Kauno technologijos universitetas
Elektros ir elektronikos fakultetas

Saulės elektrinių viso gyvavimo ciklo darnumo vertinimas

Baigiamasis magistro projektas

Tomas Kondrotas
Projekto autorius

Prof. Inga Konstantinavičiūtė
Vadovė

Kaunas, 2025

Kauno technologijos universitetas
Elektros ir elektronikos fakultetas

Saulės elektrinių viso gyvavimo ciklo darnumo vertinimas

Baigiamasis magistro projektas

Energijos technologijos ir ekonomika (6211EX073)

Tomas Kondrotas
Projekto autorius

Prof. Inga Konstantinavičiūtė
Vadovė

Doc. Roma Račkienė
Recenzentė

Kaunas 2025

Kauno technologijos universitetas
Elektros ir elektronikos fakultetas
Tomas Kondrotas

Saulės elektrinių viso gyvavimo ciklo darnumo vertinimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;

2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąraše;

3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);

4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Tomas Kondrotas
Patvirtinta elektroniniu būdu

Kondrotas, Tomas. Saulės elektrinių viso gyvavimo ciklo darnumo vertinimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovė prof. dr. Inga Konstantinavičiūtė; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: darnumas, vertinimas, ekologija, gyvavimo ciklas.

Kaunas, 2025. 60 p.

Santrauka

Siekiant išsiaiškinti, koks saulės elektrinės įsigijimo būdas yra efektyviausias, atliktas ir įvertinamas dviejų tipų saulės elektrinių viso gyvavimo ciklo darnumo vertinimas.. Pagal mokslinę literatūrą apibendrinami metodiniai saulės elektrinių gyvavimo ciklo darnumo vertinimų nurodymai ir skaičiavimai. Simuliuojama saulės elektrinių metinė ir viso gyvavimo ciklo sugeneruota elektros energija, modulių degradacija ir sezoniškumas.

Vertinama greičiausiai ekologiškai ir ekonomiškai atsiperkanti saulės elektrinės sistema ir jos įsigijimo būdas. Tyrimui atlikti pasirenkami tiksliniai objektai, kurie atitinka šių dienų tendencijas. Objektų vieta, kryptis ir orų duomenų paketas pasirenkama identiškas, maksimaliam rezultatų tikslumui pasiekti. Parenkami sistemos gyvavimo ciklo pabaigos scenarijai, kurių padariniai vertinami ekonominiais ir ekologiniais rodikliais.

Kondrotas, Tomas. Assessment of Life Cycle Sustainability of Solar Power Plants. Master's Final Degree Project / supervisor prof. dr. Inga Konstantinavičiūtė; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Field of study and area (field of study group): energy engineering, engineering sciences.

Keywords: sustainability, assessment, ecology, life cycle.

Kaunas, 2025. 60 p.

Summary

In order to find out which scientific method of acquiring solar power plants is the most effective, a life cycle sustainability assessment of two types of solar power plants is performed and evaluated. Based on the literature, methodological instructions and calculations for life cycle sustainability assessments of solar power plants are summarized. The annual and life cycle generated electricity of solar power plants, module degradation and seasonality are simulated.

The ecologically and economically profitable method of acquiring a solar power plant and its system is evaluated. Target objects are selected for the study that correspond to current trends. The location, direction and weather data package of the objects are chosen identically to achieve maximum accuracy of the results. End-of-life scenarios of the system are selected, the consequences of which are assessed by economic and ecological indicators.

Turinys

Lentelių sąrašas **7**
Paveikslų sąrašas **8**
Įvadas **10**
1. Saulės elektrinių plėtros darnumo aspektai **12**
1.1 Darni energetikos plėtra 12
1.1.1 Atsinaujinančių energijos šaltinių plėtra 12
1.1.2 Energijos efektyvumas 13
1.1.3 Energetinis saugumas ir tvarumas 13
1.2 Saulės elektrinių panaudojimo plėtros problemos 14
1.2.1 Technologinės problemos 15
1.2.2 Ekonominės problemos 15
1.2.3 Teisinės ir infrastruktūros problemos 15
1.2.4 Aplinkosauginiai veiksniai 16
1.2.5 Tinklo pajėgumai ir integravimas į elektros skirstomuosius tinklus 16
1.3 Saulės elektrinių technologiniai sprendimai ir jų rinka 16
1.3.1 Saulės moduliai 17
1.3.2 Saulės elektrinių inverteriai 19
1.3.3 Saulės elektrinių išmaniosios valdymo sistemos 19
1.3.4 Saulės elektrinių rinka 20
1.3.5 Saulės elektrinių perdirbimas 20
2 Saulės elektrinių gyvavimo ciklo vertinimo metodika **21**
2.1 Viso gyvavimo ciklo (LCA) metodikos bendrieji principai 21
2.2 Saulės elektrinių viso gyvavimo ciklo vertinimo ribos 21
2.3 Saulės elektrinių viso gyvavimo ciklo darnumo vertinimo kriterijai 30
2.3.1 Energijos efektyvumas 30
2.3.2 Aplinkosauga 31
2.3.3 Ekonomika 33
3 Saulės elektrinių viso gyvavimo ciklo darnumo palyginamasis vertinimas **34**
3.1 Tyrimo objektas 34
3.1.1 Ant privataus namo stogo montuojama saulės elektrinė iki 10 kW 35
3.1.2 Ant žemės montuojamas saulės elektrinių parkas iki 10 MW 36
3.2 Saulės elektrinių energijos generacijos palyginamasis vertinimas 37
3.3 Saulės elektrinės viso gyvavimo ciklo aplinkosauginių kriterijų palyginamasis vertinimas 39
3.4 Saulės elektrinių viso gyvavimo ciklo ekonominių kriterijų palyginamasis vertinimas 43
3.5 Saulės elektrinių viso gyvavimo ciklo darnumo vertinimo apibendrinimas 46
Išvados **48**
Literatūros sąrašas **49**
Priedai **54**
1. priedas. 10 MW galios saulės elektrinės vienerių metų gamyba 54
2 priedas. 10 MW saulės elektrinės 30-ties metų simuliacija 55
3 priedas. 10 kW ant stogo montuojamos saulės elektrinės vienerių metų gamybos simuliacija 56
4 priedas. 10 kW ant stogo montuojamos saulės elektrinės vienerių metų gamybos simuliacija 57
5 priedas. Saulės elektrinių viso gyvavimo ciklo energijos suvartojimas ir ŠESD emisijos 58
6 priedas. 10 MW saulės elektrinės su saulės sekimo įranga skaičiavimai 59
7 priedas. 10 kW ant stogo montuojamos saulės elektrinės skaičiavimai 60

Lentelių sąrašas

1 lentelė. ŠESD emisijos vienam kW instaliuotos galios pagal skirtingus saulės elektrinės utilizavimo scenarijus[21]. 20
2 lentelė. STD ir GG tipo moduliams reikalingų medžiagų išgavimui sunaudota energija ir išskirtos emisijos[14]. 23
3 lentelė. Modulių stiklas/stiklas ir standartinių modulių (stiklas/Plėvelė) surinkimui, transportui ir utilizavimui sunaudota elektros energija ir ŠESD emisijos per 1 kW instaliuotos galios[19]. 23
4 lentelė. Inverterių nuo 2,5 iki 20 kW sudedamųjų medžiagų kiekiai ir inverterio surinkimo energijos sąnaudos[19]. 24
5 lentelė. Inverterių nuo 300 kW iki 1 MW sudedamųjų medžiagų kiekiai ir inverterio surinkimo energijos sąnaudos[19]. 24
6 lentelė Transporto priemonių šiltnamio efektą sukelenčių dujų ekvivalientas[22, 43]. 25
7 lentelė. Saulės elektrinei įrengti sunaudojama darbo jėga, įranga ir išskiriamos ŠESD emisijos[16]. 26
8 lentelė. 10 MW galios elektrinės vidutinė darbų trukmė, darbuotojų skaičius ir išskirtas ŠESD emisijų kiekis[16]. 27
9 lentelė. Saulės elektrinės statyboms naudojamos technikos kiekis ir emisijos[22]. 27
10 lentelė. Saulės elektrinės eksploatacinių darbų dažnumas, reikalingi resursai ir vidutinė trukmė. 28
11 lentelė. Gedimų tipai ir tikimybės.[18] 28
12 lentelė. Emisijų kiekiai sukurti utilizuojant ir perdirbant saulės elektrinę[23]. 30
13 lentelė. Tiriamos saulės elektrinės montuojamos ant plokščio stogo duomenys. 35
14 lentelė. Tiriamos saulės elektrinės montuojamos ant plokščio stogo medžiagų žiniaraštis. 35
15 lentelė. Tiriamos saulės elektrinės su saulės sekimo sistema duomenys. 36
16 lentelė. Tiriamos saulės elektrinės su saulės sekimo sistema medžiagų žiniaraštis. 36
17 lentelė. Per 30 metų sistemos sugeneruota elektros energija (MWh) 38
18 lentelė. Ant stogo montuojamos SE (10 kW) ir saulės parke su saulės sekimo sistema (9740 kW) išpirktos saulės elektrinės palyginamieji rodikliai skirtingais gyvavimo ciklo pabaigos scenarijais. 47

Paveikslų sąrašas

1 pav. Pasaulinė AEI plėtra nuo 2010 iki 2020[5] 12
2 pav. Lietuvoje esančios saulės elektrinių plėtros problemos nuo mažiausios iki didžiausios[10] 14
3 pav. Polikristalinio modulio sluoksniai [45] 17
4 pav. Monokristalinio modulio celė[46] 18
5 pav. Dvipusiai saulės moduliai sumontuoti ant saulę sekančių konstrukcijų[22] 18
6 pav. Saulės elektrinių inverterių efektyvumo raida 2010-2024 metais[23] 19
7 pav. Vertinami LCA etapai[27] 21
8 pav. Ant žemės montuojamos SE pagaminama elektros energija tenkanti vienam kW galios per dieną[46]. 37
9 pav. Ant stogo montuojamos SE pagaminama elektros energija tenkanti vienam kW galios per dieną[46]. 37
10 pav. SE per visą gyvavimo ciklą, vienam instaliuotam kW galios tenkantis pagamintos energijos kiekis 38
11 pav. SE efektyvumo koeficiento degradavimas per 30 metų 39
12 pav. Saulės elektrinių viso gyvavimo ciklo sunaudota elektros energija, vienam kW instaliuotos galios 40
13 pav. Saulės elektrinių energijos atsipirkimo laikas 41
14 pav. ŠESD emisijos tenkančios vienam SE instaliuotam kW galios 41
15 pav. ŠESD emisijos tenkančios vienai SE pagamintai kWh 42
16 pav. ŠESD emisijų atsipirkimo laikas (metais) 42
17 pav. Ant stogo montuojamos SE ir išpirkto SE parko dalies LCOE kWh/€ 44
18 pav. Ant stogo montuojamos SE ir išpirkto SE parko dalies NPV eurais 46

Santrumpų ir terminų sąrašas

CO_2 – anglies dvideginis;

ŠESD – šiltnamio efektą skatinančios dujos;

EPBIT – energijos atsipirkimo laikas;

AEI – atsinaujinantys energijos ištekliai;

ES – Europos sąjunga;

SE – saulės elektrinė;

kW – kilovatas;

kWh – kilovatvalandė;

MWh – megavatvalandė;

MW – megavatas.

Įvadas

Temos aktualumas: Pastaraisiais metais, žalioji energetika vis labiau užkariauja pasaulį. Pasaulyje vis dažniau įrengiamos saulės ir vėjo elektrinės. Šie elektros gavimo būdai, yra laikomi vieni tvariausių šiuo metu. Naudojant šias technologijas pasitelkiami atsinaujinantys energijos ištekliai (AEI) pvz: saulės šviesos spinduliai ir vėjas. 2022 m. Europos Sąjungos (ES) vartojime, atsinaujinantys energijos ištekliai sudarė 23%. Tuo tarpu Lietuvoje, šie šaltiniai sudarė 29,6%. 2023 m. rugsėjį Europos Parlamentas pritarė, kad iki 2030 m. atsinaujinanti energetika sudarytų 42,5% viso ES suvartojimo. Sparčiai didėjantis AEI suvartojimas Lietuvoje, rodo teisinga kryptimi vystomą infrastruktūrą[1].

Namų ūkiuose, sparčiai populiarėja, ant stogų, montuojamos saulės elektrinės. Tam didelę įtaką daro aplinkos projektų valdymo agentūros skiriama parama saulės elektrinei įsigyti. 2024 m. birželio 11 d. aplinkos projektų valdymo agentūra paskelbė naują paramos kvietimą. Šį kartą, saulės elektrinės įsirengimo paramos priemonei Energetikos ministerija skyrė net 40 mln. Eur[2].

Privatūs namų ūkiai vis dažniau nori ne tik taupyti, bet ir prisidėti prie aplinkos tausojimo. Vis dėl to siekdami didžiausios finansinės naudos, kai kurie rangovai ne visada pasirenka ekologiškiausią sprendimą elektrinės montavimo procese. Nepaisant to, kad saulės energija laikoma „žaliąja“ alternatyva, norint atskleisti tikrąjį SE ekologinį pėdsaką, svarbu išsamiai įvertinti visą saulės elektrinių gyvavimo ciklą – nuo žaliavų išgavimo ir gamybos iki eksploatacijos pabaigos ir utilizacijos.

Elektrinės įrengimo sąnaudos priklauso nuo kelių veiksnių – jos bendrosios galios, tipo (antžeminė, montuojama ant stogo), taip pat nuo pasirinktų fotovoltinių modulių tipo. Ant stogo montuojamos SE paprastai reikalauja mažesnių investicijų, tačiau pasižymi mažesnę įrengiamąja galia. Saulės parke išpirkta saulės elektrinės dalis dažniausiai reikalauja didesnių investicijų, tačiau generuoja daugiau elektros energijos, todėl iškyla klausimas, kuris SE tipas yra naudingesnis. Be to, tiek rangovai, tiek vartotojai, dažnai nesusimąsto apie ilgalaikes elektrinės eksploatacijos pasekmes.

Šiuo darbu tiriama kuri saulės elektrinės konstrukcija atsiperka greičiau, yra ekologiškiausia, išskiria mažiausiai CO_2, ir kiek CO_2 išskirs elektrinės perdirbimas, bei kokią įtaką ekologijai tai darys.

Darbo objektas: - Saulės elektrinių viso gyvavimo ciklo darnumo vertinimas.

Darbo tikslas: - Atlikti ant stogo montuojamų ir ant žemės montuojamų, saulės elektrinių viso gyvavimo ciklo darnumo vertinimą.

Darbo uždaviniai:

- Atlikti saulės elektrinių darnios energetikos plėtros aspektų literatūros analizę.
- Atlikti sparčios saulės elektrinių plėtros technologinių, ekonominių ir aplinkosauginių problemų analizę.
- Sudaryti saulės elektrinių viso gyvavimo ciklo darnumo vertinimo metodiką
- Atlikti skirtingų saulės elektrinių viso gyvavimo ciklo darnumo vertinimą
- Atlikti analizuotų saulės elektrinių palyginamąjį vertinimą

Tyrimo metodika: 1 dalyje naudojama mokslinės literatūros lyginamoji analizė ir statistinių duomenų analizė, 2 dalyje aprašoma tyrimo skaičiavimų metodika, 3 dalyje taikoma matematinių skaičiavimų rezultatų lyginamoji analizė.

Magistrinio darbo struktūra: Magistrinį darbą sudaro santrauka, turinys, lentelių ir paveikslų sąrašai, santrumpos, įvadas, literatūros apžvalginė, metodinė, tiriamoji dalys, išvados, literatūros sąrašas. Darbas susideda iš 65 puslapių, 19 lentelių, 18 paveikslų ir 7 priedų. Literatūros sąrašas sudarytas iš 44 šaltinių.

1. Saulės elektrinių plėtros darnumo aspektai

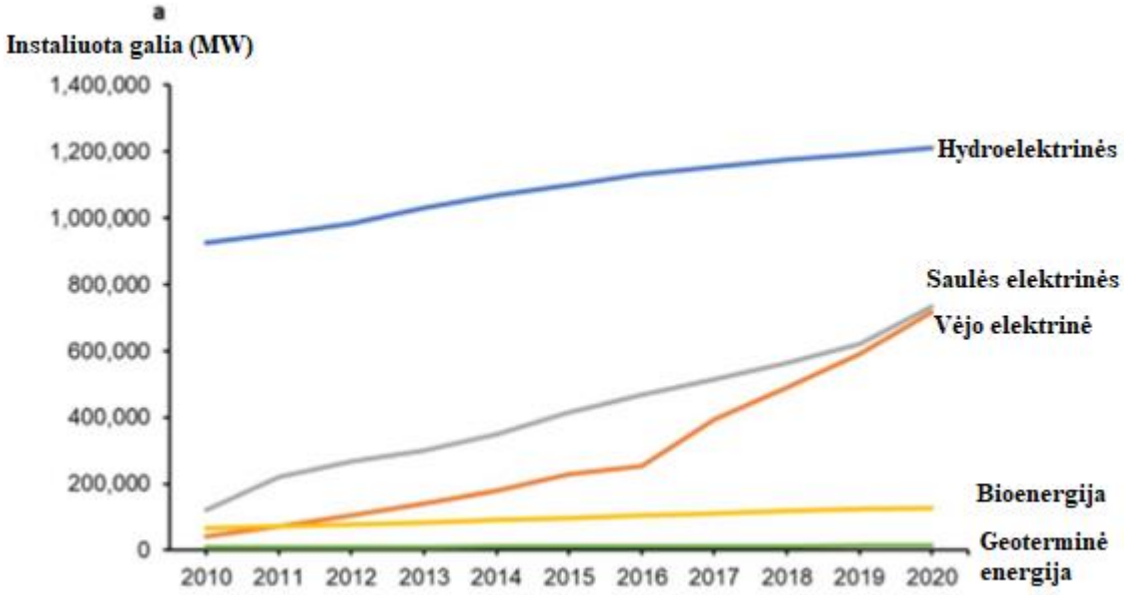
1.1 Darni energetikos plėtra

Darni energetikos plėtra – tai subalansuotas energijos vartojimo ir gamybos modelis, kuris užtikrina socialinę gerovę, ekonominį efektyvumą, o svarbiausia aplinkos tausojimą. Ši plėtra remiasi atsinaujinančių energijos šaltinių plėtra, šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų mažinimu ir energijos efektyvumo didinimu[3].

Naudojant darnią energetikos plėtra siekiama modernizuoti pastatus ir didinti jų efektyvumą. Įtraukti gyventojus ir regionus į energetikos pertvarką. Didinti AEI naudojimą ir mažinti priklausomybę nuo importuojamų iškastinių šaltinių[4]. Šis požiūris leidžia kurti tvarią energetikos sistemą, kuri prisideda prie klimato kaitos švelninimo.

1.1.1 Atsinaujinančių energijos šaltinių plėtra

Atsinaujinančių energijos šaltinių plėtra yra vienas svarbiausių faktorių siekiant tvarumo. Ši plėtra apima saulės, vėjo, vandens, biomasės ir geoterminės energijos šaltinius. Norint sumažinti priklausomybę nuo iškastinio kuro ir mažinti ŠESD išmetimą, atsinaujinančių energijos šaltinių plėtra yra būtina[3]. AEI yra ne tik ekologiškesnis, bet ir ekonomiškai tvaresnis energijos tiekimo modelis, kuris ilgainiui sumažina energijos kainas ir priklausomybę nuo importuojamo kuro.



1 pav. Pasaulinė AEI plėtra nuo 2010 iki 2020[5]

Atsinaujinančių energijos šaltinių plėtrai, taip pat didelę grėsmę kelia ir AEI panaudojimo plėtros iššūkiai. Nepastovus energijos gamybos pobūdis, ypač vėjo ir saulės elektrinėse išlieka viena pagrindinių kliūčių plačiam atsinaujinančių šaltinių vartojimui[6]. Taip pat kaip ir didelės pradinės investicijos ir būtinybė modernizuoti elektros tinklus yra svarbūs veiksniai ribojantys šios srities plėtrą.

Baltijos šalys, turi didelį techninį potencialą ant stogo montuojamoms saulės elektrinėms, taip pagerindamos elektros energijos perdavimą. Lietuvoje apie 66% populiacijos gyvena

daugiabučiuose, kurie buvo pastatyti iki 1993 metų. Šie kvartalai turi didelį potencialą pasitarnauti kaip energetinių bendrijų plėtros bandymų aikštele[7].

Iki 2030 metų Lietuva turi tikslą, savo elektros energijos vartojimą bent 45% padengti vien iš AEI. Iki 2050 metų tikimasi, 80% gamybos padengti vien tik AEI ir pasiekti 100% AEI energijos naudojimą energijos gamyboje[30].

Tačiau kaip ir daugeliui problemų, taip ir šioms, yra kuriami galimi sprendimų būdai. Nepastovų elektros energijos gamybos pobūdį galima būtų išspręsti pasitelkiant pažangius energijos kaupimo sprendimus[6]. O dideles pradines investicijas finansuoti efektyvia vyriausybės parama ar subsidijomis. Taip pat privataus ir viešojo sektoriaus bendradarbiavimas galėtų užtikrinti finansavimo stabilumą[3].

1.1.2 Energijos efektyvumas

Energijos efektyvumas – tai gebėjimas pasiekti tą patį ar geresnį rezultatą naudojant mažiau energijos išteklių. Taip šį terminą apibūdina Maria Basilio savo straipsnyje „Renewable energy and energy efficiency: An exploratory study in EU countries" Efektyvus energijos vartojimas padeda keliais aspektais. Pirmiausiai, tai mažina šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas[8]. Be to, efektyvesnis energijos vartojimas sumažina energijos išlaidas tiek verslui tiek namų ūkiams. O verslininkams, tai gali būti kelias didinti ekonominį konkurencingumą.

