumą tarp saulės elektrinių eilių. Taip pat buvo nustatyta diskonto norma prilyginant S&P indekso metiniui prieaugiui. Nustačius diskonto normą buvo apskaičiuota grynoji dabartinė vertė, pagal kurią galima spręsti ar projektas yra patrauklus investuoti ar ne. Kadangi buvo gauta santykinai maža teigiama grynoji dabartinė vertė, buvo atliekamas skirtingų paramos paketų įvertinimas, kuriame apžvelgiamos esamos subsidijavimo formos ir palyginama su kuriomis projektas investuotojui taptų patraukliausias. Skaičiavimai atlikti remiantis literatūroje pateikta skaičiavimo metodika bei MATLAB, PVsyst, MS Office. SketchUp ir HelioScope programine įranga.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Atsinaujinančios energetikos perspektyva

Klimato kaita yra vis labiau ir labiau pastebima mūsų aplinkoje. Vidutinės temperatūros, vandenynų temperatūros bei vandens lygio kilimas – tai pagrindiniai požymiai, kurie įrodo, kad vyksta klimato kaita. Vidutinė pasaulio paviršiaus temperatūra pakilo net 0.9°C nuo 1906 metų [26]. Dauguma klimatą nagrinėjančių mokslininkų sutaria, kad per praėjusį šimtmetį klimato kaita vyksta dėl žmogaus veiklos [25]. Pagrindiniai žmogaus sukuriami veiksniai, kurie skatina globalinį atšilimą yra: pramonės sektoriaus plėtimasis, didėjantis vartojimas bei iškastinio kuro naudojimas. Didėjant orų anomalijoms, kylant vandenynų lygiams ir kitų priežasčių įtakojami žmonės pradeda suprasti, kad reikia imtis priemonių siekiant sumažinti klimato kaitą. Viena iš alternatyvų – tai iškastinio kuro energijos šaltinių keitimas į atsinaujinančias energijos šaltinius. Atsinaujinanti energija – tai energijos rūšis, kuri naudoja atsinaujinančius išteklius, tokius kaip: saulės, vėjo, geotermine bei kitas neišsenkančio kuro rūšis. Šios energijos plėtra pastebima vis didesnė kiekvienais metais. 2018 metais Pasaulyje buvo įrengta net 181 GW atsinaujinančios energijos šaltinių galios [8]. Kiekvienais metais šis skaičius didėja ir atsinaujinančios energijos dalis energetikos srityje didėja. Atsinaujinanti energija sparčiausiai vystosi elektros energijos srityje, tačiau daug lėčiau šilumos ir transporto sektoriuose. Trumpai apie kiekvieną iš sektorių:

- Šilumos sektorius. Atsinaujinančios šaltinių energija 2016 metais patenkino tik 10% šildymo ir vėsinimo energijos poreikių [8]. Šis sektorius sunaudoja apie pusę visos sunaudojamos galutinės energijos, tačiau atsinaujinančios energijos dalis šiame sektoriuje yra mažiausia ir jos dalis didėja lėčiausiai. Tai vyksta dėl per mažo politinio dėmesio į šią sferą. Tačiau su kiekvienais metais šis sektorius pradeda didinti atsinaujinančios energijos dalį jame.
- Transporto sektorius. Šiame sektoriuje žymiai pradeda didėti atsinaujinančios energijos dalis dėl biodegalų naudojimo autotransporte ir sparčiai didėjančio elektromobilių kiekio. Tačiau šis didėjimas lieka ganėtinai suvaržytas dėl lėto technologinio vystymosi ir bendros transportavimo savikainos išaugimo naudojant alternatyvaus kuro rūšis. Atsinaujinančios energijos dalis ypatingai lėtai didėja aviacijos sektoriuje. Tačiau transporto sektoriuje matomos geros tendencijos, tokios kaip elektromobilių skaičiaus padidėjimas. 2018 metais elektromobilių skaičius padidėjo net 63% lyginant su 2017 metais [8]. Padidinus elektros energijos gamybos dalį iš atsinaujinančių šaltinių padidėtų ir elektromobilių sunaudojamos atsinaujinančios energijos dalis.
- Elektros energijos sektorius. Šiame sektoriuje sparčiausiai vystosi atsinaujinančios energijos dalis, dėl pingančių technologijų bei taikomų paramos priemonių, ko pasekoje elektros energijos pagaminimo savikaina tampa konkurencinga iškastinio kuro elektros energijos pagaminimo kainai. 2018 metais atsinaujinančių elektrinių galia pasaulyje pasiekė apie 2378 GW [8]. Tai buvo ketvirti metai iš eilės, kai įrengtos atsinaujinančios energijos elektrinių galios dalis buvo didesnė negu iškastinio kuro ir atominių elektrinių kartu sudėjus. Apie 100 GW galios buvo įrengta fotovoltinių saulės elektrinių, tai sudaro apie 55% visos atsinaujinančios energijos įrengtos galios. Vėjo elektrinės sudarė apie 28%, o hidroelektrinės 11%. Atsinaujinanti elektros energijos dalis 2018 metais išaugo iki 33% lyginant su visų pasaulyje įrengtų elektrinių galia [8].

Apžvelgus kiekvieną sektorių matoma, kad atsinaujinančios energijos dalis didėja ir taip pat planuojamas dar didesnis augimas ateityje, siekiant sumažinti klimato kaitą. Tai parodo atsinaujinančios energijos didėjančią svarbą Pasaulyje.

1.2. Baltijos šalių energijos technologijų apžvalga

Apžvelgti Baltijos šalių energijos technologijų scenarijus ir atsinaujinančios energijos didėjančią svarbą, galima pasinaudojus 2018 metų Baltijos šalių energijos technologijų scenarijų ataskaita (BENTE). Ji yra informatyvi tuo, kad joje analizuojami 2020-2050 metų Baltijos šalių energetikos sektoriaus vystymosi prognozės, globalinio atšilimo mažinimo priemonės bei nustatomas Baltijos šalių elektros energijos kainos pokytis. Taigi, pagrindiniai prognozuojami klimato kaitos scenarijai yra 2DS, 4DS ir BPO. Trumpai apie kiekvieną iš jų:

- 2DS (angl. „2 Degrees Scenario“) – dviejų laipsnių scenarijus, kai globalinis atšilimas apsiribuoja 2 pakilusiais vidutinės temperatūros laipsniais pasaulyje, o Europos sąjunga iki 2050 m. sumažina šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekį 80%;
- 4DS (angl. „4 Degrees Scenario“) – keturių laipsnių scenarijus, kai globalinis atšilimas apsiribuoja 4 pakilusiais vidutinės temperatūros laipsniais pasaulyje;
- BPO (angl. „Baltic Policies Scenario“) – Beveik tas pats kas 4DS, tik taikomi papildomi šiltnamio efektą sukeliančių dujų mažinimo ir atsinaujinančios energetikos skatinimo užduotys.

Pagal šitas 3 scenarijus BENTE projekto ataskaitoje buvo atliktos modeliavimai ir nustatytos prognozuojamos elektros kainos kitimas 2020-2050 metais. Šie elektros energijos kainos kitimo tempai buvo pritaikyti ir naudojami tolimesniems skaičiavimams, kurie pateikti ekonominių skaičiavimų skyriuje. Vadovaujantis šiais scenarijais buvo priertos pagrindinės BENTE projekto ataskaitos išvados kaip sumažinti klimato kaitą pasaulyje [6]:

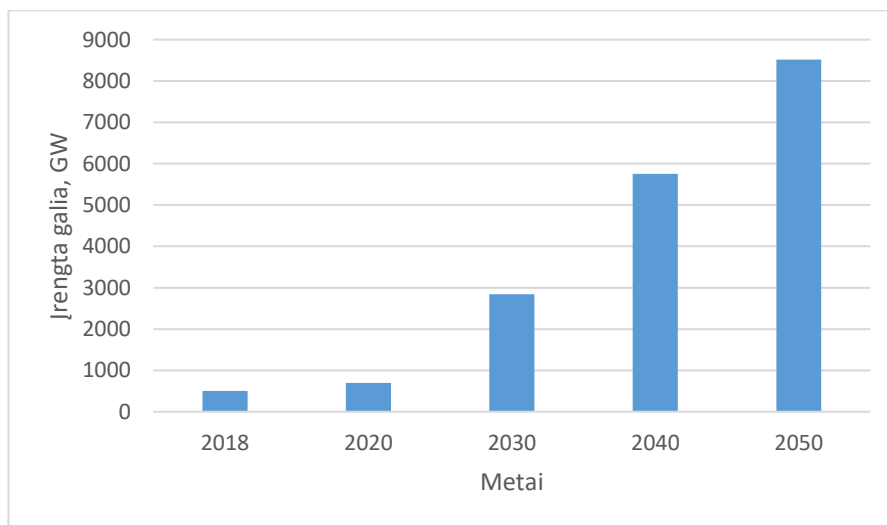
- Galutiniai vartotojai gali sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekį ir padidinti atsinaujinančios energetikos dalį elektros rinkoje tik jeigu pagaminta elektros energija bus atsinaujinanti ir neišmetanti teršalų į aplinką;
- Pati taupiausia priemonė sumažinti ŠESD emisijas Baltijos šalyse, tai sumažinti naftos produktų suvartojimą transporto, pramonės sektoriaus ir pastatų šildymo vartojime ir tai galima pasiekti naudojant atsinaujinančios energetikos priemones, tokias kaip: vėjo jėgainės, biokuro elektrinės, saulės elektrinės, taip pat neefektyvių ir pasenusių šildymo įrenginių keitimas į energetiškai efektyvesnes priemones, tokias kaip šilumos siurbliai;
- Elektros energijos vartojimas didės, dėl didėjančio elektros energijos poreikio ir elektrifikacijos. Didžiausias pakilimas prognozuojamas iš elektromobilių bei didėjančios šilumos siurblių paklausos, bei jų naudojimo namų ūkiuose;
- Atsinaujinanti energetika tampa pigiausiu pasirinkimu statant naujas elektrines ir prognozuojama, kad dėl to sparčiai didės jos dalis energetikos sistemoje;
- Atsinaujinančios energijos dalis Baltijos šalių elektros sistemoje padės sumažinti priklausomybę nuo elektros energijos importo iš kaimyninių šalių.

Atlikus BENTE projekto ataskaitos dalies apžvalgą buvo prieita išvada, kad atsinaujinanti energetika yra viena iš pagrindinių alternatyvų sumažinti ŠESD emisijas ir sumažinti energetinę priklausomybę

nuo kaimyninių šalių, todėl atsinaujinančios energetikos plėtra didės ne vien pasaulyje bet ir Baltijos šalyse, bei taps vienas iš patraukliausių energijos išgavimo būdų.

1.3. Saulės fotovoltinių elektrinių vystymosi apžvalga

Viena iš labiausiai besivystančių ir didžiausią potencialą turinčių atsinaujinančios energijos krypčių yra saulės fotovoltinės elektrinės. 2018 metais pirmą kartą per istoriją, įrengtos fotovoltinės saulės elektrinės perkopė 100 GW galią ir šių metų gale bendra įrengta galia buvo 480 GW [7]. Susidomėjimas saulės fotovoltinėmis elektrinėmis kiekvienais metais vis didėja, nors kol kas dar reikalingos paramos priemonės, kad galėtų konkuruoti su kitomis rinkoje esančiomis elektrinėmis. Tačiau prognozuojamas saulės fotovoltinių elektrinių didelis augimas, dėl pingančių technologijų, krentančios elektros pagaminimo savikainos bei ambicingų siekių sumažinti klimato kaitą. Dėl šių veiksnių prognozuojama, kad iki 2030 metų saulės fotovoltinių elektrinių įrengta galia turėtų padidėti net 6 kartus ir siekti 2840 GW, o 2050 metais pakilti net 18 kartų nuo dabartinio lygio ir siekti 8519 GW galią. Taip pat, 2050 metais šios elektrinės turėtų aplenkti įrengta vėjo elektrinių galią (6044 GW), taip patenkindama 25% visos pasaulio elektros energijos poreikius [7]. Šios prognozės parodo saulės fotovoltinių elektrinių didžiulį potencialą. Taip pat plečiantis šiai sferai bus reikalingas didelis kiekis aukštos kvalifikacijos specialistų, kurie gerai išmanytų saulės fotovoltines sistemas bei kitus su atsinaujinančia energetika susijusius dalykus, todėl saulės elektrinių tematika yra aktuali ir jos aktualumas vis didės. Taigi, šiame baigiamajame darbe buvo pasirinkta išsiaiškinti, kaip reikia tinkamai suprojektuoti saulės fotovoltinę elektrinę parenkant jai optimalų išdėstymą.



1 pav. Saulės fotovoltinių elektrinių įrengtos galios kitimas 2018-2050 metais [7]

1.4. Saulės fotovoltinių elektrinių išdėstymo projektavimo iššūkiai

Šiame darbe buvo iškelta problema, kaip tinkamai išdėstyti saulės elektrinę fiksuoto dydžio sklype, kad tai būtų ekonomiškai optimaliausia. Kaip žinoma, didelės saulės elektrinės yra projektuojamos iš tam tikrų segmentų, tai yra – saulės fotovoltinių modulių konstrukcinių blokų. Šie blokai sustatomi vienas šalia kito sudarydami saulės elektrinės modulių eiles, kurios yra statomos atitinkamu atstumu priklausomai nuo modulio pasvirimo kampo. Tačiau vien šių skaičiavimų neužtenka įvertinti norint nustatyti optimalų išdėstymą, nes didinant tarpus tarp modulių eilių gaunami vis mažesni nuostoliai dėl šešėliavimo, ko pasekoje gaunama, kad geriausia statyti vieną eilę, ant kurios niekada nekris šešėlis. Todėl buvo pasitelkti ekonominiai skaičiavimai, tokie kaip investicijų grąžos bei vidinės

gražos normos rodikliai, kurie įvertina uždirbamas pajamas bei sklypo ir įrengimo kaštus. Tai atlikus galima gauti optimalų saulės fotovoltinių modulių pasvirimo kampą ir atstumą tarp eilių. Taigi, šio darbo pagrindinė mintis nustatyti saulės elektrinės modulių eilių optimalų pasvirimo kampą, bei atstumą tarp jų, pradžioje įvertinant krentančio šešėlio daroma įtaką ir po to gautus rezultatus pritaikyti ekonominiams skaičiavimams. Atlikus daug skirtingų iteracijų buvo gautas optimaliausias reikiamas pasvirimo kampas bei atstumas tarp saulės elektrinės modulių eilių. Visi skaičiavimai ir rezultatai pateikti 2 ir 3 skyriuose.

1.5. Projektuojamos saulės fotovoltinės elektrinės apžvalga

Nustatyti reikiamus parametrus buvo pasirinktas Klaipėdoje esantis sklypas, kuris yra lygiagretainio formos. Projektuojamos saulės elektrinės pasvirimo kampas yra fiksuotas ir visi saulės fotovoltiniai moduliai yra pasukti į Pietus (nėra Saulės sekimo sistemos). Pagrindiniai saulės elektrinės komponentai aprašyti apačioje.

1.5.1. Saulės fotovoltiniai moduliai

Atliekant išdėstymo parametrų nustatymus bei projektuojant elektrinę buvo pasirinkti Solitek Solid Pro 310 kWp saulės fotovoltiniai moduliai. Tai yra Lietuvoje pagaminti bei aukštos kokybės saulės moduliai. Jiems suteikiama net 30 metų 87% galios išlaikymo garantija [16]. Pasirinkti moduliai yra monokristaliniai, nors rinkoje galima rasti tiek modulių su monokristalinėmis celėmis, tiek su polikristalinėmis. Šios celės (moduliai) vienas nuo kito skiriasi [9]:

- Gamybos būdu. Gaminant monokristalinę celę yra naudojamas Czochralskio metodas. Šito metodu yra užauginami silicio cilindriniai luitai ir jie supjaustomi į plonas celes. Tuo tarpu polikristalinės celės yra pagaminamos greičiau ir paprasčiau: išlydomas silicis ir suformuojami kvadratiniai luitai, tada prižiūrint procesą yra atvėsinamas ir sustingdomas silicis, taip gaunami kvadratiniai luitai, kurie po to būna supjaustomi į celes. Tačiau toks būdas padaro celės struktūrą iš daug kristalų, kas pasunkina elektronų judėjimą ir dėl šitos priežasties polikristalinės celės (modulio) efektyvumas yra mažesnis negu monokristalinės;
- Efektyvumas. Dėl anksčiau aprašytų gamybos skirtumų saulės fotovoltiniai moduliai iš monokristalinių celių yra efektyvesni ir gali pasiekti didesnę galią;
- Spalva. Monokristalinės celės yra juodos arba tamsiai mėlynos spalvos, o polikristalinės – mėlynos. Tai lemia struktūriniai skirtumai ir celių apdirbimo būdai;
- Ilgaamžiškumas. Dėl struktūrinių skirtumų monokristalinės celės galios kritimas per metus yra mažesnis negu polikristalinės celės.

Nors saulės moduliai iš polikristalinių celių yra pigesni, tačiau dėl didesnio efektyvumo, didesnės maksimalios galios išgavimo bei lėtesnio galios kritimo, buvo pasirinkti saulės moduliai su monokristalinėmis celėmis.

1.5.2. DC/AC įtampos keitiklių parinkimas

Projektuojant saulės elektrinę buvo pasirinkti ABB PVS-175-TL keitikliai [17]. Šie keitikliai yra ypatingi tuo, kad:

- Turi net 12 nepriklausomų MPPT jungčių, ko pasekoje, galima sumažinti jungiamųjų dėžučių skaičių, bei jungčių;

- Maksimali leistina nuolatinės srovės įtampa net 1500 V, kas leidžia sujungti daugiau saulės fotovoltinių modulių nuosekliai;
- Turi ganėtinai aukštą aplinkos poveikio rodiklį – IP65;
- Ganėtinai aukštas naudingumo koeficientas – net 98%.

