



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Saulės šviesos energiją naudojančių įrenginių utilizavimo kaštų vertinimo tyrimas Lietuvoje

Baigiamasis magistro projektas

Gytis Dačkevičius

Projekto autorius

Lekt. Aistija Vaišnorienė

Vadovė

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Saulės šviesos energiją naudojančių įrenginių utilizavimo kaštų vertinimo tyrimas Lietuvoje

Baigiamasis magistro projektas

Energijos technologijos ir ekonomika (6211EX073)

Gytis Dačkevičius

Projekto autorius

Lekt. Aistija Vaišnorienė

Vadovė

Lekt. Povilas Norkevičius

Recenzentas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Gytis Dačkevičius

Saulės šviesos energiją naudojančių įrenginių utilizavimo kaštų vertinimo tyrimas Lietuvoje

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 sąrašė;
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.

Gytis Dačkevičius

Patvirtinta elektroniniu būdu

Dačkevičius, Gytis. Saulės šviesos energiją naudojančių įrenginių utilizavimo kaštų vertinimo tyrimas Lietuvoje. Magistro baigiamasis projektas / vadovė lekt. dr. Aistija Vaišnorienė; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: saulės šviesos energija, saulės moduliai, utilizavimas, perdirbimas, gyvavimo ciklas.

Kaunas, 2023. 64 p.

Santrauka

Saulės šviesos energiją naudojančių įrenginių plėtra Lietuvoje ir visame pasaulyje sparčiai didėja, siekiant sumažinti poveikį klimato kaitai. Tačiau esant tokiai didelei plėtrai, prognozuojamas didelis nebetinkamų eksploatavimui saulės modulių atliekų kiekis ateityje, kurias reikės utilizuoti arba perdirbti. Dabartiniai saulės modulių komponentų perdirbimo pajėgumai yra riboti dėl perdirbimo įmonių rinkų trūkumo bei nedidelės Vyriausybės finansinės paskatos, o tai lemia dideles utilizavimo išlaidas, todėl pirmieji eksploatavimui nebetinkami saulės moduliai atsiduria sąvartynuose. Baigiamajame darbe atliekamas standartinio monokristalinio ir stiklas/stiklas tipo saulės modulių viso gyvavimo ciklo sąnaudų vertinimo tyrimas Lietuvoje, apskaičiuojant bei įvertinant utilizavimo ir perdirbimo kaštus, tenkančius 1 kW saulės modulio galios. Naudojama apklausos analizės metodika siekiant išsiaiškinti buitinių vartotojų, įsirengusių saulės elektrinę, sąmoningumą aplinkos apsaugos aspektu bei įvertinti, kaip keičiasi vartotojams priimtinas atsipirkimo laikas vertinant utilizavimo kaštus. Atliekant ekonominį vertinimą apskaičiuojami grynosios dabartinės vertės (NPV), elektros energijos gamybos svertinių kaštų (LCOE), vidinės grąžos normos (IRR) bei atsipirkimo laiko (PBT) rodikliai kiekvienam saulės modulio tipui. Atliekama atsipirkimo laiko ir elektros energijos gamybos svertinių kaštų priklausomybės nuo utilizavimo kaštų bei atsipirkimo laiko priklausomybės nuo elektros energijos kainos augimo jautrumo analizė. Pagal gautus ekonominio vertinimo rezultatus atliekamas abiejų tipų saulės modulių palyginimas ir daroma išvada, kad stiklas/stiklas tipo saulės moduliai efektyvesni bei mažiau priklausomi nuo utilizavimo kaštų negu standartinio monokristalinio tipo saulės moduliai.

Dačkėvičius, Gytis. Assessment Research of Utilisation Costs of Solar Power Plants in Lithuania. Master's Final Degree Project / supervisor Lect. Dr. Aistija Vaišnorienė; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): power engineering, engineering science.

Keywords: solar light energy, solar modules, recovery, recycling, life cycle.

Kaunas, 2023. 64 p.

Summary

The development of solar energy installations in Lithuania and around the world is growing rapidly to reduce the impact of climate change. However, with such a large expansion, a large amount of waste solar modules that are no longer fit for use is expected to be disposed of or recycled in the future. Current recycling capacity for solar module components is limited due to a lack of markets for recycling companies and low financial incentives from the government, which leads to high recovery costs, resulting in the first end-of-life solar modules ending up in landfills. The final thesis is a study on the life cycle cost assessment of standard monocrystalline and glass/glass solar modules in Lithuania, calculating and estimating the recovery and recycling costs per 1 kW of solar module capacity. A survey analysis methodology is used to investigate the environmental awareness of household consumers who have installed a solar power plant and to assess how consumer acceptance of the payback time changes when assessing the cost of recycling. The economic evaluation calculates the Net Present Value (NPV), the Levelized Cost of Electricity (LCOE), the Internal Rate of Return (IRR) and the Payback Time (PBT) for each type of solar module. A sensitivity analysis of the dependence of the payback time and the weighted cost of electricity generation on the recovery cost and the dependence of the payback time on the increase in the price of electricity is carried out. Based on the results of the economic evaluation, a comparison is made between the two types of solar modules and it is concluded that glass/glass solar modules are more efficient and less dependent on recovery costs than standard monocrystalline solar modules.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	9
Įvadas.....	11
1. Apžvalginė dalis.....	13
1.1. Atsinaujinančių energijos šaltinių infrastruktūros padėtis ir plėtra Lietuvoje ir pasaulyje	13
1.2. Dabartiniai saulės šviesos energiją naudojančių įrenginių iššūkiai.....	15
1.3. Saulės modulių utilizavimo kainodaros apžvalga	17
1.4. Atlikti tyrimai ir studijos	18
1.5. Saulės šviesos energiją naudojančių įrenginių tipai	18
2. Metodinė dalis.....	24
2.1. Tyrimo objektas.....	24
2.2. Tyrimo metodika	24
2.2.1. Apklauso analizės metodika	28
2.2.2. Gyvavimo ciklo sąnaudų vertinimo metodika.....	28
2.3. Ekonominis vertinimas	33
3. Tiriamoji dalis.....	35
3.1. Saulės jėgainių plėtros prognozavimas Lietuvoje	35
3.2. Standartinio monokristalinio ir stiklas/stiklas tipo saulės modulių gyvavimo ciklo sąnaudų vertinimas	37
3.2.1. Žaliavų gavybos, gamybos, transportavimo, rangos darbų kaštai.....	37
3.2.2. Standartinio monokristalinio ir stiklas/stiklas tipo saulės modulių utilizavimo/perdirbimo kaštai	38
3.3. Apklausa	48
3.4. Ekonominis vertinimas.....	54
3.5. Apibendrinantis vertinimas	59
Išvados	60
Literatūros sąrašas	61
Priedai.....	65
1 priedas. SoliTek Standard 365 W saulės modulio techniniai dydžiai	65
2 priedas. SoliTek Solid Bifacial 360 W saulės modulio techniniai dydžiai	66
3 priedas. Standartinio monokristalinio tipo saulės modulio pinigų srautai be utilizavimo kaštų ..	67
.....	67
4 priedas. Standartinio monokristalinio tipo saulės modulio pinigų srautai su utilizavimo kaštais ..	70
.....	70
5 priedas. Stiklas/stiklas tipo saulės modulio pinigų srautai be utilizavimo kaštų.....	72
6 priedas. Stiklas/stiklas tipo saulės modulio pinigų srautai su utilizavimo kaštais	75

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Saulės elektrinių eksploatavimo nutraukimo sprendimo aspektai	16
2 lentelė. Saulės šviesos energiją naudojančių įrenginių apibendrinta apžvalga	18
3 lentelė. Monokristalinių ir polikristalinių saulės modulių palyginimas.....	23
4 lentelė. Saulės elektrinių duomenys pagal skirtingas galias	24
5 lentelė. Saulės modulio komponentų perdirbimo efektyvumas (2019 m.)	26
6 lentelė. Prognozuojami elektros energijos gamybos pajėgumai iš AEI (2018 m.)	35
7 lentelė. Saulės modulio žaliavų gavybos, transportavimo, gamybos, rangos darbų kaštai.....	38
8 lentelė. Saulės modulių transportavimo kaštai nuo surinkimo iki perdirbimo vietos.....	38
9 lentelė. Aliuminio rėmo ir varinių kabelių perdirbimo kaštai.....	39
10 lentelė. Stiklo perdirbimo duomenys	39
11 lentelė. Stiklo perdirbimo ir atskyrimo kaštai	39
12 lentelė. EVA, POE plėvelių perdirbimo ir galinio sluoksnio utilizavimo duomenys	40
13 lentelė. EVA, POE plėvelių perdirbimo ir galinio sluoksnio utilizavimo kaštai	40
14 lentelė. Standartinio monokristalinio tipo saulės modulio celių perdirbimo ir utilizavimo duomenys.....	41
15 lentelė. Stiklas/stiklas tipo saulės modulio celių perdirbimo ir utilizavimo duomenys.....	41
16 lentelė. Standartinio monokristalinio tipo saulės modulio celių perdirbimo ir utilizavimo kaštai	41
17 lentelė. Stiklas/stiklas tipo saulės modulio celių perdirbimo ir utilizavimo kaštai	42
18 lentelė. Saulės modulių komponentų tvirtinimo klijų utilizavimo kaštai	42
19 lentelė. Elektros energijos kainos sudedamosios dalys.....	43
20 lentelė. Standartinio monokristalinio tipo saulės modulio komponentų atskyrimo elektros energijos sąnaudos ir kaštai	43
21 lentelė. Stiklas/stiklas tipo saulės modulio komponentų atskyrimo elektros energijos sąnaudos ir kaštai.....	44
22 lentelė. Standartinio monokristalinio tipo saulės modulio utilizavimo ir perdirbimo etapų kaštai	44
23 lentelė. Stiklas/stiklas tipo saulės modulio utilizavimo ir perdirbimo etapų kaštai	45
24 lentelė. Standartinio monokristalinio tipo saulės modulio utilizavimo ir perdirbimo kaštai pagal galių ribas	47
25 lentelė. Stiklas/stiklas tipo saulės modulio utilizavimo ir perdirbimo kaštai pagal galių ribas ...	47
26 lentelė. Saulės modulių kaštai per visą LCA	47
27 lentelė. LCA kaštai prognozuojamiems saulės jėgainių pajėgumams Lietuvoje iki 2030 m.....	48
28 lentelė. 5 apklausos klausimo rezultatai pagal saulės modulio tipą.....	52
29 lentelė. Vartotojams priimtino atsipirkimo laiko procentinė išraiška pagal standartinio monokristalinio tipo saulės elektrinės galią.....	53
30 lentelė. Vartotojams priimtino atsipirkimo laiko procentinė išraiška pagal stiklas/stiklas tipo saulės elektrinės galią.....	54
31 lentelė. Standartinio monokristalinio tipo saulės modulio ekonominiai skaičiavimai be utilizavimo kaštų.....	55
32 lentelė. Stiklas/stiklas tipo saulės modulio ekonominiai skaičiavimai be utilizavimo kaštų.....	55
33 lentelė. Standartinio monokristalinio tipo saulės modulio ekonominiai skaičiavimai su utilizavimo kaštais	56
34 lentelė. Stiklas/stiklas tipo saulės modulio ekonominiai skaičiavimai su utilizavimo kaštais.....	56

Paveikslų sąrašas

1 pav. Atsinaujinančios elektros energijos gamybos padidėjimas pagal technologijas, 2019–2020 ir 2020–2021 m.	13
2 pav. Stiklas/stiklas tipo saulės modulio sandara	20
3 pav. Monokristalinio tipo saulės modulio sandara.....	20
4 pav. Monokristalinio tipo saulės modulio celių sandara.....	22
5 pav. Saulės modulio celių gamybos procesas	22
6 pav. Vidutinės saulės elektrinės įrengimo kainos dedamosios (2022 m.)	25
7 pav. Tyrimo algoritmas	27
8 pav. Produkto gyvavimo ciklo etapai.....	29
9 pav. Gyvavimo ciklo etapų tarpusavio ryšys	30
10 pav. LCA ir žiedinės ekonomikos tarpusavio ryšys.....	32
11 pav. Saulės modulių gyvavimo ciklo struktūra.....	33
12 pav. Prognozuojami elektros energijos gamybos pajėgumai iš saulės elektrinių 2023–2030 m. 36	
13 pav. Rinkos struktūra pagal suvartotą elektros energijos, pagamintos iš atsinaujinančių energijos išteklių, kiekį, proc. ir GWh (progozė) (2018 m.).....	37
14 pav. Standartinio monokristalinio tipo saulės modulio visų perdirbimo ir utilizavimo etapų procentinė kaštų diagrama	45
15 pav. Stiklas/stiklas tipo saulės modulio visų perdirbimo ir utilizavimo etapų procentinė kaštų diagrama	46
16 pav. 1 apklausos klausimo rezultatai.....	49
17 pav. 2 apklausos klausimo rezultatai.....	49
18 pav. 3 apklausos klausimo rezultatai.....	50
19 pav. 4 apklausos klausimo rezultatai.....	51
20 pav. 5 apklausos klausimo rezultatai.....	51
21 pav. 6 apklausos klausimo rezultatai.....	52
22 pav. Atsipirkimo laiko priklausomybė nuo utilizavimo kaštų	57
23 pav. Atsipirkimo laiko priklausomybė nuo elektros energijos kainos augimo	57
24 pav. LCOE priklausomybė nuo utilizavimo kaštų	58

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

AEI – atsinaujinantys energijos ištekliai;

CO₂ – anglies dioksidas;

EEĮ – elektros ir elektronikos įranga;

ES – Europos Sąjunga;

IRR (angl. Internal rate of return) – vidinė gražos norma;

ISO (angl. *International Organization for Standardization*) – tarptautinė standartizacijos organizacija;

LCA (angl. Life Cycle Assessment) – gyvavimo ciklo vertinimo metodika;

LCI (angl. Life Cycle Inventory) – gyvavimo ciklo inventorizacijos etapas;

LCIA (angl. Life Cycle Impact Assessment) – poveikio gyvavimo ciklui vertinimas;

LCOE (angl. Levelized Cost of Energy) – elektros energijos gamybos svertiniai kaštai;

NENS – Nacionalinė energetinės nepriklausomybės strategija;

NEKS – Nacionalinis energetikos ir klimato srities veiksmų planas;

NPV (angl. Net Present Value) – grynoji dabartinė vertė;

PBT (angl. Pay Back Time) – atsipirkimo laikotarpis;

PV (angl. Photovoltaics) – saulės energija;

ŠESD – šiltnamio efektą sukeliančios dujos;

ITRPV (angl. International Technology Roadmap for Photovoltaic) – tarptautinis fotovoltinių produktų technologijų planas;

APVA – aplinkos projektų valdymo agentūra.

Terminai:

Gyvavimo ciklo vertinimo metodika – poveikio aplinkai, susijusio su visais produkto, proceso ar paslaugos gyvavimo ciklo etapais, vertinimo metodika;

Atsinaujinančių išteklių energija – energija iš atsinaujinančių neiškastinių išteklių: vėjo, saulės energija, aplinkos energija, geoterminiai, hidroterminiai ištekliai ir vandenynų energija, hidroenergija, biomasė, biodujos, įskaitant sąvartynų ir nuotekų perdirbimo įrenginių dujas, taip pat kitų atsinaujinančių neiškastinių išteklių, kurių panaudojimas technologiškai yra galimas dabar arba bus galimas ateityje, energija;

Saulės modulis – energijos rūšies keitimo įtaisas, verčiantis saulės energiją ar kito šaltinio šviesą į elektros energiją;

Tarnavimo laikas – tarnavimo laikas apibrėžiamas kaip „visas gaminio naudojimo laikas nuo pardavimo vietos iki išmetimo taško“;

Grynoji dabartinė vertė – dabartinė visų pinigų srautų vertė, įskaitant ir pradinę investiciją;

Vidinė gražos norma – vidinė gražos norma apibrėžiama kaip diskonto norma, kuri sulygina išlaidų ir pajamų srautų dabartines vertes;

Atsipirkimo laikotarpis – tai laiko periodas, reikalingas pirminei investicijų vertei atstatyti;

Nacionalinė energetinės nepriklausomybės strategija – nacionalinėje energetinės nepriklausomybės strategijoje nustatoma Lietuvos energetikos sektoriaus vizija, jos įgyvendinimo principai, strateginės kryptys, tikslai ir uždaviniai;

Saulės šviesos energija – iš saulės šviesos tiesiogiai gaunama elektros energija.

Įvadas

Atsinaujinantys energijos išteklių yra sparčiai tobulinami visame pasaulyje. AEI plėtra ir efektyvus naudojimas yra vienas iš svarbiausių darnios nacionalinės energetikos strategijos tikslų, kurių įgyvendinimas mažina valstybių priklausomybę nuo iškastinio kuro importo, didina energijos tiekimo patikimumą ir mažina anglies dioksido dujų kiekį atmosferoje. Europos Komisija siekia, kad ES būtų lyderiaujanti pasaulyje pagal bendrą pirminės energijos suvartojimą ir beveik ketvirtadalį elektros energijos išgautų iš atsinaujinančių energijos šaltinių. Lietuva siekdama įgyvendinti ES energetikos ir klimato kaitos tikslus, Paryžiaus susitarimą dėl klimato kaitos ir naujas tendencijas energetikos rinkose didina atsinaujinančių energijos išteklių dalį Lietuvos vidaus energijos gamyboje ir galutiniame energijos suvartojimo balanse. Dėl šių tikslų įgyvendinimo yra mažinama priklausomybė nuo iškastinio kuro importo ir didinami šalies elektros energijos gamybos iš AEI pajėgumai. Viena iš šių tikslų įgyvendinimo priemonių yra finansinė paskata įsirengti saulės elektrines buitiniams vartotojams. Esant tokiai didelei bei greitai infrastruktūros plėtrai diegiant saulės modulius, numatomas didelis kompozitinių medžiagų kiekis pasibaigus šių įrenginių eksploatavimo laikui. Globali problema, su kuria teks susidurti netolimoje ateityje yra tai, kad eksploatacijai netinkamus saulės modulius reikės utilizuoti. Šiuo metu tokių įrenginių perdirbimo technologijos yra ribotos dėl perdirbimo įmonių rinkų trūkumo, o Vyriausybės finansinė paskata įmonėms investuoti į perdirbimą saulės energetikos srityje yra pernelyg maža. Dėl šios priežasties šiuo metu daugelis saulės šviesos energiją naudojančių įrenginių, pasibaigus eksploatavimo laikui, atsiduria sąvartynuose, nes perdirbimui tinkamų įrenginio sudedamųjų dalių utilizavimo išlaidos yra per daug didelės, o technologijos nėra pakankamai išstobulintos. Tačiau Europos Sąjungos reguliavimo tarnyba draudžia kaupti elektronines atliekas sąvartynuose, o prie jų priskiriami ir saulės fotomoduliai. Šios atliekos privalo būti perdirbamos arba utilizuojamos. Magistriniame darbe apžvelgiama atsinaujinančių energijos šaltinių infrastruktūros padėtis ir plėtra Lietuvoje ir pasaulyje, šiuos išteklius naudojančių įrenginių utilizavimo problematika, dabartinės perdirbimo galimybės, kainodara bei saulės šviesos energiją naudojančių įrenginių tipai. Apžvelgti jau atlikti tyrimai, tačiau dauguma Lietuvoje atliktų tyrimų yra koncentruoti tik į aplinkos apsaugos problematiką, susijusią su saulės moduliais, todėl utilizavimo kaštų analizės tyrimai yra ypač aktualūs. Taikant gyvavimo ciklo sąnaudų vertinimo metodiką atliekamas saulės šviesos energiją naudojančių įrenginių utilizavimo išlaidų vertinimo tyrimas Lietuvoje skirtingiems saulės modulių tipams, ekonominis bei vartotojų sąmoningumo aplinkosauginiu aspektu vertinimas.

Darbo tikslas – įvertinti saulės šviesos energiją naudojančių įrenginių utilizavimo kaštus skirtingiems saulės modulių tipams.

Darbo uždaviniai:

1. aptarti saulės šviesos energiją naudojančių įrenginių utilizavimo problematiką;
2. išanalizuoti įrenginių, naudojančių saulės šviesos energiją, utilizavimo galimybių bei kainodaros aspektus;
3. parengti saulės šviesos energiją naudojančių įrenginių atliekų utilizavimo išlaidų ir jų pokyčio įtakos atsipirkimo laikotarpiui tyrimo metodologiją;
4. atlikti skirtingų tipų saulės modulių utilizavimo kaštų palyginamąjį vertinimą per visą gyvavimo ciklą;
5. išanalizuoti buitinių vartotojų sąmoningumą aplinkos apsaugos aspektu bei utilizavimo kaštų poveikį vartotojams dėl atsipirkimo laiko;

6. įvertinti saulės šviesos energiją naudojančių įrenginių atliekų utilizavimo išlaidų įtaką atsipirkimo laikui ir LCOE dydžiui.

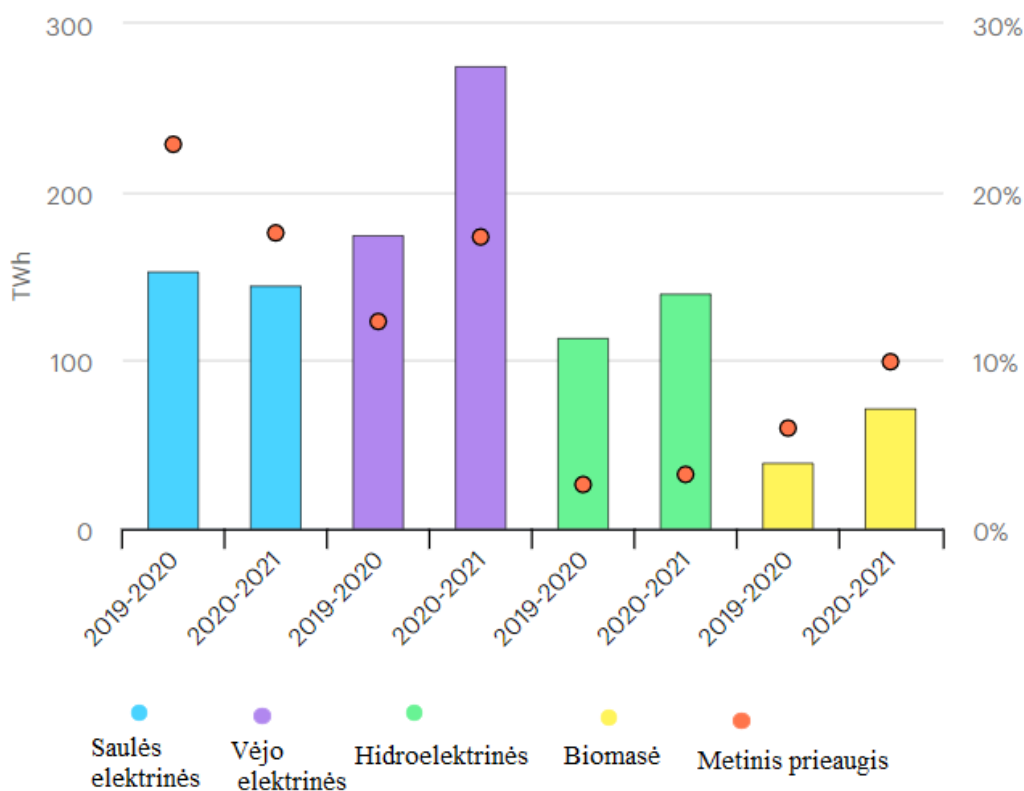
Tyrimo metodai: Magistrinio darbo tyrime naudojamos gyvavimo ciklo sąnaudų vertinimo ir apklausos metodikos. Taikant šias metodikas išanalizuojamos ir įvertinamos saulės modulių utilizavimo išlaidos, jų įtaka atsipirkimo laikotarpiui bei LCOE dydžiui. Atliekant ekonominį vertinimą apskaičiuojama grynoji dabartinė vertė (NPV), vidinė gražos norma (IRR), atsipirkimo laikotarpis (PBT) ir elektros energijos gamybos svertiniai kaštai (LCOE). Nustatoma utilizavimo kaštų įtaka atsipirkimo laikotarpiui vertinant visą saulės elektrinės gyvavimo ciklą. Atliekant apklausą vertinamas saulės jėgainės įsirengusių buitinių vartotojų sąmoningumas aplinkos apsaugos aspektu. Palyginami apklausos metu gauti duomenys su apskaičiuotais utilizavimo kaštais bei atsipirkimo laikotarpiu.

Magistrinio darbo struktūra: Magistro baigiamąjį darbą sudaro įvadas, apžvalginė, metodinė bei tiriamoji dalys, išvados ir priedai. Darbas susideda iš 76 puslapių, 34 lentelių, 24 paveikslų ir 6 priedų. Literatūros sąrašą sudaro 54 šaltiniai.

1. Apžvalginė dalis

1.1. Atsinaujinančių energijos šaltinių infrastruktūros padėtis ir plėtra Lietuvoje ir pasaulyje

Tarptautinėje bendruomenėje anglies dioksido mažinimas yra bendra problema, kelianti susirūpinimą. Šiuo metu daugelis pasaulio šalių yra išsikėlusios tikslą iki šio amžiaus vidurio pasiekti neutralų išmetamo anglies dioksido lygį. Šiuo požiūriu yra pripažįstama, kad anglies dioksido mažinimo būdai priklausys nuo sklandaus tvarios energetikos integravimo į sistemą bei paklausos ir pasiūlos valdymo strategijos. Šiam tikslui pasiekti Lietuvoje yra sudaromi savivaldybių planai, kuriuose yra nustatomos konkrečios AEI priemonės, kurios turės būti įgyvendintos. AEI plėtrai užtikrinti vyriausybės iškelti tikslai yra iki 2030 m. pasiekti, kad elektros energija, gauta iš AEI, sudarytų 50 % visos pagamintos elektros energijos. Šiuo metu Lietuvoje sunaudojamos elektros energijos dalis, gautos iš AEI, sudaro 25,47 % [1]. Reikia paminėti, kad energijos kiekis pasaulyje, gaunamas iš AEI, sudaro beveik 30 % (žr. 1 pav.).



1 pav. Atsinaujinančios elektros energijos gamybos padidėjimas pagal technologijas, 2019–2020 ir 2020–2021 m. [46]

Saulės energija yra vienas iš geriausių būdų AEI plėtrai, teigia „Solar energy utilisation: Current status and roll-out potential“ straipsnio autoriai [2]. Bendrai per metus gaunama saulės spinduliuotė Žemėje yra daugiau nei 7500 kartų didesnė negu bendras metinis pirminės energijos suvartojimas pasaulyje. Siekiant padidinti AEI plėtrą, siūloma saulės modulių technologijas integruoti į buitinius ir nebutinius pastatus, atsižvelgiant į šių modulių prieinamumą ir tvarumą. Tačiau plėtrą iš dalies stabdo tokie veiksniai kaip maža energijos talpa, neužtikrintas energijos tiekimo stabilumas ir saulės fotomodulių kaina.

Švarios energijos dokumentų paketas, priimtas Europos Komisijos 2019 m. pabaigoje, turėjo didelę įtaką daugeliui vykstančių pokyčių siekiant padidinti AEI plėtrą. Tai ir Europos žaliojo kurso skatinimas, sprendimas Europos investicijų bankui laipsniškai sumažinti iškastinio kuro finansavimą, taip pat peržiūrėti pagrindiniai Europos Sąjungos teisės aktai, skatinantys atsinaujinančių energijos išteklių plėtrą ir inovatyvias technologijas. Taip pat pastaraisiais metais sparčiai keitėsi požiūris į naujas technologijas bei jų kainas, socialinis požiūris į iškastinį kurą, naujos investicijos į energetikos infrastruktūrą. Svarbų vaidmenį tvarios energetikos infrastruktūros plėtrai taip pat turėjo ir COVID–19 pandemija, dėl kurios vyriausybės įsipareigojimas sumažinti pandemijos sukeltas ekonomines pasekmes paskatino investicijas į tvarią energetiką [3]. Vienas iš naujausių sprendimų, skatinančių investavimą į AEI, yra ES atsinaujinančios energetikos finansavimo mechanizmas (REFM), įsteigtas Europos komisijos ir veikiantis nuo 2021 m. sausio mėnesio pagal „Valdymo reglamentą“ [4], kuriuo siekiama sudaryti sąlygas ekonomiškai efektyviau diegti atsinaujinančios energetikos projektus visoje ES ir skatinti valstybių bendradarbiavimą norint pasiekti bendrus ES ir individualius valstybių tikslus tvarios energetikos požiūriu. Šiuo metu Europos klimato, infrastruktūros ir aplinkos vykdomoji agentūra (CINEA) [5] numato tris galimybes:

1. statistinis vienoje valstybėje pagamintos atsinaujinančios energijos perkėlimas į kitą;
2. kurti bendrus projektus;
3. galimybė valstybėms bendrai gauti naudos iš projektų, vykdomų skirtingose valstybėse.

Statistinį perdavimo pavyzdį reprezentuoja 2017 m. dvišalis susitarimas tarp Lietuvos ir Liuksemburgo, kuriuo susitarta, kad viena šalis padės kitai pasiekti 2020 m. AEI plėtros tikslus perkeliant tam tikrą atsinaujinančios energijos gamybos kiekį.

Geoterminė energija yra atsinaujinančios energijos forma, sukuriama elektros generatoriams panaudojant žemės šilumą. Geoterminės elektrinės naudoja šilumą giliai iš žemės, kad gamintų garą, iš kurio gaminama elektra. Šiluma surenkama keliais gręžiniais, išgręžtais vienos ar dviejų mylių gylyje į žemę, kad būtų galima pumpuoti garą arba karštą vandenį iš natūraliai susidarančių požeminių karšto vandens rezervuarų į paviršių. Geoterminės elektrinės yra vietose, kuriose yra karštųjų versmių, geizerių ar ugnikalnių aktyvumas, nes čia žemė yra ypač karšta tiesiai po paviršiumi. Geoterminiai šilumos siurbliai, kurie įsiurbia šilumą arčiau žemės paviršiaus, naudojami vandeniui arba visų tipų pastatams šildyti. 2020 metų duomenimis, bendra geoterminės energijos galia 2020 m. pasiekė 15,608 MW arba 8,3 % visos pagaminamos elektros energijos pasaulyje. Daugiausiai elektros energijos iš geoterminių šaltinių yra gaunama Jungtinėse Amerikos Valstijose, Indonezijoje ir Filipinuose [6].

Saulės energija yra gaunama tiesiogiai naudojant fotovoltinę energiją, netiesiogiai naudojant koncentruotą saulės energiją arba jų derinį. Koncentruotose saulės energijos sistemose naudojami lęšiai arba veidrodžiai ir sekimo sistemos, kad sufokusuotų didelę saulės spindulių sritį į mažą spindulį. Fotovoltiniai elementai paverčia šviesą elektros srove naudojant fotovoltinį efektą. 2020 m. duomenimis, elektros energijos gamyba iš saulės energijos sudarė 3,1 % visos pasaulyje pagaminamos elektros energijos arba iš viso buvo instaliuota 707,5 GW galios.

Hydroenergija sudaro didelę, šiuo metu naudojamą atsinaujinančios energijos, dalį. Pastaraisiais metais daugiau nei 16 % visos pasaulio elektros energijos buvo pagaminta iš hidroelektrinių, o hidroenergija sudarė net 70 % visos atsinaujinančios energijos, kuri buvo paversta elektra. Nors jos dalis sumažėjo dėl pažangių atsinaujinančios energijos technologijų plėtros, ji ir toliau išliks svarbia

atsinaujinančios energijos infrastruktūros dalimi. Bendroje energijos, gaunamos iš AEI panaudojimo schemoje taip pat kuriamos technologijos, skirtos elektros energijai gaminti iš kritulių, potvynių ir atoslūgių bei vandenyno bangų judėjimo. Kasdien tobulėjant naujoms technologijoms, komercinis šių energijos šaltinių naudojimas neatrodo nepasiekiamas.

2020 m. buvo geriausi metai pasaulinės vėjo pramonės istorijoje – įdiegta 93 GW naujos galios. Dėl technologijų naujovių ir ekonomikos masto, pasaulinė vėjo energetikos rinka per pastarąjį dešimtmetį išaugo beveik keturis kartus ir tapo vienu iš ekonomiškiausių ir atspariausių energijos šaltinių visame pasaulyje. 2020 m. rekordinį augimą lėmė didelė vėjo jėgainių plėtra Kinijoje ir JAV – dviejose didžiausiose pasaulyje vėjo energijos rinkose, kurios kartu 2020 m. įrengė beveik 75 % naujų vėjo elektrinių ir dabar tai sudaro daugiau nei pusę visos pasaulyje pagaminamos vėjo energijos. Šiuo metu visame pasaulyje yra instaliuota 743 GW vėjo jėgainių, o tai padeda išvengti daugiau nei 1,1 milijardo tonų CO₂ visame pasaulyje [7].