Pagrindinis energijos efektyvumo rodiklis yra „Energijos intensyvumas". Jis yra vienas pagrindinių rodiklių, apibrėžiantis sunaudojamos energijos kiekį vienam BVP vienetui[9]. Mažinti energijos suvartojimą vienam BVP vienetui, yra kuriamos energijos efektyvumo didinimo strategijos. Investicijos į izoliacines medžiagas, modernias šildymo bei vėdinimo sistemas. Energijos suvartojimas gamybos procesuose gali būti sumažintas diegiant pažangias technologijas ir efektyvesnę logistiką. Taip pat tinkamai izoliuoti pastatai gali sutaupyti iki 50% energijos, lyginant su senesniais neefektyviais pastatais.

Transporto elektrifikacija ir efektyvesnės degalų sąnaudos taip pat yra svarbios priemonės mažinant energijos švaistymą. Modernūs elektros tinklai leidžia efektyviau valdyti elektros srautus ir mažina energijos nuostolius. Šias ir daugiau kitų strategijų, energijos vartojimo efektyvumo gerinimui naudoja Europos šalių vyriausybės. Pagrindinis iššūkis norint gerinti energijos vartojimo efektyvumą – projektų kainą[8]. Šią problemą galėtų išspręsti Valstybės parama energijos taupymo projektams, kuri yra būtina, siekiant skatinti ilgalaikius pokyčius.

1.1.3 Energetinis saugumas ir tvarumas

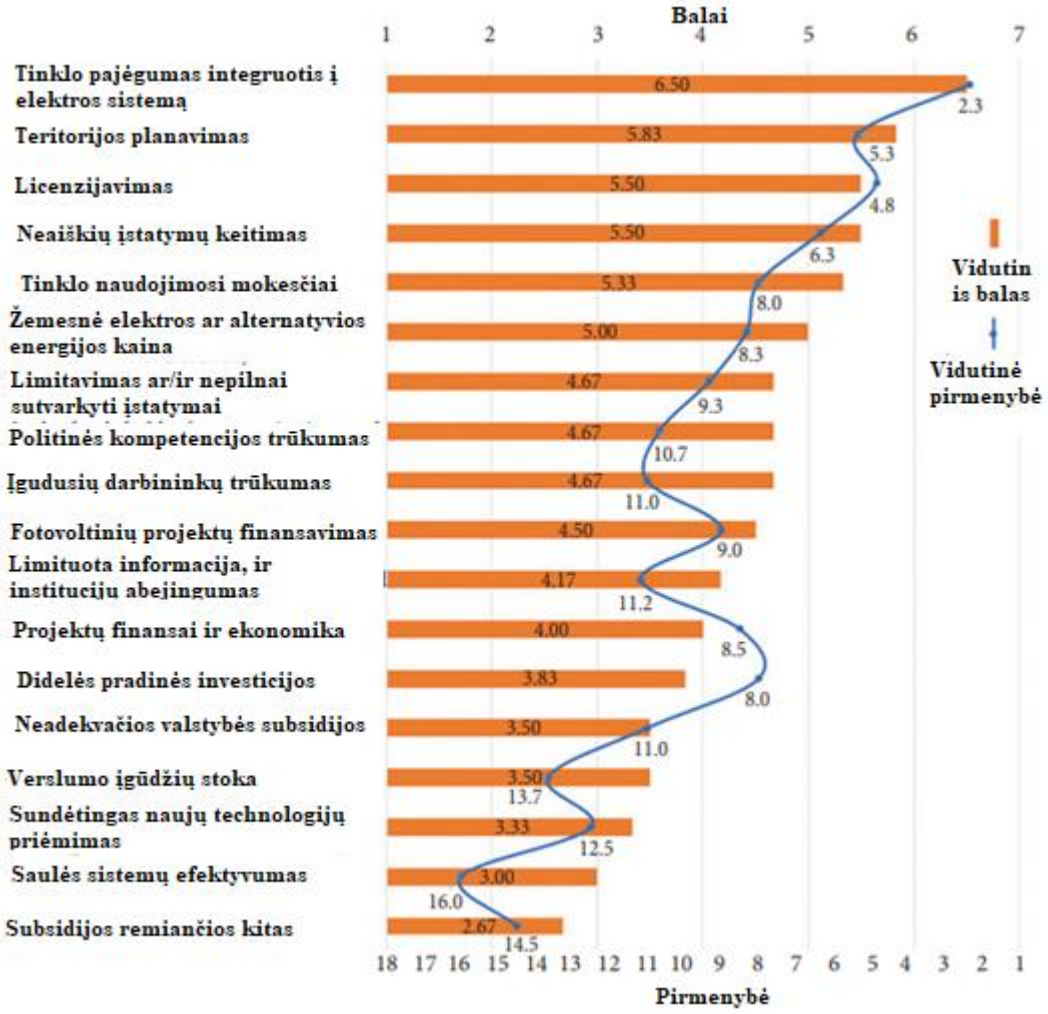
Atsižvelgiant į EUROSTAT 2022-ųjų metų duomenis, Europos Sąjunga pasigamino tik apie 37% suvartojamos energijos. Kol likę 63% buvo importuojami, taip Europos Sąjungą paverčiant didžiausią energijos importuotoją pasaulyje. Be aplinkosaugos ir ekonominių problemų, energetinės nepriklausomybės siekimas Europos Sąjungai tapo esminiu klausimu.

Atsižvelgiant į tai, kad energija yra būtina ekonomikos augimui skatinti, lygiai taip pat būtina efektyviau naudoti energiją ir didinti atsinaujinančių šaltinių naudojimą siekiant sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimą. Konkrečiai, vyriausybių, ekspertų ir visuomenės dėmesio centre tapo ekonomikos plėtros ir energijos vartojimo pusiausvyros paieška. Rusijos invazija į Ukrainą 2022

m. vasario mėn. paskatino greitą ir gilią energetikos sektoriaus transformaciją. Energetinės nepriklausomybės siekimas tapo esminiu klausimu. ES pradėjo keletą iniciatyvų, siekdama sušvelninti poveikį aplinkai ir skatinti energijos vartojimo efektyvumą bei atsinaujinančią energiją. Persvarstyta Atsinaujinančios energijos direktyva padidino šį tikslą iki 42,5% iki 2030 metų[8]. Svarbu pažymėti, kad nors ES kaip visuma yra įsipareigojusi didinti atsinaujinančios energijos dalį, atskiros valstybės narės gali progresuoti skirtingais tempais dėl įvairių veiksnių.

1.2 Saulės elektrinių panaudojimo plėtros problemos

Saulės elektrinė yra viena iš sparčiausiai tarp Lietuvos namų ūkių populiarėjantis AEI. Šią plėtrą labiausiai riboja ekonominiai, technologiniai, infrastruktūriniai, teisiniai ir aplinkosauginiai veiksniai. Šis šaltinis yra svarbus aspektas mažinant priklausomybę nuo iškastinio kuro.



2 pav. Lietuvoje esančios saulės elektrinių plėtros problemos nuo mažiausios iki didžiausios[10]

Saulės elektrinė mažina ŠESD emisijas, tuo pačiu taupant namų ūkio finansus[11]. Tačiau, kad šis energijos šaltinis pasiektų maksimalų potenvialą, reikia išspręsti šio šaltinio plėtrą ribojančius veiksnius, bei padidinti AEI pasiekiamumą.

1.2.1 Technologinės problemos

Saulės elektrinėms būdingas atsitiktinumas, netiesiogiškumas ir nepastovumas dėl klimato sąlygų, yra pagrindinis fotovoltinių elektrinių integravimo į tinklą iššūkis. Dėl šio aspekto, tikslus fotovoltinės elektrinės galios prognozavimas tapo esmine užduotimi stabiliam elektros energijos sistemos darbui. Fotovoltinės elektrinės galia ir pagaminamos energijos kiekis gali būti nuspėjamas naudojant sinoptikų, pagal meteorologines stotis sukurtas prognozes[12].

Fotovoltinių sistemų integravimas į tinklą padidina generacijos ir vartojimo disbalanso tikimybę. Šis vartojimo ir generacijos neatitikimas gali sukelti dažnio ir įtampos svyravimus tinkluose, dėl kurių iš dalies arba visiškai gali nutrūkti elektros tiekimas[13].

Fotovoltinės elektrinės sugeneruota energija gaminama nuolatinės srovės pavidalu. Ji savaime neturi reaktyviosios galios, kadangi ši savybė būdinga kintamosios srovės šaltiniams. Dėl to, siekiant užtikrinti reaktyviąją galią išryškėją, reaktyviąją galią teikiančių novatoriškų technologijų svarba[12].

Galios inverteriai, prijungti prie tinklo, jame sukuria harmonikas, kurios gali sugadinti elektroninę įrangą prijungtą prie tinklo, ir ilgalaikėje perspektyvoje sumažinti jų gyvavimo laiką[13].

Kaip ir visi įrenginiai, fotovoltinės sistemos taip pat nėra atsparios gedimams, kurie itin trukdo sistemos patikimumui, efektyvumui ir saugumui. Dėl to reikia užtikrinti fotovoltinių sistemų apsaugą nuo įvairių gedimų. Kartais tradiciniai apsaugos įrenginiai nesugeba aptikti gedimų fotovoltinėse sistemose. Tai įvyksta dėl mažesnių gedimo srovių dydžių ir nelinijinių srovių esančių fotovoltinėse elektrinėse. Be to, bet koks fotovoltinių sistemų nuolatinės srovės pusės gedimas įprastai yra nenuspėjamas, galintis sudeginti visą sistemą, net jeigu sistemoje yra įrengti apsaugos įtaisai[12].

1.2.2 Ekonominės problemos

Saulės elektrinės reikalauja didelių pradinių investicijų, kas yra ypač svarbu mažoms šalims ar saloms. Dažniausiai tokiose teritorijose grąža atsiranda tik ilguoju laikotarpiu. Be hibridizacijos saulės elektrinės tampa itinge neefektyvios. Kiekvienai 100% atsinaujinančios energetikos sistemai vis tiek reikės talpos tinklo balansavimui (pvz.: hidroelektrinė, hidroakumuliacinė, biomasė), kas brangina bendrą energetikos sistemą[5]. Dėl šio aspekto saulės elektrinių atsipirkimo laikas ženkliai prailgsta.

Atsipirkimo laiką taip pat lemia, saulės elektrinės, geografinė padėtis. Šiaurinės ar kalnuotos šalys gali turėti daug mažesnį saulės elektrinių efektyvumą, dėl ko ilgėja atsipirkimo laikas. Be to, į pradinius kaštus retai įskaičiuojamos išmontavimo, atliekų šalinimo ir perdirbimo išlaidas, kurios atsiranda saulės elektrinės gyvavimo ciklo pabaigoje[14].

1.2.3 Teisinės ir infrastruktūros problemos

Dideli saulės elektrinių parkai, dažniausiai yra projektuojami toli nuo miestų. Didelio ploto šalyse tai dažnai tampa dykumos ar kalningos vietovės. Tai ženkliai išbrangina saulės parko kainą, kadangi reikia nutiesti naują elektros tinklų liniją. Dėl atokių teritorijų, kuriose įrengiami saulės parkai, būtina įrengti nuotolinio valdymo ir apskaitos sistemas, kurios taip pat prisideda į saulės parko eksploatavimo kaštus.

Kalbant apie privačius vartotojus, miestuose, kur įrengiama daug privačių, ant stoginių saulės elektrinių, tinklai gali būti perkrauti, ir taip nauji gamintojai negauna teisės perduoti pagamintos elektros energijos į tinklą. Tačiau šie vartotojai gali įsirengti kaupiklius, kurie yra būtini, norint pilnai išnaudoti elektrinę, be teisės generuoti į tinklą. Šie kaupikliai yra pakankamai brangūs, todėl šiuo metu tai taip pat atgraso privačius elektros energijos gamintojus[15]. Tai siūloma spręsti per vyriausybę, kuri suteiktų subsidijas saulės elektrinių įrangos įsigijimui ir montavimui. Tačiau daugelyje šalių, vyriausybė subsidijas panaikina daug anksčiau negu saulės elektrinių rinka tampa brandi. Dėl ko, saulės elektrinės įrangai nespėjus atpigti, ir nespėjus atsirasti konkurencijai, subsidijos nutraukiamos, taip išbranginant įrangą, ir sumažinant paklausą. Be to prie saulės elektrinių rinkos nepastovumo prisideda ir kasmet besikeičiantys įstatymai, kurie trukdo pritraukti didesnius investuotojus[5].

1.2.4 Aplinkosauginiai veiksniai

Saulės elektrinėms eksploatuoti, vanduo beveik nereikalingas, o tai gali atlikti reikšmingą vaidmenį išsaugant vandens išteklius. Tačiau sausose ir dulkėtose vietovėse, saulės parkuose kartą per metus moduliai yra plaunami. Taip nuvalant dulkes ir atvėsinant modulį. Kiekvienam kvadratinio metro nuplovimui išnaudojama apie 4 litrus vandens[5].

Be to, nors ir fotovoltiniai moduliai generuoja elektros energiją dalinai neteršdami aplinkos, saulės elektrinių parkai užima didelius plotus, keičia natūralų gamtos kraštovaizdį ir sukelia ekosistemos išbalansavimą. Senesni fotovoltiniai moduliai bei energijos saugyklos naudoja švino baterijas. Šios baterijos labiau nei ličio-jonų akumuliatoriai sukelia didesnę grėsmę aplinkai. Fotovoltinių modulių perdirbimas kelia žmonėms toksiškų medžiagų, vandens taršos ir dirvožemio rūgštėjimo grėsmes. Taip pat saulės modulių stiklo perdirbimas techniškai galimas, tačiau ekonomiškai neefektyvus[5].

1.2.5 Tinklo pajėgumai ir integravimas į elektros skirstomuosius tinklus

Dėl energijos kaupiklių sąlyginai brangios kainos, didžioji dalis Lietuvoje esančių saulės elektrinių yra prijungtos prie tinklo. Didėjant saulės elektrinių instaliuotos galios kiekiui, didėja ir tinklo apkrova[16]. Tinklo pajėgumai yra viena didžiausių problemų norint integruoti saules elektrines į tinklą[10].

Moksliniame straipsnyje „Assessment of the barriers towards more rapid development of solar power: the case of Lithuania“ ši problema įvertinta didžiausiu balu – 6,5 iš visų sunkiausiai sprendžiamų problemų[10].

Tinklo modernizacija yra daug finansinių resursų, laiko ir pastangų reikalaujantis procesas. Modernizuojant tinklą išplečiamas tinklo lankstumas ir pajėgumas. Taip pat padidinamas energijos pasiekiamumas kaupikliams, tokiems kaip baterijos, hidroakumuliacinė elektrinė[16]. Taip yra sumažinama tikimybė „butelio kaklelio“ efektui, kas išbalansuoja tinklą.

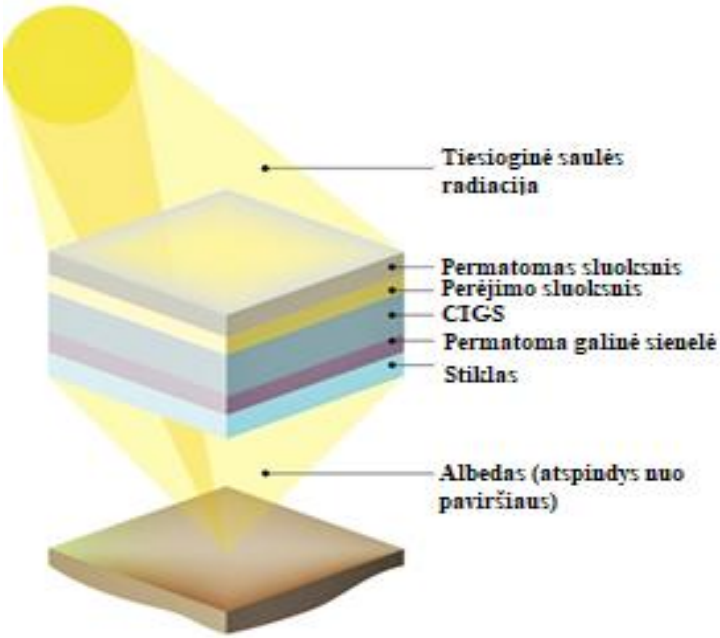
1.3 Saulės elektrinių technologiniai sprendimai ir jų rinka

Saulės moduliai būna skirtingų tipų. Tačiau visi jie, elektros energija generuoja esant saulės fotonams. Saulei apšvietus celę, šviesa gali būti atspindėta, sugerta, arba praleidžiama kiaurai celę. Nors ir visų jų veikimo principas panašus, tačiau skirtingos celės turi skirtingą efektyvumą. Labiausiai efektyvumą nulemia naudojami sluoksniai, ir jų gaminimo technologija. Keičiant sluoksnių savybės, keičiasi ir elektronų judėjimo greitis bei vieta, todėl celė gali būti mažiau, arba daugiau efektyvi[17].

Nuo 2010 iki 2018 metų, elektros energijos generavimas naudojant fotovoltines elektrines atpigo 77%. O fotovoltinių elektrinių integravimas į pastatų tinklus, leidžia pasiekti nulinio energijos poreikio pastatus.

1.3.1 Saulės moduliai

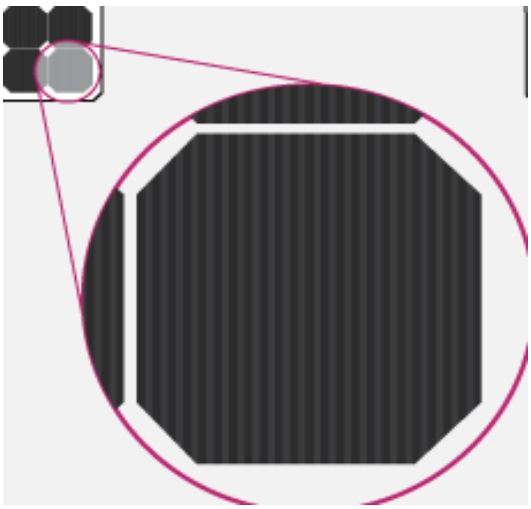
Polikristaliniai moduliai yra sudaryti iš polikristalinių saulės celių. Šios celės yra gaminamos iš silikono kristalų. Ši technologija yra išsiskiria tuo, kad karšti silikono kristalai, vėsdami savaime susiskaido į fragmentus. Šie fragmentai yra išlydomi ir suformuojami į kubelius, kurie yra supjaustomi į plonus sluoksnius. Dėl šių kristalų didesnio kiekio išsiskaidymo, šios celės yra gaminamos greičiau ir pigiau. Polikristalinės celės yra mažiau efektyvios, kadangi išlydyti silikono kristalai, palieka mažiau vietos elektronų judėjimui[18].



3 pav. Polikristalinio modulio sluoksniai [45]

Šių celių efektyvumas yra tarp trylikos ir šešiolikos procentų. Tai yra keliais procentais mažiau nei monokristalinės celės. Šias celes naudojančios panelės dažniausiai naudojamos didesnėse teritorijose, kur jas pasiekia maksimalus kiekis saulės šviesos. Taip pat, kai svarbiausias rodiklis yra kaina. Šios panelės užima daugiau vietos, bet už vieną vatą įrengtos galios mokame penkiais centais mažiau nei naudojant monokristalinius modulius[18].

Monokristaliniai saulės moduliai yra gaminami iš monokristalinių saulės celių. Kiekviena celė yra vieno silikono kristalo, kuris yra auginamas specialiai saulės paneliu gamybai gabaliukas. Laboratorijoje, cilindro formoje auginami kristalai, tuomet jie supjaustomi į diskus. Kai saulės celės yra sumontuojamos į saulės panelę, aštuonkampė silikono forma, padeda saulės panelėse sutalpinti maksimalų kiekį saulės celių. Atrodo itin panašiai, kaip sausainiai kepimo skardoje[18].



4 pav. Monokristalinio modulio celė[46]

Net stipriai suspaudus tarpusavyje, tarp aštuonkampių sienelių lieka vietos, dėl to juos galima sutalpinti talpiau. Dėl celių juodos spalvos, monokristalinės saulės panelės vidutiniškai pasiekia tarp penkiolikos ir dvidešimties procentų efektyvumo. Naujausi ekspermentiniai moduliai pasiekia arti penkiasdešimties procentų efektyvumą[18].

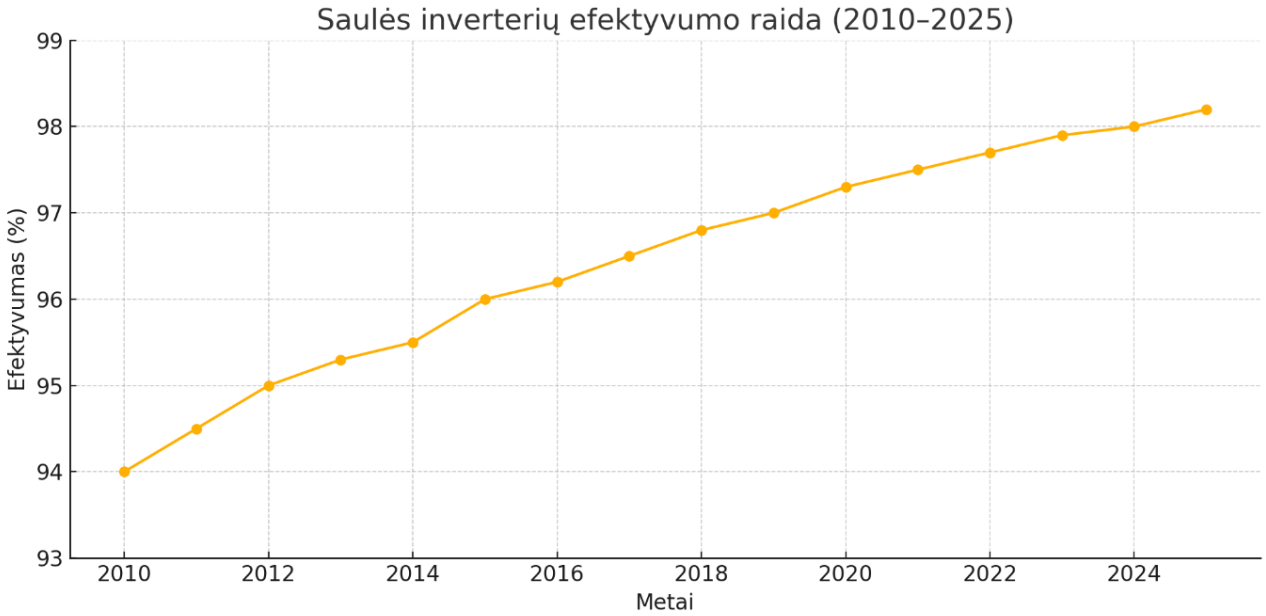
Dvipusiai saulės moduliai sugeria saulę iš abiejų pusių. Šie moduliai efektyviausi naudojant antžeminėse sistemose, kadangi montuojant ant stogo saulė neturės nuo kur atsispindėti į apatinę modulio pusę. Dažnai šie moduliai naudojami statant stogines automobiliams. Pats efektyviausias, šių panelių išnaudojimo būdas yra montuoti ant vienstiebės saulę sekančios konstrukcijos[21].