1.5.3. Nuolatinės ir kintamos srovės kabelių parinkimas

Nuolatinės srovės kabeliai buvo pasirinkti iš Eland cables kabelių asortimento [18]. Yra naudojami 4mm² skerspjūvio variniai laidininkai, kurie turi PVC izoliaciją ir yra tinkami tiesti po žeme.

Kintamos srovės kabeliai buvo parinkti, taip pat, iš tos pačios firmos tiekiamų produktų sąrašo [19]. Kabeliai naudojami sujungti įtampos keitiklio kintamos srovės pusę su moduline transformatorine. Tam naudojami Cu 3x50mm² skerspjūvio variniai laidininkai, kurie turi PVC izoliaciją ir yra tinkami tiesti po žeme. Kabeliai klojami gofruotuose vamzdžiuose. Kabelių skerspjūvio parinkimo skaičiavimai pateikti 2.1 poskyryje.

1.6. Skaičiavimų atlikimas

Prieš atliekant skaičiavimus buvo išsirinktas sklypas, pagal kurį buvo atliekami skaičiavimai. Su HelioScope programine įranga buvo atlikti saulės fotovoltinių modulių tarp eilių susidarančio tarpo keitimas ir telpančios elektrinės galios sklype nustatymas, kuris bus reikalingas tolimesniems skaičiavimams.

1 lentelė. Saulės elektrinės dydžio priklausomybė nuo atstumo tarp saulės modulių eilių

Atstumas tarp saulės fotovoltinių modulių eilių vidurio, m	Saulės fotovoltinių modulių skaičius, vnt.	Saulės elektrinės galia, kWp	Susidarius modulių eilės, vnt.
5	9932	3078.92	48
7	7020	2176.20	34
8	6188	1918.28	30
9	5356	1660.36	26
9.5	5148	1595.88	25
10	4940	1531.40	24
10.5	4524	1402.44	22
11	4316	1337.96	21
12	4108	1273.48	20
15	3276	1015.56	16
18	2652	822.12	13
25	1820	564.2	9
30	1612	499.72	8

Skaičiavimai atliekami kiekvienai metų valandai, keičiant modulių pasvirimo kampą nuo 0 iki 90 laipsnių ir keičiant atstumą tarp saulės modulių eilių, taip susidaro sudėtingi ir kompleksiniai skaičiavimai. Todėl skaičiavimai atlikti MATLAB programine įranga. Visa skaičiavimų metodika pateikta antrame ir trečiame skyriuje.

2. Technologiniai skaičiavimai

Šiame skyriuje yra pateikti modulių jungimo, kabelių parinkimo, apšvietos, elektros energijos generacijos, temperatūros, senėjimo, šešėliavimo nuostolių skaičiavimai, kurie yra reikalingi skaičiuojant optimalų išdėstymą sklype. Pirmas etapas – tai saulės elektrinės bloko sudarymas:

Prenkami 1.5.1 skyrelyje aprašyti saulės fotovoltiniai moduliai. Šių saulės modulių pagrindiniai reikalingi parametrai iš techninės specifikacijos [16]:

- Maksimali įtampa (U_{mPV}) – 33.48 V;
- Maksimali srovė (I_{mPV}) – 9.31 A;
- Maksimali sistemos įtampa nuolatinės srovės pusėje (U_{mSPV}) – 1500 V;
- Įtampos temperatūros koeficientas (μ) – 0.35 %/°C;
- Galios temperatūros koeficientas (β_{galia}) – 0.47 %/°C.

Saulės fotovoltinių modulių jungimas nuosekliai ir lygiagrečiai yra parenkamas pagal saulės modulio bei keitiklio parametrus. Pasirinktas keitiklis aprašytas 1.5.2 skyrelyje ir jo pagrindiniai reikalingi parametrai pateikti apačioje techninėje specifikacijoje [17].

- Maksimali įtampa nuolatinės srovės pusėje (U_{mK}) – 1500V;
- Pradinė (keitiklio įsijungimo) įtampa (U_{min}) – 750 V;
- MPPT skaičius – 12 vnt.;
- Maksimali srovė vienam MPPT (I_{mMPPT}) – 22 A;
- Maksimali įtampa vienam MPPT (U_{max}) – 1350 V;
- Maksimali galia nuolatinės srovės pusėje prie 30°C išorės temperatūros (P_{max}) – 188000 W.

Žinant parametrus galima atlikti modulių jungimo skaičiavimus. Viena nuosekliai jungiamų modulių grupė sudaro 26 saulės fotovoltiniai moduliai, patikrinama ar neviršijami leistini parametrai:

$$U_n = U_{mPV} \cdot N_{mod} = 33.48 \cdot 26 = 870.48 \text{ V}; \quad (1)$$

$$750 \text{ V} < 870.48 \text{ V} < 1350 \text{ V};$$

Čia:

N_{mod} – nuosekliai jungiamų modulių skaičius, vnt.

Gauta įtampos vertė tenkina įtampos keitiklio darbinio režimo ribas, tačiau šita vertė yra prie standartinių testavimo sąlygų. Reikia patikrinti ar keičiantis temperatūrai darbinė įtampa tenkina keitiklio darbinės įtampos ribas. Tam bus naudojamas įtampos temperatūros koeficientas, kuris parodo kaip temperatūrai keičiantis vienam laipsniui sumažėja/padidėja įtampa. Apačioje pateiktoje formulėje apskaičiuojama susidariusių įtampos pokyčių santykinė dalis lyginant su standartinėmis testavimo sąlygomis:

$$\eta_{TU} = \left\{ 1 - \mu \left[T_{lauko} - T_0 + (T_{NOCT} - T_{lauko}) \frac{G}{G_{NOCT}} \right] \right\}; \quad (2)$$

Čia:

η_{TU} – santykinė įtampos pokyčių dalis lyginant su standartinėmis testavimo sąlygomis;

μ – įtampos temperatūros koeficientas, 0.35 %/°C;

T_{lauko} – išorės temperatūra, °C ;

T_0 – standartinių testavimų celės temperatūra 25 °C;

T_{NOCT} – nominali darbinė modulio temperatūra (NOCT), 46°C ;

G – saulės apšvieta, W/m²;

G_{NOCT} – nominali darbinė modulio apšvieta, $\frac{800W}{m^2}$.

Pasinaudojant 2 formule apskaičiuojami įtampos pokyčiai dėl temperatūros pakitimų ir gautus santykinius pokyčius, prie +30°C ir -20°C išorės temperatūros, padauginame iš nominalios sujungtos grupės įtampos, taip gaudami pakitusios įtampos reikšmes:

$$\eta_{30U} = 0.9125;$$

$$U_{n30} = U_n \cdot \eta_{30U} = 870.48 \cdot 0.9125 = 794.31 V;$$

$$\eta_{-20U} = 1.1313;$$

$$U_{n-20} = U_n \cdot \eta_{-20U} = 870.48 \cdot 1.1313 = 984.77 V;$$

Čia:

U_{n30} – sujungtos grupės įtampa, kai išorės temperatūra 30°C, V;

U_{n-20} – sujungtos grupės įtampa, kai išorės temperatūra – 20°C, V;

η_{30U} – santykinis įtampos pokytis ties 30°C;

η_{-20U} – santykinis įtampos pokytis ties – 20°C.

Atlikus skaičiavimus gauta, kad įtampos keitiklio ribos (750V<794.31V<1350V, 750V<984.77V<1350V) nėra viršijamos ir toks jungimas nuosekliai yra tinkamas.

Blokas sudaromas sujungiant dvi grupes lygiagrečiai. Kai sujungiama lygiagrečiai, grupių srovės susideda, o jeigu vienodos grupės, vienos grupės srovė padauginama iš lygiagrečiai sujungiamų grupių skaičiaus. Šiame projekte vienas blokas susideda iš 2 lygiagrečiai sujungtų grupių. Grupės sujungiamos panaudojant kontaktines jungimo dėžutes.

$$I_n = I_{mPV} \cdot N_{grup} = 9.31 \cdot 2 = 18.62 A; \quad (3)$$

Čia:

I_n – saulės modulių bloko srovė, A;

N_{grup} – grupių skaičius, vnt.

Atlikus skaičiavimus gauta, kad blokas sudarytas iš 52 saulės fotovoltinių modulių, kur 26 moduliai jungiami nuosekliai ir gauta grupė sujungiama lygiagrečiai su kita tokia pačia grupe, yra parinktas teisingai, nes įtampa tenkina keitiklio darbinės įtampos ribas, o srovė neviršija leistinų normų (18.62A<22A).

Apskaičiuojama vieno saulės fotovoltinio modulio bloko galia prie standartinių testavimo sąlygų:

$$P_{bloko} = U_n \cdot I_n = 870.48 \cdot 18.62 = 16208.34 \text{ W}; \quad (4)$$

Kadangi keitiklio techninėje specifikacijoje nėra pateikta koks maksimalus galimas apkrovimas prie standartinių testavimo sąlygų, o pateiktas tik leistinas apkrovimas, kai yra 30°C išorės temperatūra, būtina perskaičiuoti galios kritimą prie tokios temperatūros pasinaudojus 2 formule. Pakeitus vietoj įtampos temperatūros koeficiento (μ) į galios temperatūros koeficientą (β_{galia}) galima apskaičiuoti galios nuostolius temperatūrai pakilus:

$$\eta_{TU} = \left\{ 1 - \beta_{galia} \left[T_{lauko} - T_0 + (T_{NOCT} - T_{lauko}) \frac{G}{G_{NOCT}} \right] \right\}; \quad (5)$$

$$\eta_{30P} = 0.8825;$$

Gavus galios nuostolius prie 30°C aplinkos temperatūros galima įvertinti galios kritimą bloke:

$$P'_{bloko} = P_{bloko} \cdot \eta_{30} = 16208.34 \cdot 0.8825 = 14303.86 \text{ W}; \quad (6)$$

Pasirinktas keitiklis turi 12 nepriklausomų MPPT, tai reiškia, kad bus sujungiami 12 blokų į keitiklį. Paskaičiuojama į keitiklį sujungta galia prie 30°C aplinkos temperatūros ir palyginama su techninėje specifikacijoje pateikta maksimalia apkrova.

$$P'_{keit} = P'_{bloko} \cdot N_{MPPT} = 14303.86 \cdot 12 = 171646.32 \text{ W}; \quad (7)$$

$$171646.32 \text{ W} < 188000 \text{ W};$$

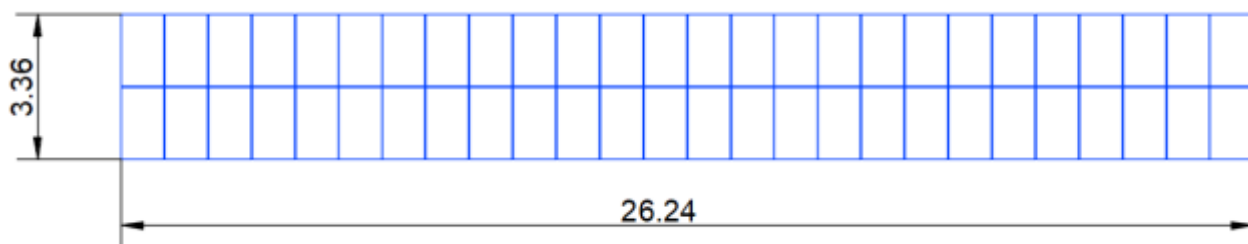
Čia:

N_{MPPT} – nepriklausomų MPPT skaičius, vnt.

Atlikus skaičiavimus gauta, kad prijungiant 12 blokų su 16208.34 W standartinių sąlygų galia taip pat perskaičiavus šią galią prie 30°C aplinkos temperatūros, keitiklio leistina prijungimo galia nuolatinės srovės pusėje nėra viršijama ir toks jungimas galimas.

Saulės fotovoltiniai moduliai bloke dedami dvejomis eilėmis stačiai. Naudojamo saulės modulio ilgis yra 1.67 m, o plotis 0.99 m. Tarp saulės modulių bloke daromi 2 cm tarpeliai, kad nepasižeistų saulės moduliai, dėl konstrukcijų galimo judėjimo žiemos metu. Tai įvertinus gaunami reikalingi parametrai tolimesniems skaičiavimams:

- Saulės modulių bloko ilgis (L) – 26.24 m;
- Saulės modulių bloko aukštis (l) – 3.36 m.



2 pav. Saulės elektrinės blokas

Detalesnis elektrinės jungimas pateiktas prieduose esančiame brėžinyje BD_SB1.

2.1. Saulės elektrinės kabelių parinkimas ir juose susidarančių nuostolių skaičiavimas

Projektuojamoje saulės elektrinėje yra 2 tipų kabeliai:

- DC pusėje esantys kabeliai einantys nuo fotovoltinių saulės modulių blokų iki keitiklio;
- AC pusėje esantys kabeliai einantys nuo keitiklio iki modulinės transformatorinės.

2.1 poskyryje buvo apskaičiuota nominali srovė tekanti iš saulės elektrinės bloko ir ji lygi 18.62 A. Kabelių skerspjūviai yra parenkami, kad tenkintu maksimalias leidžiamas srovės vertes iš techninės specifikacijos. Parenkamas Cu 1x4mm² kabelis, kurio leistina srovė yra 55A. Palyginus leidžiamą srovės dydį su nominaliu srovės dydžiu gauta, kad sąlyga tenkinama ir tokio skerspjūvio kabelis yra tinkamas.

Apskaičiuojami įtampos ir galios nuostoliai nuolatinės srovės pusės kabeliams. Tai atlikti naudojamos tokios formulės:

$$\Delta U = \frac{R_{0DC} \cdot L_{kab} \cdot I_N}{1000}; \quad (8)$$

Čia:

R_{0DC} – DC kabelio varža, Ω/km ;

L_{kab} – kabelio ilgis, m;

I_N – nominali srovė išeinanti iš bloko, A.

Apskaičiuojama susidariusi kabelių nuostolių procentinė dalis:

$$\Delta U_{\%} = \frac{\Delta U}{U_N}; \quad (9)$$

Apskaičiuojami DC dalies galios nuostoliai:

$$\Delta P = \frac{R_{0DC} \cdot L_{kab} \cdot I_N^2}{1000}; \quad (10)$$

Analogiškai apskaičiuojami galios nuostolių procentinė dalis:

$$\Delta P_{\%} = \frac{\Delta P}{P_N}; \quad (11)$$

Visi rezultatai pateikti skaičiuojamojoje schemoje BD_SB2.

Parenkami AC dalies kabeliai ir paskaičiuojami įtampos nuostoliai. Nustatoma kintamos srovės dalies nominali srovė:

$$I_{NAC} = \frac{P_{keitAC}}{\sqrt{3} \cdot U_{NAC}}; \quad (12)$$

$$I_{NAC} = \frac{185000}{\sqrt{3} \cdot 800} = 133.52A;$$

Čia:

P_{keitAC} – maksimali išeinanti iš keitiklio galia, W;

U_{NAC} – nominali iš keitiklio išeinanti įtampa, V.

Parenkamas Cu 3x50mm² kabelis ir tikrinama ar tenkinama leistina srovių norma. Tokio laidininko skerspjūvio leistina srovė klojant žemėje yra 190A. Sulyginus nominalią kintamos srovės pusėje esančia srovę ir leistiną pagal kabelio techninę specifikaciją buvo gauta, kad kabelis parinktas teisingai.

Paskaičiuojami kabelyje susidarę įtampos nuostoliai. Priimama, kad galios faktorius cosφ yra 1, nes keitiklio techninėje specifikacijoje nurodyta, kad prie nominalios apkrovos galios faktorius yra didesnis negu 0.995. Dėl šito supaprastėja įtampos skaičiavimo formulė ir tampa tokia:

$$\Delta U_{AC} = \frac{R_{0AC} \cdot L_{kab} \cdot P_{keitAC}}{1000 \cdot U_{NAC}}; \quad (13)$$

Čia:

R_{0AC} – AC kabelio varža.

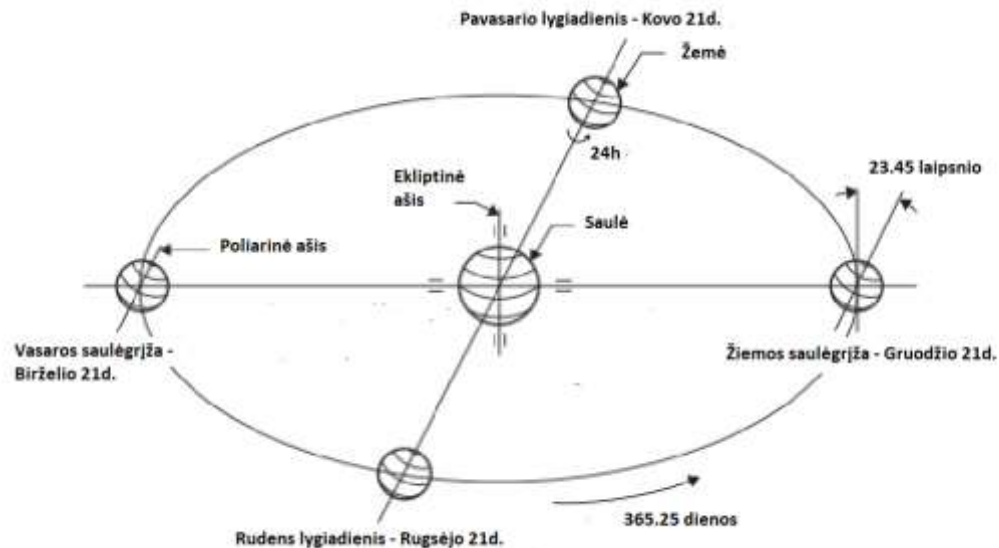
$$\Delta U_{AC\%} = \frac{\Delta U_{AC}}{U_{NAC}}; \quad (14)$$

Visi skaičiavimų rezultatai ir AC dalies kabelių parinkimai pateikti skaičiuojamoje schemoje BD_SB3.