1.2. Dabartiniai saulės šviesos energiją naudojančių įrenginių iššūkiai

2020 m. pasaulinė instaliuota saulės elektrinių galia siekė 707,5 GW. Atsižvelgiant į vidutinį 25 metų saulės modulio eksploataavimo laiką, numatoma, kad pasaulyje nebenaudojamų saulės modulių atliekos padidės 4–14 % arba iki 24 mln. tonų iki 2030 m., o iki 2050 m. padidės iki daugiau nei 80 % (apie 78 mln. tonų). Ateityje šios apimtys tik didės dėl sparčios saulės energijos plėtros visose pasaulio šalyse. Todėl saulės modulių utilizavimas ateinančiais dešimtmečiais taps aktualia aplinkos apsaugos problema. Dėl šios priežasties vis daugiau dėmesio bus skiriama šios problemos sprendimų ieškojimui, o tai paskatins atidžiai ištirti saulės fotomodulių utilizavimo ir perdirbimo aspektus. ES pradėjo taikyti fotovoltinių elektroninių atliekų reglamentus, įskaitant specifinius fotovoltinės energijos surinkimo, panaudojimo ir perdirbimo tikslus. ES Elektros ir elektroninės įrangos atliekų (toliau – EEĮ) atliekų direktyva įpareigoja visus gamintojus, tiekiančius saulės modulių plokštes ES rinkai, finansuoti šių įrenginių surinkimo ir perdirbimo Europoje išlaidas. Galima pasimokyti iš ES dalyvavimo formuojant reguliavimo sistemą, kuri padėtų kitoms šalims plėtoti vietos požiūriu tinkamus metodus [12].

Naudotų ar sugedusių saulės modulių pramoninio perdirbimo pajėgumai šiuo metu yra riboti ir atstovaujami tik Čekijos įmonės „Retina“, kelių „First Solar“ gamyklų JAV, Vokietijoje ir Malaizijoje, „Toshiba Environmental Solutions“ ir naujos „Veolia“ gamyklos Prancūzijoje. Teisės aktų leidybos lygmeniu saulės kolektorių surinkimo ir apdorojimo taisyklės EEĮ atliekų direktyvoje (Direktyva 2012/19/ES) nustatė tik ES. Šalys, turinčios pažengusią saulės energetikos infrastruktūrą, pavyzdžiui, Pietų Korėja, Japonija bei JAV, aktyviai sprendžia saulės energijos atliekų perdirbimo organizavimo problemą, o kitose, įskaitant Kiniją, dar tik ieškoma šios problemos sprendimo būdų [10].

Saulės elektrinių plėtra Lietuvoje yra akivaizdi. 2020 m. bendra instaliuota saulės elektrinių galia Lietuvoje siekė 103 MW, o iki 2023 m. išaugo 469 MW ir iš viso sudaro 572 MW galios. NEKS plane teigiama, kad Lietuvoje iki 2030 m. planuojama instaliuota saulės elektrinių galia turėtų pasiekti 1346 MW. Saulės elektrinių įsirengimą būtiniams vartotojams taip pat skatina ir didėjančios elektros energijos kainos bei valstybės teikiama parama. Tačiau dėl tokios didelės plėtros prognozuojami dideli saulės modulių atliekų kiekiai, pasibaigus jų eksploataavimo laikui. Pagal savo sudėtį saulės moduliai yra vertinami kaip specifinės stambiagabaritės atliekos. Šių atliekų tvarkymo reikalavimai Lietuvoje yra numatyti Elektros ir elektroninės įrangos bei jos atliekų tvarkymo taisyklese [8]. Saulės

moduliuose yra daug vertingų medžiagų, kurios gali būti perdirbamos ir panaudojamos kaip antrinės žaliavos. Tačiau šiuo metu tokių atliekų perdirbimas yra brangesnis procesas negu naudojimas naujų, išgautų iš pirminių šaltinių. Saulės modulių perdirbimo bei utilizavimo paslaugas teikiančių įmonių Lietuvoje šiuo metu beveik nėra. O tokias paslaugas teikiančios įmonės šiuo metu eksploatavimui netinkamus pirmuosius saulės modulius dažniausiai sandėliuoja [9].

Saulės moduliuose yra švino, kadmio ir daugelio kitų kenksmingų cheminių medžiagų. Iki šiol labiausiai paplitusi saulės modulių apdorojimo technologija išlieka jų šalinimas sąvartynuose. Tačiau tai gali būti gana pavojinga, nes kenksmingos cheminės medžiagos gali nutekėti į žemę ir užteršti geriamąjį vandenį. Deginimas taip pat taikomas saulės modulių šalinimui, kaip ir paprastoms komunalinėms atliekoms. Verta paminėti, kad deginant visų rūšių elektronines atliekas, įskaitant saulės modulius, į atmosferą gali patekti toksiškų sunkiųjų metalų. Taip pat žinoma, kad kai kurios saulės modulių sudedamosios medžiagos yra linkusios kauptis, kai patenka į atmosferą. Tai gali sukelti ilgalaikį neigiamą ekologinį poveikį. Deginimas taip pat panaikina galimybę atgauti žaliavas. Vienintelis šio metodo privalumas yra tas, kad saulės modulių nereikia atskirti nuo kitų komercinių ar pramoninių atliekų.

1 lentelėje (žr. 1 lentelę) pateikiami sprendimai, kurie turi būti priimti pasibaigus saulės modulių eksploatavimo laikui ir klausimų, svarstomų kiekvienam sprendimui, pavyzdžiai. Sprendimų kriterijai yra šie: kaina, techninis įgyvendinamumas, teisės aktai ir poveikis aplinkai. Prieš utilizuojant saulės modulius turi būti priimamas sprendimas, ar jie vis dar yra efektyvūs ir gali būti naudojami toliau, ar eksploatacija turi būti nutraukiama. Jei, atlikus sprendimą pagal visus vertinimo kriterijus pasirenkamas eksploatacijos nutraukimas, yra sprendžiama, kuriuos saulės modulių komponentus galima perdirbti, o kuriuos reikia utilizuoti.

1 lentelė. Saulės elektrinių eksploatavimo nutraukimo sprendimo aspektai (sudaryta autoriaus)

Sprendimai	Ekonominiai	Techninės galimybės	Teisės aktai	Įtaka aplinkai
Eksploatacija nutraukiama AR Naudojimas tęsiamas?	Ar finansiškai apsimoka tęsti saulės elektrinės naudojimą?	Kokia yra saulės modulių būklė?	Ar įmanoma tęsti saulės elektrinės eksploatavimą ten, kur ji įrengta?	Koks yra aplinkos poveikis jeigu eksploatavimas yra tęsiamas lyginant su eksploatavimo nutraukimu?
Naudojama pakartotinai AR Eksploatacija nutraukiama?	Ar saulės modulio komponentai gali būti perdirbami?	Kokia yra saulės modulių būklė?	Ar yra teisės aktai, draudžiantys pakartotinį panaudojimą?	Koks yra galimas poveikis aplinkai jeigu saulės modulių eksploatavimas yra pratęsiamas perdirbant?
Perdirbimas AR Šalinimas?	Kokie mokesčiai taikomi norint išmesti į sąvartyną? Kokia yra saulės modulio perdirbtų medžiagų vertė?	Ar įmanoma perdirbti medžiagas išlaikant jų vertingąsias savybes ir jas pritaikyti kitoms funkcijoms?	Ar yra teisės aktai, draudžiantys šalinti sąvartynuose? Ar yra teisės aktų, reglamentuojančių perdirbtų saulės modulių medžiagų naudojimą tikslinei paskirčiai?	Kokia galima saulės modulių nauda ir poveikis aplinkai lyginant jų perdirbimą ir šalinimą?

Tyrimų, susijusių su saulės sistemų eksploatavimo nutraukimo sąnaudomis, yra nedaug. Tačiau „Nyserda“ (2020) apskaičiavo, kad 2 MW antžeminės saulės kolektorių sistemos eksploatavimo nutraukimas kainuoja maždaug 55 tūkst. Eur, t. y. 27,5 tūkst. Eur už MW. Saulės jėgainių utilizavimo išlaidos skiriasi priklausomai nuo tokių veiksnių kaip tipas, dydis ir vieta [13].

1.3. Saulės modulių utilizavimo kainodaros apžvalga

Dabartiniai pramonės pajėgumai yra visiškai nepasirengę atliekų kiekiui, kuris yra numatomas dėl vis labiau tobulinamos atsinaujinančios energetikos. Finansinė paskata investuoti į perdirbimą saulės energetikos srityje niekada nebuvo labai stipri. Nors saulės moduluose yra nedidelis kiekis vertingų medžiagų, tokių kaip sidabras, jos dažniausiai gaminamos iš stiklo – itin menkos medžiagos. Ilgas saulės modulių eksploatavimo laikas taip pat atgraso nuo naujovių šioje srityje.

„First Solar“ yra JAV saulės modulių gamintojas, taip pat vykdomas ir saulės modulių perdirbimą, kuris taikomas tik pačios bendrovės produktams. Per metus „First Solar“ perdirba apie 2 mln. saulės modulių. Pagal dabartines galimybes, vienos plokštės perdirbimas kainuoja apie 18–27 Eur. To paties saulės modulio išmetimas sąvartyne kainuotų tik 0,90–1,8 Eur [11].

Tiesioginės perdirbimo išlaidos yra tik viena eksploatavimo pabaigos dalis. Saulės moduliai yra subtili, didelių gabaritų įranga, paprastai montuojama ant stogų gyvenamuosiuose kvartaluose. Norint juos nuimti, reikalingas specializuotas darbas, kad jie nesudužtų į skeveldras prieš patekdami į sunkvežimį. Be to, kai kurios vyriausybės saulės fotomodulius gali priskirti pavojingoms atliekoms, nes jose yra nedidelis sunkiųjų metalų (kadmio, švino) kiekis. Ši klasifikacija apima daugybę brangių apribojimų – pavojingas atliekas galima vežti tik nustatytu laiku ir pasirinktais maršrutais.

Šių nenumatytų išlaidų visuma gali sugriauti pramonės konkurencingumą. Lyginant numatomą produkcijos augimą ateityje ir logistikos augimo kreivę, iki 2050 m. apribotą 700 GW (NREL numatomos ribos JAV gyvenamųjų namų rinkoje), kartu su perdirbimo kreivėmis, tikėtina, kad iki 2031 m. atliekų kiekis viršys naujų įrenginių kiekį. 2035 m. išmesti saulės moduliai 2,56 karto viršytų naujų parduotų vienetų kiekį. Saulės šviesos energetikos ekonomika – tokia ryški iš 2021 m. perspektyvos greitai aptemtų, nes pramonę gali labai stipriai paveikti įrenginių utilizavimo problema.

Beveik neabejotinai reguliavimo institucijos turės nuspręsti, kas padengs utilizavimo išlaidas. Kadangi per ateinančius kelerius metus atliekos iš saulės šviesos energiją naudojančių įrenginių kaupiasi, JAV vyriausybė, pradėdant nuo valstijų bei išaugant iki federalinio lygio, įves saulės elektrinių perdirbimo teisės aktus. Tikėtina, kad būsiami JAV reglamentai bus taikomi pagal Europos Sąjungos EEĮ atliekų direktyvos modelį – elektroninių atliekų perdirbimo ir šalinimo visose ES valstybėse narėse teisinę sistemą. JAV valstijos, priėmusios elektronikos perdirbimo teisės aktus, dažniausiai atsisako EEĮ atliekų modelio. ES atsakomybė už praeities atliekų perdirbimą buvo paskirstyta gamintojams, atsižvelgiant į dabartinę rinkos dalį.

Tačiau visų pirma reikia sukurti reikiamus saulės modulių perdirbimo pajėgumus, nes tai yra visapusiškas eksploatavimo pabaigos infrastruktūros dalis, apimanti utilizavimą, transportavimą ir tinkamas saulės energijos atliekų saugyklas. Jei net pačios optimistiškiausios išankstinės perdirbimo prognozės yra tikslios, įmonėms gali neužtekti laiko tai padaryti vienoms. Vyriausybės subsidijos yra bene vienintelis būdas greitai sukurti pajėgumus, atitinkančius gresiančios atliekų problemos mastą. Įmonių vadovai gali įtikinamai pagrįsti vyriausybės įsikišimą, sutelkdami dėmesį į idėją, kad atliekos yra neigiamas greitų naujovių, reikalingų norint plačiai pritaikyti naujas energetikos technologijas,

pvz., saulės energiją, išorinis poveikis. Todėl saulės energijos infrastruktūros sukūrimo išlaidos yra neatsiejama mokslinių tyrimų ir plėtros paketo, kuris yra kartu su žaliosios energijos rėmimu, dalis [11].

1.4. Atlikti tyrimai ir studijos

Saulės modulių techninis eksploatavimo laikas yra praktiškai 20–30 metų, o ateinančiais metais pirmieji pradėti eksploatuoti saulės moduliai taps EEĮ atliekomis, nes 1990–aisiais buvo pradėtas platus saulės elektrinių įrengimas. Numatoma, kad iki 2050–ųjų nebenaudojamų saulės modulių masė pasieks 78 mln. tonų. Todėl būtina sukurti perdirbimo technologijas, kurios sumažintų šių atliekų kiekį. Buvo nustatyti daugiau nei 128 patentai, susiję su saulės modulių perdirbimu, ir buvo atlikti keli tyrimai šioje srityje, atsižvelgiant į vis didėjantį šios srities aktualumą. Valeria Fiandra ir kiti mokslininkai pristatė ir aptarė nebenaudojamų saulės modulių valdymą, pagrįstą pažangiu bei ekologiškai tvariu procesu [13]. Ewa Klugmann–Radziemska savo straipsnyje aptarė pagrindinius rezultatus ir analizavo perdirbimo reikšmę, atsižvelgiant į fotovoltinių elementų ir modulių gamybos aplinkos profilį ir visą gyvavimo ciklą [14]. G. Granata kartu su kitais mokslininkais tyrė polikristalinio silicio, amorfinio silicio fotovoltinių plokščių perdirbimą, nagrinėdami du alternatyvius būdus, sudarytus iš fizinių operacijų [15]. Cynthia E.L. Latunussa ir kiti mokslininkai pateikė išsamų tyrimą apie silicio fotovoltinių modulių eksploatavimo pabaigos etapą [16]. Dávidas Strachala ir kiti nagrinėjo fotovoltinių modulių perdirbimo būdus ir įvertino perdirbimo indėlį į aplinką bei žaliavų gavybos mažinimą [17]. Idiano D'Adamo ir kiti ištyrė finansinį pagrindumą kristalinio silicio (Si) saulės elementų perdirbimo procesams [18]. K. Hamouda ir kt. sukūrė fotovoltinių modulių regeneravimo ir perdirbimo programą, kurioje svarstoma, kaip sumažinti perdirbimo išlaidas ir perdirbimo proceso poveikį aplinkai [19]. Yang Xu ir kt. aptarė fotovoltinių modulių atliekų pagrindą, priežastis ir pagrindinį apdorojimo būdą [20]. Ornella Malandrino ir kt. atliko pagrindinių techninių, ekonominių ir aplinkos apsaugos pasekmių, susijusių su fotovoltinės energijos gamyba, apžvalgą, daugiausiai dėmesio sutelkdami į Europą ir Italiją [21]. Sina Herceg ir kt. savo tyrime pasiūlė išsamesnę pagrindinių rinkoje esančių fotovoltinių technologijų naudojimo pabaigos metodų analizę [22]. Sigrid Kusch–Brandt ir kt., atskleidė artėjančią atliekų problemą, kai PV plokštės pasiekia savo eksploatavimo pabaigos etapą [23].

2 lentelė. Saulės šviesos energiją naudojančių įrenginių apibendrinta apžvalga

AEI technologija	Įdiegta galia pasaulyje, GW	Įdiegta galia Lietuvoje, MW	Atliekų kiekis pasaulyje, t	Atliekų kiekis Lietuvoje, t	Eksploatavimo trukmė, metai	Utilizavimo kaštai, Eur
Saulės energija	707,5	103	24 000 000	3500	25	18–27 (vienam moduliui)

Pastaba. Informacijos šaltiniai yra skirtingi, duomenys 2020 m.

1.5. Saulės šviesos energiją naudojančių įrenginių tipai

AEI plėtra, aplinkos apsaugos problemos bei saulės modulių efektyvumas paskatino greitą šios pramonės šakos plėtrą. Fotovoltinės sistemos šiuo metu naudojamos automobiliuose, komerciniuose pastatuose, elektros tinklų papildymui ar gyvenamųjų namų elektros poreikių patenkinimui. Vis labiau didėjanti paklausa taip pat skatino ir šios technologijos tobulėjimą, siekiant padidinti efektyvumą ar sumažinti gamybos kaštus, nenaudojant brangių medžiagų, tokių kaip silicis ar sidabras. Pagal tipą saulės moduliai yra skirstomi į standartinius ir stiklas/stiklas.

Stiklas/stiklas saulės modulių dizainas – tai technologija, kai vietoj tradicinių polimerinių galinių plokščių modulių galinėje dalyje naudojamas stiklo sluoksnis. Polimerinės plokštės buvo sunkios ir brangios, todėl seniau didžiąją rinkos dalį užėmė lengvesni polimeriniai pagrindo lakštai. Tačiau, nepaisant šių trūkumų, ITRPV prognozuoja, kad iki 2029 m. rinkos dalis padidės apie 30 %. Tai grindžiama dvipusių modulių rinkos dalies padidėjimu ir padidėjusiu komunalinio masto fotovoltinių modulių diegimu, kai pirmenybė teikiama patvaresnėms modulių konstrukcijoms, pavyzdžiui, stiklas/stiklas [36].

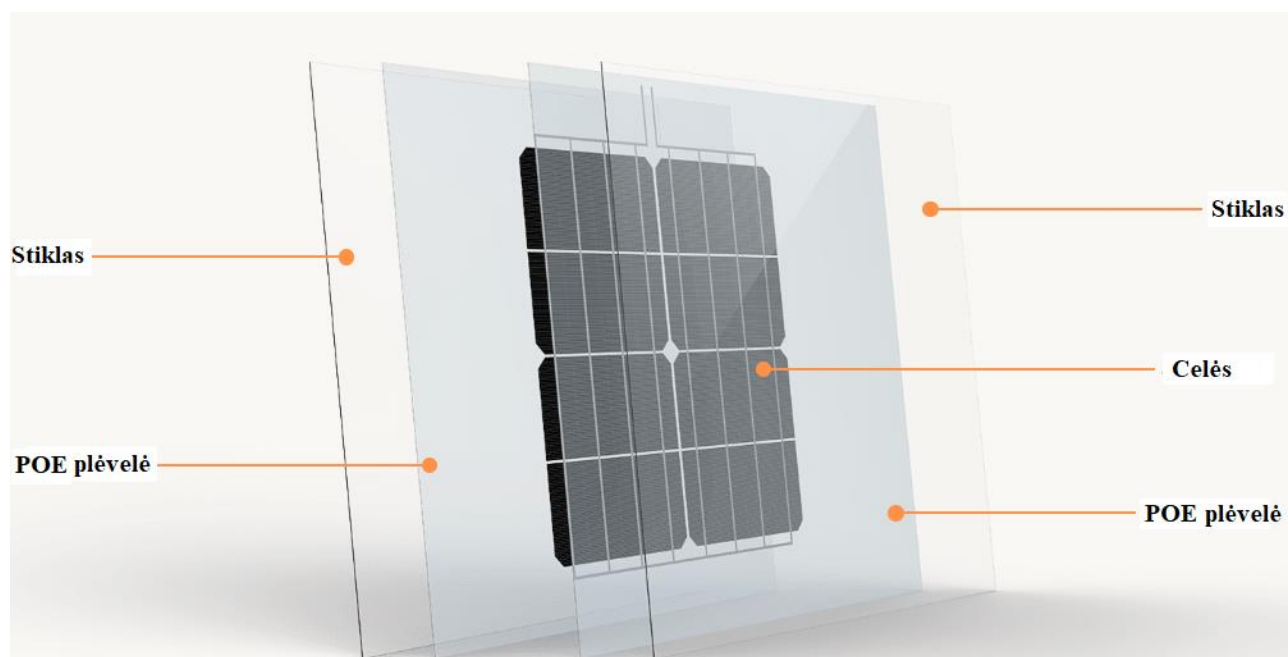
Stiklas/stiklas saulės moduliai dalinasi rinka su standartiniais monokristaliniais saulės moduliais ir yra vis dažniau naudojama technologija energiją gaminančiuose pastatuose. Dvigubo stiklo moduliai pasižymi didesniu patikimumu, ypač komunalinio masto fotovoltiniuose projektuose. Jie yra atsparesni aukštesnei temperatūrai, drėgmei ir UV spinduliams bei pasižymi geresniu mechaniniu stabilumu, todėl mažėja mikrotrūkumų rizika montuojant ir eksploatuojant. Tai ypač svarbu komunalinio masto fotovoltiniuose objektuose ir atsižvelgiant į numatomą saulės modulių eksploatavimo trukmę. Dėl didesnio stiklas/stiklas modulių konstrukcijos patikimumo tikimasi, kad jų efektyvumas sumažės tik 0,45 % per metus, lyginant su standartiniais saulės moduliais, kurių degradacija siekia apytiksliai 0,7 % per metus. Todėl tikimasi, kad per 30 metų tarnavimo laiką šie moduliai vis dar veiks 85 % pradinio pajėgumo.

Stiklas/stiklas modulių svoris vis dar yra problema: dabartiniuose projektuose, kai įreminiems moduliams iš abiejų pusių naudojamas 2 mm storio stiklas, jų svoris yra apie 22 kg, o 2,5 mm storio stiklas iš abiejų pusių padidina modulio svorį iki 23 kg. Lyginant su standartiniais moduliais, kurie sveria apie 18 kg, stiklas/stiklas modulių svoris yra apie 20 % didesnis. Nors nėra stiklo storio standarto, apskritai labai plono grūdinto stiklo gamyba yra sudėtingesnis ir brangesnis procesas. Tačiau 2,5 mm storio stiklas leidžia kurti berėmius modelius, o tai gali labai sumažinti sąnaudas [37]. Dažniausiai stiklas/stiklas tipo saulės moduliai yra dvipusio veikimo ir vadinami „Bifacial“. Stiklas/stiklas saulės modulis yra sudarytas iš dviejų stiklo sluoksnių, celių bei POE plėvelės tarp stiklo ir celių. Šio modulio sandara grafiškai pavaizduota 2 paveiksle (žr. 2 pav.). POE plėvelė yra gaminama iš polietileno bei naudojama kaip hermetizuojanti medžiaga stiklas/stiklas saulės moduliuose dėl didelio atsparumo drėgmei. POE nuo EVA plėvelės, naudojamos standartiniuose moduliuose skiriasi tuom, kad jos gamybos metu nenaudojama acto rūgštis. Du stiklo sluoksniai bendrai sudaro 88,06 %, celės 3,48 %, POE plėvelė 6,55 %, variniai kabeliai 0,75 %, o klėjai, naudojami saulės modulio komponentų tvirtinimui 1,16 % viso saulės modulio svorio [40].

Skirtingai nuo tradicinių saulės modulių, kurių celės gali naudoti tik saulės šviesą, krintančią į priekinę modulio dalį, dvipusio veikimo saulės moduliuose naudojamos labai efektyvios dvigubos N tipo silicio celės, kurios gali generuoti elektros energiją iš saulės šviesos, krintančios tiek į priekinę, tiek į galinę saulės modulio dalį. Tokiu būdu efektyvumas gali padidėti iki 35 %. Daugumoje saulės modulių didelė dalis šviesos, išsklaidytos nuo debesų, žemės, aplinkinių pastatų ar stogų, patenka į galinę pusę. Tradiciniuose moduliuose ši atspindėta saulės šviesa nėra verčiama į elektros energiją ir tik prideda nenaudingos šilumos, taip sumažindama modulio efektyvumą [35].

Standartiniai saulės moduliai pagal gamybos technologiją yra skirstomi į polikristalinius ir monokristalinius. Iki šiol labiausiai paplitusi saulės modulių technologija tarp buitinių vartotojų buvo polikristaliniai saulės moduliai. Pagrinde tai buvo dėl to, kad ši technologija buvo pigesnė nei monokristalinių saulės modulių. Tačiau dėl kainos skirtumo mažėjimo ir technologinės pažangos, šiuo metu vis didesnę rinkos dalį užima monokristaliniai saulės moduliai, todėl didžioji dalis ES, JAV

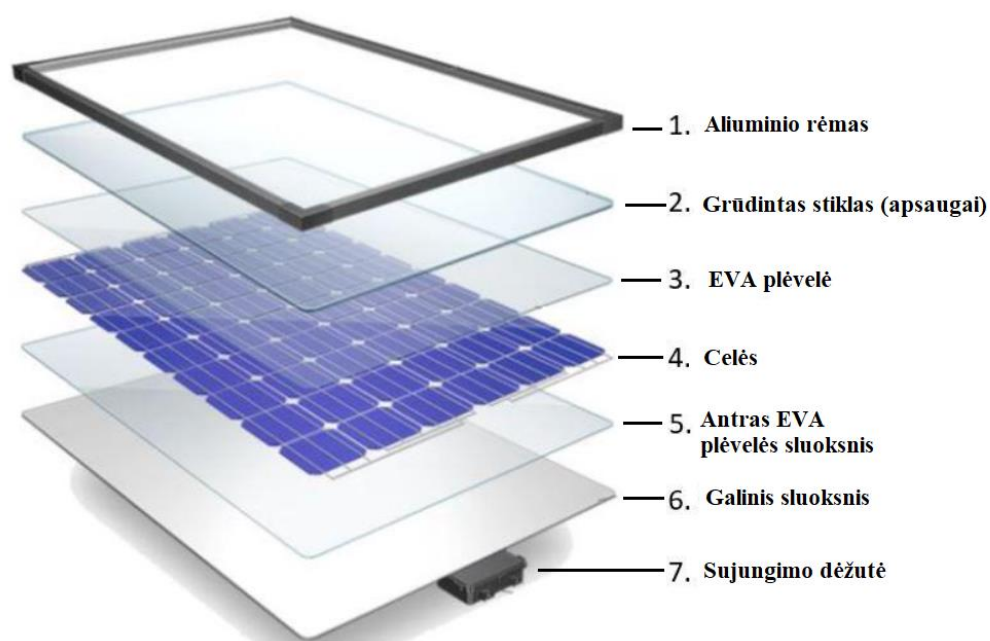
bei tuo tarpu ir Lietuvoje montuojamų saulės elektrinių yra sudarytos iš monokristalinių saulės modulių.



2 pav. Stiklas/stiklas tipo saulės modulio sandara [47]

Monokristaliniai saulės moduliai yra sudaryti iš šešių pagrindinių komponentų, kurie grafiškai pavaizduoti 3 paveiksle (žr. 3 pav.):

1. aliuminio rėmas;
2. grūdintas stiklas, skirtas apsaugoti celes, nuo 3 iki 3,5 mm storio;
3. EVA plėvelės sluoksniai;
4. celės;
5. polimerinis galinis sluoksnis;
6. jungiamoji dėžutė – diodai ir jungtys.



3 pav. Monokristalinio tipo saulės modulio sandara [31]

Monokristalinio tipo saulės modulio aliuminio rėmas sudaro 10,3 %, stiklas 74,16 %, celės 3,48 %, EVA plėvelės sluoksniai 6,55 %, galinis sluoksnis 3,6 %, variniai kabeliai 0,75 %, o klijai 1,16 % viso saulės modulio svorio.

Aliuminio rėmas yra svarbi saulės modulio sudedamoji dalis, nes apsaugo laminato sekciją, kurioje yra celės, modulio kraštus ir taip pat yra tvirta konstrukcija saulės kolektoriui pritvirtinti. Šie aliuminio rėmai suprojektuoti taip, kad būtų itin lengvi, standūs ir atlaikytų ekstremalią apkrovą ir krūvį, kurį sukelia stiprus vėjas ir išorinės jėgos.

Priekinio stiklo pagrindinė funkcija yra apsaugoti celes nuo oro sąlygų. Stiklas paprastai yra didelio atsparumo, grūdintas 3,0–4,0 mm storio, atsparus mechaninėms apkrovoms ir ekstremaliems temperatūros pokyčiams. Siekiant pagerinti efektyvumą ir našumą, dauguma gamintojų naudoja didelio pralaidumo stiklą, kuriame yra labai mažas geležies kiekis, o galinė stiklo pusė padengta antirefleksine danga, kuri sumažina nuostolius ir pagerina šviesos pralaidumą.

EVA reiškia „etileno vinilacetatą“ – tai specialiai sukurtas polimerinis labai skaidrus (plastikinis) sluoksnis, naudojamas celėms apgaubti ir išlaikyti jų padėtį gamybos metu. EVA medžiaga turi būti itin patvari ir atspari ekstremalioms temperatūroms ir drėgmei, ji svarbi ilgalaikiam veikimui, nes apsaugo nuo drėgmės ir purvo patekimo.

Galinis sluoksnis – tai galinis įprastų saulės modulių sluoksnis, kuris yra drėgmės barjeras ir galutinė išorinė danga, užtikrinanti mechaninę apsaugą ir elektros izoliaciją. Galinio sluoksnio medžiaga gaminama iš įvairių polimerų arba plastikų, įskaitant PP, PET ir PVF, kurie pasižymi skirtingu apsaugos lygiu, šiluminiu stabilumu ir ilgalaikiu atsparumu UV spinduliams.

Saulės kolektoriuose naudojamos celės, kurios yra gaminamos iš silicio kristalų plokštelių, kurios panašios į plokšteles, naudojamas kompiuterių procesoriuose. Silicio plokštelės gali būti polikristalinės arba monokristalinės ir gaminamos keliais skirtingais gamybos būdais. Efektyviausias ir daugiausiai naudojamas tipas yra monokristalinės, kurios gaminamos naudojant Čochralskio procesą. Šis gamybos procesas reikalauja daugiau energijos, palyginti su polikristaliniais, todėl jų gamyba yra brangesnė.

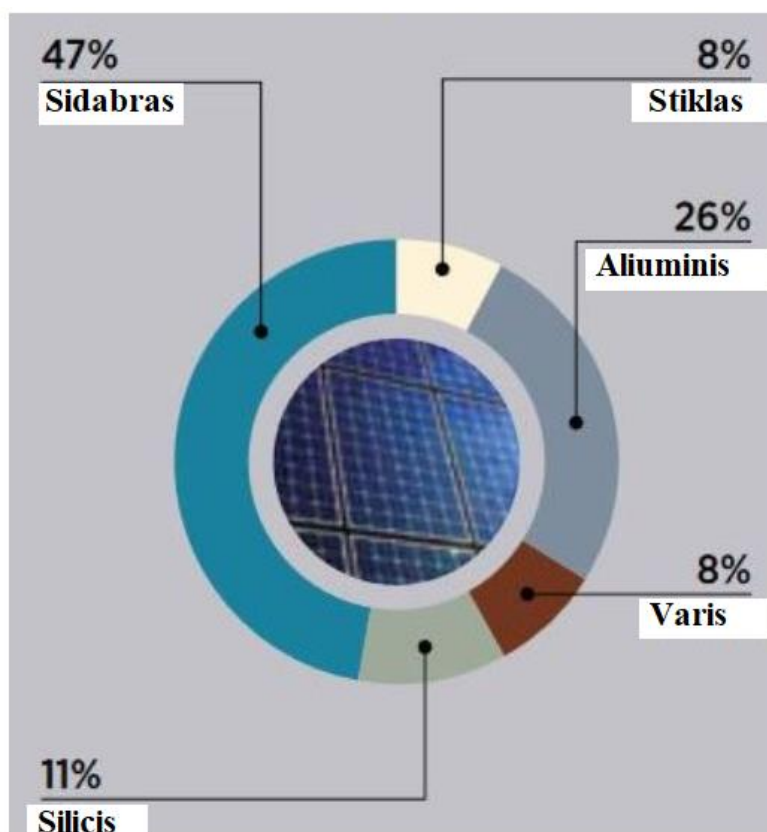
Norint iširti saulės modulių utilizavimo kaštus, būtina žinoti, iš ko šie moduliai gaminami. Dauguma buitinių vartotojų yra įsirengę saulės modulius, kurie yra sudaryti iš 60 monokristalinių celių, sujungtų nuosekliomis šynomis. Didesniuose saulės kolektoriuose, naudojamuose komercinėse sistemose ir komunalinio naudojimo saulės energijos ūkiuose, yra 72 ar daugiau celės.

Saulės modulio celės pagrinde yra sudarytos iš aliuminio, silicio, plieno ir stiklo. Taip pat tarp sudedamųjų medžiagų yra ir sidabro bei vario. Kaip matoma 4 paveiksle (žr. 4 pav.), celės sudarytos iš 8 % stiklo, 8 % vario, 11 % silicio, 26 % aliuminio ir 47 % sidabro.

Gaminant įprastas silicio pagrindu pagamintas saulės modulių celes, reikia atlikti keletą skirtingų procesų, pradedant nuo žaliavos, vadinamos kvarcitu, kuris yra kvarcinio smiltainio uoliena. Pirmiausia, kvarcinis smėlis paverčiamas metalurginės kokybės siliciu, jungiant anglį ir kvarcitą lankinėje krosnyje. Šis procesas vyksta labai aukštoje temperatūroje ir jo metu išgaunamas 99 % grynas silicis. Kitas žingsnis – metalurginės kokybės silicis paverčiamas grynu polistireniniu siliciu, naudojant cheminį gryninimo procesą.

Po to polisilicis legiruojamas nedideliais kiekiais boro arba fosforo, kad taptų P arba N tipo siliciu. Šiame etape polikristalinis silicis gali būti išlydytas ir išlietas į didelius stačiakampius blokus ir plonai supjaustytas deimantinės vielos pjovimo metodu, kad būtų pagamintos polikristalinės arba daugiakristalinės plokštelės.

