



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
FUNDAMENTINIŲ MOKSLŲ FAKULTETAS
FIZIKOS KATEDRA

Tomas Simonavičius

SAULĖS JĖGAINIŲ EFEKTYVUMO KRITERIJŲ TYRIMAS LIETUVOS TERITORIJOJE
STUDY OF EFFICIENCY CRITERIA OF PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS IN LITHUANIA

Baigiamasis magistro darbas

Saulės elementų ir modulių inžinerijos studijų programa,
valstybinis kodas 621J91001
technologijų mokslo kryptis

Vilnius, 2014

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
FUNDAMENTINIŲ MOKSLŲ FAKULTETAS
FIZIKOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

Artūras Jukna

(Vardas, pavardė)

2014-05-20

(Data)

Tomas Simonavičius

SAULĖS JĖGAINIŲ EFEKTYVUMO KRITERIJŲ TYRIMAS LIETUVOS TERITORIJOJE
STUDY OF EFFICIENCY CRITERIA OF PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS IN LITHUANIA

Baigiamasis magistro darbas

Saulės elementų ir modulių inžinerijos studijų programa,
valstybinis kodas 621J91001
technologijų mokslo kryptis

Vadovas

doc. dr. Milda Pečiulienė
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

(Parašas) 2014-06-05
(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

doc. dr. Angelė Kaulakienė
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

(Parašas) 2014-05-27
(Data)

Vilnius, 2014

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
FUNDAMENTINIŲ MOKSLŲ FAKULTETAS
FIZIKOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

Artūras Jukna

(Vardas, pavardė)

2013-02-20

(Data)

Technologijų studijų kryptis

Saulės elementų ir modulių inžinerijos studijų programa,

valstybinis kodas 621J91001

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

..... Nr.

Vilnius

Studentui (ei) Tomui Simonavičiui.....

(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Saulės jėgainių efektyvumo kriterijų tyrimas Lietuvos teritorijoje

patvirtinta 2013 m. vasario 20 d. dekanų potvarkiu Nr. 98fm

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2014 m. gegužės 31 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

- Apžvelgti fotoelektros plėtros perspektyvas Lietuvoje;
- Aptarti saulės modulių efektyvumo matavimo sąlygas;
- Nustatyti saulės modulių efektyvumo didinimo galimybes;
- Rasti priežastis, neleidžiančias pasiekti maksimalaus modulių efektyvumo;
- Naudojantis programa PVsyst suprojektuoti skirtingų konfigūracijų saulės elektrines (įvertinant modulių pakilimo kampą, geriausią modulių išdėstymą, atstumus tarp modulių, jų tipą) bei atlikti jų techninį-ekonominį palyginimą;
- Remiantis gautais rezultatais išskirti efektyviausią saulės jėgainių technologiją Lietuvoje.

Vadovas

(Paraša)

.....doc. dr. Milda Pečiulienė.....

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

(Parašas)

Tomai Simonavičiui

(Vardas, pavardė)

2013 02 21

(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų
sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo
organizavimo tvarkos aprašo 2013–2014 m. m.
2 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Tomas Simonavičius 20073655

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)
Fundamentinių mokslų

(Fakultetas)

Saulės elementų ir modulių inžinerija Semifm12
(Studijų programa, akademinė grupė)

**BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽINGUMO DEKLARACIJA**

2014 m. gegužės 5 d.
(Data)

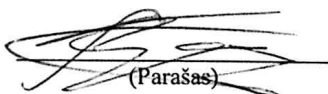
Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas (projektas) tema: Saulės jėgainių efektyvumo
kriterijų tyrimas Lietuvos teritorijoje

patvirtintas 20___ m. _____ d. dekanų potvarkiu Nr. _____, yra
savarankiškai parašytas. Šiame darbe (projekte) pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar
netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą (projektą), mane konsultavo
mokslininkai ir specialistai: _____

Mano darbo (projekto) vadovas doc. dr. Milda Pečiulienė

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą (projektą) nėra. Jokių įstatymų nenumatytų
piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).


(Parašas)

TOMAS SIMONAVIČIUS

(Vardas ir pavardė)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
FUNDAMENTINIŲ MOKSLŲ FAKULTETAS
FIZIKOS KATEDRA

Technologijų studijų kryptis

Saulės elementų ir modulių inžinerijos studijų programa,

valstybinis kodas 621J91001

PAŽYMA
APIE BAIGIAMĄJĮ MAGISTRO DARBĄ

.....Nr.

Vilnius

Tomas Simonavičius

Studentas (ė).....
(Vardas, pavardė)

Studento (ės) studijų svertinis įvertinimų vidurkis.....balo.

Baigiamojo darbo tema: Saulės jėgainių efektyvumo kriterijų tyrimas Lietuvos teritorijoje

Baigiamasis darbas peržiūrėtas ir studentui (ei)
leidžiama ginti šį baigiamąjį darbą magistro laipsnio suteikimo komisijoje.

Katedros vedėjas

.....
(Parašas)

prof. dr. Artūras Jukna
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

VADOVO ATSILIEPIMAS
APIE BAIGIAMĄJĮ MAGISTRO DARBĄ
2014-05-19

Magistrantas Tomas Simonavičius, baigiamajame magistro darbe „Saulės jėgainių efektyvumo kriterijų tyrimas Lietuvos teritorijoje“, išklėlė tikslą - atrasti priežastis, kurios skatina arba stabdo saulės elektrinių plėtrą Lietuvoje, ir nustatyti, kokios technologijos saulės elektrinės ir saulės elementai efektyviausiai dirba Lietuvos klimatinėje zonoje bei nustatyti saulės modulių efektyvumo didinimo galimybes ir surasti priežastis neleidžiančias pasiekti maksimalų efektyvumą. Darbe magistrantas apžvelgė fotoelektros plėtros perspektyvas Lietuvoje bei saulės elementų efektyvumo didinimo būdus. Naudojantis programa PVsyst suprojektavo skirtingų konfigūracijų saulės elektrines. Magistrantas atliko skirtingos technologijos saulės jėgainių technoeconominę analizę. Magistranto darbo rezultatai yra reikšmingi ir suteikiantys žinių apie įvairių technologijų saulės jėgainių galimą plėtrą Lietuvos teritorijoje.

Magistranto Tomo Simonavičiaus dviejų metų nuoseklaus darbo rezultata vertinu teigiamai ir siūlau leisti ginti viešame magistrų baigiamųjų darbų gynimo vertinimo ir magistro laipsnio suteikimo komisijos posėdyje.

Vadovas

.....
(Parašas)

dr. doc., Milda Pečulienė

.....
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Fundamental Sciences
Department of Physics

ISBN ISSN
Copies No.
Date-.....-.....

Master Degree Studies **Solar Cell and Modules Engineering** study programme Master Graduation Thesis

Title **Study of Efficiency Criteria of Photovoltaic Power Plants in Lithuania.**

Author **Tomas Simonavičius**

Academic supervisor **Assoc Prof Dr Milda Pečiulienė**

Thesis
language: Lithuanian

Annotation

This thesis work includes study on efficiency criteria of photovoltaic power plants. It provides information about photovoltaic power plants, their components, efficiency of these plants and current situation in energy sector of Lithuania. The study describes factors that determine the solar modules and power efficiency and overviews efficiency enhancement techniques. Different types and technologies of photovoltaic power plants were designed and technical-economical comparison was made by using program PVSYST. The study on efficiency criteria of photovoltaic power plants determined optimal tilt angle of solar modules and distance between solar module bands. The produced energy was calculated using stationary, single axis tracking and dual axis tracking construction. After the technical-economical comparison of different technology and efficiency photovoltaic modules used in power plants it was determined which photo-voltaic power plants are most economically beneficial in Lithuania. Conclusions are given at the end of the work. Thesis consists of: 68 p. of text, 46 pictures, 15 tables and 30 bibliographical entries.

Keywords: Photovoltaic power plant, photovoltaic modules, efficiency enhancement, elevation angle, solar cells.

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Fundamentinių mokslų fakultetas
Fizikos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Saulės elementų ir modulių inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas **Saulės jėgainių efektyvumo kriterijų tyrimas Lietuvos teritorijoje.**

Autorius **Tomas Simonavičius**

Vadovas **doc. dr. Milda Pečiulienė**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Šiame baigiamajame darbe atliekamas saulės jėgainių efektyvumo kriterijų Lietuvos teritorijoje tyrimas. Aptariamos saulės jėgainės, jų komponentai ir efektyvumas, dabartinė Lietuvos energetikos situacija bei klimato sąlygų tinkamumas jėgainių statybai. Aprašomi veiksniai, lemiantys saulės jėgainių ir modulių efektyvumą ir apžvelgiami efektyvumo didinimo būdai. Naudojant programą PVSYST, projektuojamos skirtingų tipų ir technologijų saulės elektrinės ir atliekamas jų techninis-ekonominis palyginimas. Atliekant saulės jėgainių efektyvumo kriterijų tyrimą, parenkamas optimaliausias saulės jėgainės variantas, nustatant optimaliausią saulės modulių posvyrio kampą ir atstumą tarp saulės modulių juostų. Apskaičiuojamas saulės jėgainės pagaminamos energijos kiekis, naudojant skirtingas saulės jėgainės konstrukcijas: esant stacionariai konstrukcijai, su vienos ašies sekimo sistemomis ir dviaše sekimo sistema. Atlikus skirtingų technologijų ir efektyvumų saulės modulių naudojančių jėgainių techninį-ekonominį palyginimą nustatyta kokios technologijos saulės jėgainės ekonomiškai naudingiausia statyti Lietuvoje. Darbo pabaigoje pateikiamos išvados. Darbo apimtis – 68 p. teksto, 46 iliustr., 15 lent., 30 bibliografinių šaltinių.

Prasminiai žodžiai: Saulės jėgainės, saulės moduliai, efektyvumo didinimas, posvyrio kampas, saulės elementai.

TURINYS

Paveikslų sąrašas	8
Lentelių sąrašas	10
Santrumpų sąrašas	11
ĮVADAS.....	12
1. Saulės elektrinės.....	14
1.1. Fotoelektros plėtros perspektyvos	14
1.2. Fotovoltinės sistemos	15
1.3. Saulės elementai	16
1.4. Saulės elementų veikimo principai.....	17
1.5. Inverteriai	19
1.6. Saulės elementus laikančiosios konstrukcijos	20
1.7. Saulės jėgainių integravimo galimybės Lietuvoje.....	22
1.7.1. Klimato sąlygos saulės modulių statybai	24
2. Saulės jėgainių efektyvumas	25
2.1. Saulės jėgainės kokybės koeficientas	26
2.2. Kokybės koeficiento reikšmę lemiantys veiksniai	27
2.3. Saulės elementų efektyvumo didinimas	29
2.4. Veiksniai, darantys įtaką saulės modulių efektyvumui	30
2.4.1. Saulės elementų neatitikties nuostoliai, jų vengimas ir efektyvumo didinimas.....	33
2.4.2. Optiniai nuostoliai, jų vengimas ir efektyvumo didinimas	34
2.4.3. Mažai geležies turintis stiklas	35
2.4.4. Saulės elemento paviršiaus tekstūravimas	36
2.4.5. Galinių Lamberto reflektorių panaudojimas	37
2.4.6. Galinių kontaktų saulės elementai	38
2.4.7. Giliai įdiegtų kontaktų technologija.....	39
2.4.8. Saulės elementai su koncentratoriais	39
2.4.9. Tandemo tipo saulės elementai	41
3. Saulės jėgainės optimaliausio varianto parinkimas, projektuojant Lietuvos klimato zonoje ...	42
3.1. Saulės jėgainių projektavimo programa PVSYST	43
3.2. Tiriamasis objektas.....	46
3.3. Saulės jėgainės projektavimas ir optimizavimas.....	47
3.3.1. Klimato sąlygų parinkimas	47

3.3.2. Saulės jėgainės projektavimas.....	50
3.3.3. Saulės jėgainės optimizavimas parenkant saulės modulių posvyrio kampą.....	53
3.3.4. Saulės jėgainės optimizavimas parenkant optimaliausią atstumą tarp saulės modulių juostų.....	54
3.3.5. Saulės jėgainės optimizavimas naudojant vienašę sekimo sistemą su horizontalia rytų - vakarų ašimi	55
3.3.6. Saulės jėgainės optimizavimas naudojant vienašę sekimo sistemą su horizontalia šiaurės - pietų ašimi.....	56
3.3.7. Saulės jėgainės optimizavimas naudojant dviašę sekimo sistemą.....	57
3.4. Skirtingos technologijos saulės jėgainių techninis-ekonominis palyginimas.....	58
IŠVADOS	64
Literatūra.....	66

Paveikslų sąrašas

- 1 pav.** Saulės jėgainės schema (Marangoly 2012)
- 2 pav.** Pagrindinės fotomodulių rūšys (Marangoly 2012)
- 3 pav.** p - n jungties schema (Saulės elemento tyrimas 2004)
- 4 pav.** Saulės fotoelemento struktūra (Saulės elemento tyrimas 2004)
- 5 pav.** Saulės jėgainių inverterių rūšys (Cramer et al. 2004)
- 6 pav.** Sekimo sistemos įtaka generuojamos energijos kiekiui (Marangoly 20122012)
- 7 pav.** Vienašės sekimo sistemos (Automatic solar tracking system 2009)
- 8 pav.** Dviašės sekimo sistemos (Automatic solar tracking system 2009)
- 9 pav.** Nacionalinio tinklo schema (Šiuo metu dirbančios šiluminės jėgainės 2012)
- 10 pav.** Fotoelektros gamybos potencialas Lietuvoje (Šúri et al. 2007)
- 11 pav.** Pakeičiami ir nepakeičiami veiksniai, lemiantys optimalų fotovoltinės sistemos našumą (Mani et al. 2010)
- 12 pav.** 24 MW saulės jėgainės PR kitimo grafikas keičiantis oro sąlygomis (Dierauf 2013)
- 13 pav.** Saulės jėgainėje skaičiuotinių nuostolių diagrama (Kymaki et al. 2008)
- 14 pav.** Saulės elementų efektyvumo matavimo sistema (Honsberg, Bowden 2012)
- 15 pav.** Saulės spinduliuotės spektras; λ_g atitinka bangos ilgį, kurio fotono energija atitinka Si draudžiamosios juostos plotį E_g (Saulės elemento tyrimas 2004)
- 16 pav.** Elektros energijos tekėjimas, kai dalis modulio yra uždengta (Honsberg, Bowden 2012)
- 17 pav.** Optinių nuostolių šaltiniai (Honsberg, Bowden 2012)
- 18 pav.** Šviesos pralaidumas pro standartinį ir mažai geležies turintį stiklą (Sunarc Technology 2012)
- 19 pav.** Skirtingų bangos ilgių sugertis pro standartinį ir mažai geležies turintį stiklą (Sunarc Technology 2012)
- 20 pav.** Tekstūruotas puslaidininkio paviršius piramidžių formos būdu (Honsberg, Bowden 2012)
- 21 pav.** Tekstūruotas puslaidininkio paviršius atvirkščių piramidžių formos būdu (Honsberg, Bowden 2012)
- 22 pav.** Lazeriu tekstūruoto puslaidininkio paviršius (Dobranski, Drygala 2008)
- 23 pav.** Galinis Lamberto reflektorius (Honsberg, Bowden 2012)
- 24 pav.** Trumpojo jungimo srovės schema sugaunant ir nesugaunant šviesos (Honsberg, Bowden 2012)
- 25 pav.** Saulės elementai su kontaktais apatinėje dalyje (Honsberg, Bowden 2012)

- 26 pav.** Saulės elementas su giliais kontaktais (Honsberg, Bowden 2012)
- 27 pav.** Saulės modulių su koncentratoriais tipai (Honsberg, Bowden 2012)
- 28 pav.** Lęšiniai saulės koncentratoriai (Swanson 2003)
- 29 pav.** Tandemo tipo saulės elementai (Honsberg 2009)
- 30 pav.** Tandemo tipo saulės elemento maksimalus teorinis galimas efektyvumas (Honsberg 2009)
- 31 pav.** Programos PVSYST projektavimo tipo pasirinkimo langas
- 32 pav.** Programos PVSYST 3-D projektavimo įrankis
- 33 pav.** Žemės sklypo, kuriame bus saulės jėgainė, schema
- 34 pav.** Projektinė saulės jėgainės schema
- 35 pav.** PVSYST programos koordinatų ir vietovės parinkimo langas
- 36 pav.** Saulės kelio diagrama
- 37 pav.** Albedo reikšmės
- 38 pav.** Projektinė saulės jėgainės schema
- 39 pav.** Saulės modulių išdėstymo ant konstrukcijų schema
- 40 pav.** Projektuojamos saulės jėgainės saulės kelio diagrama
- 41 pav.** Specifinis pagamintos elektros energijos kiekis per dieną
- 42 pav.** Elektros energijos priklausomybė nuo atstumo tarp saulės modulių juostų
- 43 pav.** Vienašė sekimo sistema su horizontalia rytų – vakarų ašimi
- 44 pav.** Vienašė sekimo sistema su horizontalia šiaurės – pietų ašimi
- 45 pav.** Dviašė sekimo sistema
- 46 pav.** Žemės kainos įtaka grynajam pelnui, kai yra statomos skirtingų technologijų saulės jėgainės (A - vidutinio efektyvumo saulės modlius naudojanti jėgainė, B – aukšto efektyvumo, C – žemo)

Lentelių sąrašas

- 1 lentelė.** Populiariausių komerciškai prieinamų saulės elementų specifikacijos (Marangoly 2012)
- 2 lentelė.** Pusedininkinių draudžiamosios juostos (Saulės elemento tyrimas 2004)
- 3 lentelė.** Atskirų saulės modulių komponentų įtaka jėgainių produktyvumui (Saulės jėgainės įrengimo procesas 2013)
- 4 lentelė.** Supirkimo tarifai (Informacinių technologijų pasaulis 2012)
- 5 lentelė.** Kauno miesto klimato sąlygos
- 6 lentelė.** Suprojektuotos saulės jėgainės skaičiavimų rezultatai
- 7 lentelė.** Skaičiavimų rezultatai parenkant skirtingą saulės modulių posvyrio kampą
- 8 lentelė.** Skaičiavimų rezultatai parenkant optimaliausią atstumą tarp saulės modulių juostų
- 9 lentelė.** Saulės jėgainės, naudojančios vienašę sekimo sistemą su horizontalia rytų - vakarų ašimi, skaičiavimų rezultatai
- 10 lentelė.** Saulės jėgainės, naudojančios vienašę sekimo sistemą su horizontalia šiaurės - pietų ašimi, skaičiavimų rezultatai
- 11 lentelė.** Saulės jėgainės, naudojančios dviašę sekimo sistemą, skaičiavimų rezultatai
- 12 lentelė.** Skirtingo efektyvumo saulės modulių specifikacijos
- 13 lentelė.** Skirtingo efektyvumo saulės modulių naudojančių jėgainių kainoraštis
- 14 lentelė.** Skirtingo efektyvumo saulės modulių naudojančių jėgainių skaičiavimo rezultatai
- 15 lentelė.** Skirtingo efektyvumo saulės modulių naudojančių saulės jėgainių ekonominis palyginimas

Santrumpų sąrašas

AM – (angl. *air mass*) oro masės koeficientas

a-Si – amorfinis silicis

CdTe - kadmio telūridas

CIGS - vario indžio galio di – selenidas

CIS - vario indžio di – selenidas

c-si - kristalinis silicis

EES – elektros energetikos sistema

FEM - fotoelektriniai moduliai

FM – fotomoduliai

GaAs – galio arsenidas

GH - (angl. *greenhouse effect*) šiltnamio efektas

IAE – Ignalinos atominė elektrinė

InGaN - indžio galio nitridas

NREL - Nacionalinė atsinaujinančiosios energijos laboratorija

PR - (angl. *perfomance ratio*)- kokybės koeficientas)

PV - (angl. *PV module*) fotovoltiniai saulės moduliai

TM - (angl. *thermal collector*) šilumos kolektorius

UV – ultravioletiniai spinduliai

IVADAS

Energija yra mus supančios aplinkos varančioji jėga. Globalios problemos: klimato kaita, priklausomybė nuo importuojamo kuro ir kylančios energijos kainos verčia mus iš naujo pergalvoti, kaip mes gaminame ir naudojame energiją.

Uždarius Ignalinos atominę elektrinę, Lietuva neturi galimybių pagaminti užtekčiai elektros energijos šalies poreikiams tenkinti. Norėdama tapti lygiaverte Europos Sąjungos nare, Lietuva turi būti integruota į bendrą Europos energijos sistemą, o pati šalis turi turėti pakankamai išteklių šalies poreikiams tenkinti, todėl šalies nacionalinėje strategijoje yra iškeltas tikslas – iki 2020 m. 23 % elektros energijos turi būti pagaminta iš atsinaujinančių energijos šaltinių. Kadangi šalyje atsinaujinančių išteklių resursai yra neriboti, tai yra vienas iš svarbiausių prioritetų, identifikuotų nacionalinėje energetikos politikoje.

Saulės energija naudojama labai plačiai: skaičiuotuvuose, palydovuose, kosminėse stotyse, naujo tipo automobiliuose, dviračiuose, elektros energiją gaminančiose jėgainėse, pastatuose. Vienas didžiausių saulės energijos naudojimo privalumų yra tas, kad jos yra visur, taigi įrenginiai gali būti mobilūs, jie neturi būti susieti laidais prie kokio nors stacionaraus objekto. Fotoelementus ketindami įsikrauti mobiliuosius telefonus ar kitoms reikmėms įsigyja netgi alpinistai. Visi minėti mobilūs elektros įrenginiai yra pagaminti iš fotoelementų (Milutienė 2011).

Pasak A. Krotkaus (2010), saulės elementai, verčiantys šviesos energiją elektra, yra bene seniausieji žinomi puslaidininkiniai prietaisai. Pirmieji 4 % efektyvumo silicio saulės elementai buvo sukurti Bello laboratorijoje (JAV) daugiau kaip prieš 50 metų. Deja, jie tobulėjo kur kas lėčiau, nei kiti puslaidininkių elektronikos komponentai, kuriems galioja garsusis Mūro dėsnis: kas porą metų prietaiso parametrai pagerėja dvigubai, todėl šiandien parduodamų saulės elementų energijos vertimo efektyvumas retai viršija 18 %.

Viena iš svarbiausių saulės elementų savybių yra jų efektyvumas. Šiuo metu didžiausias laboratorijoje pasiektas efektyvumas yra 43,5 %. Bet kol kas tokio efektyvumo saulės elementai yra labai brangūs ir komerciškai negaminami. Komerciškai prieinamų saulės elementų efektyvumas svyruoja nuo 12 iki 20 %.

Problema. Didelė saulės jėgainių statybos paklausa paskatino rinkoje atsirasti daug neprofesionalių įmonių, kurios stato ir projektuoja tokias jėgaines. Dauguma tokių įmonių susikūrė apie 2010 m., kai buvo įsigalioję aukšti elektros energijos supirkimo tarifai. Patirties ir žinių stoka, taip pat siekis labai greitai įgyvendinti užsakytas saulės jėgainių statybas, paskatino rinkoje atsirasti nekokybiškai ir neefektyviai suprojektuotų saulės jėgainių.

Darbo aktualumas. Saulės jėginių efektyvumą lemia pasirinktų saulės modulių efektyvumas. Saulės elementų efektyvumo didinimas yra svarbus veiksnys, mažinantis saulės elementų sąnaudas, kadangi tam pačiam energijos kiekiui gauti reikia mažiau saulės elementų. Be abejo, saulės elementų efektyvumo augimas reikalauja naujų technologinių sprendinių, kuriems surasti būtini moksliniai tyrimai.