2.2. Saulės deklinacijos kampas

Atlikti skaičiavimai ir naudojama metodika 2.2-2.2.4 ir 2.6-2.7 skyreliuose buvo paimta iš Heinrich Haberlis knygos „Photovoltaics System Design and Practice“ [3].

Žemės sukimosi ašis yra visada pasvirusi 23.45° kampu nuo ekliptinės ašies, kuri yra ekliptinės plokštumos normalė. Ekliptinė plokštuma - tai Žemės skriejimo aplink Saulę plokštuma. Kai Žemė sukasi aplink saulę, jos poliarinė ašis sukasi atitinkamai kiekvienu metų laiku. Grafinis atvaizdavimas pateiktas 3 pav.



3 pav. Žemės skriejimo ir pasvirimo apie Saulę grafikas [3]

Saulės deklinacijos kampas – tai kampas tarp saulės spindulių ir ekvatoriaus plokštumos. Jis susidaro todėl, kad Žemė yra pasvirusi 23.45° kampui ir gali kisti nuo $+23.45^\circ$ iki -23.45° . Vasaros saulėgrįža ji būna $+23.45^\circ$, Rudens ir Pavasario lygiadieniais 0° , o Žiemos saulėgrįža -23.45° . Saulės deklinacija kiekvienai metų dienai gali būti apskaičiuota pagal formulę:

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + N) \right]; \quad (15)$$

Čia:

δ – saulės deklinacija, $^\circ$;

N – metų dienos skaičius (Sausio 1d. yra 1, Gruodžio 31d. yra 365).

Šitas dydis yra svarbus įvertinant saulės spindulių kritimą į plokštumą ir skaičiuojant saulės modulių generuojamą energiją kiekvienai metų dienai bei valandai.

2.2.1. Valandinis kampas

Priimta, kad Žemė aplink savo ašį apsisuka per 24 valandas arba 1440 minučių [10]. Padalinus minučių skaičių per vieną apsisukimą iš 360° gaunama, kad vienas Žemės rutulio pasisukimo laipsnis aplink ašį atitinka 4 minutes. Taigi, valandinis kampas (h) – tai Žemės rutulio apsisukimo laikas minutėmis paverstas į laipsnius. Skaičiuojant reikia atsižvelgti į laiką: po pietų esančios valandos iki vidurnakčio turi teigiamą reikšmę, o nuo vidurnakčio iki pietų – neigiamą reikšmę. Šis dydis gaunamas pagal tokią formulę:

$$h = 0.25 \cdot \text{min}; \quad (16)$$

Čia:

min – minutės nuo 12:00. Pvz., 13:00 yra 60 min, 10:00 yra – 120 min.

Šis kampas yra svarbus ir reikalingas nustatant saulės poziciją dienos metu. Remiantis saulės pozicija yra apskaičiuojamas generuojamos elektros energijos kiekis saulės elektrinei kiekvienai valandai.

2.2.2. Saulės pakilimo ir azimuto kampai

Saulės pakilimo kampas (α) – tai toks kampas, kuris susidaro tarp pakilusios saulės skleidžiamų spindulių srauto ir horizontalaus žemės paviršiaus plokštumos. Kiekvienai metų dienai ir valandai ši kampą gauti galima su formule:

$$\alpha = \sin^{-1}(\sin(L)\sin(\delta) + \cos(L)\cos(\delta)\cos(h)); \quad (17)$$

Čia:

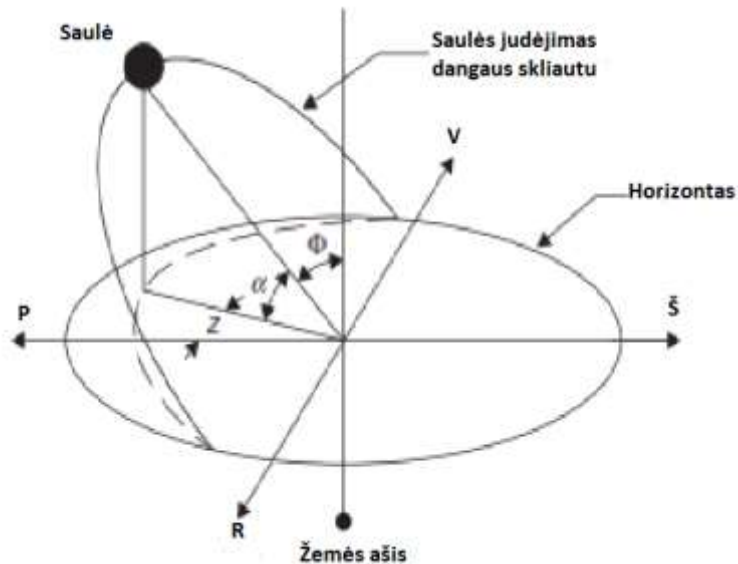
α – Saulės pakilimo kampas, °;

L – Platuma, °;

δ – Saulės deklinacija, °;

h – Valandinis kampas, °.

Saulės azimuto kampas (z) – tai kampas, kuris susidaro saulės spinduliams nukrypus nuo Pietų krypties į Rytus arba Vakarus vertinant ant horizontalios plokštumos. Šie kampai pateikti paveikslėlyje esančiame žemiau.



4 pav. Saulės judėjimo dangaus skliautu grafinis atvaizdavimas [3]

Saulės azimuto kampas apskaičiuotas pagal formulę:

$$z = \sin^{-1} \left[\frac{\cos(\delta)\sin(h)}{\cos(\alpha)} \right]; \quad (18)$$

Čia:

z – saulės azimuto kampas, °;

δ – Saulės deklinacijos kampas, °;

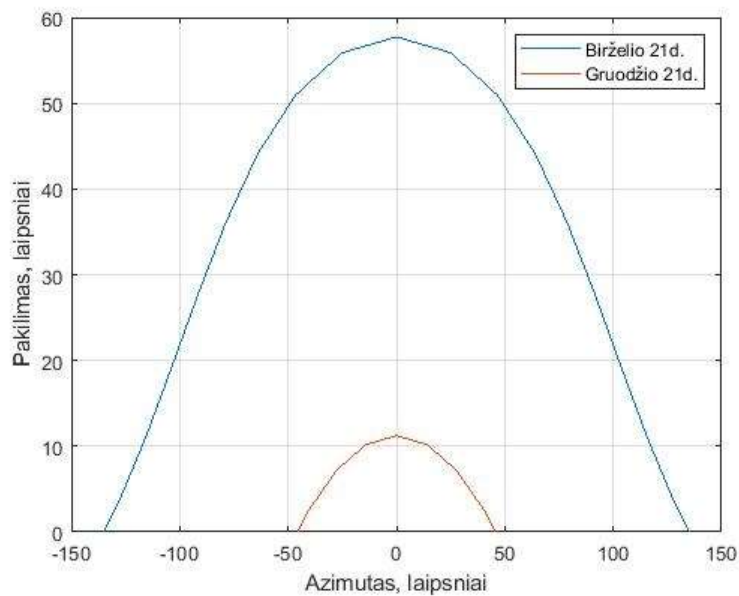
α – Saulės pakilimo kampas, °;

h – Valandinis kampas, °.

Ši formulė yra teisinga, kai $\cos(h) > \frac{\tan \delta}{\tan L}$, jei ši sąlyga yra netenkinama, tokiu atveju saulė yra už Rytų – Vakarų juostos ir yra reikalingos tam tikros korekcijos:

- Kai saulė yra Rytų pusėje $z_{pataisyta} = -\pi + |z|$;
- Kai saulė yra Vakarų pusėje $z_{pataisyta} = \pi - z$.

Pasinaudojus šiomis formulėmis galima nusipiešti saulės pakilimo nuo azimuto priklausomybę ir palyginti gautus rezultatus su programinės įrangos rezultatais. Apačioje pateiktas grafikas, kur parodytas Birželio 21 dienos ir Gruodžio 21 dienos rezultatų palyginimas. Šios dienos buvo pasirinktos, nes tai yra ekstremumų dienos – kai saulės kelias dangaus skliautu yra ilgiausias ir trumpiausias. Skaičiavimai atlikti projektuojamo sklypo vietoje. Gauti duomenys naudojami tolimesnėms skaičiavimams.



5 pav. Rezultatai MATLAB programinėje įrangoje

Atlikus palyginimą su gerai žinomos programinės įrangos PVsyst gautu grafiku, rezultatai sutapo, todėl galima daryti išvadą, kad skaičiavimai atlikti teisingai.

2.2.3. Saulės spindulių kritimo kampas

Saulės spindulių kritimo kampas – tai kampas tarp krentančių ant plokštumos spindulių ir plokštumos paviršiaus normalės. Naudojant bendrą šio kampo išraišką galima įvertinti tokius parametrus: modulių pasvirimo kampą, projektuojamą vietovę – platumą, modulių pasukimą į rytus arba vakarus. Bendra šio kampo išraiškos formulė:

$$\theta = \cos^{-1} \left[\frac{\sin(L)\sin(\delta)\cos(\beta) - \cos(L)\sin(\delta)\sin(\beta)\cos(z) + \cos(L)\cos(\delta)\cos(h)\cos(\beta) + \sin(L)\cos(\delta)\cos(h)\sin(\beta)\cos(z)}{\cos(\delta)\sin(h)\sin(\beta)\sin(z)} \right]; \quad (19)$$

Čia:

β – saulės modulių pasvirimo kampas tarp saulės modulių ir horizontalio plokštumos, °;
 θ – saulės spindulių kritimo kampas, °.

Ši saulės spindulių kritimo formulės forma tinkama visiems nejudinamiems plokštėms paviršiams.

2.2.4. Tiesioginių saulės spindulių pasvirimo faktorius

Tiesioginių saulės spindulių pasvirimo faktorius (R_B) – tai santykis tarp tiesioginių saulės spindulių krentančių ant horizontalios plokštumos ir pasvirusios plokštumos, horizontalios plokštumos atžvilgiu. Gaunami duomenys iš duomenų bazių [20], tokie kaip apšvieta, yra pateikti horizontaliam paviršiui, todėl šis santykis yra reikalingas perskaičiuojant saulės apšvietą pasvirusiam arba pakreiptam paviršiui. Šis faktorius yra gaunamas taip:

$$G_{Bt} = G_{Bn} \cos(\theta); \quad (20)$$

$$G_B = G_{Bn} \cos(\phi); \quad (21)$$

$$\cos(\phi) = \sin(\alpha); \quad (22)$$

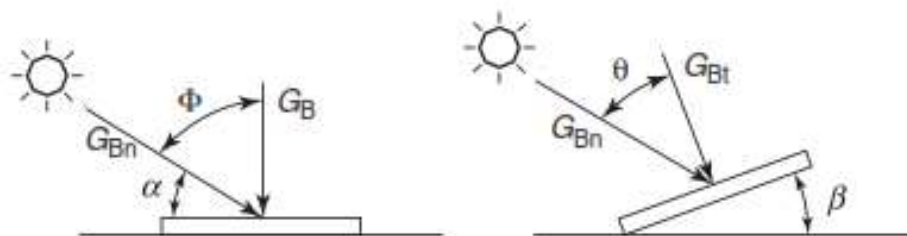
$$R_B = \frac{G_{Bt}}{G_B} = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\phi)} = \frac{\cos(\theta)}{\sin(\alpha)}; \quad (23)$$

Čia:

G_{Bn} – tiesioginė saulės apšvieta, W/m^2 ;

G_{Bt} – pasvirusios plokštumos normalės saulės apšvieta, W/m^2 ;

G_B – horizontalios plokštumos normalės saulės apšvieta, W/m^2 .



6 pav. Tiesioginiai saulės spinduliai horizontaliame ir pasvirusiame paviršiuje [3]

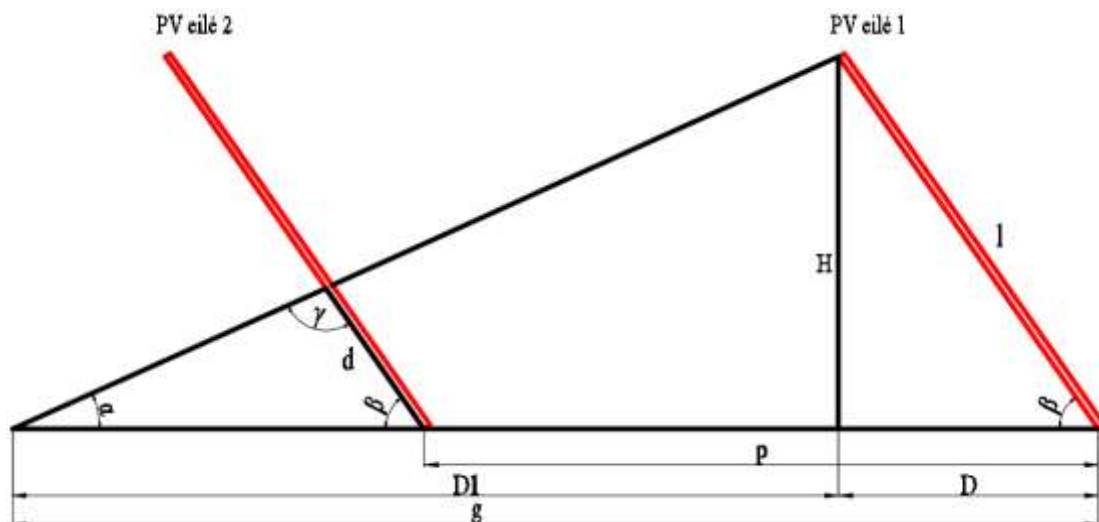
Gaunama, kad tiesioginių saulės spindulių pasvirimo faktorius yra lygus kosinuso saulės spindulių pasvirimo kampo ir sinuso saulės pakilimo kampo santykiui.

2.3. Saulės fotovoltinių modulių eilių šešėliuojamo ploto skaičiavimas

Saulės elektrinės yra sudarytos iš daugelio saulės modulių, kurie yra sudedami į konstrukcijas ir išdėstomi tinkama tvarka pasirinktoje teritorijoje. Kadangi modulių yra naudojama daug ir jie yra pasvirę nustatytu kampu, saulei tekant iš Rytų į Vakarus ir kylant aukštyrą ir žemyn susidaro šešėlis. Kadangi didelės saulės elektrinės sudaro daug modulių blokų ir eilių, susidaro nuostoliai dėl šešėliavimo. Norint išvengti šitų nuostolių, arba juos sumažinti iki nereikšmingos vertės, reikia technologiškai ir ekonomiškai teisingai išdėstyti saulės modulių eiles. Pagrindinis technologinis parametras, kuriuo remiamasi išdėstant saulės elektrinę, yra šešėliuojamo ploto susidarymas. Taikant trigonometriją buvo sudaryti krentančio šešėlio ploto ant saulės elektrinių skaičiavimai, kurie tinkami daugumai fiksuoto pasvirimo elektrinių.

2.3.1. Šešėlio aukščio ant modulių eilės skaičiavimas

Šioje dalyje yra įvertinama krentančio ant modulio šešėlio aukštis, kuris susidaro saulei tekant aukštyn ir žemyn. Raudonai yra žymimi saulės fotovoltinių modulių eilės ir jų aukštis l . Žemiau pateikta skaičiavimo schema ir išvedimas:



7 pav. Šešėlio krentančio ant fotovoltinio modulio aukščio skaičiavimo schema

Pasinaudodami stataus trikampio savybėmis ir trigonometrija yra randama saulės modulių eilės projekciją į žemės plokštumą (D):

$$D = l * \cos(\beta); \quad (24)$$

Čia:

l – modulio eilės aukštis, m.

Randama saulės modulių eilės aukštinė (H), išeinanti iš eilės viršaus:

$$H = l * \sin(\beta); \quad (25)$$

Randamas šešėlio ilgis (g), krentantis ant žemės plokštumos:

$$g = D1 + D = \frac{H}{\tan \alpha} + D; \quad (26)$$

Žinoma, kad trikampio kampų suma yra lygi 180° , tad gaunam kampas γ :

$$\gamma = 180^\circ - \alpha - \beta; \quad (27)$$

Pasinaudojus Sinusų teorema, gaunamas šešėlio aukštis krentantis ant antros saulės fotovoltinių modulių eilės:

$$\frac{(g - p)}{\sin \gamma} = \frac{d}{\sin \alpha}; \quad (28)$$

$$d = \frac{(g - p) * \sin \alpha}{\sin \gamma}; \quad (29)$$

Čia:

p – Atstumas tarp saulės modulių eilių, m.

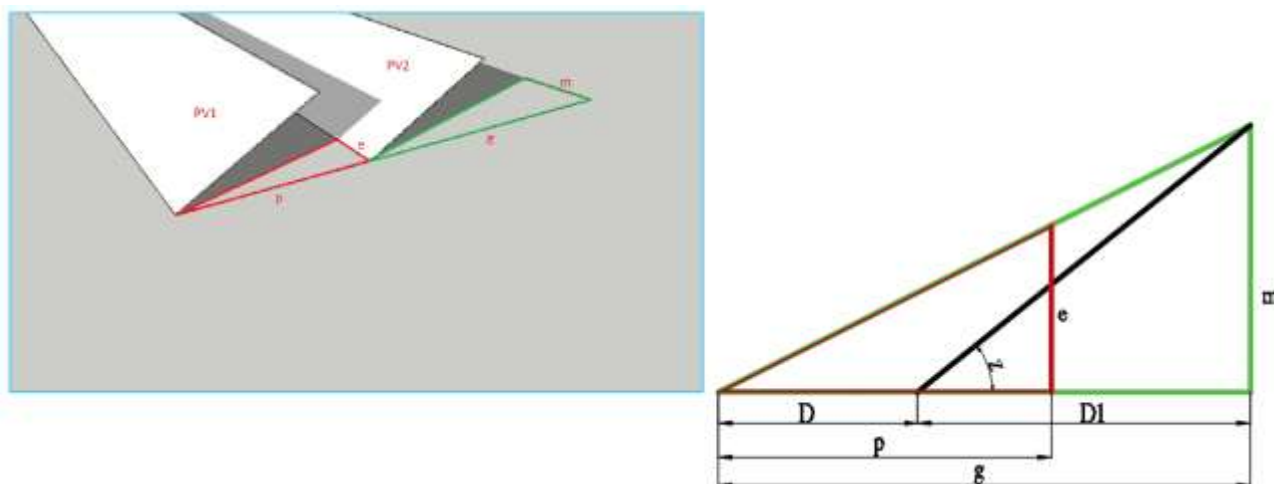
Šios formulės tinkamos, kai $0 < d < l$. Kitais atvejais:

- Kai $d \leq 0$, tai $d = 0$;
- Kai $d \geq l$, tai $d = l$.