5 pav. Dvipusiai saulės moduliai sumontuoti ant saulę sekančių konstrukcijų[22]

Dvipusiai saulės moduliai daugiausiai gaminami iš monokristalini celių. Labiausiai pastebimas fizinis reiškinys, kad šios panelės yra itin plonos. Šios sistemos montuojamos kitaip, nei įprastos. Šias paneles naudojančios elektrinės, laikančiosios konstrukcijos turi būti išdėliotos taip, kad būtų sukuriama kuo mažiau šešėlio. Dėl to šioms panelėms montuojamos siauresnės konstrukcijos, ir bandoma išvengti sujungimo dėžučių. Teisingai sumontavus, šios panelės gali pasiekti tarp dvidešimt dviejų ir dvidešimt trejų procentų efektyvumą[21].

1.3.2 Saulės elektrinių inverteriai

Inverteriai yra viena iš pagrindinių saulės elektrinės dalių. Jie konvertuoja nuolatinę srovę į kintamąją. Pastaraisiais metais inverterių technologijos sparčiai tobulėjo. Tobulėjimas buvo orientuotas į efektyvumą, harmonikų mažinimą, saugumą ir tvarumą[23].



6 pav. Saulės elektrinių inverterių efektyvumo raida 2010-2024 metais[23]

Nuo 2020 metų pagrinde naudojami yra centralizuoti, string, mikro ir hibridiniai inverteriai. Saulės parkuose dažniausiai montuojami centralizuoti inverteriai, o namų ūkiuose string inverteriai. Pastaruoju metu vis daugiau namų ūkių renkasi hibridinius inverterius. Tai lemia tinklo apkrovimo ir leidžiamos generuoti į tinklą galios mažinimas. Šis reiškinys priverčia namų ūkius įsirengti kaupiklius, dėl to būtina įsirengti hibridinius inverterius. Nepaisant to, inverteriai susiduria su iššūkiais. Įtampos svyravimų mažinimas, nuotėkio srovės ir elektromagnetinių trikdžių svyravimų mažinimas[23].

1.3.3 Saulės elektrinių išmaniosios valdymo sistemos

Saulės elektrinėse kartais naudojama išmanioji monitoringo sistema. Ji paremta giliojo stiprinamojo mokymosi algoritmu (DQN – Deep Q-Network)[24]. Ši sistema realiu laiku stebi, prognozuoja ir optimizuoja saulės elektrinių generuojamos energijos integraciją į išmaniuosius tinklus. Ji sukurta dirbti dinamiškose aplinkose, kuriuose keičiasi saulės apšvietimas, apkrovos poreikis ir akumuliatorių lygis.

DQN sistema leidžia algoritmui išmokti optimalių strategijų valdant saulės elektrinių generuojamos energijos tiekimą, akumuliatorių įkrovimą, iškrovimą, taip pat apkrovos balansavimą. Algoritmas naudoja temperatūros, drėgmės, apkrovos, baterijų lygio, generacijos ir saulės apšvietimo daviklius[24]. Sistema prognozuoja saulės elektrinės energijos gamybą, leidžiančią planuoti kaupiklių įkrovimą ir tinklo apkrovą

1.3.4 Saulės elektrinių rinka

Pasaulinė saulės elektrinių energijos rinka 2024 metais vertinama virš 280 milijardų JAV dolerių. Numatomas vidutinis metinis augimo tempas iki 2030 metų (CAGR) 7-9%. Labiausiai dominuojanti pasaulyje yra Kinija. Ji užima daugiau nei 40% pasaulinės saulės elektrinių rinkos. JAV, Indija, ES ir Brazilija demonstruoja spartų augimą dėl vyriausybės priimtų subsidijų, energijos apskaitos pagal galutinį suvartojimą (angl. *net-metering*), ar žaliųjų įsipareigojimų. Tuo metu Afrikoje ir Pietų Azijoje matomas augimas paskatintas decentralizuotų saulės elektrinių (*off-grid*). Visi šie veiksniai pagrinde paskatinti dėl mažėjančių saulės modulių kainos, technologijų efektyvumo pažangos, vyriausybių tikslų ir paskatinimų.

Tačiau saulės elektrinių rinka vis tiek susiduria su iššūkiais. Daugelyje šalių trūksta elektros tinklų infrastuktūros. Taip pat dėl geopolitinės situacijos esantys tiekimo grandinės sutrikimai stabdo SE plėtrą[25]. Vis dažniau pradedama galvoti apie PV modulių atliekų kiekį ir perdirbimą, kas išbranginą visą saulės elektrinės gyvavimo ciklą. Iki 2030 metų, tikimasi jog bendroji įrengtoji saulės energijos galia pasaulyje viršys 4000 GW. Taip pat tikimasi, kad privatūs namų ūkiai ir bendruomeniniai projektai taps viena iš dominuojančių saulės elektrinių įrengimo tikslų.

1.3.5 Saulės elektrinių perdirbimas

Visos sistemos komponentų šiltnamio efektą skatinančių dujų emisijos skaičiuojamos pagal skirtingus atliekų utilizavimo būdus. Yra keli galimi scenarijai: sąvartynas, dalinis perdirbimas, gilusis perdirbimas. Atliekas pristatant į sąvartyną šiltnamio efektą skatinančių dujų emisijos yra didžiausios – vidutiniškai 93 kilogramai CO_2e vienam instaliuotam nuolatinės srovės kW galios[26]. Šis metodas vadinamas *„Cutoff“*. Naudojant jį, visi perdirbimai yra neįskaitomi ir gauname tik pirmines emisijas be perdirbimo naudos.

Naudojant dalinį perdirbimą, naudojame „Avoided burden“ metodą. Šiuo atveju įskaičiuojama nauda iš medžiagų, kurios grąžinamos atgal į tiekimo grandinę (pvz., aliuminis, stiklas)[26]. Dėl šio aspekto, perdirbimo scenarijaus bendrosios emisijos dažniausiai tampa neigiamos. Perdirbimo emisijos. Saulės elektrinei su saulės sekimo sistema ir pavaromis, pagal scenarijų, pateikiamos lentelėje:

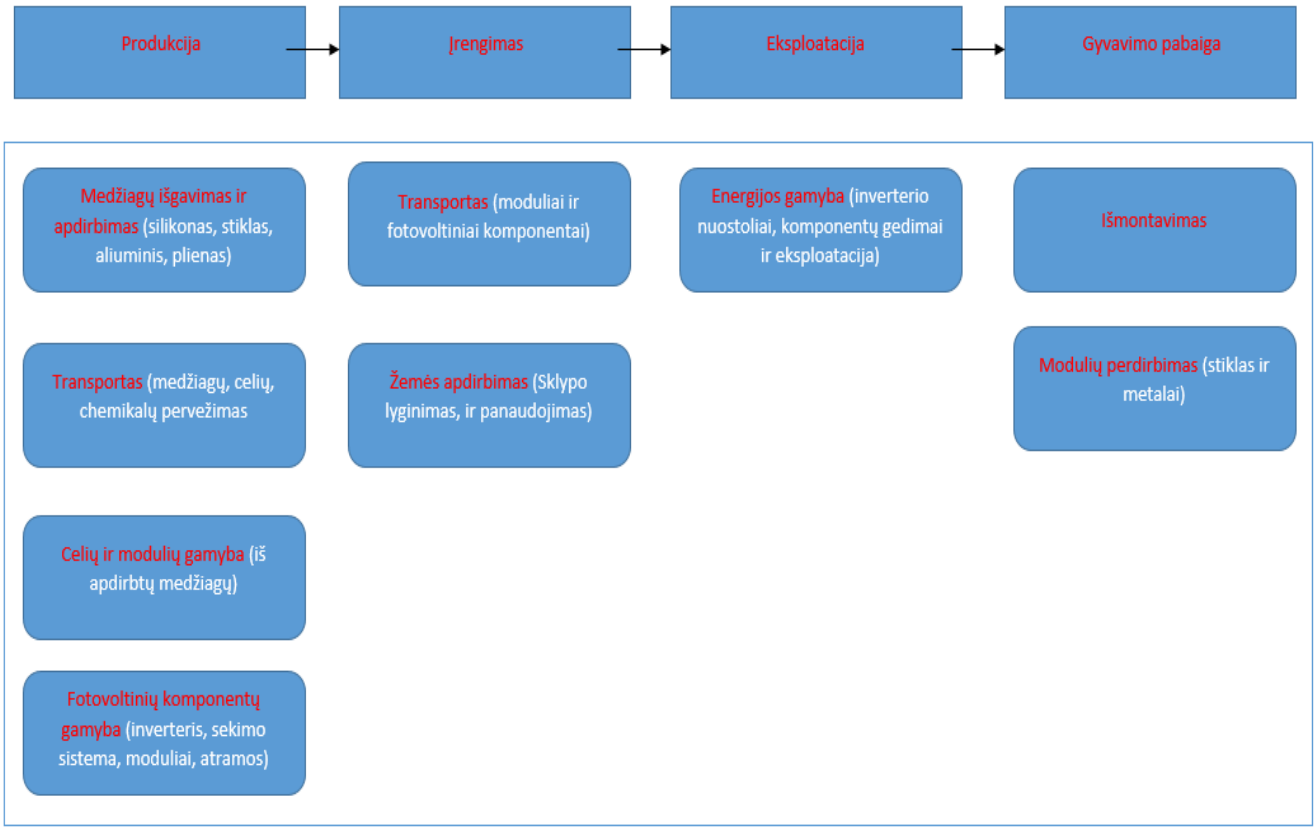
1 lentelė. ŠESD emisijos vienam kW instaliuotos galios pagal skirtingus saulės elektrinės utilizavimo scenarijus[26].

Scenarijus	**Metodas**	**Emisijos (kg CO2e/kWdc)**
Landfill	Cutoff	93
Partial Recycling	Avoided Burden	-62
High-Recovery Recycling	Cutoff	110
High-Recovery Recycling	Avoided Burden	-49

2 Saulės elektrinių gyvavimo ciklo vertinimo metodika

2.1 Viso gyvavimo ciklo (LCA) metodikos bendrieji principai

Viso gyvavimo ciklo vertinimas – metodas, skirtas įvertinti produkto, paslaugos ar sistemos poveikį aplinkai per visą jos gyvavimo ciklą. Naudojant šį metodą saulės elektrinėms, viso gyvavimo ciklo vertinimas apima etapus, nuo žaliavų gaminimo iki demontavimo ir perdirbimo. Vertinant visą gyvavimo ciklą, vertinami šeši pagrindiniai etapai: medžiagų išgavimas, įrenginių gamyba, transportavimas, montavimas, eksploatavimas, gyvavimo ciklo pabaigos procesai(žr. 7 Pav).



7 pav. Vertinami LCA etapai[27]

2.2 Saulės elektrinių viso gyvavimo ciklo vertinimo ribos

Atliekant analizę reikia apsibrėžti sistemos ribas. Ar analizuojama tik modulių gamyba, ar modulių eksploatacija, ar visos saulės elektrinės gaminimas, montavimas, eksploatavimas, transportavimas, utilizavimas. Surenkami duomenys apie visus procesus, kiek visi procesai sunaudoja energijos ir kiek išskiria CO_2..

Žaliavų komponentams gavyba

Saulės elektrinėms įrengti išnaudojama daug resursų. Priklausomai nuo dydžio ir elektrinės tipo, saulės elektrinės medžiagiškumas gali kisti. 2 lentelėje matoma, kad saulės elektrinės dalių gamyboje dominuoja aliuminis, tačiau visai sistemai prireikia ir lustų, kurių gamyba sunaudoja didelius kiekius sunkiai išgaunamų medžiagų, tokių kaip neodimis ar silicis[29]. Šiame žingsnyje vertinami medžiagoms iškasti sunaudoti energijos kiekiai, žmogiškųjų išteklių ir mašinų sunaudotą energija. Medžiagų išskleidžiamos CO_2 emisijos randamos „climatiq.io“ duomenų bazėje[34].

Silicis gaminamas iš kvarcinio smėlio. Dažniausiai jis išgaunamas iš aukštos kokybės smėlio telkinių. Kvarcas (didelio grynumo silicio dioksidas, SiO2) kaitinamas iki ~2000 celsijų. Tam dažniausiai naudojama anglis, arba mediena[29]. Terminiu būdu išgautas 98-99% grynumo silicis, išvalomas iki >99,9999% grynumo silicio. Tuomet išliejamas į cilindrus ir supjaustomas į plonas plokšteles, kurios vėliau naudojamos fotovoltinėse panelėse.

Stiklo sluoksnio gamyba prasideda nuo gryno kvarcinio smėlio sumaišymo su kalcio karbonatu ir dolomitu. Mišinys kaitinamas 1600 celsijų temperatūros krosnyje. Gautas stiklas išlyginamas ant lydyto metalo paviršiaus, kur yra greitai atvėsinimas, kad įgautų didesnį stiprumą ir atsparumą smūgiams[29]. Galiausiai supjaustomas į reikiamo dydžio plokštes. Įprastai fotovoltiniam modulyje naudojama viena stiklo plokštė, tačiau stiklas-stiklas moduliuose naudojami du: viršutinis ir galinis fotovoltinės panelės sluoksniai.

Aliuminio rėmas, prasideda nuo aliuminio rūdos - boksito. Rafinuojant šią medžiagą gaunamas aliuminio oksidas. Naudojant elektrolizę, išgaunamas grynas aliuminis. Pridedant magnį, kuris prideda stiprumo, pradedamas formuoti aliuminio lydinys[29]. Toliau aliuminis išspaudžiamas per formą, gaunami profiliai. Anoduojamas – dirbtinai oksiduojamas paviršius stiprumui ir atsparumui korozijai. Pjaustymas ir sujungimas į rėmą. Aliuminio profiliai naudojami tik standartinio tipo fotovoltinėse panelėse.

Plastikinių sluoksnių gamyba (EVA). Šiam procesui naudojami naftos produktai. Pirmiausiai naudojant cheminę reakciją gaunamos EVA granulės. Plastikas kaitinamas ir formuojamas į plėveles[29]. Plastiko sluoksniai sulaminuojami, supjaustomi ir su karštais presais priklijuojami prie fotovoltinių celių.

Metalinės jungtys (kabeliai, laidai, kontaktai). Šiam procesui naudojama vario rūda, alavas, kai kuriais atvejais sidabras. Iškasama rūda, arba perdirbami senas vario laužas – taip išgaunamas grynas varis. Vario strypai ištempiami į plonus laidus. Kontaktams suformuojami sidabro ar lydinio tinklai. Kontaktai sujungiami su saulės celėmis ir kontaktų dėžute[30].

2 lentelė. STD ir GG tipo moduliams reikalingų medžiagų išgavimui sunaudota energija ir išskirtos emisijos[31].

Komponentas	Masė (t/vnt)	STD tipo naudojimas (vnt)	GG tipo naudojimas (vnt)	Bendras svoris (kg)	Energijos sunaudojimas (kWh)	CO2 emisijos (gCO2)
Silicio celės	0,000012	60	60	0,72	216	7920
Jungčių dėžutė	0,000236	1	1	0,236	11,8	708
Juostelės (ribbon)	0,00019	1	1	0,19	19	950
Galinė plėvelė	0,0015	1	0	1,5	30	900
Stiklas	0,009	1	2	9	135	630
Aliuminio rėmas	0,003	1	0	3	600	31500
EVA plėvelė	0,0008	2	0	1,6	64	960
POE plėvelė (GG tipo)	0,00076	0	2	1,52	60,8	912

Elektrinės dalių gamyba

Saulės elektrinę sudaro daug skirtingų medžiagų ir įrenginių. Nuo jungčių iki saulės modulių ir inverterių. Elektrinės dalių gamyboje vertinami procesai, kurie reikalauja didelių energijos kiekių[29]. Taip pat vertinami žmogiškieji ištekliai, pakuotės.

Medžiagų efektyvumo didinimas gamybos metu ir medžiagų perdirbimas gali stipriai sumažinti ekologinį pėdsaką[30]. Toksiškų medžiagų naudojimas sukelia buveinių naikinimą ir vandens užteršimą. Dėl šio faktoriaus itin svarbus netoksiškų, didelio efektyvumo energijos technologijų kūrimas.

Fotovoltiniai moduliai

Pasirenkant skirtingus modulių tipus, skiriasi ir modulių energijos sąnaudos bei ŠESD emisijos. 3 lentelėje pateikiami duomenys apie dviejų skirtingų fotovoltinių modulių tipų viso gyvavimo ciklo metu sunaudota energija. Taip pat pateiktos ŠESD emisijos tenkančias 1kW instaliuotos galios. Atsižvelgus į lentelėje pateiktus duomenis, stiklas/stiklas modulių surinkimo, transportavimo ir eksploatacijos procesai sunaudoja didesnį kiekį energijos, tačiau šie moduliai yra paprasčiau perdirbami.

3 lentelė. Modulių stiklas/stiklas ir standartinių modulių (stiklas/Plėvelė) surinkimui, transportui ir utilizavimui sunaudota elektros energija ir ŠESD emisijos per 1 kW instaliuotos galios[29].

Kategorija	Rodiklis	GG tipas	STD tipas
Energija	Modulio surinkimas	29.3 kWh / kW	28.7 kWh / kW
	Transportas + priežiūra	829.2 kWh / kW	547.4 kWh / kW
	Utilizavimas / perdirbimas	29.3 kWh / kW	30.9 kWh / kW
	Iš viso be žaliavų	887 kWh / kW	637 kWh / kW
ŠESD emisijos	Bendra emisijų suma be žaliavų	~0.24 tCO_2e / kW	~0.17 tCO_2e / kW
	% nuo viso ciklo CO_2e	~26%	~18%
	Viso ciklo emisijos (palyginimui)	0.92 tCO_2e / kW	0.95 tCO_2e / kW

Inverteriai

Inverteriai yra viena iš pagrindinių SE sistemos dalis. Ji tiesiogiai daro įtaką visos SE veikimui, patikimumui ir investicijų grąžai. Tačiau kaip teigiama straipsnyje, dėl galios keitimo elektronikos, dizaino ir kokybės problemų, saulės inverteris itin prisideda prie SE patikimumo problemų[32]. Norint užtikrinti sistemos patikimumą, inverteriai turi būti projektuojami su didelėmis saugos ribomis. Turi būti parenkami aukštos kokybės komponentai, kurie atlaikytų ilgalaikes eksploatavimo sąlygas.

Inverterio kainą ir ŠESD emisijas lemia technologinis sudėtingumas, galia, integruotos funkcijos ir gamyklos apimtys. Tai matoma 4 ir 5 lentelėse. Taip pat ŠESD emisijas lemia inverterio aušinimo tipas . Oru aušinami inverteriai yra pigesni, patikimesni ir išskiria mažesnį kiekį emisijų, tačiau skysčių aušinami inverteriai yra efektyvesni didelės galios sistemose.

4 lentelė. Inverterių nuo 2,5 iki 20 kW sudedamųjų medžiagų kiekiai ir inverterio surinkimo energijos sąnaudos[29].

Komponentas	**Kiekis**	**Mato vnt.**
Aliuminis	2,1	kg
Varis	1,8	kg
Plastikas	1,7	kg
Plienas	1,3	kg
PCB	0,4	kg
Stiklas	0,3	kg
Energijos sąnaudos (kWh)	48	kWh

5 lentelė. Inverterių nuo 300 kW iki 1 MW sudedamųjų medžiagų kiekiai ir inverterio surinkimo energijos sąnaudos[29].

Komponentas	**Kiekis**	**Mato vnt.**
Aliuminis	64,5	kg
Varis	90,3	kg
Plienas	78,6	kg
Plastikas	52,4	kg
PCB	3,4	kg
Stiklas	4,5	kg
Transformatorius	800	kg
Energijos sąnaudos (kWh)	1236	kWh

Transportavimas

Kiekviename iš šių etapų, vienu ar kitu atveju vyks transportavimas. Norint pagaminti komponentus, reikia pervežti medžiagas, norint sumontuoti elektrinę reikia pervežti elektrinės dalis. Norint įrengti elektrinę, reikia pervežti sunkiąją techniką ir žmones. O norint demontuoti turime išvežti visas išmontuotas medžiagas. Net ir po demontavimo, sąvartynai turės pervežti atliekas perdirbimui, o šiukšles deginimui ar į sąvartyną. Šiame etape vertinsime žmogiškųjų išteklių ir mašinų išnaudotą energiją bei sukurtas emisijas[33].

Iš gamyklų, į numatytą vietą yra transportuojami saulės elektrinių komponentai. Jie transportuojami keliais, vandeniu ir oru. Pasirinkus vieną iš šių kelių, skiriasi naudojamo transporto rūšis ir išskiriamos emisijos. 6 lentelėje pateikiamos emisijos pagal transporto rūšį. Turint reikalingą

infrastruktūrą, kroviniai gali būti pervežami tvariausiu būdu – elektriniu traukiniu. Populiariausių gamintojų gamyklos:

- „Huawei“ inverteriai, pagrinde, yra gaminami Šendženo mieste, Kinijoje;
- „Trinasolar“ saulės moduliai, pagrinde, yra gaminami Čangdžou mieste, Kinijoje;
- „K2 systems“ antžeminių ir antstoginių elektrinių montavimo sistemos pagrinde yra gaminamos Renningene, Vokietijoje;
- „NKT“ saulės elektrinių ir galios kabeliai, pagrinde, yra gaminami Asnaes mieste, Danijoje;
- „Eaton“ automatinai jungikliai ir skydai pagrinde gaminami Bonos mieste;
- „Eaton“ transformatoriai, pagrinde, gaminami Ankaroje, Turkijoje.