Darbo tikslas. Atrasti priežastis, kurios skatina arba stabdo saulės elektrinių plėtrą Lietuvoje, ir nustatyti, kokios technologijos saulės elektrinės ir saulės elementai efektyviausiai veikia Lietuvos klimato zonoje. Taip pat nustatyti saulės modulių efektyvumo didinimo galimybes ir surasti priežastis, neleidžiančias pasiekti maksimalų efektyvumą.

Tikslo įgyvendinimui keliama šie uždaviniai:

1. Apžvelgti fotoelektros plėtros perspektyvas Lietuvoje.
2. Aptarti saulės jėginių sudedamąsias dalis.
3. Aptarti saulės jėginių ir fotomodulių efektyvumo didinimo būdus.
4. Naudojantis programa PVSYST suprojektuoti skirtingų konfigūracijų saulės elektrines bei atlikti jų techninį-ekonominį palyginimą. Remiantis gautais rezultatais išrinkti efektyviausią saulės jėginių technologiją Lietuvoje.

Naudojami metodai. Darbe atliekama aktualios literatūros apžvalga bei, naudojantis programoma PVSYST, projektuojamos skirtingų tipų ir technologijų saulės elektrinės ir atliekamas jų techninis-ekonominis palyginimas.

Darbo struktūra. Darbą sudaro trys skyriai. Pirmame skyriuje aptariamos saulės jėgainės, jų komponentai ir efektyvumas, dabartinė Lietuvos energetikos situacija bei klimato sąlygų tinkamumas jėginių statybai. Antrame skyriuje aprašomi veiksniai, lemiantys saulės jėginių ir modulių efektyvumą, ir pateikiami efektyvumo didinimo būdai. Trečiame skyriuje, naudojant programą PVSYST, projektuojamos skirtingų tipų ir technologijų saulės elektrinės ir atliekamas jų techninis-ekonominis palyginimas.

1. SAULĖS ELEKTRINĖS

1.1. FOTOELEKTROS PLĖTROS PERSPEKTYVOS

Lietuvoje fotoelektra nėra plačiai naudojama, kadangi šalis turi gerai išplėtotą elektros paskirstymo infrastruktūrą ir pakankamai didelę patirtį gaminant elektros energiją tradiciniais būdais, tačiau pasaulyje ši elektros energijos rūšis, paremta tiesioginiu saulės šviesos vertimu į elektros energiją, vertinama kaip greičiausiai pasaulyje besivystanti energetikos rūšis. Prognozuojama, kad ES šalyse iki 2020 m. suminė saulės elektrinių galia turėtų siekti iki 450 GW, o visame pasaulyje - iki 2050 m. Iš fotoelektros bus pagaminama 11% pasaulio elektros energijos, ir tai leis išvengti apie 2,3 gigatonų (GT) CO₂ emisijų per metus (Blakers 2009).

Fotoelektros technologijų pramonė yra viena iš sparčiausiai besirutuliojančių aukštųjų technologijų sektorių pasaulyje. Vienas iš labiausiai lemiančių veiksnių fotoelektros plėtrą yra fotoelektrinių modulių kainos. 1976 m. šių modulių kainos siekė apie 60 \$/W, o po to ženkliai ir gana sparčiai mažėjo iki maždaug 3 - 4 \$/W (minimali kaina). Planuojama, kad 2020 m. kaina sieks apie 0,5 \$/W. Fotoelektros pramonės atstovai, ieškodami būdų, kaip sumažinti fotoelektros prietaisų gamintojų sąnaudas, didelį dėmesį skiria ir fotoelektrinių modulių efektyvumo didinimui. 2000 m. Vokietijoje buvo sukurta plonaplėvių CIGS modulių gamybos technologija, kurią naudojant ženkliai sumažėjo šio tipo fotoelektrinių modulių gamybos sąnaudos ir beveik dvigubai padidėjo energijos konversijos efektyvumas (Fotoelektros plėtros perspektyvos 2012). 2002 m. JAV mokslininkai išbandė indžio galio nitridą (InGaN). Iš šios medžiagos pagaminti daugybės jungčių fotoelektriniai keitikliai su keliais skirtingais sluoksniais turėtų sugerti visą šviesos spektro bangų energiją, todėl manoma, kad jų efektyvumas turėtų būti apie 50% ar netgi didesnis. 2004 m. JAV mokslininkai išbandė dar vienos naujos medžiagos tinkamumą fotoelektriniam keitikliui gaminti – cinko mangano telūro lydinį (ZnMnTe) ir nustatė, kad iš šios medžiagos pagamintas vienos jungties fotoelektrinis keitiklis gali priimti visą saulės spektrą, o šis paprasčiausios vienasluoksnės struktūros keitiklis gali turėti naudingumo koeficientą iki 57 %, kai šiuo metu naudojamų fotoelektrinių modulių efektyvumas yra 2-3 kartus mažesnis (Fotoelektros plėtros perspektyvos 2012).

Nepaisant minėtų mokslo naujovių fotoelektros pramonėje, mokslininkai įvardija fotoelektros pramonės sritis, kurioms būtini tolesni tyrimai bei bandymai, norint toliau sėkmingai plėtoti fotoelektros panaudojimą. 2013-2020 m. ir 2020-2030 m. laikotarpiais didesnis dėmesys bus ir toliau skiriamas sąnaudų mažinimui bei efektyvumo didinimui, naujų technologijų taikymui fotomodulių gamyboje, įrangos naudojimo trukmei, gamtos netešiančių

gamybos procesų tobulinimui, medžiagų resursų poreikio mažinimui, efektyvesnių medžiagų panaudojimui (Blakers 2009).

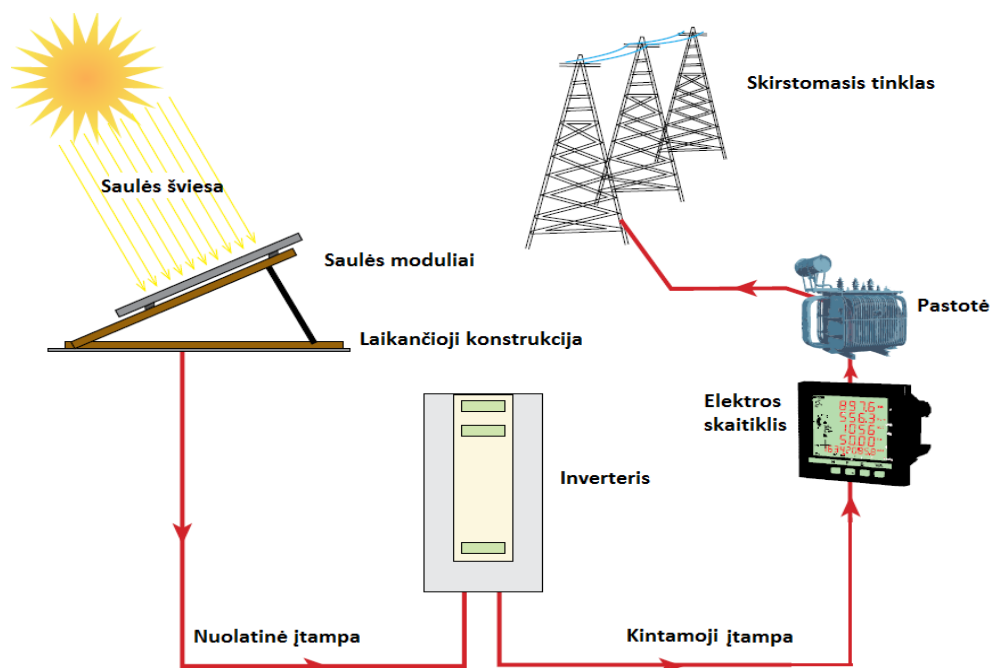
1.2. FOTOVOLTINĖS SISTEMOS

Fotovoltinės sistemos arba saulės elektrinės yra įrenginiai, verčiantys saulės energiją į elektros energiją. Saulės elektrinės yra aplinkai draugiškos, neieškoja iškastinio kuro ir neskleidžia jokių šiltnamio efektą sukeliančių dujų. Jos gali būti įvairių dydžių ir skirtingų galių (Marangoly 2012).

Pagrindinės saulės jėgainių sudedamosios dalys yra šios:

- fotovoltiniai moduliai;
- inverteriai;
- metalinės konstrukcijos;
- kabeliai ir jungtys;
- įžeminimas ir žaibosauga;
- stebėsenos sistema.

1 pav. pavaizduota saulės elektrinės schema.



1 pav. Saulės jėgainės schema (Marangoly 2012)

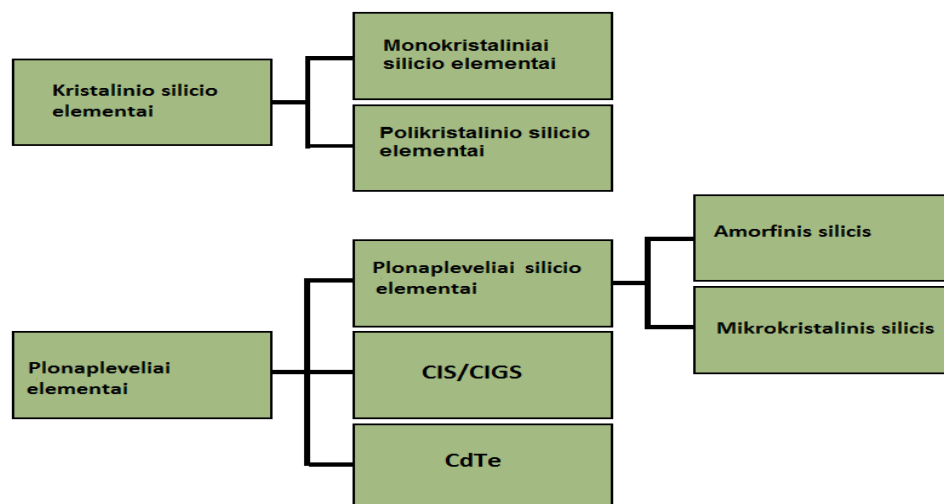
Bendras saulės jėgainės efektyvumas priklauso nuo jos komponentų kokybės, efektyvumo ir aplinkos sąlygų. Pagrindiniai veiksniai, dėl kurių prarandamas saulės elektrinių efektyvumas:

- aplinkos sąlygos (aukšta temperatūra, dulkės);
- inverteriai 2 – 5 %;
- kabeliai ir jungtys 1 – 5 %;
- stebėsenos sistema 1 – 2 %;
- fotoelementų technologijos;
- fotoelementų pagaminimo kokybė;
- saulės elektrinės surinkimo kokybė.

1.3. SAULĖS ELEMENTAI

Fotomoduliai yra pagrindinė saulės jėgainių sudedamoji dalis. Dėl fotomodulių saulės energija yra verčiama į elektros energiją. Pagrindinės komerciškai prieinamos saulės elementų rūšys pateiktos 2 pav.

Saulės baterijos (moduliai) yra skirstomos į dvi pagrindines kategorijas: kristalinio silicio saulės elementai ir plonaplėveliai elementai. Kristalinio silicio elementai skirstomi į dvi subkategorijas – monokristaliniai ir polikristaliniai silicio elementai, o plonaplėvelių elementų kategorija skirstoma į plonaplėvelius silicio elementus (amorfino silicio ir mikrokristalinio silicio), vario indžio selenido (CIS) ar vario indžio galio senenido (CIGS) elementus ir kadmio telurido (CdTe) elementus.



2 pav. Pagrindinės fotomodulių rūšys (Marangoly 2012)

Visų saulės modulių specifikacijos pateiktos 1 lentelėje. Kristalinio silicio saulės elementai yra patys populiariausi ir užima 90 % rinkos. Viena iš priežasčių yra aukštesnis efektyvumas, palyginti su kitomis fotomodulių rūšimis. Kita vertus, šių modulių kaina yra didesnė. Kristalinio silicio saulės elementai skirstomi į dvi rūšis: monokristaliniai ir polikristaliniai. Polikristaliniai moduliai yra pigesni, bet jų efektyvumas mažesnis nei monokristalinių modulių (Cramer et al. 2004).

1 lentelė. Populiariausių komerciškai prieinamų saulės elementų specifikacijos (Marangoly 2012)

Technologija	Kristalinis silicis	Amorfinis silicis	Kadmio telūridas	Vario indžio galio di selenidas
Santrumpa	c-Si	a-Si	CdTe	CIGS arba CIS
Fotoelemento storis	Stori sluoksniai (200-300 μm)	Ploni sluoksniai ($<1\mu\text{m}$)	Ploni sluoksniai ($<1\mu\text{m}$)	Ploni sluoksniai ($<1\mu\text{m}$)
Fotoelementų efektyvumas	12-21%	5-7%	8-11%	8-11%
Temperatūrinis koeficientas	-0,50%/°C	-0,21%/°C	-0,25%/°C	-0,36%/°C

Plonaplėveliai saulės elementai yra pagaminti iš labai plonų puslaidininkio sluoksnių. Ši technologija leidžia sumažinti šių elementų kainą, bet kartu gaunamas mažesnis efektyvumas.

Plonaplėveliai saulės elementai pasižymi mažesniu galios praradimu dėl aukštos temperatūros, kuris yra beveik dvigubai mažesnis nei kitų saulės elementų. Naudojant šiuos elementus, sugeneruojama apie 20% daugiau energijos esant išsklaidytos saulės šviesos sąlygomis (t.y. debesuotomis dienomis ar lyjant).

1.4. SAULĖS ELEMENTŲ VEIKIMO PRINCIPAI

Fotovoltinių elementų veikimas pagrįstas fotovoltiniu efektu – įtampos arba srovės atsiradimu, medžiagą paveikus šviesa. Daugumos rinkoje esančių saulės modulių pagrindinė gamybinė medžiaga yra silicis. Silicis dažniausia naudojamas todėl, kad jis yra pusiau laidus, o jo elektroninės savybės gali būti keičiamos įdėjus šiek tiek priemaišų.

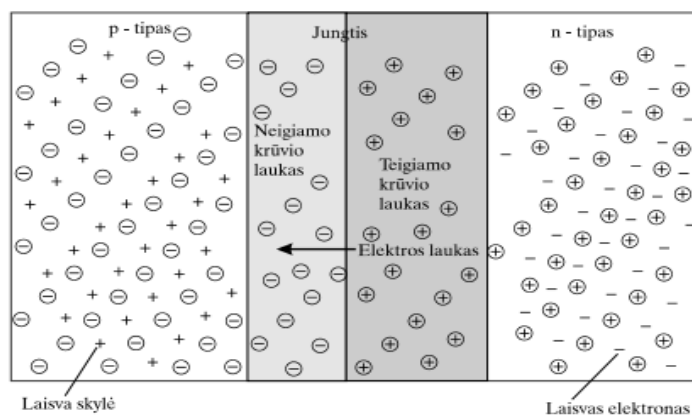
Saulės fotoelementuose naudojamos medžiagos turi nuo 1,0 iki 1,75 eV draudžiamąją juostą. Diapazone nuo infraraudonųjų iki ultravioletinių šviesos spindulių, šviesos fotonų energija yra apie 0,5 – 2,9 eV. 2 lentelėje nurodyti kai kurių puslaidininkių draudžiamųjų juostų dydžiai. Draudžiamosios juostos plotis lemia saulės elemento atviros grandinės įtampą. Platesnė

draudžiamoji juosta reiškia, kad tos medžiagos atomo valentiniais elektronams perkelti į laidumo juostą reikalinga didesnė energija (mažesnio bangos ilgio šviesa). Draudžiamosios juostos dydis yra svarbus saulės elementų veikimui, kadangi fotonai, ateinantys iš saulės, yra skirtingos energijos (Saulės elemento tyrimas 2004).

2 lentelė. Puslaidininkių draudžiamosios juostos (Saulės elemento tyrimas 2004)

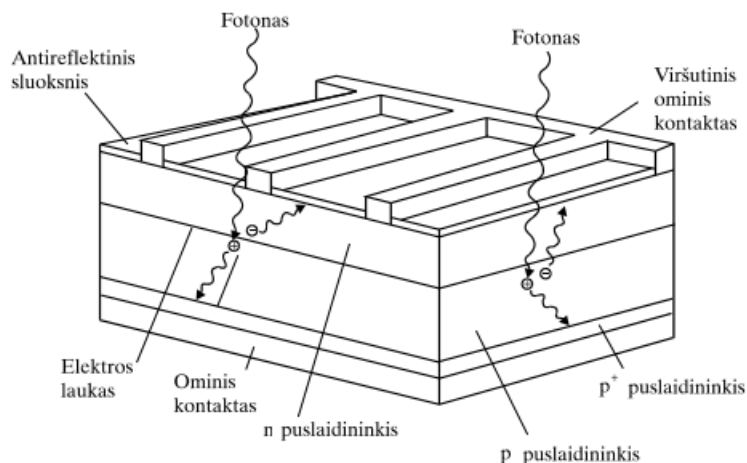
Medžiaga	Draudžiamoji juosta , eV
Monokristalinis silicis	1,12
Amorfinis silicis	1,75
Kadmio telūridas	1,44
Galio arsenidas	1,43

Norint, kad puslaidininkis veiktų kaip saulės fotoelementas, turi būti formuojama p-n jungtis (3 pav.). Apšvietus saulei fotoelementą, silicyje generuojamos skylių ir elektronų poros, jonizuojami silicio atomai. Šie, veikiami p-n jungties potencialų skirtumo, pradeda judėti link skirtingų tipų laukų. Elektronai yra neigiami krūvininkai, o skylės teigiami krūvininkai, todėl elektrinis laukas elektronus traukia prie n tipo puslaidininkio, kuris yra prie viršutinio kontakto, o skylės - prie p tipo puslaidininkio, esančio prie apatinio kontakto, pagaminto iš vientiso metalo sluoksnio. Šiuos sluoksnius sujungus išorine grandine, laisvieji elektronai keliauja į p tipo silicio sluoksnį ir ten rekombinuojasi su skylėmis, išlaisvindami savo krūvio energiją. Tiek vienoje, tiek kitoje puslaidininkio plokštelės pusėje suformuoti metaliniai elektrodai, prie kurių jungiama apkrova (Saulės elemento tyrimas 2004).



3 pav. p - n jungties schema (Saulės elemento tyrimas 2004)

4 pav. pavaizduota saulės fotoelemento struktūra.



4 pav. Saulės fotoelemento struktūra (Saulės elemento tyrimas 2004)

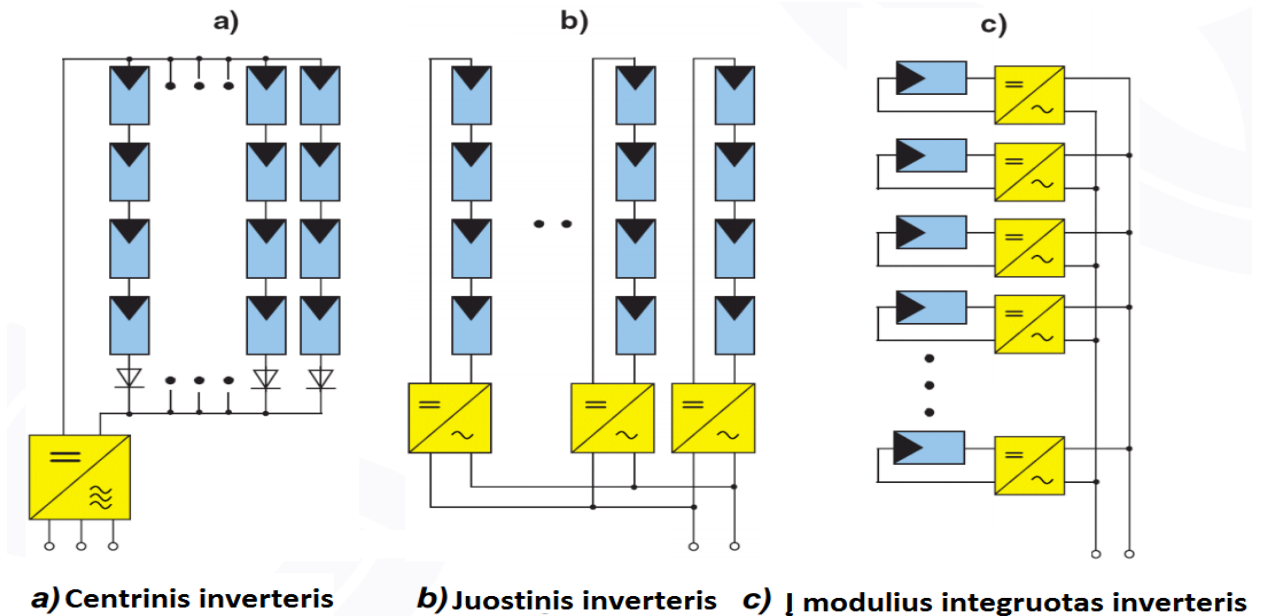
Saulės elementų gamybai gali būti panaudojamas bet koks puslaidininkis, o saulės elementų eksploatacines charakteristikas lemia puslaidininkio prigimtis, elemento struktūra bei jo gamybos technologija.

1.5. INVERTERIAI

Saulės modulių gaminama elektra yra nuolatinės įtampos, o skirstomajame tinkle yra naudojama kintamoji įtampa. Dėl to yra naudojami inverteriai, paverčiantys nuolatinę įtampą į kintamąją. Inverteriai yra trijų rūšių (Cramer et al. 2004):

- Centriniai – paprasta instaliacija, didelis patikimumas ir maža kaina. Pagrindiniai trūkumai: padidėję nesutapties nuostoliai ir nėra maksimalios galios taško sekos kiekvienai saulės modulių juostai. Bendra saulės jėgainės galia krenta, kai dalis modulių skirtingu kampu pasukti į saulę arba dalis saulės modulių yra nevienodai apšviesti.
- Juostiniai inverteriai – bendra juostinių inverterių kaina yra didesnė nei centrinių, bet būna mažesni nesutapties nuostoliai ir yra maksimalios galios taško sekimas kiekvienai saulės modulių juostai. Saulės elektrinių efektyvumas, naudojant juostinius inverterius, yra didesnis nei naudojant centrinius.
- Į modlius integruoti inverteriai – Saulės jėgainė, turinti į modlius integruotus inverterius, yra brangesnė nei elektrinė, naudojanti centrinius ar juostinius inverterius, bet kartu yra pati efektyviausia. Maksimalios galios taško sekimas yra kiekvienam fotomoduliui ir, esant pažeistam arba neapšviestam moduliui, elektros tiekimas nutrūksta tik iš to modulio, o ne iš visos modulių juostos ar visos elektrinės.

Saulės jėgainėse naudojamų inverterių rūšys yra pavaizduotos 5 pav.



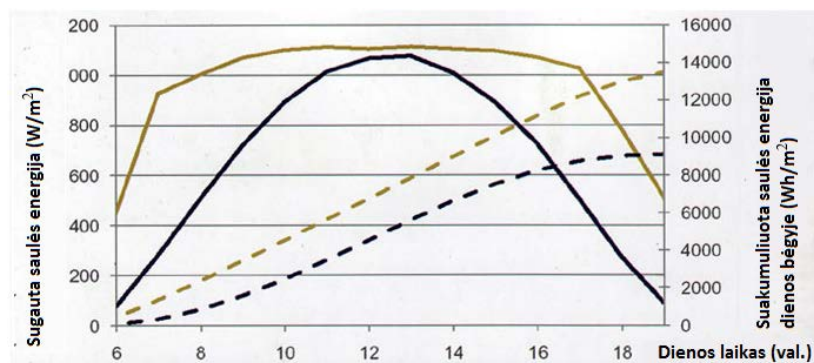
5 pav. Saulės jėgainių inverterių rūšys (Cramer et al. 2004)

1.6. SAULĖS ELEMENTUS LAIKANČIOSIOS KONSTRUKCIJOS

Saulės moduliai gali būti integruoti į pastatus arba sumontuoti ant laikančių metalinių konstrukcijų dėl stabilumo, apsaugos ir optimalios orientacijos. Laikančiosios metalinės konstrukcijos gali būti su fiksuotu mechanizmu arba su saulės sekimo mechanizmu. Pirmuoju atveju, kai yra fiksuotas mechanizmas, saulės moduliai yra pastatomi tam tikru kampu ir orientuojami tam tikra kryptimi, priklausomai nuo vietovės ar esamų sąlygų, norint maksimalizuoti metinius rezultatus. Šis montavimo būdas yra kur kas pigesnis, jį paprasčiau sumontuoti ir reikia mažesnių priežiūros išlaidų.