Skaiciuojant nebuvo vertinamas saulės modulių storis ir tarpai tarp sumontuotų modulių, nes jie yra labai maži ir nesudaro didelės reikšmės rezultatuose.

2.3.2. Šešėlio pločio ant modulių eilės skaičiavimas

Įvertinti vien tik krentančio šešėlio aukštį ant modulių eilės nepakanka, nes Saulė dangaus skliautu juda ne vien tik aukštyn žemyn, bet ir į Vakarų ir Rytus. Saulei judant dangaus skliautu iš Rytų į Vakarų krentantis ant fotovoltinių modulių šešėlis juda ir jo plotas kinta. Norint tiksliai įvertinti krentančio šešėlio plotą reikia įvertinti šešėlio plotą. Jo apskaičiavimo metodika ir schemos pateiktos apačioje.



8 pav. Šešėlio pločio skaičiavimo schema. Dešinėje projekcija į žemės plokštumą iš viršaus.

Viršuje pateiktame paveikslėlyje yra pateiktas krentančio šešėlio pločio susidarymo schema. Šiame paveikslėlyje raudonai ir žaliai žymimi trikampiai yra panašieji. Žaliojo trikampio kraštinė „m“ yra susidaręs šešėlio poslinkis ant žemės plokštumos neužstojant jokiui objektui, tačiau reikalinga raudonojo trikampio kraštinė „e“, kuri yra atitinkamai mažesnė nei kraštinė „m“, nes šešėlį užstoja antra elektrinės eilė. Pasinaudojus Talio teorema, kuris teigia: tiesė, lygiagreti trikampio kraštinei ir kertanti kitas dvi kraštines, atkerta nuo jo trikampį, kurio kraštinių proporcingos duotojo trikampio kraštinėms, sudaromas proporcingų kraštinių santykiai:

$$\frac{e}{m} = \frac{p}{g}; \quad (30)$$

Čia:

e – šešėlio poslinkis ant modulių eilės, m;
 m – šešėlio poslinkis ant žemės plokštumos, m.

Iš santykio išsireiškiamas šešėlio poslinkis ant modulių eilės (e):

$$e = \left\lfloor \frac{p * m}{g} \right\rfloor, \text{ kai } e \geq L, \text{ tai } e = L; \quad (31)$$

Čia:

L – fotomodulių eilės ilgis, m.

Apskaičiuojamas šešėlio poslinkis ant žemės plokštumos

$$m = (g - D) * \tan z; \quad (32)$$

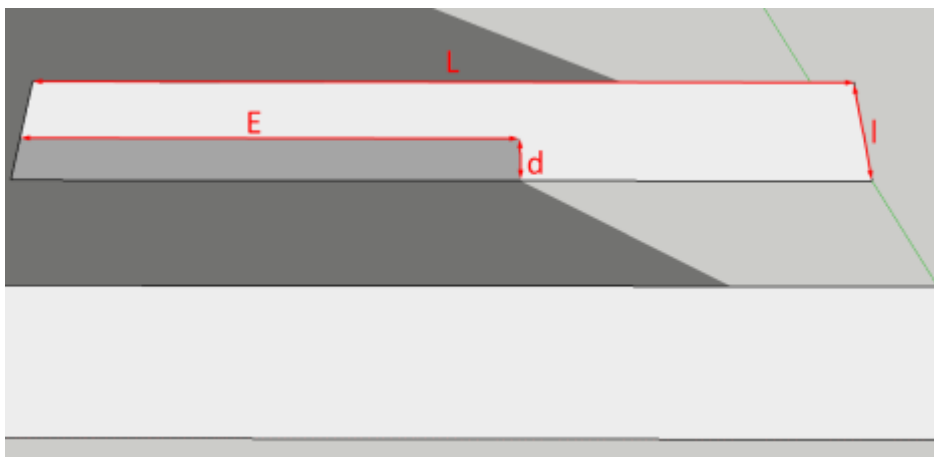
Gaunamas šešėlio pločio ant modulių eilės išraiška:

$$E = L - e; \quad (33)$$

Visi atstumai matuojami metrais, o kampai laipsniais. Šios formulų išraiškos tinkamos tiek saulei tekant iš Rytų į Pietus, tiek iš Pietų į Vakarų, dėl to šešėlio poslinkis 31 formulėje vertinamas modulių.

2.3.3. Šešėlio ploto ant modulių eilės skaičiavimas

Visos fotovoltinių modulių eilės yra projektuojamos vienodu pasvirimo kampu, todėl gaunasi lygiagrečios plokštumos. Susidariusi šešėlio forma ant modulių eilės, tarp dviejų lygiagrečių plokštumų, yra stačiakampio formos. Tai galima nesunkiai pamatyti pasistačius dvi lygiagrečias plokštumas prieš šviesos šaltinį, arba naudojant Sketchup programinę įrangą.



9 pav. Užimamo šešėlio ploto ant modulių eilės Sketchup vizualizacija

Taigi, šešėlio užimamo ploto formulė yra tokia:

$$S_{\text{šešėlis}} = E * d; \quad (34)$$

Tačiau daug svarbesnis yra nešešėliuojamo ploto santykis su visu plotu :

$$\eta_{nešešėlis} = \frac{S - S_{šešėlis}}{S} = \frac{L * l - E * d}{L * l}; \quad (35)$$

Gautas santykis yra svarbus vertinant optimalų elektrinės išdėstymą. Tai pagrindinis rodiklis sprendžiant atstumo tarp eilių ir modulių pasvirimo kampo technologinį parinkimą.

2.3.4. Šešėlio ploto ant modulių eilės skaičiavimo pritaikymas ant projektuojamo sklypo

Projektuojamos saulės elektrinės sklypas nėra lygus kvadratas ar stačiakampis, jo forma primena rombą, todėl yra būtina šešėlio skaičiavimus pritaikyti esamam sklypui.



10 pav. Sklypo situacija su išdėstyta saulės elektrine

Kadangi sklypo forma yra lygiagretainis, tai reikia koreguoti šešėlio pločio dydį. Jį pakoreguoti galima taip:

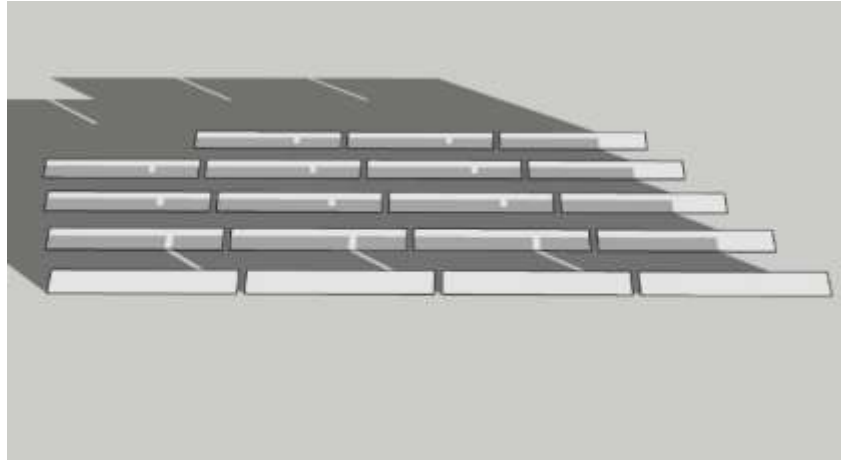
- Kai saulė teka iš Rytų į Pietus (rytinėmis valandomis), $E_{koreguotas} = E + l_{poslinkis}$;
- Kai saulė teka nuo Pietų į Vakarus (vakarinėmis valandomis), $E_{koreguotas} = E - l_{poslinkis}$;

Čia:

$l_{poslinkis}$ – tai sekančios eilės poslinkis į Vakarus, lyginant su prieš tai esančia eile, m.

Taip pat, kiekviena eilė yra sudaryta iš 4 blokų kurie yra atskirti 60cm tarpeliais, dėl kurių šešėlio ploto skaičiavimas taip pat apsunkėja ir turi būti pakoreguotas. Nagrinėjamame sklype yra 4 skirtingi eilių šešėliavimo atvejai:

- Priekinė modulių eilė – tai eilė, kur nekrenta šešėlis nuo kitų eilių (pašaliniai šešėliavimai tokie kaip : medžiai, nėra vertinami);
- Antra modulių eilė – tai eilė, kur krenta šešėlis nuo pirmos eilės;
- Trečia ir kitos modulių eilės (išskyrus paskutinę) – tai eilės, kur krenta šešėlis nuo prieš tai esančių dviejų eilių;
- Paskutinė eilė – tai eilė, mažesnė negu kitos, nes sklypo kampe planuojama modulinė transformatorinė.



11 pav. Projektuojamos saulės elektrinės šešėlio susidarymo vizualizacija Sketchup programinėje įrangoje

Kadangi kiekvienos eilės šešėlio plotas yra skirtingas, reikia pakoreguoti nešešėliuojamo ploto santyki su visu plotu kiekvienam skirtingam atvejui, apačioje pateikiami šio santykio pritaikymas kiekvienam eilių tipui:

Pirma eilė yra nešešėliuojama kitų eilių, todėl gauname:

$$\eta_{1nešešėlis} = \frac{S - S_{1šešėlis}}{S} = \frac{L * l - 0}{L * l} = \frac{L * l}{L * l} = 1; \quad (36)$$

Antra eilė yra šešėliuojama tik pirmos eilės, todėl gauname:

$$\eta_{2nešešėlis} = \frac{S - S_{2šešėlis}}{S} = \frac{(4 * L * l) - (E * d + 3 * (E * d - l_{tarpelis} * d))}{(4 * L * l)}; \quad (37)$$

Čia:

$l_{tarpelis}$ – tai tarpas tarp eilėse esančių modulių blokų, m (šiuo atveju 0.6m).

Trečia ir kitos eilės išskyrus paskutinę eilę yra labai panašios į antrą, tik reikia įvertinti, kad nešešėliuojama vieta dėl esančio tarpelio tarp eilių blokų yra mažesnė negu antros eilės, nes yra užstojami saulės apšvieta antros eilės, tai galime pamatyti 11 paveikslėlyje.

$$\eta_{3nešešėlis} = \frac{S - S_{3šešėlis}}{S} = \frac{(4 * L * l) - (E * d + 3 * (E * d - l_{tarpelis} * (d - d_2)))}{(4 * L * l)}; \quad (38)$$

$$d_2 = \frac{(g - 2 * p) * \sin \alpha}{\sin \gamma}, \text{ jei } d_2 < 0, \text{ tada } d_2 = 0; \quad (39)$$

Paskutinė eilė yra panaši į prieš tai esančias eiles, tik šitoje eilėje yra dedami 3 blokai, todėl santykis lyginant su prieš tai esančių eilių santykiais skiriasi. Būtina įvesti naują santykio išraišką:

$$\eta_{4nešešėlis} = \frac{S - S_{4šešėlis}}{S} = \frac{(3 * L * l) - (E * d + 2 * (E * d - l_{tarpelis} * (d - d_2)))}{(3 * L * l)}; \quad (40)$$

Reikalinga apsibrėžti papildomas sąlygas, kai pro tarpelį krentantys spinduliai nepilnai krenta ant modulių eilės, o dalis krenta į kitą tarpelį, tada šešėlio ploto formulė turi būti pakoreguota taip:

Kai $0 < (L - E) < l_{tarpelis}$, tai:

$$S_{2\text{šešėlis}} = (E * d - 3 * ((L - E) * d)); \quad (41)$$

$$S_{3\text{šešėlis}} = (E * d - 3 * ((L - E) * (d - d_2))); \quad (42)$$

$$S_{4\text{šešėlis}} = (E * d - 2 * ((L - E) * (d - d_2))). \quad (43)$$

Atlikus išvedimus buvo gautos formulės, kaip apskaičiuoti šešėliuojamo bloko ploto santykinę dalį su nešešėliuojamo bloko ploto dalimi projektuojamoje elektrinėje. Pasinaudojus šiomis formulėmis bus galima nustatyti saulės elektrinės elektros energijos generacijos kitimą didinant/mažinant saulės elektrinės eilių atstumus ir pasvirimus.

2.4. Saulės fotovoltinių modulių temperatūros galios nuostolių skaičiavimas saulės elektrinėje

Temperatūros galios nuostolių įvertinimas yra būtinas, nes tai yra vieni iš didžiausių nuostolių saulės elektrinėje. Elektrinis saulės fotovoltinių modulių efektyvumas ir elektrinė galia tiesiškai priklauso nuo fotomodulių temperatūros [10]. Fotovoltinių modulio (celės) temperatūrai didėjant, nuostoliai dėl temperatūros didėja, o elektrinis efektyvumas mažėja. Šiame darbe temperatūros nuostoliai yra priklausomi tik nuo apšvietos ir yra nevertinamas vėdinimas bei kiti objektai, kurie gali įkaitinti modulį. Skaičiavimuose naudota modulio temperatūros nuostolių formulė yra tokia:

$$\eta_{\text{temperatūra}} = \left\{ 1 - \beta_{\text{galia}} \left[T_{\text{lauko}} - T_0 + (T_{\text{NOCT}} - T_{\text{lauko}}) \frac{G}{G_{\text{NOCT}}} \right] \right\}; \quad (44)$$

Čia:

β_{galia} – fotomodulio galios temperatūros koeficientas, 0.47%/°C;

T_{lauko} – lauko temperatūra, °C;

T_0 – standartinė testavimo temperatūra (STC), 25°C;

T_{NOCT} – nominali darbinė modulio temperatūra (NOCT), 46°C;

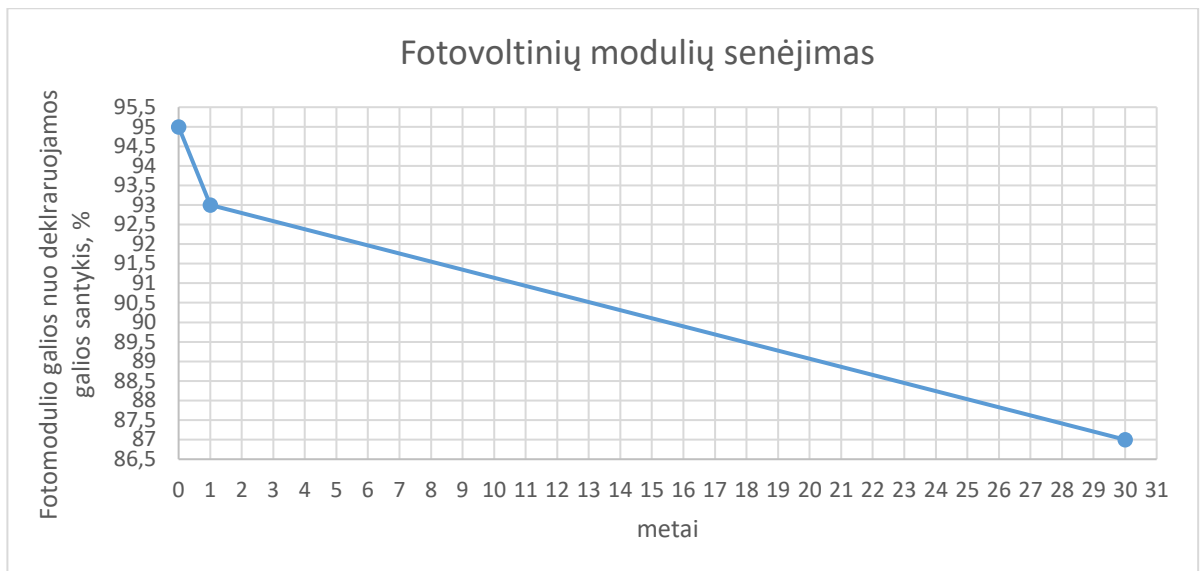
G – saulės apšvieta, W/m²;

G_{NOCT} – nominali darbinė modulio apšvieta, 800W/m².

Reikalingi dydžiai, tokie kaip fotovoltinio modulio galios temperatūros koeficientas ir nominali darbinė modulio temperatūra buvo paimti iš saulės elektrinės fotovoltinio modulio techninės specifikacijos [16].