Norint pagaminti efektyvesnes monokristalines plokšteles arba celes, legiruotą silicį galima paversti grynu kietojo kristalo luitu naudojant Čochralskio procesą. Šio proceso metu polikristalinis silicis lydomas aukštame slėgyje ir temperatūroje, kad būtų išgaunamas vienas didelis monokristalinis kristalas, vadinamas luitu [31]. Aprašytas celių gamybos procesas pavaizduotas 5 paveiksle (žr. 5 pav.).



4 pav. Monokristalinio tipo saulės modulio celių sandara [48]



5 pav. Saulės modulio celių gamybos procesas [31]

Polikristaliniai saulės moduliai, kaip ir monokristaliniai, taip pat gaminami iš silicio. Tačiau vietoje vieno silicio kristalo gamintojai išlydo daugybę silicio fragmentų ir taip suformuoja plokšteles, iš kurių gaminama viena plokštė. Polikristaliniai saulės elementai dar vadinami „daugiakristaliniais“ arba daug kristalų turinčiais silicio elementais.

Polikristalinių saulės kolektorių efektyvumas paprastai būna mažesnis nei monokristalinių elementų, nes kiekviename elemente yra daug daugiau kristalų, o tai reiškia, kad elektronai turi mažiau laisvės judėti. Dėl lengvesnio gamybos proceso šių plokščių vidutinė kaina yra mažesnė. Be to, polikristaliniai saulės moduliai paprastai turi mėlyną atspalvį, o ne juodą, kaip monokristaliniai. Kadangi polikristalinių modulių efektyvumas mažesnis nei kitų tipų plokščių, paprastai šių plokščių yra montuojama daugiau norint gauti tokią pačią galią, tačiau individuali elementų kaina yra mažesnė. Polikristaliniai saulės moduliai taip pat yra labai patvarūs, tačiau paprastai tarnauja šiek tiek trumpiau nei monokristaliniai saulės moduliai. Be to, jos yra labiau jautrios aukštai temperatūrai, o tai reiškia, kad karštomis vasaros dienomis jų našumas sumažėja [34]. Apibendrintas monokristalinių ir polikristalinių saulės modulių palyginimas pateikiamas 3 lentelėje (žr. 3 lentelę).

3 lentelė. Monokristalinių ir polikristalinių saulės modulių palyginimas

Rodiklis	Monokristalinis saulės modulis	Polikristalinis saulės modulis
Silicio išdėstymas	Vienas gryno silicio kristalas	Daug sulietų silicio fragmentų
Kaina	Didesnė	Mažesnė
Išvaizda	Juodas atspalvis	Mėlynas atspalvis
Efektyvumas	Didesnis	Mažesnis
Tarnavimo laikas	25–40 metų	20–35 metai
Atsparumas temperatūrai	Didesnis	Mažesnis

2. Metodinė dalis

2.1. Tyrimo objektas

Pirmoje tyrimo dalyje buvo apžvelgtos kelios AEI formos, jų plėtra bei infrastruktūra pasaulio bei Lietuvos mastu, perdirbimo, utilizavimo kainodara bei šiandieninės galimybės. Tolimesniai tyrimo eigai tyrimo objektu pasirenkami du skirtingo tipo saulės moduliai: standartinis monokristalinis ir stiklas/stiklas. Tyrimo metu bus siekiama išanalizuoti saulės modulių utilizavimo išlaidas buitiniam vartotojui Lietuvoje, o būtent šie saulės modulių tipai yra labiausiai šiuo metu paplitę tarp buitinių vartotojų Lietuvoje, įsirengusių saulės elektrinę. Tam, kad būtų galima kuo tiksliau palyginti, priimama, kad saulės moduliai gaminami „SoliTek“ įmonėje. Monokristalinio ir stiklas/stiklas saulės modulių tipų techniniai dydžiai naudojami iš gamintojo pateiktų duomenų lapų (žr. 1 ir 2 priedus). Vienas standartinis monokristalinis saulės modulis sveria 20 kg ir yra 365 W galingumo. Stiklas/stiklas saulės modulis sveria 30 kg, o jo nominali galia yra 360 W. Atitinkamai 1 kW tenkantis svoris yra 54,79 kg ir 83,33 kg. Norint tyrimą pritaikyti didesnei vartotojų grupei, saulės jėgainių galių ribos pasirenkamos 1–5 kW ir 6–10 kW galingumo. Į šias galių ribas patenka didžioji dalis buitinių vartotojų Lietuvoje. Pavyzdžiui, vartotojams, kurie turi vienfazį elektros įvadą, saulės elektrinės galia yra ribojama iki 3,6 kW [37]. Vartotojai, turintys didesnius elektros energijos vartojimo poreikius bei norintys naudotis saulės elektrinės pagaminta elektros energija visus metus, dažniausiai įsirengia apytiksliai 10 kW galios saulės elektrinę. Šiame tyrime bus skaičiuojami 1 kW tenkantys utilizavimui priskiriami kaštai tam, kad būtų galima apskaičiuotas išlaidas pritaikyti nusistatytoms galių riboms. 4 lentelėje (žr. 4 lentelę) parodyti saulės elektrinių, kurios patenka į pasirinktas galių ribas, duomenys. Šie duomenys apima saulės modulių skaičių, pagamintą elektros energijos kiekį per metus bei plotą, kurį užima saulės jėgainė.

4 lentelė. Saulės elektrinių duomenys pagal skirtingas galias (sudaryta autoriaus pagal [37] šaltinį)

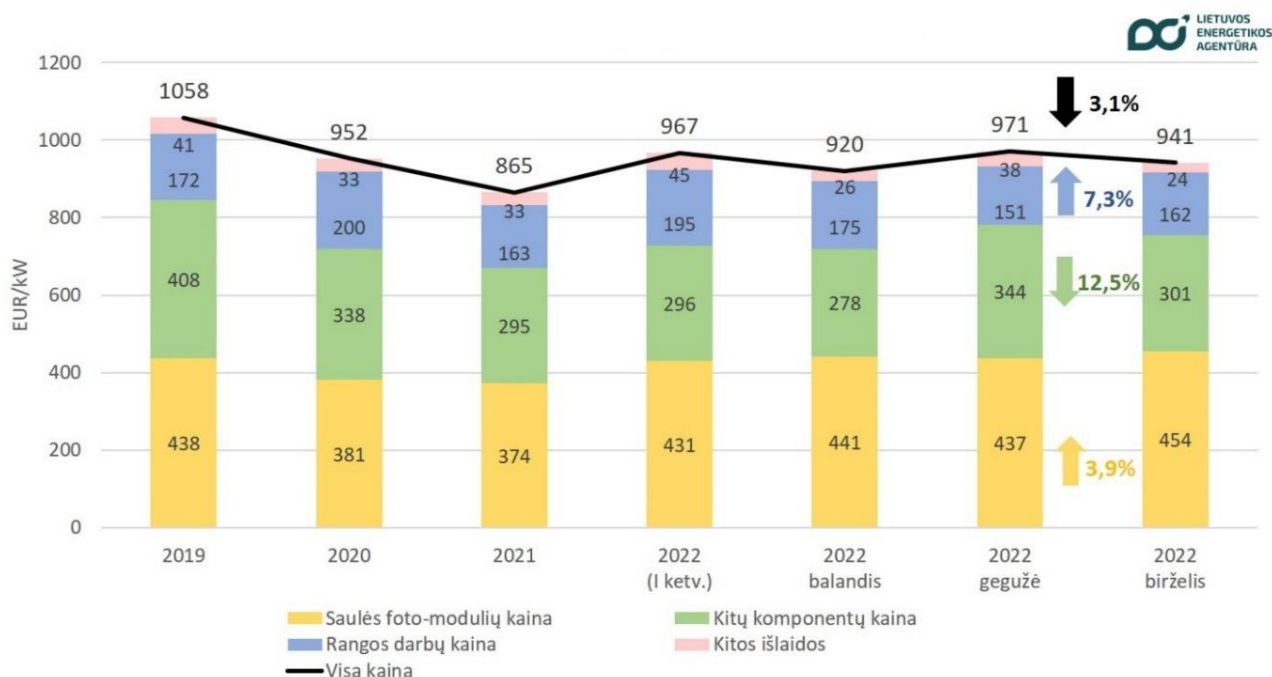
kWh per metus	Saulės modulių skaičius	Saulės elektrinės galia, kW	Plotas, kv. m
3000	9	3,195	16,91
3600	11	3,905	20,67
6000	17	6,035	31,95
9600	28	9,94	52,62

Saulės modulių perdirbimo bei utilizavimo kaštai 3.2.2. skyrelyje perskaičiuojami pasirinktoms 1–5 kW ir 6–10 kW galių riboms. Taip pat šioms galių riboms atliekami ekonominiai skaičiavimai, kurie pateikiami 3.4. skyriuje. Į šias galių ribas patenka pasirinktos 4 saulės modulių galios: 3,195 kW, 3,905 kW, 6,035 kW bei 9,94 kW ir pateikiamos 4 lentelėje (žr. 4 lentelę). Į 1–5 kW galių ribą patenkančios galios tarpusavy skiriasi 1,22 karto, o 6–10 kW galių ribai priklausančios galios skiriasi daugiau – 1,65 karto. Matoma, kad 3,195 kW galios saulės elektrinė sudaryta iš 9 saulės modulių, 3,905 kW iš 11 modulių, 6,035 kW iš 17 modulių, o 9,94 kW iš 28 saulės modulių. Mažiausios ir didžiausios galios saulės elektrinių modulių skaičius skiriasi 21 moduliu.

2.2. Tyrimo metodika

Magistrinio darbo tyrimas siekiant išanalizuoti ir įvertinti skirtingų saulės modulių utilizavimo išlaidas, jų įtaką atsipirkimo laikotarpiui bei LCOE dydžiui bus įgyvendinamas pasitelkiant dvi metodikas. Pirmoji metodika yra apklausa, skirta buitiniams vartotojams, įsirengusiems saulės

elektrinę. Šia metodika siekiama išsiaiškinti, kada realiems vartotojams atsipirkimo laikotarpis tampa nepriimtinas, vėliau palyginant su apskaičiuotu atsipirkimo laikotarpiu įvertinus utilizavimo kaštus. Be to, analizuojant apklausą įvertinamas tikslinės vartotojų grupės sąmoningumas aplinkosaugos klausimu. Antroji naudojama metodika yra gyvavimo ciklo sąnaudų vertinimo metodika (toliau – LCA), kuria pasinaudojus galima išanalizuoti produkto kaštus bei poveikį aplinkai nuo pagaminimo iki utilizavimo ar perdirbimo. Šiame magistrinio darbo tyrime naudojant LCA metodiką koncentruojamasi į perdirbimo/utilizavimo etapą. Žaliavų gavybos, transportavimo bei gamybos etapai nėra detalizuojami. Todėl šių etapų vidutiniai duomenys, kurie yra reikalingi norint įvertinti visą saulės modulio gyvavimo ciklą, naudojami iš jau atliktų kaštų analizių. VŠĮ Lietuvos energetikos agentūra pateikia vidutines 2019–2022 m. birželio mėn. saulės elektrinių įrengimo kainas, į kurias įeina saulės modulio kaina, rangos darbų kaina, kitų komponentų kaina bei kitos išlaidos. Šios kainų dedamosios pateikiamos 6 paveiksle (žr. 6 pav.). Kitų komponentų kaina, į kurią įeina inverteriai, kaupikliai bei valdymo įranga, nebus vertinama, kadangi šiame tyrime nagrinėjami tik saulės modulių kaštai. Prie kitų išlaidų taip pat priskiriamos transportavimo išlaidos žaliavų gavybos bei gamybos metu. Tyrimo metu bus naudojami 2022 m. birželio mėn. vidutiniai duomenys. Saulės modulių atskirų dalių perdirbimo koeficientai pateikiami 5 lentelėje (žr. 5 lentelę) [41]. Įvertinus dviejų skirtingų tipų saulės modulių utilizavimo išlaidas, jie bus palyginami tarpusavyje atsižvelgiant į visą gyvavimo ciklą. Siekiant įvertinti saulės modulių naudojimo ateityje perspektyvas Lietuvoje, bus remiamasi Nacionalinės energetinės nepriklausomybės strategijos (toliau – NENS) [32] ir Nacionalinės energetikos ir klimato srities veiksmų (toliau – NEKS) planais [39]. Detalus tyrimo algoritmas pateikiamas 7 paveiksle (žr. 7 pav.). Magistriniame darbe naudojamų metodikų taikymas plačiau aprašytas atitinkamai 2.2.1. ir 2.2.2. skyreliuose.

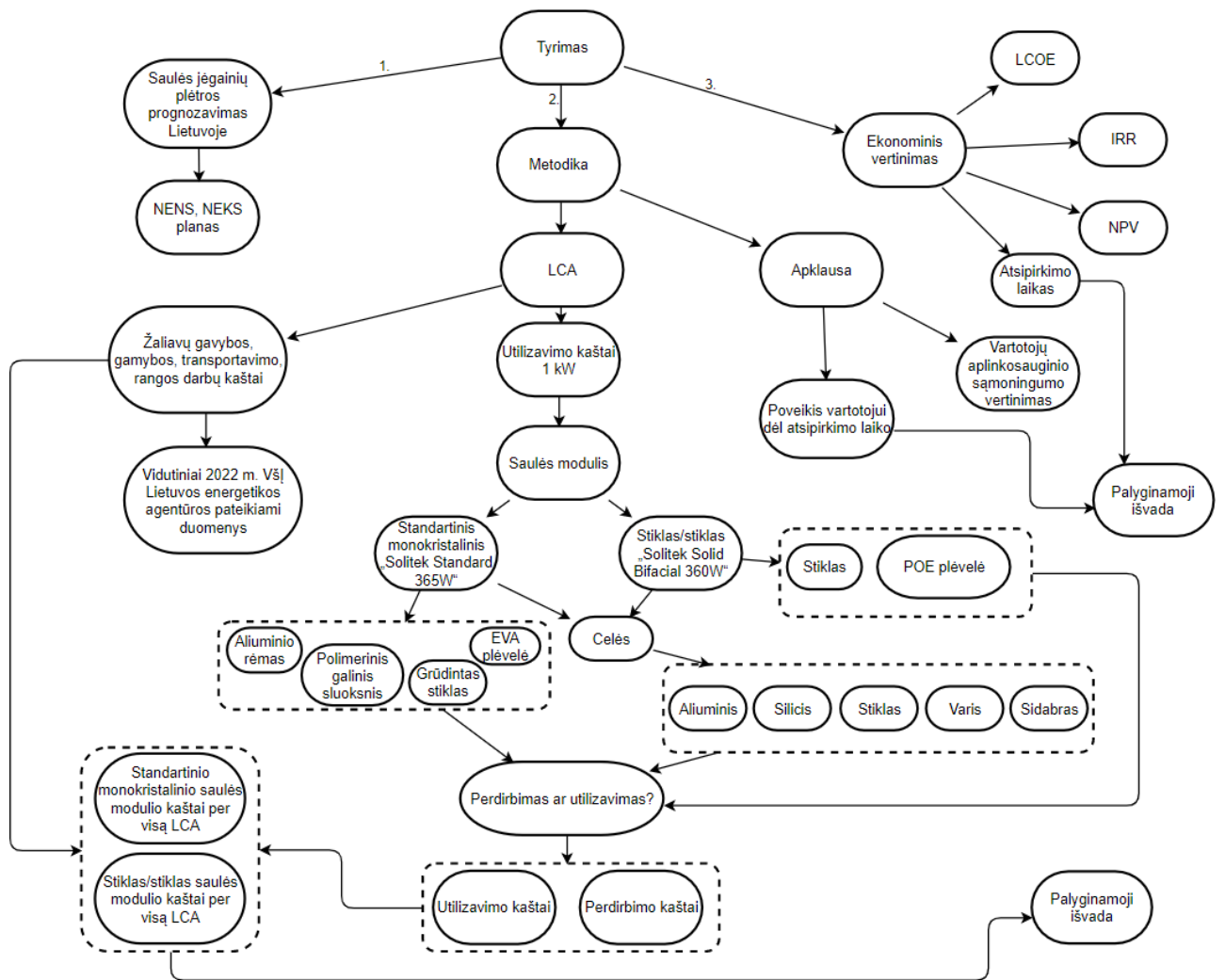


6 pav. Vidutinės saulės elektrinės įrengimo kainos dedamosios (2022 m.) [49]

5 lentelė. Saulės modulio komponentų perdirbimo efektyvumas (2019 m.)

Komponentas		Perdirbimo efektyvumas, %
Aliuminio rėmas		100
Stiklas		100
POE, EVA plėvelė		100
Galinis polimerinis sluoksnis		-
Variniai kabeliai		99
Celės	Aliuminis	100
	Silicis	95
	Stiklas	100
	Varis	99
	Sidabras	94

5 lentelėje (žr. 5 lentelę) pateikiami saulės modulių atskirų komponentų perdirbimo koeficientai, naudojami 3.2.2. skyrelyje esančiuose saulės modulių utilizavimo ir perdirbimo kaštų skaičiavimuose. Pagal perdirbimo efektyvumo koeficientus apskaičiuojama, kokia saulės modulio komponento procentinė dalis yra tinkama perdirbimui, o kita dalis, netinkama perdirbimui, yra utilizuojama. Matoma, kad aliuminio rėmas, stiklas, EVA bei POE plėvelės gali būti perdirbamos 100 %, variniai kabeliai 99 %, o galinis polimerinis sluoksnis, kurį turi tik standartinio monokristalinio tipo saulės moduliai, šiandieninėmis galimybėmis negali būti perdirbamas dėl savo sudėties, todėl turi būti utilizuojamas. Saulės modulių celės yra sudarytos iš aliuminio, silicio, stiklo, vario bei sidabro, todėl perdirbimo koeficientai skaičiuojami kiekvienai celės sudedamajai daliai atskirai. Aliuminio bei stiklo perdirbimo galimybės yra pažangios, todėl šios dalys gali būti perdirbamos 100 %, varis 99 %, silicis 95 %, o mažiausios perdirbimo galimybės yra sidabro, kuris gali būti perdirbamas 94 % efektyvumu.



7 pav. Tyrimo algoritmas (sudaryta autoriaus)

7 paveiksle (žr. 7 pav.) pateikiamas magistrinio darbo tyrime naudojamas algoritmas. Visų pirma, pasinaudojant NENS ir NEKS planais, 3.1. skyriuje atliekamas saulės jėginių plėtros prognozavimas Lietuvoje. Tyrimo analizės atlikimui naudojamos 3 metodikos: LCA, apklausa ir ekonominis vertinimas. Saulės modulių gyvavimo ciklo sąnaudų vertinimo metodika atliekama įvertinant žaliavų gamybos, gamybos, transportavimo bei rangos darbų kaštus pagal vidutinius 2022 m. VŠĮ Lietuvos energetikos agentūros pateikiamus duomenis 3.2.1. skyrelyje. Vėliau įvertinami standartinio monokristalinio ir stiklas/stiklas tipų saulės modulių atskirų komponentų utilizavimo bei perdirbimo kaštai, tenkantys 1 kW galios. Apskaičiuoti bendri LCA kaštai kiekvienam modulio tipui yra palyginami tarpusavyje. Kita naudojama metodika yra apklausa, atliekama 3.3. skyriuje. Apklausos tikslas yra įvertinti vartotojų sąmoningumą aplinkos apsaugos aspektu bei išsiaiškinti, koks saulės elektrinės atsipirkimo laikas yra priimtinas. 3.4. skyriuje atliekamas ekonominis vertinimas pasirinktoms saulės elektrinių galių riboms apskaičiuojant NPV, IRR, LCOE dydžius bei atsipirkimo laiką nevertinant utilizavimo kaštų. Vėliau tie patys rodikliai apskaičiuojami įvertinus utilizavimo kaštus bei atliekamas palyginimas. Apskaičiuotas atsipirkimo laikotarpis yra palyginamas su apklausos metu gautais duomenimis ir atliekamas utilizavimo kaštų poveikio vertinimas vartotojams dėl padidėjusio atsipirkimo laiko.

2.2.1. Apklauso analizės metodika

Šiame magistrinio darbo tyrime bus taikoma apklauso analizės metodika sudarant apklausa. Apklausa dažnai taikoma, kai tiriamas reiškinys yra susijęs su žmonių nuostatomis, poreikiais ar interesais. Dažniausiai apklausa taikoma kaip instrumentas informacijai iš respondentų surinkti iš anksto apgalvotais klausimais. Apklauso vykdomos siekiant gauti reprezentatyvios informacijos apie tiriamas tikslines grupes, o taip pat norint atrasti ryšius tarp skirtingų tyrimo parametru. Pagal apklauso atlikimo būdą, apklauso skirstomos į tiesiogines apklauso (vykdomas tiesioginio interviu būdu), anketavimą, testus ir apklauso panaudojant technologijas [33]. Apklauso atlikimo būdas buvo pasirinktas anketos pildymas atsakant į iš anksto sudarytus klausimus.

Apklauso tikslas yra išsiaiškinti buitinių vartotojų sąmoningumą saulės modulių utilizavimo aplinkosauginiu aspektu bei įvertinti, kaip keičiasi vartotojams priimtinas saulės elektrinės atsipirkimo laikas įvertinus utilizavimo išlaidas. Apklausa buvo sudaryta naudojant „Google Docs“ programine įranga ir susideda iš 6 klausimų. Apklausa skirta buitiniams vartotojams, todėl bus skleidžiama per grupes, kurios yra socialiniame tinkle „Facebook“. Tokiose, būtent diskusijoms apie saulės elektrines skirtose grupėse yra nesunku pasiekti didelę tikslinę auditoriją t. y. buitinius, saulės elektrines įsirengusius vartotojus. Visi apklausoje pateikiami klausimai yra uždaro tipo ir pateikiami su atsakymo variantais, kur respondentas gali pasirinkti vieną atsakymo variantą. Toks atsakymų pateikimo variantas buvo pasirinktas norint gauti kuo tikslesnius duomenis. Apklausa sudarantys klausimai:

1. kokios galios saulės elektrinę esate įsirengę?
2. kokio tipo saulės moduliai sudaro Jūsų elektrinę?
3. skaičiuojamas saulės modulių tarnavimo laikas yra 20–30 metų. Europos Sąjungos reguliavimo tarnyba draudžia kaupti elektronines atliekas sąvartynuose (prie jų priskiriami ir saulės fotomoduliai). Šios atliekos privalo būti perdirbamos arba utilizuojamos. Ką planuojate daryti pasibaigus saulės modulių tarnavimo laikui?
4. Europos branduolinių tyrimų organizacijos mokslininkai (CERN) yra nustatę, kad saulės modulių gamybos ir utilizavimo procesai yra taršūs. Ar Jums, prieš įsigyjant saulės elektrinę, buvo svarbus aplinkosauginis aspektas?
5. kiek būtumėte linkę skirti lėšų saulės modulio utilizavimui arba kiek tai galėtų kainuoti?
6. koks atsipirkimo laikotarpis Jums būtų priimtinas?

Nuoroda į apklausa: [Apklausa](#)

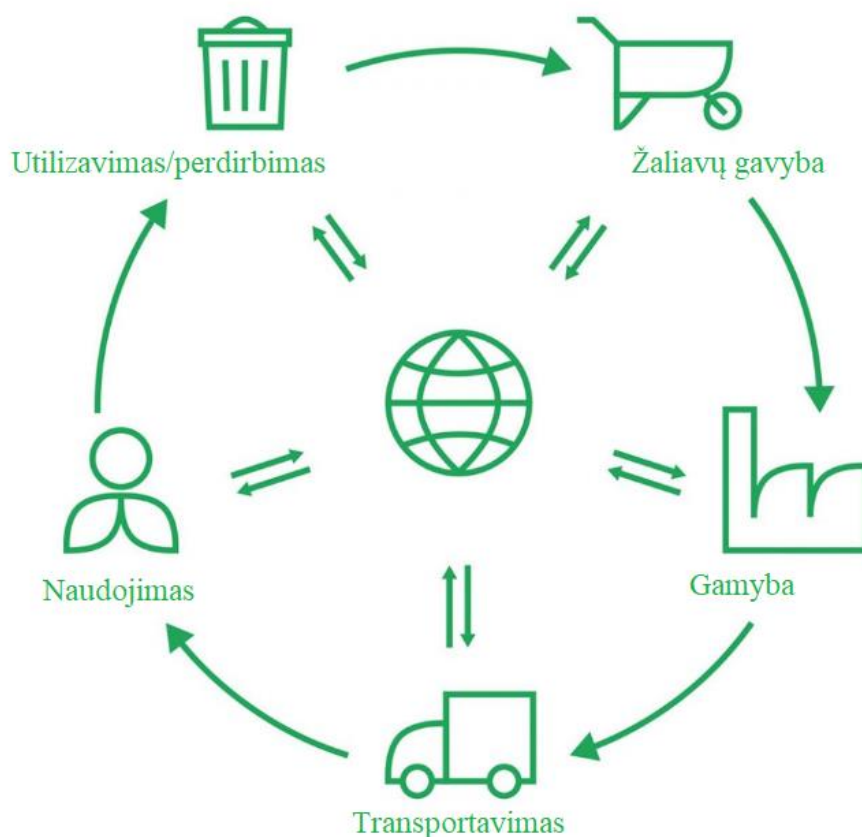
Apklauso rezultatai ir palyginamosios išvados pateikiamos tiriamosios dalies 3.3. „Apklausa“ skyriuje.

2.2.2. Gyvavimo ciklo sąnaudų vertinimo metodika

Pastaruoju metu vis daugiau įmonių ir organizacijų pripažįsta aplinkos apsaugos svarbą bei pradeda vertinti savo produktų poveikį aplinkai. Dėl šios priežasties aplinkos apsaugos aspektas vis labiau įtraukiamas į produktų projektavimo ir kūrimo procesus. Būtent tam reikia nustatyti pagrindinius aplinkos apsaugos klausimus, susijusius su produktu per visą jo gyvavimo ciklą. Pagrindiniai klausimai apima problemines veiklas, medžiagas bei procesus, susijusius su produktu nuo žaliavų įsigijimo, gamybos ir transportavimo iki naudojimo ir utilizavimo ar perdirbimo. Produktas negali būti pagamintas be žaliavų, transportavimo bei utilizavimo, todėl pagrindinių produkto aplinkosaugos

problemų nustatymas per visą jo gyvavimo ciklą yra sudėtinga užduotis. Tam įgyvendinti reikalingos sistemingos analitinės priemonės, skirtos gaminio aplinkosauginiam vertinimui per visą jo gyvavimo laikotarpio ciklą.

LCA geriausiai žinomas kaip kiekybinė gaminio aplinkosauginių aspektų analizė per visą jo gyvavimo ciklą arba poveikio aplinkai, susijusio su visais produkto, proceso ar paslaugos gyvavimo ciklo etapais, vertinimo metodika. LCA metodika grafiškai pavaizduota 8 paveiksle (žr. 8 pav.). Ši metodika pradėta taikyti dar 1960 metais analizuojant galimas pakuočių alternatyvas. Vėliau LCA pradėtas buvo plėtojamas ir pradėtas naudoti ne tik produktams, bet ir paslaugoms analizuoti. Gyvavimo ciklo analizės metodas yra sisteminė priemonė, leidžianti analizuoti, kokią įtaką produktas turi aplinkai per visą jo gyvavimo ciklą ir įvertinti galimą jų poveikį aplinkai, o pagrindinis tikslas yra pagerinti bendrą gaminio aplinkosauginį profilį. Pagrindė vertinami į orą, vandenį ar žemę išmetami teršalai, tokie kaip CO₂, kietosios dalelės, neperdirbamos atliekos ar kitos ŠESD, naudojamos gamybos ar transportavimo metu. Poveikis aplinkai LCA kontekste reiškia neigiamą poveikį sritims, tokioms kaip ekosistema, žmonių sveikata ar gamtos išteklių [24].

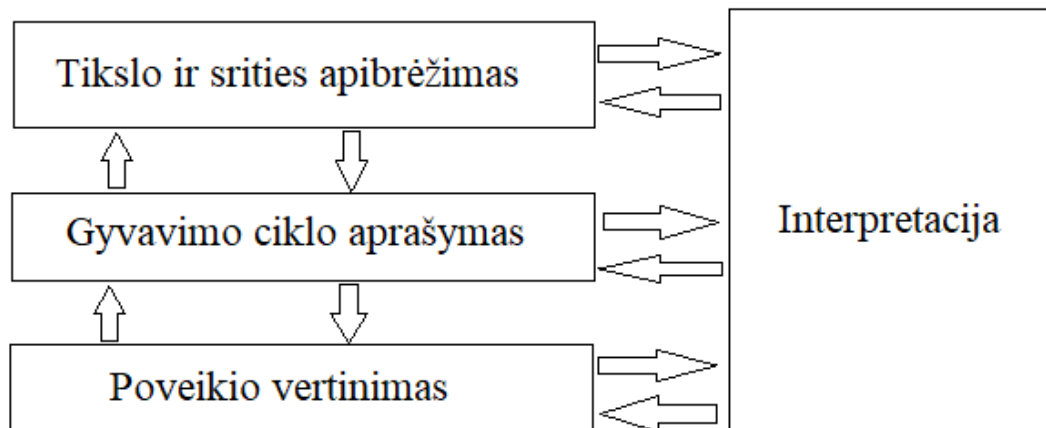


8 pav. Produkto gyvavimo ciklo etapai [28]

LCA metodika yra plačiai naudojama verslo ir pramonės įmonių viso pasaulio mastu. Pasitelkiant šią metodiką galima atlikti skirtingų gaminių variantų lyginamąją analizę, todėl ji dažnai naudojama priimant sprendimus investicijoms į technologijas ar inovacijas [25]. Gyvavimo ciklo sąnaudų vertinimo metodika yra standartizuota, todėl ji yra patikima ir skaidri. Tarptautinė standartizacijos organizacija (ISO) nustatė ir pateikė LCA standartus ISO 14040 ir 14044 [26]. Šiuose standartuose aprašyti keturi pagrindiniai LCA etapai:

1. tikslo ir taikymo srities apibrėžimas;
2. inventoriaus analizė;
3. poveikio vertinimas;
4. interpretacija.

Šių etapų tarpusavio ryšys pavaizduotas 9 paveiksle (žr. 9 pav.).



9 pav. Gyvavimo ciklo etapų tarpusavio ryšys (sudaryta autoriaus pagal [50] šaltinį)

1 žingsnis. LCA tikslo ir apimties apibrėžimas

Tikslo ir apimties apibrėžimo etapu užtikrinama, kad tyrimas LCA metodikos būdu būtų atliekama nuosekliai. Atliekant LCA modeliuojamas produkto, paslaugos ar sistemos gyvavimo ciklas. Svarbiausias uždavinys yra kruopščiai apibrėžti LCA tyrimo tikslą ir apimtį. Pavyzdžiui, kokia yra LCA atlikimo priežastis, koks tikslus gaminio ir jo gyvavimo ciklo apibrėžimas ir sistemos ribų aprašymas. Sistemos ribose apibūdinama, kas įtraukiama į vertinimą, o kas neįtraukiama. Pavyzdžiui, į tyrimo apimtį galima neįtraukti nedidelio kiekio produkto sudedamųjų dalių, kurios nedaug prisideda prie bendro pėdsako [28].

2 žingsnis. Išteklių ir išmetamųjų teršalų inventorizacijos analizė (LCI)

Gyvavimo ciklo inventorizacijos etapas apima duomenų rinkimą ir skaičiavimo procedūrą, skirtą kiekybiniam tiriamos sistemos sąnaudų ir išieigos įvertinimui. Vertinamos medžiagos yra energija, žaliavos bei kitos fizinės sąnaudos, šalutiniai produktai, atliekos bei išmetami teršalai. Dažniausiai šie duomenys yra susiję su pirminiais procesais, pavyzdžiui, produkto gamyba [27].

3 žingsnis. Poveikio gyvavimo ciklui vertinimas (LCIA)

Produkto galimo poveikio aplinkai reikšmingumas, remiantis gyvavimo ciklo inventorizacijos rezultatais, vertinamas naudojant LCIA. Gyvavimo ciklo poveikio vertinimą sudaro keli elementai. Tai yra klasifikavimas, apibūdinimas, normalizavimas ir pasvėrimas. Iš šių keturių elementų normalizavimas ir pasvėrimas laikomi neprivalomais, tačiau pirmieji du yra privalomi LCIA elementai [31]. Gyvavimo ciklo poveikio vertinimo etapu siekiama nustatyti galimą tiriamo produkto ar sistemos poveikį aplinkai per visą jų gyvavimo ciklą, taip pat šiuo etapu galima aptikti svarbius atskaitos taškus, kuriuose būtų galima pagerinti jų aplinkosauginį veiksmingumą [29].

4 žingsnis. Interpretacija

Interpretavimo etape yra tikrinama, ar kitų etapų metu gautos išvados yra pagrįstos. Šiame etape LCI ir LCIA rezultatai interpretuojami atsižvelgiant į nustatytą tikslą ir taikymo sritį, siekiant konkrečių išvadų bei rekomendacijų. Šis etapas apima išsamumo, jautrumo ir nuoseklumo patikras. Interpretavimo etape taip pat nagrinėjamas gautų rezultatų neapibrėžtumas ir tikslumas [27].