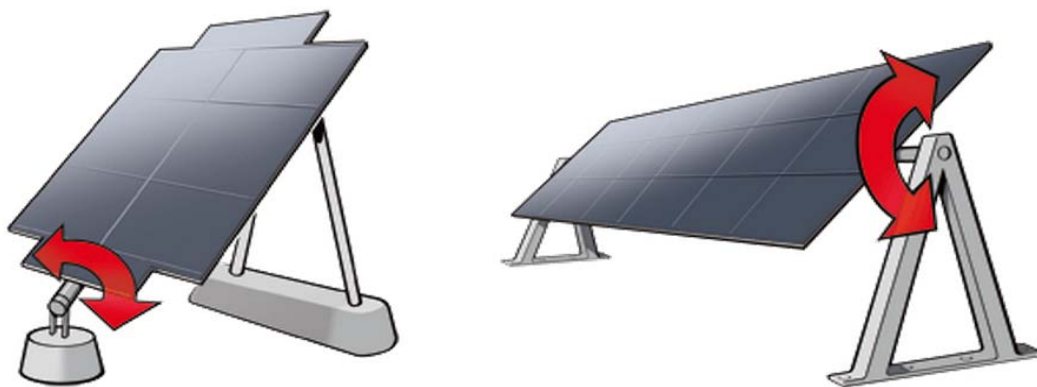
Modulių ir sekimo sistemos gali būti vienos ašies arba dviejų. Sekimo sistemos yra brangesnės, bet jos gali kur kas daugiau sugerti saulės energijos dėl prisitaikančios orientacijos.

Sekimo sistemos padidina energijos generavimą rytais ir vakarais, kai saulė yra arti horizonto. 6 pav. pavaizduotas generuojamos energijos kiekis esant sekimo sistemai ir be jos (Marangoly 2012).



6 pav. Sekimo sistemos įtaka generuojamos energijos kiekiui (The Advantages of Using Our Solar Trackers 2011)

Vienaašės sekimo sistemos yra paprastesnės ir reikalauja mažiau įrangos, tačiau tokia sistema sugeneruoja mažiau energijos (7 pav.).



7 pav. Vienašės sekimo sistemos (Automatic solar tracking system 2009)

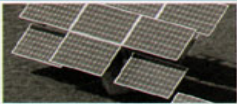
Dviašės sekimo sistemos yra sudėtingesnės, brangesnės, bet galinčios pagaminti daugiau energijos (8 pav).



8 pav. Dviašės sekimo sistemos (Automatic solar tracking system 2009)

Vienaašės sekimo sistemos yra apie 10% -15% brangesnės nei stacionarios, bet pagaminamos energijos kiekis yra 20% - 30% didesnis. Dviašės sekimo sistemos yra 15% - 20% brangesnės, tačiau pagaminamos energijos kiekis yra kur kas didesnis – 30% - 40% (The Advantages of Using Our Solar Trackers 2011). Sekimo sistemų pagaminamos energijos kiekio ir kainų palyginimas pateiktas 3 lentelėje.

3 lentelė. Stacionarios ir su sekimo sistema konstrukcijų elektros gamyba ir kaina (The Advantages of Using Our Solar Trackers 2011)

Konstrukcijos tipas	Stacionari	Vienos ašies sekimo sistema	Dviejų ašių sekimo sistema
			
Elektros gamyba	100 %	20% - 30% didesnė nei stacionarios	30% - 40% didesnė nei stacionarios
Konstrukcijų kaina	100 %	10% - 15% didesnė nei stacionarios	15% - 20% didesnė nei stacionarios

1.7. SAULĖS JĖGAINIŲ INTEGRAVIMO GALIMYBĖS LIETUVOJE

Iki 2010 m. pagrindinis gaminamos elektros šaltinis buvo Ignalinos atominė elektrinė (IAE). Uždarius ją, elektros energijos daugiausiai gamina šiluminės jėgainės, kurios daugiausia naudoja iškastinį kurą. Lietuvoje taip pat yra keli vėjo jėgainių parkai, kurių bendra instaliuota galia yra vos daugiau nei 220 MW (Nacionalinė energetikos strategija 2011).

Lietuvoje 2011 m. į elektros energetikos sistemą (EES) buvo perduota 10,4 teravatvalandės (TWh) elektros energijos. Įvertinus nuostolius elektros tinkluose, galutiniam vartojimui buvo perduota 9,53 TWh elektros energijos. Šiuo metu žymesnis elektros energijos poreikio augimas pastebimas pramonės sektoriuje (Valstybės kainų ir energetikos komisija 2012).

Didžioji dalis Lietuvoje suvartojamos elektros energijos yra importuojama, kita dalis – pagaminama Lietuvos elektrinėse. 2011 m. į Lietuvą importuota 8,7 TWh elektros energijos, Lietuvos elektrinėse pagaminta 4,8 TWh elektros energijos (iš jų 2,018 TWh pagamino Lietuvos energija, AB). Bendra instaliuota galia elektrinėse 2011 m. pabaigoje buvo 4021,1 MW. Šiluminė dalis sudarė 68,6 %, hidroelektrinių – 25,5 % (įvertinant ir Kruonio hidroakumuliacinės elektrinės galią) ir atsinaujinančių šaltinių (vėjo ir biokurą naudojančių elektrinių) – apie 5,9 proc. Beveik pusė visos Lietuvoje pagamintos „žaliosios“ elektros energijos yra pagaminama Kauno hidroelektrinėje (Lietuvos elektros sektorius 2013). 2011 m.

Lietuvos elektros energetikos sistemos galios sunaudojimo (bruto) maksimumas buvo vasario 25 d. 10 val. – 1737 MW, o didžiausias vasaros metu buvo liepos 21 d. 14 val. ir sudarė 1436 MW. Lietuvos elektros biržoje 2011 metais buvo suprekiauta 7.963.921,5 MWh (Valstybės kainų ir energetikos komisija 2012).

Prognozuojama, kad 2016 m. Lietuvos elektros energetikos sistemoje bus pagaminta 5,9 TWh elektros energijos mažiau nei suvartota. Elektros energijos kaina Švedijoje sieks 50 eurų už MWh, o Lietuvoje formuosis kiek didesnė kaina – 52 eurai už MWh. Todėl planuojama, kad per tarpsteminę jungtį „NordBalt“ iš Švedijos į Lietuvos EES bus patiekta 3,5 TWh pigesnės elektros energijos. Dėl kainų skirtumų tarp Latvijos ir Lietuvos prekybos zonų, prognozuojamas elektros importas iš Latvijos į Lietuvą sudarys 2,5 TWh. Numatoma elektros kaina Rusijos valdomoje IPS/UPS energetikos sistemoje 2016 m. išliks maža ir sudarys 45 eurus už MWh, todėl iš šios sistemos į Lietuvą bus importuojamas didelis kiekis elektros – 4,1 TWh. Prognozės rodo, kad Lenkijoje formuosis didelė elektros kaina – 58 eurai už MWh, todėl Lietuva bus elektros energijos tranzito šalis tarp IPS/UPS sistemos ir Lenkijos. Tikėtina, kad iš Rusijos per Lietuvą į Lenkiją persiunčiamos elektros kiekis 2016 m. sieks 4 TWh.

Lietuvos energetikos sistema yra sujungta su kaimyninėmis elektros energetikos sistemomis (9 pav.):

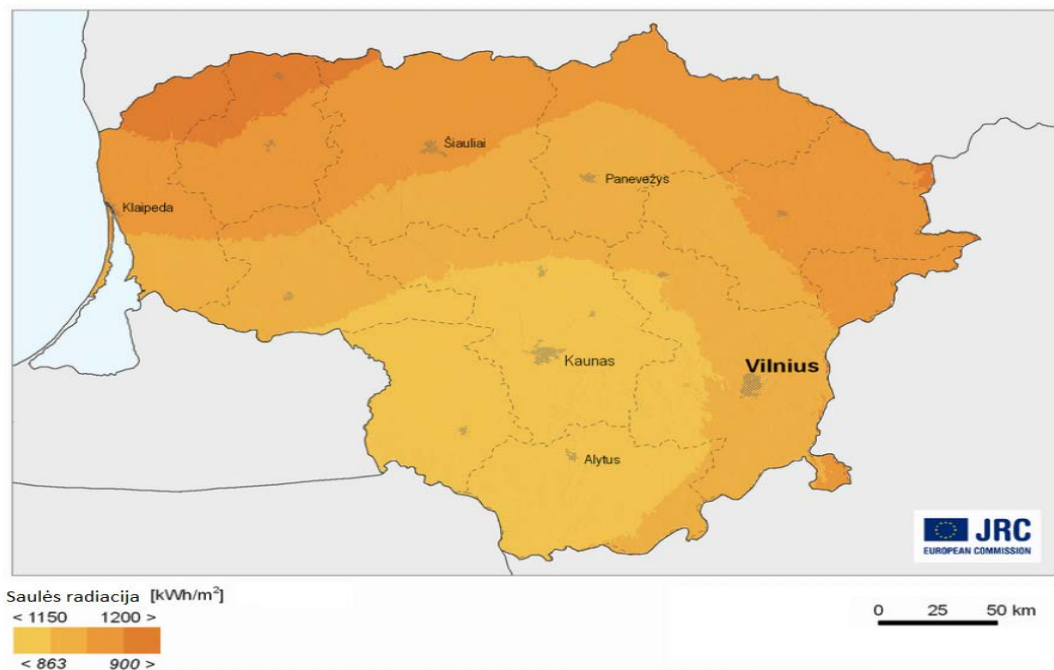
- su Latvijos elektros energetikos sistema jungia keturios 330 kV ir trys 110 kV linijos;
- su Baltarusijos elektros energetikos sistema jungia penkios 330 kV ir septynios 110 linijos;
- su Rusijos elektros energetikos sistema jungia trys 330 kV ir trys 110 linijos;



9 pav. Nacionalinio tinklo schema (Šiuo metu dirbančios šiluminės jėgainės 2012)

1.7.1. Klimato sąlygos saulės modulių statybai

Nors Lietuvos geografinės koordinatės yra maždaug 54-56 laipsnių šiaurės platumos, bet mokslinių tyrimų rezultatai liudija, kad saulės spindulių kiekis gali visiškai patenkinti mūsų šalies energijos poreikius. Lietuvos geografinė padėtis leidžia tikėtis panašaus saulės energijos efekto kaip Danijoje ar Vokietijoje (Janušonienė 2001). Įvairiose Lietuvos teritorijose per metus į horizontalaus paviršiaus kvadratinį metrą patenka vidutiniškai 1000 kWh saulės energijos (Šūri et al. 2007) (10 pav.).

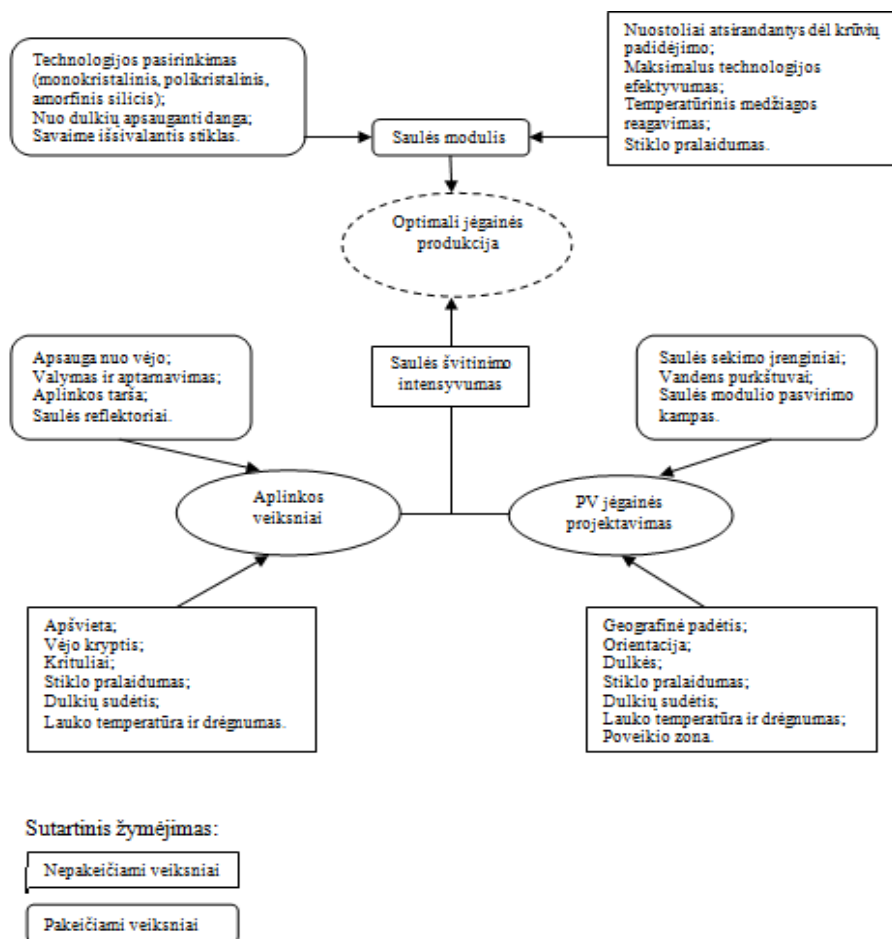


10 pav. Fotoelektros gamybos potencialas Lietuvoje (Šūri et al. 2007)

Didžiausią potencialą fotoelektros gamybai turi pietinė Lietuvos dalis: Nida, Lazdijai, Šilutė, Kybartai, Klaipėda, Telšiai – vietovės, kuriose vienam kvadratiniam metrui per metus vidutiniškai tenka nuo 1042 kWh iki 1013 kWh. Vidutinį potencialą turi Šiaulių, Dotnuvos, Kauno Vėžaičių vietovės, kur vienam kvadratiniam metrui per metus vidutiniškai tenka apie 996 kWh iki 976 kWh. Mažiausiai saulės spindulių tenka Lietuvos rytinei daliai: Utenai, Varėnai, Vilniaus miestui, Dūkštui, Biržams. Šiose vietovėse vidutiniškai vienam kvadratiniam metrui saulės šviesos tenka apie 939 kWh - 926 kWh (Janušonienė 2011).

2. SAULĖS JĖGAINIŲ EFEKTYVUMAS

Saulės jėgainių veikimas priklauso nuo jėgainės atskirų komponentų kokybės ir oro sąlygų. Norint efektyviai eksploatuoti saulės jėgainę, būtina atsižvelgti į daugelį veiksnių, kurie pagal savo kilmę yra skirstomi į keičiamus ir nepakeičiamus veiksnius (11 pav.) (Mani et al. 2010).

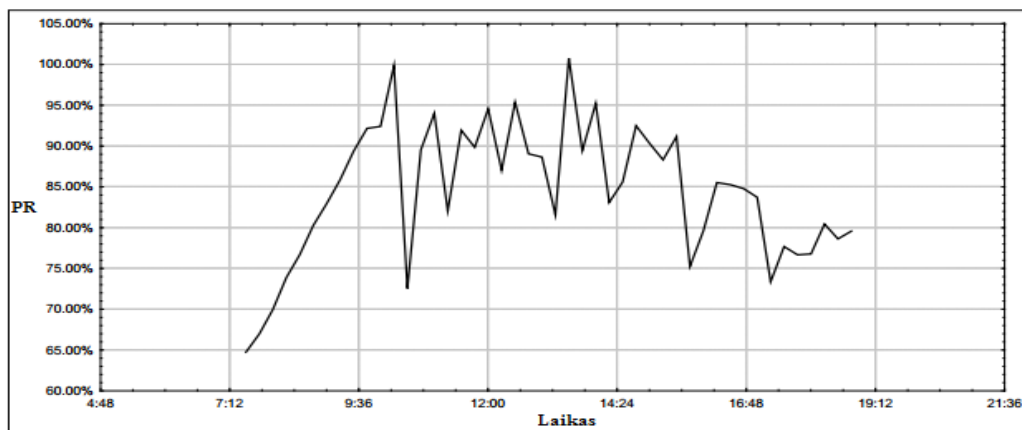


11 pav. Pakeičiami ir nepakeičiami veiksniai, lemiantys optimalų fotovoltinės sistemos našumą (Mani et al. 2010)

Atmosferiniai veiksniai, tokie kaip - temperatūra, aerozoliai, lietus, sniegas, drėgmė, vėjas, apšvieta yra ne mažiau svarbūs nei fotovoltinių įrenginių konstrukcijos. Vienus veiksnius galima keisti, pvz. konstrukcijų parinkimą, medžiagų įvairovę, montavimo kampą, tačiau kitos aplinkybės yra atsitiktinės, nepriklausomos nuo mūsų, todėl negali būti pakeičiamos, pvz. geografinė padėtis, saulės spinduliuotės intensyvumas, vyraujantys vėjai, pasirinktos sistemos maksimalus naudingumo koeficientas, sistemos nuostoliai ir kt.

2.1. SAULĖS JĖGAINĖS KOKYBĖS KOEFICIENTAS

Paprasčiausias būdas apibūdinti saulės jėgainės efektyvumą yra apskaičiuoti jėgainės kokybės koeficientą (*angl.* Performance ratio) (toliau - PR). Šis koeficientas išreiškiamas procentiniu dydžiu ir apibūdina santykį tarp faktinio ir teorinio saulės jėgainės našumo. Vadinasi, tai parodo, kuri dalis energijos gali būti perduodama tinklui atėmus energijos nuostolius (pvz., šilumos ir laidumo nuostolius) ir suvartotos energijos kiekį eksploatavimui. PR rodiklio reikšmė yra taip pat veikiamą oro sąlygų, todėl skaičiuotina šio rodiklio reikšmė vasaros ir žiemos laikotarpiu yra skirtinga (Performance ratio Quality factor for the PV plant 2012). Fotovoltinės sistemos elektros gamyba, keičiantis oro temperatūrai, vidutiniškai keičiasi apie 0,5 %/°C, saulės apšvietai - apie 5-10 % (ypatingai PV modulių, turinčių aukštą šuntavimo ir nuoseklią varžą), o keičiantis saulės spektrui, elektros gamyba gali skirtis iki 3 %, priklausomai nuo saulės atspindžių (Performance ratio Quality factor for the PV plant 2012). Nacionalinė atsinaujinančių energijos šaltinių laboratorija 2013 m. atliko 24 MW saulės jėgainės matavimus, kaip keičiasi PR koeficientas bėgant laikui ir keičiantis oro sąlygoms (12 pav.).



12 pav. 24 MW saulės jėgainės PR kitimo grafikas keičiantis oro sąlygomis (Dierauf 2013)

Kuo PR reikšmė yra arčiau 100 %, tuo efektyviau veikia saulės jėgainė. Realybėje 100% PR reikšmė negali būti pasiekta, nes neišvengiamai atsiranda nuostolių saulės jėgainės veikimo metu (pvz. šilumos nuostoliai dėl saulės modulių skleidžiamos šilumos). Aukštos kokybės saulės jėgainės gali pasiekti iki 80 - 90 % kokybės koeficiento reikšmę.

Kokybės koeficientas (PR) apskaičiuojamas pagal sekančią formulę (Performance ratio Quality factor for the PV plant 2012):

$$PR = \text{tikrasis saulės jėgainėje pagamintos energijos kiekis (kWh)} / \text{skaičiuotina, nominali saulės jėgainės energijos produkcija (kWh)}.$$

Nominalus jėgainės pagamintas energijos kiekis apskaičiuojamas pagal sekančią formulę:

Nominalus jėgainės pagamintos energijos kiekis = metinis generuojamas saulės energijos kiekis ant saulę generuojančio paviršiaus x santykinis PV modulių efektyvumas.

2.2. KOKYBĖS KOEFICIENTO REIKŠMĘ LEMIANTYS VEIKSNIAI

Veiksniai, lemiantys kokybės koeficiento reikšmę, skirstomi į aplinkos veiksnius (saulės modulio temperatūra, saulės spinduliuotė ir sklaidos galia, šešėliavimas) ir kitus veiksnius (laidumo nuostoliai, saulės modulių ir inverterio efektyvumas, saulės elementų degradacija, skirtingos saulės modulių technologijos, komponentų pasirinkimas) (Performance ratio Quality factor for the PV plant 2012).

Aplinkos veiksniai

- **Saulės modulio temperatūra** - kai atsiranda temperatūros skirtumai moduluose, mažėja visos saulės jėgainės efektyvumas. Skirtingą modulių aušinimą ir mažesnę visos jėgainės produktyvumą lemia įvairios saulės jėgainės projektavimo klaidos ar nuokrypiai, modulių išdėstymas ir jų įtvirtinimas. Tyrimai rodo, kad temperatūros skirtumas tarp jėgainės modulių gali siekti ir 17 °C. 1 °C laipsnio padidėjimas sistemos efektyvumą mažina 0,5 %, o dėl aukštos temperatūros įtakos gali susidaryti nuo 3,6 % iki 7,12 % pagaminamos energijos nuostolių (13 pav.) (Kymaki et al. 2008).

- **Saulės spinduliuotė ir sklaidos galia** – ryte, vakare ir ypač žiemą, kai saulė yra žemai danguje, saulės jėgainei tenka mažiau saulės spindulių, todėl šiuo metu skaičiuojamos PR reikšmė yra kur kas žemesnė nei dienos ar vasaros metu.

- **Šešėliavimas** – saulės modulio efektyvumo ir produktyvumo sumažėjimą taip pat gali sukelti saulės jėgainės aplinkoje esantys veiksniai, užstojančys šviesą vienai ar net kelioms grandinės dalims. Šešėliavimą gali sukelti purvas, namo kampas ar kita pastato dalis, medžiai ir nukritę lapai. Šešėliuojami saulės moduliai sugeria mažiau saulės spindulių nei įprasta ir tai sąlygoja mažesnę saulės modulių efektyvumą ir atitinkamai PR mažėjimą. Sniegas taip pat sukelia šešėliavimą, kuris lemia fotomodulių generuojamos galios sumažėjimą.

Backeris ir kt. (2006) Vokietijoje atliko sniego įtakos tyrimą, kurio metu buvo nustatoma sniego poveikis saulės jėgainės darbo našumui. Tyrimui buvo naudojami fotovoltiniai moduliai (SM130–L, Siemens solar), orientuoti pietų kryptimi ir sumontuoti 28° kampu. Atlikto tyrimo metu nustatyta, kad dienomis, kai snigo, apšvieta buvo labai maža, todėl ir nuostoliai buvo

nereikšmingi, tačiau saulėtų ir šaltų dienų periodu, apsnigta jėgainė buvo pajėgi konvertuoti tik nedidelę apšvietos dalį.

Galios nuostolių suma dėl nešvarumų (žemių) priklauso nuo dulkių (vietos žemės ūkio veiklos) rūšies, nuo praėjusio laiko, nuo paskutinio lietaus ir atlikto valymo. Remiantis Kymaki ir kt. 2008 metais atliktais tyrimais, buvo empiriniu būdu apskaičiuoti pavyzdinės saulės jėgainės įvairių nuostolių koeficientai. Nuostoliai sukeliama nešvaros žiemą vidutiniškai siekia apie 4-5%, vasaros laikotarpiu - 6-7%, todėl metinė nuostolių, sukeliama dėl įvairių nešvarumų, reikšmė vidutiniškai yra apie 5,86 % (13 pav).