2.5. Saulės fotovoltinių modulių senėjimo įvertinimas

Projektuojamoje saulės elektrinėje buvo pasirinkti Solitek SOLID Pro 310Wp fotovoltiniai moduliai, kuriems yra taikomas, net 30 metų 87% galios išlaikymo garantinis laikotarpis. Tačiau fotovoltiniai moduliai, kaip ir kiekvienas daiktas sensta ir jų efektyvumas su kiekvienais metais mažėja. Kadangi garantinis laikotarpis yra suteiktas galiai, yra pateikta kreivė, kaip kiekvienais metais krenta galia. Pasinaudojus šiuo grafiku nustatyta, kiek santykinai krenta modulio galia ir šie nuostoliai pritaikyti tolimesniuose skaičiavimuose. Grafikas sudarytas techninės specifikacijos duomenimis [16]:



12 pav. Solitek Solid Pro 310 kWp modulio senėjimo grafikas[16]

Kaip matoma iš grafiko, Solitek modulio galia yra tik 95% deklaruojamos, nes pagaminto modulio galios matavimo paklaida $\pm 5\%$, tai galia gali svyruoti $310\text{Wp} \pm 5\%$. Priimamos blogesnes sąlygos, tai yra 95% modulio pradinės deklaruojamos galios. Iš grafiko matyti, kad po pirmų metų galia krenta dar 2% iki 93%, o toliau galia krenta tiesiškai ir po 30 metų pasiekia 87% deklaruojamos galios. Paskaičiuojami tiesės lygties koeficientai ir gaunama tiesės lygtis:

$$\eta_{\text{senėjimas}} = -0.207 * x_{\text{metai}} + 93.207; \quad (45)$$

Čia:

$\eta_{\text{senėjimas}}$ – fotomodulio galios nuo deklaruojamos vertės santykis, %;

x_{metai} – metai.

Matoma, kad nuo 1 iki 30 metų pasirinkto saulės modulio naudingumas kiekvienais metais sumažėja 0.207%. Šis modulio senėjimo įvertinimas bus naudojamas tolimesniems skaičiavimams, nes projektuojamo saulės elektrinės ekonominis vertinimas bus skaičiuojamas 30-čiai metų.

2.6. Oro masės pataisos koeficientas

Kad gauti kuo tikslesnius saulės elektrinės elektros generacijos rezultatus, reikalinga įvesti dar vieną koeficientą – tai oro masės pataisos koeficientas. Jis priklauso nuo dviejų komponentų:

- Saulės fotomodulio naudojamos absorbcijos medžiagos. Šiame projekte naudojami saulės moduliai yra naudojami iš monokristalinių celių. Nacionalinio Standartų ir Technologijų instituto (NIST) specialistai yra išmatavę ir nustatę skirtingų medžiagų celių α_i vertes, kurios reikalingos skaičiavimams. Šiame projekte naudojami saulės moduliai yra naudojami iš monokristalinių celių. Reikalingi koeficientai pateikti apačioje esančioje lentelėje;

2 lentelė. Naudojamos α_i konstantos monokristaliniam fotomoduliui [3]

Saulės fotomodulių celės tipas	Monokristaliniai
α_0	0.935823

Saulės fotomodulių celės tipas	Monokristaliniai
α_1	0.054289
α_2	-0.008677
α_3	0.000527
α_4	-0.000011

- Oro masės santykio. Tai santykis atstumų tarp saulės spindulių einančių tam tikru kampu per atmosfera ir tarp saulės spindulių einančių tiesiai virš esančio paviršiaus. Saulės spindulių įveiktas atstumas bus mažiausias, kai saulės pozicija bus statmena žemės paviršiui ir analogiškai ilgiausias atstumas, kai saulės pozicija bus horizontalioj pozicijoje. Kuo saulės spinduliai įveikia didesnę atstumą pereinant atmosferą, tuo šie spinduliai tampa labiau išsklaidyti. Tai įvyksta dėl įvairių cheminių medžiagų ir vandens lašelių buvimo atmosferoje, kas apsunkina pereinamumą atmosfera, todėl tiesioginė saulės apšvieta tampa silpnesnė ir tai įtakoja saulės elektrinės generuojamos elektros energijos kiekį. Išraiška, kuria galima apskaičiuoti šį santykį yra pateikta apačioje.

$$m_0 = \frac{1}{\cos(\phi) + 0.5050(96.08 - \phi)^{-1.634}}; \quad (46)$$

Reikiami dydžiai yra gaunami iš prieš tai esančiuose skyriuose pateiktų skaičiavimų. Bendra oro masės pataisos išraiška yra tokia:

$$M = \alpha_0 + \alpha_1 m_0 + \alpha_2 m_0^2 + \alpha_3 m_0^3 + \alpha_4 m_0^4. \quad (47)$$

2.6.1. Saulės spindulių kritimo kampo pataisos koeficientai

Saulės spindulių kritimo kampui didėjant, didėja it atspindėjusių spindulių nuo fotomodulio paviršiaus dalis. Šitas efektas tampa labai pastebimas ir daro didelę įtaką skaičiavimams, kai saulės spindulių kritimo kampas tampa didesnis negu 65° [3]. Saulės spindulių kritimo kampo pataisos koeficientas – tai yra santykis tarp fotomodulio sugertų ir atspindėjusių saulės spindulių nuo fotomodulio paviršiaus. Tačiau skaičiavimams reikalinga šiek tiek kitokia išraiška – tai santykis tarp sugertų saulės spindulių prie tam tikro saulės spindulių kritimo kampo ir sugertų saulės spindulių, kai saulės spindulių kritimo kampas yra normalė paviršiui. Taigi gauname šio koeficiento formulę:

$$K_\theta = \frac{(\tau\alpha)_\theta}{(\tau\alpha)_n}; \quad (48)$$

Šiai formulei reikalingi komponentai gaunami iš šių formulių:

$$(\tau\alpha)_\theta = e^{-\left[\frac{K*L}{\cos(\theta_r)}\right]} * \left\{ 1 - 0.5 \left[\frac{\sin^2(\theta_r - \theta)}{\sin^2(\theta_r + \theta)} + \frac{\tan^2(\theta_r - \theta)}{\tan^2(\theta_r + \theta)} \right] \right\}; \quad (49)$$

$$(\tau\alpha)_n = e^{-K*L} \left[1 - \left(\frac{n_0 - 1}{n_0 + 1} \right)^2 \right]; \quad (50)$$

$$\theta_r = \sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta}{n_0} \right); \quad (51)$$

Čia:

K – išskaidymo koeficientas, tipinė vertė 4m^{-1} ;

L – stiklo storis, m;

θ_r – spindulio lūžio kampas, °;

n_0 – stiklo lūžio rodoklis, 1.526;

θ – kritimo kampas, °.

Kadangi bendrą apšvieta sudaro trys komponentai: tiesioginė saulės apšvieta, išskaidyta apšvieta ir nuo žemės atspindėjusi apšvieta, reikalingi 3 skirtingi koeficientai, kurie yra apskaičiuojami taip:

$$K_{\theta,B} = \frac{(\tau\alpha)_B}{(\tau\alpha)_n}, K_{\theta,D} = \frac{(\tau\alpha)_D}{(\tau\alpha)_n}, K_{\theta,G} = \frac{(\tau\alpha)_G}{(\tau\alpha)_n}; \quad (52)$$

Tačiau kiekvienai bendros apšvietos daliai reikalingas kritimo kampo nustatymas, kuris kiekvienai daliai gaunamas taip:

- Kritimo kampas tiesioginiai saulės apšvietai yra tas pats kritimo kampas, gaunamas iš prieš tai aprašytos formulės:

$$\theta_B = \theta; \quad (53)$$

- Kritimo kampas išskaidytai apšvietai gauti yra naudojama papildoma formulė:

$$\theta_D = 59.68 - 0.1388\beta + 0.001497\beta^2; \quad (54)$$

- Kritimo kampas nuo žemės atspindėjusiam kampui gauti yra naudojama taip pat papildoma formulė:

$$\theta_G = 90 - 0.5788\beta + 0.002693\beta^2; \quad (55)$$

2.7. Suminės saulės elektrinės elektros energijos generacijos skaičiavimas

Krentanti saulės apšvieta ant saulės modulio susideda iš 3 komponentų:

1. Tiesioginė saulės apšvieta;
2. Išskaidyta apšvieta;
3. Nuo žemės atspindėjusi apšvieta.

Kad būtų teisingai įvertinta saulės modulių generuojama elektros energija, reikia įvertinti visus 3 komponentus. Bendra sugeneruojama elektros energijos formulė yra tokia:

$$H_{0i} = H_B + H_D + H_G; \quad (56)$$

Čia:

H_B – Tiesioginė saulės apšvieta, Wh/m^2 ;

H_D – Išskaidyta saulės apšvieta, Wh/m^2 ;

H_G – Nuo žemės atspindėjusi saulės apšvieta, Wh/m^2 .

Pritaikius izotropinį dangaus modelį ir įvedus spindulių kritimo kampo pataisos koeficientus bei šešėliavimo nuostolių įvertinimą ši formulė perrašoma taip:

$$H_{0i} = (\tau\alpha)_n M \left\{ H_B R_B K_{\theta,B} \eta_{inešešėlis} + H_D K_{\theta,D} \left[\frac{1+\cos\beta}{2} \right] + (H_B + H_D) \rho_G K_{\theta,G} \left[\frac{1-\cos\beta}{2} \right] \right\}; \quad (57)$$

Nuostoliai susidarę dėl krentančio šešėlio yra vertinami tik tiesioginei saulės apšvietai ir nėra vertinami išskaidytai bei nuo žemės atspindėjusiai apšvietai.

57 formulėje gautas elektros energijos kiekis yra koreguojamas su senėjimo, temperatūros ir įtampos keitiklio nuostoliais:

$$H_i = H_{0i} \eta_{senėjimas} \eta_{temperatūra} \eta_{keitiklis}; \quad (58)$$

Čia:

$\eta_{keitiklis}$ – keitiklio naudingumo koeficientas iš keitiklio techninės specifikacijos [17], 0,98;

Elektros energijos kiekis visai saulės elektrinei yra paskaičiuojamas padauginant saulės modulių plotą iš kiekvienai eilei generuojamo elektros kiekio kvadratiniam metrui. Kaip ir aptarta anksčiau, šioje saulės elektrinėje yra 4 skirtingos saulės apšvietos įvertinus krentantį šešėlį. Kadangi vieną eilę sudaro 4 saulės elektrinės blokai (paskutinę eilę 3 blokai), tai skaičiuojant saulės elektrinės bendrą generuojamą elektros kiekį atsiranda 4 arba 3.

Apskaičiuojamas elektros energijos kiekis visai saulės elektrinei:

$$H = (4LlH_1 + 4LlH_2 + 4Ll(N_{eilės} - 3)H_3 + 3LlH_4) \eta_{modulis}; \quad (59)$$

Čia:

L – Saulės elektrinės modulių bloko ilgis, m;

l – Saulės elektrinės modulių bloko plotis, m;

H_1 – Pirmos eilės pagamintas elektros energijos kiekis kvadratiniam metrui, Wh/m²;

H_2 – Antros eilės pagamintas elektros energijos kiekis kvadratiniam metrui, Wh/m²;

H_3 – Trečios ir kitų eilių pagamintas elektros energijos kiekis kvadratiniam metrui, Wh/m²;

H_4 – Paskutinės eilės pagamintas elektros energijos kiekis kvadratiniam metrui, Wh/m²;

$N_{eilės}$ – Visos saulės elektrinės eilės ;

$\eta_{modulis}$ – Saulės modulio naudingumo koeficientas iš techninės specifikacijos, 0,1871.

Apačioje pateiktas grafikas kaip kinta projektuojamos saulės elektrinės sugeneruotos elektros energijos santykis su įrengta galia. Jis apskaičiuojamas taip:

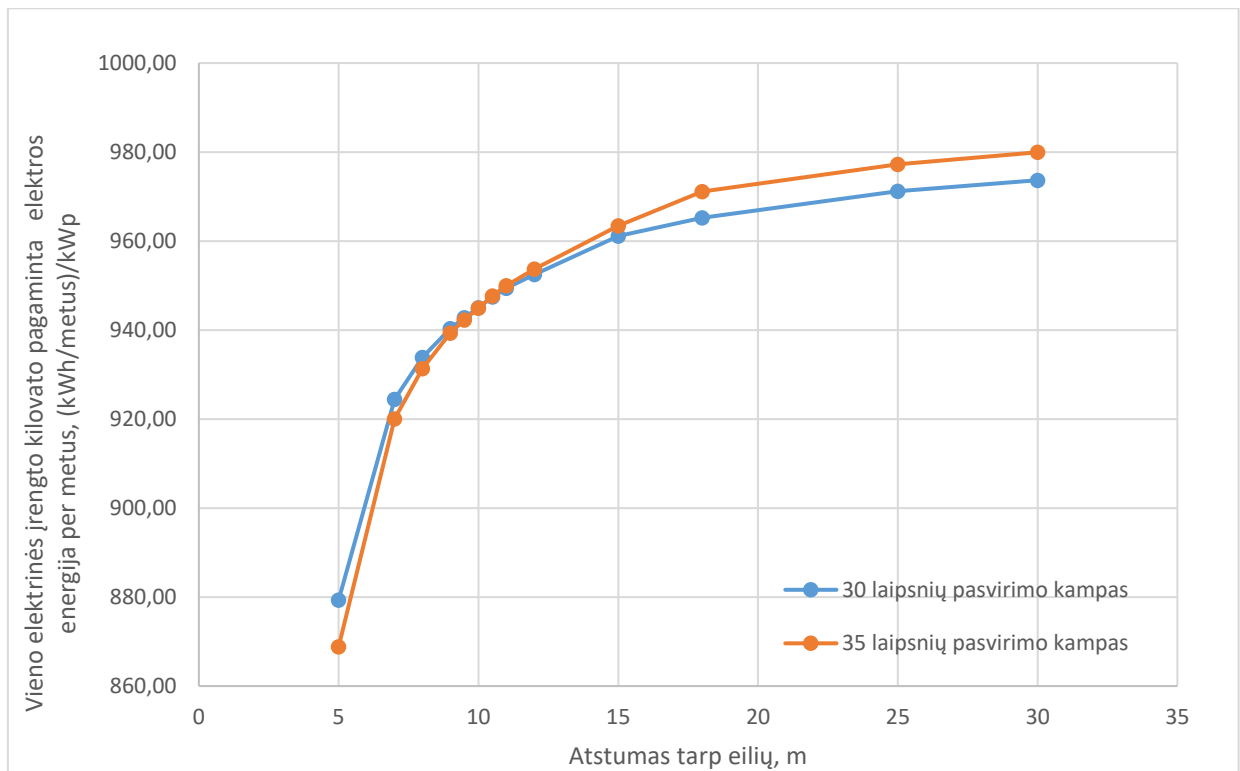
$$Y = \frac{\sum_{8760}^t H}{P_{elektrinė}}; \quad (60)$$

Čia:

$\sum_{8760}^t H$ – apskaičiuojama suminis metinis elektros energijos kiekis, kWh/metus;

$P_{elektrinė}$ – įrengta saulės elektrinės galia, kWp;

Y – Vieno įrengto elektrinės kilovato pagaminamas elektros energijos kiekis, ($\frac{kWh}{metus}$)/kWp.



13 pav. Saulės elektrinės įrengto kilovato pagaminamos elektros energijos kiekio priklausomybė nuo atstumo tarp saulės modulių eilių.

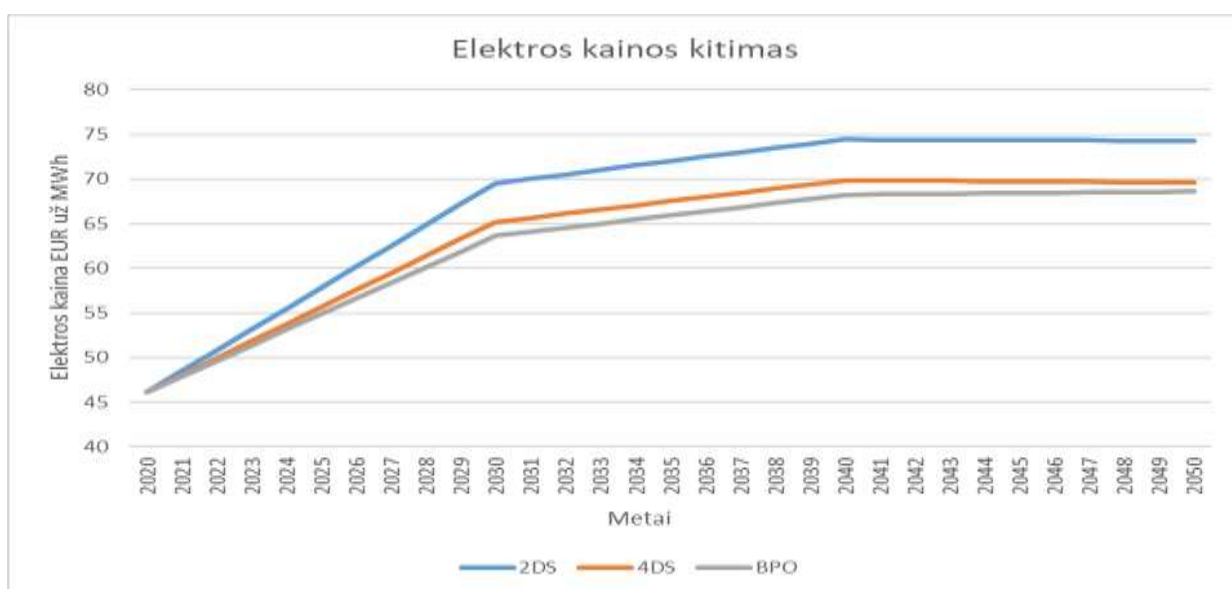
Grafike parinkti 30 ir 35 laipsnių pasvirimo kampai, nes su tokiais kampais gaunamos didžiausios reikšmės, kas ir yra siekiama. Kaip matyti iš grafiko, geriausia saulės modulių pasvirimo kampą daryti 30 laipsnių iki 11 metrų atstumo tarp modulių eilių. Kai yra daugiau negu 11 metrų, pasvirimo kampą reiktų daryti 35 laipsnius. Taip pat, iš šio grafiko nėra nustatyti optimalaus atstumo tarp saulės modulių eilių, nes nėra ekstremumo, kurį būtų galima priskirti kaip optimaliausią variantą. Dėl šios priežasties sekančiame skyriuje yra atliekami ekonominiai skaičiavimai, su kuriais galima apskaičiuoti optimalų atstumą tarp saulės elektrinės fotovoltinių modulių eilių. Skaičiavimų rezultatai ties visais atstumais tarp eilių ir modulių pasvirimais yra pateikti lentelėse 1 priede.