Kiti gyvavimo ciklo metodai

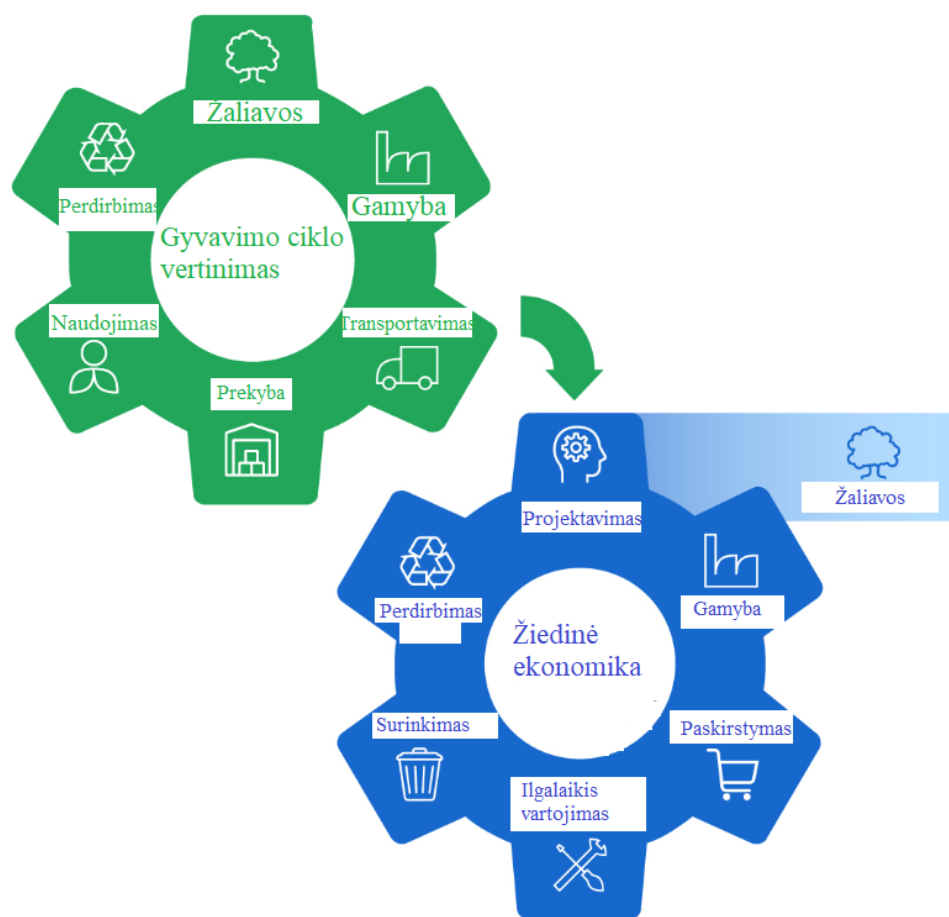
Be LCA, labiausiai žinomi kiti du gyvavimo ciklo metodai. Gyvavimo ciklo metodas „nuo lopšio iki lopšio“ (angl. Cradle-to-cradle) yra taikomas tada, kai gamyboje naudojamos medžiagos yra visiškai perdirbamos ir pakartotinai panaudojamos kitame gyvavimo cikle. Pavyzdžiui, produktai (televizoriai, automobiliai, sintetinis pluoštas), vadinamosios techninės perdirbamos medžiagos, atskiriamos tam, kad produktą panaudojus būtų galima gaminti naujas prekes. Medžiagos lieka gamintojo nuosavybe, kurias po panaudojimo jis surenka ir vėl įtraukia į techninį ciklą [30].

Žiedinė ekonomika

Žiedinė ekonomika skatina tvarų išteklių naudojimą ir poveikio aplinkai mažinimą, kartu kuriant vertę visuomenei, ekonomikai ir verslui. Pagrindinis žiedinės ekonomikos metodo tikslas – pakeisti medžiagų naudojimą iš linijinio, t. y. tiesiosios linijos nuo medžiagų gamybos iki produkto panaudojimo, sąvartyno ar deginimo, į žiedinį, kai medžiagos gali būti naudojamos iš naujo. Tai vadinama ciklo uždarymu. Atsinaujinančiosios energijos naudojimas yra žiedinės ekonomikos pagrindas – iškastinio kuro deginimas niekada negali būti žiedinis.

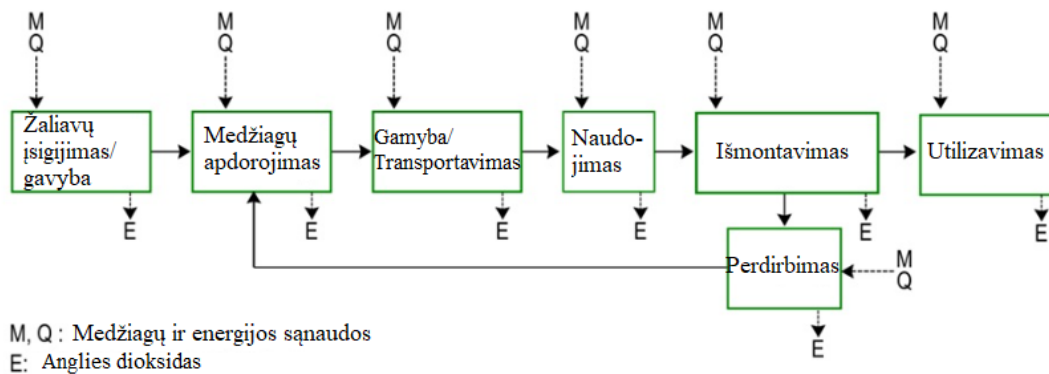
Linijinės ekonomikos atveju prekės sukuriama vienkartiniam tarnavimo laikui ir išmetamos pasibaigus jų naudingo tarnavimo laikui ar net anksčiau. Linijinis metodas reikalauja labai daug išteklių ir dėl jo susidaro didžiuliai kiekiai atliekų sąvartynuose. Tačiau žiedinėje ekonomikoje siekiama visiškai panaikinti atliekas.

Derindami žiedinės ekonomikos principus su LCA metodikomis, produktų kūrėjai gali įvertinti įvairių produktų ir tiekimo grandinės aplinkosauginį veiksmingumą, palyginti žiedines strategijas ir užtikrinti teigiamą aplinkosauginę pusiausvyrą kuriant naujus žiedinius produktus ar paslaugas. Kadangi vis dar neaišku, kokia yra geriausia perdirbimo, pakartotinio naudojimo ir kitų gyvavimo ciklo pabaigos panaudojimo galimybių strategija, LCA yra puiki priemonė galimybėms ir rezultatams įvertinti. Be to, ji gali padėti apibrėžti tikslus ir rodiklius, kuriais laikui bėgant būtų galima matuoti ir skatinti žiediškumą. Šių metodikų tarpusavio ryšys pavaizduotas 10 paveiksle (žr. 10 pav.) [28].



10 pav. LCA ir žiedinės ekonomikos tarpusavio ryšys [28]

Aprašyta LCA metodologija bus taikoma saulės moduliams atsižvelgiant į gyvavimo ciklo etapus, tačiau jų nedetalizuojant. Tyrime bus analizuojami tik utilizavimo ar perdirbimo procesai atskiros modulio dalims. Fotovoltinių elementų gyvavimo ciklą paprastai sudaro medžiagų gamyba, saulės modulio celių ir pačių fotovoltinių modulių gamyba, įrengimas, eksploatavimas ir priežiūra, perdirbimas/utilizavimas ir gyvavimo ciklo pabaiga (žr. 11 pav.). Saulės modulių sistemų LCA bus pagrįstas fotovoltinių modulių, celių bei kitų saulės modulių sudedamųjų dalių, tokių kaip stiklas ar rėmas, gyvavimo ciklo aprašais. Analizuojant utilizavimo kaštus, bus vertinamos atskiros saulės modulio dalys. Jeigu jas įmanoma perdirbti, bus skaičiuojamos perdirbimo išlaidos. Kitos sudedamosios dalys, kurios šiuo metu yra netinkamos perdirbimui, bus vertinamos siekiant išsiaiškinti kaštus, reikalingus jų utilizavimui. Į šiuos kaštus taip pat įtraukiamos energijos išlaidos, reikalingos atitinkamam procesui įgyvendinti. Apskaičiavus galutines utilizavimo išlaidas, duomenys bus palyginti su apklausos metu gautais realiais duomenimis, kuriuos pateikė buitiniai vartotojai, turintys įsirengę saulės elektrinę. Tokiu būdu galima įvertinti, ar saulės elektrinės įsirengimas buitiniam vartotojui yra vis dar naudingas ir patrauklus bei ar atitinka jų lukesčius.



11 pav. Saulės modulių gyvavimo ciklo struktūra [51]

2.3. Ekonominis vertinimas

Ekonominis vertinimas bus atliekamas siekiant išsiaiškinti bei apskaičiuoti utilizavimo kaštų įtaką saulės modulio atsipirkimo laikotarpiui bei LCOE dydžiui. Vertinant atsipirkimo laikotarpį, bus naudojama jautrumo analizė siekiant išsiaiškinti utilizavimo išlaidų priklausomybę atsipirkimo laikotarpiui vertinant visą saulės elektrinės gyvavimo ciklą. Ekonominio vertinimo bei jautrumo analizės atlikimui bus skaičiuojama grynoji vertė (NPV), vidinė grąžos norma (IRR), atsipirkimo laikotarpis (PBT) bei elektros energijos gamybos svertiniai kaštai (LCOE).

Grynoji dabartinė vertė (NPV) nustatoma apskaičiuojant išlaidas (neigiamus pinigų srautus) ir pajamas (teigiamus pinigų srautus) kiekvienam investicijų laikotarpiui. Skaičiuojant NPV įvertinami kasmetiniai pinigų srautai. Apskaičiavus NPV galima įvertinti, ar projekto metu gauti pinigų srautai padengs pradinės investicijas. Saulės modulio grynoji dabartinė vertė apskaičiuojama pagal formulę:

$$NPV = \sum_{t=0}^n CF_t \quad (1)$$

čia CF_t – pinigų srautai, Eur.

Atsipirkimo laikas yra apibūdinamas kaip laiko periodas, reikalingas padengti pirminę investiciją. Šiuo atveju, skaičiuojant atsipirkimo laikotarpį, kartu su pirminėmis investicijomis bus vertinami ir utilizavimo kaštai, tokiu būdu siekiant išsiaiškinti utilizavimo kaštų poveikį atsipirkimo laikui. Atsipirkimo laikotarpis bus skaičiuojamas pagal formulę:

$$PBT = \frac{W}{\sum CF_t} \quad (2)$$

čia W – pradinės investicijos, Eur;

$\sum CF_t$ – pinigų srautai, Eur.

Elektros energijos gamybos svertiniai kaštai (LCOE) yra apibūdinami kaip vidutinė minimali elektros energijos kaina, už kurią pardavus elektros energiją, būtų galima padengti investicijas. Šiuo atveju tai yra elektros energijos kaina, kurią pagamina saulės modulis, taip pat vertinant pradinės, eksploatavimo bei utilizavimo išlaidas. Skaičiuojant elektros energijos gamybos svertinius kaštus,

bus siekiama įvertinti utilizavimo kaštų įtaką rinkos kainai bei LCOE dydžiui. LCOE apskaičiuojami pagal 3 formulę:

$$\text{LCOE} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (3)$$

čia I_t – investicijos, per metus, kur t metai, Eur;

M_t – eksploatacinės ir kitos išlaidos, kur t metai, Eur;

E_t – per metus sugeneruojama saulės modulio elektros energija, kWh/metus;

R – diskonto norma;

n – saulės modulio tarnavimo laikas.

Vidinė gražos norma (IRR) yra diskontavimui naudojama palūkanų norma, kuriai esant iš projekto gaunamų pinigų srautų suma lygi investicijoms. Vidinė pelno norma laikoma diskonto koeficiento reikšmė, prie kurios projekto pinigų srautų grynoji dabartinė vertė lygi 0. Vidinė gražos norma apskaičiuojama:

$$\text{IRR} = \sum_{t=0}^n \frac{\text{CF}_t}{(1+\text{IRR})^t} = 0 \quad (4)$$

čia: CF_t – pinigų srautai, Eur;

r – laiko periodų skaičius.

3. Tiriamoji dalis

3.1. Saulės jėgainių plėtros prognozavimas Lietuvoje

Lietuva pastaraisiais metais yra stipriai pažengusi AEI srityje ir intensyviai didina visų atsinaujinančių energijos išteklių instaliuotą galią. Viena iš to priežasčių yra Lietuvos Respublikos atsinaujinančių išteklių energetikos įstatymas, kuriuo numatoma, kad 2030 metais energijos gamybos iš atsinaujinančių išteklių energijos dalis, palyginti su šalies bendruoju galutiniu energijos suvartojimu, sudarytų ne mažiau kaip 50 % ir kad ši dalis toliau būtų didinama, tam panaudojant naujausias ir veiksmingiausias atsinaujinančių energijos išteklių naudojimo technologijas ir skatinant energijos vartojimo efektyvumą, o 2045 metais ši dalis sudarytų 100 % [38].

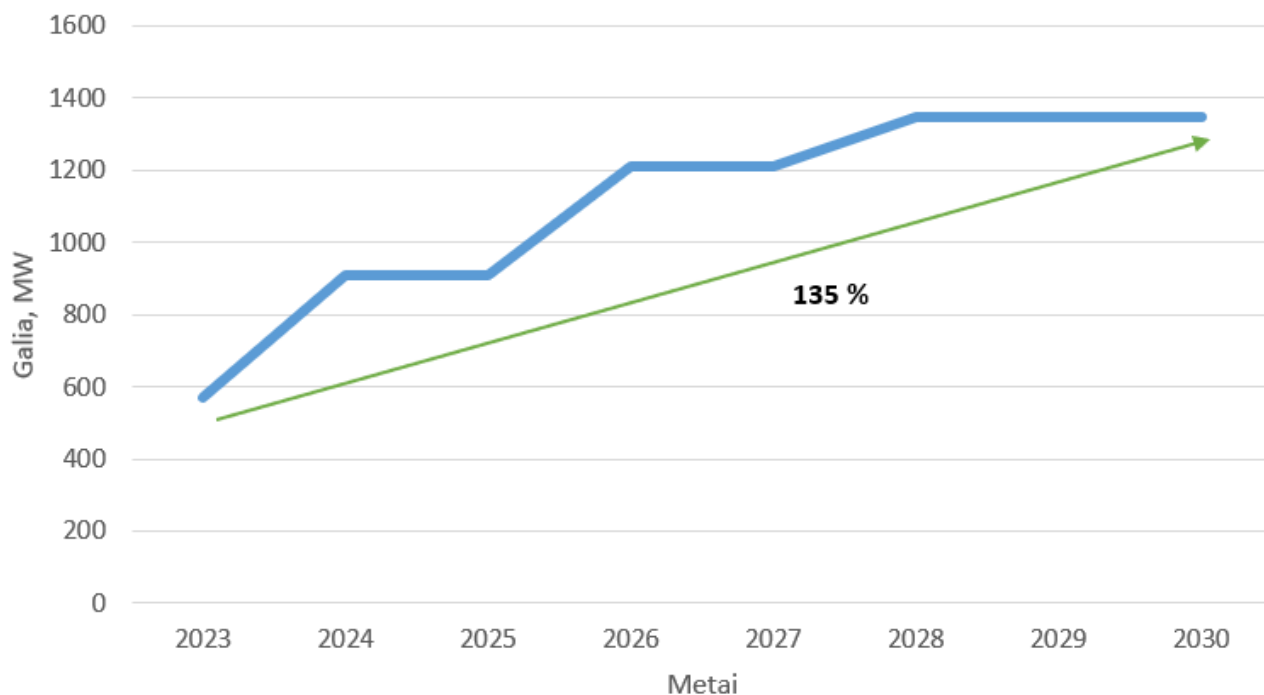
Nuo 2017 m. saulės elektrinės įsirengimo procedūra buitiniam vartotojui buvo ženkliai supaprastinta. 2018 m. buvo pradėtas finansinis skatinimas saulės jėgainių įsirengimui, kuris vis dar intensyviai vykdomas. Pagrindinė skatinamoji priemonė saulės jėgainių plėtrai Lietuvoje yra APVA teikiama parama gyventojams iš ES fondo lėšų. Pavyzdžiui, 2022 m. tam buvo skirta 29,9 mln. eurų. Paramos dydis įsirengus tik saulės modulius yra 242,92 eurų už 1 kW saulės elektrinės įrengtosios galios.

Lietuvos elektros perdavimo sistemos operatoriaus „Litgrid“ pateikiamais naujausiais 2023 metų sausio mėnesio duomenimis, saulės elektrinių instaliuota galia Lietuvoje yra 572 MW. Pagal NEKS planą, saulės modulių naudingam eksploatavimo laikotarpiui esant apytiksliai 20 metų, daroma prielaida, kad 2023–2030 m. laikotarpiu dabartinių pajėgumų modernizuoti nereikės. 2021–2022 m. buvo planuojama instaliuoti 18 MW galios naujų saulės jėgainių, tačiau vien 2022 m. pirmoje pusėje prie tinklo buvo prijungta virš 35 MW galios naujų saulės elektrinių. 2023–2025 m. laikotarpiu planuojama įrengti papildomus 339 MW galios saulės elektrinių, 2026–2027 m. laikotarpiu 300 MW, o 2028–2030 m. 135 MW galios. Bendrai iki 2030 m. planuojama įrengti apytiksliai 774 MW galios saulės elektrinių (žr. 6 lentelę.). Tačiau stebint tokią aktyvią saulės elektrinių plėtrą Lietuvoje, galima daryti prielaidą, kad faktiškai instaliuota galia viršys prognozuojamą.

6 lentelė. Prognozuojami elektros energijos gamybos pajėgumai iš AEI (2018 m.) (sudaryta autoriaus pagal [39] šaltinį)

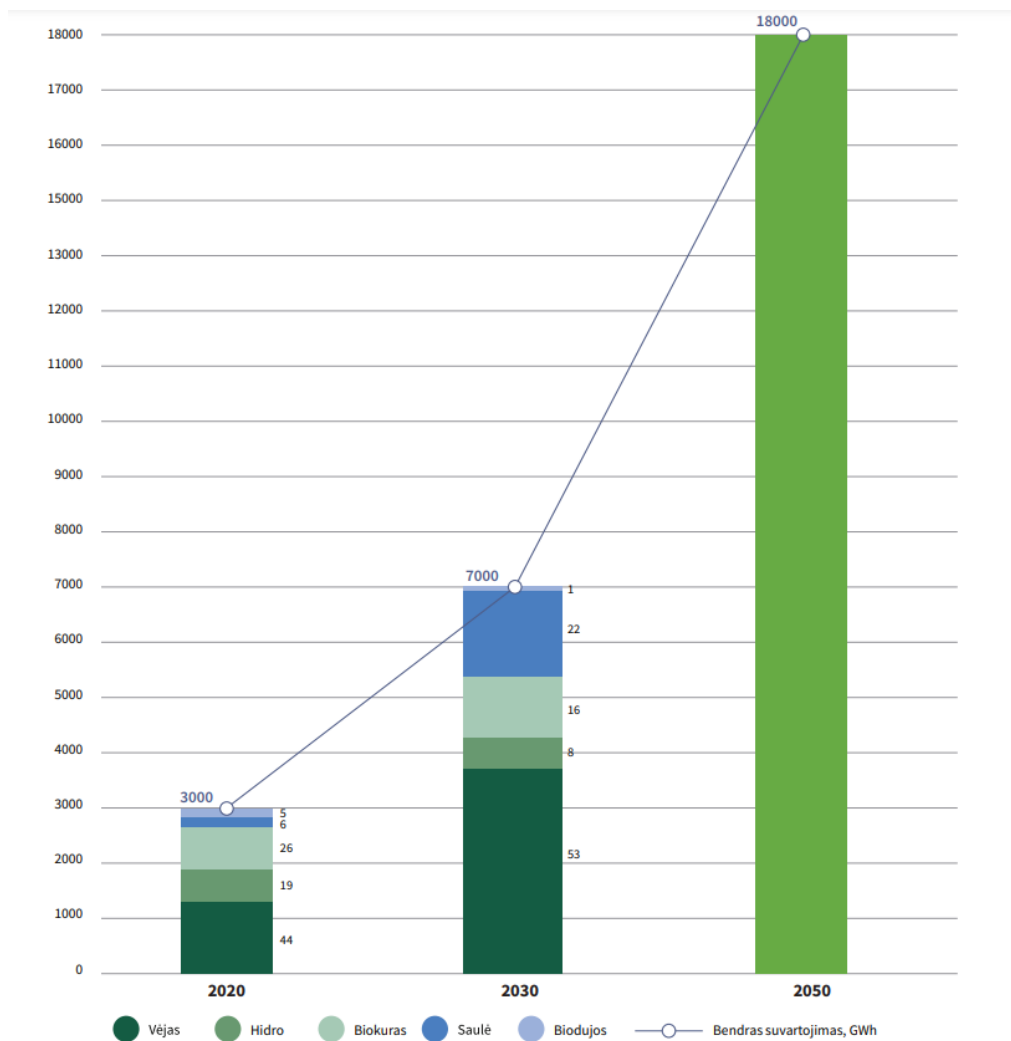
	2020 m.		2021–2022 m.		2023–2025 m.		2026–2027 m.		2028–2030 m.	
	Moder nizuoti	Nauji	Rekon struoti	Nauji	Moder nizuoti	Nauji	Moder nizuoti	Nauji	Moder nizuoti	Nauji
Vėjo elektrinės, MW	–	–	0,16	–	1,025	692	51,87	280	110,41	350
Hidroelektrinės, MW	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Saulės elektrinės, MW	–	–	–	18	–	339	–	300	–	135
Biomasės jėgainės, MW	–	–	5	73	29,75	5	18,71	–	20	–
Biodujų jėgainės, MW	–	–	0,185	–	4,077	–	–	–	10,624	–

12 paveiksle (žr. 12 pav.). pateikiamas saulės jėgainių pajėgumų įrengimo prognozės Lietuvoje grafikas, sudarytas pagal 6 lentelėje pateiktus duomenis. Matoma, kad saulės elektrinių galia Lietuvoje visais metais didėja, o lyginant 2023 ir 2030 m. pastebimas įrengtos galios padidėjimas daugiau nei 2 kartus. Vertinant dabartinę instaliuotą galią bei prognozuojant sparčią saulės elektrinių plėtrą Lietuvoje, galima daryti prielaidą, kad eksploatavimui netinkamų saulės modulių atliekų dydis Lietuvoje tik didės.



12 pav. Prognozuojami elektros energijos gamybos pajėgumai iš saulės elektrinių 2023–2030 m. (sudaryta autoriaus)

NENS plane nurodoma, kad iki 2025 m. iš saulės šviesos energijos bus suvartojama ne mažiau kaip 20 % visos pagaminamos elektros energijos Lietuvoje, o tai yra apie 1000 GWh iš prognozuojamų 5000 GWh bendro suvartojimo. Pagal NENS plane pateikiamą rinkos struktūros pagal suvartotą elektros energijos, pagamintos iš atsinaujinančių energijos išteklių kieki, prognozės iki 2050 m. diagramą (žr. 13 pav.), matoma, kad iki 2030 m. prognozuojamas 2 % prieaugis – iš viso suvartojama 22 % arba 1540 GWh elektros energijos iš saulės jėgainių. Taigi, per 5 metus numatomas didesnis nei 1,5 karto suvartojimo padidėjimas – 540 GWh.



13 pav. Rinkos struktūra pagal suvartotą elektros energijos, pagamintos iš atsinaujinančių energijos išteklių, kiekį, proc. ir GWh (progozė) (2018 m.) [52]

3.2. Standartinio monokristalinio ir stiklas/stiklas tipo saulės modulių gyvavimo ciklo sąnaudų vertinimas

3.2.1. Žaliavų gavybos, gamybos, transportavimo, rangos darbų kaštai

Saulės modulių visas gyvavimo ciklas susideda iš žaliavų gavybos, saulės modulių gamybos, transportavimo, naudojimo bei perdirbimo/utilizavimo etapų. Kadangi magistrinio darbo tyrimas atliekamas siekiant išanalizuoti paskutinį, t. y. utilizavimo/perdirbimo etapą, kitos ciklo dalys nėra detalizuojamos. Tačiau norint įvertinti saulės modulio sąnaudas per visą LCA, reikalingi ir ankstesnių etapų kaštų duomenys. Tam pasinaudojama VŠĮ Lietuvos energetikos agentūros pateikiamomis saulės elektrinės įrengimo vidutinėmis kainomis (žr. 6 pav.). Pastebima, kad 2022 m. saulės modulių gamybos, įrengimo bei projektavimo kainos kilo dėl didėjančios infliacijos, paklausos bei didėjančių pagrindinių saulės modulių sudedamųjų dalių kainos. Todėl siekiant gauti kuo tikslesnius rezultatus, naudojami 2022 m. birželio mėn. VŠĮ Lietuvos energetikos agentūros pateikiami saulės elektrinių įrengimo vidutiniai duomenys, kurie yra išskaidyti pagal etapus ir pateikiami 7 lentelėje (žr. 7 lentelę). Žaliavų gavybos bei saulės modulio gamybos kaštai yra pateikiami bendrai ir sudaro 454 Eur, šių etapų metu reikalingo transportavimo kaštai yra 24 Eur, o rangos darbų išlaidos 162 Eur. Visų etapų

susumuoti kaštai su PVM yra 640 Eur, kurie yra tenkantys 1 kW saulės modulio. Dėl duomenų trūkumo daroma prielaida, kad 7 lentelėje pateikti kaštai yra vienodi abiemis saulės modulių tipams.

7 lentelė. Saulės modulio žaliavų gavybos, transportavimo, gamybos, rangos darbų kaštai

LCA Etapas	Kaštai, Eur/kW
Žaliavų gavybos, saulės modulio gamybos	454
Transportavimo	24
Rangos darbų	162
	Iš viso: 640

3.2.2. Standartinio monokristalinio ir stiklas/stiklas tipo saulės modulių utilizavimo/perdirbimo kaštai

Į utilizavimo arba perdirbimo procesus įtraukiami kaštai skaičiuojami tenkantys 1 kW ir tiriami standartinio monokristalinio „Solitek Standard 365W“ bei stiklas/stiklas „Solitek Solid Bifacial 360W“ tipų saulės moduliams. Tyrimo lentelėse pateikiami kiekvieno saulės modulio komponento svoriai yra proporcingai apskaičiuoti nuo viso svorio, tenkančio 1 kW saulės modulio. Pirmasis saulės modulių perdirbimo proceso etapas yra transportavimas. Tyrimas vykdomas Lietuvos mastu, todėl numatoma, kad saulės moduliai surenkami visos šalies teritorijoje. Tačiau tikslaus atstumo nustatyti yra neįmanoma, todėl daroma prielaida, kad nuo surinkimo iki perdirbimo vietos yra 200 km atstumas. Saulės moduliai transportuojami dyzeliniu automobiliu, į kurį telpa 5 saulės moduliai ir kurio kuro sąnaudos yra vidutiniškai 10 l/100 km. 2023 m. kovo 16 d. duomenimis, dyzelino kaina yra 1,50 Eur/l įskaitant PVM. Standartinio monokristalinio ir stiklas/stiklas tipo saulės modulių transportavimo kaštai, tenkantys 1 kW pateikiami 8 lentelėje (žr. 8 lentelę).

8 lentelė. Saulės modulių transportavimo kaštai nuo surinkimo iki perdirbimo vietos

Saulės modulis	Transportavimo kaštai, Eur/kW
Standartinis monokristalinis	16,44
Stiklas/stiklas	16,67

Į perdirbimo įmonę pristatyti saulės moduliai utilizavimui iškraunami ant konvejerio, kuriuo moduliai transportuojami išmontavimui. Konvejerinės sistemos pabaigoje moduliai automatiškai išmontuojami roboto pagalba. Pirmiausia nupjaunami aliuminio rėmo kraštai, poto išmontuojama likusi rėmo dalis ir atskiriami variniai kabeliai nuo modulio. Proceso pabaigoje perdirbimui tinkamas aliuminio rėmas ir kabeliai patenka į atskirus kontenerius. Remiantis jau atliktais tyrimais, priimama, kad 1 kg aliuminio perdirbimo kaštai yra 0,22 Eur [43]. Iš atskirtų varinių kabelių masės 99 % yra tinkami perdirbimui. Priimama, kad kabeliai perdirbami atliekų perdirbimo įmonėje „EMP recycling“. Priimant vidutinius duomenis, 1 kg varinių kabelių perdirbimo kaštai yra 1,73 Eur su PVM, kurie yra perskaičiuojami pagal svorį, tenkantį 1 kW kiekvieno saulės modulio. Perdirbimui netinkami variniai kabeliai gali būti nemokamai utilizuojami Vilniaus apskrities atliekų tvarkymo

centre UAB „VAATC“. 9 lentelėje pateikiami aliuminio rėmo ir varinių kabelių svoriai, perdirbimo efektyvumas ir perdirbimo kaštai, tenkantys 1 kW abiejų tipų saulės moduliams (žr. 9 lentelę).

9 lentelė. Aliuminio rėmo ir varinių kabelių perdirbimo kaštai

Saulės modulis	Komponentas	Svoris, kg	Perdirbimo efektyvumas, %	Perdirbamas svoris, kg	Utilizuojamas svoris, kg	Perdirbimo kaštai, Eur/kW	Utilizavimo kaštai, Eur/kW
Standartinis monokristalinis	Aliuminio rėmas	5,64	100	5,64	-	1,24	-
	Variniai kabeliai	0,41	99	0,4059	0,0041	0,70	-
Stiklas/stiklas		0,63	99	0,6237	0,0063	1,08	-

Tolimesnis proceso etapas po aliuminio rėmo ir kabelių atskyrimo yra stiklo atskyrimas nuo saulės modulio. Šio proceso metu stiklas yra atskiriamas nuo EVA ir POE (stiklas/stiklas saulės modulio tipo atveju) plėvelės sluoksnių. Siekiant palengvinti stiklo nuėmimą, likusi saulės modulio dalis yra kaitinama vidutinių ir trumpųjų infraraudonųjų spindulių sistema. Vėliau stiklas yra mechaniškai atskiriamas robotizuota pjaustymo mašina. Proceso pabaigoje gaunamas atskirtas stiklo sluoksnis, tinkamas perdirbimui. 10 lentelėje pateikiami kiekvieno modulio tipo 1 kW tenkantys stiklo svoriai, perdirbimo efektyvumas bei perdirbimui tinkamas svoris (žr. 10 lentelę).

10 lentelė. Stiklo perdirbimo duomenys

Saulės modulis	Komponentas	Svoris, kg	Perdirbimo efektyvumas, %	Perdirbamas svoris, kg	Utilizuojamas svoris, kg
Standartinis monokristalinis	Stiklas	40,63	100	40,63	-
Stiklas/stiklas		73,38	100	73,38	-

Pagal 10 lentelėje pateiktus kiekvieno modulio perdirbimui tinkamus svorius apskaičiuojami perdirbimo kaštai, kurie pateikiami 11 lentelėje (žr. 11 lentelę). Stiklas perdirbamas antrinių žaliavų perdirbimo įmonėje „Žalioji taškas“, veikiančioje Lietuvoje. 2020 m. kaštų apžvalgoje pateikiamais duomenimis, 1 kg svorio stiklo perdirbimas kainuoja 0,095 Eur be PVM [42]. Stiklo atskyrimo proceso metu yra naudojama kaitinimo sistema, todėl atskyrimo kaštai skaičiuojami papildomai ir 1 kg tenkantys kaštai sudaro 0,013 Eur be PVM.

11 lentelė. Stiklo perdirbimo ir atskyrimo kaštai

Saulės modulis	Komponentas	Perdirbimo kaštai, Eur/kW	Utilizavimo kaštai, Eur/kW	Atskyrimo kaštai, Eur/kW	Iš viso be PVM, Eur/kW	PVM (21%), Eur	Iš viso su PVM, Eur/kW
Standartinis monokristalinis	Stiklas	3,86	-	0,53	4,39	0,92	5,31
Stiklas/stiklas		6,97	-	0,95	7,92	1,66	9,58

Kitas išmontavimo proceso etapas yra EVA ir POE plėvelių sluoksnio atskyrimas. Šis procesas yra automatizuotas ir atliekamas įkaitinant saulės modulį iki 150–200 °C tam, kad EVA ir POE sluoksniai suminkštėtų. Tokiu būdu plėvelės sluoksnius galima pašalinti juos nulupant ir nepažeidžiant saulės

modulio celių. Vėliau plėvelės yra susmulkinamos ir išrūšiuojamos, kad jas būtų galima perdirbti. Galinis monokristalinio saulės modulio sluoksnis yra pašalinamas naudojant automatizuotą graviravimo mašiną, o šiam procesui atlikti užtenka kambario temperatūros. Tačiau galinis fluorintas sluoksnis yra vienintelis saulės modulio komponentas, kuris šiuo metu laikomas neperdirbamu. Šis komponentas sudarytas iš skirtingų PET ir PVF polimerų sluoksnių. PET sluoksnį galima perdirbti, tačiau jį atskirti nuo PVF polimero sluoksnio šiandieninėmis perdirbimo galimybėmis nėra. Vienintelis utilizavimo būdas yra deginimas arba šalinimas sąvartyne. Galinio sluoksnio utilizavimui tinkamas svoris bei perdirbimui tinkamų EVA ir POE plėvelių svoriai, tenkantys 1 kW pateikiami 12 lentelėje (žr. 12 lentelę).