- **Kiti veiksniai**

- **Laidumo nuostoliai** – šie nuostoliai atsiranda dėl nesandarumo laidų mazguose, dėl nekokybiškos kabelio rūšies ir medžiagos naudojamo.

- **PV modulių efektyvumas** – PV modulių efektyvumas turi lemiamą įtaką saulės jėgainės efektyvumui. Kuo didesnis saulės elementų efektyvumo reikšmė, tuo didesnis PR koeficientas.

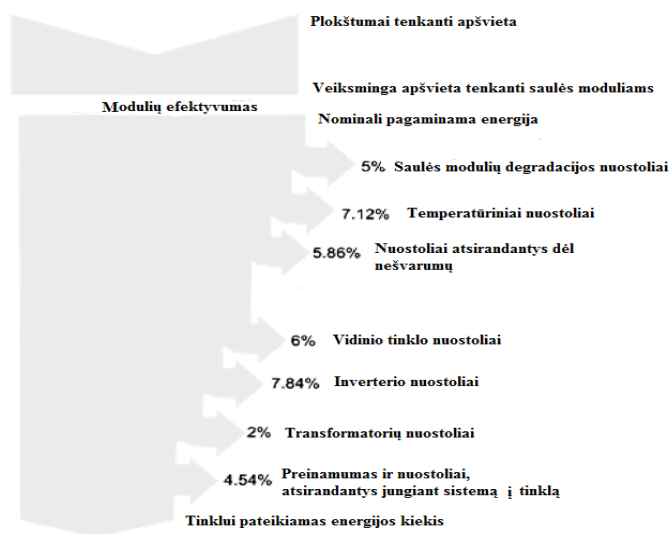
- **Inverterio efektyvumas** - jei saulės jėgainėje įrengtas inverteris yra labai efektyvus, tai gali didinti PR vertę. Inverteriai, veikiantys 90% efektyvumu, leidžia pasiekti 80% PR reikšmę.

- **Skirtingos saulės modulių technologijos** – pramonėje dažniausiai naudojamos trys šios saulės elementų rūšys: monokristaliniai silicio elementai, polikristaliniai silicio elementai ir plonų sluoksnių saulės elementai. Jei saulės jėgainėje sumontuotos skirtingos saulės elementų technologijos, tai gali sukelti kokybės koeficiento nukrypimus.

- **Komponentų pasirinkimas** - instaliuotos saulės jėgainės gyvavimo laikotarpis - 25-30 metų. Visą šį laikotarpį jėgainė turi veikti efektyviai ir teikti maksimalią naudą. Ar jėgainė bus saugi, produktyvi ir patikima, priklausys nuo jėgainės komponentų kokybės, jų parametrų suderinimo, instaliavimo ir vietos specifikos.

- **Saulės elementų degradacija** – saulės jėgainės sistema sudaryta iš nuosekliai sujungtų saulės modulių ir inverterio, kuris keičia srovę iš nuolatinės į kintamąją. Tipinės saulės jėgainės problema yra ta, kad silpniausia jėgainės dalis - modulis, veikiantis mažiausiu efektyvumu, tampa pagrindiniu veiksniu, ribojančiu visos jėgainės efektyvumą. Situaciją apsunkina ir tai, kad moduliai struktūriškai sudaryti iš 3-4 saulės celių grandžių, sujungtų nuosekliai. Savo ruožtu gamybos procesas neužtikrina identiško saulės elementų efektyvumo, to neišmanoma padaryti dėl nepastovios puslaidininkio (silicio) kristalų sandūros. Skirtumas tarp celių efektyvumo siekia jau 2 % gamybos pabaigoje. Tačiau didesnė problema yra ta, kad puslaidininkis degraduoja ir kiekvienas elementas degraduoja skirtingai. Šį procesą nulemia tiek vidinė puslaidininkio kristalų sandūra, tiek aplinkos poveikis (drėgmė, UV), tiek gamybos technologiniai aspektai. Tai

reiškia, kad saulės jėgainės „silpnųjų“ grandžių vieta yra pastoviai kintanti ir tiesiogiai veikia PR reikšmę. Monokristaliniai saulės elementai ir polikristaliniai saulės elementai pasensta iki 20% per 20 metų.



13 pav. Saulės jėgainėje skaičiuotinų nuostolių diagrama (Kymaki et al. 2008)

Kymaki ir kt. (2008) atliktų tyrimų metu nustatyta, kad prieinamumo ir prisijungimo prie tinklo nuostoliai svyruoja nuo 0,3 % (spalio ir lapkričio mėnesiais) iki 19,9% (kovo mėnesį), todėl skaičiuotinas metinis šių nuostolių vidurkis vidutiniškai yra 4,54 %. Nuostoliai yra labai maži (<1%) vasario, balandžio, rugsėjo, spalio ir gruodžio mėnesiais, ir nuo gegužės iki liepos jie padidėja, o sausio ir kovo mėnesiais nuostoliai yra labai dideli (Kymaki et al. 2008) (13 pav.).

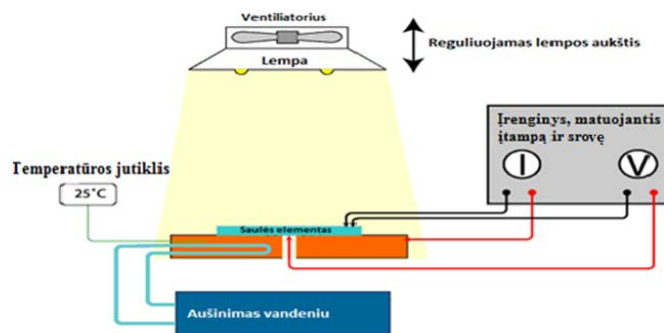
2.3. SAULĖS ELEMENTŲ EFEKTYVUMO DIDINIMAS

Viena iš svarbiausių charakteristikų, apibūdinančių saulės elementą, yra efektyvumas. Tam, kad galima būtų nustatyti tikslų saulės modulių efektyvumą ir kad galima būtų lyginti skirtingus modulių, buvo nustatytos standartinės testavimo sąlygos. Standartinės testavimo sąlygos yra (Honsberg, Bowden 2012):

- ant žemės naudojamiems saulės elementams oro masės indeksas AM1,5, o kosmose naudojamiems saulės elementams oro masės indeksas AM0. Koeficientas AM parodo saulės spindulių kelią pro žemės atmosferą ir pateikiamas kaip santykis su atmosferos storium;
- saulės apšvietimo intensyvumas yra lygus 1000 W/m^2 arba 1 saulės apšvietimui;

- saulės elemento temperatūra lygi 25°C;
- naudojama keturių kontaktų matavimo sistema.

Saulės elementų efektyvumo matavimo sistema yra pateikta 14 pav..



14 pav. Saulės elementų efektyvumo matavimo sistema (Honsberg, Bowden 2012)

Sukurti naudingumo koeficiento matavimo sistemą, kuri atitiktų visus aukščiau išvardytus reikalavimus, yra pakankamai sunku ir brangu. Dauguma saulės modulių gamintojų turi paprastas individualias matavimo sistemas, kurios apskaičiuoja saulės elementų efektyvumą su nedidele paklaida. Periodiškai gamintojai nusiunčia savo gaminius su paskaičiuotais efektyvumais į sertifikuotas testavimo laboratorijas, kurios patvirtina ar gerai yra suskaičiuotas efektyvumas.

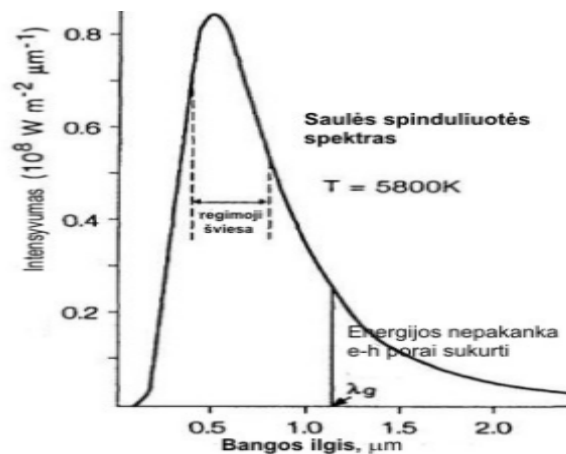
2.4. VEIKSNIAI, DARANTYS ĮTAKĄ SAULĖS MODULIŲ EFEKTYVUMUI

Santykis tarp gaunamo iš saulės elemento elektros galingumo ir krintančio į elementą saulės šviesos galingumo, vadinamas saulės fotoelemento efektyvumu:

$$\eta = \frac{P_m}{E \times A_c}; \quad (1)$$

čia P_m – elektrinė galia (W), E – krentanti saulės energija (W/m^2), A_c - saulės elemento aktyvus plotas (m^2) (Saulės elemento tyrimas, 2004). Saulės modulių efektyvumas yra matuojamas procentais ir nusako, kiek saulės energijos gali surinkti 1 m^2 ploto fotoelektrinė plokštė.

Saulės spinduliuotės spektras pavaizduotas 15 pav. Silicio draudžiamosios energijos plotį $E_g = 1,12 \text{ eV}$ atitinka fotonas, kurio bangos ilgis $\lambda_g = 1100 \text{ nm}$ ($E = h \cdot \nu$ ir $c = \nu \lambda$). Visi fotonai, kurių bangos ilgis $\lambda > \lambda_g$, turi per mažai energijos, kad galėtų sukurti porą elektronas-skylė. Tokiu būdu prarandama apie 23 % efektyvumo η . Naudojant medžiagas, kurių E_g didesnis, efektyvumas dar daugiau sumažėja (Saulės elemento tyrimas 2004) .



15 pav. Saulės spinduliuotės spektras λ_g atitinka bangos ilgį, kurio fotono energija atitinka Si draudžiamosios juostos plotį E_g (Saulės elemento tyrimas 2004)

Be to, fotonų energijos $E > E_g$ gali būti įvairios, o elektrono-skylės poros susidarymui sunaudojama lygiai E_g energija; likusi dalis $E - E_g$ virsta šiluma. Dėl minėtų dviejų efektų maksimali teorinė silicio fotoelemento efektyvumo riba lygi 44 %. Šiuo metu gaminamų ir esančių rinkoje saulės fotoelementų vidutinis efektyvumo koeficientas yra apie 15 %. Tokiu būdu 85% į saulės fotoelementą krentančios energijos nėra fotoelemento konvertuojami į elektros energiją ir jie sudaro energijos nuostolius fotoelemente. Saulės fotoelemento nuostoliai susideda iš: 1) atspindžio nuostolių; 2) konversijos nuostolių; 3) šilumos nuostolių; 4) perdavimo nuostolių. Atspindžio nuostoliai atsiranda dėl to, kad dalis į fotoelementą krentančių šviesos fotonų yra atspindimi nuo jo paviršiaus. Nors visi fotoelementai yra padengiami neatspindinčia danga, tačiau dalis fotonų atsispindi nuo šio paviršiaus ir tai sudaro apie 8% visos į fotoelementą krentančios energijos. Šviesos kvantai, kurių energija mažesnė už fotoelemento draudžiamąją juostą, nepajėgia permesti elektrono iš valentinės juostos į laidumo juostą. Toks fotonas pereis kiaurai pro fotoelementą. Tokiu būdu fotoelemente susidaro perdavimo nuostoliai, kurie sudaro 21% fotoelemento energijos balanse. Šviesos fotonas, kurio energija didesnė už fotoelemento draudžiamąją juostą, gali išlaisvinti tik vieną elektroną, o energijos perteklius virsta šiluma. Be to, kiti, didesnę energiją turintys fotonai, praeina pro fotoelementą kiaurai ir šiek tiek jį sušildo. Tokiu būdu fotoelemente susidaro šilumos nuostoliai, kurie sudaro 31% fotoelemento energijos balanse. Perdavimo ir šilumos nuostoliai priklauso šviesos bangos ilgiams, kurie fotoelemento negali būti panaudoti dėl didesnės ar mažesnės fotonų energijos prie tam tikrų šviesos bangos ilgių. Kai kurie iš fotoelemente sugeneruotų elektronų nepatenka į išorinę grandinę ir dėl to susidaro konversijos nuostoliai, kurie sudaro 25% visos į fotoelementą krentančios energijos (Saulės elemento tyrimas 2004) .

Saulės elemento efektyvumui įtakos turi daugybė gamybos procese naudojamų medžiagų bei surinkimo technologijų. 3 lentelėje pateikti pagrindiniai komponentai ir kritiniai veiksniai lemiantys fotomodulio kokybę.

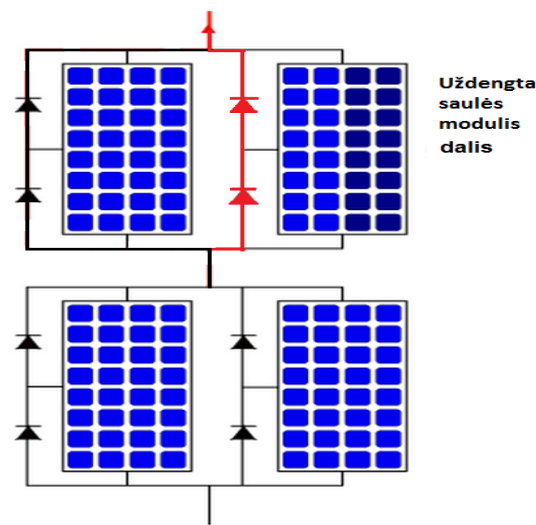
3 lentelė. Atskirų saulės modulių komponentų įtaka jėgainių efektyvumui (Saulės jėgainės įrengimo procesas 2013)

Komponentas	Kritiniai veiksniai, lemiantys fotomodulio kokybę	Įtaka fotomodulio savybėms
Stiklas	- Per didelis geležies kiekis stiklo sudėtyje; - Degradacija, lemianti struktūros pažeidimą ir skaidrumo praradimą; - Antireflekcinės dangos savybių silpnėjimas.	- Apsaugos nuo išorinio poveikio praradimas; - Netolygi FM sistemos degradacija; - Efektyvumo mažėjimas.
Elementai	- Silpniausias grandinės elementas, veikiamas temperatūrų, tampa daliniu energijos vartotoju, kaista didindamas varžą ir taip mažindamas efektyvumą; - Elektrinių krūvių sandūros (pn) pažeidimai; - Dėl medžiagos trapumo atsiradę mikrolūžiai.	- Netolygi FV sistemos degradacija; - Efektyvumo mažėjimas; - Pavojus FV sistemos saugumui.
Elementų juostų kontaktai	Korozijos procesas nulemtas vidinių (kaitimas, bloga litavimo kokybė) ir išorinių (drėgmė, UV spinduliai) sąlygų.	- Netolygi FV sistemos degradacija; - Efektyvumo mažėjimas.
Apatinė danga	- Atsparumo aplinkos poveikiui praradimas; - Degradacija nulemta UV spindulių ir besikeičiančių temperatūrų; - Spalvos ir skaidrumo pakitimai (geltonavimas, rudavimas); - Apsaugos nuo drėgmės patekimo praradimas; - Fizinių savybių praradimas; - Atsparumas mechaniniam poveikiui; - Galimas laisvų halogenų atsiradimas, kurių junginiai yra pavojingi išorinei aplinkai; - Vidinių medžiagos sluoksnių degradacija.	- Apsaugos nuo išorinio poveikio praradimas; - Netolygi FV sistemos degradacija; - Efektyvumo mažėjimas; - Pavojus FV sistemos saugumui.
Modulio kraštų izoliacinių savybių praradimas	Pralaidumas drėgmei	- Apsaugos nuo išorinio poveikio praradimas; - Netolygi FV sistemos degradacija; - Efektyvumo mažėjimas; - Pavojus FV sistemos saugumui.
Kontaktų dėžutė	- Dėžutės neatsparumas UV spinduliams; - Izoliacinių savybių praradimas ir apsaugos funkcijų silpnėjimas; - Kontaktų korozija	- Pavojus FV sistemos saugumui; - Gedimai atviroje grandinėje; - Sistemos produktyvumo kritimas.
Jungimo kabeliai	- Žaliavų degradacija (grėsmė elektrinėms jungtims) - Kabelių medžiagos neatsparumas UV spinduliams; - Jungčių neilgaamžiškumas.	- Pavojus FV sistemos saugumui; - Gedimai atviroje grandinėje; - Sistemos produktyvumo kritimas.

2.4.1. Saulės elementų neatitikties nuostoliai, jų vengimas ir efektyvumo didinimas

Saulės elementų neatitikties nuostoliai atsiranda, kai yra sujungiami neidentiškų parametrų elementai arba kai jie yra veikiami skirtingų aplinkos sąlygų. Neatitikties nuostoliai yra didelė problema saulės modulyje, kadangi bendras modulio galingumas priklauso nuo saulės elemento, kurio galia yra mažiausia. Kitaip tariant, jeigu vienas iš 36 standartiniame saulės modulyje esančių saulės elementų yra pažeistas, tai bendra galia priklausys nuo to pažeisto ir mažiausiai galios turinčio elemento. Dėl neatitikties yra prarandama saulės modulio galia, krenta naudingumo koeficientas ir netgi gali būti sugadintas saulės elementas.

Elektros energijos tekėjimas, kai dalis modulio yra uždengta, yra pavaizduotas 16 pav.



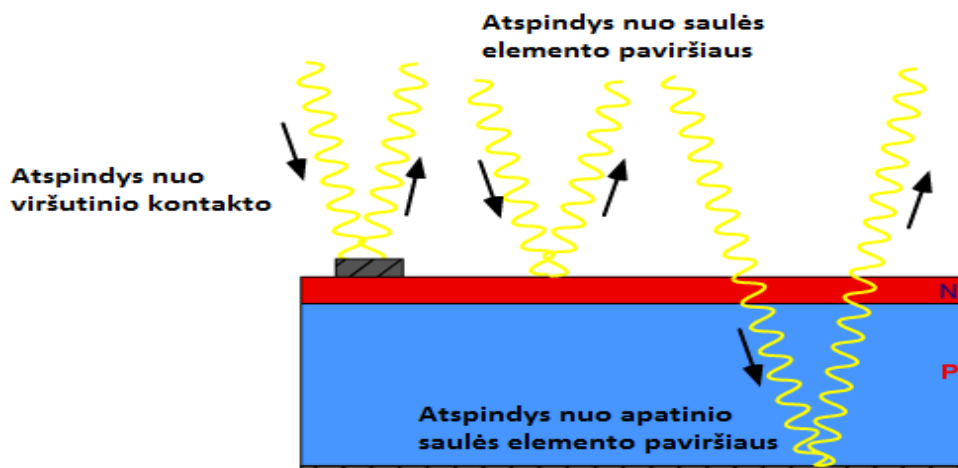
16 pav. Elektros energijos tekėjimas, kai dalis modulio yra uždengta (Honsberg, Bowden 2012)

Norint to išvengti, kiekvienas saulės elementas turi būti išbandomas, t.y. išmatuojama įtampa, srovė bei apskaičiuojama galia ir naudingumo koeficientas prie standartinių testavimo sąlygų. Tada identiškų parametrų saulės elementai rūšiuojami ir naudojami tame pačiame saulės modulyje ir gaunamas didesnis saulės modulio efektyvumas.

Neatitikties nuostoliai gali būti prilyginami tokiam atvejui, kai yra uždengiama kuri nors saulės modulio dalis arba nors vienas saulės elementas. Kai taip įvyksta, elektros energija pradeda tekėti pro tam tikrus apsauginius diodus (by-pass), taip apsaugodama modulį nuo sudegimo, bet prarasdama dalį galios. Nesant apsauginiams diodams, modulis tuo atveju išvis negamina energijos.

2.4.2. Optiniai nuostoliai, jų vengimas ir efektyvumo didinimas

Optiniai nuostoliai mažina saulės elementų galią, sumažindami trumpojo jungimo srovę. Optiniai nuostoliai susideda iš šviesos, kuri galėtų sugeneruoti elektrono ir skylės porą, bet nesugeneruoja dėl to, kad ta šviesa atsispindi nuo saulės modulio paviršiaus arba šviesa nėra sugeriama puslaidininkyje. Optiniai nuostoliai, kurie yra galimi saulės modulyje, yra parodyti 17 pav.



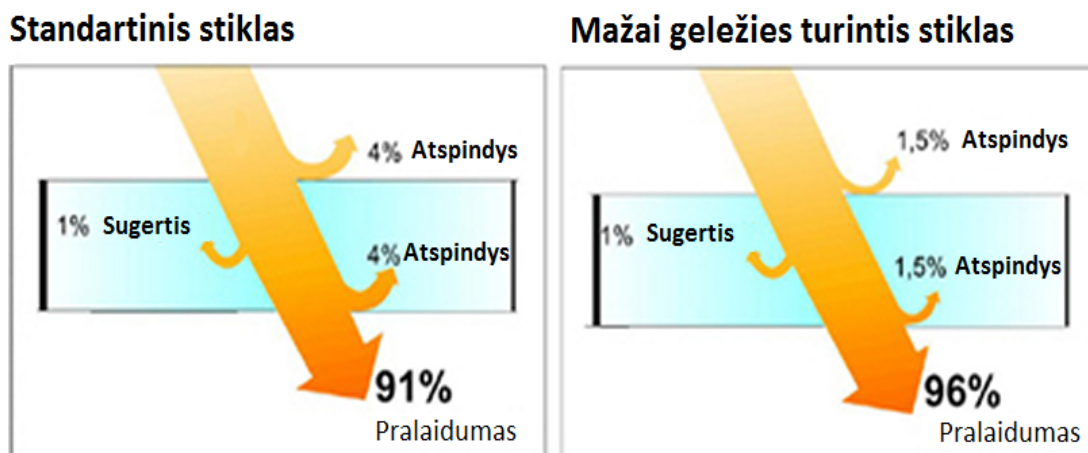
17 pav. Optinių nuostolių šaltiniai (Honsberg, Bowden 2012)

Pagrindiniai būdai, sumažinantys optinius nuostolius ir padidinantys saulės elemento efektyvumą:

- Viršutiniai kontaktai, uždengiantys saulės elementą, atspindi šviesą ir neleidžia fotonams patekti į puslaidininkį. Sumažinus kontaktų užimamą plotą daugiau šviesos patenka į puslaidininkį taip padidinant efektyvumą.
- Antirefleksinės dangos naudojimas padeda sumažinti atspindį nuo saulės modulio paviršiaus.
- Šviesos sugertis gali būti padidinta sudarant tekstūrą ant puslaidininkio paviršiaus.
- Puslaidininkis, naudojamas saulės elemente, gali būti pastorinamas, tuomet padidėja ilgų šviesos bangų sugertis.
- Šviesos sugavimas puslaidininkyje, naudojant paviršiaus tekstūravimą ir apatinio paviršiaus atspindį.
- Naudoti mažai geležies turintį stiklą, kad būtų sumažinta šviesos sugertis ir atspindys stikle.

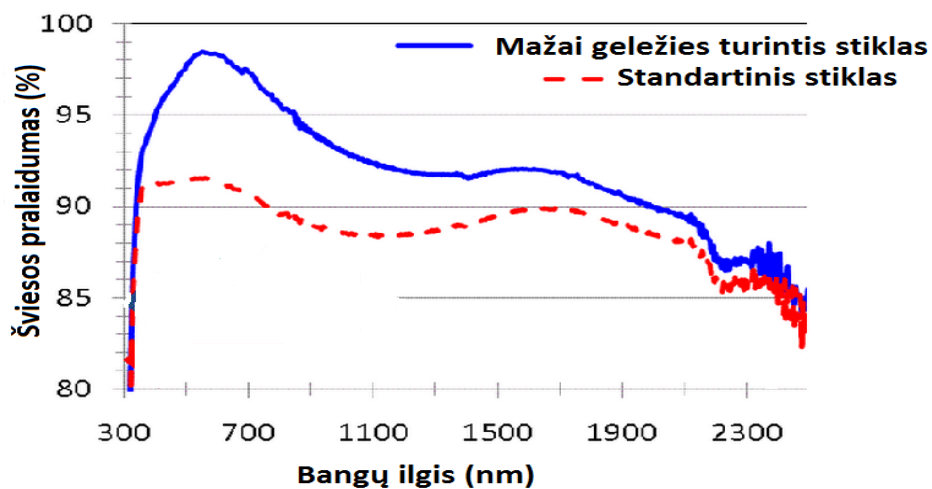
2.4.3. Mažai geležies turintis stiklas

Maksimalus šviesos pralaidumas pro standartinį grūdintą stiklą, naudojamą saulės moduluose, yra apie 91 %. Taigi vienas iš būdų padidinti šviesos pralaidumą yra naudoti daugiau šviesos praleidžiantį stiklą. Geros kokybės ir mažai geležies turintis stiklas sugeria 1 % ir atspindi po 1,5 % abiejuose stiklo pusėse praeinančios saulės šviesos. 18 pav. pavaizduotas šviesos pralaidumas pro paprastą stiklą ir mažai geležies turintį stiklą.