3. Ekonominis saulės elektrinės įvertinimas

Vien pagal technologinius rodiklius parenkant saulės elektrinės išdėstymą nėra įvertinama sklypo kaina, eksploataciniai bei įrengimo kaštai. Taip pat, gaunama kad kuo labiau didinami tarpai tarp saulės elektrinės eilių, tuo mažesni nuostoliai dėl šešėliavimo. Vertinant vien pagal technologinius rodiklius gaunasi, kad optimaliausia į sklypą dėti vieną eilę, kur niekados nekris šešėlis nuo kitų eilių, tačiau tai tikrai nebus optimalus išdėstymas sklype, nes neįvertinami ekonominiai rodikliai. Taigi, vienas iš svarbiausių šio darbo dalių – tai ekonominis įvertinimas.

3.1. Elektros energijos kaina

Projektuojama saulės elektrinė pagamintą elektros energiją pardavinės NORDPOOL biržoje. Siekiant įvertinti elektros energijos kainą ir jos valandinius svyravimus, buvo panaudoti 2019 metų elektros energijos dienos į priekį rinkos kainos duomenys. Kaip kis vidutinė metinė kaina 2020-2050 metais nustatyta remiantis BENTE projekto ataskaitoje pateiktomis Baltijos šalių elektros energijos kainų kitimo prognozėmis. Įvertinti 3 kainų kitimo scenarijai.



14 pav. Vidutinė metinė elektros energijos kainos kitimo prognozė pagal 3 scenarijus

Metinės pajamos apskaičiuotos susumuojant kiekvieną valandą pagamintos elektros energijos kiekio ir tos valandos rinkos kainos sandaugas. Buvo priimta, kad visos elektros energijos kiekis parduodamas už tos valandos elektros rinkos kainą.

$$R_y = \sum_h E_{y,h} \cdot P_{y,h}; \quad (61)$$

Čia:

R_y – elektrinės pajamos y metais;

$E_{y,h}$ - saulės elektrinės pagamintas elektros energijos kiekis y metais, h valandą, kWh;

$P_{y,h}$ - elektros energijos kaina NORDPOOL dienos į priekį rinkoje y metais, h valandą, Eur/kWh .

3.2. Saulės elektrinės įrengimo, eksploataavimo ir sklypo kainos nustatymas

Saulės elektrinės pastatymui reikalingos investicijos buvo nustatytos sudarant preliminarą sąmatą, kuri buvo sudaryta praktikos atlikimo metu bei nagrinėjant panašių projektų savikainas internete. Atlikus skaičiavimus ir palyginimus buvo nustatyta, kad yra reikalingos 720 Eur/kWp investicijos. Preliminari sąmata pateikta 2 priede.

Išnagrinėjus literatūrą bei pritaikius gautas žinias iš darbo buvo priimta, kad eksploataciniai kaštai, tokie kaip saulės elektrinės modulių plovimas, žolės pjovimas bei pastovus veikimo prižiūrėjimas kainuoja 15000 Eur per metus vienam įrengtam megavatui. Taip pat, buvo įvertinta, kad kas 10 metų bus keičiami visi įtampos keitikliai.

Sklypo kaina buvo priimta 60000 Eur.

3.3. Diskonto normos nustatymas

Norint įvertinti projekto pelningumą, reikia įvertinti pinigų vertės kitimą laike. Kaip žinoma, 100 eurų 2020 metais nėra lygus 100 eurų 2030 metais, nes atsiranda galimybių pinigus investuoti ir 2030 metais turėti daugiau negu 100 eurų. Dėl šios priežasties pinigų srautai negali būti tiesiogiai lyginami ar sumuojami – jie turi būti konvertuoti į vienodą vertę. Apskaičiuoti ateities pinigų srautų dabartinę vertę yra naudojama diskonto norma. Diskonto norma parodo kiek kiekvienais metais procentų sumažėja pinigų vertė lyginant su dabartine verte. Nustatant diskonto normą, buvo pasirinkta alternatyva investuoti į S&P 500 indeksą, nes tai yra santykinai mažos rizikos investavimo alternatyva. S&P 500 indeksas – tai 500 didžiausių JAV įmonių kapitalizacijos. Teigiama, kad jis geriausiai apibūdina JAV ekonomikos augimo pokyčius [24]. Taigi, šio indekso augimo tempas bus priimtas kaip diskonto norma. Tam naudojami indekso kainos pokyčiai tarp 2000 ir 2020 metų. 2000-01-03 indekso vertė buvo 1441,47\$, o 2020-01-03 indekso vertė buvo 3234.85\$ [22]. Apskaičiuojama diskonto norma:

$$r = \left(\frac{FV}{PV} \right)^{\frac{1}{t}} - 1 = \left(\frac{3234,85}{1441,47} \right)^{\frac{1}{20}} - 1 = 0.0412 = 4.12\%; \quad (62)$$

Čia:

FV – dabartinė vertė (2020 metų S&P 500 indekso kaina), \$;

PV – buvusi vertė (2000 metų S&P 500 indekso kaina), \$;

t – laikas, m.

Gauta, kad diskonto norma yra 4.12%, tolimesniuose skaičiavimuose tokia vertė ir bus naudojama.

3.4. Saulės elektrinės išdėstymas pagal investicijų grąžos ir vidinės grąžos normos rodiklius

Prenkant saulės elektrinės išdėstymo planą yra svarbu atsižvelgti į sklypo dydį bei kainą ir jam parinkti tinkamo dydžio elektrinę. Kai turima fiksuoto dydžio žemės sklypas iškyla problema – kokius daryti atstumus tarp saulės elektrinės modulių eilių, kad nepatirti didelių nuostolių dėl šešėliavimo. Kaip ir buvo gauta atliekant technologinius skaičiavimus, optimaliausias variantas būtų daryti vieną saulės modulių eilę ant kurios niekada nekristu šešėlis nuo kitos saulės modulių eilės, tačiau toks projektas būtų labai nuostolingas ir nelogiškas, nes būtų neišnaudotas sklypo plotas, už

kurį yra sumokėta. Todėl būtina įvertinti saulės elektrinės įrengimo, eksploatavimo bei sklypo kainas. Tam įvertinti naudojami vidinės grąžos normos ir investicijų grąžos rodikliai.

Investicijų grąžos rodiklis gali būti apskaičiuotas pagal tokią formulę:

$$ROI = \frac{\sum_{y=1}^{30} (R_y - C_{eksploatacija}) - C_{irengimas} - C_{sklypas}}{C_{irengimas} + C_{sklypas}}; \quad (63)$$

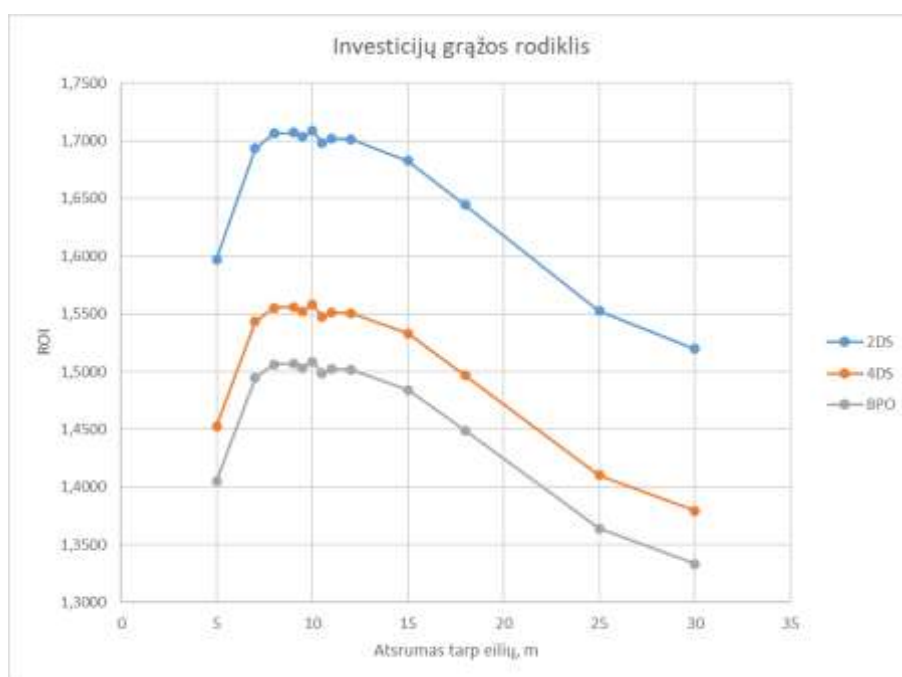
Čia:

R_y – pajamos y metais, Eur;

$C_{eksploatacija}$ – metinės eksploatacinės elektrinės išlaidos (15 000 Eur.);

$C_{irengimas}$ – elektrinės įrengimo kaina, Eur;

$C_{sklypas}$ – sklypo kaina, Eur.



15 pav. Investicijų grąžos rodiklio priklausomybė nuo atstumo tarp saulės modulių eilių

Pateiktame grafike aukščiau yra pateiktos investicijų grąžos priklausomybės nuo atstumo kreivės 30 laipsnių pasvirimo kampui, nes ties šiuo pasvirimo kampu buvo gautos didžiausios šio rodiklio vertės. Taip pat matoma, kad ties 10 metrų atstumu tarp eilių šis rodiklis visoms trimis prognozėms yra didžiausias. Pasinaudojus šiuo grafiku galima padaryti išvadą, kad kai modulių pasvirimo kampas 30 laipsnių ir tarp modulių eilių atstumas yra 10 metrų, toks išdėstymas yra optimaliausias ekonominiu požiūriu. Visi gauti rezultatai pateikti 1 priede.

Netgi svarbesnis rodiklis už investicijų grąžos rodiklį yra vidinės grąžos norma. Šių rodiklių pagrindinis skirtumas, kad IRR parodo kokia investicinė grąža bus gaunama kiekvienais metais, kai ROI parodo tiesiog bendrą investicijos vaizdą ir parodo kokia grąža bus gauta per visą projekto gyvavimo laiką. Taip pat IRR įvertina busimų pinigų vertę, kai ROI į tai neatsižvelgia. Turint vidinę grąžos normą galima sulyginti su alternatyvia investicija ir įvertinti ar geriau apsimoka investuoti į

pasirinktą projektą ar į alternatyvą, pavyzdžiui į S&P 500 indeksą. Bendra vidinės grąžos rodiklio išraišką ir rezultatai pateikti apačioje ir 1 priede:

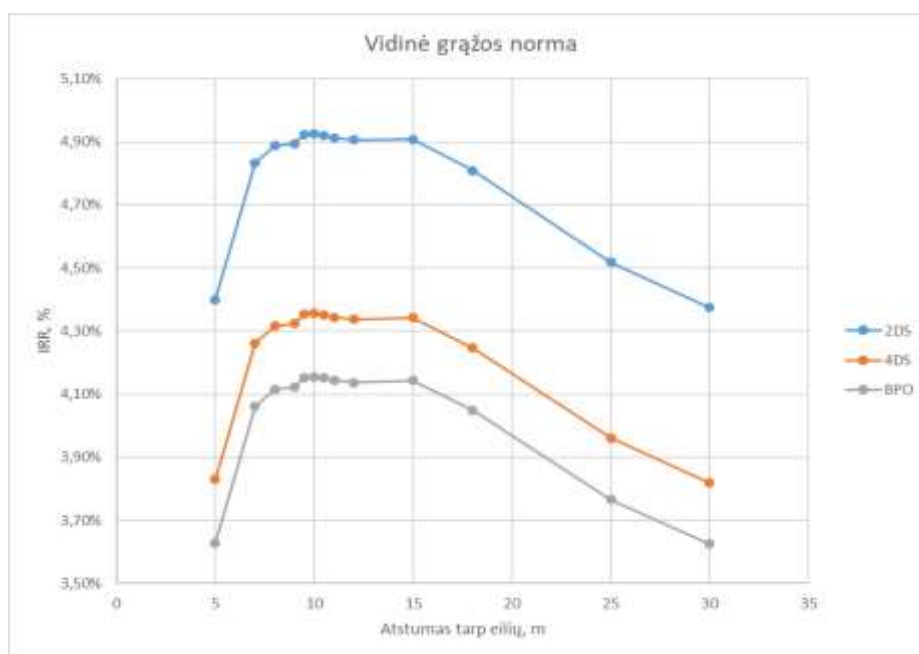
$$0 = NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1 + IRR)^t}; \quad (64)$$

Čia:

NPV – grynoji dabartinė vertė, Eur;

CF_t – Pinigų srautas (pajamos – išlaidos), Eur;

IRR – vidinė grąžos norma.



16 pav. Vidinės grąžos normos priklausomybė nuo atstumo tarp eilių

Pateiktame grafike aukščiau yra pateiktos vidinės grąžos normos priklausomybės nuo atstumo kreivės 30 laipsnių pasvirimo kampui, nes ties šiuo pasvirimo kampu buvo gautos didžiausios šio rodiklio vertės. Taip pat matoma, kad ties 10 metrų atstumu tarp eilių šis rodiklis visoms trims prognozėms yra didžiausias. Pasinaudojus šiuo grafiku galima padaryti išvadą, kad kai modulių pasvirimo kampas 30 laipsnių ir tarp modulių eilių atstumas yra 10 metrų, toks išdėstymas yra optimaliausias ekonominiu požiūriu. Visi gauti rezultatai pateikti 1 priede.

Sulyginus dviejų gautų rodiklių rezultatus, buvo prieita išvada, kad naudojant anksčiau minėtas elektrinės įrengimo, eksploatavimo ir sklypo išlaidas, bei statant elektrinę pasirinkto sklypo formos sklype ir naudojant pasirinktas konstrukcijas, optimaliausias elektrinės išdėstymas yra darant 30 laipsnių saulės modulių pasvirimą ir tarp modulių eilių darant 10 metrų ilgio atstumus.

3.5. Grynoji dabartinė vertė

Dar vienas svarbus ekonominio įvertinimo rodiklis yra grynoji dabartinė vertė. Tai rodiklis kurio tikslas „nustatyti dabartinę būsimų pajamų bei išlaidų vertę, naudojant diskontuotų pinigų srautų metodą“ [14]. Šis rodiklis gali būti naudojamas įvertinti projekto patrauklumą bei atsiperkamumą, tačiau jis priklauso nuo pasirinktos diskonto normos. Didžiausias trūkumas šio rodiklio, tai yra

diskonto normos nustatymas. Diskonto norma yra subjektyvus ir prognozuojamas dydis, todėl jis negali būti tikslus, ko pasekoje grynoji dabartinė vertė negali būti apskaičiuota tiksliai. Nagrinėjant energetikos projektus buvo pastebėta, kad dažniausia vertė yra 4-5%. 3.4 esančiame poskyryje apskaičiuota diskonto norma patenka į šias ribas, todėl priimama, kad paskaičiuota diskonto norma yra teisinga. Grynosios dabartinės vertės apskaičiavimo formulė yra tokia:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t}; \quad (65)$$

Šis rodiklis buvo skaičiuojamas praeitame poskyryje nustatytam optimaliam saulės elektrinės išdėstymui pagal 3 prognozes. Buvo gauta:

- Pagal 2DS prognozę, grynoji dabartinė vertė po 30 metų yra 125421 Eur;
- Pagal 4DS prognozę, grynoji dabartinė vertė po 30 metų yra 35269 Eur;
- Pagal BPO prognozę, grynoji dabartinė vertė po 30 metų yra 4792 Eur.

Iš gautų rezultatų matyti, kad grynoji dabartinė vertė yra teigiama, kas padaro projektą patraukliu, tačiau grynoji dabartinė vertė gauta ganėtinai maža ir tik apie 30 metus pasiekia teigiamą vertę. Neženkliai padidėjus diskonto normai grynoji dabartinė vertė gali tapti neigiama, kas padarytų projektą nebeatraukliu investuotojams, dėl ko sekančiame poskyryje yra nagrinėjami investavimo patrauklumo didinimo paketai.