6 lentelė Transporto priemonių šiltnamio efektą sukelenčių dujų ekvivalientas[22, 43].

Transporto rūšis	**CO_2e (g/km)**	**Tipinė apkrova (t)**	**CO_2e (g/tkm)**
Sunkvežimis	800	10	80
Mikroautobusas (N1)	250	0,5	500
Jūrinis konteinerinis laivas			15,9
Elektrinis traukinys	100	100	1

Elektrinės statyba

Elektrinės statyboje vertinsime daug veiksnių. Pradedama nuo vietos vertinimo, kuris paaiškina augalų ar kitų gamtos deguonies išskyrimo nuostolius, bei prarastus galimus CO_2 naikinimo kiekius. Elektrinės montavimo metu išskirtos CO_2 emisijos daugiausiai susidaro iš darbo jėgos ir mašinų reikiamų tam darbui, sunaudotos elektros energijos, vadovų ir kitų darbuotojų, dirbančių organizacinį darbą ofise sunaudoti resursai[35].

Darbo jėga skaičiuojama pagal naudojamų įrankių kiekį, darbo valandas, statybvietės įrengimą, keliones į ir iš darbo, žmogaus gyvybinę veiklą, ir administracinį darbą[35]. 7 lentelėje aprašyti žmogaus veiklai reikalingų procesų išskiriamos ŠESD emisijos ir energijos sąnaudos.

7 lentelė. Saulės elektrinei įrengti sunaudojama darbo jėga, įranga ir išskiriamos ŠESD emisijos[35].

Šaltinis	**Energijos sunaudojimas**	**Laikas per kurį ji suvartota**	**Šiltnamio efektą sukeliančių dujų išskyrimas**
Elektriniai gręžtuvai, suktukai, suvirinimo aparatai, kiti elektriniai įrankiai.	Vidutiniškai ~ 1 kWh žmogui	Darbo diena (8h)	~0,3 kg / kWh
Dyzeliniai / benzininiai generatoriai, pjūklai, kompresoriai, siurbliai	Vidutiniškai ~ 1,3 litro vienam žmogui	Darbo diena (8h)	~2,5 kg / l
Laikinųjų ofisų šildymas, vėdinimas, apšvietimas, dušai	Vidutiniškai ~ 16 kWh visam personalui iki 50 žmonių	Darbo diena (8h)	~0,3 kg / kWh
Maisto gamyba ir vartojimas, atliekų tvarkymas, vienkartinis inventorius, vandens sunaudojimas		Darbo diena (8h)	~0,25 kg / h
Administracinis darbas (kompiuteris, monitorius, apšvietimas, šildymas/vėdinimas)	~ 1,6 kWh vienam žmogui	Darbo diena (8h)	~ 0,3 kg / kWh
Kelionės į statybvietę (~60 km į abi puses, automobilis naudojantis 7l dyzelino 100 km)	~ 4,2 l vienam žmogui	Darbo diena (8h)	~ 0,13 kg / km

Pagal tyrimą Kinijoje, vidutiniame namų ūkyje, vienam asmeniui tenka apie 2,31 tCO_2e per metus. Urbanizuotose vietovėse, šis skaičius yra apie 1,77 karto didesnis negu kaimo vietovėse. Tai reiškia, kad vidutinis žmogus, gyvendamas gyvenimą, per valandą sunaudoja apie 263,7 gCO_2e. Straipsnyje išskiriami šeši pagrindiniai šiltnamio efektą sukeliančias dujas išskiriantys šaltiniai. Daugiausiai – namų ūkio vartojimas. Į tai įeina visi daiktai, medžiagos ir darbai, naudojami namų ūkiui. Kiek mažiau elektra ir šildymas kietu kuru ar dujomis[35].

Emisijos taip pat suskirstytos pagal elgsenos kategorijas. Daugiausiai emisijų išskiria būstas. Jo aptarnavimas, vienam žmogui, per metus yra nuo 0,39 iki 1,17 tonos CO_2. Kiek mažiau išskiria paslaugos suteikiamos žmogui, asmens vartojamas maistas, naudojamas transportas ir dėvimi drabužiai.

Atlikus tyrimą, buvo nustatyti pagrindiniai, šiltnamio efektą skatinančias dujas lemiantys veiksniai. Kuo didesnis namų ūkis, tuo mažesnės emisijos tenka vienam žmogui. Tai yra dėl to, nes kai kurie veiksniai vienam žmogui išskiria tiek pat emisijų, kiek išskirtų keliems žmonėms. Taip pat buvo nustatyta, kad didesnes pajamas turintys žmonės, vartoja daugiau, ir išskiria daugiau emisijų[35].

Turint šiuos duomenis, galima apskaičiuoti, žmogaus sukeliamas CO_2 emisijas statant saulės elektrinę. 8 lentelėje saulės elektrinės projektas yra skirstomas į fazes, ir kiekviena fazė turi savo naudojamus resursus. Didžiausias darbo valandų kiekis yra SE montavimo fazėje, o mažiausias projektavime[35].

8 lentelė. 10 MW galios elektrinės vidutinė darbų trukmė, darbuotojų skaičius ir išskirtas ŠESD emisijų kiekis[35].

Projekto fazė	**Vidutinė trukmė (mėn.)**	**Reikalingų žmonių kiekis**	**Žmonių specialybė**	**Apytikslės darbo valandos(visų žmonių)**	**Šiltnamio efektą sukeliančių dujų preliminarus kiekis (kg)**
Projektavimas ir leidimų gavimas	1 - 2	5 - 10	Projektuotojai, inžinieriai, teisininkai	1000 - 1500	1674,63 – 2511,94
Paruošiamieji ir infrastruktūros darbai	1	10 - 20	Žemės paruošimas, tvoros, keliai, kabelių trasos	2000 - 3000	70462,5 – 105693,75
Montavimas ir įrenginių instaliacija	2 – 3	50 - 70	Montuotojai, elektrikai, sunkiosios technikos operatoriai	20000 - 30000	704625 - 1056937,5
Testavimas ir paleidimas	0,5 - 1	10 - 15	Inžinieriai, elektrikų komanda, kokybės kontrolė	1000 – 2000	34825 - 69650

Saulės parko statyba yra neįsivaizduojama be sunkiosios technikos. Sunkioji technika dirba nuo 2 iki 6 savaičių priklausomai nuo oro ir personalo kiekio. Pateikiama 9 lentelė su sunkiosios technikos naudojamais resursais ir šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijomis[35].

9 lentelė. Saulės elektrinės statyboms naudojamos technikos kiekis ir emisijos[33].

Technika	**Vidutinės emisijos (kg CO_2/val. arba /km)**	**Naudojimas (val. arba km)**	**Apytikslis CO_2 kiekis (t)**
Ekskavatorius	~75–95 kg CO_2/val	200 val.	15–19
Gręžimo staklės	~60 kg CO_2/val	100 val.	6
Krautuvas	~45 kg CO_2/val	100 val.	4.5
Autokrano	~90 kg CO_2/val	50 val.	4.5
Sunkvežimiai	~0.9 kg CO_2/km	1000 km	0.9

Eksploatavimas

Saulės elektrinės eksploatacija yra vienas iš pagrindinių, viso gyvavimo ciklo etapų. Tipinis SE eksploatacinis laikotarpis siekia 23-30 metų. Priklausomai nuo konstrukcijos ir montavimo vietos yra parenkama ir eksploatavimo procesų metodika. 10 lentelėje pateikiami, saulės parko su saulės sekimo sistema eksploatacijos procesai ir dažnis.

10 lentelė. Saulės elektrinės eksploatacinių darbų dažnumas, reikalingi resursai ir vidutinė trukmė[36].

Eksploatacinis procesas	Apžiūros dažnis	ŠESD išskiriantys procesai	Reikalingi resursai	Vidutinė trukmė vienai sekimo grupei	Papildomos medžiagos
Sekimo mechanizmų (variklių ir pavarų) patikra	Kas 6 mėnesius	Patikrinamas variklių darbas, sutepamos judančios dalys.	2 žmonės.	5-10 min	1,25-2,65 l alyvos vienai sekimo grupei
Sekimo sistemos elektronika (valdikliai, jutikliai)	Kas 12 mėnesių	Patikrinamas veikimas, atnaujinama programinė įranga, kalibruojami jutikliai.	2 žmonės	5-15 min	Kompiuteris
Modulių valymas	Kas 3-4 mėnesius	Valomi moduliai	1 žmogus	1-2 min (1 modulio)	2-5l vandens per modulį
Kabelių, jungčių, inverterių apžiūra	Kas 12 mėnesių	Apžiūrimi kontaktai, izoliacija, diagnozuojami inverteriai	2 žmones	10-15 min	
Konstrukcijų patikra	Kas 12 mėnesių	Tikrinamos deformacijos, suvaržomos konstrukcijos, tvarkoma korozija	2 žmones	8-12 min	
Saulės sekimo įrangos kalibracija	Kas 12 mėnesių	Tikrinami ir jei reikia koreguojami	1 žmogus	30 min (sekimo grupei)	nešiojamas kompiuteris

Gedimų remontas ir eksploatacinių atliekų šalinimas

Gedimų remontas apima itin plačią išteklių naudojimo sritį. Naudojami žmogiškieji ištekliai gedimo nustatymui. Atsarginių dalių pervežimui naudojamos mašinos. Sugedusios dalies keitimui reikalingi žmogiškieji ištekliai ir kai kuriais atvejais kiti įrenginiai. 11 lentelėje pateikiami gedimų tipai ir tikimybė, pagal kurią apskaičiuojami gedimo likvidavimo padariniai[37, 38].

11 lentelė. Gedimų tipai ir tikimybės.[38]

Gedimas	Tikimybė
Sekimo sistemos variklių gedimas	Tipinė variklių gedimų norma 0,1-0,5% per metus
Inverterių gedimas	Tipinė inverterių gedimų norma 0,5-1% per metus
Modulių gedimas	Tipinė modulių gedimų norma 0,1-0,5% visų parko modulių per metus
Kiti saulės elektrinės gedimai	Tipinė saulės elektrinės gedimų nesusijusių su inverteriais, saulės moduliais ar sekimo sistema yra ~0,5% per metus
Modulių degradacija	Tipinė modulių degradacija per metus 0,7 – 1% per metus

Šalinant eksploatacines atliekas, naudojamos transporto priemonės, kurios perveža atliekas į perdirbimo cechus ar sąvartynus. Šios mašinos dažniausiai turi vidaus degimo variklį, ir jis naudodamas kurą, sunaudoja daug energijos ir išskiria didelį kiekį CO_2 emisijų.

Elektrinės demontavimas ir demontuotų dalių transportavimas

Elektrinės demontavimo pagrindiniai energijos vartotojai yra žmogiškieji ištekliai ir mašinos. Šiuo atveju matuojama jų sunaudota energija ir mašinų sunaudotas kuras.

Perdirbimo etape, viena iš svarbiausių dalių yra demontuotos saulės elektrinės, o ypač modulių pervežimas į perdirbimo vietą. Paprasčiausia perdirbti metalo konstrukcijas. Jas galima pernaudoti, arba išlydyti ir išlieti per naujo. Tas pats ir su kabeliais. Šias paslaugas teikia net ir Lietuvoje esančios įmonės. Sunkiausia dalis yra perdirbti fotovoltinius modulius. Šia veikla užsiimančių įmonių ne tiek ir daug. Populiariausia Europos mastu yra „PV CYCLE“.

Ši įmonė įkurta kaip ne pelno siekianti organizacija, kuri savo veiklą pradėjo 2007-taisiais metais. Per 2023-čiuosius metus su šios įmonės pagalba perdirbta 14541 toną fotovoltinių elektrinių atliekų, iš kurių 2416 tonų buvo kaupikliai. Didžioji dalis perdirbtų modulių yra silikono pagrindo. Ši įmonė pati neatlieka perdirbimo, tačiau vykdo logistiką. Su šios įmonės pagalba surenkamos atliekos, ir pervežamos į perdirbimo vietas. Dažniausiai į Saint-Loubės Prancūzijoje esančią perdirbimo vietą[39]. Demontuotų dalių transportavimui apskaičiuoti, naudojami transportavimo dalyje pateikti duomenys.

Atliekų perdirbimas

Atliekų perdirbimas, tai procesas, kuris panaudoja atliekas naujo produkto kūrimui. Pagrindinė perdirbimo mintis yra perdirbti medžiagą taip, kad būtų sunaudota mažiau energijos, negu išgaunant ar gaminant naują. Šiuo atveju vertinsime perdirbimo procesų metu sunaudotą energiją, ir sukurtas emisijas[40].

Perdirbimo emisijos dažniausiai skaičiuojamos, pagal saulės elektrinės per visą gyvavimo ciklą pagamintos elektros energijos kiekį. Kiekvienu scenarijumi šie skaičiai skiriasi. Atliekų perdirbime galimi trys scenarijai: šalinimas sąvartyne, LGRF ir FRELP[41]. LGRF (Laminated glass recycling facility) – tai perdirbimo metodas naudojamas pašalinti medžiagas naudojant mechaninį trupinimą ir atskyrimą. Taikant šį metodą, daugiausiai atgaunamas stiklas ir aliuminis. Tačiau prarandami dauguma vertingų komponentų pvz., sidabras, silicis. Šis metodas yra mažiau efektyvus negu FRELP. FRELP (Full recovery end-of-life photovoltaic) – tai kombinuotas procesas, kuris apima šiluminį, cheminį ir mechaninį medžiagų atskyrimą[42]. Šis procesas apima iki 95% stiklo, aliuminio, sidabro, vario, silicio ir kitų puslaidininkių. 12 lentelėje nurodomi kiekiai emisijų sukurtų utilizuojant ir perdirbant saulės elektrines.

12 lentelė. Emisijų kiekiai sukurti utilizuojant ir perdirbant saulės elektrinę[43].

Perdirbimo būdas	**Kiekis (kg CO_2-eq/kWh)**
Šalinimas sąvartyne	0,059
Perdirbimas LGRF metodu	0,054
Perdirbimas FRELP metodu	0,046

Turint visų SE gyvavimo ciklo pabaigos procesų scenarijus, galima suskaičiuoti SE gyvavimo ciklo pabaigos emisijas. Šios emisijos turėtų sudaryti apie 5-10% visų saulės elektrinės gyvavimo ciklo emisijų.

2.3 Saulės elektrinių viso gyvavimo ciklo darnumo vertinimo kriterijai

Vertinant saulės fotovoltinės elektrinės darnumą, reikia nustatyti rodiklius, kuriais šis procesas matuojamas. Svarbu atsižvelgti į viso gyvavimo ciklo poveikį - nuo žaliavų gavybos iki utilizavimo. Pagrindiniai kriterijai: energijos efektyvumas, aplinkosauga, ekonomika. Energijos efektyvumas padeda nustatyti SE naudingumą ir energijos generavimo efektyvumą. Aplinkosauga – ŠESD emisijas sukurtas per visą gyvavimo laikotarpį. Taip pat šių emisijų atsipirkimo laiką. Tai padeda nustatyti kuris SE tipas yra ekologiškai naudingesnis. Be to reikia atsižvelgti ir į ekonominius aspektus. Dažniausiai įrangos kaina yra pagrindinis veiksnys lemiantis SE tipo pasirinkimą, dėl to būtina nustatyti SE kainą ir atsipirkimą pagal konstrukcijos tipą. Šie rodikliai padeda nustatyti saulės elektrinės, per visą gyvavimo ciklą, sunaudotą energiją ir išskleistas emisijas. Taip pat projekto atsipirkimo laiką, finansinę grąžą.

2.3.1 Energijos efektyvumas

Efektyvumui ištirti, turime žinoti elektros energijos gamybos kiekius per visą gyvavimo ciklą. Taip pat šiame žingsnyje, aiškiai matomi, sistemų tipų skirtumai, per efektyvumo prizmę. Šį etapą aprašyti naudojamas elektros energijos pagamintas kiekis (kWh) ir laikotarpis, per kurį tas kiekis pagamintas (metais)[31].

Efektyvumas (*Energy yield*) - tai rodiklis, kuris parodo kiek elektros energijos, per tam tikrą laiką, sugeneravo saulės elektrinė[43]. Šis rodiklis naudojamas, energijos atsipirkimo laikui apskaičiuoti.

Formulė:

$$E_y = P \cdot p \cdot G$$

Čia E_y – Per tam tikrą laiką sugeneruotas elektros energijos kiekis (kWh)

P – Įrengtoji galia (kW);

p – Efektyvumo koeficientas (%);

G – Saulės radiacijos intensyvumas (kW/m^2).

Tiksliam energijos atsipirkimo laikui apskaičiuoti, reikia apskaičiuoti modulių degradacija. **Modulių degradacija –** tai modulių generacija po t metų.

Formulė:

$$E_t = E_0 \cdot (1 - d)^t$$

Čia E_t – modulių generacija po t metų;

E_0 – pradinis metinis energijos kiekis;

d – degradacijos koeficientas;

t – metai.

Energijos atsipirkimo laikas (*Energy Payback Time*) – tai rodiklis, kuris parodo kiek laiko reikia, kad saulės elektrinė pagamintų tiek elektros energijos, kiek suvartotų jos visas gyvavimo ciklas[31]. Šis rodiklis yra vienas iš pagrindinių viso gyvavimo ciklo vertinime. Kuo mažesnis šis rodiklis, tuo elektrinė efektyvesnė arba tvaresnė. Šis rodiklis apima energiją, sunaudotą šiuose etapuose:

- Žaliavų gavyba ir apdorojimas;
- Komponentų gamyba;
- Transportavimas;
- Modulių gamyba;
- Įrengimas;
- Eksploatacija;
- Utilizavimas/perdirbimas.

Formulė:

$$EPBT = \frac{CED}{E_{out}}$$

Čia CED (kWh) – sistemos gamybos bendras energinis poreikis;

E_{out}(kWh/metai) – sistemos metinė elektros energijos generacija.

2.3.2 Aplinkosauga

Vienas iš svarbiausių gyvavimo ciklo darnumo vertinimo aspektų yra aplinkosauga. Rodikliai naudojami aprašyti aplinkosaugos efektui, parodo sutaupytas ir sukurtas šiltnamio efektą skatinančias dujas.

GHGLCA (Life-cycle GHG Emissions) – tai šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekis išskirtas per visą gyvavimo ciklą[31]. Šis rodiklis yra labai svarbus ŠESD emisijų atsipirkimo laiko apskaičiavimui.

Formulė:

$$GHGLCA = GHG_{žal} + GHG_{komp} + GHG_{trans} + GHG_{gam} + GHG_{įreng} + GHG_{ekspl} + GHG_{util}$$

Čia $GHG_{žal}$ – Žaliavų gavyba;

GHG_{komp} – komponentų gamyba;

GHG_{trans} – transportas;

GHG_{gam} – įrenginių gamyba;

$GHG_{įreng}$ – elektrinės įrengimas;

GHG_{ekspl} – elektrinės eksploatavimas;

GHG_{util} – elektrinės utilizavimas.

ŠESD emisijų atsipirkimo laikas (GPBT) – laikotarpis, per kurį saulės elektrinė kompensuoja ŠESD emisijas, išskirtas jos gamybos, statybos, eksploatacijos ir demontavimo metu[44]. Šis rodiklis yra vienas svarbiausių SE projektuose. Šiam rodikliui esant didesniu, nei SE gyvavimo laikas, projektas tampa ekologiškai nenaudingas, dėl to nevykdomas.

Formulė:

$$GPBT = \frac{GHG_{Emissions}}{GHG_{Saved\ per\ year}}$$

Čia $GHG_{Emissions}$ – išmetamas ŠESD emisijų kiekis, nustatytas taikant LCA;

GHG_{Saved} – išvengtas ŠESD emisijų kiekis, dėl įrengtų naujų elektros energijos gamybos pajėgumų, per visą gyvavimo ciklą.

Formulė:

$$GHG_{Saved} = E_{gen} \cdot Fosilinės\ energijos\ emisijos\ koeficientas$$

Čia E_{gen} – Mėnesio elektros gamyba (kWh);

Fosilinės energijos emisijos koeficientas (gCO_2eq/kWh).

ŠESD intensyvumo rodiklis (GHG Emissions Intensity) (gCO_{2ekv}/kWh) Šis rodiklis vertina per visą gyvavimo ciklą, saulės elektrinės sistemos išskirtą CO_2 ekvivalentą gramais per vieną kWh[44]. Šis rodiklis leidžia tiesiogiai palyginti energijos šaltinius pagal aplinkos poveikį. Pavyzdžiui gamtinės dujos 400 gCO_{2ekv}/kWh. Dėl to šį rodiklį apskaičiavus SE, galima išsiaiškinti, ar projektas yra pakankamai „žalias“.

Formulė:

$$GHG\ Intensity = \frac{GHG_{Emissions}}{Elektrinės\ per\ visą\ gyvavimo\ ciklą\ sugeneruota\ elektros\ energija(kWh)}$$

Čia $GHG_{Emissions}$ – išmetamas ŠESD emisijų kiekis, nustatytas taikant LCA (gCO_2eq).

2.3.3 Ekonomika

Dažnu atveju, labiau ekologiškas produktas yra brangesnis nei įprastas. Tačiau žvelgiant į ateities perspektyvas, dažnu atveju investuoti į ekologiškus pasirinkimus yra efektyviau. Kad ir koks būtų projektas, galiausiai svarbu, kad jis neštų ir ekonominę naudą. Saulės elektrinėse skaičiuojamos elektrinės sugeneruotos energijos kainos ir svertiniai vidutiniai kapitalo kaštai.