18 pav. Šviesos pralaidumas pro standartinį ir mažai geležies turintį stiklą (Sunarc Technology 2012)

Mažai geležies turintis stiklas sumažina šviesos atspindį stikle iki 1,5 % iš abiejų stiklo pusių ir taip padidina šviesos pralaidumą 5 – 6 %. Didesnis šviesos pralaidumas leidžia saulės elementui sugerti daugiau šviesos ir taip yra padidinamas bendras saulės modulio efektyvumas. 19 pav. yra pavaizduotas skirtingų bangos ilgių sugertis su ir be antirefleksinės dangos.

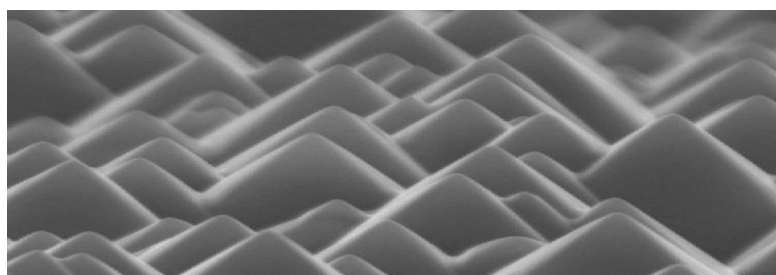


19 pav. Skirtingų bangos ilgių sugertis pro standartinį ir mažai geležies turintį stiklą (Sunarc Technology 2012)

Mažai turinčio geležies stiklo konstrukcija gerai praleidžia saulės spindulius į kolektoriaus vidų ir saulės spinduliai gali prasiskverbti iki 97 %.

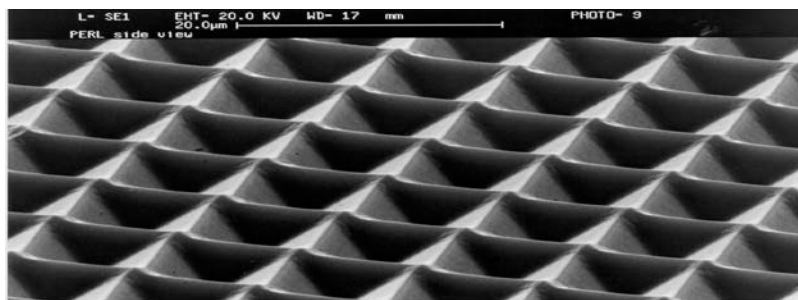
2.4.4. Saulės elemento paviršiaus tekstūravimas

Paviršiaus tekstūravimas yra labai efektyvus ir ilgai išliekantis efektas padedantis sumažinti atspindį. Tekstūruotas paviršius padidina tikimybę, kad atspindėjusi šviesa sugrįš atgal į kristalą, o ne atgal į aplinką. Tekstūravimas gali būti atliekamas kelias būdais. Vienas iš būdų yra išėsdinimas rūgštimi suformuojant puslaidininkio paviršių iš mažų piramidžių formos struktūrų. Tokiu būdu tekstūruotas puslaidininkio paviršius pavaizduotas 20 pav.



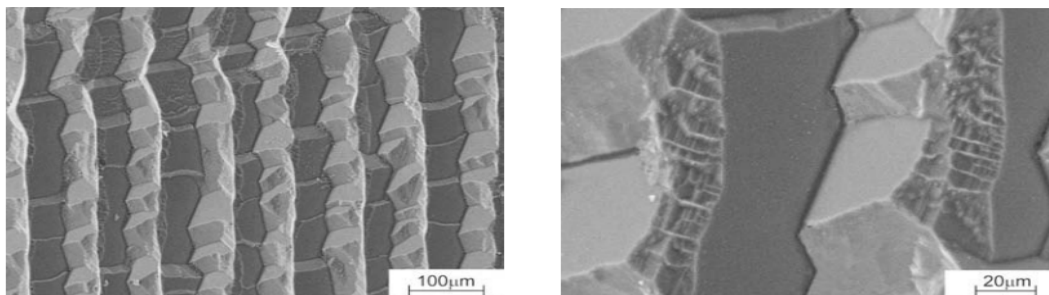
20 pav. Tekstūruotas puslaidininkio paviršius piramidžių formos būdu (Honsberg, Bowden 2012)

Dar vienas tekstūravimo būdas yra, kai rūgštis išėsdina atvirkščios piramidės formos paviršiaus struktūras. Tokiu būdu tekstūruotas puslaidininkio paviršius pavaizduotas 21 pav.



21 pav. Tekstūruotas puslaidininkio paviršius atvirkščių piramidžių formos (Honsberg, Bowden 2012)

Taip pat puslaidininkio paviršius gali būti tekstūruotas lazeriu. Lazerio spindulys suformuoja vienodus griovelius ant puslaidininkio paviršiaus. Lazerio spinduliu tekstūruotas paviršius pavaizduotas 22 pav.

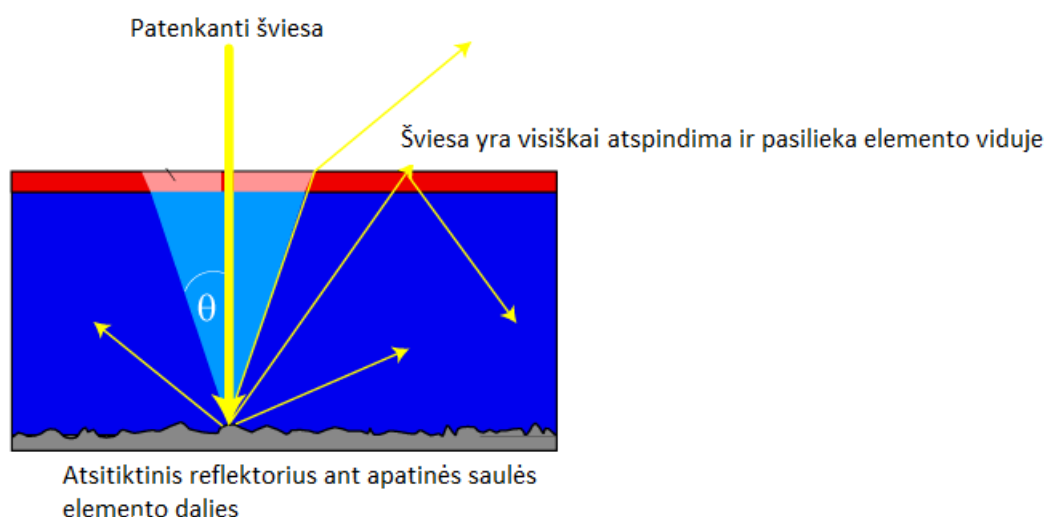


22 pav. Lazeriu tekstūruoto puslaidininkio paviršius (Dobranski, Drygala 2008)

Paskutiniu metu lazerinės technologijos vis dažniau integruojamos į monokristalinio ir poli-Si SE gamybos technologijas, pakeičiant standartinę tekstūravimą šarminiais (mono-Si SE atveju) ir rūgštiniais (poli-Si SE atveju) tirpalais, visų pirma dėl to, kad gamybos metu Si plokštelės kraštai gali būti izoliuojami vienodu lazeriu (I ir II kartos saulės elementai 2011)

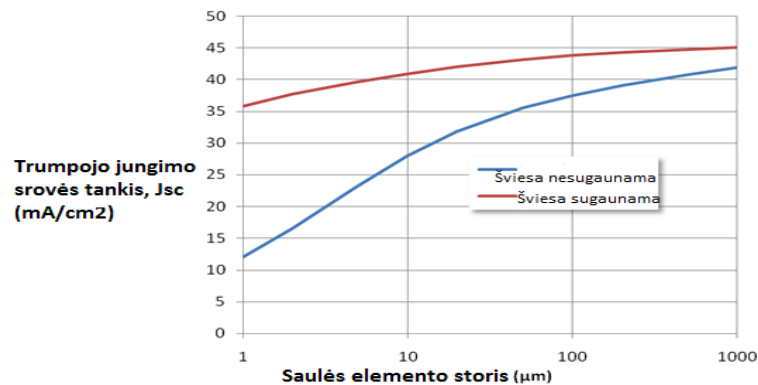
2.4.5. Galinių Lamberto reflektorių panaudojimas

Lamberto reflektoriai yra specialios rūšies reflektoriai, kurie atsitiktinai išsklaido į juos atsklidusią šviesą. Šie reflektoriai yra naudojami ant apatinės saulės elemento dalies ir dėl šviesos atspindžio jie sumažina šviesos sugertį ant galinių kontaktų ir transmisiją pro patį puslaidininkį, leisdami šviesai atsispindėti atgal į puslaidininkį. Tokia technologija leidžia padidinti šviesos, patekusios į puslaidininkį, optinį kelią 50 kartų ir padidina šviesos sugertį ir paties saulės elemento efektyvumą. Galinio Lamberto reflektoriaus schema yra pavaizduota 23 pav.



23 pav. Galinis Lamberto reflektorius (Honsberg, Bowden 2012)

24 pav. yra parodyta silicio saulės elemento trumpojo jungimo srovė sugaunant ir nesugaunant šviesos kai yra naudojami galiniai Lamberto reflektoriai.



24 pav. Trumpojo jungimo srovės schema sugaunant ir nesugaunant šviesos (Honsberg, Bowden 2012)

Galinių reflektorių naudojimas yra ypač svarbus, kai saulės elemento storis yra mažas. Esant $5 \mu\text{m}$ saulės elemento storiui, trumpojo jungimo srovės tankis yra dvigubai didesnis naudojant galinius reflektorius nei jų nenaudojant.

2.4.6. Galinių kontaktų saulės elementai

Galinių kontaktų saulės elementai pasiekia didesnę efektyvumą perkeldami priekinius kontaktus į apačią. Didesnis efektyvumas išgaunamas dėl didesnio puslaidininkio ploto, į kurį patenka saulės šviesa, nes viršutiniai kontaktai neužstoja saulės šviesos.

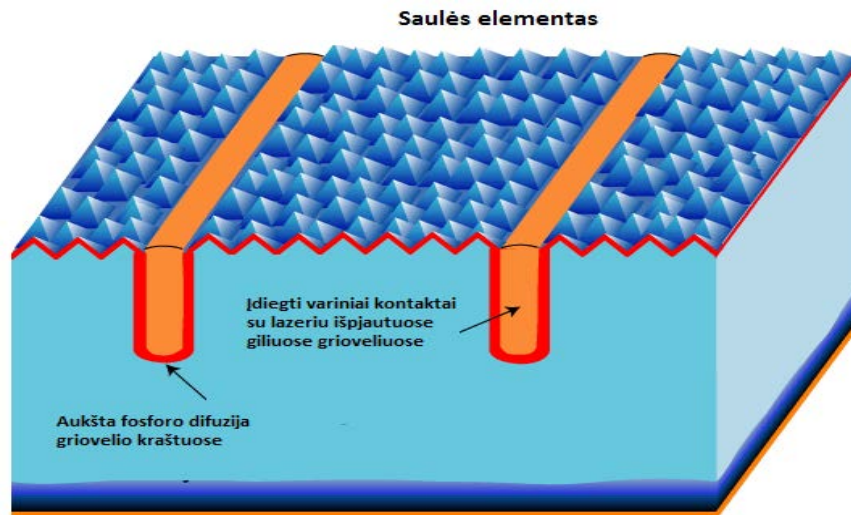


25 pav. Saulės elementai su kontaktais apatinėje dalyje (Honsberg, Bowden 2012)

Dar vienas privalumas, kad saulės elementai su kontaktais apatinėje dalyje gali būti išdėlioti saulės modulyje arčiau vienas kito. Saulės elemento su kontaktais apatinėje dalyje schema pateikta 25 pav.

2.4.7. Giliai įdiegtų kontaktų technologija

Giliai įdiegtų kontaktų technologija leidžia saulės elementams pasiekti didesnę efektyvumą nei ant paviršiaus uždėtų kontaktų. Šie kontaktai daromi siauri, bet gilūs, taip išlaikant gerą elektros srovės pralaidumą ir užimant mažai saulės elemento paviršiaus plotą. Saulės elementas su giliais kontaktais pavaizduotas 26 pav.



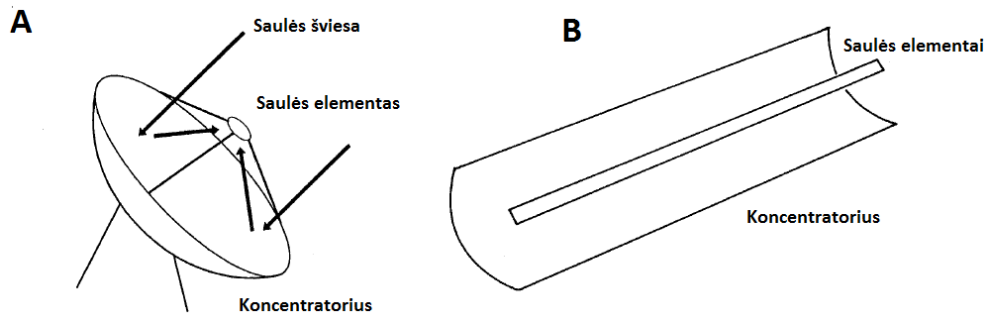
26 pav. Saulės elementas su giliais kontaktais (Honsberg, Bowden 2012)

Kontaktai yra įdiegiami prieš tai lazeriu suformuojant gilius griovelius ant elemento paviršiaus. Po griovelių suformavimo yra tepama sidabro pasta, kuri šilko grafijos būdu yra sulydoma su saulės elementu.

2.4.8. Saulės elementai su koncentratoriais

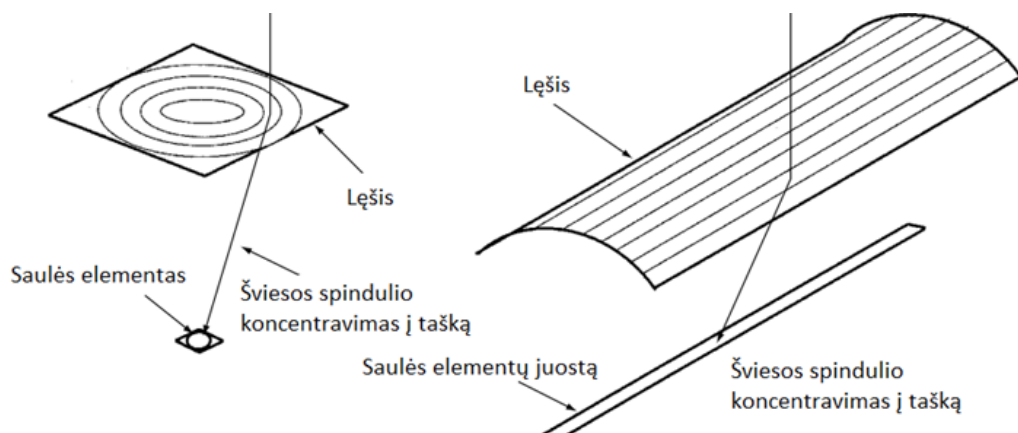
Saulės moduliai su koncentratoriais yra naudingi todėl, kad yra sumažinamas saulės modulio aktyvus plotas sugaunant tą patį kiekį šviesos. Tokiu būdu brangūs saulės elementai yra pakeičiami pigesniais koncentratoriais. Taip pat, saulės elementą veikiant koncentruota šviesa, didesne nei 1 saulė, didėja saulės elemento efektyvumas. Koncentratorių paskirtis yra sukonzcentruoti ir nukreipti saulės šviesą į vieną tašką arba liniją – saulės elementą. Bet norint, kad koncentratorius efektyviai koncentruotų šviesą į saulės elementą, jis turi būti nuolatos nukreiptas į saulę naudojant komplikutas sekimo sistemas, o tokios sistemos reikalauja priežiūros ir yra pakankamai brangios.

Koncentratoriai gali būti koncentruojantys į tašką – parabolinis koncentratorius (27 pav. A dalis) arba koncentruojantys į linijas – linijinis parabolinis koncentratorius (27 pav. B dalis).



27 pav. Saulės modulių su koncentratoriais tipai (Honsberg, Bowden 2012)

Labai mažiems saulės elementams gali būti naudojami lęšiai, kurie koncentruoja saulės šviesą į tašką arba į vieną liniją. Tokiems lęšiams pagaminti yra naudojamas stiklas arba akrilinis plastikas. Saulės elementas su lęšiu turi būti labai maži, kadangi didesnei sistemai lęšio storis tampa pernelyg didelis. Lęšiai, koncentruojantys saulės šviesą, pavaizduoti 28 pav.

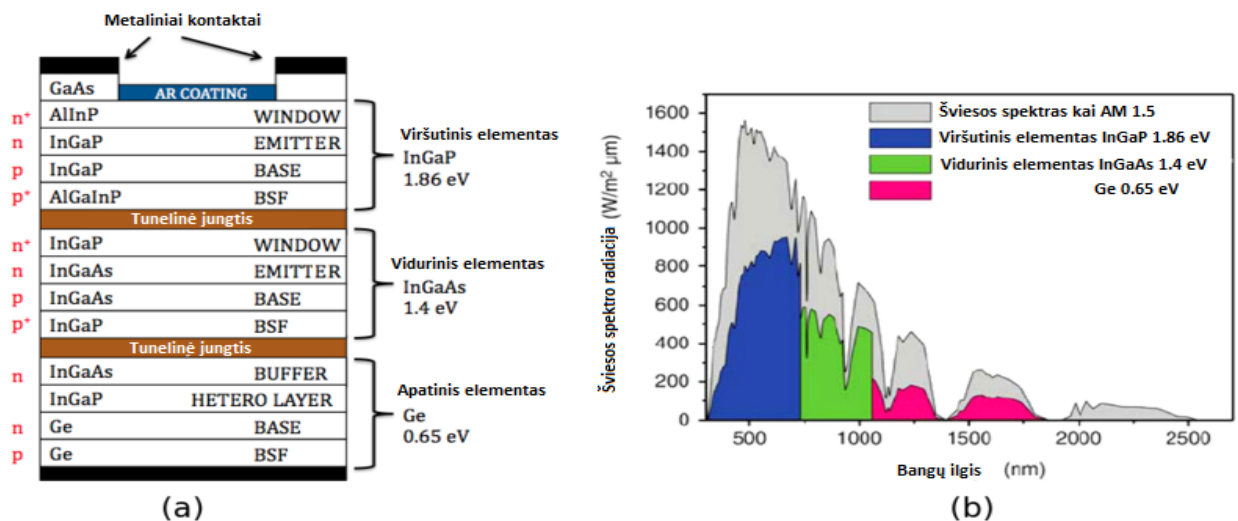


28 pav. Lęšiniai saulės koncentratoriai (Swanson 2003)

Vienas iš saulės elementų su koncentratoriais sistemos trūkumų yra tas, kad saulės elementai apšviesti labai intensyvios saulės šviesos smarkiai įkaista. Esant aukštai saulės elemento temperatūrai sumažėja krūvininkų judris ir todėl mažėja elemento efektyvumas. Taip pat koncentratoriai negali dideliu tikslumu vienodai paskirstyti saulės šviesos ir tai sukelia nesutapties nuostolius.

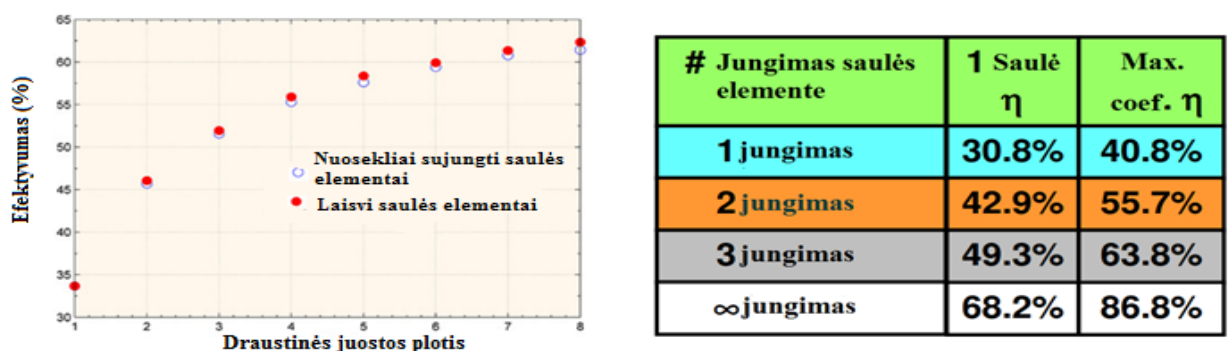
2.4.9. Tandemo tipo saulės elementai

Tandemo tipo saulės elementai yra sudaryti iš dviejų ar daugiau p-n sandūrų. Kiekviena iš p-n sandūrų pasiima skirtingų šviesos bangos ilgių spektro dalį. Tokiu būdu yra sumažinami vienii iš didžiausių saulės elementuose esančių nuostolių ir smarkiai padidina efektyvumą. 29 pav. yra pavaizduota tandemo tipo saulės elementų schema, o b schemos dalyje yra parodyta, kurią šviesos spektro dalį pasisavina skirtinga p-n sandūra.



29 pav. Tandemo tipo saulės elementai (Honsberg 2009)

Tandemo tipo saulės elementų efektyvumas priklauso nuo p-n sandūrų skaičiaus ir jų saulės šviesos spektro pasisavinimo gebos. Maksimalus teorinis tandemo elementų galimas efektyvumas yra pavaizduotas 30 pav.



29 pav. Tandemo tipo saulės elemento maksimalus teorinis galimas efektyvumas (Honsberg 2009)

Tandemo tipo saulės elementai yra labai brangūs ir jų pagaminimo technologija yra labai sudėtinga dėl to, kad turi būti išpjauti labai ploni sluoksniai puslaidininkų plokštelių ir jie turi būti sujungiami į kelias p-n sandūras.

3. SAULĖS JĖGAINĖS OPTIMALIAUSIO VARIANTO PARINKIMAS, PROJEKTUOJANT LIETUVOS KLIMATO ZONOJE

2008 m. Europos komisija pristatė teisės aktų paketą, kuris apėmė ir 2009/28/EB Direktyvą. Pagrindinis šios Direktyvos tikslas - skatinti iš atsinaujinančių energijos šaltinių gaminamą energiją ir iškelti ES šalims narėms tikslus iki 2020 metų pagaminti atitinkamą kiekį iš atsinaujinančių šaltinių, kuris negali būti mažesnis nei 20 % visos šalies sunaudojamų resursų. Lietuva įsipareigojo pagaminti 23 % energijos iš atsinaujinančių šaltinių. Šis įsipareigojimas paskatino šalies valdžią priimti sprendimus, dėl aktyvesnio skatinimo naudoti atsinaujinančius šaltinius energijos gamybai (Vasarevičius 2011).