12 lentelė. EVA, POE plėvelių perdirbimo ir galinio sluoksnio utilizavimo duomenys

Saulės modulis	Komponentas	Svoris, kg	Perdirbimo efektyvumas, %	Perdirbamas svoris, kg	Utilizuojamas svoris, kg
Standartinis monokristalinis	EVA plėvelė	3,59	100	3,59	-
	Galinis sluoksnis	1,97	-	-	1,97
Stiklas/stiklas	POE plėvelė	5,46	100	5,46	-

Pagal 12 lentelėje pateikiamus komponentų svorius apskaičiuojami perdirbimo kaštai EVA ir POE plėvelėms ir utilizavimo kaštai galiniam sluoksniui. Priimama, kad šiuo atveju galinis sluoksnis yra šalinamas sąvartyne ir pridodamas Vilniaus apskrities atliekų tvarkymo centrui UAB „VAATC“. Antrinių žaliavų plastiko 1 kg kiekis atliekų tvarkymo centre priimamas už 0,12 Eur be PVM [44]. EVA ir POE plėvelės yra sudarytos iš PET plastiko, todėl jos perdirbamos antrinių žaliavų perdirbimo įmonėje „Žaliasis taškas“. 2020 m. kaštų apžvalgoje pateikiamais duomenimis, 1 kg PET plastiko perdirbimo kaštai yra 0,30 Eur be PVM [42]. 13 lentelėje pateikiami EVA ir POE plėvelių perdirbimo kaštai, apskaičiuoti pagal komponentų svorį, tenkantį 1 kW bei monokristalinio tipo saulės modulio galinio sluoksnio utilizavimo kaštai (žr. 13 lentelę).

13 lentelė. EVA, POE plėvelių perdirbimo ir galinio sluoksnio utilizavimo kaštai

Saulės modulis	Komponentas	Perdirbimo kaštai, Eur/kW	Utilizavimo kaštai, Eur/kW	PVM (21%), Eur	Iš viso su PVM, Eur/kW
Standartinis monokristalinis	EVA plėvelė	1,08	-	0,23	1,31
	Galinis sluoksnis	-	0,24	0,05	0,29
Stiklas/stiklas	POE plėvelė	1,64	-	0,34	1,98

Paskutinis proceso etapas yra celių perdirbimas. Kadangi celėse yra vertingų metalų, šio proceso metu vykdomas jų antrinis išgavimas terminio apdorojimo būdu. Pirmiausia, naudojant natrio hidroksido tirpalą pašalinamas celėse esantis aliuminis. Vėliau atskiriama sidabro elektrodų tinklelio linija naudojant salietros tirpalą bei išgaunamas 95 % grynumo silicis naudojant natrio hidroksido tirpalą ėsdinimo būdu. Stiklas bei varis išgaunamas aukštos temperatūros oksidacinio poliravimo būdais. Saulės modulio celės sudarytos iš 26 % aliuminio, 11 % silicio, 8 % stiklo, 8 % vario bei 47 % sidabro. Silicis, varis bei sidabras dėl perdirbimo metu susidarančių nuostolių negali būti pilnai perdirbamas, todėl perdirbimui netinkamas šių medžiagų kiekis yra utilizuojamas. Standartinio monokristalinio ir stiklas/stiklas tipo saulės modulių celių sudedamųjų dalių svoriai, tinkami perdirbimui ir utilizavimui pateikiami 14 ir 15 lentelėse (žr. 14 ir 15 lenteles).

14 lentelė. Standartinio monokristalinio tipo saulės modulio celių perdirbimo ir utilizavimo duomenys

Saulės modulis	Komponentas	Celių sudedamoji dalis	Svoris, kg	Perdirbimo efektyvumas, %	Perdirbamas svoris, kg	Utilizuojamas svoris, kg
Standartinis monokristalinis	Celės	Aliuminis	0,50	100	0,50	-
		Silicis	0,21	95	0,1995	0,0105
		Stiklas	0,15	100	0,15	-
		Varis	0,15	99	0,1485	0,0015
		Sidabras	0,90	94	0,846	0,054

15 lentelė. Stiklas/stiklas tipo saulės modulio celių perdirbimo ir utilizavimo duomenys

Saulės modulis	Komponentas	Celių sudedamoji dalis	Svoris, kg	Perdirbimo efektyvumas, %	Perdirbamas svoris, kg	Utilizuojamas svoris, kg
Stiklas/stiklas	Celės	Aliuminis	0,75	100	0,75	-
		Silicis	0,32	95	0,304	0,016
		Stiklas	0,23	100	0,23	-
		Varis	0,23	99	0,2277	0,0023
		Sidabras	1,36	94	1,2784	0,0816

Pagal 14 ir 15 lentelėse pateikiamus skirtingų tipų saulės modulių kiekvieno celės komponento svorius apskaičiuojami perdirbimo ir utilizavimo kaštai. Perdirbimo kaštai yra naudojami iš jau atliktų tyrimų, kuriuose nurodoma, kad 1 kg silicio perdirbti kainuoja 0,47 Eur, aliuminio 0,7 Eur, vario 3,5 Eur ir sidabro 0,53 Eur [41] [40]. Perdirbimui netinkami kiekiai yra utilizuojami Lietuvoje veikiančioje perdirbimo įmonėje „EMP recycling“. Viešai prieinamame įmonės internetiniame puslapyje nurodoma, kad 1 kg tenkantys metalo atliekų utilizavimo kaštai yra 0,1 Eur [45]. Apskaičiuoti standartinio monokristalinio ir stiklas/stiklas tipo saulės modulių celių sudedamųjų dalių perdirbimo ir utilizavimo kaštai pateikiami 16 ir 17 lentelėse (žr. 16 ir 17 lenteles).

16 lentelė. Standartinio monokristalinio tipo saulės modulio celių perdirbimo ir utilizavimo kaštai

Saulės modulis	Komponentas	Celių sudedamoji dalis	Perdirbimo kaštai, Eur/kW	Utilizavimo kaštai, Eur/kW	Iš viso be PVM, Eur/kW	PVM (21%), Eur	Iš viso su PVM, Eur/kW
Standartinis monokristalinis	Celės	Aliuminis	0,35	-	0,35	0,07	0,42
		Silicis	0,094	0,001	0,095	0,01	0,11
		Stiklas	0,014	-	0,014	0,01	0,02
		Varis	0,52	0,0002	0,5202	0,11	0,63
		Sidabras	0,45	0,005	0,455	0,10	0,55

17 lentelė. Stiklas/stiklas tipo saulės modulio celių perdirbimo ir utilizavimo kaštai

Saulės modulis	Komponentas	Celių sudedamoji dalis	Perdirbimo kaštai, Eur/kW	Utilizavimo kaštai, Eur/kW	Iš viso be PVM, Eur/kW	PVM (21%), Eur	Iš viso su PVM, Eur/kW
Stiklas/stiklas	Celės	Aliuminis	0,53	-	0,53	0,11	0,64
		Silicis	0,143	0,002	0,145	0,04	0,18
		Stiklas	0,022	-	0,022	0,01	0,03
		Varis	0,80	0,0002	0,8002	0,17	0,97
		Sidabras	0,68	0,008	0,688	0,14	0,83

Pasibaigus saulės modulį išmontavimo procesui, turi būti utilizuojami klijai, kuriais buvo tvirtinami saulės modulį komponentai. Klijai priskiriami prie pavojingų atliekų, todėl jie negali būti perdirbami. Priimama, kad klijai utilizavimui pridudami Vilniaus apskrities atliekų tvarkymo centrui UAB „VAATC“. 1 kg klijų utilizavimo kaina yra 1,05 Eur įskaitant PVM [44]. Kiekvieno saulės modulio tipo 1 kW tenkantis klijų svoris ir apskaičiuoti utilizavimo kaštai pateikiami 18 lentelėje (žr. 18 lentelę).

18 lentelė. Saulės moduliu komponentų tvirtinimo klijų utilizavimo kaštai

Saulės modulis	Komponentas	Svoris, kg	Utilizavimo kaštai, Eur/kW
Standartinis monokristalinis	Klijai	0,636	0,668
Stiklas/stiklas		0,967	1,015

Apskaičiavus visų saulės modulio perdirbimo ir utilizavimo procesų kaštus, įvertinami kiekvieno komponento atskyrimo kaštai. Visas išmontavimo procesas yra automatizuotas, todėl vertinama tik elektros energija, sunaudojama kiekvieno saulės modulio komponento atskyrimui. Procesų priežiūrai bei įrengimų remontui reikalingas darbuotojas, todėl priimama, kad 1 kW galiai tenkantys saulės moduliai išmontuojami per 1 valandą, o darbuotojo užmokestis skaičiuojamas 5 Eur/h. Darbuotojo užmokesčio kaštai įvertinti 22 ir 23 lentelėse (žr. 22 ir 23 lenteles). Standartinio monokristalinio ir stiklas/stiklas tipo saulės moduliu skirtingų komponentų atskyrimo metu sunaudoti energijos kiekiai, reikalingi kaštų apskaičiavimui naudojami iš Ugnės Venckūnaitės atlikto baigiamojo magistrinio darbo tyrimo „Skirtingų saulės moduliu gyvavimo ciklo lyginamasis tyrimas“. Norint gauti kuo tikslesnius duomenis ir įvertinti sezoninį kainų svyravimą, elektros energijos kaina apskaičiuojama priimant 2019–2021 m. „Nord Pool“ biržos metinių elektros energijos kainų vidurkį [53]. 2022 m. yra nevertinami todėl, kad tų metų vidutinė elektros energijos kaina dėl politinių veiksnių buvo neįprastai didelė. Vidutinė 2019–2021 m. elektros energijos kaina už 1 MWh yra 56,87 Eur, o 1 kWh kaina yra 0,057 Eur. Reguluojama elektros energijos kainos sudedamoji dalis, kurią sudaro skirstymo vidutinės ir žemos įtampos tinklais paslaugos kaina, perdavimo paslaugos kaina, sisteminių paslaugų kaina bei viešuosius interesus atitinkančių paslaugų (VIAP) kaina, priimama iš AB „Energijos skirstymo operatoriaus“ pateikiamų 2022 m. duomenų [54]. Elektros energijos 1 kWh galutinė kaina

ir kainos dedamosios pateikiamos 19 lentelėje (žr. 19 lentelę). Galutinė elektros energijos kaina apskaičiuota 0,16 Eur/kWh. Standartinio monokristalinio ir stiklas/stiklas tipo saulės modulių komponentų atskyrimo metu sunaudoti elektros energijos kiekiai ir apskaičiuoti kaštai pateikiami atitinkamai 20 ir 21 lentelėse (žr. 20 ir 21 lenteles).

19 lentelė. Elektros energijos kainos sudedamosios dalys

Elektros energijos kainos sudedamoji dalis	Elektros energijos kaina, Eur/kWh
Biržos kaina	0,057
Perdavimo paslaugos kaina	0,00712
Sisteminių paslaugų kaina	0,00613
Skirstymo vidutinės įtampos tinklais kaina	0,00928
Skirstymo žemosios įtampos tinklais kaina	0,03429
VIAP kaina	0,00321
Skirstymo paslaugos papildomos dedamosios kaina	0,0119
Iš viso be PVM:	0,1289
Iš viso su PVM:	0,16

20 lentelė. Standartinio monokristalinio tipo saulės modulio komponentų atskyrimo elektros energijos sąnaudos ir kaštai

Saulės modulis	Komponentas	Elektros energijos kiekis, kWh	Elektros energijos sąnaudų kaštai, Eur/kWh
Standartinis monokristalinis	Aliuminio rėmas	0,376	0,06
	Stiklas	1,500	0,24
	EVA plėvelė	0,002	0,000032
	Galinis sluoksnis	2,143	0,343
	Celės	3,429	0,549
		Iš viso: 7,45	Iš viso: 1,19

21 lentelė. Stiklas/stiklas tipo saulės modulio komponentų atskyrimo elektros energijos sąnaudos ir kaštai

Saulės modulis	Komponentas	Elektros energijos kiekis, kWh	Elektros energijos sąnaudų kaštai, Eur/kWh
Stiklas/stiklas	Stiklas	3,007	0,48
	POE plėvelė	0,003	0,0005
	Celės	3,429	0,549
		Iš viso: 6,439	Iš viso: 1,029

Ištyrus skirtingų tipų saulės modulių atskirų komponentų utilizavimo ir perdirbimo procesų kaštus, atskirai pagal kiekvieną etapą susumuojami visi standartinio monokristalinio ir stiklas/stiklas saulės modulio tipo utilizavimo ir perdirbimo kaštai, tenkantys 1 kW saulės elektrinės galios ir pateikiami 22 ir 23 lentelėse (žr. 22 ir 23 lenteles).

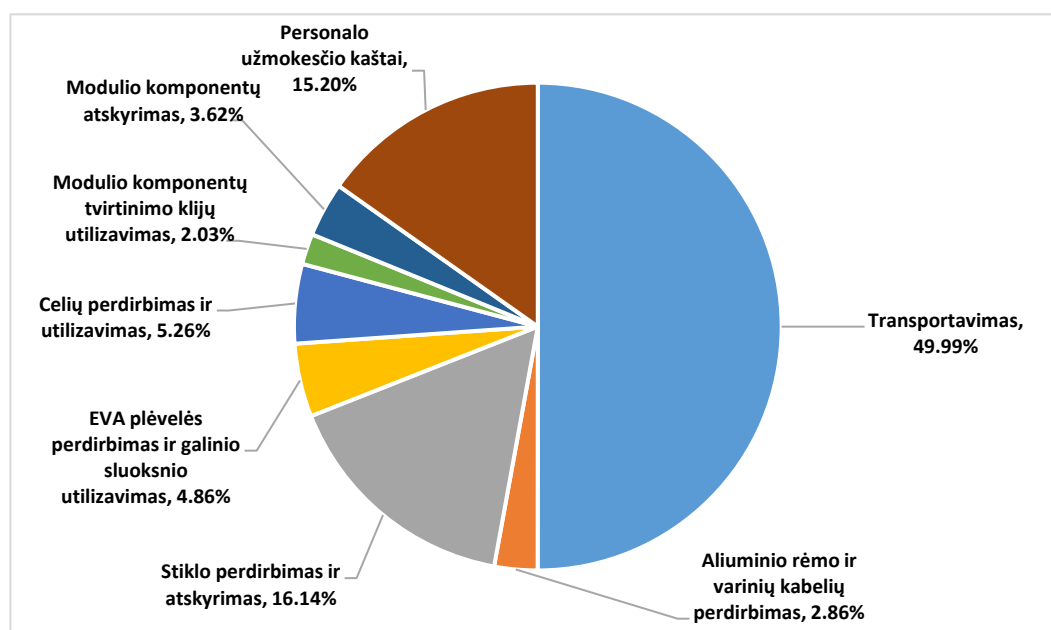
22 lentelė. Standartinio monokristalinio tipo saulės modulio utilizavimo ir perdirbimo etapų kaštai

Saulės modulis	Perdirbimo/utilizavimo etapas	Kaštai, Eur/kW
Standartinis monokristalinis	Transportavimas	16,44
	Aliuminio rėmo ir varinių kabelių perdirbimas	0,94
	Stiklo perdirbimas ir atskyrimas	5,31
	EVA plėvelės perdirbimas ir galinio sluoksnio utilizavimas	1,6
	Celių perdirbimas ir utilizavimas	1,73
	Modulio komponentų tvirtinimo klijų utilizavimas	0,668
	Modulio komponentų atskyrimas	1,19
	Personalo užmokesčio kaštai	5
		Iš viso: 32,89

23 lentelė. Stiklas/stiklas tipo saulės modulio utilizavimo ir perdirbimo etapų kaštai

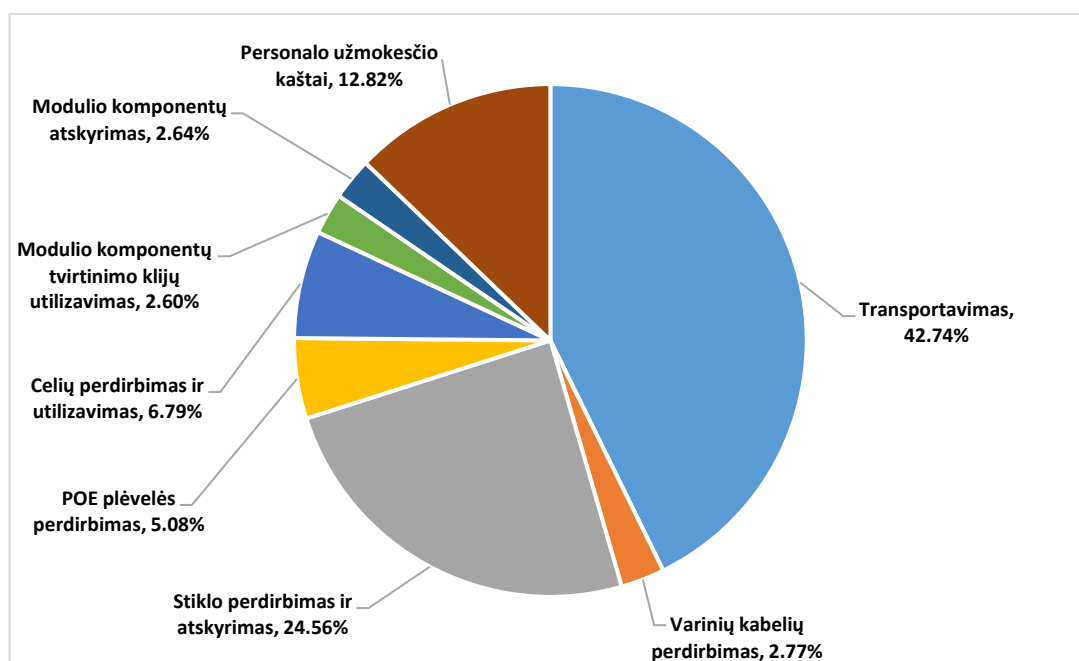
Saulės modulis	Perdirbimo/utilizavimo etapas	Kaštai, Eur/kW
Stiklas/stiklas	Transportavimas	16,67
	Varinių kabelių perdirbimas	1,08
	Stiklo perdirbimas ir atskyrimas	9,58
	POE plėvelės perdirbimas	1,98
	Celių perdirbimas ir utilizavimas	2,65
	Modulio komponentų tvirtinimo klijų utilizavimas	1,015
	Modulio komponentų atskyrimas	1,029
	Personalo užmokesčio kaštai	5
		Iš viso: 39

14 paveiksle (žr. 14 pav.) pavaizduota standartinio monokristalinio tipo saulės modulio visų komponentų perdirbimo ir utilizavimo etapų kaštų, tenkančių 1 kW saulės elektrinės galios, procentinė diagrama. Matoma, kad didžiausią galutinių išlaidų dalį sudaro transportavimo etapas, kuris užima 49,99 %, o bendra saulės modulio komponentų perdirbimo bei utilizavimo dalis sudaro 50,01 %, iš kurios aliuminio rėmo ir varinių kabelių perdirbimas užima 2,86 %, stiklo atskyrimas ir perdirbimas 16,14 %, EVA plėvelės perdirbimas ir galinio sluoksnio utilizavimas 4,86 %, celių perdirbimas ir utilizavimas 5,26 %, modulio komponentų atskyrimas 3,62 %, personalo užmokesčio kaštai 15,20 %, ir mažiausia dalis tenka modulio komponentų tvirtinimo klijų utilizavimo kaštams, kuri sudaro 2,03 % visų išlaidų.



14 pav. Standartinio monokristalinio tipo saulės modulio visų perdirbimo ir utilizavimo etapų procentinė kaštų diagrama (sudaryta autoriaus)

Stiklas/stiklas saulės modulių tipo procentinė perdirbimo bei utilizavimo išlaidų diagrama pateikiama 15 paveiksle (žr. 15 pav.). Transportavimo etapo kaštai sudaro 42,74 %, o saulės modulių sudedamųjų dalių perdirbimo kaštai 57,26 %, iš kurių varinių kabelių perdirbimo kaštai 2,77 %, stiklo perdirbimas ir atskyrimas sudaro 24,56 % galutinių kaštų, POE plėvelės perdirbimas 5,08 %, celių perdirbimas ir utilizavimas 6,79 %, modulių komponentų tvirtinimo klijų utilizavimas 2,60 %, modulių komponentų atskyrimas 2,64 % bei personalo užmokesčio kaštai 12,82 % visų utilizavimui tenkančių kaštų. Pastebima, kad didžiausią dalį galutinių utilizavimo ir perdirbimo išlaidų sudaro transportavimo etapas, o mažiausią – modulių komponentų tvirtinimo klijų utilizavimo bei komponentų atskyrimo etapai, sudarantys vienodą procentinę visų kaštų dalį. Lyginant standartinio monokristalinio ir stiklas/stiklas saulės modulių kaštus, pastebima, kad standartinio monokristalinio tipo saulės modulių 1 kW tenkantys transportavimo kaštai yra daugiau nei 7 % didesni negu stiklas/stiklas saulės modulių. Stiklo perdirbimui ir atskyrimui tenkantys stiklas/stiklas saulės modulių kaštai yra daugiau nei 8 % didesni negu standartinio monokristalinio tipo saulės modulių. Tokį skirtumą lemia tai, kad stiklas/stiklas saulės modulis sudarytas iš dviejų stiklo sluoksnių, kurie atitinkamai sudaro didesnę dalį bendro saulės modulių svorio.



15 pav. Stiklas/stiklas tipo saulės modulių visų perdirbimo ir utilizavimo etapų procentinė kaštų diagrama (sudaryta autoriaus)

Apskaičiuotos išlaidos perskaičiuojamos pagal pasirinktas 1–5 kW ir 6–10 kW saulės elektrinių galių ribas ir 4 lentelėje pateiktas į šias galių ribas patenkančias galias. Standartinio monokristalinio ir stiklas/stiklas tipo saulės modulių utilizavimo ir perdirbimo išlaidos, tenkančios pasirinktoms galioms atitinkamai pateikiamos 24 ir 25 lentelėse (žr. 24 ir 25 lenteles).

24 lentelė. Standartinio monokristalinio tipo saulės modulio utilizavimo ir perdirbimo kaštai pagal galių ribas

Saulės modulis	Galios riba, kW	Galia, kW	Utilizavimo ir perdirbimo kaštai, Eur
Standartinis monokristalinis	1–5	3,195	105,08
		3,905	128,44
	6–10	6,035	198,49
		9,94	326,93

25 lentelė. Stiklas/stiklas tipo saulės modulio utilizavimo ir perdirbimo kaštai pagal galių ribas

Saulės modulis	Galios riba, kW	Galia, kW	Utilizavimo ir perdirbimo kaštai, Eur
Stiklas/stiklas	1–5	3,195	124,61
		3,905	152,29
	6–10	6,035	235,37
		9,94	387,66

Atlikus skirtingų tipų saulės modulių utilizavimo kaštų analizę, apskaičiuojamos ir įvertinamos saulės modulių sąnaudos per visą gyvavimo ciklą. Žaliavų gavybos, transportavimo bei gamybos etapų sąnaudos naudojamos iš pateiktų duomenų 7 lentelėje (žr. 7 lentelę). 1 kW tenkantys standartinio monokristalinio ir stiklas/stiklas tipo saulės modulių apskaičiuoti kaštai įvertinus visus gyvavimo ciklo etapus pateikiami 26 lentelėje (žr. 26 lentelę).

26 lentelė. Saulės modulių kaštai per visą LCA

Saulės modulis	LCA kaštai, Eur/kW
Standartinis monokristalinis	672,89
Stiklas/stiklas	679

Išanalizavus saulės modulių kaštus pagal gyvavimo ciklo sąnaudų vertinimo metodiką matoma, kad stiklas/stiklas tipo saulės fotomodulio kaštai per visą gyvavimo ciklą sudaro 679 Eur ir yra nedaug didesni už standartinio monokristalinio tipo saulės modulio kaštus, kurie yra 672,89 Eur. Kadangi koncentruojamasi į saulės modulių komponentų perdirbimo bei utilizavimo kaštus, pastebima, kad kaštų skirtumui didžiausią įtaką turi dvigubas stiklo sluoksnis stiklas/stiklas tipo saulės moduluose lyginant su standartinio monokristalinio tipo saulės moduliais. Stiklas/stiklas tipo saulės modulis neturi aliuminio rėmo bei galinio sluoksnio, priešingai negu standartinio monokristalinio tipo saulės modulis, tačiau galutiniam kaštams tai didelės įtakos neturi, kadangi aliuminio rėmas gali būti pilnai perdirbamas, o galinis sluoksnis utilizuojamas nedideliais kaštais.

Apskaičiavus ir įvertinus skirtingų tipų saulės modulių sąnaudas, tenkančias 1 kW per visą LCA, apskaičiuojami preliminarūs kaštai, tenkantys prognozuojamiems naujiems saulės elektrinių pajėgumams iki 2030 m. Lietuvoje pagal 3.1 skyriuje pateikiamus duomenis. Kadangi nėra žinoma, kurie saulės modulių tipai kokius pajėgumus sudarys, priimamas apskaičiuotas standartinio monokristalinio ir stiklas/stiklas tipų saulės modulių kaštų vidurkis, kuris 1 kW yra 675,95 Eur, o 1 MW 675 950 Eur. Kaštai skaičiuojami vertinant žaliavų gavybos, gamybos, transportavimo bei utilizavimo/perdirbimo etapų sąnaudas. Apskaičiuoti kaštai, tenkantys prognozuojamai instaliuotai saulės elektrinių galiai iki 2030 m. pateikiami 27 lentelėje (žr. 27 lentelę).

27 lentelė. LCA kaštai prognozuojamiems saulės jėgainių pajėgumams Lietuvoje iki 2030 m.

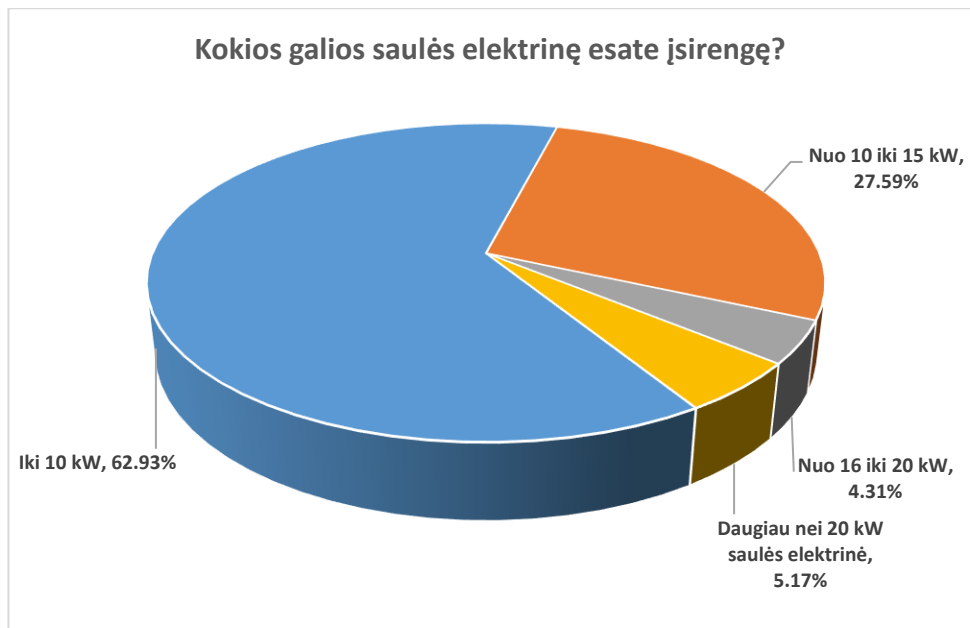
Metai	Prognozuojama saulės elektrinių galia, MW	LCA kaštai, Eur
2023–2025	339	229 147 050
2026–2027	300	202 785 000
2028–2030	135	91 253 250

Matoma, kad 2023–2025 m. prognozuojama instaliuoti 339 MW arba 339 000 kW galios naujų saulės elektrinių pajėgumų Lietuvoje, o šiai galiai tenkantys LCA kaštai sudaro 229 147 050 Eur. 2026–2027 m. laikotarpiu planuojama įrengti naujus 300 MW arba 300 000 kW galios saulės elektrinių, kurių LCA kaštai yra 202 785 000 Eur. 2028–2030 m. prognozuojamas 135 MW arba 135 000 kW saulės elektrinių galios padidėjimas, o viso gyvavimo ciklo sąnaudos, tenkančios šiai galiai yra 91 253 250 Eur.

3.3. Apklausa

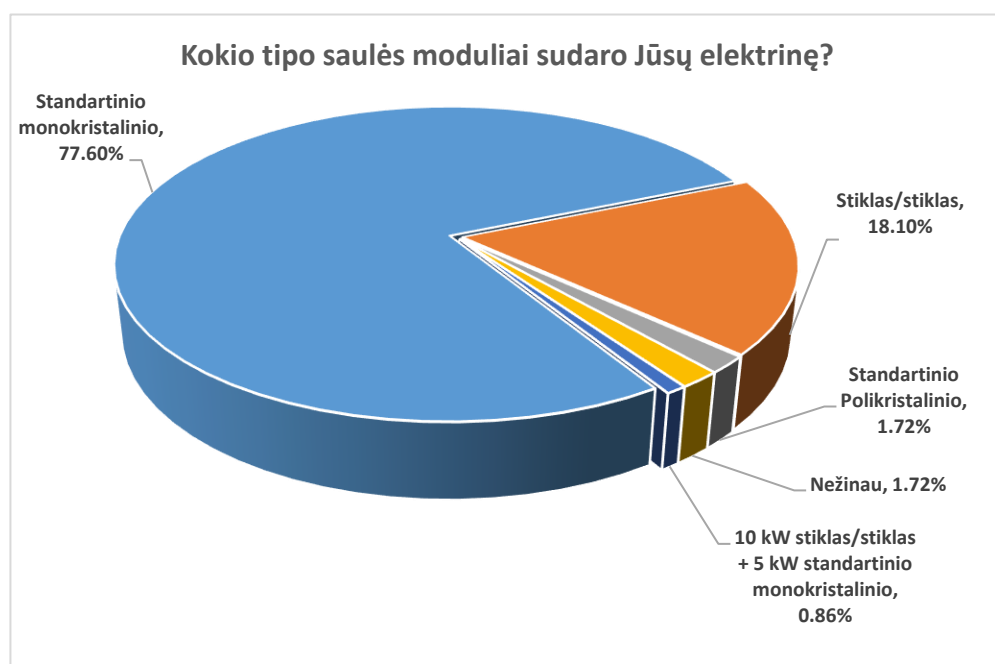
Siekiant išsiaiškinti buitinių vartotojų sąmoningumą aplinkos apsaugos aspektu bei įvertinti, kaip keičiasi vartotojams priimtinas saulės elektrinės atsipirkimo laikas įvertinus utilizavimo kaštus, buvo parengta bei atlikta apklausa. Apklausa buvo sudaryta naudojant „Google Docs“ sąsają ir susideda iš 6 klausimų su atsakymo variantais bei galimybe respondentui įrašyti savo atsakymą, jei nė vienas iš pateiktų nėra tinkamas. Apklausa buvo skleidžiama 6-iose socialinio tinklo „Facebook“ grupėse, kurios yra skirtos diskusijoms apie saulės elektrines. Tokiu būdu pasiekama reikalinga tikslinė auditorija, t. y. buitiniai vartotojai, įsirengę saulės elektrinę. Apklausa buvo vykdoma dvi savaites ir joje savo atsakymus pateikė 116 respondentų. Surinkti duomenys buvo apdorojami ir analizuojami „Microsoft Excel“ programine įranga.

Pirmasis apklausos klausimas yra „Kokios galios saulės elektrinę esate įsirengę?“ bei pateikiamas su 4 galimais atsakymo variantais. 16 paveiksle (žr. 16 pav.) pateikiama atsakymo rezultatų procentinė diagrama. Matoma, kad daugiausiai respondentų turi įsirengę iki 10 kW saulės elektrinę, iš viso 62,93 % arba 73 vartotojai. 27,59 % arba 32 respondentai turi įsirengę nuo 10 iki 15 kW, 4,31 % arba 5 respondentai nuo 16 iki 20 kW, o 5,17 % arba 6 respondentai turi įsirengę daugiau nei 20 kW saulės elektrinę.