Vidutiniai svertiniai kapitalo kaštai (WACC) – šis rodiklis parodo, kiek įmonei, vidutiniškai kainuoja, pritraukti kapitalą. Šis rodiklis naudojamas subalansuotiems elektros gamybos kaštams apskaičiuoti. Kuo didesni vidutiniai svertiniai kapitalo kaštai, tuo didesni ir subalansuoti elektros gamybos kaštai.

Formulė:

$$WACC = \left(\frac{E}{E+D}\right) \cdot R_E + \left(\frac{D}{E+D}\right) \cdot R_D \cdot (1-T)$$

Čia E – Nuosavo kapitalo dydis;

D – Skolos dydis;

R_E – Nuosavo kapitalo kaina (%);

R_D – Skolos palūkanų norma (%);

T – Pelno mokesčio tarifas.

Subalansuoti elektros gamybos kaštai (LCOE) – rodo kiek, per visą elektrinės gyvavimo laikotarpį, vidutiniškai kainuoja pagaminti 1 kWh elektros energijos[45]. LCOE skaičiavimas įtraukia pradines investicijas, eksploatacines išlaidas, finansavimo sąnaudas ir subsidijas ar paramą jeigu tokia taikoma. Šis rodiklis yra vienas svarbiausių ekonominiam viso gyvavimo ciklo vertinimui. Subalansuoti elektros gamybos kaštai, dažnai lemia elektrinės tipo ir energijos generavimo būdo pasirinkimą. Įprastai iškastinį kurą naudojantys elektros generavimo būdas, dėl kuro kainos, yra brangesnis nei SE. Dėl to, lyginant energijos šaltinius, būtiną atsižvelgti į šį rodiklį. LCOE yra būtinas apskaičiuojant metinius pinigų srautus.

Formulė:

$$LCOE = \sum_{t=0}^{T} \frac{I_t + O\&M_t - IS_t}{(1+d)^t} \Big/ \sum_{t=0}^{T} \frac{C_I \cdot 8760 \cdot LF \cdot (1-DE)^t}{(1+d)^t}$$

Čia I_t – investicija t metais;

$O\&M_t$ – eksploatacinės išlaidos t metais;

IS_t – subsidija t metais;

D – diskonto norma (WACC);

C_I – įrengtoji galia (kW);

LF – apkrovos koeficientas (%);

DE – degradacijos koeficientas (%);

T – metų skaičiuos.

Metiniai pinigų srautai (C) – metiniai pinigų srautai skaičiuojami pagal pajamų ir išlaidų skirtumą[45]. Šis rodiklis būtinas, grynosios dabartinės vertės apskaičiavimui. Didėjant šitam rodikliui, didėja ir NPV.

$$C_t = C_{in,t} - C_{out,t}$$

Čia $C_{in,t}$ – įplaukos;

$C_{out,t}$ – išlaidos.

Grynoji dabartinė vertė (NPV) – yra vienas pagrindinių finansinės analizės rodiklių, jis naudojamas įvertinti investicinio projekto pelningumą. Šis rodiklis parodo kiek pinigų projektas uždirbs ar praras įvertinus diskontavimą[45]. Šiam rodikliui didžiausią įtaką daro pradinė investicija ir grynieji pinigų srautai.

$$NPV = C_0 + \sum_{t=1}^{n} \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

Čia C_0 – pradinė investicija;

C_t – Grynieji pinigų srautai kiekvienais metais;

r – Diskonto norma;

n – projekto trukmė.

t – laikotarpio indeksas (metai).

3 Saulės elektrinių viso gyvavimo ciklo darnumo palyginamasis vertinimas

3.1 Tyrimo objektas

Darant palyginamąją analizę, lyginamos dvi fotovoltinės elektrinės. Šiame tyrime tirsime dvi saules elektrines. Viena iš jų plačiai naudojama privačių namų ūkių – ant stogo montuojama saulės elektrinė iki 10 kW galios. Antroji plačiau naudojama verslo – antžeminis saulės elektrinių parkas ~ 10 MW galios.

Kad skaičiavimai būtų tikslesni, abejuose objektuose, naudosime tuos pačius fotovoltinius modulius. Objektus lyginsime pagal anksčiau pateiktus rodiklius.

3.1.1 Ant privataus namo stogo montuojama saulės elektrinė iki 10 kW

13 lentelė. Tiriamos saulės elektrinės montuojamos ant plokščio stogo duomenys.

Saulės elektrinės tipas	Montuojama ant plokščio stogo
Vieta	Jonava 55.07° (š) 24.28° (r)
Aukštis virš jūros lygio	46 m
Instaliuota galia	10 kW DC
Konstrukcijos kampas	15°
Sistemos dažnis	50 hz
Sistemos įtampa	0,4 kV
Kryptis	Pietūs

14 lentelė. Tiriamos saulės elektrinės montuojamos ant plokščio stogo medžiagų žiniaraštis.

Eil. Nr	Pavadinimas	Mato vienetas	Kiekis
1	Fotovoltinis monokristalinis modulis STD TSM-500-NEG18R	Vienetai	20
2	Aliuminė laikančioji konstrukcija 15°	Vienetai	24
3	Kabelis 1x6 DC	Metrai	50
4	Kabelis 1x6 PE	Metrai	25
5	Jungtys MC4	Vienetai	8
6	Inverteris Huawei SUN2000-10KTL-M2-400V 10 kW	Vienetai	1
7	Kabelis 5x4 Cu	Metrai	5
8	Automatinis jungiklis C20 3F	Vienetai	1
9	Plastikinis lovelis 20x30	Metrai	4
10	Tvirtinimo dirželiai	Vienetai	100

3.1.2 Ant žemės montuojamas saulės elektrinių parkas iki 10 MW

15 lentelė. Tiriamos saulės elektrinės su saulės sekimo sistema duomenys.

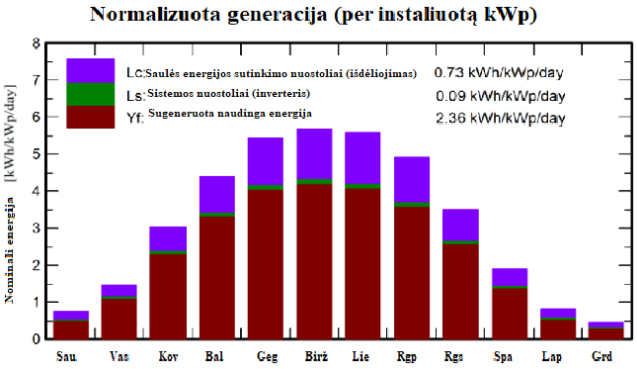
Saulės elektrinės tipas	Antžeminis saulės parkas su saulės sekimo sistema
Vieta	Jonava 55.07º (š) 24.28º (r)
Aukštis virš jūros lygio	46 m
Instaliuota galia	9,74 MW DC
Konstrukcijos kampas	55º iki 235º
Sistemos dažnis	50 hz
Sistemos įtampa	10 kV
Kryptis	Pietūs

16 lentelė. Tiriamos saulės elektrinės su saulės sekimo sistema medžiagų žiniaraštis.

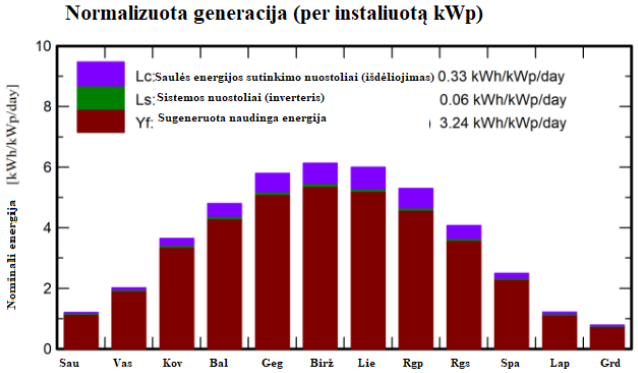
Eil. Nr	Pavadinimas	Mato vienetas	Kiekis
1	Inverteris 300 kW	vienetas	25
2	Saulės modulis 650 W	vienetas	15000
3	Tarpinės jungtys (MC4)	komplektai	500
4	Metalinės konstrukcijos saulės moduliams tvirtinti	komplektai	348
5	Trackerių automatika	komplektas	1
6	Trackerių paskirstymo skydas	komplektas	1
7	Sniego daviklio 2,5x2,5 betonuojama aikštelė su 1m aukščio tvorele	komplektas	1
8	Metalinės inverterių montavimo konstrukcijos	Komplektas	25
9	Datalogger 3000A	vienetas	2
10	Apšvietos matavimo prietaisas	vienetas	2
11	Tinklo maršrutizatorius	vienetas	2
12	Maršrutizatoriaus išorinės antenos	vienetas	2
13	Tinklo spinta ir įrenginiai	komplektas	1
14	Monitoringo sistema	vienetas	1
15	1500V DC kabelis	metrai	5680
16	24V DC kabelis	metrai	7790
17	0,4 kV kabelis	metrai	2947
18	Cinkuota įžeminimo juosta	metrai	8400
19	0,8 kV Al 3x240mm^2	metrai	2000
20	Įžeminimo kontūras	komplektas	1
21	PE gofruotas iki d110mm požeminis vamzdis	metrai	20000
22	Ekranuotas ryšio kabelis lauko sąlygoms su PE FTP 4x2x0,5	metrai	410
23	Tvora ir vartai	Metrai (pagal plotą)	

3.2 Saulės elektrinių energijos generacijos palyginamasis vertinimas

Norint įvertinti pagrindinius rodiklius, tam reikalingas elektrinės viso gyvavimo ciklo elektros energijos generavimas. Naudojant „PVsyst“ programą, simuliuojamas abiejų elektrinių, trisdešimties metų, elektros energijos generavimas[46]. Dėl tikslesnių palyginamųjų rezultatų, abiejų saulės elektrinių lokacija, veikimo laikotarpis ir orų duomenys pasirenkami analogiški. Tačiau pagrindiniai sistemos rodikliai, įranga, plotas ir elektrinės išdėliojimas pasirenkami atsižvelgiant į realią, tos sistemos veikimui reikiamą situaciją. Atlikus simuliaciją pastebimi pirmieji skirtumai, tarp stacionarios ir saulės sekimo sistemą naudojančias saulės elektrines. Palyginus grafikus:



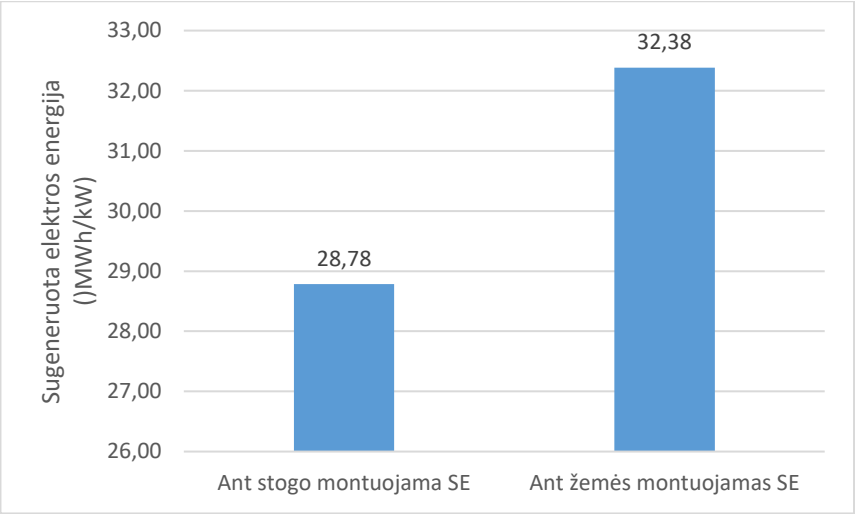
9 pav. Ant stogo montuojamos SE pagaminama elektros energija tenkanti vienam kW galios per dieną[46].



8 pav. Ant žemės montuojamos SE pagaminama elektros energija tenkanti vienam kW galios per dieną[46].

Iškart pastebima, kad saulės elektrinės su saulės sekimo sistema, elektros generacija vienam kW galios, yra didesnė, o nuostoliai dėl saulės elektrinės išdėstymo mažesni. Dėl šio faktoriaus daroma prielaida, kad saulės parkas su saulės sekimo sistema, naudingiau ir efektyviau išnaudoja elektros energiją. Toliau pastebima, kad ant stogo montuojama saulės elektrinė turi didesnius sisteminius nuostolius ir mažesnį po nuostolių sugeneruotos elektros energijos kiekį. Tai vyksta dėl mažesnio modulių kiekio tenkančio vienam inverteriui, dėl ko inverterio nuostoliai išdalinami mažesniam kiekiui instaliuotos galios.

Vidutinė saulės elektrinė įpratai vertinama trisdešimties metų laikotarpiui. Šiuo atveju atlikta simuliacija, saulės elektrinėms veikiant trisdešimt metų. Simuliacija, atsižvelgiant į sistemos degradacija, orus ir sistemos nuostolius sugeneravo sistemos elektros energijos, trisdešimties metų, generaciją. Viso generavimo ciklo metu sugeneruota energija tenkanti vienam kW galios pateikiama grafike:



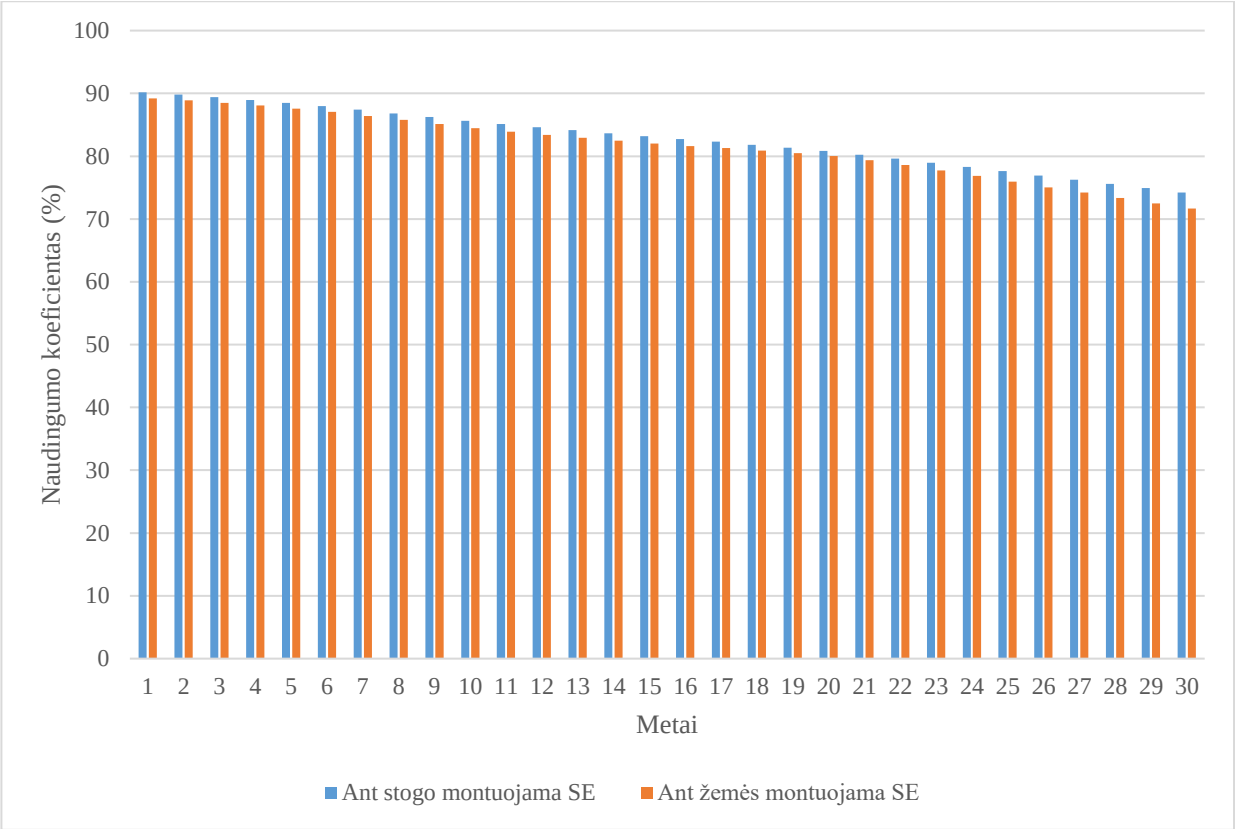
10 pav. SE per visą gyvavimo ciklą, vienam instaliuotam kW galios tenkantis pagamintos energijos kiekis

Sugeneruoti duomenys koreliuoja su prieš tai pateiktais vienos dienos generacijos duomenimis. Saulės sekimo sistemą turinti saulės elektrinė per visą gyvavimo ciklą, vienam kW instaliuotos galios sugeneruoja daugiau elektros energijos nei ant stogo montuojama stacionari saulės elektrinė. Pagrindinis veiksnys, kuris sukuria šį skirtumą yra saulės elektrinės efektyvumą didinanti saulės sekimo sistema. Įvertinus visus nuostolius sugeneruoti per visą gyvavimo ciklą, kiekvienos elektrinės pagamintos elektros energijos po nuostolių duomenys.

17 lentelė. Per 30 metų sistemos sugeneruota elektros energija (MWh)

	Saulės elektrinės tipas	
	10 kW ant stogo montuojama saulės elektrinė	**9740 kW ant žemės montuojama saulės elektrinė**
Per 30 metų sistemos sugeneruota elektros energija (MWh)	287,83	315415

Šie duomenis skaičiuojami atsižvelgiant į saulės elektrinės sistemos degradaciją. Įvertinus pradinius fotovoltinių modulių efektyvumo koeficientus ir kasmetinį degradacijos koeficientą generuojami duomenys. Sugeneravus degradacijos duomenis, atliekama palyginamoji analizė. Abiejų elektrinių degradacija palyginta grafike:

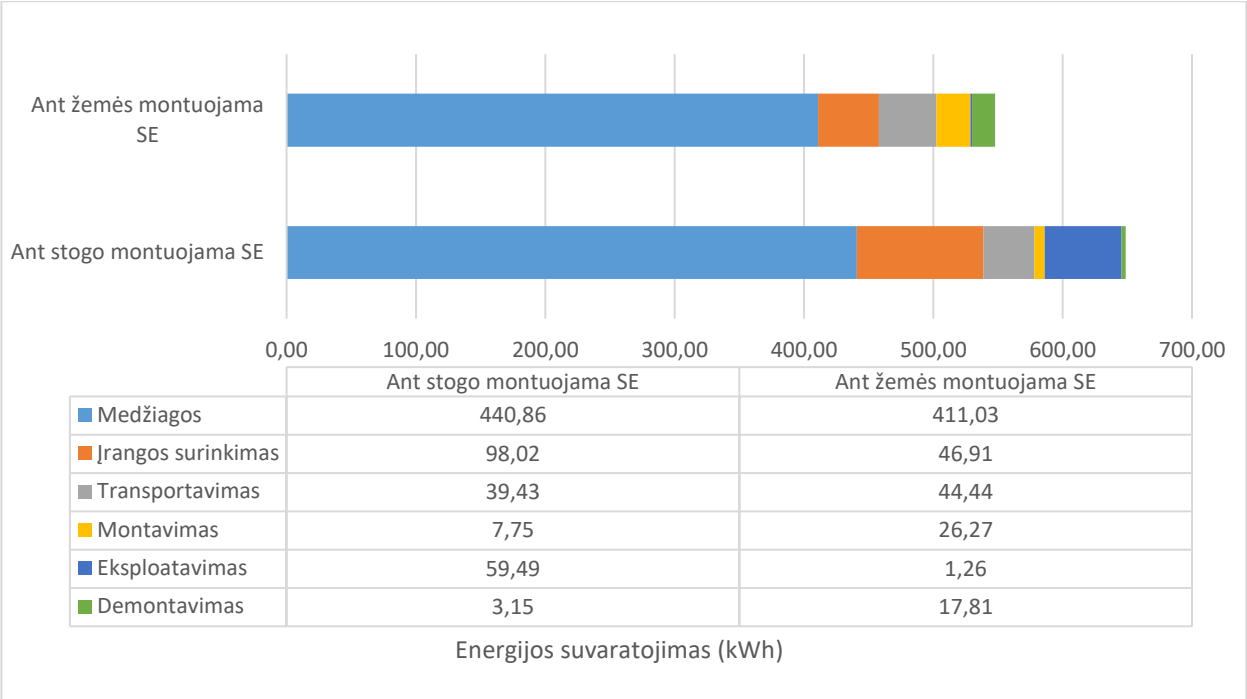


11 pav. SE efektyvumo koeficiento degradavimas per 30 metų

Pateiktame grafike matoma, kad saules parke esantys saulės moduliai per visą gyvavimą degraduoja iki mažesnio efektyvumo koeficiento negu stacionari ant stogo montuojama saulės elektrinė. Dėl to pradinis įrenginių efektyvumo koeficientas yra mažesnis. Turint abiejų elektrinių viso gyvavimo ciklo elektros energijos sugeneravimo kiekius, galima atlikti viso gyvavimo ciklo šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų palyginimą ir apskaičiavimą.