Iki 2013 m. atsinaujinančios energetikos įstatymo pakeitimų saulės jėgainių statybos Lietuvoje buvo pasiekusios bumą. Pačios populiariausios saulės jėgainės buvo 30 kW galimumo ir buvo statomos ant žemės paviršiaus. Tokį spartų mažųjų saulės jėgainių statybų bumą lėmė kelios priežastys:

- labai aukšti elektros energijos iš saulės elektrinių supirkimo tarifai (2012 m. elektros energijos supirkimo tarifai pateikti 4 lentelėje);
- pakankamai ilgas 12 metų elektros energijos supirkimo užtikrintumas;
- greitas saulės jėgainių atsipirkimo laikotarpis;
- elektros energijos supirkimo užtikrinimas įstatymais.

4 lentelė. Supirkimo tarifai (Informacinių technologijų pasaulis 2012)

Energijos galia	Integruotos į pastatą jėgainės	Neintegruotos į pastatą jėgainės
Iki 30 kW	1,80 Lt/kWh	1,44 Lt/kWh
Nuo 30 iki 100 kW	1,66 Lt/kWh	1,33 Lt/kWh
Virš 100 kW	1,28 Lt/kWh	1,04 Lt/kWh

Didelė saulės jėgainių statybos paklausa paskatino rinkoje atsirasti daug neprofesionalių įmonių, kurios stato ir projektuoja tokias jėgaines. Dauguma tokių įmonių susikūrė apie 2010 metus, kai buvo įsigalioję aukšti elektros energijos supirkimo tarifai. Patirties ir žinių stoka, taip pat siekis labai greitai įgyvendinti užsakytas saulės jėgainių statybas, paskatino rinkoje atsirasti nekokybiškai ir neefektyviai suprojektuotų saulės jėgainių.

Šiame skyriuje bus projektuojamos ir lyginamos 30 kW galingumo saulės jėgainės su jau esamu įmonės UAB „Arginta” projektu, naudojant saulės jėgainių projektavimo programą PVSYST ir iš literatūros šaltinių įgytas žinias.

Saulės jėgainės, kuri yra stacionari sistema optimizavimui bus taikomos šios priemonės:

- Optimalus saulės modulių pakilimo kampo parinkimas;
- Optimalaus atstumo tarp saulės modulių parinkimas, taip mažinant šešėliavimus ir neatitiktis nuostolius.

Saulės jėgainės su sekimo sistema:

- Pagamintos elektros energijos iš tokio pat galingumo saulės jėgainės palyginimas, naudojant skirtingų tipų saulės sekimo sistemas.

3.1. SAULĖS JĖGAINIŲ PROJEKTAVIMO PROGRAMA PVSYST

PVSYST yra kompiuterinės programinės įrangos paketas, skirtas tirti, modeliuoti, analizuoti ir optimizuoti įvairias sukomplektuotas saulės energijos sistemas. Ši programa yra vienas iš pagrindinių įrankių saulės sistemų projektuotojams ir yra taikoma prie tinklo prijungtoms, savarankiškomis ir pumpavimo sistemoms. Ši programinė įranga apima plačią meteorologinių, saulės sistemų komponentų duomenų bazę.

PVSYST suteikia galimybę analizuoti ir kurti skirtingų kombinacijų fotoelektros sistemas, kuriose saulės kolektoriai yra naudojami konvertuoti saulės spindulių energiją į elektros energiją. Programoje yra siūlomi trys pasirinkimai: preliminarus dizainas, projekto rengimas ir įrankiai (31 pav.).



31 pav. Programos PVSYST projektavimo tipo pasirinkimo langas

„Preliminarus dizaino“ parinktis leidžia įvertinti savarankiškas ar prie tinklo prijungtas sistemas, panaudojant reikšmes, matuojamas kas mėnesį, preliminariam sistemos produktyvumo

įvertinimui. Atliekant „preliminaraus dizaino“ vertinimą, kiekvienam projektui reikia nurodyti vietą ir naudojamą sistemą. Programoje galima pasirinkti iš anksto nustatytas reikšmes įvairiose pasaulio dalyse, tačiau naudotojas taip pat turi galimybę pakeisti ir patikslinti vietos koordinatas bei meteorologinę informaciją, jei programoje pateikta informacija nėra pakankamai tiksli. Pasirinkus „preliminaraus dizaino“ funkciją, saulės sistemos našumo vertinimas atliekamas naudojant reikšmes, matuojamas kas mėnesį, išskiriant tik kelias bendras sistemos charakteristikas ir nenurodant konkrečios sistemos komponentų. Šiame etape apytiksliai yra apskaičiuojama sistemos kaina ir metinės aptarnavimo išlaidos.

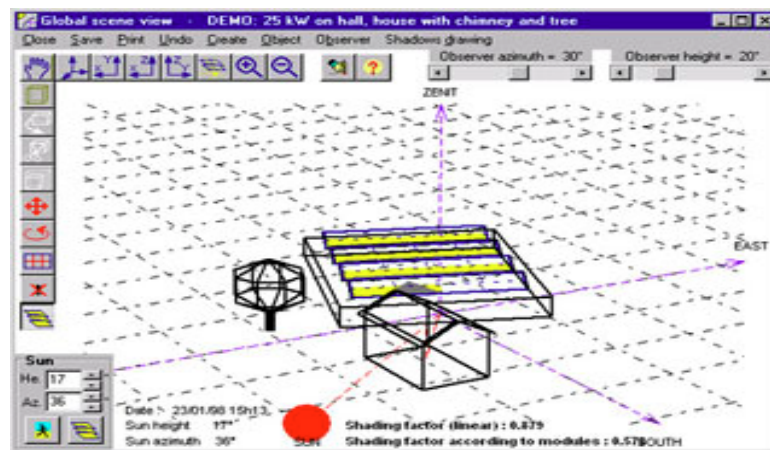
Pasirinkus „Preliminaraus dizaino“ parinktį atliekami šie veiksmai:

1. Pasirenkama vietovė (valstybė, miestas) ir sistema (masyvo specifikacija - aktyvus plotas, nominali galia, metinis našumas ir kolektorių orientacija);																															
2. Nustatomi sistemos parametrai (parenkamas modulių tipas, technologija, montavimo vieta, vėdinimo galimybė)																															
3. Rezultatų analizė (rezultatai gali būti pateikiami grafiškai ir lentelėmis, nurodant patenkančią saulės kiekį, sistemos produktyvumą).	<table border="1"><thead><tr><th colspan="2">Input Data</th><th colspan="2">Parameters</th><th colspan="2">Results</th></tr></thead><tbody><tr><td colspan="2">Geneve</td><td>Area</td><td>1.0 m2</td><td>Nonreal power</td><td>0.1 kW</td></tr><tr><td colspan="2">Plane: tilt 30°, azimuth 0°</td><td>Module Cost</td><td>5.00 EUR/Wp</td><td>Annual Yield</td><td>0.1 MWh/yr</td></tr><tr><td colspan="2"></td><td>Technology</td><td>Polycrystalline</td><td>Investment</td><td>1070 EUR</td></tr><tr><td colspan="2"></td><td></td><td></td><td>Energy cost</td><td>1.15 EUR/kWh</td></tr></tbody></table>	Input Data		Parameters		Results		Geneve		Area	1.0 m2	Nonreal power	0.1 kW	Plane: tilt 30°, azimuth 0°		Module Cost	5.00 EUR/Wp	Annual Yield	0.1 MWh/yr			Technology	Polycrystalline	Investment	1070 EUR					Energy cost	1.15 EUR/kWh
Input Data		Parameters		Results																											
Geneve		Area	1.0 m2	Nonreal power	0.1 kW																										
Plane: tilt 30°, azimuth 0°		Module Cost	5.00 EUR/Wp	Annual Yield	0.1 MWh/yr																										
		Technology	Polycrystalline	Investment	1070 EUR																										
				Energy cost	1.15 EUR/kWh																										

„Projekto dizainas“ funkcijos pasirinktis leidžia parengti išsamią, visiškai charakterizuotą pasirinktos sistemos analizę. Tiksliems rezultatams apskaičiuoti naudojami detalizuoti, valandos tikslumo modeliavimo duomenys. Atliekant šią analizę galima pasirinkti skirtingus modeliavimo variantus (sistemos komponentų išdėstymo bei orientacijos galimybes), įvertinti sistemos paviršiaus šešėliavimo įtaką sistemos našumui ir apskaičiuoti sistemos galimus nuostolius. Taip pat šiame etape programoje yra pasirenkami reikalingi sistemos komponentai ir atliekamas

tikslus ekonominis sistemos vertinimas. Pasirinkus reikalingus sistemos komponentus, pritaikius optimaliausią modeliavimo variantą, PVSYST programa suformuoja sistemos našumo bei finansinių rezultatų ataskaitą.

Atliekant tikslų sistemos modeliavimą, naudinga pasinaudoti 3-D CAO įrankiu, kuris leidžia programos naudotojui sukurti grafinį sistemos vaizdą trimačiu formatu (32 pav.). Šiame etape yra galimybė įvertinti nuostolius, kuriuos sukelia ant projektuojamos sistemos krentantys šešėliai. Naudojantis šiuo įrankiu, kuriant grafinį sistemos vaizdą, yra taip pat įvertinami šešėlius metantys objektai (medžiai, pastatai, stulpai), todėl braižant sistemą ir keičiant sistemos komponentų orientaciją, yra suteikiama galimybė sistemos projektavimo vietą ir orientaciją numatyti taip, kad būtų kuo mažiau krentančių šešėlių ant sistemos paviršiaus ir kad patektų kuo daugiau saulės šviesos.



32 pav. Programos PVSYST 3-D projektavimo įrankis

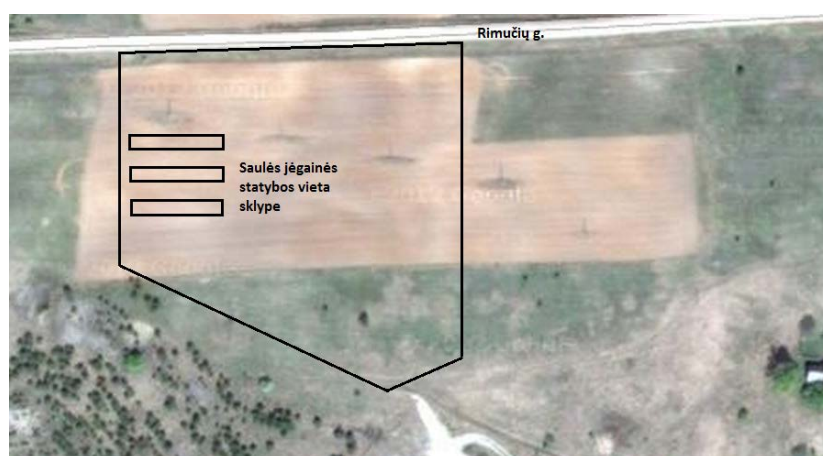
Projektuojant prie tinklo prijungtas sistemas, naudotojas turi įrašyti pasirinktą nominalią galią, pasirinkti inverterį ir saulės modulių tipą. Programa automatiškai pasiūlo reikiamą inverterių kiekį ir galimą sistemos išdėstymą. Ši procedūra panašiai yra atliekama ir individualioms sistemoms, tačiau projektuojant šias sistemas pirmiausia reikia įvertinti būsimas sistemos apkrovas (namų apyvokos prietaisų galios ir veikimo laiko pasirinkimas). Tuomet vartotojas turi nurodyti laiką (baterijų autonomijos dienas), kai apkrovos poreikiai gali būti nepatenkinti. Pagal apkrovos lygį programa nurodo reikiamą sistemos varžą ir automatiškai apskaičiuoja reikiamą saugyklos talpą bei FV modulių sistemos galią.

Projektuojant sistemą, PVSYST programa parengia detalų ekonominį sistemos vertinimą, naudojant realias komponentų kainas, papildomas išlaidas ir investavimo sąlygas. Komponentų kainos ar tikslesni parametrai gali būti įvedami naudotojo. Programa siūlo tam tikras įkainių pasirinkimo galimybes, tačiau kai kuriais atvejais šie duomenys nėra tikslūs, kadangi technologijų kainos skiriasi priklausomai nuo vietovės, kiekio ir kitų aspektų. Įvedus

įkainius, sistema apskaičiuoja reikiamas investicijas, metines išlaidas ir galutinę vartotojams pateikiamą elektros kainą.

3.2. TIRIAMASIS OBJEKTAS

Tiriamajam objektui yra pasirinkta 30 kW fotovoltinė saulės jėgainė, kuri bus statoma Molėtų rajone, Kaližų kaime. Žemės sklypas, kuriame projektuojama jėgainė yra 1,61 ha ploto. Žemės sklypas yra kalvotoje vietovėje, žemės ūkio paskirties, jame nėra jokių statinių, aukštų augalų ar medžių. Dėl šių priežasčių nuostoliai dėl šešėlių nebus įtraukiami. Žemės sklypo, kuriame bus saulės jėgainė, schema pavaizduota 33 pav.

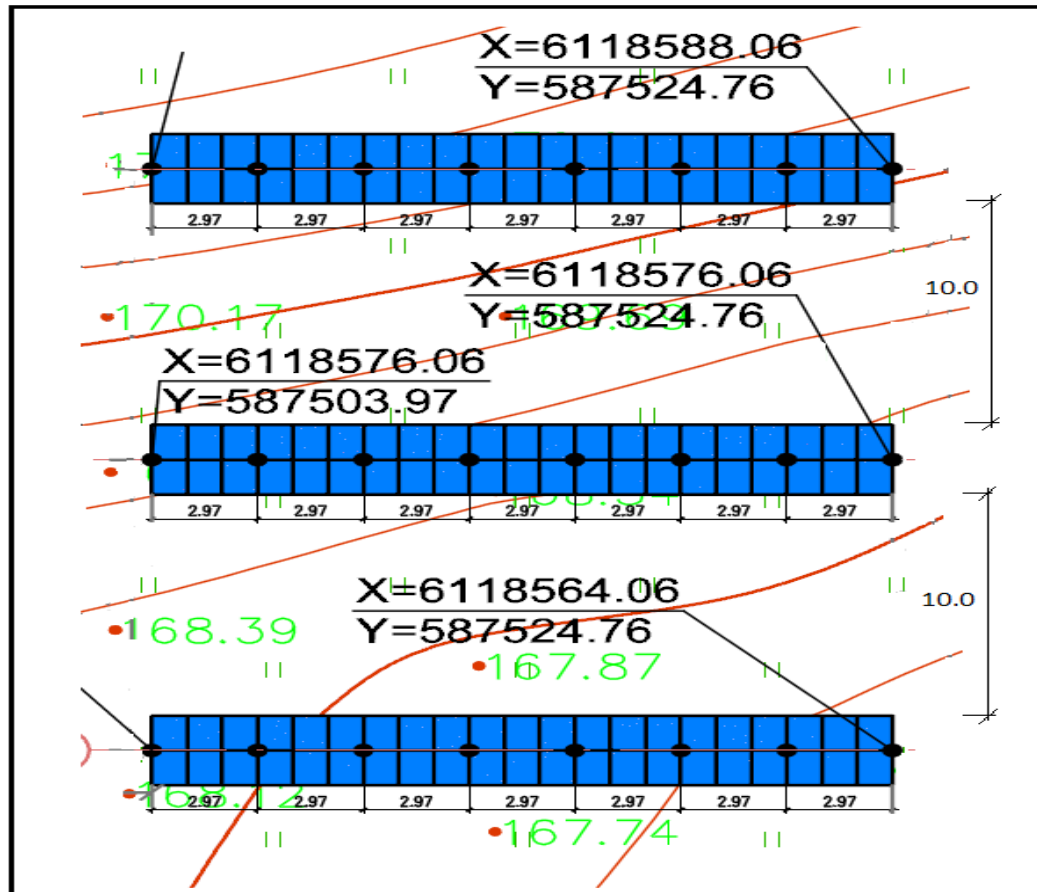


33 pav. Žemės sklypo, kuriame bus saulės jėgainė, schema

Saulės jėgainės techninės specifikacijos:

- Saulės jėgainės užimamas plotas 650 m²
- Aktyvus fotovoltinių modulių plotas 219 m²
- Saulės jėgainės konstrukcija – stacionari, be sekimo sistemų;
- Saulės elektrinė padalinta į tris eiles;
- Saulės moduliai – Polikristaliniai Yingli solar Eging PV 245 W;
- Visą saulės jėgainę sudaro 122 fotomoduliai.
- 2 inverteriai SMA Sunny Tripower;
- Projektinė metinė elektros energijos gamyba – 31600 kWh;
- Visa pagaminta elektros energija parduodama į skirstomuosius tinklus.

Saulės jėgainės schema pavaizduota 34 pav.



34 pav. Projektinė saulės jėgainės schema

3.3. SAULĖS JĖGAINĖS PROJEKTAVIMAS IR OPTIMIZAVIMAS

3.3.1. Klimato sąlygų parinkimas

Pradedant projektuoti saulės jėgainę PVSYST programa, visų pirma nurodomos planuojamos statyti jėgainės koordinatės ir parenkama vietovė. Programos PVSYST duomenų bazėje Molėtų miesto koordinatės ir tikslių klimato sąlygų nėra, todėl tolimesniems skaičiavimams yra pasirenkamas artimiausias miestas, kuris yra programos duomenų bazėje – Kaunas. Koordinatės ir vietovės parinkimo langas yra pavaizduotas 35 pav. Parinkus miestą programa automatiškai nustato pasirinkto miesto ilgumos ir platumos koordinatas, aukštį virš jūros lygio ir laiko zoną.

Geographical Coordinates | Monthly meteo | Interactive Map

Project location

Location

Site name:

Country: Region:

Geographical Coordinates

Latitude: Decimal Deg. min. (+ = North, - = South hemisph.)

Longitude: (+ = East, - = West of Greenwich)

Altitude: M above sea level

Time zone: Corresponding to an average difference

Legal Time - Solar Time = 0h 24m

Meteo data Import

☒ Meteonorm 6.1 ☐ NASA-SSE

Tabular I/O (Excel)

You may re-define here the site name (your project's location), and eventually the geographical coordinates, and eventually monthly values!

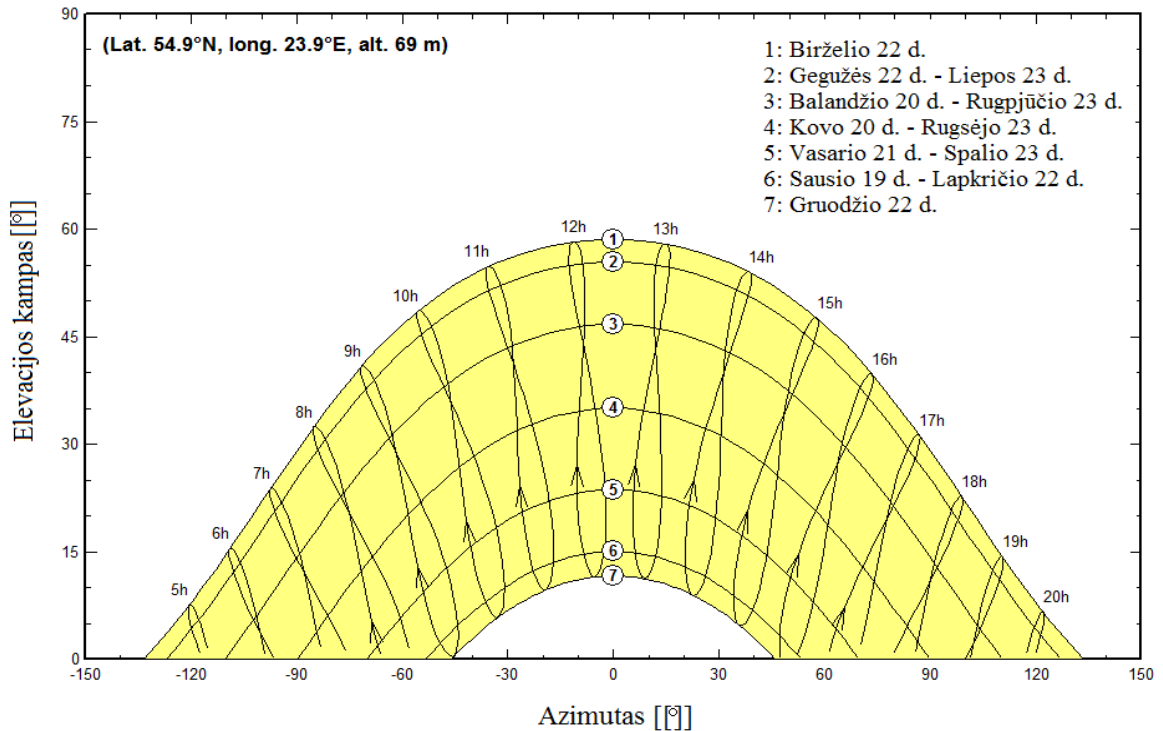
35 pav. PVSYST programos koordinačių ir vietovės parinkimo langas

Projektuojant saulės jėgainę, programa iš turimų duomenų bazių automatiškai parenka kiekvieno mėnesio vidutinę temperatūrą, vėjo greitį bei saulės energijos kiekį. Kauno klimato sąlygų duomenys pateikiami 5 lentelėje.

5 lentelė. Kauno miesto klimato sąlygos

Mėnuo	Saulės apšvieta per dieną, kWh/m ²	Išsklaidyta ir atsispindėjusi saulės apšvieta per dieną, kWh/m ²	Temperatūra, °C	Vėjo greitis, m/s
Sausis	0,53	0,37	- 3,1	4,2
Vasaris	1,25	0,73	- 2,4	4,3
Kovas	2,26	1,33	0,4	3,8
Balandis	3,65	1,73	7,7	3,5
Gegužė	5,16	2,33	12,7	3,4
Birželis	5,28	2,70	15,7	3,1
Liepa	5,18	2,78	18,4	2,9
Rugpjūtis	4,2	2,08	17,6	2,8
Rugsėjis	2,47	1,42	12,3	3,1
Spalis	1,42	0,88	7,2	3,8
Lapkritis	0,6	0,41	2,0	4,0
Gruodis	0,31	0,26	- 2,7	4,1

Pagal pasirinktą geografinę padėtį programa parenka saulės kelią per horizontą visam metų laikui. Diagrama vaizduoja kaip keičiasi Saulės kelias dangaus sferoje per metus keičiantis Saulės deklinacijai ir tai leidžia nustatyti saulės padėtį pasirinktą valandą skirtingu metų laiku (36 pav.). Naudojantis šia diagrama, programa gali tiksliai įvertinti šešėliavimo nuostolius, atsirandančius tarp keliomis juostomis išdėstytų saulės modulių juostų, kurie gali mesti vieni kitiems šešėlius ir dėl objektų, esančių šalia saulės jėgainės.



36 pav. Saulės kelio diagrama

Kitu etapu yra nustatomos saulės atspindžio nuo žemės paviršiaus reikšmės. Šios reikšmės dar kitaip yra vadinamos albedo reikšmėmis, nurodančiomis kokia dalis elektromagnetinių spindulių, krintančio į paviršių, atsispindi.

Kadangi saulės jėgainė bus statoma atviraime lauke, šiltuoju metų laiku, pagal 37 pav. nurodytas tipines albedo reikšmes, pasirenkama, kad albedo reikšmė yra 0,2, o šaltuoju metų laiku, kai aplink saulės jėgainę galimai yra prisnigta - albedo reikšmė yra 0,8. Kovo ir gruodžio mėnesiais sniego būna mažiau, todėl albedo reikšmė parenkama 0,6. Žinant albedo reikšmes, projektavimo programa įvertina papildomus saulės šviesos, atsispindėjusios nuo žemės paviršiaus, energijos kiekius.