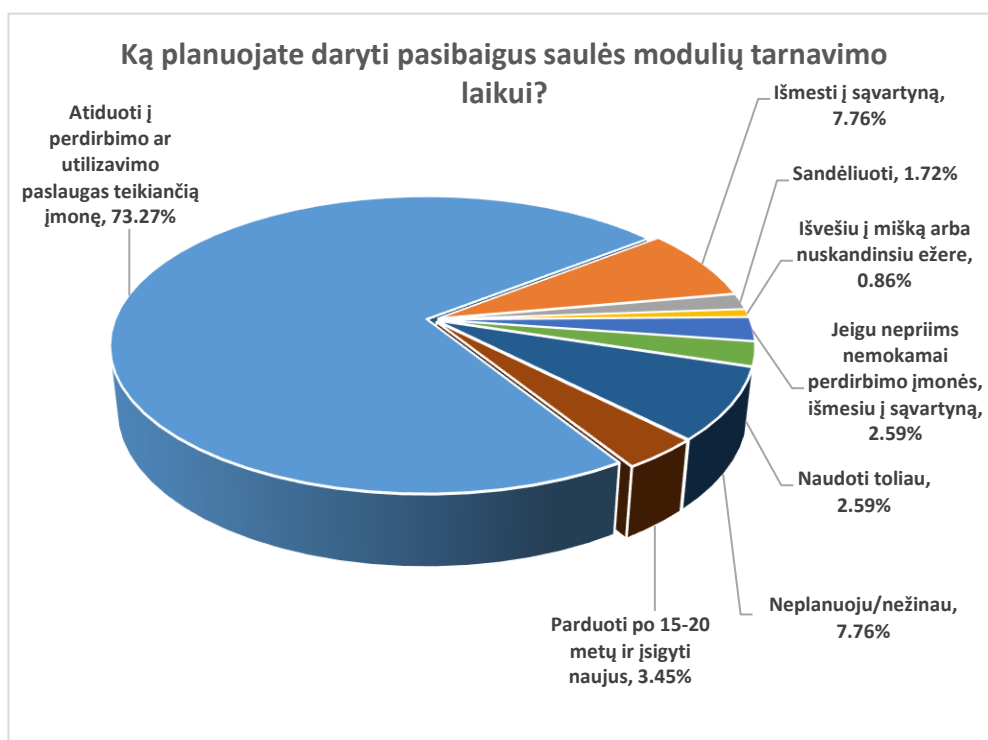
16 pav. 1 apklausos klausimo rezultatai (sudaryta autoriaus)

2 klausimu buvo siekiama išsiaiškinti, kokio tipo saulės moduliai sudaro vartotojų elektrinę tam, kad būtų galima tiksliau įvertinti, ar atsipirkimo laikas, įvertinus utilizavimo sąnaudas, vartotojams vis dar yra priimtinas bei kokią utilizavimo išlaidų sumą respondentai galėtų skirti 1 saulės modulio utilizavimui. 17 paveiksle (žr. 17 pav.) pateikiami atsakymų rezultatai procentais. Matoma, kad didžiąją dalį vartotojų saulės elektrinių sudaro standartinio monokristalinio tipo saulės moduliai: iš viso 77,60 % arba 90 apklaustųjų. Stiklas/stiklas tipo saulės modulius turi įsirengę 18,10 % arba 21 vartotojas. Respondentai, neradę jiems tinkamo atsakymo varianto, patys įrašė atsakymą ir 2 respondantai arba 1,72 % atsakė, kad jų saulės elektrinę sudaro standartinio polikristalinio tipo saulės moduliai, tiek pat apklaustųjų nežinojo, o vienas vartotojas, sudarantis 0,86 % visų apklaustųjų atsakė, kad jo saulės elektrinė yra mišri, sudaryta iš standartinio monokristalinio ir stiklas/stiklas tipo saulės modulių.



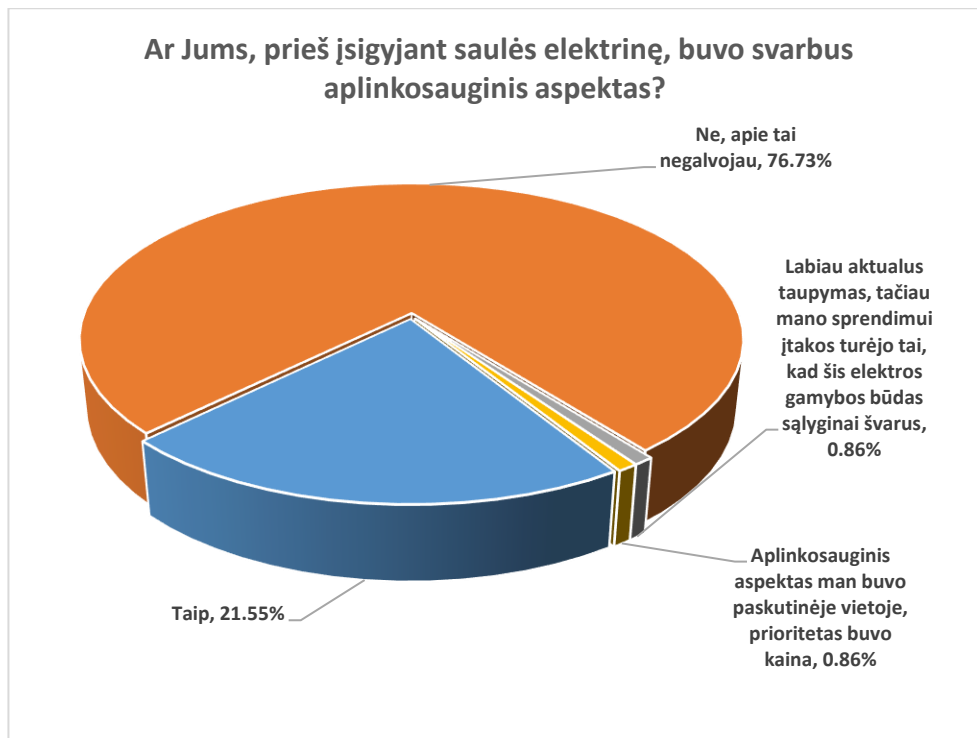
17 pav. 2 apklausos klausimo rezultatai (sudaryta autoriaus)

3 klausimu buvo siekiama įvertinti vartotojų sąmoningumą aplinkos apsaugos aspektu pateikiant 3 atsakymo variantus. Iš 18 (žr. 18 pav.) paveiksle pateikiamos diagramos matoma, kad 73,27 % arba 85 apklaustieji sąmoningai vertina aplinkos apsaugą ir pasibaigus saulės modulių tarnavimo laikui planuoja modulius atiduoti į perdirbimo ar utilizavimo paslaugas teikiančią įmonę. 7,76 % arba 9 vartotojai atsakė, kad saulės modulius planuoja išmesti į sąvartyną, o dar tiek pat atsakė, kad šiuo metu neplanuoja arba nežino. 2 respondentai arba 1,72 % žada saulės modulius sandėliuoti, 0,86 % išvežti į mišką arba nuskandinti ežere, o 2,59 % žada išmesti į sąvartyną, jeigu neturės galimybės priduoti utilizavimui/perdirbimui nemokamai. Pastebima, kad iš viso netgi 12,93 % arba 15 respondentų aplinkos apsaugos aspektas nėra svarbus. 2,59 % žada naudoti modulius toliau pasibaigus jų eksploatavimo laikui, 3,45 % vartotojų žada parduoti turimus saulės modulius ir įsigyti naujus.



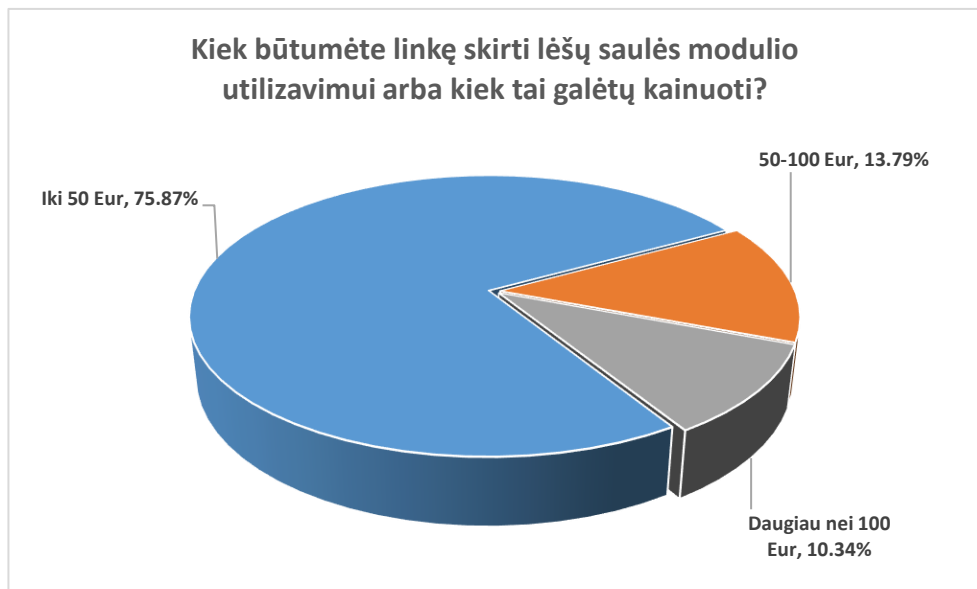
18 pav. 3 apklausos klausimo rezultatai (sudaryta autoriaus)

4 klausimu, taip pat kaip ir 3, buvo siekiama įvertinti vartotojų sąmoningumą aplinkos apsaugos aspektu pateikiant 2 atsakymo variantus. 19 paveiksle (žr. 19 pav.) pateikiama atsakymo rezultatų procentinė diagrama, iš kurios matoma, kad tik 21,55 % arba 25 vartotojai prieš įsigyjant saulės elektrinę apsvarstė aplinkos apsaugos aspektą, o 76,73 % arba 89 respondentai atsakė, kad apie tai negalvojo ir jiems tai nebuvo aktualu. 1 vartotojas arba 0,86 % atsakė, kad prioritetas buvo kaina, o aplinkosauginis aspektas buvo visiškai nesvarbus, taip pat 1 vartotojas atsakė, kad labiau aktualus buvo taupymo negu aplinkos apsaugos aspektas, tačiau taip pat įtakos turėjo ir tai, kad saulės šviesos energija yra atsinaujinantis elektros energijos šaltinis.



19 pav. 4 apklausos klausimo rezultatai (sudaryta autoriaus)

5 klausimas buvo sudarytas siekiant išsiaiškinti, kokia išlaidų suma, skirta saulės modulio utilizavimui/perdirbimui, būtų priimtina vartotojams. Iš 20 (žr. 20 pav.) paveiksle pateikiamų atsakymų rezultatų pastebima, kad didžiajai daliai, 75,87 % arba 88 respondentams priimtina suma vieno saulės modulio utilizavimui yra iki 50 Eur. 13,79 % arba 16 vartotojų būtų linkę skirti 50–100 Eur, o 10,34 % arba 12 vartotojų būtų priimtina daugiau nei 100 Eur išlaidų suma vieno saulės modulio utilizavimui.



20 pav. 5 apklausos klausimo rezultatai (sudaryta autoriaus)

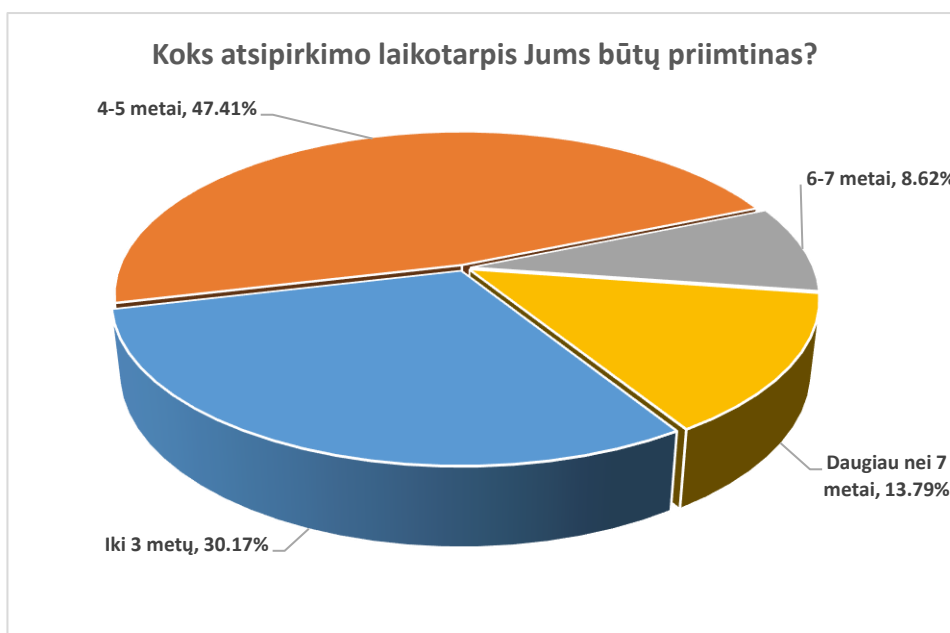
Analizuojant apklausos rezultatus pastebima, kad 76,67 % arba 69 vartotojams, turintiems saulės elektrinę, sudarytą iš standartinio monokristalinio tipo saulės modulių, priimtina utilizavimo suma yra iki 50 Eur. 12,22 % arba 11 vartotojų priimtina suma yra 50–100 Eur, o 10 vartotojų, kurie sudaro

11,11 %, galėtų skirti daugiau nei 100 Eur vieno saulės modulio utilizavimui. Vienas standartinis monokristalinis saulės modulis yra 365 W galingumo. Kadangi 3.2.2. skyrelyje utilizavimo kaštai buvo skaičiuojami tenkantys 1 kW saulės modulio, jie yra perskaičiuojami pagal saulės modulio galią ir gaunama 12 Eur. Iš apklausos rezultatų pastebima, kad visiems apklaustiesiems tokia suma, skirta utilizavimui, būtų priimtina. 76,19 % arba 16 vartotojų, kurie turi įsirengę saulės elektrinę, sudarytą iš stiklas/stiklas tipo saulės modulių, vieno tokio tipo saulės modulio utilizavimui galėtų skirti iki 50 Eur. Nuo 50 iki 100 Eur galėtų mokėti 14,29 %, o daugiau nei 100 Eur – 9,52 % vartotojų. Vieno stiklas/stiklas tipo saulės modulio galia yra 360 W, todėl šiai galiai tenkantys utilizavimo kaštai yra 14 Eur. Iš apklausos rezultatų matoma, kad visiems apklausoje dalyvavusiems vartotojams tokia išlaidų suma būtų priimtina. Daroma išvada, kad vartotojams, kurių elektrinę sudaro tiek standartinio monokristalinio, tiek stiklas/stiklas tipo saulės moduliai, apskaičiuota vieno modulio utilizavimui/perdirbimui tenkanti kaštų suma yra priimtina. 5 klausimo rezultatai, išanalizuoti pagal pasirinktą saulės modulio tipą 2 klausime, pateikiami 28 lentelėje (žr. 28 lentelę).

28 lentelė. 5 apklausos klausimo rezultatai pagal saulės modulio tipą

Saulės modulis	Išlaidos, Eur		
	<50	50–100	>100
Standartinis monokristalinis	76,67 %	12,22 %	11,11 %
Stiklas/stiklas	76,19 %	14,29 %	9,52 %

6 klausimo tikslas yra išsiaiškinti, ar buitiniams vartotojams saulės elektrinės atsipirkimo laikas, įvertinus utilizavimo kaštus, vis dar yra priimtinas. Iš 21 paveiksle (žr. 21 pav.) pateikiamos atsakymų rezultatų diagramos matoma, kad 47,41 % arba 55 respondentams yra priimtinas 4–5 metų atsipirkimo laikas, 35 vartotojams, kurie sudaro 30,17 % apklaustųjų, iki 3 metų, 13,79 % daugiau nei 7 metai, o 8,62 % 6–7 metai.



21 pav. 6 apklausos klausimo rezultatai (sudaryta autoriaus)

Siekiant tiksliau išanalizuoti rezultatus, iš 29 lentelės (žr. 29 lentelę), pastebima, kad 28 vartotojams arba 31,11 % visų respondentų, turinčių saulės elektrinę, sudarytą iš standartinio monokristalinio tipo

saulės modulių ir kurios galia yra iki 10 kW, priimtinas atsipirkimo laikotarpis yra 4–5 metai, 2,22 % 6–7 metai, 23,33 % mažiau negu 3 metai, o 7,78 % daugiau negu 7 metai. 15,56 % vartotojų, kurių elektrinės galia yra 10–15 kW, priimtinas atsipirkimo laikas yra 4–5 metai, 3,33 % 6–7 metai bei tokiam pačiam kiekiui vartotojų yra priimtinas didesnis nei 7 metų, o 4,44 % mažesnis negu 3 metų atsipirkimo laikas. 2,22 % 16–20 kW galios elektrinę turinčių vartotojų tikisi, kad jų investicija atsipirks per 4–5 metus, tiek pat vartotojų, kad mažiau nei per 3 metus, o 1,11 % vartotojų yra priimtinas ir didesnis negu 7 metų atsipirkimo laikas. Nė vienas apklausos dalyvis, turintis 16–20 kW saulės elektrinę nesitiki, kad ji atsipirks per 6–7 metus. 2,22 % vartotojų, turinčių didesnės nei 20 kW galios saulės elektrinę, priimtinas atsipirkimo laikotarpis yra 4–5, o 1,11 % mažiau negu 3 metai. Matoma, kad nė vienas iš respondentų nepasirinko 6–7 ir didesnio nei 7 metų laikotarpio kaip priimtino. Apskaičiuota, kad standartinio monokristalinio tipo saulės elektrinę atsipirks po 4,43 metų. Toks atsipirkimo laikas yra priimtinas 68,88 % arba 62 vartotojams, turintiems tokio tipo saulės modulius. Kadangi nevertinant utilizavimo kaštų atsipirkimo laikas apskaičiuotas 4,26 metų, pastebima, kad jis yra tinkamas tam pačiam kiekiui respondentų, todėl daroma išvada, kad utilizavimo kaštų įvertinimas neturi poveikio atsipirkimo laikui, kurio tikisi vartotojai.

29 lentelė. Vartotojams priimtino atsipirkimo laiko procentinė išraiška pagal standartinio monokristalinio tipo saulės elektrinės galią

Standartinio monokristalinio tipo saulės elektrinės galia, kW	Atsipirkimo laikas, metai			
	4–5	6–7	<3	>7
<10	31,11 %	2,22 %	23,33 %	7,78 %
10–15	15,56 %	3,33 %	4,44 %	3,33 %
16–20	2,22 %	-	2,22 %	1,11 %
>20	2,22 %	-	1,11 %	-

30 lentelėje (žr. 30 lentelę) pavaizduota vartotojus tenkinančio atsipirkimo laiko rezultatai, išreikšti procentais ir suskirstyti pagal vartotojų turimas saulės elektrinių galias. Matoma, kad 33,33 % vartotojų, turinčių iki 10 kW saulės elektrinę, sudarytą iš stiklas/stiklas saulės modulių, tenkina 4–5 metų atsipirkimo laikas. 4,76 % apklaustųjų yra priimtinas 6–7 metų bei tokiam pačiam kiekiui vartotojų daugiau nei 7 metų atsipirkimo laikas, o 19,05 % mažiau negu 3 metų. 10–15 kW ir mažiau negu 3 kW saulės elektrinę turintys respondentai, kurie sudaro po 4,76 % atsakė, kad jiems priimtinas yra 4–5 bei mažiau negu 3 metų atsipirkimo laikas, o 6–7 metų atsipirkimo laikotarpis tenkina 9,52 % apklaustųjų. Nė vienas vartotojas, dalyvavęs apklausoje, nebuvo įsirengęs 16–20 kW galios saulės elektrinės, kurią sudarytų stiklas/stiklas tipo saulės moduliai, todėl duomenų apie jiems tinkamą atsipirkimo laiką nėra. Daugiau nei 20 kW galios saulės elektrinę įsirengę vartotojai, kurie sudaro po 4,76 % visų apklaustųjų, turinčių stiklas/stiklas tipo saulės modulių elektrinę, atsakė, kad jiems priimtinas būtų 6–7, daugiau nei 7 bei mažiau negu 3 metų atsipirkimo laikotarpis. Tyrimo metu apskaičiuota, kad saulės elektrinė, sudaryta iš stiklas/stiklas tipo saulės modulių, įvertinus utilizavimo kaštus, atsipirks po 4,44 metų. Toks atsipirkimo laikotarpis yra priimtinas iš viso 71,43 % vartotojų. Tai yra 2,55 % daugiau vartotojų priimtinas atsipirkimo laikas negu apskaičiuotas standartinio monokristalinio tipo saulės modulių elektrinėms. Nevertinant utilizavimo sąnaudų, apskaičiuota, kad

stiklas/stiklas saulės elektrinės atsipirkimo laikas yra 4,24 metų. Todėl pastebima, kad tiek įvertinus, tiek neįvertinus utilizavimo kaštų, atsipirkimo laikas yra vis dar priimtinas tokiam pačiam kiekiui vartotojų, įsirengusių stiklas/stiklas tipo saulės modulių elektrinę.

30 lentelė. Vartotojams priimtino atsipirkimo laiko procentinė išraiška pagal stiklas/stiklas tipo saulės elektrinės galią

Stiklas/stiklas tipo saulės elektrinės galia, kW	Atsipirkimo laikas, metai			
	4–5	6–7	<3	>7
<10	33,33 %	4,76 %	19,05 %	4,76 %
10–15	4,76 %	9,52 %	4,76 %	4,76 %
16–20	-	-	-	-
>20	-	4,76 %	4,76 %	4,76 %

3.4. Ekonominis vertinimas

Ekonominiai skaičiavimai atliekami norint įvertinti saulės modulių utilizavimo bei perdirbimo išlaidų įtaką atsipirkimo laikotarpiui bei LCOE dydžiui. Skaičiavimai atlikti skaičiuojant, kad elektros energijos kaina yra 0,16 Eur/kWh bei darant prielaidą, kad elektros energijos kaina kiekvienais metais auga po 2,5 %, o diskonto norma taip pat pasirenkama 2,5 %. Standartinio monokristalinio tipo saulės modulio eksploatavimo laikas, naudojamas atliekant skaičiavimus, yra 20 metų, o stiklas/stiklas tipo – 30 metų. Standartinio monokristalinio ir stiklas/stiklas tipo saulės modulių pinigų srautai, neįskaitant utilizavimo kaštų, pateikiami atitinkamai 3 ir 5 prieduose (žr. 3 ir 5 priedus). Standartinio monokristalinio tipo saulės modulio pinigų srautai, įskaitant utilizavimo bei perdirbimo kaštus, pateikiami 4 priede (žr. 4 priedą), o stiklas/stiklas tipo – 6 priede (žr. 6 priedą). Skaičiavimuose priimama, kad abiejų tipų saulės modulių kintami kaštai yra nevertinami ir yra lygūs 0 Eur, pastovūs kaštai standartinio monokristalinio tipo saulės modulio 12,4 Eur, o stiklas/stiklas tipo 11,3 Eur. Siekiant gauti tikslesnius rezultatus, elektros energijos generacija iš saulės modulių apskaičiuota atsižvelgiant į galios išnaudojimo koeficientus kiekvieną valandą, o pajamos apskaičiuotos atsižvelgiant į elektros energijos kainų valandinius svyravimus. Visi ekonominiai skaičiavimai atliekami 4 lentelėje (žr. 4 lentelę) pateiktoms galių riboms atskirai abiem saulės modulių tipams. 31 ir 32 lentelėse (žr. 31 ir 32 lenteles) atitinkamai pateikiami standartinio monokristalinio ir stiklas/stiklas tipo saulės modulių ekonominiai rodikliai vertinant žaliavų gamybos, saulės modulio gamybos, transportavimo bei rangos darbų kaštus, tačiau nevertinant utilizavimo ir perdirbimo kaštų. Lyginant grynąją dabartinę vertę (NPV) matoma, kad abiejų saulės modulio tipų galiai didėjant, didėja ir NPV reikšmė. Stiklas/stiklas tipo saulės modulio NPV reikšmės visoms galioms yra didesnės apytiksliai 1,6 karto. Vertinant vidinės pelno normos (IRR) rodiklį pastebima, kad šis rodiklis nuo instaliuotos saulės modulio galios nepriklauso ir parodo, prie kokios diskonto normos NPV būtų lygus 0. Stiklas/stiklas tipo saulės modulio IRR yra nedaug didesnis už standartinio monokristalinio tipo ir sudaro 34,15 %, o standartinio monokristalinio 33,87 %. Lyginant LCOE dydį, pastebima, kad stiklas/stiklas tipo saulės modulio LCOE yra 0,07 Eur ir jis yra nedaug mažesnis už monokristalinio tipo saulės modulio, kuris yra 0,08 Eur. Atsipirkimo laikotarpis abiem saulės modulių tipams gaunamas panašus ir sudaro apytiksliai 4 metus ir 2 mėnesius. Pagal gautus NPV rodiklius daroma

išvada, kad į abiejų saulės modulių skirtingų galių elektrines verta investuoti, nes visais atvejais $NPV > 0$, tačiau vertinant IRR ir LCOE rodiklius matoma, kad truputį pelningesnė investicija yra į stiklas/stiklas tipo saulės modulius, kurių IRR yra 0,28 % didesnis, o LCOE 0,01 Eur mažesnis negu standartinio monokristalinio tipo.

31 lentelė. Standartinio monokristalinio tipo saulės modulio ekonominiai skaičiavimai be utilizavimo kaštų

Saulės modulis	Galios riba, kW	Galia, kW	NPV, Eur	IRR, %	LCOE, Eur	Atsipirkimo laikas, metai
Standartinis monokristalinis	1–5	3,195	10615,97	33,87	0,08	4,26
		3,905	12975,07			
	6–10	6,035	20052,38			
		9,94	33027,45			

32 lentelė. Stiklas/stiklas tipo saulės modulio ekonominiai skaičiavimai be utilizavimo kaštų

Saulės modulis	Galios riba, kW	Galia, kW	NPV, Eur	IRR, %	LCOE, Eur	Atsipirkimo laikas, metai
Stiklas/stiklas	1–5	3,195	17091,50	34,15	0,07	4,24
		3,905	20889,61			
	6–10	6,035	32283,94			
		9,94	53173,54			

Atlikti skaičiavimai įvertinus utilizavimo bei perdirbimo kaštus abiem saulės modulių tipams pateikiami 33 ir 34 lentelėse (žr. 33 ir 34 lenteles). Pastebima, kad įvertinus utilizavimo kaštus standartinio monokristalinio tipo saulės modulio NPV reikšmė kiekvienai galiai sumažėja apytiksliai 1 %, o stiklas/stiklas tipo sumažėja 0,73 %. Didesnis skirtumas įvertinus utilizavimo kaštus pastebimas lyginant IRR reikšmę, kuri standartinio monokristalinio tipo saulės moduliui sumažėja 1,57 %, o stiklas/stiklas tipo taip pat sumažėja truputį daugiau – 1,82 %. Standartinio monokristalinio ir stiklas/stiklas tipo saulės modulių LCOE dydžiui utilizavimo kaštai įtakos neturėjo, nes abiem atvejais elektros energijos gamybos svertiniai kaštai gauti atitinkamai 0,08 Eur ir 0,07 Eur. Įvertinus utilizavimo kaštus matoma, kad monokristalinio tipo saulės modulio atsipirkimo laikotarpis padidėja 2 mėnesiais, o stiklas/stiklas tipo neženkliai daugiau – 2,5 mėnesio. Bendrai vertinant visus ekonominius rodiklius, daroma išvada, kad stiklas/stiklas tipo saulės moduliai yra ekonomiškai pranašesni už standartinio monokristalinio tipo, nes gautos didesnės NPV reikšmės bei vidinės pelno normos rodiklis, o atsipirkimo laikotarpis nedaug didesnis už monokristalinio tipo saulės modulio, vertinant tai, kad stiklas/stiklas tipo saulės modulio eksploatavimo laikas yra 30, o monokristalinio tipo 20 metų.

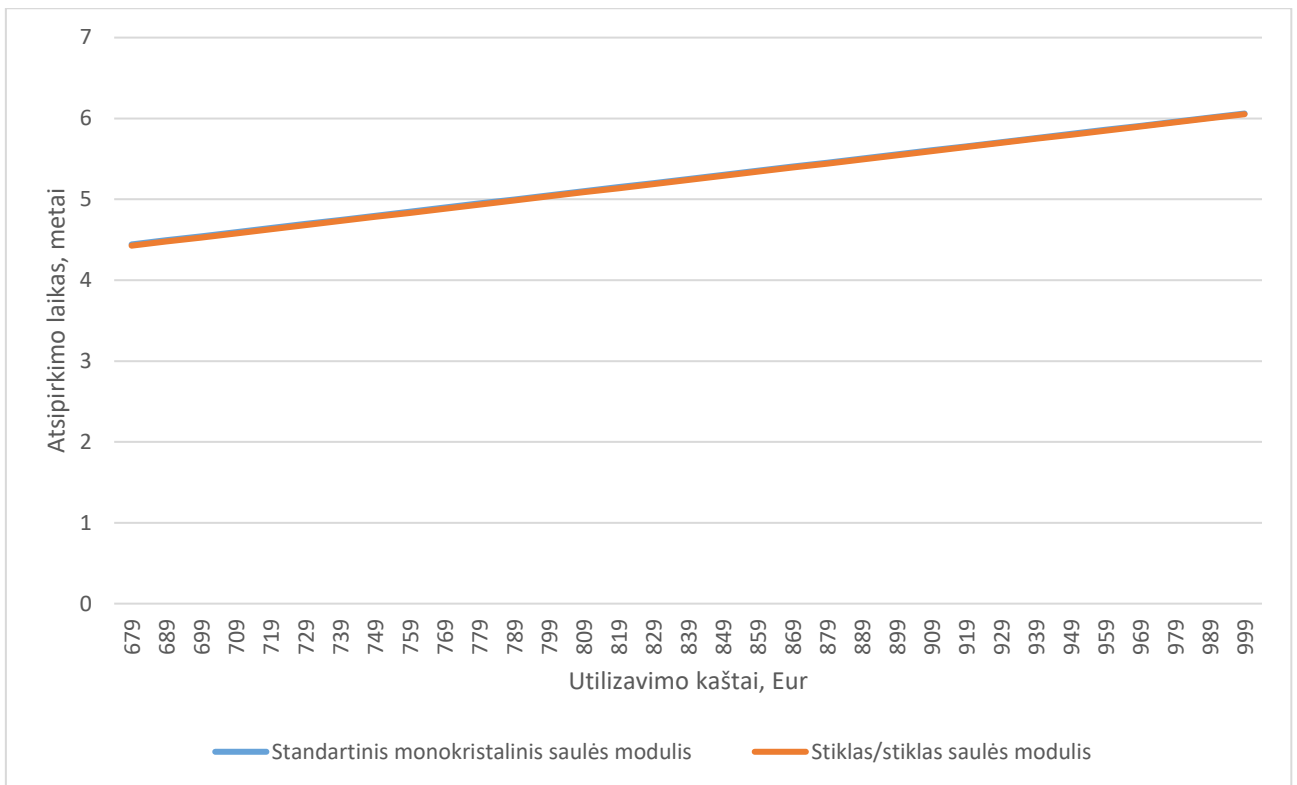
33 lentelė. Standartinio monokristalinio tipo saulės modulio ekonominiai skaičiavimai su utilizavimo kaštais

Saulės modulis	Galios riba, kW	Galia, kW	NPV, Eur	IRR, %	LCOE, Eur	Atsipirkimo laikas, metai
Standartinis monokristalinis	1–5	3,195	10510,88	32,30	0,08	4,43
		3,905	12846,64			
	6–10	6,035	19853,89			
		9,94	32700,53			

34 lentelė. Stiklas/stiklas tipo saulės modulio ekonominiai skaičiavimai su utilizavimo kaštais

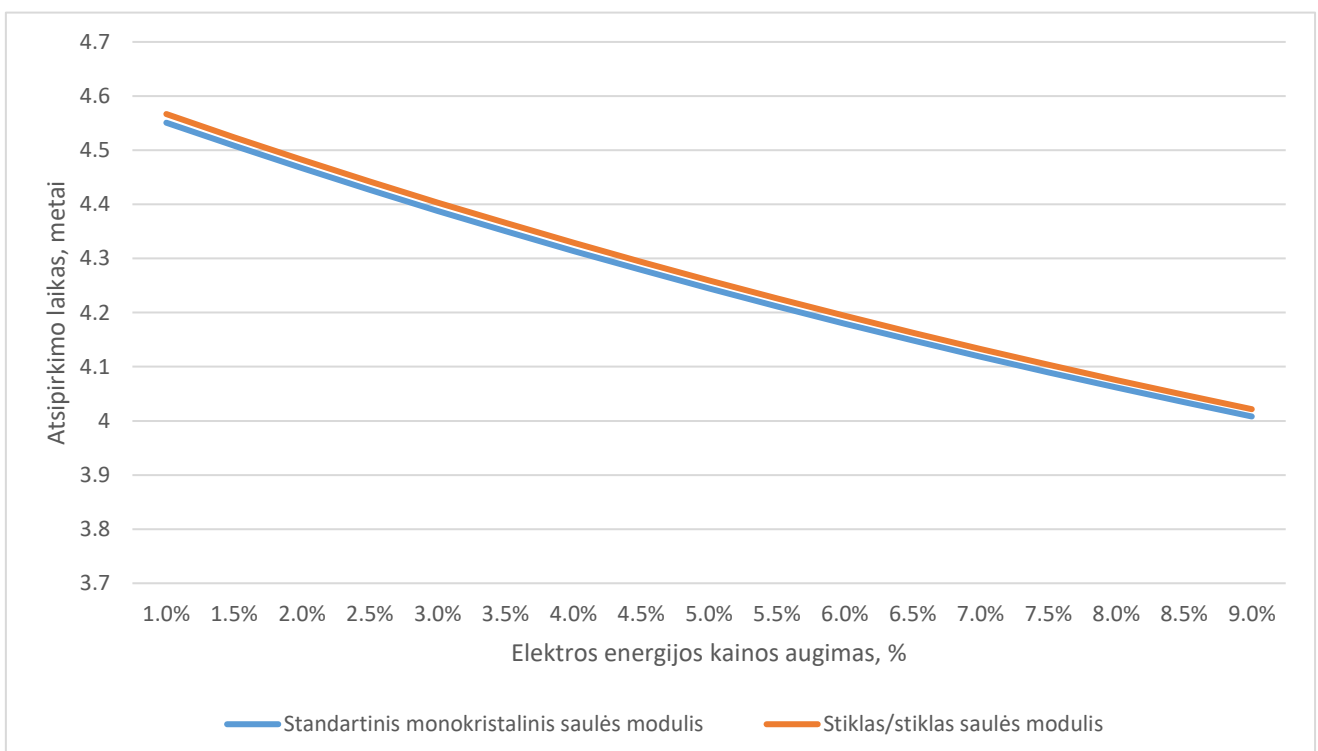
Saulės modulis	Galios riba, kW	Galia, kW	NPV, Eur	IRR, %	LCOE, Eur	Atsipirkimo laikas, metai
Stiklas/stiklas	1–5	3,195	16966,89	32,33	0,07	4,44
		3,905	20737,31			
	6–10	6,035	32048,57			
		9,94	52785,88			

22 paveiksle pavaizduota standartinio monokristalinio ir stiklas/stiklas saulės modulio tipų atsipirkimo laiko priklausomybė nuo utilizavimo kaštų (žr. 22 pav.). Atliekant jautrumo analizę abiem saulės modulių tipams pastebima tiesinė priklausomybė. Stiklas/stiklas tipo saulės modulio utilizavimo kaštus padidinus nuo 39 iki 359 eurų stiklas/stiklas tipo saulės moduliams atsipirkimo laikas pailgėja nuo 4 metų ir 5 mėnesių iki 6 metų ir 1 mėnesio, o tai yra 1,37 karto daugiau. Standartinio monokristalinio tipo saulės modulio kaštus padidinus nuo 32,89 iki 359 eurų už 1 kW, saulės modulio atsipirkimo laikas padidėja tiek pat, nuo 4 metų ir 5 mėnesių iki 6 metų ir 1 mėnesio, o tai yra taip pat 1,37 karto daugiau.