3.3 Saulės elektrinės viso gyvavimo ciklo aplinkosauginių kriterijų palyginamasis vertinimas

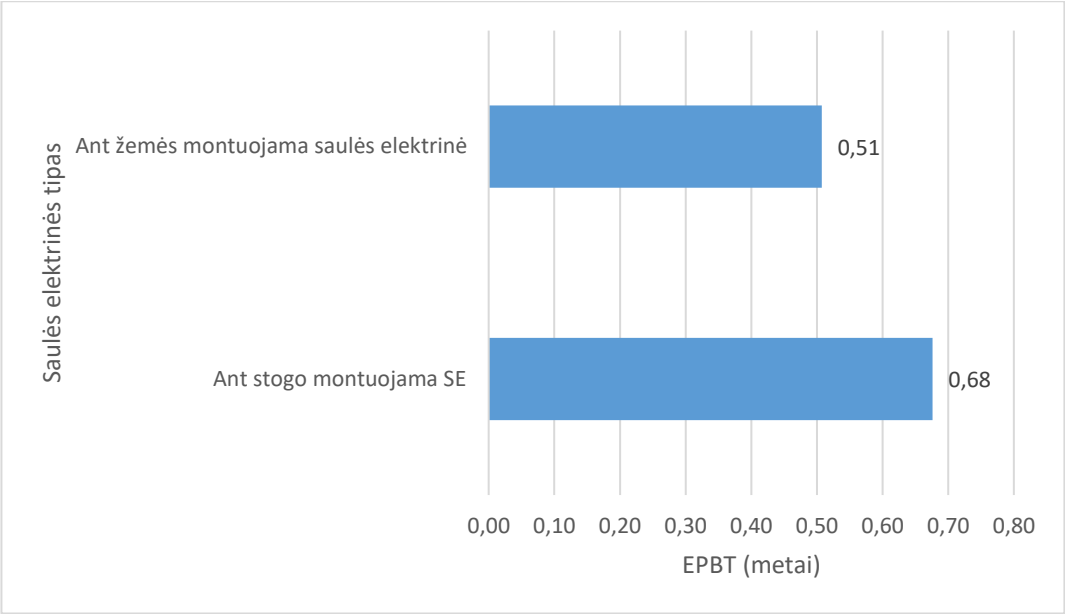
Renkantis ekonomiškai ir ekologiškai efektyviausią SE, reikia palyginti pagrindinius rodiklius. Norint įrodyti, kad saulės elektrinė pagamina daugiau elektros energijos negu suvartoja per visą gyvavimo ciklą, o projektas yra efektyvus, pirmiausiai suskaičiuojama elektrinės viso gyvavimo ciklo sunaudojama energija. 12 paveikslėlyje pateikiamas grafikas su saulės elektrinių vienam kW instaliuotos galios tenkančiam sunaudotų kWh kiekį.



12 pav. Saulės elektrinių viso gyvavimo ciklo sunaudota elektros energija, vienam kW instaliuotos galios

Iš pateiktos diagramos matoma, kad vienam instaliuotam galios kW tenkančios energijos sąnaudos, saulės elektrinėje su saulės sekimo sistema yra mažesnės, nei stacionarioje ant stogo sumontuotoje saulės elektrinėje. Didžiausias skirtumas yra eksploatavimo fazėje. Tai daugiausiai vyksta dėl transporto naudojimo, kadangi naudojamas tas pats kiekis energijos nuvažiuoti iki objekto, tačiau, ant stogo montuojamos saulės elektrinės atveju, apžiūrima mažiau saulės modulių. Šiek tiek mažiau skiriasi įrangos surinkimo sekcija, kadangi prie vieno inverterio prijungtas mažesnis kiekis saulės modulių, dėl to vienam instaliuotam kW galios tenka didesnė dalis inverterio surinkimo elektros energijos.

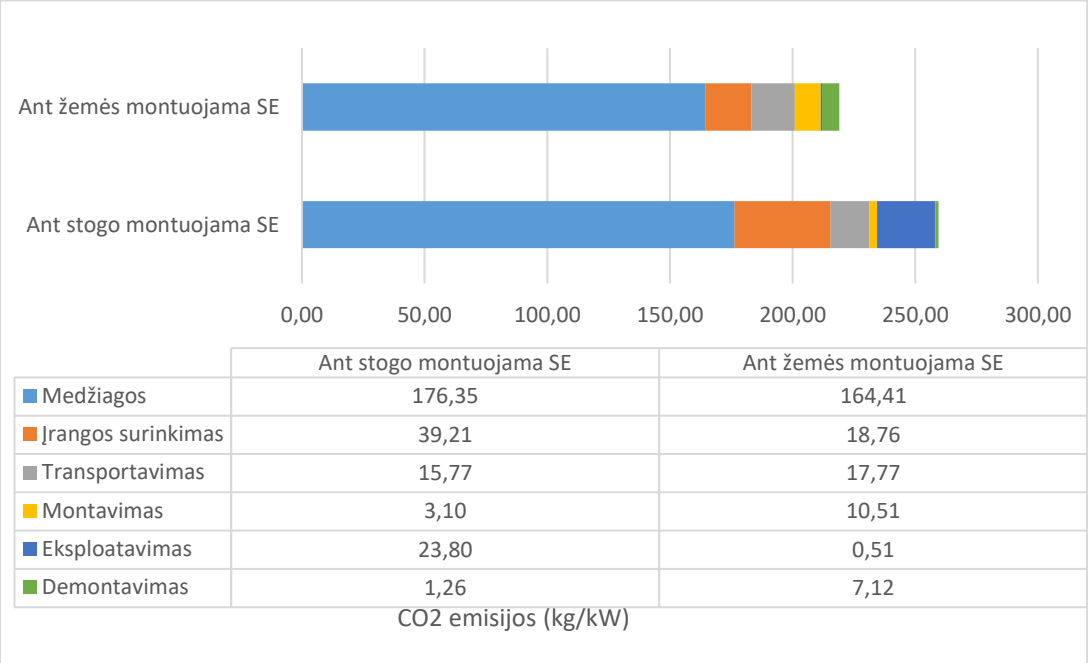
Turint bendrą energijos suvartojimą, galima apskaičiuoti vieną iš svarbiausių energijos atsipirkimo rodiklių – EPBT. 13 paveiksle pateikiamas grafikas kuriame pavaizduotas energijos atsipirkimo laikas pagal saulės elektrinės tipą.



13 pav. Saulės elektrinių energijos atsipirkimo laikas

Šiame grafike atvaizduotas saulės elektrinės su sekimo įranga ir stacionarios ant stogo montuojamos saulės elektrinės energijos atsipirkimo laikas. Ant stogo montuojamos saulės elektrines viso gyvavimo ciklo metu sunaudotos energijos atsipirkimo laikas yra ilgesnis. Tai yra dėl to, kad ant stogo montuojama saulės elektrinė yra stacionari ir neseka saulės. Taip ji praranda didelį kiekį, per metus, sugeneruojamos elektros energijos.

Turint energijos rodiklius, apskaičiuojamos ŠESD emisijos vienam instaliuotam kW galios. 14 paveiksle pateikiamas grafikas, kuriame lyginamos abiejų SE viso gyvavimo ciklo metu išskirtos ŠESD emisijos.

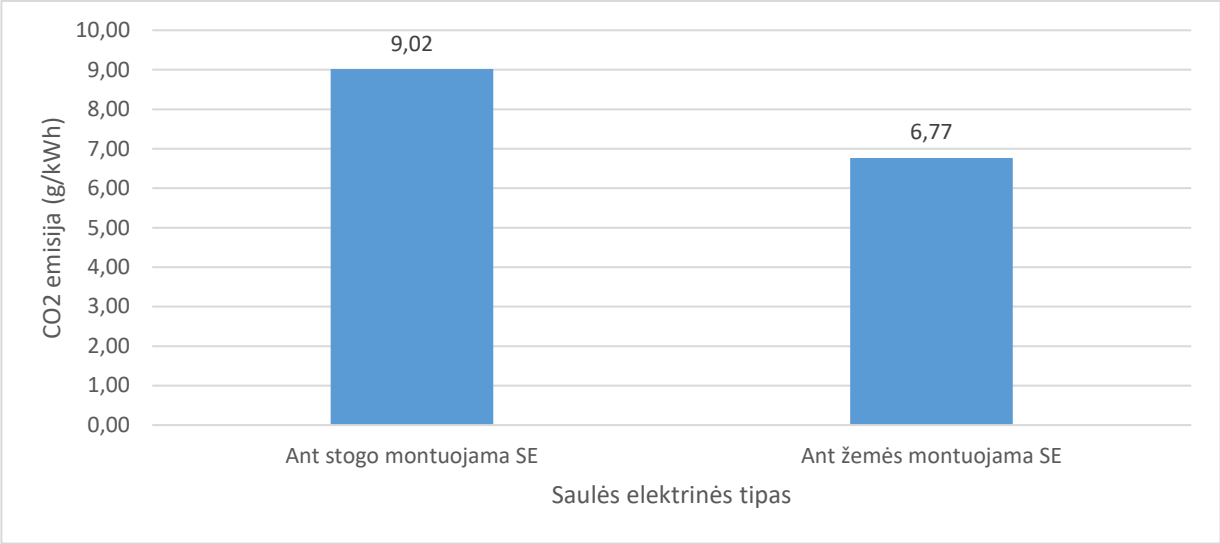


	Ant stogo montuojama SE	Ant žemės montuojama SE
Medžiagos	176,35	164,41
Įrangos surinkimas	39,21	18,76
Transportavimas	15,77	17,77
Montavimas	3,10	10,51
Eksploatavimas	23,80	0,51
Demontavimas	1,26	7,12

14 pav. ŠESD emisijos tenkančios vienam SE instaliuotam kW galios

Pateiktame grafike matomą, kad didesnę galią turinti elektrinė sukuria mažiau CO_2 emisijų vienam kW instaliuotos galios. Daugiausiai šį skirtumą sukuria eksploatacijos fazė, kadangi didžiąją

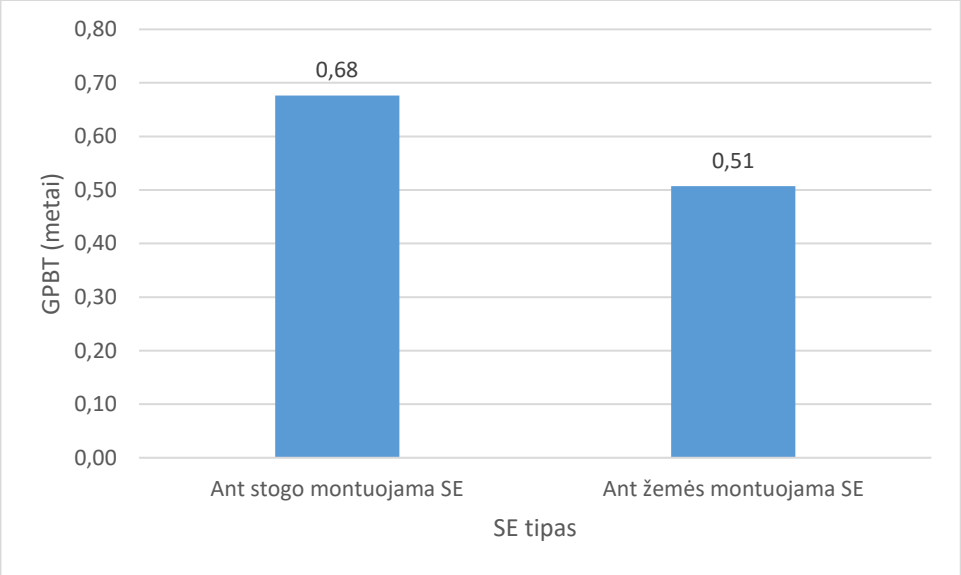
eksploatacijos dalį sudaro transportas. Dėl šios priežasties, eksploatuojant didesnę saulės elektrinę, transporto sukurtos emisijos išnaudojamos didesniam kiekiui galios eksploatuoti. Kas ir sukuria didžiausią emisijų skirtumą tarp šių elektrinių. Turint per visą elektrinės gyvavimo ciklą išskleistas ŠESD emisijas ir per visą gyvavimo ciklą sugeneruotą elektros energijos kiekį, skaičiuojamos ŠESD emisijos vienai sugeneruotai kWh. 15 paveiksle palygintos skirtingų SE tipų ŠESD emisijos per 1 kWh.



15 pav. ŠESD emisijos tenkančios vienai SE pagamintai kWh

Kaip ir prieš tai pateiktame grafike, čia saulės sekimo sistemą turinti saulės elektrinė, vienos kWh elektros energijos pagaminimui, išskleidžia mažesnes ŠESD emisijas.

Ne mažiau svarbus ir ŠESD emisijų atsipirkimo laikas. 16 paveiksle lyginamas ant stogo ir ant žemės montuojamų SE ŠESD atsipirkimo laikas.



16 pav. ŠESD emisijų atsipirkimo laikas (metais)

Ant stogo montuojama saulės elektrinė per savo gyvavimo laiką sukurtas emisijas atperka lėčiau. Tai vyksta dėl mažesnio SE efektyvumo ir didesnių ŠESD emisijų.

3.4 Saulės elektrinių viso gyvavimo ciklo ekonominių kriterijų palyginamasis vertinimas

Pradedant saulės elektrinių viso gyvavimo ciklo ekonominį vertinimą, turime susiskaičiuoti diskonto normą. Kaip nuosavo kapitalo kainą naudosime 2024 metų Lietuvoje buvusį infliacijos dydį, o kaip skolinto kapitalo, vidutines, įmonių, saulės elektrinėms siūlomų palūkanų dydį. Kaip pradinė investicija yra įvertinama APVA subsidijos grąžinama dalis. Pirmiausiai suskaičiuojamas stacionariai ant stogo montuojamai saulės elektrinei:

$$WACC = \left(\frac{3230}{3230+3060}\right) \cdot 0{,}033 + \left(\frac{3060}{3230+3060}\right) \cdot 0{,}045 \cdot (1-0) = 0{,}0388 \text{ t.y. } 3{,}88\%$$

Čia bendra elektrinės su įrengimu kaina yra 6290 eurų. Toliau skaičiuojama saules sekimo sistemą turinčio saulės parko dalies diskonto norma.

$$WACC = \left(\frac{E}{E+D}\right) \cdot R_E + \left(\frac{D}{E+D}\right) \cdot R_D \cdot (1-T) =$$
$$= \left(\frac{3230}{3230+6760}\right) \cdot 0{,}033 + \left(\frac{6760}{3230+6760}\right) \cdot 0{,}045 \cdot (1-0) = 0{,}0411 \text{ t.y. } 4{,}11\%$$

Čia E – Nuosavo kapitalo dydis;

D – Skolos dydis;

R_E – Nuosavo kapitalo kaina (%);

R_D – Skolos palūkanų norma (%);

T – Pelno mokesčio tarifas.

Šiuo atveju diskonto norma yra didesnė. Tai yra dėl to, kad saulės parko dalies kaina už tą patį investuotą kiekį pinigų yra brangesnė. Išsiaiškinus projekto diskonto normą, galima skaičiuoti subalansuotus elektros gamybos kaštus. Skaičiuojant stacionarios, mažos galios, ant stogo montuojamos saulės elektrinės energijos gamybos kaštus, eksploatacijos kaštai yra apie 1% nuo saulės elektrinės vertės. Modulių degradacija priimama kaip 0,4%.

$$LCOE = \sum_{t=0}^{T} \frac{I_t + O\&M_t - IS_t}{(1+d)^t} / \sum_{t=0}^{T} \frac{C_I \cdot 8760 \cdot LF \cdot (1-DE)^t}{(1+d)^t} = \frac{\sum_{t=0}^{30} \frac{6290 + 62{,}0 - 3230}{(1+0{,}0388)^t}}{\sum_{t=0}^{30} \frac{10450 \cdot (1-0{,}004)^t}{(1+0{,}0388)^t}}$$
$$= \frac{4190}{259047} = 0{,}0163 \text{ €}/kWh$$

Čia I_t – investicija t metais;

$O\&M_t$ – eksploatacinės išlaidos t metais;

IS_t – subsidija t metais;

D – diskonto norma (WACC);

C_I – įrengtoji galia (kW);

LF – apkrovos koeficientas (%);

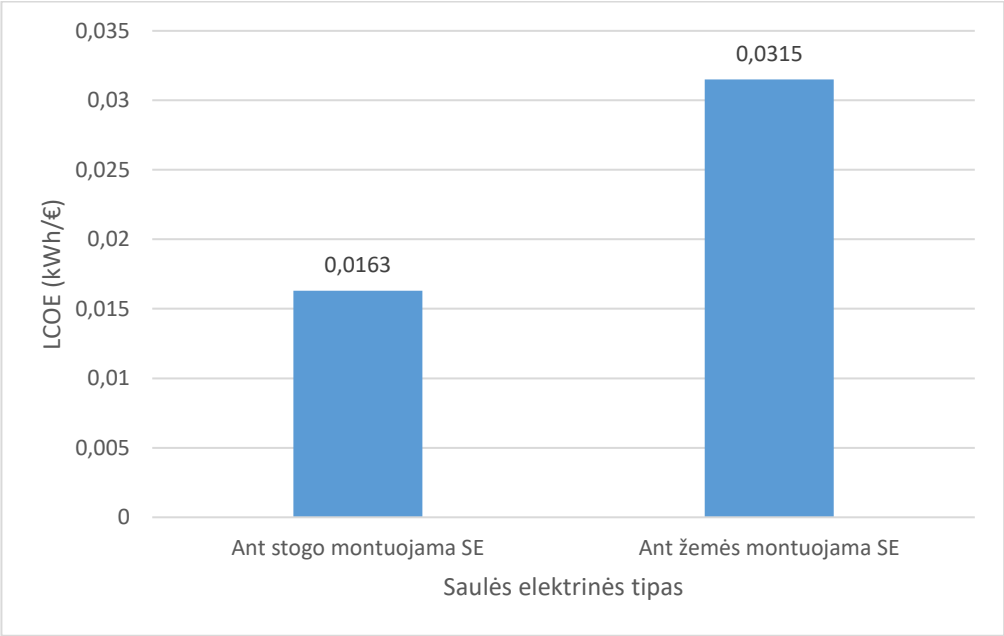
DE – degradacijos koeficientas (%);

T – metų skaičiuos.

Apskaičiavus stacionarios saulės elektrinės gamybos kaštus, pastebime, kad gauta vienos kWh gamybos kaina yra itin maža. Tam daro įtaką mažesnė diskonto norma ir APVA parama. Toliau skaičiuojama saulės sekimo sistemą turinčio saulės parko dalies energijos gamybos kaštai.

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^{30} \frac{9990 + 765 - 3230}{(1 + 0{,}0411)^t}}{\sum_{t=0}^{30} \frac{11814{,}17 \cdot (1 - 0{,}004)^t}{(1 + 0{,}0411)^t}} = \frac{10694{,}2}{323834{,}7} = 0{,}0315\ €/kWh$$

Šiuo atveju pasinaudota informacija pagal analogišką saulės parko projektą. Šiuo atveju 10 kW galios įsigijimas kainuoja 9990 eurų su PVM. Mėnesinis eksploatacijos mokestis yra 15,83€. Prie to prisideda 47,92€ už ESO paskirstymo tinklų naudojimą. Taigi bendra suma už eksploatavimą 63,75€. Taip pat šiam parkui yra pasinaudota APVA parama, kuri kompensuoja 3230 eurų nuo 10 kW galios.



17 pav. Ant stogo montuojamos SE ir išpirkto SE parko dalies LCOE kWh/€

19 paveiksle, ant žemės, saulės parke, montuojamos SE gautas rezultatas yra didesnis už ant stogo montuojamos, mažos galios saulės elektrinės, kadangi šiuo atveju nusipirkti parko dalį yra brangiau, taip pat jo eksploatacija per metus kainuoja apie 12,5 karto daugiau. Dėl šių kaštų, saulės elektrinės parko, vienos kWh gamybos kaina yra 1,93 karto didesnė negu mažos galios, ant stogo montuojamos saulės elektrinės.

Saulės elektrinės atsipirkimo laikas

Turint abiejų saulės elektrinių vienos kWh pagaminimo kainas, galima apskaičiuoti kokio kiekio elektros energijos reikia pagaminti, kad saulės elektrinė atsipirktų. Skaičiuojama grynoji dabartinė vertė NPV. Apskaičiuojama ant stogo montuojamos saulės elektrinės NPV.

$$NPV = C_0 + \sum_{t=1}^{n} \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

$$= 6290 - 3230 + \sum_{t=1}^{30} \frac{10450 \cdot 0{,}23 - 10450 \cdot 0{,}0163 - 62}{(1+0{,}0388)^t} = \sim 62045€$$

Čia C_0 – pradinė investicija;

C_t – Grynieji pinigų srautai kiekvienais metais;

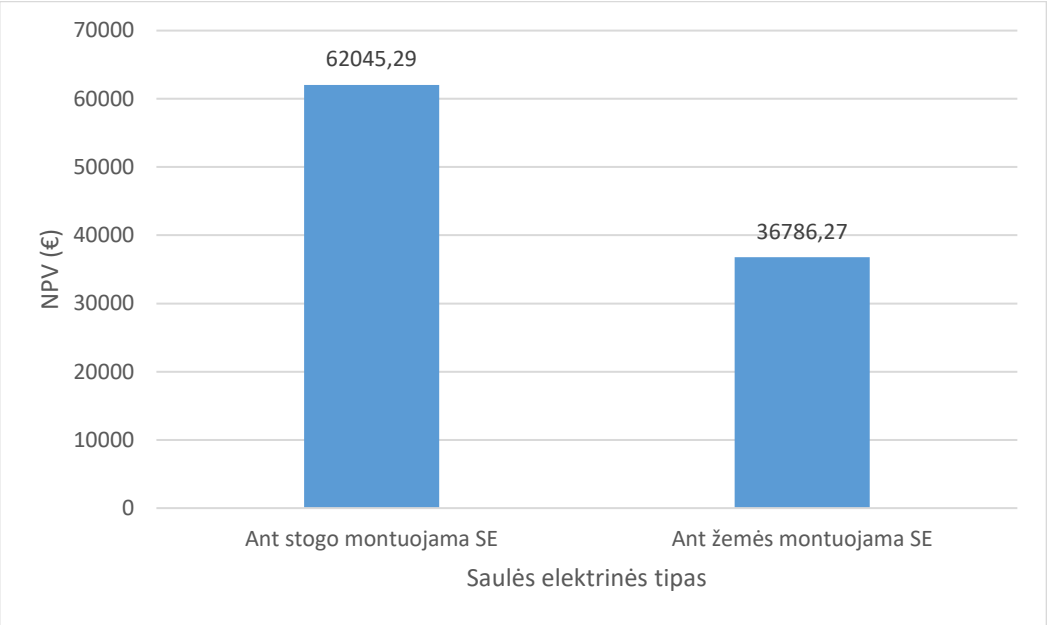
r – Diskonto norma;

n – projekto trukmė.