Albedo
Design conditions
Other limitations

Albedo values

Monthly values

Jan.	0.80	July	0.20
Feb.	0.80	Aug.	0.20
Mar.	0.60	Sep.	0.20
Apr.	0.30	Oct.	0.20
May	0.20	Nov.	0.30
June	0.20	Dec.	0.60

Set a common value

Common value

(Default: albedo = 0.2)

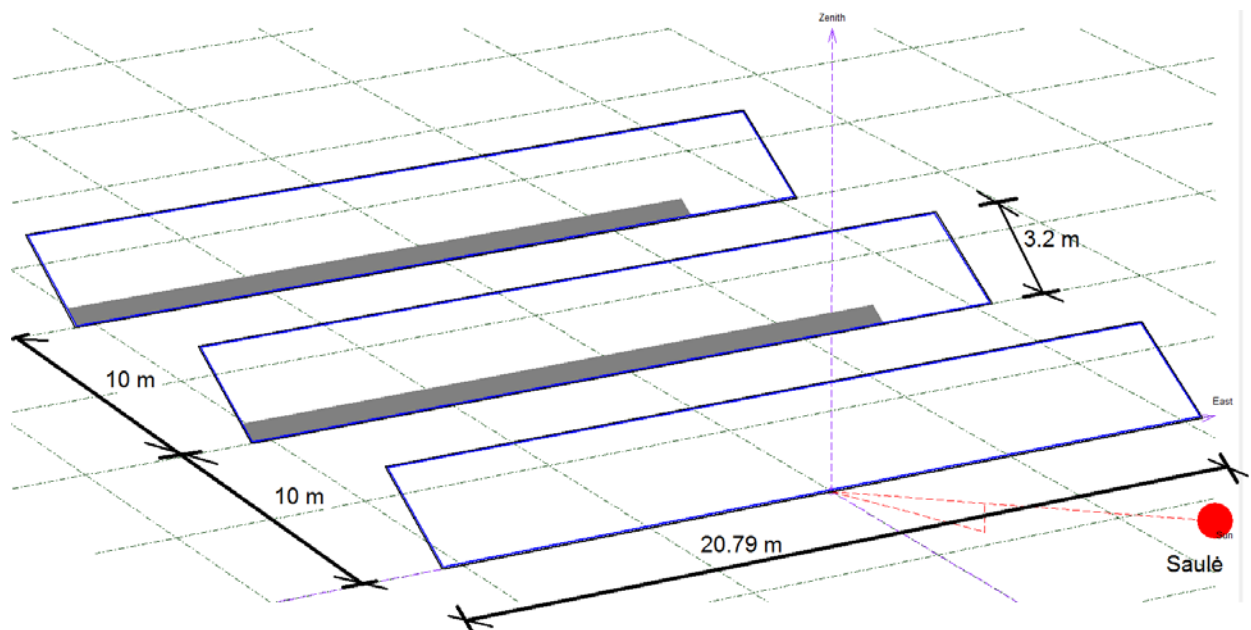
Usual values for albedo

Urban situation	0.14 - 0.22
Grass	0.15 - 0.25
Fresh Grass	0.26
Fresh snow	0.82
Wet snow	0.55 - 0.75
Dry asphalt	0.09 - 0.15
Wet asphalt	0.18
Concrete	0.25 - 0.35
Red tiles	0.33
Aluminium	0.85
New galvanised steel	0.35
Very dirty galvanised ste	0.08

37 pav. Albedo reikšmės

3.3.2. Saulės jėgainės projektavimas

Pasirinkus tikslias saulės jėgainės statybos koordinatas ir aplink esančius objektus, projektuojamas saulės modulių išdėstymas, kad būtų galima įvertinti šešėliavimo nuostolius. Atstumas parinktas tarp saulės modulių juostų yra 10,0 m. Vienos juostos ilgis 20,79 m, o plotis - 3,2 m. Projektinė saulės jėgainės schema pateikta 38 pav.



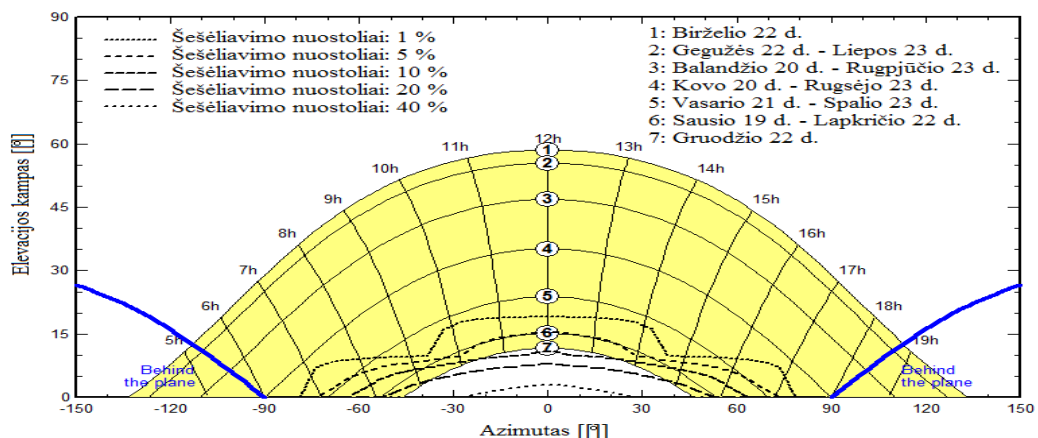
38 pav. Projektinė saulės jėgainės schema

Vienos juostos saulės modulių išdėstymo schema pateikta 39 pav. Šioje saulės jėgainėje sumontuoti du, vienas virš kito, saulės moduliai į vieną 20,79 m ilgio juostą.



39 pav. Saulės jėgainės schema

Nubraižius saulės jėgainės modulių išdėstymo schemą, buvo gauta metinė saulės kelio diagrama su pažymėtais šešėliavimo nuostoliais skirtingu metų laiku, esant skirtingam saulės pakilimo aukščiui bei azimuto kampui (40 pav.). Saulės kelio diagramoje matoma, kad didžioji dalis šešėliavimo nuostolių atsiranda šaltuoju metų laiku ir tęsiasi iki kovo mėnesio, o vėliau prasideda rugsėjo mėnesį. Šiltuoju metų laikotarpiu šešėliavimo nuostolių nėra, išskyrus, kai saulės azimuto kampas yra mažesnis nei -90° arba didesnis nei 90° , tuomet saulės jėgainė visiškai negauna tiesioginių saulės spindulių.



40 pav. Projektuojamos saulės jėgainės saulės kelio diagrama

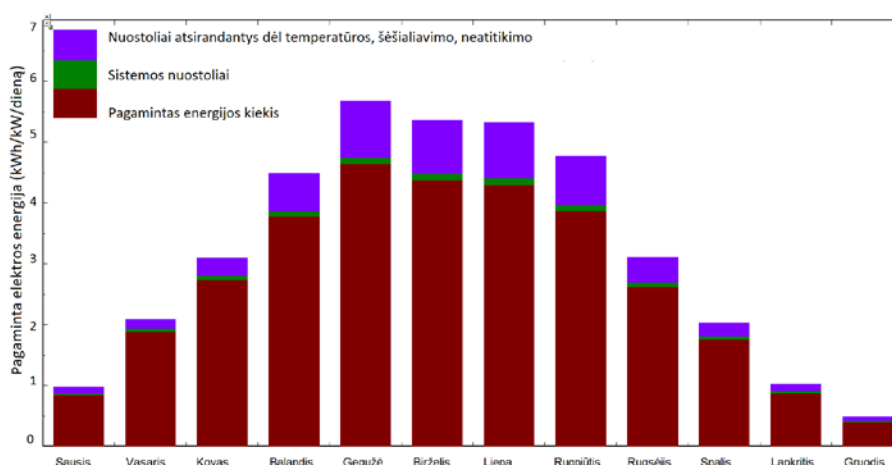
Nustačius klimato sąlygas, įvedus anksčiau minėtus saulės jėgainės sistemų parametrus, įvertinus šešėliavimo nuostolius, saulės jėgainių projektavimo programa apskaičiuoja PV

modulių pasvirimo kampą, pagamintą elektros energijos kiekį per metus, specifinį pagamintos elektros energijos kiekį per metus, atstumą tarp saulės modulių juostų, specifinį pagamintos elektros energijos kiekį per dieną, temperatūros, šešėliavimo ir neatitikties nuostolius, saulės jėgainės kokybės koeficientą ir sistemos nuostolius. Skaičiavimų rezultatai pateikiami 6 lentelėje.

6 lentelė. Suprojektuotos saulės jėgainės skaičiavimų rezultatai

PV modulių pasvirimo kampas	35°	Atstumas tarp saulės modulių juostų	10 metrų
Pagamintas elektros energijos kiekis per metus	28812 kWh/metus	Specifinis pagamintos elektros energijos kiekis per dieną	2,68 kWh/kW/diena
Specifinis pagamintas elektros energijos kiekis per metus	977 kWh/kW/metus	Temperatūros, šešėliavimo ir neatitikties nuostoliai	0,46 kWh/kW/diena
Saulės jėgainės kokybės koeficientas	0,829	Sistemos nuostoliai (inverterio)	0,07 kWh/kW/diena

Pagamintas elektros energijos kiekis per metus yra 28812 kWh. Saulės jėgainės kokybės koeficientas 0,829. Vidutinis specifinis pagamintos elektros energijos kiekis per dieną yra 2,68 kWh/kW.



41 pav. Specifinis pagamintos elektros energijos kiekis per dieną

41 pav. pavaizduota specifinis pagamintos elektros energijos kiekis per dieną skirtingais mėnesiais. Daugiausia elektros energijos buvo pagaminama gegužės mėnesį, o mažiausiai – gruodžio mėnesį.

3.3.3. Saulės jėgainės optimizavimas parenkant saulės modulių posvyrio kampą

Vienas iš svarbiausių saulės jėgainės efektyvumo kriterijų yra optimalaus modulių posvyrio kampo parinkimas. Siekiant optimizuoti saulės modulių posvyrio kampą, buvo atlikta dvylika skaičiavimų su skirtingais posvyrio kampais. Visi kiti saulės jėgainės parametrai buvo parinkti tie patys, kaip ir ankstesniame skyrelyje. Tyrimo metu buvo pasirinkta dešimt kampų nuo 30° iki 40°, kadangi Lietuvos klimato zonoje jie yra optimaliausi. Rezultatų palyginimui pasirinkti 20° ir 50° kampai. Rezultatai pateikiami 7 lentelėje.

7 lentelė. Skaičiavimų rezultatai parenkant skirtingą saulės modulių posvyrio kampą

Saulės modulių posvyrio kampas	Pagamintas el. energijos kiekis kWh/metus	Saulės jėgainės kokybės koeficientas	Šešėliavimo, temperatūros, neatitikties nuostoliai kWh/ metas	Sistemos nuostoliai (inverterio, laidų varžos) kWh/ metas
20°	27951	0,842	4507,02	741,3
30°	28721	0,835	4936,2	751,1
31°	28755	0,834	4942,3	753,3
32°	28779	0,833	4949,8	758,6
33°	28797	0,832	4985,0	763,5
34°	28810	0,830	5150,9	784,6
35°	28812	0,829	5152,0	786,2
36°	28812	0,828	5278,2	788,4
37°	28807	0,827	5322,4	776,0
38°	28794	0,826	5365,3	770,4
39°	28776	0,824	5398,4	763,0
40°	28752	0,823	5440,2	755,5
50°	28205	0,812	5794,74	751,2

Iš skaičiavimo rezultatų matyti, kad daugiausia elektros energijos yra pagaminama, kai saulės modulių posvyrio kampas yra 35° ir 36°. Prie šių nustatytų posvyrio kampų saulės jėgainė pagamino 28812 kWh elektros energijos. Esant 35° posvyrio kampui saulės jėgainės kokybės koeficientas siekė 0,829, o skaičiuotini bendri nuostoliai - 5938,2 kWh per metus. Esant nustatytam 36° posvyrio kampui, saulės jėgainės kokybės koeficientas buvo 0,828, o bendri nuostoliai – 6066,6 kWh. Nors, ties abiem posvyrio kampais saulės jėgainė pagamino vienodą elektros energijos kiekį, visti esant 35° posvyrio kampui, saulės jėgainės rodikliai buvo

efektyvesni – didesnis kokybės koeficientas ir patiriami mažesni nuostoliai. Dėl šių priežasčių tolimesniems skaičiavimams yra naudojamas kaip pats optimaliausias 35° kampas.

3.3.4. Saulės jėgainės optimizavimas parenkant optimaliausią atstumą tarp saulės modulių juostų

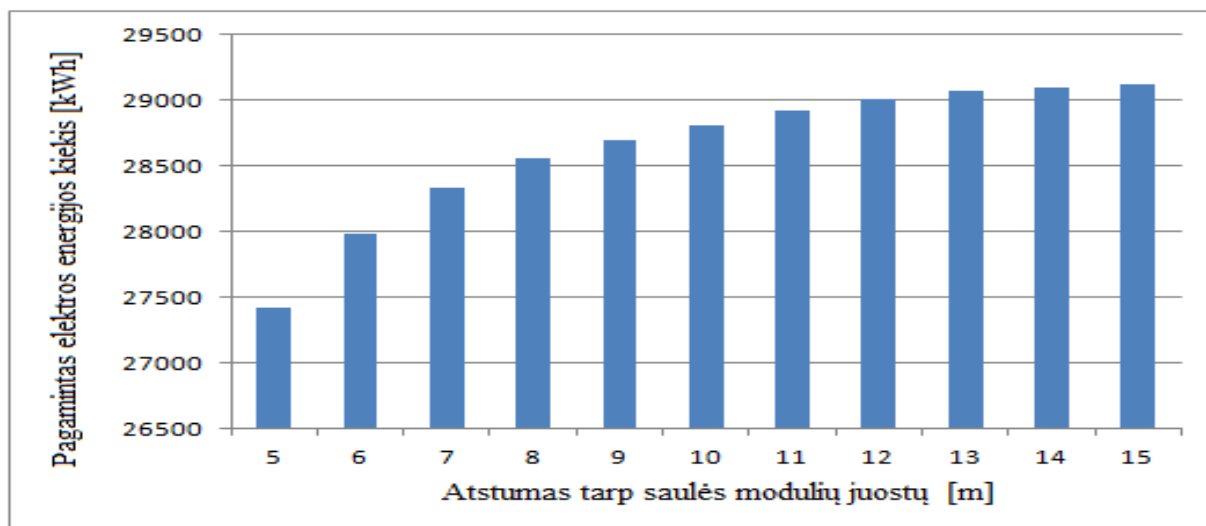
Optimalus atstumas tarp saulės modulių juostų yra vienas iš saulės jėgainės efektyvumo kriterijų. Optimaliausio atstumo parinkimui buvo naudojama dvylika skirtingų atstumų. Šis optimizavimas yra svarbus tuomet, kai žemės sklypas, ant kurio bus statoma saulės jėgainė yra brangus, ir siekiama, kad saulės jėgainė užimtų kuo mažesnę plotą, tačiau pagaminamos elektros energijos kiekis būtų kuo didesnis. Skaičiavimų rezultatai pateikiami 8 lentelėje.

8 lentelė. Skaičiavimų rezultatai parenkant optimaliausią atstumą tarp saulės modulių juostų

Atstumas tarp saulės modulių juostų, metrais	Pagamintas el. energijos kiekis, kWh/metus	Saulės jėgainės kokybės koeficientas	Šešėliavimo, temperatūros, neatitikties nuostoliai, kWh/metus	Sistemos nuostoliai (Inverteris, laidų varža), kWh/ metus
1	15037	0,433	19208,4	536,5
5	27423	0,789	6545,1	744,3
6	27986	0,805	6009,3	751,4
7	28332	0,815	5687,4	754,2
8	28564	0,822	5472,8	768,5
9	28691	0,826	5258,2	774,8
10	28812	0,829	5152,0	786,2
11	28922	0,832	5043,5	789,8
12	29006	0,835	4936,2	790,0
13	29074	0,837	4912,1	794,5
14	29103	0,837	4903,5	796,0
15	29125	0,838	4828,9	800,4
20	29224	0,841	4721,6	812,6

Gautų rezultatų palyginimui pateikiama pagamintos elektros energijos priklausomybės nuo atstumo tarp saulės modulių diagrama (42 pav.). Iš skaičiavimų rezultatų ir diagramos galima matyti, kad pagamintas energijos kiekis nustoja smarkiai didėti ties 13 m atstumu tarp

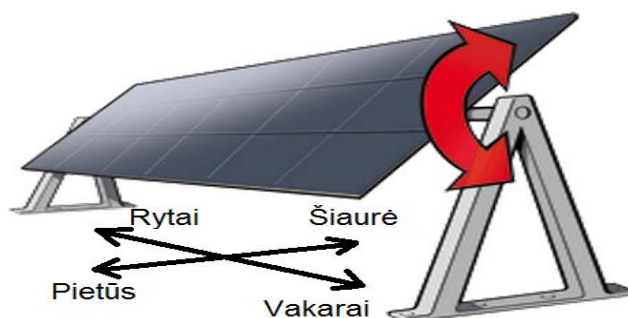
saulės modulių juostų. Ties šiuo atstumu saulės jėgainės kokybės koeficientas bei šešėliavimo nuostoliai pradeda didėti palaipsniui, todėl galima teigti, kad optimaliausias atstumas tarp saulės modulių juostų yra 13 m. Ties šiuo atstumu pagamintas energijos kiekis yra 29074 kWh per metus.



42 pav. Elektros energijos priklausomybė nuo atstumo tarp saulės modulių juostų

3.3.5. Saulės jėgainės optimizavimas naudojant vienaašę sekimo sistemą su horizontalia rytų - vakarų ašimi

Vienaašėje sekimo sistemoje su horizontalia rytų-vakarų ašimi, saulės moduliai yra nuolatos sukiojami pietų – šiaurės kryptimi kampu nuo 10° iki 80° , priklausomai nuo saulės pakilimo kampo. Šios sekimo sistemos schema yra pavaizduota 43 pav.



43 pav. Vienaašę sekimo sistema su horizontalia rytų – vakarų ašimi

Palikus visus ankstesnius saulės jėgainės parametrus, o pakeitus tik stacionarią konstrukciją į konstrukciją su sekimo sistema buvo atliekami skaičiavimai. Gauti rezultatai pateikiami 9 lentelėje.

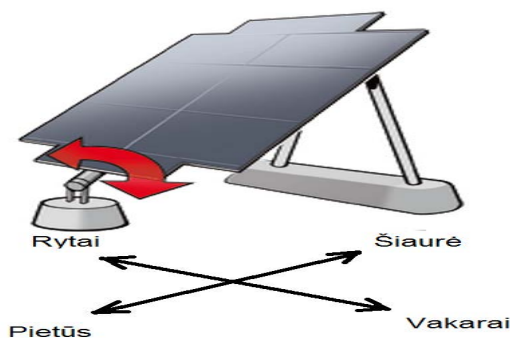
9 lentelė. Saulės jėgainės, naudojančios vienaašę sekimo sistemą su horizontalia rytų - vakarų ašimi, skaičiavimų rezultatai

Saulės jėgainės sekimo sistemos tipas		Vienaašę sistema su horizontalia rytų-vakarų ašimi	
Pagamintas elektros energijos kiekis per metus	31336 kWh/metus	Specifinis pagamintos elektros energijos kiekis per dieną	2,92 kWh/kW/diena
Specifinis pagamintas elektros energijos kiekis per metus	977 kWh/kW/metus	Temperatūros, šešėliavimo ir neatitikties nuostoliai	0,463kWh/kW/diena
Saulės jėgainės kokybės koeficientas	0,852	Sistemos nuostoliai (inverterio)	0,07 kWh/kW/diena

Naudojant šią sistemą pagamintas elektros energijos kiekis per metus padidėjo iki 31336 kWh ir, lyginant su stacionaria sistema, kuri pagamino 29074 kWh, skirtumas siekia 7,2 %. Apskaičiuotas šios jėgainės kokybės koeficientas – 0,852.

3.3.6. Saulės jėgainės optimizavimas naudojant vienaašę sekimo sistemą su horizontalia šiaurės - pietų ašimi

Ši sekimo sistema yra vienaašė, o saulės moduliai yra automatiškai sukiojami rytų ir vakarų kryptimis, todėl turi būti papildomai parenkamas saulės modulių posvyrio kampas pietų kryptimi. Iš ankstesnių skaičiavimų yra nustatyta, kad optimaliausias posvyrio kampas pietų kryptimi pagal pasirinktas klimato sąlygas yra 35°. Šios sekimo sistemos schema pavaizduota 44 pav.



44 pav. Vienaašę sekimo sistema su horizontalia šiaurės – pietų ašimi

Atliekant skaičiavimus, visi saulės jėgainės parametrai pasirenkami tie patys kaip anksčiau minėtuose skyreliuose, keičiamas tik sekimo sistemos tipas. Skaičiavimų rezultatai pateikiami 10 lentelėje.

10 lentelė. Saulės jėgainės, naudojančios vienaašę sekimo sistemą su horizontalia šiaurės - pietų ašimi, skaičiavimų rezultatai

Saulės jėgainės sekimo sistemos tipas		Vienaašė sistema su horizontalia šiaurės-pietų ašimi	
Pagamintas elektros energijos kiekis per metus	38864 kWh/metus	Specifinis pagamintos elektros energijos kiekis per dieną	3,62 kWh/kW/diena
Specifinis pagamintas elektros energijos kiekis per metus	1322 kWh/kW/metus	Temperatūros, šešėliavimo ir neatitikties nuostoliai	0,55 kWh/kW/diena
Saulės jėgainės kokybės koeficientas	0,852	Sistemos nuostoliai (inverterio)	0,08 kWh/kW/diena

Pagamintas elektros energijos kiekis, naudojant vienaašę sekimo sistemą su horizontalia šiaurės – pietų ašimi yra 38864 kWh ir, palyginus su stacionaria sistema, elektros energijos kiekis padidėjo 25,2 %. Atliekant skaičiavimus su šia sekimo sistema taip pat išaugo saulės jėgainės kokybės koeficientas, kuris yra lygus 0,852.

3.3.7. Saulės jėgainės optimizavimas naudojant dviašę sekimo sistemą

Dviašė sekimo sistema nukreipia saulės modulių taip, kad saulės spinduliai visada kristų statmenai į saulės modulį. Ši sekimo sistema gali sukurti modulių tiek rytų – vakarų, tiek šiaurės – pietų kryptimi. Dviašės sekimo sistemos schema pavaizduota 45 pav.



45 pav. Dviašė sekimo sistema

Pakeitus saulės jėgainės sekimo sistemą buvo atliekami skaičiavimai ir gauti rezultatai pateikiami 11 lentelėje.

11 lentelė. Saulės jėgainės, naudojančios dviašę sekimo sistemą, skaičiavimų rezultatai

Saulės jėgainės sekimo sistemos tipas		Dviašė sistema	
Pagamintas elektros energijos kiekis per metus	40732 kWh/metus	Specifinis pagamintos elektros energijos kiekis per dieną	3,80 kWh/kW/diena
Specifinis pagamintas elektros energijos kiekis per metus	1385 kWh/kW/Metus	Temperatūros, šešėliavimo ir neatitikties nuostoliai	0,57 kWh/kW/diena
Saulės jėgainės kokybės koeficientas	0,852	Sistemos nuostoliai (inverterio)	0,09 kWh/kW/diena

Naudojant dviašę sekimo sistemą pagamintas elektros energijos kiekis per metus yra 40732 kWh. Palyginus su stacionaria sistema, pagamintas energijos kiekis išaugo 28,7 %.