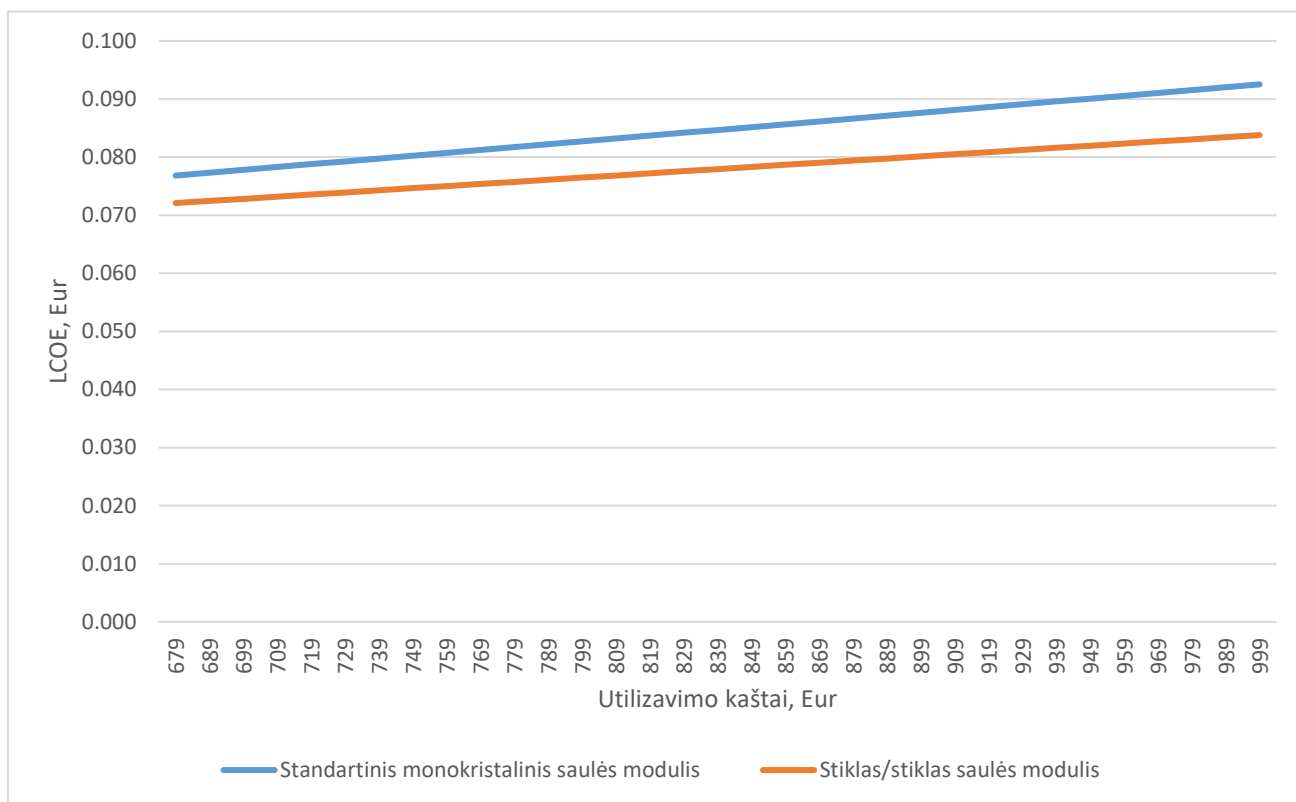
22 pav. Atsipirkimo laiko priklausomybė nuo utilizavimo kaštų (sudaryta autoriaus)

23 paveiksle (žr. 23 pav.) pateikiama atsipirkimo laiko priklausomybė nuo elektros energijos kainos augimo. Pastebima, kad didėjant elektros energijos metiniam kainos augimui, abiejų tipų saulės modulių atsipirkimo laiko priklausomybė yra atvirkštinė, todėl saulės modulių atsipirkimo laikas trumpėja. Didėjant elektros energijos kainai 1 %, standartinio monokristalinio ir stiklas/stiklas tipo saulės modulių atsipirkimo laikas sutrumpėja beveik 1 mėnesiu.



23 pav. Atsipirkimo laiko priklausomybė nuo elektros energijos kainos augimo (sudaryta autoriaus)

24 paveiksle (žr. 24 pav.) pateikiama elektros energijos gamybos svertinių kaštų priklausomybė nuo utilizavimo kaštų abiemis saulės modulių tipams. Iš grafiko matoma šių rodiklių tiesinė priklausomybė, nes didėjant utilizavimo kaštams, didėja LCOE kaštai. Standartinio monokristalinio tipo saulės modulio utilizavimo kaštus padidinus nuo 32,89 iki 359 eurų, pastebima, kad LCOE padidėja 1,21 karto, nuo 0,08 iki 0,09 Eur. Stiklas/stiklas tipo saulės modulio utilizavimo kaštus padidinus nuo 39 iki 359 eurų LCOE kaštai padidėja mažiau – 1,16 karto, nuo 0,07 iki 0,08 Eur. Tai parodo, kad utilizavimo kaštų padidėjimo poveikis LCOE dydžiui, vertinant stiklas/stiklas tipo saulės modulius, yra mažesnis negu standartinio monokristalinio tipo saulės moduliams.



24 pav. LCOE priklausomybė nuo utilizavimo kaštų (sudaryta autoriaus)

Atlikus ekonominį vertinimą apskaičiuojant NPV, IRR, LCOE ir PBT rodiklius abiemis saulės modulių tipams matoma, kad stiklas/stiklas tipo saulės moduliai yra ekonomiškai pranašesni už standartinio monokristalinio tipo saulės modulius. Įvertinus utilizavimo kaštus, apskaičiuota, kad stiklas/stiklas tipo saulės modulių atsipirkimo laikas yra 4 metai ir 5,5 mėnesio, o standartinio monokristalinio – 4 metai ir 5 mėnesiai. Utilizavimo bei perdurbimo kaštų įvertinimas stiklas/stiklas saulės modulio atsipirkimo laiką padidino 2,5 mėnesiais, o standartinio monokristalinio tipo 2 mėnesiais. Lyginant NPV bei IRR rodiklius pastebimas stiklas/stiklas tipo saulės modulio pranašumas, nes NPV rodiklis visoms galioms stiklas/stiklas saulės modulio yra didesnis apytiksliai 1,6 karto, o IRR rodiklis 0,03 %. Standartinio monokristalinio tipo saulės modulio LCOE dydis nepriklausomai nuo galios yra 0,08 Eur, o stiklas/stiklas 0,07 Eur. Atsipirkimo laiko skirtumas tarp saulės modulių nėra didelis, o vertinant eksploatavimo laiką, kuris stiklas/stiklas saulės moduliui yra 30 metų, o monokristaliniam 20 metų, bei atsižvelgiant į elektros energijos generaciją, daroma išvada, kad stiklas/stiklas saulės moduliai yra efektyvesni bei mažiau paveikiami papildomų utilizavimo kaštų.

3.5. Apibendrinantis vertinimas

Atlikus skirtingų tipų saulės modulių utilizavimo bei perdirbimo kaštų vertinimo tyrimą, apskaičiuota, kad standartinio monokristalinio tipo saulės modulio utilizavimo išlaidos, tenkančios 1 kW galios, sudaro 32,89 Eur, o stiklas/stiklas tipo saulės modulio 39 Eur. Lyginant saulės modulių viso gyvavimo ciklo sąnaudas, apskaičiuota, kad standartinio monokristalinio tipo saulės modulio kaštai yra 672,89 Eur, o stiklas/stiklas tipo 679 Eur. Skirtingų tipų saulės modulių kaštų skirtumas per visą LCA yra nedidelis ir sudaro 6,11 Eur. Pastebima, kad didžiausią įtaką kaštų skirtumui turi du stiklo sluoksniai stiklas/stiklas tipo saulės moduliuose, lyginant su standartinio monokristalinio tipo saulės moduliais.

Apklausoje iš viso dalyvavo 116 buitinių vartotojų, įsirengusių saulės elektrinę. Apklaustos duomenų analizė parodė, kad 73,27 % vartotojų yra linkę atiduoti eksploatavimui nebetinkamus saulės modulius į perdirbimo arba utilizavimo paslaugas teikiančią įmonę, o 12,93 % respondentų aplinkos apsauga nėra svarbi, nes dalis vartotojų žada saulės modulius išmesti į sąvartyną arba į mišką, sandėliuoti arba nuskandinti ežere. Prieš įsigyjant saulės elektrinę, tik 21,55 % vartotojų apsvarstė aplinkos apsaugos aspektą, o 78,45 % apie tai negalvojo. Tai parodo, kad vartotojų požiūris yra vis labiau sąmoningesnis aplinkos apsaugos aspektu. Iš apklaustos rezultatų matoma, kad visiems vartotojams, turintiems tiek standartinio monokristalinio tipo, tiek stiklas/stiklas tipo saulės elektrinę, tyrimo metu apskaičiuoti utilizavimo kaštai yra priimtini. Pastebima, kad 68,88 % apklausoje dalyvavusių vartotojų, įsirengusių standartinio monokristalinio tipo saulės elektrinę bei 71,43 % vartotojų, turinčių stiklas/stiklas tipo saulės elektrinę, tyrimo metu apskaičiuotas atsipirkimo laikas įvertinus utilizavimo išlaidas yra priimtinas. Daroma išvada, kad utilizavimo sąnaudos neturi įtakos atsipirkimo laikui, kurio tikisi vartotojai, nes tiek įvertinus, tiek neįvertinus utilizavimo kaštų, atsipirkimo laikas yra priimtinas tokiam pačiam kiekiui vartotojų, įsirengusių standartinio monokristalinio bei stiklas/stiklas tipo saulės elektrinę.

Išanalizavus saulės modulių ekonominius rodiklius, pastebima, kad nevertinant utilizavimo bei perdirbimo kaštų, stiklas/stiklas tipo saulės moduliai yra pranašesni už monokristalinio tipo saulės modulius pagal NPV, IRR bei LCOE rodiklius. NPV rodiklis visoms galių reikšmėms yra didesnis apytiksliai 1,6 karto, IRR 0,28 %, o LCOE 0,01 Eur. Atsipirkimo laikas abiejų tipų saulės moduliams gautas apytiksliai 4 metai ir 2 mėnesiai. Įvertinus utilizavimo kaštus, pastebimas standartinio monokristalinio tipo saulės modulio NPV reikšmės sumažėjimas kiekvienai galiai apytiksliai 1 %, IRR reikšmės 1,57 %, o LCOE dydžiui utilizavimo kaštai įtakos neturėjo, nes abiem atvejais gauta 0,08 Eur reikšmė. Stiklas/stiklas tipo saulės modulio NPV reikšmės sumažėjo 0,73 %, IRR 1,82 %, o LCOE dydis nepakito – 0,07 Eur. Pastebima, kad įvertinus utilizavimo kaštus standartinio monokristalinio tipo saulės modulio atsipirkimo laikas padidėja 2 mėnesiais, o stiklas/stiklas tipo 2,5 mėnesio. Atlikta jautrumo analizė parodė, kad stiklas/stiklas tipo saulės modulių atsipirkimo laikas ir LCOE dydis yra mažiau paveikiami didėjančių utilizavimo kaštų negu standartinio monokristalinio tipo saulės modulių.

Atsižvelgiant į eksploatavimo laiką bei remiantis gautais utilizavimo kaštų ir ekonominio vertinimo rezultatais, daroma išvada, kad stiklas/stiklas tipo saulės moduliai yra efektyvesni visais ekonominiais rodikliais bei yra mažiau paveikiami papildomų utilizavimo sąnaudų nei standartinio monokristalinio tipo saulės moduliai.

Išvados

1. Išnagrinėjus saulės šviesos energiją naudojančių įrenginių utilizavimo problematikos literatūrą, pastebėta, kad didėjantis atsinaujinančių energijos išteklių poreikis lemia didėjančią saulės modulių atliekų skaičių, kurių padidėjimas iki 2050 m. prognozuojamas daugiau nei 80 % (apie 78 mln. tonų) pasaulio mastu. Lietuvoje aktyvi saulės šviesos jėgainių infrastruktūros plėtra bei numatyti planai nuo 2023 m. iki 2030 m. padidinti saulės elektrinių instaliuotą galią daugiau nei 135 % įrengiant papildomus 774 MW galios pajėgumus leidžia daryti išvadą, kad pasibaigus šių įrenginių eksploatavimo laikui, bus neišvengiama saulės modulių utilizavimo problema ir Lietuvoje.
2. Išanalizavus saulės šviesos energiją naudojančių įrenginių utilizavimo kainodarą, perdirbimo bei utilizavimo galimybes, paaiškėjo, kad šiuo metu saulės modulių perdirbimo bei utilizavimo technologijos yra nepakankamai išstobulintos ir ribotos dėl didelių kainų, o labiausiai paplitusi saulės elementų apdorojimo technologija yra jų šalinimas sąvartynuose. Nustatyta, kad vieno saulės modulio perdirbimas kainuoja apie 18–27 Eur, o tuo tarpu šalinimas sąvartyne kainuotų tik 0,90–1,8 Eur.
3. Atliekant saulės šviesos energiją naudojančių įrenginių atliekų utilizavimo kaštų ir jų įtakos atsipirkimo laikotarpiui bei LCOE dydžiui tyrimą, apjungiamo gyvavimo ciklo sąnaudų vertinimo metodika ir apklausa, detalizuojant utilizavimo kaštus standartinio monokristalinio ir stiklas/stiklas tipo saulės moduliams bei vertinant vartotojų sąmoningumą aplinkos apsaugos aspektu.
4. Atlikto skirtingų tipų saulės modulių kaštų per visą gyvavimo ciklą vertinimo tyrimo rezultatai parodė, kad standartinio monokristalinio tipo saulės modulio kaštai, tenkantys 1 kW galios yra apytiksliai 1 % mažesni negu stiklas/stiklas tipo ir atitinkamai sudaro 672,89 Eur ir 679 Eur. Pastebima, kad didžiausią įtaką kaštų skirtumui turi du stiklo sluoksniai stiklas/stiklas tipo saulės moduluose, lyginant su standartinio monokristalinio tipo saulės moduliais.
5. Remiantis apklausos rezultatais, daroma išvada, kad didžiąjai daliai vartotojų aplinkos apsaugos aspektas yra svarbus, nes 73 % visų apklaustųjų planuoja saulės modulius atiduoti į perdirbimo arba utilizavimo paslaugas teikiančią įmonę pasibaigus jų tarnavimo laikui, o tik 13 % respondentų aplinkos apsauga nėra svarbi. Pastebėta, kad tiek įvertinus, tiek neįvertinus utilizavimo kaštų, atsipirkimo laikas yra priimtinas tokiam pačiam kiekiui vartotojų, įsirengusių standartinio monokristalinio bei stiklas/stiklas tipo saulės elektrinę, todėl daroma išvada, kad utilizavimo kaštai neturi įtakos atsipirkimo laikui, kurio tikisi vartotojai.
6. Atlikus ekonominį vertinimą, nustatyta, kad vertinant utilizavimo kaštus standartinio monokristalinio tipo saulės modulio atsipirkimo laikotarpis yra 4,43 metų, o stiklas/stiklas tipo 4,44 metų. Nustačius utilizavimo išlaidas, standartinio monokristalinio tipo saulės modulio atsipirkimo laikas padidėja 2 mėnesiais, o stiklas/stiklas tipo 2,5 mėnesio. Pastebima, kad įvertinti utilizavimo kaštai standartinio monokristalinio bei stiklas/stiklas tipo saulės modulių LCOE dydžiui įtakos neturėjo, nes abiem atvejais gauta atitinkamai 0,08 Eur ir 0,07 Eur reikšmė.

Literatūros sąrašas

1. Lietuvos Respublikos energetikos ministerija. Parengtos rekomendacijos savivaldybėms dėl atsinaujinančių energijos išteklių plėtros projektų. [žiūrėta 2022-03-19]. Prieiga per internetą: [Parengtos rekomendacijos savivaldybėms dėl atsinaujinančių energijos išteklių plėtros projektų | Lietuvos Respublikos energetikos ministerija \(lr.v.lt\)](#)
2. GUIQIANG LI., et al. Solar energy utilisation: Current status and roll-out potential. *Applied Thermal Engineering*. 2022, vol. 9 [žiūrėta 2022-03-19]. Prieiga per: Research Gate.
3. CARERI F., et al. 2020–2022: Pivotal Years for European Energy Infrastructure. *Energies* 2022, 2022, 15(6):1999 [žiūrėta 2022-03-19]. Prieiga per: MDPI.
4. European Parliament and Council of the European Union. Regulation (EU) 2018/1999 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the Governance of the Energy Union and Climate Action. 2018. [žiūrėta 2022-03-20]. Prieiga per internetą: <https://europa.eu/!pCfRgh>
5. European Commission. Commission Implementing Regulation (EU) 2020/1294 of 15 September 2020 on the Union Renewable Energy Financing Mechanism. 2020. [žiūrėta 2022-03-20]. Prieiga per internetą: <https://europa.eu/!KMg4rv>
6. RICHTER A. ThinkGeoEnergy's Top 10 Geothermal Countries 2020–installed power generation capacity (MWe). [žiūrėta 2022-03-20]. Prieiga per internetą: [Top 10 Geothermal Countries 2020 – installed power generation capacity \(MWe\) | ThinkGeoEnergy - Geothermal Energy News](#)
7. UNDERSTANDING RENEWABLE ENERGY INFRASTRUCTURE–NEW TRENDS IN TECHNOLOGY. [žiūrėta 2022-03-22]. Prieiga per internetą: [Understanding Renewable Energy Infrastructure - New Trends in Technology - c3controls](#)
8. Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija. Įsakymas dėl Elektros ir elektroninės įrangos bei jos atliekų tvarkymo taisyklių patvirtinimo. 2004 [žiūrėta 2023-05-05]. Prieiga per internetą: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.241701/HjGAttYeXv>
9. Elektronikos platintojų asociacija. Pasaka apie saulės energijos naudą: ar tikrai pabaiga bus laiminga? 2020 [žiūrėta 2023-05-06]. Prieiga per internetą: <https://www.epa.lt/naujienos/pasaka-apie-saules-energijos-nauda-ar-tikrai-pabaiga-bus-laiminga/>
10. RATNER S., et al. Eco-Design of Energy Production Systems: The Problem of Renewable Energy Capacity Recycling. *Applied Sciences*. 2020, 10(12):4339 [žiūrėta 2022-03-24]. Prieiga per: MDPI.
11. ATALAY A., et. al. The Dark Side of Solar Power. 2021 [žiūrėta 2022-03-24]. Prieiga per internetą: [The Dark Side of Solar Power \(hbr.org\)](#)
12. INVERNIZZI COLETTE D., et al. Developing policies for the end-of-life of energy infrastructure: Coming to terms with the challenges of decommissioning. *Energy Policy*. 2020, vol. 144 [žiūrėta 2022-03-25]. Prieiga per: Science Direct.
13. FIANDRA V., et al.. End-of-life of silicon PV panels: A sustainable materials recovery process, *Waste Management*. 84 2019, 91–101 [žiūrėta 2022-03-27]. Prieiga per: Research Gate.
14. RADZIEMSKA E.K. Current trends in recycling of photovoltaic solar cells and modules waste. *Chem didact ecol metrol*. 2012, 17(1-2); 89-95 [žiūrėta 2022-03-27]. Prieiga per: Sciendo.

15. GRANATA G., et al. Recycling of photovoltaic panels by physical operations. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2014, 239-248 [žiūrėta 2022-03-27]. Prieiga per: Research Gate.
16. LATUNUSSA C.E.L., et al. Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2016, vol. **156**, 101–111 [žiūrėta 2022-03-27]. Prieiga per: Science Direct.
17. STRACHALA D., et al. Methods for recycling photovoltaic modules and their impact on environment and raw material extraction. *Acta Montanistica Slovaca*. 2017, vol. **22**, 257-269 [žiūrėta 2022-03-27]. Prieiga per: Research Gate.
18. D'ADAMO I., et al. Economic Feasibility for Recycling of Waste Crystalline Silicon Photovoltaic Modules *International Journal of Photoenergy*. 2017, vol. **2017**, 6 pages [žiūrėta 2022-03-27]. Prieiga per: Research Gate.
19. KIM.S., JEONG B. Closed-Loop Supply Chain Planning Model for a Photovoltaic System Manufacturer with Internal and External Recycling. *Sustainability*. 2016, 8, 596 [žiūrėta 2022-03-29]. Prieiga per: MDPI.
20. XU.Y., et al. Overview of the production background and treatment methods of waste photovoltaic modules. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018, vol. **452** [žiūrėta 2022-03-29]. Prieiga per: Research Gate
21. MALANDRINO.O., et al. Policies and Measures for Sustainable Management of Solar Panel End-of-Life in Italy. *Sustainability*. 2017, 9, 481 [žiūrėta 2022-03-31]. Prieiga per: MDPI.
22. HERCEG S., et al. Influence of Waste Management on the Environmental Footprint of Electricity Produced by Photovoltaic Systems. *Energies*. 2020, 13,2146 [žiūrėta 2022-03-31]. Prieiga per: MDPI.
23. BRANDT S.K., MOHAMMAD A. Waste electrical and electronic equipment (WEEE): A closer look at photovoltaic panels. *SGEM2017 Conference Proceedings (17th International Multidisciplinary Scientific Geo-conference SGEM 2017, 29 June-5 July 2017)*. 2017, vol. **17**, 317-324 [žiūrėta 2022-04-02]. Prieiga per: Research Gate.
24. KUN-MO L., ATSUSHI I. Life Cycle Assessment. Best Practices of ISO 14040 Series. 2004 [žiūrėta 2022-12-21]. Prieiga per internetą: https://www.apec.org/docs/default-source/Publications/2004/2/Life-Cycle-Assessment-Best-Practices-of-International-Organization-for-Standardization-ISO-14040-Ser/04_cti_scsc_lca_rev.pdf
25. European Commission. European Platform on Life Cycle Assessment (LCA) [žiūrėta 2022-12-22]. Prieiga per internetą: <https://europa.eu/!KMg4rv>
26. TARPTAUTINĖ STANDARTIZACIJOS ORGANIZACIJA. [ISO/TC 207/SC 5]. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework (ISO 14040:2006), 2022 [žiūrėta 2022-12-27]. Prieiga per internetą: <https://www.iso.org/standard/37456.html>
27. European Commission. European Platform on Life Cycle Assessment (LCA) [žiūrėta 2022-12-22]. Prieiga per internetą: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/lifecycleassessment.html>
28. GOLSTEIJN L. Life Cycle Assessment (LCA) explained. *Life cycle assessment*. 2022 [žiūrėta 2023-01-03]. Prieiga per internetą: <https://pre-sustainability.com/articles/life-cycle-assessment-lca-basics/#h-four-steps-of-life-cycle-assessment>
29. CHRYSOSTOMOU C., et al. Life cycle assessment of concrete manufacturing in small isolated states: the case of Cyprus. *International Journal of Sustainable Energy*. 2015, DOI:10.1088/1757-899X/452/3/032105 [žiūrėta 2023-01-05]. Prieiga per: Research Gate

30. EPEASWITZERLAND. Cradle to cradle. [žiūrėta 2023-01-05]. Prieiga per internetą: <https://www.epeaswitzerland.com/cradle-to-cradle/>
31. SVARC J. Solar Panel Construction. 2020 [žiūrėta 2023-01-08]. Prieiga per internetą: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction>
32. Lietuvos Respublikos energetikos ministerija. Nacionalinė energetinės nepriklausomybės strategija. 2018 [žiūrėta 2023-01-11]. Prieiga per internetą: https://enmin.lrv.lt/uploads/enmin/documents/files/Nacionaline%20energetines%20nepriklausomybes%20strategija_2018_LT.pdf
33. MoksloMedis. Apklausa kiekybiniame tyrime. [žiūrėta 2023-01-15]. Prieiga per internetą: <https://mokslomedis.lt/apklausa-kiekybiniame-tyrime/>
34. MARSH J. Monocrystalline vs. polycrystalline solar panels: which is the best for you? 2022 [žiūrėta 2023-02-03]. Prieiga per internetą: <https://news.energysage.com/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar/>
35. SUBCONTRACTSINDIA. Solar PV panels–Understanding photovoltaics. [žiūrėta 2023-02-05]. Prieiga per internetą: <https://www.subcontractsindia.com/solar-panels--pv-.html>
36. PV–Manufacturing. Glass–Glass PV Modules. [žiūrėta 2023-02-10]. Prieiga per internetą: <https://pv-manufacturing.org/glass-glass-modules/>
37. SoliTek. Dažniausiai užduodami klausimai apie saulės elektrines. [žiūrėta 2023-02-13]. Prieiga per internetą: <https://www.solitek.lt/lt/duk-apie-saules-elektrines>
38. Lietuvos Respublikos Seimas. Lietuvos Respublikos Atsinaujančių išteklių energetikos įstatymas. 2011 [žiūrėta 2023-02-15]. Prieiga per internetą: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.398874/asr>
39. Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija. Nacionalinis energetikos ir klimato srities veiksmų planas 2021–2030 m. 2018 [žiūrėta 2023-02-20]. Prieiga per internetą: <https://www.ena.lt/uploads/Failai-NEKS-VP/NEKS-VP-2021-2030.pdf>
40. CORCELLI F., et al. Sustainable urban electricity supply chain – Indicators of material recovery and energy savings from crystalline silicon photovoltaic panels end-of-life. *Ecological Indicators*. 2018, vol. **94**, 37–51 [žiūrėta 2023-03-02]. Prieiga per: Science Direct.
41. DENG R., et al. A techno–economic review of silicon photovoltaic module recycling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019, vol. **109**, 532–550 [žiūrėta 2023-03-05]. Prieiga per: Science Direct.
42. PRO Europe. Participation Cost Overview 2020. 2020 [žiūrėta 2023-03-12]. Prieiga per internetą: <https://www.pro-e.org/files/PRO-Europe-Participation-Costs-Overview-2020.pdf>
43. FTHENAKIS M. V., End-of-life management and recycling of PV modules. *Energy Policy*. 2000, vol. **28**, 1051–1058 [žiūrėta 2023-03-13]. Prieiga per: Science Direct.
44. Vilniaus apskrities atliekų tvarkymo centras. UAB „VAATC“ didelių gabaritų ir žaliųjų atliekų surinkimo aikštelių metiniai nemokamai priimamų atliekų kiekiai, mokamai priimamų atliekų priėmimo įkainiai, didžiausi mokamai vienu metu galimi pristatyti kiekiai bei prekių ir produktų pardavimo įkainiai. 2022 [žiūrėta 2023-03-15]. Prieiga per internetą: <https://www.vaatc.lt/wp-content/uploads/2022/07/2022-07-18-Priedas-d%C4%971-UAB-%E2%80%9CVAATC%E2%80%9D-atliek%C5%B3-surinkimo-aik%C5%A1tel%C4%97se-priimam%C5%B3-atliek%C5%B3-kiekio-ir-mokamai-priimam%C5%B3-atliek%C5%B3-pri%C4%97mimo-%C4%AFkaini%C5%B3-patvirtinimo-1.24E-V%C4%AE-22-0044.pdf>

45. EMP Recycling. Atliekų naikinimas. [žiūrėta 2023-03-17]. Prieiga per internetą: <https://emp.lt/paslaugos/atlieku-naikinimas/>
46. IEA. Renewables. *Global Energy Review 2021*. 2021 [žiūrėta 2023-03-20]. Prieiga per internetą: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021/renewables>
47. METSOLAR. Met Glass/Glass solar modules and panels. *Technology*. [žiūrėta 2023-04-02]. Prieiga per internetą: <https://metsolar.eu/products/met-glass-glass/>
48. WEHRMANN. B. Resources and recycling needs for Germany's solar panels. 2021 [žiūrėta 2023-04-05]. Prieiga per internetą: <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/resources-and-recycling-needs-germanys-solar-panels>
49. Lietuvos energetikos agentūra. Saulės elektrinių įrengimo kainos Lietuvoje birželio mėnesį krito. 2022 [žiūrėta 2023-04-07]. Prieiga per internetą: <https://www.ena.lt/Naujiena/saules-elektriniu-irengimo-kainos-lietuvoje-birzelio-menesi-krito/>
50. MURALIKRISHNA I. V., MANICKAM V. Chapter Five–Life Cycle Assessment. *Environmental Management*. 2017, 57–75 [žiūrėta 2023-04-10]. Prieiga per: Science Direct.
51. FTHENAKIS M. V., ANCTIL A. Life Cycle Assessment of Organic Photovoltaics. 2012 [žiūrėta 2023-04-12]. Prieiga per internetą: <https://www.intechopen.com/chapters/32591>
52. Lietuvos Respublikos Seimas. Nutarimas dėl Nacionalinės energetinės nepriklausomybės strategijos patvirtinimo. 2012 [žiūrėta 2023-04-14]. Prieiga per internetą: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.429490/asr>
53. NordPool. Day–ahead prices. [žiūrėta 2023-04-16]. Prieiga per internetą: <https://www.nordpoolgroup.com/en/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/LT/Yearly/?view=table>
54. ESO. Elektros kainos sudedamosios dalys. [žiūrėta 2023-04-20]. Prieiga per internetą: https://www.eso.lt/lt/verslui/elektra_99/tarifai-kainos-atsiskaitymai-ir-skolos/kas-sudaro-elektros-kaina_1876.html

Priedai

1 priedas. SoliTek Standard 365 W saulės modulio techninės charakteristikos

Darbinės sąlygos		Mechaniniai parametrai	
Maksimali modulių sistemos įtampa	DC 1500 V (TUW)	Saulės elementų dydis (mm)	166x83
Darbinė temperatūra	-40 °C / +85 °C	Saulės elementų skaičius	120 (6x20)
Maksimali srovė	15	Priekinis stiklas	3,2 mm
Nominali mechaninė apkrova (vėjas/sniegas)	2400/3600 Pa**	Svoris	20 kg
Maksimali mechaninė apkrova (vėjas/sniegas)	3600/5400 Pa	Matmenys (ilgis x plotis x aukštis) (mm)	1755x1038x30
IP klasė	68	Jungiamosios dėžutės IP klasė	IP68
Saugumo klasė	II	Kabelių ilgis	1,1 m
		Kabelių skerspjūvio plotas	4 mm²
		Diodų skaičius	3
		Kabelių jungties tipas	MC4 tipo
		Rėmas	Juodai anoduotas aliuminio rėmas
Elektriniai parametrai		Temperatūros pokyčio koeficientai	
Nominali galia (Pmax/W)	365	Srovės temperatūros koeficientas (α)	+0.049% / °C
Nominali įtampa (Vmpp/V)	34,00	Įtampos temperatūros koeficientas (β)	-0.33% / °C
Nominali srovė (Impp/A)	10,74	Galios temperatūros koeficientas (γ)	-0.36% / °C
Tuščios veiklos įtampa (Voc/V)	41,30	Nominali veikiančio modulių temperatūra	43±2 °C
Nominali srovė (Isc/A)	11,30		
Modulio efektyvumas (ns)	20,04		

** Saugumo faktorius -1,5

*Esant standartinėms bandymo sąlygoms (STC), kai apšvieta 1000 W/m², oro masės koeficientas 1,5 ir saulės elementų temperatūra 25 °C.