Per visą projekto laiką, su APVA parama, ant stogo montuojama saulės elektrinė uždirbs 62045,29€ elektros kainai esant 0,23€. Visa investiciją į ant stogo montuojamą saulės elektrinę su APVA parama atsiperka jau per antrus metus. Apskaičiuojame saulės sekimo sistemą turinčio parko 10 kW dalies grynąją dabartinę vertę.

$$NPV = 9990 - 3230 + \sum_{t=1}^{30} \frac{11814{,}17 \cdot 0{,}23 - 11814{,}17 \cdot 0{,}0163 - 765}{(1+0{,}0411)^t} = \sim 36786€$$

Čia apskaičiuotas per visą projekto laiką, su APVA parama, saulės parke su saulės sekimo sistema išpirktoji dalis uždarbis, kai elektros kaina 0,23€. Visa investiciją į ant saulės parke su saulės sekimo sistema 10 kW galios dalį atsiperka per 3 metus. 20 paveiksle lyginamos abiejų tipų SE grynosios dabartinės vertės.



18 pav. Ant stogo montuojamos SE ir išpirkto SE parko dalies NPV eurais

Palyginus šių abiejų elektrinių atsipirkimo laiką ir bendrą projekto pelną, matoma, kad finansiškai naudingesnė yra ant namo stogo sumontuota saulės elektrinė. Taip pat galima manyti, kad saulės parkai yra skirti tiems žmonėms, kurie neturi vietos kur ją įsirengti. Saulės parko variantas labiau tinkamas žmonėms, kurie iš energijos skirstymo operatoriaus negauna leidimo, į tinklą, generuoti elektros energiją.

Apskaičiavus diskontuotus pinigų srautus, galima teigti, kad ant stogo montuojama 10 kW galios SE, turi didesni atsipirkimą, nei SE parke išpirkta 10 kW dalis. Tam didžiausią įtaką daro eksploatacijos kaštai ir didelė pradinė investicija.

3.5 Saulės elektrinių viso gyvavimo ciklo darnumo vertinimo apibendrinimas

19 lentelėje analizuojamos dvi skirtingos SE. Pirmoji tai ant namo stogo sumontuota 10 kW galios saulės elektrinė. Antroji – saulės parke sumontuota 9740 kW saulės elektrinė, kuri turi saulės kampo sekimo sistemą. Žvelgiant į lentelę akivaizdu, kad perdirbimo scenarijus yra žymiai palankesnis abiem elektrinių tipams, negu utilizavimas išmetant sąvartyne.

18 lentelė. Ant stogo montuojamos SE (10 kW) ir saulės parke su saulės sekimo sistema (9740 kW) išpirktos saulės elektrinės palyginamieji rodikliai skirtingais gyvavimo ciklo pabaigos scenarijais.

	10 kW		9740 kW	
Rodiklis	Sąvartynas	Perdirbimas	Sąvartynas	Perdirbimas
CO2 emisijos (g/kWh)	12,25	10,09	9,64	7,72
CO2 emisijos (g/kW)	352485,49	290485,49	312087,70	250087,70
CO2 emisijos (kgCO2)	3524,85	2904,85	3039734,21	2435854,21
Energijos suvartojimas (kWh)	8812,14	7262,14	7599335,52	6089635,52
EPBT (metai)	0,92	0,76	0,72	0,58
NPV (€)	62045		36786	
LCOE (€/kWh)	0,0163		0,0315	

Apskaičiavus energijos atsipirkimo laiką EPBT, matoma, kad 10 kW energijos atsipirkimo laikas perdirbimo atveju yra mažesnis, negu saulės sekimo sistemą turinčio saulės parko. Tai yra dėl to, nes saulės parkas, dėl instaliuotos sistemos, per metus vienam kW instaliuotos galios, sugeneruoja daugiau elektros energijos.

Priklausomai nuo norimos naudos, abi elektrinės turi savų pliusų. Ant stogo montuojama saulės elektrinė turi lėtesnį energijos(EPBT) ir ŠESD (GHG) atsipirkimo laiką, tačiau greitesnį finansinį atsipirkimo laiką. O saulės elektrinė su saulės sekimo sistema, turi greitesnį energijos (EPBT) ir ŠESD (GHG) atsipirkimo laiką. Tačiau finansiškai šis variantas, dėl didelių pradinių investicijų ir eksploatacinių kaštų yra lėčiau atsiperkantis variantas. Taigi, norint ekologiškiausio varianto, reikia rinktis ant žemės montuojamų saulės elektrinių parke esančią SE. O norint finansiškai efektyviausio varianto pasirenkama ant nuosavo namo stogo montuojama SE.

Išvados

1. Atlikus literatūros analizę nustatyta, kad saulės elektrinių plėtra yra glaudžiai susijusi su darnios energetikos principais, ypač klimato kaitos švelninimu, energetiniu saugumu bei vietinės ekonomikos skatinimu.

2. Pagrindinės SE plėtros kliūtys – elektros tinklų pajėgumų stoka, lėtas leidimų išdavimas ir ribotas finansavimas. Nustatyta, kad daugiau nei 30% naujų projektų susiduria su ribotu tinklų pajėgumu, o piko metu, saulės gamyba gali viršyti vietinį poreikį, tuo pačiu energijos kaupimas išlieka sudėtingas. Nors modulių kainos per pastarąjį dešimtmetį sumažėjo apie 80%, tačiau inverteriai ir SE montavimas vis dar sudaro daugiau nei puse SE kainos.

3. SE gyvavimo ciklo darnumui įvertinti sukurta kompleksinė metodika, paremta LCA principais. Ji apima tiek energinio efektyvumo, tiek aplinkosauginę ir ekonominę analizę ir vertina šešis pagrindinius rodiklius: energijos atsipirkimo laikotarpį (EPBT), viso gyvavimo ciklo ŠESD emisijas tenkančias 1 kWh (gCO_2-eq/kWh), ŠESD emisijų atsipirkimo laiką (GPBT), svertinę elektros energijos gamybos kainą (LCOE), grynąją dabartinę vertę (NPV).

4. Atlikus dviejų SE tipų viso gyvavimo ciklo darnumo vertinimą nustatyta, kad ant žemės montuojama SE sistema pasižymi mažesnėmis ŠESD emisijomis (6,77 gCO_2/kWh) lyginant su ant stogo montuojama sistema (9,02 gCO_2/kWh).

5. Atlikus SE palyginamąjį vertinimą, nustatyta, kad ant žemės montuojama SE yra aplinkosauginiu požiūriu efektyvesnė ir turi trumpesnį energijos atsipirkimo laiką (EPBT – 0,58 m.). Tačiau ji reikalauja žemės plotų įrengimui, brangesnės priežiūros ir didesnių investicijų. Ant stogo montuojama SE yra ekonomiškai pranašesnė ir pasižymi mažesniais energijos gamybos kaštais (LCOE – 0,0163 €/kWh), didesne grynąja dabartine verte (NPV – 62045 €) dėl paprastesnės ir pigesnės konstrukcijos. SE parko dalies įsigyjimas pranešesnis mažesniu aplinkosauginiu poveikiu, o ant stogo montuojama SE yra ekonomiškai naudingesnis sprendimas individualių namų gyventojams.

Literatūros sąrašas

1. Europos parlamentas. (2017) „Atsinaujinanti energija: ambicingi tikslai Europai“. [žiūrėta 2024-06-03] Prieiga per internetą: https://www.europarl.europa.eu/topics/lt/article/20171124STO88813/atsinaujinanti-energija-ambicingi-tikslai-europai
2. Aplinkos projektų valdymo agentūra „40 mln. € parama saulės elektrinėms – jau birželio 11 d. Ką reikėtų žinoti?“ [žiūrėta 2024-06-06]. Prieiga per internetą: https://apva.lrv.lt/lt/naujienos-24316/40-mln-parama-saules-elektrinems-jau-birzelio-11-d-ka-reiketu-zinoti/
3. Zheng, M., Zhang, X. (2025). Digitalization and renewable energy development: Analysis based on cross-country panel data. Energy. [žiūrėta 2025-04-01] Prieiga per internetą: https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135077
4. A. A. Soto, Ž. Stasiškienė. (2024) „Exploring the Interplay Between Energy Policies and Sustainable Development Goals Within Lithuania’s Energy Sector: A Critical Review“ [žiūrėta 2025-04-23] Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/385928046_Exploring_the_Interplay_Between_Energy_Policies_and_Sustainable_Development_Goals_Within_Lithuania's_Energy_Sector_A_Critical_Review
5. Farghali, M., Osman, A. I., Chen, Z., Abdelhaleem, A., Ihara, I., Mohamed, I. M. A., Yap, P.-S., Rooney, D. W. (2023). Social, environmental, and economic consequences of integrating renewable energies in the electricity sector: A review. Environmental Chemistry Letters, 21(3), 1381–1418. [žiūrėta 2025-04-01] Prieiga per internetą: https://doi.org/10.1007/s10311-023-01587-1
6. Pata, U. K. (2025). How to progress towards sustainable development by leveraging renewable energy sources, technological advances, and human capital. [žiūrėta 2025-04-01] Prieiga per internetą: [žiūrėta 2025-04-01] Prieiga per internetą: https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122367
7. K. Lebedeva, A. Borodinecs, A. Palcikovskis, R. Wawerka, N. Skandalos. (2025) „Estimation of LCOE for PV electricity production in the Baltic States - Latvia, Lithuania and Estonia until 2050“ [žiūrėta 2025-04-23] Prieiga per internetą: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667095X25000091
8. Basílio, M. (2025). Renewable energy and energy efficiency: An exploratory study in EU countries. Sustainable Futures, 9, 100514. [žiūrėta 2025-04-01] Prieiga per internetą: https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.100514
9. T. Sueyoshi, M. Goto (2023) „Energy Intensity, Energy Efficiency and Economic Growth among OECD Nations from 2000 to 2019“ [žiūrėta 2025-04-11] Prieiga per internetą: https://www.mdpi.com/1996-1073/16/4/1927
10. A. Pažėraitė, D. Brandišauskas (2022) „Assessment of the barriers towards more rapid development of solar power: the case of Lithuania“ [žiūrėta 2025-04-25] Prieiga per internetą: https://www.lmaleidykla.lt/ojs/index.php/energetika/article/download/4858/4227/
11. D. Štreimikienė, V. Lekavičius, G. Stankūnienė, A. Pažėraitė. (2022) „Renewable Energy Acceptance by Households: Evidence from Lithuania“ [žiūrėta 2025-04-23] Prieiga per internetą:

https://www.researchgate.net/publication/361908124_Renewable_Energy_Acceptance_by_Households_Evidence_from_Lithuania
12. Shafiullah, M., Ahmed, S. D., Al-Sulaiman, F. A. (2022). Grid Integration Challenges and Solution Strategies for Solar PV Systems: A Review. IEEE Access, 10, 52233–52247. [žiūrėta 2025-04-01] Prieiga per internetą: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3174555
13. T. A. Naidu, S. K. Sadanandanm T. Ghaoud. (2022) "Power Quality in Grid-Connected PV Systems: Impacts, Sources, and Mitigation Strategies“ [žiūrėta 2025-04-11] Prieiga per internetą: https://smartgrid.ieee.org/bulletins/june-2022/power-quality-in-grid-connected-pv-systems-impacts-sources-and-mitigation-strategies
14. Costa, D., De Regel, S., Espadas-Aldana, G., Laget, H., Kishore, R., Meuret, Y., Duerinckx, F. (2024). Environmental and economic impacts of photovoltaic integration in concentrated solar power plants. Solar Energy, 274, 112550. [žiūrėta 2025-04-01] Prieiga per internetą: https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112550
15. V. P. Verma. (2024) „Advancement in Solar Technology: Evolution, Generation, Future Prospective, and Challenges - A Review“ [žiūrėta 2025-04-25] Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/381929133_Advancement_in_Solar_Technology_Evolution_Generation_Future_Prospective_and_Challenges_-_A_Review
16. D. Milcius, R. Urbonas (2024) „Mapping Renewable Energy Sources potential, challenges, and opportunities in Lithuania‘ [žiūrėta 2025-04-25] Prieiga per internetą: https://www.euki.de/wp-content/uploads/2024/10/Mapping-Renewable-Energy-Sources-potential-challenges-and-opportunities-in-Lithuania.pdf
17. Maka, A. O. M., Alabid, J. M. (2022). Solar energy technology and its roles in sustainable development. Clean Energy, 6(3), 476–483. [žiūrėta 2025-04-02] Prieiga per internetą: https://doi.org/10.1093/ce/zkac023
18. V. Kornienko, O. Oklobia , S. Irvine, S. Jones, A. Munshi, W. Sampath, A. Abbas, K. Curs on , S. Robertson, Y. Y. Tse, K. Barth, J. Bowers, M. Walls (2024). Absorber texture and the efficiency of polycrystalline thin film CdTe solar cells [žiūrėta 2024-06-13] Prieiga per internetą: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040609024000798
19. Hagmann, M. (2022). New process boosts efficiency of bifacial CIGS thin film solar cell. [žiūrėta 2025-05-13]. Prieiga per: https://www.empa.ch/web/s604/bifacial-cigs
20. Vagas H. (2017). Monocrystalline Cells vs. Polycrystalline Cells: What's the Difference?” [žiūrėta 2024-06-13] Prieiga per internetą: Monocrystalline Cells vs. Polycrystalline Cells: What's the Difference (artgreenconstruction.com)
21. McDevitt, C., Marsh, J. (2024). Bifacial solar panels: What you need to know. EnergysSage. [žiūrėta 2025-03-04]. Prieiga per: https://www.energysage.com/solar/bifacial-solar-panels-what-you-need-to-know/
22. Ludt B. (2022). Should you install bifacial solar panels on tracking systems? Solar Power World. [žiūrėta 2025-03-25]. Prieiga per: https://www.solarpowerworldonline.com/2022/05/should-you-install-bifacial-solar-panels-on-tracking-systems/
23. Tawfiq, K. B., Zeineldin, H., Al-Durra, A., El-Sadaany, E. F. (2025). Enhancing photovoltaic grid integration with hybrid energy storage and a novel three-phase ten-switch inverter for superior power quality. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 167, 110580. [žiūrėta 2025-04-01] Prieiga per internetą: https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.110580

24. Singh, D., Shah, O. A., Arora, S. (2024). Adaptive control strategies for effective integration of solar power into smart grids using reinforcement learning. Energy Storage & Saving, 3(4), 327. [žiūrėta 2025-04-01] Prieiga per internetą: https://doi.org/10.1016/j.enss.2024.08.002
25. V. Kihlstrom, J. Elbe. (2021) „Constructing Markets for Solar Energy—A Review of Literature about Market Barriers and Government Responses“ [žiūrėta 2025-04-25] Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/350109414_Constructing_Markets_for_Solar_Energy-A_Review_of_Literature_about_Market_Barriers_and_Government_Responses
26. Smith, B. L., Sekar, A., Mirletz, H., Heath, G., & Margolis, R. (2024). An updated life cycle assessment of utility-scale solar photovoltaic systems installed in the United States. National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-7A40-87372. [žiūrėta 2025-05-02]. Prieiga per: https://www.nrel.gov/docs/fy24osti/87372.pdf.
27. E. Brivio, A. Danelli, P. Girardi (2024) “ Ground-mounted or residential rooftop photovoltaic plant - European production or Chinese production: which is the most environmentally sustainable system? A case study in Italy” [žiūrėta 2025-01-17] Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/379079308_Ground-mounted_or_residential_rooftop_photovoltaic_plant_-_European_production_or_Chinese_production_which_is_the_most_environmentally_sustainable_system_A_case_study_in_Italy
28. Duomenų bazė „Searates“ (2025) [Žiūrėta 2025-05-01] Prieiga per internetą: https://www.searates.com/distance-time/
29. Frischknecht, R., Stolz, P., Krebs, L., de Wild-Scholten, M., Sinha, P. (2020). Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems. IEA PVPS Report T12-19:2020. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. [žiūrėta 2025-04-02] Prieiga per internetą: https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17977.19041
30. A. M. H. Saad. (2024) „Analyzing the lifecycle of solar panels including raw material sourcing, manufacturing, and end-of-life disposal“ [žiūrėta 2025-04-17] Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/385382841_Analyzing_the_lifecycle_of_solar_panels_including_raw_material_sourcing_manufacturing_and_end-of-life_disposal
31. Konstantinavičiūtė, I., Bobinaitė, V., Lekavičius, V., Venckūnaitė, Ū. (2024). Assessing the sustainability of solar photovoltaics: The case of glass–glass and standard panels manufactured in Lithuania. Clean Technologies and Environmental Policy, 27(4), 1877–1898. [žiūrėta 2025-04-02] Prieiga per internetą: https://doi.org/10.1007/s10098-024-02989-7
32. K. Kiran. (2021) „A Review of Design, Manufacturing of Grid Tied PV Inverter and its Impact on Site Performance, Reliability and Safety“ [žiūrėta 2025-04-27] Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/371948728_A_Review_of_Design_Manufacturing_of_Grid_Tied_PV_Inverter_and_its_Impact_on_Site_Performance_Reliability_and_Safety
33. Lietuvos Respublikos susisiekimo ministerija. (2021). Transporto sektoriaus išmetamų šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠESD) kiekio mažinimo priemonių efektyvumo vertinimas ir prognozių modeliavimas: Galutinė ataskaita. Vilnius.
34. Duomenų bazė „Climatiq“ (2025) [Žiūrėta 2025-05-01] Prieiga per internetą: https://www.climatiq.io/
35. Qu, J., Liu, L., Zeng, J., Maraseni, T. N., Zhang, Z. (2022). City-level determinants of household CO_2 emissions per person: An empirical study based on a large survey in

China. Land, 11(6), 925. [žiūrėta 2025-04-02] Prieiga per internetą: https://doi.org/10.3390/land11060925

36. Abdulla, H., Sleptchenko, A., Nayfeh, A. (2024). Photovoltaic systems operation and maintenance: A review and future directions. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 195, 114342. [žiūrėta 2025-04-02] Prieiga per internetą: https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114342
37. Pimpalkar, R., Sahu, A., Yadao, A., Patil, R. B., Roy, A. (2025). Reliability analysis and life cycle costing of rooftop solar photovoltaic (PV) system operating in a composite environment. Science and Technology for Energy Transition 80, 32. [žiūrėta 2025-04-02] Prieiga per internetą: https://doi.org/10.2516/stet/2025012
38. Friesen, G., Köntges, M., Lin, J., Oreski, G., Eder, G. C., Hacke, P., Gebhardt, P., Özkalay, E., Bucher, C., Caccivio, M., Couderc, R., Spataru, S. V. (2025). Photovoltaic Failure Fact Sheets (PVFS) 2025. IEA PVPS Report T13-30:2025. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. [žiūrėta 2025-04-02] Prieiga per internetą: https://doi.org/10.69766/CKCD1805
39. PV CYCLE. (2023). Annual report 2023. [žiūrėta 2025-04-26]. Prieiga per: https://www.pvcycle.org/web/content/website.annualreport/17/attachedpdf?filename=2023_-_annual_report.pdf
40. Zhao, L., Zhang, S., Liu, Q. (2024). A comprehensive review on the recycling technology of silicon-based photovoltaic modules. Journal of Cleaner Production, 448, 141661. [žiūrėta 2025-04-01] Prieiga per internetą:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141661
41. Daljit Singh, J. K., Molinari, G., Bui, J., Soltani, B., Rajarathnam, G. P., Abbas, A. (2021). Life cycle assessment of disposed and recycled end-of-life photovoltaic panels in Australia. Sustainability, 13(19), 11025. [žiūrėta 2025-04-02] Prieiga per internetą: https://doi.org/10.3390/su131911025
42. Z. N. Ndalloka, H. V. Nair, S. Alpert, C. Schmid. (2024) „Solar photovoltaic recycling strategies“ [Žiūrėta 2025-05-10] Prieiga per internetą: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X24000732
43. J. Pearce (2023) „Is Small or Big Solar Better for the Environment? Comparative Life Cycle Assessment of solar photovoltaic Roof-top vs. Ground-mounted Systems“ [žiūrėta 2025-05-10] Prieiga per internetą: https://www.academia.edu/111416760/Is_Small_or_Big_Solar_Better_for_the_Environment_Comparative_Life_Cycle_Assessment_of_Solar_Photovoltaic_Roof_top_vs_Ground_mounted_Systems
44. Ruixiong Li, Haoran Zhang, Huanran Wang, Quingshi Tu, Xuejun Wang, (2019) Integrated hybrid life cycle assessment and contribution analysis for CO_2 emission and energy consumption of a concentrated solar power plant in China [žiūrėta 2025-01-17] Prieiga per internetą: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219302610
45. Csongor Czipf (2025) The impact of changing energy prices, interest rates, and investment costs on the net present value and internal rate of return for alternative energy projects [žiūrėta 2025-04-30] Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/389787204_The_impact_of_changing_energy_prices_interest_rates_and_investment_costs_on_the_net_present_value_and_internal_rate_of_return_for_alternative_energy_projects

46. Simuliavimo programa „PVsyst 8“ (2025) [Žiūrėta 2025-05-02] Prieiga per internetą: https://www.pvsyst.com/

Priedai

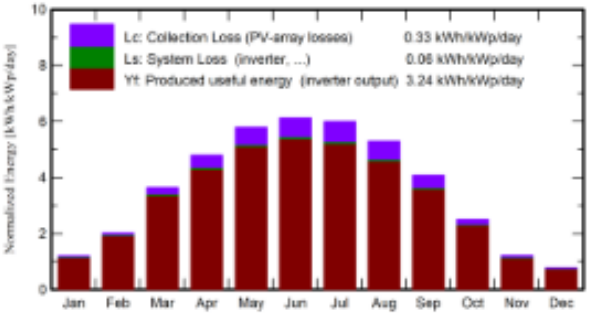
1. priedas. 10 MW galios saulės elektrinės vienerių metų gamyba