3.4. SKIRTINGOS TECHNOLOGIJOS SAULĖS JĖGAINIŲ TECHNINIS-EKONOMINIS PALYGINIMAS

Saulės jėgainių įrengimo sąnaudos yra vienas iš svarbiausių parametru renkantis kokio tipo ir technologijos saulės jėgainė bus įrenginėjama. Skirtingo efektyvumo saulės moduliai lemia saulės jėgainės dydį, užimamą plotą bei konstrukcinių medžiagų kiekį bei montavimo darbų apimtį. Tos pačios galios saulės jėgainė, tik su aukštu saulės modulių efektyvumu, leidžia sutaupyti perkant žemės sklypą, laikančiąsias konstrukcijas, kabelius, bet atsiranda papildomos išlaidos perkant efektyvesnius ir kur kas brangesnius saulės modulius. Naudojant žemo efektyvumo saulės modulius yra sutaupoma perkant pačius saulės modulius, bet pralošiama perkant kitas medžiagas, sklypą ir atliekant montavimo darbus. Taip pat žemo efektyvumo saulės moduliai pagamina šiek tiek mažiau energijos nei aukšto efektyvumo saulės moduliai, esant tam pačiam saulės jėgainės galingumui.

Šiai analizei atlikti buvo parenkami trijų skirtingų technologijų ir efektyvumų saulės moduliai. Skirtingo efektyvumo saulės elementų specifikacijos pateiktos 12 lentelėje. Saulės jėgainė yra stacionarios konstrukcijos, atstumas tarp saulės modulių juostų 13 metrų, o posvyrio kampas 36°.

12 lentelė. Skirtingo efektyvumo saulės modulių specifikacijos

Pavadinimas	Yingli solar Eging PV	Sunpower SPR-X20	Yohkon YEC 200
Naudojama technologija	Polikristalinio silicio saulės elementai	Aukščiausios kokybės monokristalinio silicio saulės elementai	Vario indžio selenido (CIS) saulės elementai
	Saulės elementų paviršiaus tekstūravimas	Galinių kontaktų saulės elemente technologija	Saulės elementų paviršiaus tekstūravimas
	Grublėtas stiklas	Galinių reflektorių saulės elemente technologija	Grublėtas stiklas
		Saulės elementų paviršiaus tekstūravimas	
		Antirefleksinis sluoksnis suformavimas	
		Mažai geležies turintis stiklas	
		Grublėtas stiklas	
		Aukštos kokybės ominiai kontaktai	
Galia	245 W	327 W	136 W
Efektyvumas	Saulės elementų efektyvumas – 16,78 %	Saulės elementų efektyvumas – 22,24 %	Saulės elementų efektyvumas – 11,6 %
	Saulės modulio efektyvumas - 15 %	Saulės modulio efektyvumas - 20,08 %	Saulės modulio efektyvumas -10,4 %

Skaičiavimams buvo parinkti aukšto efektyvumo (20,08 %) Sunpower X-20, vidutinio efektyvumo Yingli solar Eging (15 %) ir mažo efektyvumo (10.4 %) Yohkon YEC 200 saulės moduliai. Remiantis saulės jėgainių rinkos kainomis ir skirtingų kompanijų komerciniais pasiūlymais buvo sudarytas skirtingus saulės modulius naudojančių jėgainių įrengimo kainoraštis (13 lentelė). Saulės jėgainės gali būti statomos ant bet kokios paskirties žemės sklypų ir bet kokiam Lietuvos regione, tad žemės kaina yra parenkama kaip pati pigiausia - žemės ūkio paskirties, kur vidutinė rinkos kaina yra apie 100 Lt už arą. Saulės jėgainė, naudojanti aukščiausio efektyvumo saulės modulius, kainuoja 186295 Lt, vidutinio efektyvumo – 162940 Lt, o mažiausio – 154830 Lt. Žemės sklypas saulės jėgainei naudojant aukščiausio efektyvumo

saulės modulių yra mažiausias – 7,6 a. Kadangi aukšto efektyvumo saulės modulių aktyvusis plotas yra mažesnis nei vidutinio ar žemo efektyvumo saulės modulių, tai leidžia sutaupyti perkant laikančiąsias konstrukcijas, kabelius, žemės sklypą bei atliekant montavimo darbus. Naudojant mažo efektyvumo saulės modulių yra reikalingas didesnis žemės sklypas, reikia daugiau laikančiųjų konstrukcijų, kabelių, taip pat padaugėja montavimo darbų, bet yra sutaupoma perkant pačius saulės modulių.

13 lentelė. Skirtingo efektyvumo saulės modulių naudojančių jėgainių kainoraštis

Saulės modulių pavadinimas	Eging PV/Jing Jing			Sunpower SPR-X20			Yohkon YEC 200		
Medžiagų pavadinimas	Kaina, vnt.	Kiekis	Kaina viso, Lt	Kaina, vnt.	Kiekis	Kaina, Lt	Kaina, vnt.	Kiekis	Kaina, Lt
Fotoelektrinis	480 Lt	122	58560	970 LT	92	89200	220 LT	222	48600
Inverteris Siemens		2 vnt.	15525		2 vnt.	15525		2 vnt.	15525
Kabeliai			10475			9420			10990
Konstrukcijos moduliams			30500			27450			32025
Stebėsenos sistema			10000			10000			10000
Projektavimas			7000			7000			5000
Montavimo darbai			29940			26940			31440
Zemės sklypas	100 Lt	9.4 a	940	100 Lt	7,6 a	760	100 Lt	12,5 a	1250
Visa saulės jėgainės kaina	162940 Lt			186295 Lt			154830 Lt		

Naudojant programą PVSYST buvo paskaičiuotas saulės jėgainių, naudojančių skirtingos kokybės ir efektyvumo saulės modulių, pagamintas elektros energijos kiekis, saulės jėgainės kokybės koeficientas bei patirti nuostoliai. Skaičiavimų rezultatai pateikti 14 lentelėje.

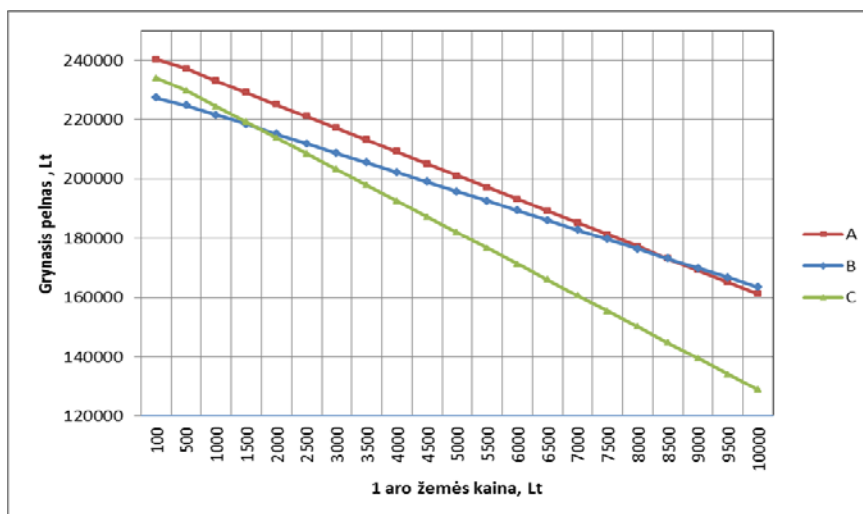
Saulės jėgainė, naudojanti aukščiausio efektyvumo Sunpower SPR-X20 saulės modulių, pagamina daugiausia elektros energijos per metus, kadangi dėl kokybiškų modulių ir žemo temperatūros poveikio moduliui koeficiento buvo patirti mažesni nuostoliai. Mažo efektyvumo saulės moduliai Yohkon YEC 200 pagamina mažiausiai elektros energijos, patiria didžiausius nuostolius ir saulės jėgainės kokybės koeficientas naudojant šiuos modulių yra mažiausias.

14 lentelė. Skirtingo efektyvumo saulės modulių naudojančių jėgainių skaičiavimo rezultatai

Saulės modulių pavadinimas	Eging PV/Jing Jing	Sunpower SPR-X20	Yohkon YEC 200
Pagamintas elektros energijos kiekis per metus	29074 kWh/metus	29574 kWh/metus	28126 kWh/metus
Saulės jėgainės kokybės koeficientas	0,837	0,856	0,790
Temperatūros, šešėliavimo ir neatitikties nuostoliai	4912,1 kWh/metus	4732,4 kWh/metus	5342,5 kWh/metus
Sistemos nuostoliai (inverterio)	794,5 kWh/metus	810,0 kWh/metus	764,6 kWh/metus

Apskaičiavus pagamintus elektros energijos kiekius, yra apskaičiuojamos gautos metinės pajamos iš saulės jėgainės bei viso laikotarpio grynasis pelnas. Gautos pajamos yra apskaičiuojamos padauginus pagamintą elektros energijos kiekį iš skatinamojo tarifo, kuris yra nurodytas 5 lentelėje. Gauti skaičiavimo rezultatai pateikti 15 lentelėje.

Aukšto efektyvumo saulės modulių naudojančios saulės jėgainės užima mažesnę žemės plotą, todėl esant brangiam žemės sklypui šias jėgaines statyti yra ekonomiškai naudingiau. Tam tikslui buvo atlikti skaičiavimai siekiant nustatyti, ties kokia žemės sklypo kaina yra ekonomiškai naudinga statyti aukšto, vidutinio ir žemo efektyvumo saulės modulių naudojančias saulės jėgaines. Gauti skaičiavimo rezultatai pateikti 46 pav.



46 pav. Žemės kainos įtaka grynajam pelnui, kai yra statomos skirtingų technologijų saulės jėgainės (A - vidutinio efektyvumo saulės modulių naudojanti jėgainė, B – aukšto efektyvumo, C – žemo)

Iš skaičiavimo rezultatų matyti, kad esant žemai sklypo kainai – nuo 100 Lt iki 1000 Lt už arą, vertėtų rinktis vidutinio arba žemo efektyvumo saulės modulių. Kainai nuo 1000 Lt iki 8500 Lt už arą, optimaliausia rinktis vidutinio arba aukšto efektyvumo saulės modulių, o žemės kainai esant nuo 8500 Lt už arą, ekonomiškai naudingiausia rinktis aukšto efektyvumo modulių.

15 lentelė. Skirtingo efektyvumo saulės modulių naudojančių saulės jėgainių ekonominis palyginimas

Saulės jėgainės veikimo metai	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Saulės modulių pavadinimas	Eging PV/Jing Jing vidutinio efektyvumo saulės moduliai												
Investicijos į saulės jėgainę, Lt	162940												
Generuojama energija, kWh		29074	28783	28495	28211	27929	27650	27373	27099	26828	26560	26294	26032
Pajamos Lt		41867	41448	41033	40624	40218	39815	39417	39023	38633	38247	37864	37485
Eksplotacinės ir draudimo išlaidos Lt		-2500	-2500	-2500	-2500	-2500	-2500	-2500	-2500	-2500	-2500	-2500	-2500
Investuotojo sukauptas pelnas Lt	-162940	-123573	-84626	-46093	-7969	29748	67064	103981	140504	176637	212384	247748	282733
Pelno mokestis 12 metų laikotarpiui (15%)	42410												
Grynasis pelnas	240323												
Saulės modulių pavadinimas	Sunpower SPR-X20 aukšto efektyvumo saulės moduliai												
Investicijos į saulės jėgainę, Lt	186295												
Generuojama energija		29574	29278	28985.5	28696	28409	28125	27843	27565	27289	27016	26746	26479
Pajamos		42587	42161	41739	41322	40908	40499	40094	39693	39297	38904	38515	38129
Eksplotacinės ir draudimo išlaidos		-2500	-2500	-2500	-2500	-2500	-2500	-2500	-2500	-2500	-2500	-2500	-2500
Investuotojo sukauptas pelnas	-186295	-146208	-106548	-67309	-28487	9922	47921	85515	122709	159505	195909	231923	267553
Pelno mokestis 12 metų laikotarpiui (15%)	40133												
Grynasis pelnas	227420												
Saulės modulių pavadinimas	Yohkon YEC 200 žemo efektyvumo saulės moduliai												
Investicijos į saulės jėgainę, Lt	154830												
Generuojama energija		28126	27845	27566	27291	27018	26748	26480	26215	25953	25694	25437	25182
Pajamos		40501	40096	39695	39299	38906	38516	38131	37750	37372	36999	36629	36262
Eksplotacinės ir draudimo išlaidos		-2500	-2500	-2500	-2500	-2500	-2500	-2500	-2500	-2500	-2500	-2500	-2500
Investuotojo sukauptas pelnas	-154830	-116829	-79232	-42037	-5238	31167	67184	102815	138065	172938	207436	241565	275328
Pelno mokestis 12 metų laikotarpiui (15%)	41299												
Grynasis pelnas	234028												

Iš 15 lentelės skaičiavimo rezultatų matyti, kad ekonomiškai naudingiausia yra statyti vidutinio efektyvumo saulės modulių naudojančias saulės jėgaines. Investicijos į vidutinio efektyvumo saulės modulių naudojančias saulės jėgaines yra didesnės nei naudojant mažo efektyvumo saulės modulių, tačiau pagamintas energijos kiekis ir tuo pačiu pajamos gaunamos didesnės. Naudojant aukšto efektyvumo saulės modulių, investicijos į saulės jėgainę yra kur kas didesnės nei į vidutinio saulės modulių naudojančias saulės jėgaines, o pagamintas energijos kiekis ir gautos pajamos yra nepakankamai didelės, kad gautas grynasis pelnas, viso saulės jėgainės veikimo periode, aplenkto grynąjį pelną gautą iš vidutinio efektyvumo saulės modulių naudojančias jėgaines išskyrus tada, kai žemės sklypo kaina yra didesnė nei 8500 Lt už arą.

IŠVADOS

1. Nors Lietuvos geografinės koordinatės yra maždaug 54-56 laipsnių šiaurės platumos, bet mokslinių tyrimų rezultatai liudija, kad saulės spindulių kiekis gali visiškai patenkinti mūsų šalies energijos poreikius. Didžiausią potencialą fotoelektros gamybai turi pietinė Lietuvos dalis: Nida, Lazdijai, Šilutė, Kybartai, Klaipėda, Telšiai – vietovės, kuriose vienam kvadratiniam metrui per metus vidutiniškai tenka nuo 1042 kWh iki 1013 kWh.

2. Saulės jėgainių veikimas priklauso nuo jėgainės atskirų komponentų kokybės ir aplinkos veiksnių. Modulio padėtis jėgainėje, jo tvirtinimas, projektavimo klaidos lemia skirtingą jėgainės modulių aušinimą. Šis efektas išbalansuoja modulių efektyvumą mažindamas ir visos jėgainės produktyvumą. Dar vienas svarbus veiksnys, mažinantis jėgainės produktyvumą, yra saulės modulių šešėliavimas. Šešėliuojami saulės moduliai sugeria mažiau saulės spindulių ir tai sąlygoja ne tik mažesnę saulės modulių efektyvumą, bet ir visos saulės jėgainės kokybės koeficientą.

3. Žinoma, kad optiniai nuostoliai mažina saulės elementų galią, mažindami trumpojo jungimo srovę. Pastebėta, kad pagrindiniai būdai, mažinantys optinius nuostolius ir didinantys saulės elemento efektyvumą yra: saulės elemento paviršiaus tekstūravimas, galinio atspindžio technologija, galinių Lamberto reflektorių naudojimas, giliai įdiegtų kontaktų arba galinių kontaktų saulės elemente naudojimas.

4. Praktinėje darbo dalyje suprojektuota standartinė 30 kW galios stacionarios konstrukcijos saulės jėgainė. Sumodeliavus saulės jėgainės konstrukcinę schemą, parinkus sistemos komponentus, nustatius klimato sąlygas ir įvertinus šešėliavimo nuostolius, buvo atlikti skaičiavimai. Pagamintas elektros energijos kiekis per metus buvo 28812 kWh, o saulės jėgainės kokybės koeficientas lygus 0,829.

5. Atliekant saulės jėgainių efektyvumo kriterijų tyrimą, buvo bandoma parinkti optimaliausią saulės jėgainės variantą. Atlikta dvylika skaičiavimų su skirtingais saulės modulių pakilimo kampais. Nustatyta, kad optimaliausias kampas Lietuvos klimato zonoje yra 35° . Atlikus dvylika skaičiavimų su skirtingais atstumais tarp saulės modulių juostų, buvo gauta, kad optimaliausias atstumas yra 13 metrų.

6. Keičiant saulės jėgainės stacionarią konstrukciją į vienašę sekimo sistemą su horizontalia rytų – vakarų ašimi, buvo gautas 7,2 % metinis pagamintos elektros energijos kiekio padidėjimas. Naudojant vienašę sekimo sistemą su horizontalia šiaurės – vakarų ašimi buvo apskaičiuotas 25,2 % metinis pagamintos elektros energijos kiekio padidėjimas, palyginti su stacionaria sistema. Geriausias rezultatas buvo pasiektas naudojant dviašę sekimo sistemą, kai

pagamintas elektros energijos kiekis per metus buvo 28,7 % didesnis nei saulės jėgainės su stacionaria sistema.

7. Atlikus saulės jėgainių, naudojančių aukšto, vidutinio ir žemo efektyvumo saulės modulių, techninį-ekonominį palyginimą, nustatyta, kad ekonomiškai naudingiausia yra statyti vidutinio efektyvumo saulės modulių naudojančias saulės jėgaines, kadangi gautas grynasis pelnas yra 240323 Lt ir tai yra 12903 Lt daugiau nei naudojant aukšto efektyvumo modulių ir 6295 Lt daugiau nei naudojant žemo efektyvumo modulių. Taip pat buvo apskaičiuota, kad statyti saulės jėgaines, naudojančias aukšto efektyvumo saulės modulių, ekonomiškai naudinga esant žemės sklypo kainai didesnei nei 8500 Lt už arą.

LITERATŪRA

Automatic solar tracking system. 2009. [interaktyvus]. [žiūrėta 2012-12-05]. Prieiga per internetą: <http://cvchary.blogspot.com/2009/06/automatic-solar-tracking-system.html>

Becker, G.; Schiebelsberger, B.; Weber, W. 2006. An approach to the impact of snow on the yield of grid connected PV systems. Bavarian Association for the Promotion of Solar Energy, 155–159.

Blakers, A., et al., 2009. A Global Report on Photovoltaic and Wind Energy. Research and Development on Renewable Energies. International Energy Panel on Renewables Energy [interaktyvus]. [žiūrėta 2012-12-10]. Prieiga per internetą: http://www.icsu.org/publications/reports-and-reviews/ispre-photovoltaic-wind/ISPRE_Photovoltaic_and_Wind.pdf

Cramer, G. 2004. PV system technologies: State-of-the-art and trends in decentralized electrification, *Refocus* 5(1), 38-42.

Dierauf, T., et al. 2013. Weather-Corrected Performance Ratio. National Renewable Energy Laboratory [interaktyvus]. [žiūrėta 2013-02-14]. Prieiga per internetą: <http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/57991.pdf>

Dobranski, L.A.; Drygala, A.. 2008. Surface texturing of multicrystalline silicon solar cells.

Dorobantu, L.; Popescu, M. O.; Popescu, C. L. 2011. Yield loss of photovoltaic panels caused by depositions. The 7th International Symposium on Advanced topics in electrical engineering, 506–510.

Fotoelektros plėtros perspektyvos. 2012. UAB „Saulės energija“ [interaktyvus]. [žiūrėta 2012-12-10]. Prieiga per internetą: http://www.saulėsvejoenergija.lt/Fotoelektra/&Language=lt_LT

Honsberg, A. 2009. Advanced solar cells. Arizona State University.

Honsberg, A.; Bowden, S. 2012. Knyga apie saulės elementus, modlius ir saulės elektrines. PVCDROM [interaktyvus]. [žiūrėta 2012-12-05]. Prieiga per internetą: <http://www.pveducation.org/pvcdrom>.

Janušonienė, V. 2001. Ar verta Lietuvoje saulės šviesą versti elektra, *Mokslas ir gyvenimas* 6(522): 14-17.

Krotkus, A.. 2010. Naujovės saulės energetikoje [interaktyvus]. [žiūrėta 2012-12-01]. Prieiga per internetą: <http://rtn.elektronika.lt/mi/0507/saulės.html>

Kymaki, E.; Kylakakis, S.; Papazoglou, T. 2009. Performance analysis of a grid connected photovoltaic park on the island of Crete, *Energy Conversion and Management* 50 (3): 433–438.

Lietuvos elektros sektorius.. 2013. Lietuvos Respublikos energetikos ministerija [interaktyvus]. [žiūrėta 2012-12-05]. Prieiga per internetą: http://www.enmin.lt/lt/activity/veiklos_kryptys/energijos_efektyvumas/elektros_ukis.php?sphras_e_id=10548&clear_cache=Y

Lietuvos Respublikos atsinaujinančių išteklių įstatymas. *Valstybės žinios*. 2011, Nr.62-2936.

Mani, M.; Pillai, R. 2010. Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 4(2010): 3124–3131.

Marangoly, A. G. 2012. Utility Scale Solar Power Plants: A Guide For Developers and Investors. International Finance Corporation. [interaktyvus]. [žiūrėta 2014-03-10]. Prieiga per internetą:

http://www1.ifc.org/wps/wcm/connect/topics_ext_content/ifc_external_corporate_site/ifc+sustainability/publications/publications_handbook_solarpowerplants .

Milutiene, E.. 2011. Saulės energijos naudojimas. Daktaro laipsnio disertacija. KTU. Aplinkos inžinerijos fakultetas.

Nacionalinė energetikos strategija. 2011. Energetinės nepriklausomybės strategija.

Performance ratio Quality factor for the PV plant. 2012. SMA Solar Technology AG [interaktyvus]. [žiūrėta 2012-12-12]. Prieiga per internetą: <http://files.sma.de/dl/7680/Perfratio-UEN100810.pdf>

PVSYST projektavimo įrankis [interaktyvus]. [žiūrėta 2012-12-16]. Prieiga per internetą: <http://www.pvsyst.com/en/>.

Saulės elemento tyrimas. 2004. Laboratoriniai darbai. Aplinkos fizika. Vytauto didžiojo universitetas [interaktyvus]. [žiūrėta 2012-12-12]. Prieiga per internetą: http://gamta.vdu.lt/bakalaurai/lab_darbai/apl_fiz/ESF%20AF%20LD%201%20Saules.pdf

Saulės jėgainės įrengimo procesas. 2013. UAB „Via Solis“. [interaktyvus]. [žiūrėta 2012-12-08]. Prieiga per internetą: <http://www.viasolis.eu/lt/saules-jegaines-irengimo-procesas>

Šiuo metu dirbančios šiluminės jėgainės, nacionalinio tinklo schema ir ateities planai (2012). LITGRID [interaktyvus]. [žiūrėta 2012-12-05]. Prieiga per internetą: http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:iiflnAuh87IJ:www.litgrid.eu/go.php/lit/Schema_ir_tehnines_charakteristikos/152/10/203+Lietuvos+330-110+kV+elektros+perdavimo+sistema+2011&cd=1&hl=lt&ct=clnk&gl=lt

Sunarc Technology. 2012. AR surfaces [interaktyvus]. [žiūrėta 2012-12-08]. Prieiga per internetą:

http://www.sunarc.net/index.php?option=com_content&view=article&id=26&Itemid=24.

Swanson ,M.. 2003. Photovoltaic Concentrators. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. ISBN: 0-471-49196-9.

Šúri, M., et al. 2007. Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries, *Solar Energy* 81(10): 1295–1305.

The Advantages of Using Our Solar Trackers. 2011. Rimlife Green Technologies LLC. [interaktyvus]. [žiūrėta 2012-12-05]. Prieiga per internetą: <http://cvchary.blogspot.com/2009/06/automatic-solar-tracking-system.html>.

Vasarevičius, D. 2011. Atsinaujinančių šaltinių panaudojimo ir perspektyvų Lietuvoje analizė, *Mokslas – Lietuvos ateitis* 3(1): 73-77.

I ir II kartos saulės elementai. 2011. Fotoelektros technologijų ir verslo asociacija [interaktyvus]. [žiūrėta 2014-03-10]. Prieiga per internetą: <http://www.pvatvirainovacija.lt/index.php/lt/apvalgos/1>.