3.6. Saulės elektrinės investavimo patrauklumo padidinimo skaičiavimas

Apskaičiavus projekto vidinę grąžos normą 3 scenarijais buvo gauta, kad blogiausiu elektros kainos kilimo scenarijumi (BPO) ši norma būtų 4.16%. Gauta norma buvo didesnė 0.04% už apskaičiuota diskonto norma, kuri buvo prilyginta investavimo alternatyvai į S&P 500 indeksą, tačiau šios normos buvo gautos labai panašios, o investavimas į saulės elektrinę turi didesnę investavimo riziką negu investavimas į S&P 500. Todėl norint paskatinti saulės elektrinių plėtrą ir patraukti investuotojų dėmesį buvo paskaičiuoti galimi subsidijavimo paketai, kurie padidintų tokių projektų patrauklumą. Sudaryti 5 subsidijavimo formų paketai:

1. APVA subsidija iki 10kW saulės elektrinėms pritaikyti ir didelėms saulės elektrinėms (322.91 Eur subsidija įrengtam saulės elektrinės kilovatu);
2. Subsidijuoti 20% saulės elektrinės įrengimo kainos;
3. Subsidijuoti 30% saulės elektrinės įrengimo kainos;
4. Už kiekvieną kilovatvalandę mokėti papildomai 1 euro centą;
5. Už kiekvieną kilovatvalandę mokėti papildomai 2 euro centus;

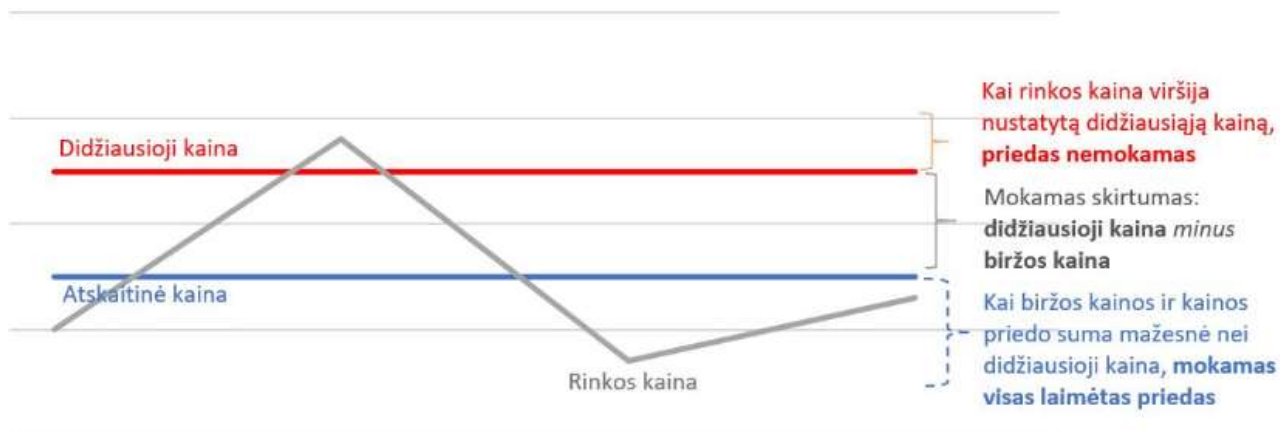
3 lentelė. Saulės elektrinės subsidijavimo paketų 1-5 rezultatai

Be subsidijavimo			
Rodikliai	2DS	4DS	BPO
Vidinė grąžos norma	4,93%	4.36%	4.16%
Dabartinė grynoji vertė po 30 metų (Eur)	125421.59	35268.92	4792.29
Dabartinė grynoji vertė pasiekia 0 (metai)	26	29	30
1 paketas (skiriamas subsidijų dydis projektui – 494504.37 Eur)			
Rodikliai	2DS	4DS	BPO

1 paketas (skiriamas subsidijų dydis projektui – 494504.37 Eur)			
Rodikliai	2DS	4DS	BPO
Vidinė grąžos norma	10.08%	9.38%	9.12%
Dabartinė grynoji vertė po 30 metų (Eur)	619925.96	529773.30	499296.67
Dabartinė grynoji vertė pasiekia 0 (metai)	13	14	15
2 paketas (skiriamas subsidijų dydis projektui – 220521.60 Eur)			
Rodikliai	2DS	4DS	BPO
Vidinė grąžos norma	6,70%	6.09%	5.87%
Dabartinė grynoji vertė po 30 metų (Eur)	345943.19	255790.52	255313,89
Dabartinė grynoji vertė pasiekia 0 (metai)	19	22	22
3 paketas (skiriamas subsidijų dydis projektui – 330782.40 Eur)			
Rodikliai	2DS	4DS	BPO
Vidinė grąžos norma	7.85%	7.21%	6.98%
Dabartinė grynoji vertė po 30 metų (Eur)	456203.99	366051.32	335574.69
Dabartinė grynoji vertė pasiekia 0 (metai)	17	18	19
4 paketas (skiriamas subsidijų dydis projektui – 393942.10 Eur)			
Rodikliai	2DS	4DS	BPO
Vidinė grąžos norma	6,30%	5.78%	5.60%
Dabartinė grynoji vertė po 30 metų (Eur)	350470.49	260317.82	229841.20
Dabartinė grynoji vertė pasiekia 0 (metai)	21	22	23
5 paketas (skiriamas subsidijų dydis projektui – 787884.20 Eur)			
Rodikliai	2DS	4DS	BPO
Vidinė grąžos norma	7.61%	7.14%	6.97%
Dabartinė grynoji vertė po 30 metų (Eur)	575519.39	485366.73	454890.10
Dabartinė grynoji vertė pasiekia 0 (metai)	17	18	19

Iš gautų rezultatų nustatyta, kad geriausia yra skirti vienkartinę pradinę subsidiją, negu skirti papildomą priemoną už parduotą kilovatvalandę. Tačiau tokiu būdu valstybė įsipareigoja sumokėti didelę pinigų sumą per vieną kartą, dėl ko būtų investuojama į mažesnį projektų skaičių negu išdalinant priemoną per tam tikrą laikotarpį (4-5 paketai).

Atskiru punktu vertėtų apžvelgti VERT atsinaujinančios energetikos plėtros vykdomus aukcionus, kai yra skiriamas priedas prie elektros energijos rinkos kainos. Apžvelgiant NORDPOOL rinkos kainas bendras metinis vidurkis buvo gautas 45.87 Eur/MWh, tačiau skaičiuojant kainos vidurkį kada saulės elektrinė generuoja elektros energiją, buvo gauta, kad kainos vidurkis siekia net 57.90 Eur/MWh. Valstybinė energetikos reguliavimo taryba 2019 metais nustatė maksimalius aukciono laimėtojo kainos priedus. Jis apskaičiuojamas kaip skirtumas tarp didžiausios ir atskaitinės kainos. 2019 metais didžiausia kaina buvo nustatyta 48.93 Eur/MWh, atskaitinė kaina – 45.07 Eur/MWh, o maksimalus galimas priedas 3.86 Eur/MWh.



17 pav. priedo išmokos nustatymo metodika pagal VERT [29]

Atlikus 2019 metų NOORDPOOL kainos vienam įrengtam saulės elektrinės kilovatui pritaikymą priedo išmokai gauti, buvo nustatyta, kad dėl didelės rinkos kainos 2019 metais, kai generuoja saulės elektrinė energiją, priedo išmokos dydis vienam įrengtam kilovatui siektų tik 1.47 centus už kilovatvalandę (1MW-1.47 Eur/MWh). Tai sudaro tik 2.5%, nuo rinkoje parduotos elektros energijos kainos. Tai yra ganėtinai maža subsidija, dėl kurios saulės elektrinių plėtra nebūtų labai skatinama. Todėl šio tipo skatinimo programa (nagrinėjant 2019 metų duomenis) nėra pati tinkamiausia vystyti saulės fotovoltinės elektrinės bei joms konkuruoti su kitomis atsinaujinančių šaltinių elektrinėmis, tokiomis kaip vėjo elektrinės.

Išvados

1. Atlikus atsinaujinančios energetikos perspektyvos apžvalgą buvo nustatyta, kad atsinaujinančios energetikos dalis elektros sistemoje sparčiai didės dėl politinio spaudimo siekiant suvaldyti klimato kaitą bei pingančios elektros energijos išgavimo savikainos iš atsinaujinančių šaltinių. Saulės fotovoltinių elektrinių įrengtosios galios dalis ateityje didės labiausiai lyginant su kitomis atsinaujinančios energetikos rūšimis. Prognozuojama, kad iki 2030 metų saulės fotovoltinių elektrinių įrengta galia turėtų padidėti net 6 kartus, o 2050 metais pakilti net 18 kartų nuo dabartinio lygio.
2. Tyrimui parinkti Solitek Solid pro 310 kWp monokristaliniai saulės fotovoltiniai moduliai, ABB PVS-175-TL 175kW galios įtampos keitikliai bei Eland cables kabeliai.
3. Sudaryta ir pritaikyta nuostolių dėl šešėliavimo priklausomybės nuo atstumo tarp saulės elektrinės eilių bei fotomodulių pasvirimo kampo skaičiavimo metodika.
4. Įvertinus susidarančius šešėliavimo, temperatūrinius bei modulių senėjimo nuostolius nustatyta, kad elektros gamyba saulės elektrinėje yra didžiausia, kai modulių pasvirimo kampas yra 30 laipsnių, esant atstumui tarp modulių eilių mažesniame nei 11 metrų. Kai atstumas didesnis nei 11 m, tada elektros gamyba didžiausia, kai moduliai pasvirę 35 laipsnių kampu. Esant nedideliame atstumui tarp eilių, statesnis modulių pasvirimo kampas lemia didesnę šešėliavimą.
5. Atlikus ekonominius skaičiavimus keičiant fotomodulių pasvirimo kampą ir atstumą tarp eilių buvo pastebėta, kad vidinės grąžos norma gaunama didžiausia ties 30° fotomodulių pasvirimu ir 10 metrų atstumu tarp saulės elektrinės eilių, todėl šie parametrai buvo pasirinkti kaip optimalūs saulės elektrinės išdėstymas pasirinktame sklype. Ties optimaliu išdėstymu ir pagal 3 skirtingus kainų kitimo scenarijus vidinės grąžos norma buvo gauta 4.93-4.16%, o grynoji dabartinė 125421.59-4792.29 Eur.
6. Siekiant padidinti patrauklumą investuotojams buvo sudaryti ir paskaičiuoti subsidijavimo paketai, kurie padidintų saulės elektrinių patrauklumą. Palyginus subsidijavimo paketus buvo prieita išvada, kad labiausiai patrauklumą investuoti padidintų pradinės vienkartinės subsidijos, nes jos projekto pelningumą ir vidinę grąžos normą padidina labiausiai, o subsidijos dydis būtų mažiausias. Pritaikius vienkartinę pradinę APVA iki 10 kW galios elektrinėms ant namo stogo paramą nagrinėjamai elektrinei, vidinės grąžos norma padidėtų net iki 10.08-9.12%.

Literatūros sąrašas

1. Gytis Petrauskas ir Vytautas Adomavičius (2012). *Saulės energijos naudojimas elektros gamybai*. Kaunas: Technologija.
2. Gytis Svinkūnas ir Algimantas Navickas (2011). *Elektros energetikos pagrindai*. [Interaktyvus]. [žiūrėta 2020-05-20]. Prieiga per internetą: <https://www.ebooks.ktu.lt/einfo/164/elektros-energetikos-pagrindai/>
3. Soteris A. Kalogirou (2014). *Solar Energy Engineering*. [Interaktyvus]. [žiūrėta 2020-05-20]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/book/9780123972705/solar-energy-engineering>
4. Heinrich Haberlis (2012). *Photovoltaics System Design and Practice* [Interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-18]. Prieiga per internetą: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/ktu-ebooks/reader.action?docID=835145&query>
5. Valentinas Klevas (2010). *Energetikos ekonomikos pagrindai*. [Interaktyvus]. [žiūrėta 2020-05-18]. Prieiga per internetą: <https://www.ebooks.ktu.lt/einfo/624/energetikos-ekonomikos-pagrindai/>
6. Baltic Energy Technology Scenarios (2018) [Interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per internetą: <https://www.nordicenergy.org/publications/baltic-energy-technology-scenarios-2018/>
7. Future of Solar Photovoltaic (2019) [Interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-15]. Prieiga per internetą: <https://www.irena.org/publications/2019/Nov/Future-of-Solar-Photovoltaic>
8. Renewables 2019 Global Status Report (2019) [Interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-25]. Prieiga per internetą: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf
9. electrical properties mono and polycrystalline silicon solar cells (2013) [Interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-24]. Prieiga per internetą: http://jamme.acmsse.h2.pl/papers_vol59_2/5922.pdf
10. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations (2008) [Interaktyvus]. [žiūrėta 2020-05-01]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X08002788>
11. Extended model for irradiation suitable for large bifacial PV power plants (2019) [Interaktyvus]. [žiūrėta 2020-05-01]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X19308448>
12. Adam P. Showman & Timothy E. Dowling „*Encyclopedia of Solar System*” (2014), chapter 20 [Interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-29]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124158450000207>
13. Partial shading detection for PV arrays in a maximum power tracking system using the sine-cosine algorithm (2020) [Interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-29]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082619311792>
14. Vidinė gražos norma ir grynoji dabartinė vertė) [Interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-20]. Prieiga per internetą: <https://www.finansistas.net/vidine-grazos-norma.html>
15. NORDPOOL elektros energijos kainos 2019 metais [Interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-22]. Prieiga per internetą: https://www.nordpoolgroup.com/globalassets/marketdata-excel-files/elspot-prices_2019_hourly_eur.xls
16. Solitek solid pro fotomodulių techninė specifikacija [Interaktyvus]. [žiūrėta 2020-03-13]. Prieiga per internetą: <https://solitek.eu/lt/product/solid-pro-m-60/>

17. ABB įtampos keitiklio techninė specifikacija [Interaktyvus]. [žiūrėta 2020-05-04]. Prieiga per internetą: https://library.e.abb.com/public/0f00edbf0a574789ba72e3c9dd64e788/PVS-175-TL_9AKK107046A3492_EN_Rev_C.pdf
18. Nuolatinės srovės kabelių techninė specifikacija [Interaktyvus]. [žiūrėta 2020-05-10]. Prieiga per internetą: <https://www.elandcables.com/cables/photovoltaic-solar-h1z2z2-k-cable>
19. Kintamos srovės kabelių techninė specifikacija [Interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-22]. Prieiga per internetą: <https://www.elandcables.com/cables/n2xfgb-cable-061kv>
20. Skaičiavimams reikalingų aplinkos parametrų duomenų šaltinis [Interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-20]. Prieiga per internetą: https://secure.meteonorm.com/files/meteonorm7.1.11_installer.exe
21. Ignitis saulės parkai [Interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-14]. Prieiga per internetą: https://www.saulėsparkai.lt/?gclid=CjwKCAjw5lj2BRBdEiwA0Frc9U3d7mQ3lK8OTxdN3RaMThxBwMTPNQpI6HKzUiTceHuwqGxk_Zbs0BoC0wUQAvD_BwE
22. S&P 500 index vertės [Interaktyvus]. [žiūrėta 2020-05-21]. Prieiga per internetą: <https://www.marketwatch.com/investing/index/spx>
23. APVA parama mažoms saulės elektrinėms [Interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-07]. Prieiga per internetą: <https://www.apva.lt/norite-isirengti-saules-elektrine/>
24. S&P 500 Index [Interaktyvus]. [žiūrėta 2020-05-10]. Prieiga per internetą: <https://www.investopedia.com/terms/s/sp500.asp>
25. Scientific Consensus: Earth's Climate is Warming [Interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-21]. Prieiga per internetą: https://climate.nasa.gov/scientific-consensus/#*
26. Effects of global warming [Interaktyvus]. [žiūrėta 2020-03-29]. Prieiga per internetą: <https://www.nationalgeographic.com/environment/global-warming/global-warming-effects/>
27. IRR vs ROI [Interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-18]. Prieiga per internetą: <https://www.wallstreetmojo.com/irr-vs-roi/>
28. Return on Investment (ROI) Versus Internal Rate of Return (IRR) [Interaktyvus]. [žiūrėta 2020-04-13]. Prieiga per internetą: <https://www.investopedia.com/articles/investing/111715/return-investment-roi-vs-internal-rate-return-irr.asp>
29. Priedo išmokos kainos nustatymas [Interaktyvus]. [žiūrėta 2020-05-19]. Prieiga per internetą: <https://enmin.lrv.lt/lt/veiklos-sritys-3/atsinaujinantys-energijos-istekliai/aukcionai/kaip-nustatomos-kainos>
30. LIETUVOS RESPUBLIKOS ENERGETIKOS MINISTERIJA. Elektros įrenginių įrengimo taisyklės [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-05-19]. Prieiga per internetą: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.418124/asr>

Priedai

1 priedas. IRR, ROI, NPV ir kWh/kWp rezultatų lentelės

1 lentelė. IRR 2DS

	Kampas, laipsniais											
Atstumas tarp eilių, m	0	10	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90
5	3,57%	4,28%	4,50%	4,48%	4,40%	4,27%	4,11%	3,67%	3,09%	2,31%	1,28%	- 0,05%
7	3,51%	4,29%	4,73%	4,82%	4,83%	4,78%	4,66%	4,27%	3,68%	2,86%	1,78%	0,38%
8	3,47%	4,26%	4,73%	4,85%	4,89%	4,85%	4,76%	4,39%	3,81%	2,99%	1,90%	0,50%
9	3,42%	4,19%	4,71%	4,84%	4,89%	4,88%	4,79%	4,45%	3,88%	3,07%	1,98%	0,58%
9,5	3,42%	4,21%	4,73%	4,86%	4,92%	4,91%	4,83%	4,50%	3,94%	3,13%	2,04%	0,64%
10	3,41%	4,19%	4,72%	4,86%	4,93%	4,92%	4,85%	4,52%	3,97%	3,16%	2,07%	0,67%
10,5	3,38%	4,17%	4,71%	4,85%	4,92%	4,92%	4,85%	4,53%	3,98%	3,18%	2,10%	0,70%
11	3,36%	4,15%	4,69%	4,84%	4,91%	4,91%	4,85%	4,54%	3,99%	3,20%	2,11%	0,72%
12	3,32%	4,11%	4,67%	4,83%	4,91%	4,91%	4,85%	4,55%	4,02%	3,22%	2,15%	0,76%
15	3,27%	4,05%	4,61%	4,80%	4,91%	4,93%	4,88%	4,60%	4,09%	3,32%	2,26%	0,89%
18	3,16%	3,94%	4,50%	4,69%	4,81%	4,87%	4,84%	4,57%	4,08%	3,32%	2,28%	0,93%
25	2,88%	3,65%	4,21%	4,40%	4,52%	4,57%	4,56%	4,37%	3,95%	3,24%	2,24%	0,93%
30	2,74%	3,51%	4,06%	4,25%	4,37%	4,43%	4,42%	4,23%	3,80%	3,11%	2,12%	0,82%