Main results

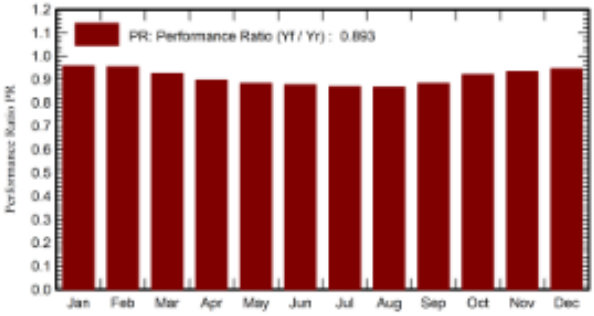
System Production

Produced Energy	11525 MWh/year	Specific production	1184 kWh/kWp/year
Used Energy	5 MWh/year	Perf. Ratio PR	89.35 %
		Solar Fraction SF	51.89 %

Normalized productions (per installed kWp)



Performance Ratio PR



Balances and main results

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray MWh	E_User MWh	E_Solar MWh	E_Grid MWh	EFrGrid MWh
January	15.6	10.80	-3.20	37.4	37.1	358	0.0	0.0	349	0.0
February	31.4	19.40	-2.38	56.4	55.8	536	0.0	0.0	524	0.0
March	77.4	38.73	1.88	112.9	110.7	1036	0.0	0.0	1018	0.0
April	117.3	55.74	8.17	143.9	140.4	1279	0.0	0.0	1258	0.0
May	159.9	78.13	14.00	179.6	174.8	1569	0.0	0.0	1544	0.0
June	166.2	79.17	16.56	183.7	179.1	1596	1.7	0.9	1569	0.8
July	166.3	79.93	19.29	186.0	180.9	1598	1.7	0.9	1572	0.8
August	137.5	64.89	18.27	164.2	160.0	1409	1.7	0.9	1385	0.9
September	89.2	44.53	13.16	122.1	119.2	1069	0.0	0.0	1050	0.0
October	46.0	27.48	7.63	77.4	76.3	709	0.0	0.0	694	0.0
November	17.2	12.00	3.47	36.5	36.2	341	0.0	0.0	332	0.0
December	9.7	6.86	-0.20	24.4	24.3	232	0.0	0.0	225	0.0
Year	1033.8	517.67	8.12	1324.7	1294.7	11734	5.1	2.7	11522	2.5

Legends

GlobHor	Global horizontal irradiation	EArray	Effective energy at the output of the array
DiffHor	Horizontal diffuse irradiation	E_User	Energy supplied to the user
T_Amb	Ambient Temperature	E_Solar	Energy from the sun
GlobInc	Global incident in coll. plane	E_Grid	Energy injected into grid
GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings	EFrGrid	Energy from the grid

2 priedas. 10 MW saulės elektrinės 30-ties metų simuliacija

Aging Tool

Aging Parameters

Time span of simulation 30 years

Module average degradation

Loss factor 0.4 %/year

Mismatch due to degradation

Imp RMS dispersion 0.4 %/year

Vmp RMS dispersion 0.4 %/year

Weather data used in the simulation

Jonava MN82 SYN

Years reference year

	EUseful	PR	PR loss
Year	MWh	%	%
1	11507	89.21	-0.19
2	11464	88.88	-0.57
3	11415	88.49	-0.99
4	11359	88.06	-1.47
5	11298	87.59	-2.01
6	11227	87.04	-2.62
7	11146	86.41	-3.32
8	11063	85.77	-4.04
9	10979	85.12	-4.77
10	10896	84.48	-5.49
11	10822	83.90	-6.13
12	10757	83.40	-6.70
13	10695	82.92	-7.23
14	10636	82.46	-7.74
15	10580	82.02	-8.24
16	10529	81.63	-8.67
17	10484	81.28	-9.07
18	10436	80.90	-9.48
19	10382	80.49	-9.95
20	10321	80.02	-10.48
21	10240	79.39	-11.18
22	10138	78.60	-12.07
23	10028	77.75	-13.02
24	9913	76.86	-14.01
25	9795	75.94	-15.04
26	9681	75.05	-16.03
27	9571	74.20	-16.99
28	9461	73.35	-17.94
29	9351	72.50	-18.89
30	9241	71.65	-19.84

PVsyst TRIAL

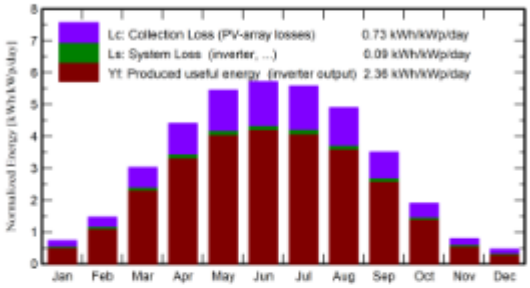
3 priedas. 10 kW ant stogo montuojamos saulės elektrinės vienerių metų gamybos simuliacija

Main results

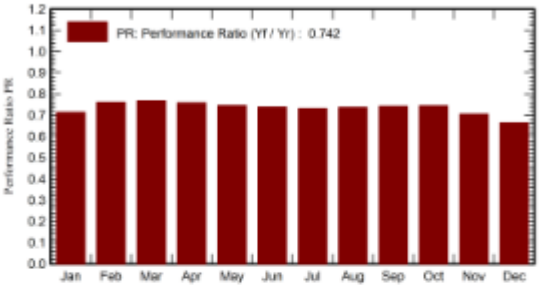
System Production

Produced Energy	8602.6 kWh/year	Specific production	860 kWh/kWp/year
Used Energy	48.2 kWh/year	Perf. Ratio PR	74.22 %
		Solar Fraction SF	45.14 %

Normalized productions (per installed kWp)



Performance Ratio PR



Balances and main results

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray kWh	E_User kWh	E_Solar kWh	E_Grid kWh	EFrGrid kWh
January	15.6	10.80	-3.20	22.9	21.5	178.2	4.09	1.07	162.1	3.02
February	31.4	19.40	-2.38	41.1	39.5	330.1	3.70	1.27	311.8	2.43
March	77.4	38.73	1.88	94.1	90.9	749.7	4.09	1.80	721.2	2.29
April	117.3	55.74	8.17	132.2	128.3	1036.2	3.96	2.13	1000.8	1.83
May	159.9	78.13	14.00	169.0	164.2	1300.1	4.09	2.51	1257.6	1.58
June	166.2	79.17	16.56	171.5	166.5	1307.6	3.96	2.64	1263.1	1.32
July	166.3	79.93	19.29	173.3	168.1	1309.9	4.09	2.57	1265.8	1.52
August	137.5	64.89	18.27	152.1	147.8	1157.2	4.09	2.32	1118.1	1.77
September	89.2	44.53	13.16	105.4	101.8	811.6	3.96	1.94	780.8	2.02
October	46.0	27.48	7.63	58.8	56.4	458.6	4.09	1.55	436.0	2.54
November	17.2	12.00	3.47	24.0	22.8	185.3	3.96	1.06	168.4	2.90
December	9.7	6.86	-0.20	14.5	13.6	110.2	4.09	0.89	95.1	3.21
Year	1033.8	517.67	8.12	1159.0	1121.3	8934.8	48.18	21.75	8580.9	26.43

Legends

GlobHor	Global horizontal irradiation	EArray	Effective energy at the output of the array
DiffHor	Horizontal diffuse irradiation	E_User	Energy supplied to the user
T_Amb	Ambient Temperature	E_Solar	Energy from the sun
GlobInc	Global incident in coll. plane	E_Grid	Energy injected into grid
GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings	EFrGrid	Energy from the grid

PVsyst TRIAL

4 priedas. 10 kW ant stogo montuojamos saulės elektrinės vienerių metų gamybos simuliacija

Aging Tool

Aging Parameters

Time span of simulation 30 years

Module average degradation

Loss factor 0.4 %/year

Mismatch due to degradation

Imp RMS dispersion 0.4 %/year

Vmp RMS dispersion 0.4 %/year

Weather data used in the simulation

Jonava MN82 SYN

Years reference year

	EUseful	PR	PR loss
Year	MWh	%	%
1	10.45	90.19	-0.21
2	10.41	89.81	-0.63
3	10.36	89.40	-1.08
4	10.31	88.96	-1.57
5	10.26	88.49	-2.09
6	10.20	87.97	-2.67
7	10.13	87.40	-3.30
8	10.06	86.81	-3.94
9	9.99	86.23	-4.59
10	9.93	85.64	-5.24
11	9.86	85.11	-5.83
12	9.81	84.62	-6.38
13	9.75	84.14	-6.90
14	9.70	83.67	-7.42
15	9.64	83.21	-7.93
16	9.59	82.75	-8.44
17	9.54	82.30	-8.94
18	9.48	81.83	-9.46
19	9.43	81.34	-10.00
20	9.37	80.83	-10.57
21	9.30	80.25	-11.20
22	9.23	79.63	-11.90
23	9.15	78.97	-12.62
24	9.08	78.30	-13.36
25	9.00	77.62	-14.12
26	8.92	76.94	-14.87
27	8.84	76.26	-15.62
28	8.76	75.59	-16.36
29	8.68	74.91	-17.12
30	8.60	74.22	-17.87

PVsyst TRIAL

5 priedas. Saulės elektrinių viso gyvavimo ciklo energijos suvartojimas ir ŠESD emisijos

	Galia			Galia
	10,00			9740
Antstoginėė			Saulės parkas	
Medžiagos			Medžiagos	
Energijos suvaratojimas VISO (kWh)	CO2 emisijos VISO g		Energijos suvaratojimas VISO (kWh)	CO2 emisijos VISO g
4408,65	1763459,40		4003462,639	1601385056
Įrangos surinkimas			Įrangos surinkimas	
Energijos suvaratojimas VISO (kWh)	CO2 emisijos VISO g		Energijos suvaratojimas VISO (kWh)	CO2 emisijos VISO g
980,24	392094,60		456883,805	182753522
Transportavimas			Transportavimas	
Energijos suvaratojimas VISO (kWh)	CO2 emisijos VISO g		Energijos suvaratojimas VISO (kWh)	CO2 emisijos VISO g
394,29	157717,15		432797,5135	173119005,4
Montavimas			Montavimas	
Energijos suvaratojimas VISO (kWh)	CO2 emisijos VISO g		Energijos suvaratojimas VISO (kWh)	CO2 emisijos VISO g
77,52	31009,04		255878,6406	102351456,3
Eksploatavimas			Eksploatavimas	
Energijos suvaratojimas VISO (kWh)	CO2 emisijos VISO g		Energijos suvaratojimas VISO (kWh)	CO2 emisijos VISO g
594,89	237955,50		12307,795	4923118
Demontavimas			Demontavimas	
Energijos suvaratojimas VISO (kWh)	CO2 emisijos VISO g		Energijos suvaratojimas VISO (kWh)	CO2 emisijos VISO g
31,55	12619,20		173455,125	69382050
Utilizavimas			Utilizavimas	
Energijos suvaratojimas VISO (kWh)	CO2 emisijos VISO g		Energijos suvaratojimas VISO (kWh)	CO2 emisijos VISO g
2325,00	930000,00		2264550	905820000
Perdirbimas			Perdirbimas	
Energijos suvaratojimas VISO (kWh)	CO2 emisijos VISO g		Energijos suvaratojimas VISO (kWh)	CO2 emisijos VISO g
775,00	310000,00		754850	301940000

6 priedas. 10 MW saulės elektrinės su saulės sekimo įranga skaičiavimai

Saulės elektrinė su trackeriais ~10 MW								
			Kiekis					
	Medžiaga/darbas	vnt	kg/vnt	kW	Energijos sąn	Energijos sąn	CO2 emisijos	CO2 emisijos VISO g
Modulio sudėtinių medžiagų gamyba ir apdirbimas	Silicio celių gamyba	900000	0,012	9740	0,33	297000	132	118800000
	Jungčių dėžutė	15000	0,236	9740	1,77	26550	708	10620000
	Juostelės	15000	0,19	9740	2,375	35625	950	14250000
	Galinė plėvelė	15000	1,5	9740	2,25	33750	900	13500000
	Stiklas	15000	9	9740	1,575	23625	630	9450000
	Aluminio rėmas	15000	3	9740	78,75	1181250	31500	472500000
	EVA plėvelė	30000	0,8	9740	2,4	72000	960	28800000
STD modulis	Modulio surinkimas	15000	14,738	9740	0,6672	10008	266,88	4003200
	Transportas+priežiūra	15000	14,738	9740	0,6672	10008	266,88	4003200
	Utilizavimas pendirbimas	15000	14,738	9740	0,6672	10008	266,88	4003200
Inverteris	Aluminis	25	26,7	9740	564,705	14117,625	225882	5647050
	Varis	25	49,2	9740	433,452	10836,3	173380,8	4334520
	Plastikas	25	7,12	9740	17,85	446,25	7140	178500
	Pilenas	25	20,2	9740	87,365	2184,125	34946	873650
	PCB	25	3,8	9740	27,7695	694,2375	11107,8	277695
	Stiklas	25	4,5	9740	16,16625	404,15625	6466,5	161662,5
	Inverterio surinkimas	25	111,12	9740	521,25	13031,25	208500	5212500
	Inverterio montavimo konstrukcijos	25	10	9740	43,25	1081,25	17300	432500
Trackeriai	Trackerių automatika	25	4	9740	9,6	240	3840	96000
	Trackerių pakėlimymo skydas	1	35	9740	84	84	33600	33600
	Sniego daviklio betonuojama aikštelė	1	4312,5	9740	1832,8125	1832,8125	733125	733125
Monitoringas	Data logger 3000A	2	2	9740	4,8	9,6	1920	3840
	Monitoringo sistema	1	6	9740	14,4	14,4	5760	5760
	Marinutiziatoriaus išorinės antenos	2	4	9740	9,6	19,2	3840	7680
	Aplinkos matavimo prietaisas	2	1,7	9740	4,08	8,16	1632	3264
	Tinklo marinutiziatorius	2	2	9740	4,8	9,6	1920	3840
	Tinklo spinta	1	70	9740	168	168	67200	67200
Įžeminimas	Cinkuota įžeminimo juosta	8400	1,28	9740	9,696	81446,4	3878,4	32578560
Tvora	Tvora ir vartai	1730	7,5	9740	56,8125	98285,625	22725	39314250
Konstrukcijos	Pavara Nerudijantis pilenas	125	100	9740	1044,5	130562,5	417800	52225000
	Karštai cinkuotas pilenas	125	2000	9740	15150	1893750	6060000	757500000
	Konstrukcijų gaminimas	125	2000	9740	2500	312500	1000000	125000000
PE gofruotas vamzdis	Vamzdžio gamyba	20000	0,6	9740	0,3045	6090	121,8	2436000
	PE plastikas	20000	0,6	9740	4,188	83760	1675,2	33504000
Kabelis 1500V DC	Kabelio gamyba	56800	0,078	9740	0,117	6645,6	46,8	2658240
	Varis	56800	0,058	9740	0,51098	29023,664	204,392	11609465,6
	PVC izoliacija	56800	0,02	9740	0,21	11928	84	4771200
Kabelis 24V	Kabelio gamyba	7790	0,073	9740	0,1095	853,005	43,8	341202
	Varis	7790	0,028	9740	0,24668	1921,6372	98,672	768654,88
	PVC izoliacija	7790	0,045	9740	0,4725	3680,775	189	1472310
Kabelis 0,4 kV	Kabelio gamyba	2947	0,15	9740	0,225	663,075	90	265230
	Varis	2947	0,05	9740	0,4405	1298,1535	176,2	519261,4
	PVC izoliacija	2947	0,1	9740	1,05	3094,35	420	1237740
Kabelis FTP 4x2x0,5	Kabelio gamyba	410	0,99	9740	1,485	608,85	594	243540
	Varis	410	0,042	9740	0,37002	151,7082	148,008	60683,28
	PVC izoliacija	410	0,057	9740	0,5985	245,385	239,4	98154
Kabelis 4x240 Al	Kabelio gamyba	2000	2,7	9740	4,05	8100	1620	3240000
	Aluminis	2000	1,8	9740	21,465	42930	8586	17172000
	PVC izoliacija	2000	0,9	9740	9,45	18900	3780	7560000
Transportas	Modulai	15000	14,738	9740	12,933707	194005,6	5173,4827	77602241,01
	Inverteriai	15	111,12	9740	90,561575	1358,4236	36224,63	543369,4494
	Montavimo sistemos	125	2100	9740	678,7998	84849,975	271519,92	33939990
	Kabeliai	69947	0,7982	9740	0,2580086	18046,926	103,20343	7218770,223
	Automatiniai jungikliai	220	0,38	9740	0,0494529	10,879643	19,781169	4351,857189
	Trackeriai	1	4447,5	9740	2962,9245	2962,9245	1185169,8	1185169,8
	Įžeminimas	8400	1,28	9740	0,338688	2844,9792	135,4752	1137991,68
	Tvora ir vartai	1730	7,5	9740	0,192	332,16	76,8	132864
	Monitoringas	1	95,4	9740	63,55548	63,55548	25422,192	25422,192
SE montavimas	Projektavimas	1		9740	3871,75	3871,75	1548700	1548700
	Paruošiamieji ir infrastruktūros darbai	1		9740	7787,25	7787,25	3114900	3114900
	Montavimas	1		9740	97417,875	174590,63	38967150	69836250
	Paleidimas ir bandymas	1		9740	1379,0156	1379,0156	551606,25	551606,25
	Kaileniai	1		9740	68250	68250	27300000	27300000
Eksploatacija	Sekimo mechaninių (variklių ir pavarų) patikra	1		9740	4611,25	4611,25	1844500	1844500
	Sekimo sistemos elektronika (valdikliai, jutikliai)	1		9740	594,88875	594,88875	237955,5	237955,5
	Modulių valymas	1		9740	1885,5938	1885,5938	754237,5	754237,5
	Kabelių, jungčių, inverterių apžiūra	1		9740	1821,0938	1821,0938	728437,5	728437,5
	Konstrukcijų patikra	1		9740	1573,875	1573,875	629550	629550
	Saulės sekimo įrangos kalibracija	1		9740	1821,0938	1821,0938	728437,5	728437,5
SE gyvavimo ciklo pabaiga	Elektrinės demontavimas	1		9740	173455,13	173455,13	69382050	69382050
	Demontuotų dalių pervežimas		569422		1408,4767	118314,09	563390,69	47325635,18
	Elektrinės utilizavimas/pendirbimas	1		9740	2264550	2264550	905820000	905820000
	Pendirbimo atveju	1		9740	77,5	754850	31000	301940000

7 priedas. 10 kW ant stogo montuojamos saulės elektrinės skaičiavimai

Antstoginė elektrinė								
			Kiekis					
	Medžiaga/darbas	vnt	kg/vnt	kW	Energijos su	Energijos suvaratojimas VISO (	CO2 emisijos vnt.	CO2 emisijos VISO g
Modului reikalingų medžiagų šūgavimas ir apdirbimas	Silicio celių gamyba	1200,00	0,01	10,00	0,33	396,00	132,00	158400,00
	Jungčių dėžutė	20,00	0,24	10,00	1,77	35,40	708,00	14160,00
	Juostelės	20,00	0,19	10,00	2,38	47,50	950,00	19000,00
	Galinė plėvelė	20,00	1,50	10,00	2,25	45,00	900,00	18000,00
	Stiklas	20,00	9,00	10,00	1,58	31,50	630,00	12600,00
	Aliuminio rėmas	20,00	3,00	10,00	78,75	1575,00	31500,00	630000,00
	EVA plėvelė	40,00	0,80	10,00	2,40	96,00	960,00	38400,00
	Modulio surinkimas	20,00		10,00	0,67	13,34	266,88	5337,60
	Transportas+priežiūra	20,00		10,00	0,67	13,34	266,88	5337,60
STD modulis	Utilizavimas perdirbimas	20,00		10,00	0,67	13,34	266,88	5337,60
	Aliuminis	1,00	2,10		44,42	55,13	17766,00	22050,00
	Varis	1,00	1,80		15,86	15,86	6343,20	6343,20
	Plastikas	1,00	1,70		17,85	17,85	7140,00	7140,00
	Plienas	1,00	1,30		5,62	5,62	2249,00	2249,00
	PCB	1,00	0,40		3,27	3,27	1306,80	1306,80
	Stiklas	1,00	0,30		1,08	0,05	431,10	21,00
Inverteris	Inverterio surinkimas	1,00			1,80	1,80	720,00	720,00
Konstrukcijos	Aliuminis	24,00	4,00		84,60	2030,40	33840,00	812160,00
	Konstrukcijų gaminimas	24,00	4,00		40,20	964,80	16080,00	385920,00
Kabeliai	Kabelio gamyba	75,00	0,08		0,00	0,29	1,56	117,00
	Varis	75,00	0,06		0,51	38,32	204,39	15329,40
	PVC izoliacija	75,00	0,02		0,21	15,75	84,00	6300,00
	Moduliai	20,00	14,74	10,00	12,93	258,67	5173,48	103469,65
	Inverteriai	1,00	7,60	10,00	6,19	6,19	2477,57	2477,57
	Montavimo sistemos	24,00	4,00	10,00	1,29	31,03	517,18	12412,34
	Kabeliai	75,00	0,05	10,00	0,02	1,31	6,98	523,65
Transportas	Automatiniai jungikliai	1,00	0,38		0,05	0,05	19,78	19,78
	Projektavimas				30,97	30,97	12389,60	12389,60
	Montavimas				24,41	24,41	9764,40	9764,40
	Paleidimas				2,64	2,64	1055,04	1055,04
SE montavimas	Kelionės				19,50	19,50	7800,00	7800,00
Eksploatacija	Kabelių. Jungčių, inverterių apžiūra				594,89	594,89	237955,50	237955,50
SE gyvavimo ciklo pabaiga	Demontuotos elektrinės pervežimas		402,79		5,56	83,69	2225,07	33476,57
	Elektrinės demontavimas				31,55	31,55	12619,20	12619,20
	Elektrinės utilizavimas/perdirbimas				232,50	2325,00	93000,00	930000
	Perdirbimo atveju				77,50	775,00	31000,00	310000,00
							Iš viso:	3840192,49