Matmenys ir montavimas

A: Drenavimas; B: Ventilacija; C: Montavimo skylės; D: Įžeminimo skylės;

Dėmesio

- Siekiant užtikrinti saugumą ir produkto naudojimo ilgaamžiškumą, svarbu atsižvelgti ar fotovoltinių modulių sistema yra tinkama vietos aplinkos sąlygoms (vėjo ir sniego apkrovos, temperatūra).
- Negalima nuosekliai jungti skirtingai orientuotų fotovoltinių modulių į vieną elektrinę grandinę (išimtis: negalioja naudojant optimizatorius).
- Negalima jungti skirtingus fotovoltinių modulių kiekius turinčias elektrines grandines į skirtingus vieno MPPT įėjimus (išimtis: negalioja naudojant optimizatorius).
- Nuosekliai junkite tik vienodus elektrinius parametrus turinčius fotovoltinius modulius (išimtis: negalioja naudojant optimizatorius).
- Įsitikinkite jog jūsų inverteris turi nuolatinės srovės kirtiklį, jei ne – rekomenduojama kirtiklį įsirengti papildomai.
- Niekada neleiskite skirtingiems metalams liestis vienas su kitu. Norėdami pašalinti galvaninę koroziją, naudokite bimetalinį arba plastikinį separatorių.
- Pritygtinai rekomenduojama įrengti virštampių ribotuvus tiek nuolatinės, tiek kintamos srovės dalyse, virštampių sukelti padariniai fotovoltiniams moduliams ir kitai elektrinei įrangai yra negarantiniai, nekompensuojami.
- Pritygtinai rekomenduojama įžeminti fotovoltinius modulius ir įrengti žaibosaugos sistema saulės elektrinėje.

Patarimai

- Gera modulių ventilacija ir trumpesnis jungiamųjų kabelių atstumas padidina elektros energijos gamybos efektyvumą.
- Rekomenduojama atsižvelgti į šalia esančių objektų skleidžiamus šėšėlius. Daliniai šėšėliai gali stipriai sumažinti elektros energijos gamybą.

Šis dokumentas tapo neteisiškai patvirtintas. Gamintojas patikrina, ar šis dokumentas patvirtina kiti gamintojo specifikacijos ir šio produkto reikalavimai. Šešėliai šio dokumento versijoje pateikti tik informaciniais tikslais. Šis dokumentas ir diegimo vadovas visada galite rasti mūsų tinklalapyje www.solitek.eu

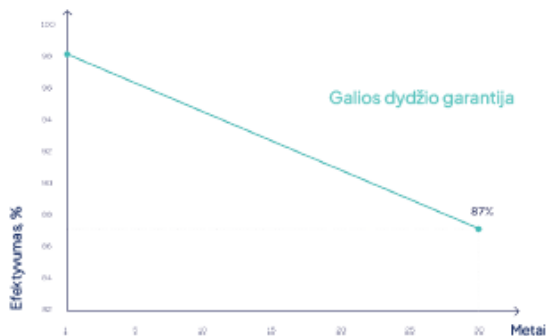
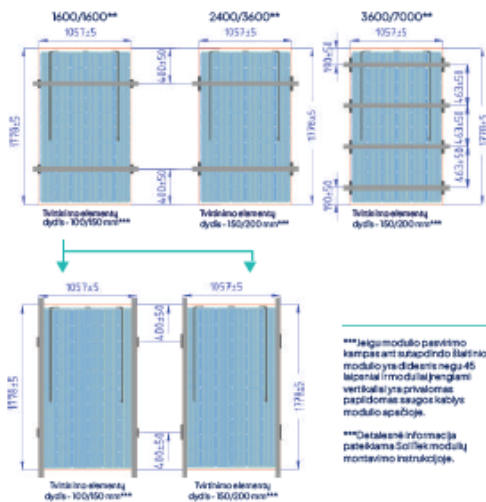
2 priedas. SoliTek Solid Bifacial 360 W saulės modulio techninės charakteristikos

Elektriniai parametrai (STC*)	
Nominali galia	360
Saulės elementų technologija	Dvipusio veikimo
Tuščio veikos įtampa (V_{oc}/V)	40,41
Trumpojo jungimo srovė (I_{sc}/A)	11,09
Nominali įtampa (V_{mpp}/V)	34,44
Nominali srovė (I_{mpp}/A)	10,48
Modulio efektyvumas (η)	19,38%
Maksimali modulių sistemos įtampa (V)	1500
Maksimali srovė (A)	15
Galios tolerancija	0/+5W

*Esant standartinėms bandymo sąlygoms (STC), kai apšvieta $1000 W/m^2$, oro masės koeficientas 1,5 ir saulės elementų temperatūra 25°C.

Galios padidėjimas dėl dvipusio veikimo efekto	5%	10%	20%	25%
Bendra modulių galia (Wp)	378	396	432	450

Matmenys ir montavimas



Temperatūros pokyčio koeficientai	
Srovės temperatūros koeficientas (α)	+0.04% / °C
Įtampos temperatūros koeficientas (β)	-0.35% / °C
Galios temperatūros koeficientas (δ)	-0.47% / °C
Nominali veikiančio modulių temperatūra	46 °C
Mechaniniai parametrai	
Matmenys (ilgis x plotis x aukštis) (mm)	1770x1049x7,1
Matmenys su kraštų sandarinimu (ilgis x plotis x aukštis) (mm)	1778±5x1057±5x7,1
Svoris (kg)	30
Priekinis/Galinis stiklas (mm)	3
Saulės elementų tipas	Dvipusio veikimo
Saulės elementų dydis	166x166
Kontaktinių juostų skaičius saulės elemente	9
Modulio skaidrumas (%)	10
Saulės elementų konfigūracija	6x10
Rėmo tipas	Bėrimis
Veikimo temperatūra (°C)	-40 + +85
Nominali mechaninė apkrova (vėjas/sniegas) (Pa)	3600/7000**
Maksimali mechaninė apkrova (vėjas/sniegas) (Pa)	5400/10500
Jungiamoji dėžutė / IP klasė	Skaidyto tipo jungiamosios dėžutės/IP68
Kabelių skerspjūvio plotas (mm ²)	4
Kabelių ilgis	1,2m
Diodų skaičius	3
Kabelių jungties tipas	MC4 tipo

**Saugumo faktorius - 1,5

Dėmesio

- Siekiant užtikrinti saugumą ir produkto naudojimo ilgaamžiškumą, svarbu atsižvelgti ar fotovoltinių modulių sistema yra tinkama vietos aplinkos sąlygoms (vėjo ir sniego apkrovos, temperatūra).
- Negalima nuosekliai jungti skirtingai orientuotų fotovoltinių modulių į vieną elektrinę grandinę (išimtis: negalioja naudojant optimizatorius).
- Negalima jungti skirtingus fotovoltinių modulių kiekius turinčias elektrines grandines į skirtingus vieno MPPT šėlimus (išimtis: negalioja naudojant optimizatorius).
- Nuosekliai junkite tik vienodus elektrinius parametrus turinčius fotovoltinius modulius (išimtis: negalioja naudojant optimizatorius).
- Įsitikinkite jog jūsų inverteris turi nuolatinės srovės kirtikį, jei ne - rekomenduojama kirtikį įsirengti papildomai.
- Niekada neleiskite skirtingiems metalams liestis vienas su kitu. Norėdami pašalinti galvą koroziją, naudokite bimetalinį arba plastikinį separatorių.
- Primitygtinai rekomenduojama įrengti viršūninių ribotuvus tiek nuolatinės, tiek kintamos srovės dalyse, viršūninių sukelti padariniai fotovoltiniams moduliams ir kitai elektrinei įrangai yra negarantiniai, nekompensuojami.
- Primitygtinai rekomenduojama įžeminti fotovoltinius modulius ir įrengti žaibo saugos sistema saulės elektrinėje.
- Jeigu montavimo komponentai (montavimo bėgiai) yra įrengti išilgai galinės modulių pusės, dvipusio veikimo efektas bus mažesnis dėl galinių saulės elementų šešėliavimo.

Patarimai

- Gera modulių ventilacija ir trumpesnis jungiamųjų kabelių atstumas padidina elektros energijos gamybos efektyvumą.
- Rekomenduojama atsižvelgti į šalia esančių objektų skleidžiamus šešėlius. Daliniai šešėliai gali stipriai sumažinti elektros energijos gamybą.
- Padidinus aukštį tarp saulės modulių ir montavimo paviršiaus padidėja dvipusio modulių veikimo efektas.
- Dvipusis modulių veikimo efektas žymiai išauga, jei moduliai yra įrengiami virš baltų šviesą atspindinčių paviršių.



Šis dokumentas tapo mūsų teikiama paslauga. Gerinti jo kokybę mes de laisvai naudojame bei galime apibūdinti ir kitais produktais. Naudodami šį dokumentą, turite būti informuoti, kad dokumentas, kurį mes pateikiame, yra mūsų vadovų rankraštis, kuris gali būti mūsų teikiama paslauga. www.solitek.eu



3 priedas. Standartinio monokristalinio tipo saulės modulio pinigų srautai be utilizavimo kaštų

Metai	Diskontuota elektros energijos generacija, kWh				Elektros energijos kaina, kWh	Pajamos, Eur			
	3,195	3,905	6,035	9,94		Galia, kW			
	3,195	3,905	6,035	9,94		3,195	3,905	6,035	9,94
1	0	0	0	0	0,160	0	0	0	0
2	4075	4980	7696	12677	0,164	795,02	971,69	1501,71	2473,40
3	3975	4859	7509	12367	0,168	814,90	995,99	1539,25	2535,24
4	3878	4740	7326	12066	0,172	835,27	1020,89	1577,73	2598,62
5	3784	4624	7147	11771	0,177	856,15	1046,41	1617,18	2663,58
6	3691	4512	6973	11484	0,181	877,56	1072,57	1657,61	2730,17
7	3601	4402	6803	11204	0,186	899,49	1099,38	1699,05	2798,43
8	3514	4294	6637	10931	0,190	921,98	1126,87	1741,52	2868,39
9	3428	4190	6475	10664	0,195	945,03	1155,04	1785,06	2940,10
10	3344	4087	6317	10404	0,200	968,66	1183,91	1829,69	3013,60
11	3263	3988	6163	10150	0,205	992,87	1213,51	1875,43	3088,94
12	3183	3890	6012	9903	0,210	1017,70	1243,85	1922,31	3166,16
13	3105	3796	5866	9661	0,215	1043,14	1274,95	1970,37	3245,32
14	3030	3703	5723	9426	0,221	1069,22	1306,82	2019,63	3326,45
15	2956	3613	5583	9196	0,226	1095,95	1339,49	2070,12	3409,61
16	2884	3525	5447	8972	0,232	1123,35	1372,98	2121,88	3494,85
17	2813	3439	5314	8753	0,238	1151,43	1407,30	2174,92	3582,22
18	2745	3355	5185	8539	0,243	1180,22	1442,49	2229,30	3671,78
19	2678	3273	5058	8331	0,250	1209,72	1478,55	2285,03	3763,57
20	2612	3193	4935	8128	0,256	1239,96	1515,51	2342,15	3857,66
21	2549	3115	4814	7930	0,262	1270,96	1553,40	2400,71	3954,11

Metai	Pastovūs kaštai, Eur				Operatyviniai pinigų srautai, Eur			
	Galia, kW							
	3,195	3,905	6,035	9,94	3,195	3,905	6,035	9,94
1	0	0	0	0	-2044.80	-2499.20	-3862.40	-6361.60
2	39,62	48,42	74,83	123,26	755,40	923,27	1426,87	2350,15
3	39,62	48,42	74,83	123,26	775,28	947,56	1464,42	2411,98
4	39,62	48,42	74,83	123,26	795,65	972,46	1502,90	2475,36
5	39,62	48,42	74,83	123,26	816,53	997,99	1542,34	2540,33
6	39,62	48,42	74,83	123,26	837,94	1024,15	1582,77	2606,92
7	39,62	48,42	74,83	123,26	859,88	1050,96	1624,21	2675,17
8	39,62	48,42	74,83	123,26	882,36	1078,45	1666,69	2745,13
9	39,62	48,42	74,83	123,26	905,41	1106,62	1710,23	2816,84
10	39,62	48,42	74,83	123,26	929,04	1135,49	1754,85	2890,35
11	39,62	48,42	74,83	123,26	953,26	1165,09	1800,59	2965,69
12	39,62	48,42	74,83	123,26	978,08	1195,43	1847,48	3042,91
13	39,62	48,42	74,83	123,26	1003,52	1226,52	1895,54	3122,06
14	39,62	48,42	74,83	123,26	1029,60	1258,40	1944,80	3203,20
15	39,62	48,42	74,83	123,26	1056,33	1291,07	1995,29	3286,36
16	39,62	48,42	74,83	123,26	1083,73	1324,56	2047,04	3371,60
17	39,62	48,42	74,83	123,26	1111,81	1358,88	2100,09	3458,97
18	39,62	48,42	74,83	123,26	1140,60	1394,06	2154,46	3548,52
19	39,62	48,42	74,83	123,26	1170,10	1430,13	2210,19	3640,32
20	39,62	48,42	74,83	123,26	1200,35	1467,09	2267,32	3734,41
21	39,62	48,42	74,83	123,26	1231,34	1504,98	2325,87	3830,85

Metai	Grynieji pinigų srautai, Eur				NPV			
	Galia, kW							
	3,195	3,905	6,035	9,94	3,195	3,905	6,035	9,94
1	-2044,80	-2499,20	-3862,40	-6361,60	-2044,80	-2499,20	-3862,40	-6361,60
2	642,09	784,78	1212,84	1997,62	-1418,37	-1733,56	-2679,14	-4412,70
3	658,99	805,43	1244,75	2050,18	-791,13	-966,94	-1494,36	-2461,30
4	676,30	826,59	1277,46	2104,06	-163,12	-199,37	-308,11	-507,47
5	694,05	848,29	1310,99	2159,28	465,66	569,14	879,58	1448,73
6	712,25	870,52	1345,36	2215,88	1095,18	1338,56	2068,68	3407,24
7	730,90	893,32	1380,58	2273,90	1725,43	2108,86	3259,15	5368,01
8	750,01	916,68	1416,68	2333,36	2356,39	2880,03	4450,96	7330,99
9	769,60	940,62	1453,69	2394,32	2988,04	3652,05	5644,07	9296,12
10	789,68	965,17	1491,62	2456,79	3620,36	4424,88	6838,46	11263,34
11	810,27	990,33	1530,51	2520,83	4253,34	5198,53	8034,09	13232,61
12	831,37	1016,11	1570,36	2586,47	4886,96	5972,95	9230,93	15203,88
13	852,99	1042,55	1611,21	2653,75	5521,21	6748,14	10428,95	17177,09
14	875,16	1069,64	1653,08	2722,72	6156,07	7524,08	11628,13	19152,21
15	897,88	1097,41	1696,00	2793,40	6791,52	8300,75	12828,43	21129,18
16	921,17	1125,87	1739,99	2865,86	7427,56	9078,12	14029,83	23107,95
17	945,04	1155,05	1785,07	2940,12	8064,16	9856,19	15232,30	25088,49
18	969,51	1184,95	1831,29	3016,25	8701,31	10634,94	16435,81	27070,75
19	994,59	1215,61	1878,66	3094,27	9339,01	11414,34	17640,35	29054,69
20	1020,29	1247,03	1927,22	3174,25	9977,23	12194,39	18845,88	31040,27
21	1046,64	1279,23	1976,99	3256,22	10615,97	12975,07	20052,38	33027,45

4 priedas. Standartinio monokristalinio tipo saulės modulio pinigų srautai su utilizavimo kaštais

Metai	Operatyviniai pinigų srautai, Eur				Grynieji pinigų srautai, Eur			
	Galia, kW							
	3,195	3,905	6,035	9,94	3,195	3,905	6,035	9,94
1	-2149,88	-2627,64	-4060,89	-6688,53	-2149,88	-2627,64	-4060,89	-6688,53
2	755,40	923,27	1426,87	2350,15	642,09	784,78	1212,84	1997,62
3	775,28	947,56	1464,42	2411,98	658,99	805,43	1244,75	2050,18
4	795,65	972,46	1502,90	2475,36	676,30	826,59	1277,46	2104,06
5	816,53	997,99	1542,34	2540,33	694,05	848,29	1310,99	2159,28
6	837,94	1024,15	1582,77	2606,92	712,25	870,52	1345,36	2215,88
7	859,88	1050,96	1624,21	2675,17	730,90	893,32	1380,58	2273,90
8	882,36	1078,45	1666,69	2745,13	750,01	916,68	1416,68	2333,36
9	905,41	1106,62	1710,23	2816,84	769,60	940,62	1453,69	2394,32
10	929,04	1135,49	1754,85	2890,35	789,68	965,17	1491,62	2456,79
11	953,26	1165,09	1800,59	2965,69	810,27	990,33	1530,51	2520,83
12	978,08	1195,43	1847,48	3042,91	831,37	1016,11	1570,36	2586,47
13	1003,52	1226,52	1895,54	3122,06	852,99	1042,55	1611,21	2653,75
14	1029,60	1258,40	1944,80	3203,20	875,16	1069,64	1653,08	2722,72
15	1056,33	1291,07	1995,29	3286,36	897,88	1097,41	1696,00	2793,40
16	1083,73	1324,56	2047,04	3371,60	921,17	1125,87	1739,99	2865,86
17	1111,81	1358,88	2100,09	3458,97	945,04	1155,05	1785,07	2940,12
18	1140,60	1394,06	2154,46	3548,52	969,51	1184,95	1831,29	3016,25
19	1170,10	1430,13	2210,19	3640,32	994,59	1215,61	1878,66	3094,27
20	1200,35	1467,09	2267,32	3734,41	1020,29	1247,03	1927,22	3174,25
21	1231,34	1504,98	2325,87	3830,85	1046,64	1279,23	1976,99	3256,22

Metai	NPV			
	Galia, kW			
	3,195	3,905	6,035	9,94
1	-2149,88	-2627,64	-4060,89	-6688,53
2	-1523,45	-1862,00	-2877,63	-4739,62
3	-896,22	-1095,38	-1692,85	-2788,23
4	-268,20	-327,80	-506,60	-834,40
5	360,58	440,71	681,09	1121,80
6	990,10	1210,12	1870,19	3080,31
7	1620,35	1980,43	3060,66	5041,09
8	2251,31	2751,60	4252,47	7004,07
9	2882,95	3523,61	5445,58	8969,19
10	3515,28	4296,45	6639,97	10936,42
11	4148,26	5070,09	7835,60	12905,69
12	4781,88	5844,52	9032,44	14876,95
13	5416,13	6619,71	10230,46	16850,17
14	6050,98	7395,65	11429,63	18825,28
15	6686,44	8172,31	12629,94	20802,25
16	7322,47	8949,69	13831,34	22781,02
17	7959,07	9727,76	15033,81	24761,57
18	8596,23	10506,50	16237,32	26743,83
19	9233,93	11285,91	17441,86	28727,77
20	9872,15	12065,96	18647,39	30713,35
21	10510,88	12846,64	19853,89	32700,53

5 priedas, Stiklas/stiklas tipo saulės modulio pinigų srautai be utilizavimo kaštų

Metai	Diskontuota elektros energijos generacija, kWh				Elektros energijos kaina, kWh	Pajamos, Eur			
	3,195	3,905	6,035	9,94	Galia, kW	3,195	3,905	6,035	9,94
1	0	0	0	0	0,160	0	0	0	0
2	4075	4980	7696	12677	0,164	795,02	971,69	1501,71	2473,40
3	3975	4859	7509	12367	0,168	814,90	995,99	1539,25	2535,24
4	3878	4740	7326	12066	0,172	835,27	1020,89	1577,73	2598,62
5	3784	4624	7147	11771	0,177	856,15	1046,41	1617,18	2663,58
6	3691	4512	6973	11484	0,181	877,56	1072,57	1657,61	2730,17
7	3601	4402	6803	11204	0,186	899,49	1099,38	1699,05	2798,43
8	3514	4294	6637	10931	0,190	921,98	1126,87	1741,52	2868,39
9	3428	4190	6475	10664	0,195	945,03	1155,04	1785,06	2940,10
10	3344	4087	6317	10404	0,200	968,66	1183,91	1829,69	3013,60
11	3263	3988	6163	10150	0,205	992,87	1213,51	1875,43	3088,94
12	3183	3890	6012	9903	0,210	1017,70	1243,85	1922,31	3166,16
13	3105	3796	5866	9661	0,215	1043,14	1274,95	1970,37	3245,32
14	3030	3703	5723	9426	0,221	1069,22	1306,82	2019,63	3326,45
15	2956	3613	5583	9196	0,226	1095,95	1339,49	2070,12	3409,61
16	2884	3525	5447	8972	0,232	1123,35	1372,98	2121,88	3494,85
17	2813	3439	5314	8753	0,238	1151,43	1407,30	2174,92	3582,22
18	2745	3355	5185	8539	0,243	1180,22	1442,49	2229,30	3671,78
19	2678	3273	5058	8331	0,250	1209,72	1478,55	2285,03	3763,57
20	2612	3193	4935	8128	0,256	1239,96	1515,51	2342,15	3857,66
21	2549	3115	4814	7930	0,262	1270,96	1553,40	2400,71	3954,11
22	2487	3039	4697	7736	0,269	1302,74	1592,23	2460,72	4052,96
23	2426	2965	4582	7547	0,275	1335,31	1632,04	2522,24	4154,28
24	2367	2893	4471	7363	0,282	1368,69	1672,84	2585,30	4258,14
25	2309	2822	4362	7184	0,289	1402,90	1714,66	2649,93	4364,59
26	2253	2753	4255	7009	0,297	1437,98	1757,53	2716,18	4473,71
27	2198	2686	4151	6838	0,304	1473,93	1801,47	2784,08	4585,55
28	2144	2621	4050	6671	0,312	1510,78	1846,50	2853,69	4700,19
29	2092	2557	3951	6508	0,319	1548,54	1892,67	2925,03	4817,69
30	2041	2494	3855	6349	0,327	1587,26	1939,98	2998,15	4938,14
31	1991	2434	3761	6195	0,336	1626,94	1988,48	3073,11	5061,59

Metai	Pastovūs kaštai, Eur				Operatyviniai pinigų srautai, Eur			
	Galia, kW							
	3,195	3,905	6,035	9,94	3,195	3,905	6,035	9,94
1	0	0	0	0	-2044,80	-2499,20	-3862,40	-6361,60
2	36,10	44,13	68,20	112,32	758,92	927,57	1433,51	2361,08
3	36,10	44,13	68,20	112,32	778,79	951,86	1471,06	2422,92
4	36,10	44,13	68,20	112,32	799,17	976,76	1509,54	2486,30
5	36,10	44,13	68,20	112,32	820,05	1002,28	1548,98	2551,26
6	36,10	44,13	68,20	112,32	841,45	1028,44	1589,41	2617,85
7	36,10	44,13	68,20	112,32	863,39	1055,26	1630,85	2686,11
8	36,10	44,13	68,20	112,32	885,88	1082,74	1673,33	2756,07
9	36,10	44,13	68,20	112,32	908,93	1110,91	1716,86	2827,78
10	36,10	44,13	68,20	112,32	932,55	1139,79	1761,49	2901,28
11	36,10	44,13	68,20	112,32	956,77	1169,39	1807,23	2976,62
12	36,10	44,13	68,20	112,32	981,59	1199,72	1854,12	3053,84
13	36,10	44,13	68,20	112,32	1007,03	1230,82	1902,18	3133,00
14	36,10	44,13	68,20	112,32	1033,11	1262,69	1951,44	3214,13
15	36,10	44,13	68,20	112,32	1059,84	1295,36	2001,93	3297,29
16	36,10	44,13	68,20	112,32	1087,24	1328,85	2053,68	3382,53
17	36,10	44,13	68,20	112,32	1115,33	1363,18	2106,73	3469,90
18	36,10	44,13	68,20	112,32	1144,11	1398,36	2161,10	3559,46
19	36,10	44,13	68,20	112,32	1173,62	1434,42	2216,83	3651,25
20	36,10	44,13	68,20	112,32	1203,86	1471,38	2273,96	3745,34
21	36,10	44,13	68,20	112,32	1234,86	1509,27	2332,51	3841,78
22	36,10	44,13	68,20	112,32	1266,63	1548,11	2392,53	3940,64
23	36,10	44,13	68,20	112,32	1299,20	1587,91	2454,05	4041,96
24	36,10	44,13	68,20	112,32	1332,58	1628,71	2517,10	4145,82
25	36,10	44,13	68,20	112,32	1366,80	1670,54	2581,74	4252,27
26	36,10	44,13	68,20	112,32	1401,87	1713,40	2647,98	4361,39
27	36,10	44,13	68,20	112,32	1437,82	1757,34	2715,89	4473,23
28	36,10	44,13	68,20	112,32	1474,67	1802,38	2785,49	4587,87
29	36,10	44,13	68,20	112,32	1512,44	1848,54	2856,83	4705,37
30	36,10	44,13	68,20	112,32	1551,15	1895,86	2929,96	4825,81
31	36,10	44,13	68,20	112,32	1590,84	1944,36	3004,91	4949,27

Metai	Grynieji pinigų srautai, Eur				NPV			
	Galia, kW							
	3,195	3,905	6,035	9,94	3,195	3,905	6,035	9,94
1	-2044,80	-2499,20	-3862,40	-6361,60	-2044,80	-2499,20	-3862,40	-6361,60
2	645,08	788,43	1218,49	2006,92	-1415,45	-1730,00	-2673,63	-4403,63
3	661,98	809,08	1250,40	2059,48	-785,38	-959,90	-1483,49	-2443,39
4	679,29	830,25	1283,11	2113,35	-154,59	-188,94	-291,99	-480,93
5	697,04	851,94	1316,63	2168,57	476,90	582,88	900,81	1483,69
6	715,23	874,18	1351,00	2225,17	1109,06	1355,52	2094,90	3450,42
7	733,88	896,97	1386,22	2283,19	1741,89	2128,97	3290,23	5419,21
8	753,00	920,33	1422,33	2342,66	2375,36	2903,22	4486,79	7390,00
9	772,59	944,28	1459,33	2403,61	3009,46	3678,23	5684,53	9362,76
10	792,67	968,82	1497,27	2466,09	3644,17	4453,99	6883,44	11337,42
11	813,25	993,98	1536,15	2530,13	4279,49	5230,48	8083,47	13313,95
12	834,35	1019,77	1576,00	2595,77	4915,38	6007,69	9284,61	15292,30
13	855,98	1046,20	1616,85	2663,05	5551,85	6785,60	10486,83	17272,43
14	878,15	1073,29	1658,72	2732,01	6188,88	7564,18	11690,10	19254,28
15	900,87	1101,06	1701,64	2802,70	6826,45	8343,43	12894,40	21237,83
16	924,16	1129,52	1745,63	2875,15	7464,54	9123,33	14099,69	23223,02
17	948,03	1158,70	1790,72	2949,42	8103,16	9903,86	15305,96	25209,82
18	972,49	1188,60	1836,93	3025,54	8742,28	10685,00	16513,19	27198,19
19	997,57	1219,26	1884,31	3103,57	9381,89	11466,75	17721,34	29188,09
20	1023,28	1250,68	1932,86	3183,54	10021,98	12249,08	18930,40	31179,49
21	1049,63	1282,88	1982,63	3265,52	10662,54	13031,99	20140,35	33172,34
22	1076,64	1315,89	2033,65	3349,54	11303,55	13815,45	21351,15	35166,61
23	1104,32	1349,73	2085,94	3435,67	11945,01	14599,46	22562,80	37162,26
24	1132,70	1384,41	2139,54	3523,94	12586,91	15384,00	23775,27	39159,27
25	1161,78	1419,95	2194,48	3614,43	13229,23	16169,06	24988,55	41157,60
26	1191,59	1456,39	2250,79	3707,18	13871,96	16954,62	26202,60	43157,22
27	1222,15	1493,74	2308,51	3802,24	14515,10	17740,68	27417,41	45158,09
28	1253,47	1532,02	2367,67	3899,69	15158,63	18527,22	28632,97	47160,19
29	1285,57	1571,26	2428,31	3999,57	15802,55	19314,23	29849,26	49163,49
30	1318,48	1611,48	2490,46	4101,94	16446,84	20101,69	31066,25	51167,95
31	1352,21	1652,70	2554,18	4206,88	17091,50	20889,61	32283,94	53173,54

6 priedas, Stiklas/stiklas tipo saulės modulio pinigų srautai su utilizavimo kaštais

Metai	Operatyviniai pinigų srautai, Eur				Grynieji pinigų srautai, Eur			
	Galia, kW							
	3,195	3,905	6,035	9,94	3,195	3,905	6,035	9,94
1	-2648,66	-3237,25	-5003,02	-8240,26	-2648,66	-3237,25	-5003,02	-8240,26
2	758,92	927,57	1433,51	2361,08	645,08	788,43	1218,49	2006,92
3	778,79	951,86	1471,06	2422,92	661,98	809,08	1250,40	2059,48
4	799,17	976,76	1509,54	2486,30	679,29	830,25	1283,11	2113,35
5	820,05	1002,28	1548,98	2551,26	697,04	851,94	1316,63	2168,57
6	841,45	1028,44	1589,41	2617,85	715,23	874,18	1351,00	2225,17
7	863,39	1055,26	1630,85	2686,11	733,88	896,97	1386,22	2283,19
8	885,88	1082,74	1673,33	2756,07	753,00	920,33	1422,33	2342,66
9	908,93	1110,91	1716,86	2827,78	772,59	944,28	1459,33	2403,61
10	932,55	1139,79	1761,49	2901,28	792,67	968,82	1497,27	2466,09
11	956,77	1169,39	1807,23	2976,62	813,25	993,98	1536,15	2530,13
12	981,59	1199,72	1854,12	3053,84	834,35	1019,77	1576,00	2595,77
13	1007,03	1230,82	1902,18	3133,00	855,98	1046,20	1616,85	2663,05
14	1033,11	1262,69	1951,44	3214,13	878,15	1073,29	1658,72	2732,01
15	1059,84	1295,36	2001,93	3297,29	900,87	1101,06	1701,64	2802,70
16	1087,24	1328,85	2053,68	3382,53	924,16	1129,52	1745,63	2875,15
17	1115,33	1363,18	2106,73	3469,90	948,03	1158,70	1790,72	2949,42
18	1144,11	1398,36	2161,10	3559,46	972,49	1188,60	1836,93	3025,54
19	1173,62	1434,42	2216,83	3651,25	997,57	1219,26	1884,31	3103,57
20	1203,86	1471,38	2273,96	3745,34	1023,28	1250,68	1932,86	3183,54
21	1234,86	1509,27	2332,51	3841,78	1049,63	1282,88	1982,63	3265,52
22	1266,63	1548,11	2392,53	3940,64	1076,64	1315,89	2033,65	3349,54
23	1299,20	1587,91	2454,05	4041,96	1104,32	1349,73	2085,94	3435,67
24	1332,58	1628,71	2517,10	4145,82	1132,70	1384,41	2139,54	3523,94
25	1366,80	1670,54	2581,74	4252,27	1161,78	1419,95	2194,48	3614,43
26	1401,87	1713,40	2647,98	4361,39	1191,59	1456,39	2250,79	3707,18
27	1437,82	1757,34	2715,89	4473,23	1222,15	1493,74	2308,51	3802,24
28	1474,67	1802,38	2785,49	4587,87	1253,47	1532,02	2367,67	3899,69
29	1512,44	1848,54	2856,83	4705,37	1285,57	1571,26	2428,31	3999,57
30	1551,15	1895,86	2929,96	4825,81	1318,48	1611,48	2490,46	4101,94
31	1590,84	1944,36	3004,91	4949,27	1352,21	1652,70	2554,18	4206,88

Metai	NPV			
	Galia, kW			
	3,195	3,905	6,035	9,94
1	-2648,66	-3237,25	-5003,02	-8240,26
2	-2019,31	-2468,04	-3814,25	-6282,29
3	-1389,23	-1697,95	-2624,10	-4322,05
4	-758,44	-926,98	-1432,61	-2359,59
5	-126,96	-155,17	-239,80	-394,97
6	505,21	617,48	954,28	1571,76
7	1138,03	1390,93	2149,62	3540,55
8	1771,50	2165,17	3346,17	5511,34
9	2405,60	2940,18	4543,92	7484,10
10	3040,32	3715,94	5742,82	9458,76
11	3675,63	4492,44	6942,86	11435,29
12	4311,53	5269,65	8144,00	13413,64
13	4948,00	6047,55	9346,22	15393,77
14	5585,02	6826,14	10549,49	17375,62
15	6222,59	7605,39	11753,78	19359,17
16	6860,69	8385,29	12959,08	21344,36
17	7499,30	9165,81	14165,35	23331,16
18	8138,42	9946,96	15372,57	25319,53
19	8778,03	10728,71	16580,73	27309,43
20	9418,12	11511,04	17789,79	29300,83
21	10058,68	12293,94	18999,73	31293,68
22	10699,70	13077,41	20210,54	33287,95
23	11341,16	13861,42	21422,19	35283,60
24	11983,05	14645,96	22634,66	37280,61
25	12625,37	15431,01	23847,93	39278,94
26	13268,11	16216,58	25061,98	41278,56
27	13911,25	17002,63	26276,80	43279,43
28	14554,78	17789,17	27492,36	45281,53
29	15198,69	18576,18	28708,64	47284,83
30	15842,99	19363,65	29925,64	49289,29
31	16487,64	20151,56	31143,32	51294,88