2 lentelē. IRR 4DS

	Kampas, laipsniais											
Atstumas tarp eiliu, m	0	10	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90
5	3,00%	3,71%	3,93%	3,91%	3,83%	3,70%	3,54%	3,10%	2,52%	1,74%	0,71%	-0,64%
7	2,95%	3,72%	4,16%	4,25%	4,26%	4,21%	4,09%	3,70%	3,12%	2,30%	1,21%	-0,19%
8	2,91%	3,69%	4,16%	4,27%	4,32%	4,28%	4,19%	3,82%	3,25%	2,43%	1,33%	-0,07%
9	2,85%	3,64%	4,14%	4,27%	4,32%	4,31%	4,22%	3,88%	3,32%	2,50%	1,41%	0,00%
9,5	2,86%	3,65%	4,16%	4,30%	4,35%	4,34%	4,26%	3,93%	3,38%	2,56%	1,48%	0,07%
10	2,84%	3,63%	4,15%	4,29%	4,36%	4,35%	4,28%	3,95%	3,40%	2,59%	1,50%	0,10%
10,5	2,82%	3,61%	4,14%	4,28%	4,35%	4,35%	4,28%	3,96%	3,42%	2,62%	1,53%	0,13%
11	2,80%	3,58%	4,13%	4,27%	4,34%	4,34%	4,28%	3,97%	3,43%	2,63%	1,55%	0,15%
12	2,76%	3,55%	4,10%	4,26%	4,34%	4,34%	4,29%	3,99%	3,46%	2,66%	1,58%	0,19%
15	2,71%	3,49%	4,05%	4,23%	4,34%	4,36%	4,32%	4,04%	3,53%	2,76%	1,70%	0,33%
18	2,61%	3,38%	3,94%	4,13%	4,25%	4,30%	4,28%	4,01%	3,52%	2,76%	1,72%	0,37%
25	2,33%	3,10%	3,65%	3,84%	3,96%	4,02%	4,01%	3,82%	3,40%	2,69%	1,69%	0,38%
30	2,19%	2,95%	3,51%	3,70%	3,82%	3,88%	3,87%	3,68%	3,25%	2,56%	1,57%	0,27%

3 lentelē. IRR BPO

	Kampas, laipsniais											
Atstumas tarp eiliu, m	0	10	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90
5	2,81%	3,51%	3,73%	3,71%	3,63%	3,50%	3,34%	2,90%	2,32%	1,54%	0,51%	-0,84%

	Kampas, laipsniais											
Atstumas tarp eilių, m	0	10	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90
7	2,75%	3,52%	3,95%	4,05%	4,06%	4,01%	3,89%	3,50%	2,92%	2,10%	1,01%	-0,39%
8	2,71%	3,49%	3,96%	4,08%	4,12%	4,08%	3,98%	3,62%	3,05%	2,23%	1,14%	-0,27%
9	2,65%	3,44%	3,94%	4,07%	4,12%	4,11%	4,02%	3,68%	3,12%	2,31%	1,22%	-0,19%
9,5	2,66%	3,45%	3,96%	4,09%	4,15%	4,14%	4,06%	3,73%	3,18%	2,37%	1,28%	-0,13%
10	2,65%	3,43%	3,95%	4,09%	4,16%	4,15%	4,08%	3,75%	3,20%	2,40%	1,31%	-0,10%
10,5	2,62%	3,41%	3,94%	4,08%	4,15%	4,15%	4,08%	3,76%	3,22%	2,42%	1,34%	-0,06%
11	2,60%	3,38%	3,93%	4,07%	4,14%	4,14%	4,08%	3,77%	3,23%	2,43%	1,35%	-0,04%
12	2,56%	3,35%	3,90%	4,06%	4,14%	4,14%	4,09%	3,79%	3,26%	2,46%	1,39%	-0,01%
15	2,51%	3,29%	3,85%	4,04%	4,14%	4,16%	4,12%	3,84%	3,34%	2,56%	1,51%	0,13%
18	2,41%	3,19%	3,74%	3,93%	4,05%	4,11%	4,08%	3,82%	3,33%	2,57%	1,53%	0,18%
25	2,14%	2,91%	3,46%	3,65%	3,77%	3,82%	3,81%	3,62%	3,20%	2,50%	1,50%	0,19%
30	1,99%	2,76%	3,32%	3,50%	3,62%	3,68%	3,67%	3,48%	3,06%	2,37%	1,38%	0,08%

4 lentelė. ROI 2DS

	Kampas, laipsniais											
Atstumas tarp eilių, m	0	10	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90
5	1,4021	1,5675	1,6209	1,6170	1,5974	1,5667	1,5269	1,4241	1,2927	1,1255	0,9214	0,6830
7	1,3782	1,5605	1,6667	1,6898	1,6934	1,6797	1,6510	1,5559	1,4171	1,2328	1,0071	0,7476
8	1,3677	1,5521	1,6677	1,6964	1,7063	1,6978	1,6734	1,5836	1,4462	1,2603	1,0314	0,7681

	Kampas, laipsniais											
Atstumas tarp eilių, m	0	10	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90
9	1,3542	1,5380	1,6613	1,6935	1,7070	1,7026	1,6818	1,5968	1,4621	1,2763	1,0459	0,7801
9,5	1,3509	1,5344	1,6576	1,6898	1,7033	1,6990	1,6783	1,5934	1,4590	1,2735	1,0434	0,7779
10	1,3458	1,5294	1,6579	1,6929	1,7090	1,7071	1,6887	1,6079	1,4752	1,2898	1,0583	0,7908
10,5	1,3360	1,5189	1,6470	1,6820	1,6980	1,6962	1,6780	1,5977	1,4657	1,2811	1,0505	0,7841
11	1,3312	1,5141	1,6469	1,6835	1,7018	1,7020	1,6856	1,6083	1,4783	1,2941	1,0631	0,7957
12	1,3242	1,5069	1,6429	1,6815	1,7014	1,7033	1,6884	1,6138	1,4856	1,3024	1,0717	0,8041
15	1,2925	1,4733	1,6085	1,6555	1,6826	1,6876	1,6759	1,6072	1,4839	1,3042	1,0756	0,8093
18	1,2557	1,4338	1,5681	1,6139	1,6443	1,6583	1,6515	1,5864	1,4672	1,2915	1,0665	0,8035
25	1,1746	1,3471	1,4781	1,5234	1,5527	1,5661	1,5642	1,5180	1,4167	1,2535	1,0384	0,7842
30	1,1449	1,3154	1,4449	1,4899	1,5196	1,5332	1,5315	1,4849	1,3842	1,2266	1,0169	0,7651

5 lentelė. ROI 4DS

	Kampas, laipsniais											
Atstumas tarp eilių, m	0	10	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90
5	1,2681	1,4243	1,4748	1,4711	1,4526	1,4236	1,3860	1,2890	1,1649	1,0070	0,8142	0,5892
7	1,2456	1,4177	1,5180	1,5398	1,5432	1,5303	1,5032	1,4134	1,2824	1,1083	0,8952	0,6501
8	1,2357	1,4098	1,5189	1,5461	1,5554	1,5474	1,5243	1,4396	1,3099	1,1343	0,9182	0,6695

	Kampas, laipsniais											
Atstumas tarp eilių, m	0	10	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90
9	1,2229	1,3965	1,5129	1,5433	1,5560	1,5519	1,5323	1,4520	1,3248	1,1494	0,9318	0,6808
9,5	1,2198	1,3931	1,5093	1,5397	1,5524	1,5482	1,5286	1,4485	1,3215	1,1463	0,9289	0,6782
10	1,2150	1,3884	1,5097	1,5428	1,5579	1,5561	1,5388	1,4625	1,3372	1,1621	0,9435	0,6910
10,5	1,2057	1,3785	1,4994	1,5324	1,5476	1,5459	1,5287	1,4529	1,3282	1,1539	0,9362	0,6846
11	1,2012	1,3740	1,4993	1,5339	1,5512	1,5513	1,5359	1,4629	1,3401	1,1662	0,9481	0,6956
12	1,1947	1,3672	1,4955	1,5320	1,5508	1,5526	1,5385	1,4681	1,3471	1,1741	0,9562	0,7035
15	1,1647	1,3354	1,4630	1,5074	1,5330	1,5377	1,5267	1,4618	1,3455	1,1757	0,9599	0,7085
18	1,1299	1,2981	1,4249	1,4681	1,4968	1,5101	1,5037	1,4422	1,3296	1,1637	0,9513	0,7029
25	1,0533	1,2162	1,3399	1,3827	1,4104	1,4231	1,4212	1,3776	1,2820	1,1279	0,9247	0,6847
30	1,0253	1,1863	1,3086	1,3511	1,3791	1,3920	1,3903	1,3463	1,2513	1,1025	0,9044	0,6667

6 lentelė. ROI BPO

	Kampas, laipsniais											
Atstumas tarp eilių, m	0	10	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90
5	1,2245	1,3776	1,4271	1,4235	1,4054	1,3769	1,3400	1,2449	1,1232	0,9684	0,7793	0,5586
7	1,2023	1,3711	1,4695	1,4909	1,4942	1,4816	1,4550	1,3669	1,2384	1,0677	0,8587	0,6184
8	1,1927	1,3634	1,4704	1,4970	1,5062	1,4983	1,4757	1,3926	1,2654	1,0931	0,8812	0,6373
9	1,1801	1,3503	1,4645	1,4943	1,5068	1,5028	1,4835	1,4048	1,2800	1,1080	0,8946	0,6485

	Kampas, laipsniais											
Atstumas tarp eilių, m	0	10	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90
9,5	1,1770	1,3470	1,4610	1,4907	1,5032	1,4991	1,4799	1,4013	1,2768	1,1050	0,8918	0,6459
10	1,1724	1,3424	1,4614	1,4938	1,5086	1,5069	1,4899	1,4150	1,2922	1,1204	0,9061	0,6584
10,5	1,1632	1,3326	1,4512	1,4837	1,4985	1,4969	1,4800	1,4056	1,2834	1,1124	0,8989	0,6522
11	1,1588	1,3282	1,4512	1,4851	1,5020	1,5022	1,4870	1,4155	1,2950	1,1245	0,9105	0,6629
12	1,1524	1,3216	1,4475	1,4832	1,5016	1,5034	1,4896	1,4205	1,3019	1,1322	0,9185	0,6707
15	1,1230	1,2904	1,4156	1,4591	1,4842	1,4888	1,4780	1,4144	1,3003	1,1338	0,9221	0,6755
18	1,0889	1,2539	1,3782	1,4206	1,4487	1,4618	1,4555	1,3952	1,2847	1,1220	0,9137	0,6701
25	1,0138	1,1735	1,2948	1,3368	1,3640	1,3764	1,3746	1,3318	1,2380	1,0869	0,8876	0,6523
30	0,9863	1,1442	1,2641	1,3058	1,3333	1,3459	1,3443	1,3011	1,2079	1,0620	0,8677	0,6346

7 lentelė. NPV 2DS

	Kampas, laipsniais											
Atstumas tarp eilių, m	0	10	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90
5	-161336	45728	112684	107788	83269	44820	-5013	-133699	-298262	-507657	-763316	-1061711
7	-127301	35791	130805	151484	154721	142516	116806	31721	-92467	-257438	-459381	-691559
8	-120392	25700	117287	140057	147872	141138	121785	50631	-58242	-205657	-387057	-595801
9	-113482	10997	98472	120668	129946	126899	112527	53798	-39206	-167471	-326618	-510152
9,5	-108188	13965	97783	120192	130013	127971	115036	59944	-28940	-152385	-306030	-483462

	Kampas, laipsniais											
Atstumas tarp eilių, m	0	10	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90
10	-106743	10644	92780	115188	125422	124211	112471	60786	-24033	-142583	-290572	-461569
10,5	-101199	6507	83285	104487	114588	114097	103936	57530	-19622	-128246	-264186	-421344
11	-99919	2979	77662	98253	108521	108594	99395	55911	-17248	-120837	-250785	-401179
12	-99834	-1697	71297	92024	102671	103668	95684	55584	-13275	-111690	-235663	-379394
15	-86357	-7754	51045	71499	83271	85415	80346	50470	-3137	-81344	-180772	-296589
18	-79533	-15653	32483	48887	59783	64835	62382	39047	-3720	-66718	-147374	-241671
25	-72623	-28395	5185	16804	24325	27761	27265	15411	-10542	-52379	-107543	-172702
30	-72538	-33224	-3350	7031	13867	17022	16614	5868	-17345	-53691	-102066	-160134

8 lentelė. NPV 4DS

	Kampas, laipsniais											
Atstumas tarp eilių, m	0	10	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90
5	-317880	-121595	-58125	-62766	-86009	-122455	-169695	-291682	-447679	-646174	-888524	-1171387
7	-238067	-83464	6603	26205	29057	17704	-6667	-87323	-205047	-361430	-552861	-772953
8	-218078	-79591	7228	28813	36221	29838	11492	-55958	-159164	-298906	-470863	-668740
9	-198089	-77801	2831	23872	32667	29779	16155	-39517	-127680	-249268	-400131	-574111
9,5	-189525	-73731	5724	26966	36276	34341	22079	-30146	-114402	-231421	-377069	-545265
10	-184810	-73534	4327	25568	35269	34121	22993	-26002	-106406	-218785	-359071	-521166

	Kampas, laipsniais											
Atstuma s tarp eilių, m	0	10	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90
10,5	-172727	-70627	2155	22252	31828	31362	21730	-22257	-95396	-198366	-327230	-476207
11	-168177	-70635	160	19679	29413	29482	20762	-20458	-89809	-188006	-311190	-453755
12	-164822	-71793	-2599	17049	27142	28087	20518	-17495	-82769	-176061	-293580	-429830
15	-138265	-63754	-8016	11373	22533	24565	19760	-8561	-59377	-133513	-227765	-337554
18	-121631	-61077	-15446	104	10432	15221	12896	-9224	-49765	-109484	-185941	-275329
25	-101642	-59717	-27884	-16871	-9741	-6484	-6954	-18191	-42793	-82452	-134744	-196512
30	-98287	-61020	-32701	-22860	-16380	-13389	-13776	-23962	-45967	-80422	-126278	-181324

9 lentelė. NPV BPO

	Kampas, laipsniais											
Atstuma s tarp eilių, m	0	10	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90
5	-370800	-178159	-115867	-120422	-143234	-179004	-225366	-345089	-498190	-693001	-930852	-1208464
7	-275512	-123779	-35384	-16145	-13133	-24489	-48408	-127567	-243105	-396586	-584463	-800469
8	-251101	-115186	-29978	-8794	-1524	-7788	-25793	-91991	-193281	-330429	-499194	-693398
9	-226691	-108636	-29500	-8850	-218	-3053	-16424	-71063	-157589	-276920	-424982	-595733
9,5	-217021	-103377	-25397	-4549	4588	2688	-9346	-60601	-143294	-258140	-401084	-566158
10	-211201	-101990	-25576	-4728	4792	3666	-7256	-55342	-134253	-244546	-382227	-541313
10,5	-196907	-96703	-25272	-5548	3850	3393	-6060	-49234	-121012	-222071	-348542	-494754

	Kampas, laipsniais											
Atstuma s tarp eilių, m	0	10	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90
11	-191252	-95521	-26040	-6883	2670	2738	-5821	-46276	-114339	-210713	-331610	-471529
12	-186791	-95489	-27580	-8297	1609	2536	-4892	-42199	-106262	-197822	-313160	-446880
15	-155813	-82685	-27982	-8952	2000	3995	-721	-28516	-78390	-151150	-243652	-351403
18	-135863	-76433	-31649	-16388	-6251	-1551	-3834	-25543	-65331	-123941	-198979	-286708
25	-111452	-70305	-39063	-28254	-21257	-18060	-18522	-29551	-53696	-92618	-143940	-204561
30	-106992	-70416	-42623	-32965	-26605	-23670	-24050	-34047	-55643	-89458	-134463	-188487

11 lentelė. kWh/kWp

	Kampas, laipsniais											
Atstuma s tarp eilių, m	0	10	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90
5	810,91	868,62	887,35	886,06	879,37	868,87	855,34	820,66	776,61	720,61	652,16	572,20
7	811,79	876,31	914,27	922,78	924,43	920,07	910,45	878,29	831,23	768,49	691,53	603,02
8	812,20	877,86	919,33	929,91	933,89	931,36	923,29	892,97	846,24	782,61	704,10	613,66
9	812,73	878,67	923,20	935,06	940,33	939,33	932,55	903,74	857,70	793,73	714,08	622,11
9,5	812,89	878,94	924,63	937,06	942,81	942,29	936,00	907,98	862,21	798,16	718,14	625,62
10	813,07	879,21	925,91	938,84	945,05	944,93	939,03	911,72	866,25	802,15	721,82	628,86
10,5	813,46	879,74	927,45	940,79	947,44	947,71	942,16	915,43	870,33	806,20	725,61	632,28
11	813,69	880,07	928,74	942,33	949,38	949,99	944,75	918,54	873,72	809,64	728,88	635,23

	Kampas, laipsniais											
Atstumas tarp eilių, m	0	10	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90
12	813,94	880,46	930,62	944,89	952,50	953,73	949,01	923,65	879,38	815,42	734,46	640,41
15	815,25	882,07	932,95	950,80	961,13	963,43	959,77	936,11	892,89	829,13	747,65	652,56
18	816,77	883,86	935,35	953,19	965,22	971,10	968,98	946,10	903,48	839,97	758,30	662,65
25	820,42	888,10	940,50	958,95	971,19	977,24	977,37	961,14	923,75	862,28	780,80	684,56
30	821,93	889,85	942,47	961,10	973,68	979,96	980,16	963,71	926,17	866,11	785,62	688,75

2 priedas. Saulės elektrinės sąmata optimaliam išdėstymui

10 lentelė. Sąmata

Produktas	Kiekis, vnt.	Kaina, Eur	Suma, Eur
DC/AC keitiklis	8	7800	62400
Saulės fotovoltiniai moduliai	4940	140	691600
Modulinė transformatorinė	1	35000	35000
Konstrukcijos	95	2500	237500
Kitos	1531	20	30620
Darbas	1531	30	45930
Suma:			1103050
1 kWp kaina			720

