



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Hibridinės vėjo ir saulės elektrinės su energijos kaupiklių sistema tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Ignas Grinius**

Projekto autorius

**Doc. Tomas Deveikis**

Vadovas

---

**Kaunas, 2026**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Hibridinės vėjo ir saulės elektrinės su energijos kaupiklių sistema tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

---

**Ignas Grinius**

Projekto autorius

**Doc. Tomas Deveikis**

Vadovas

**Doc. Ramūnas Deltuva**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2026**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

Ignas Grinius

## **Hibridinės vėjo ir saulės elektrinės su energijos kaupiklių sistema tyrimas**

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.

Ignas Grinius

*Patvirtinta elektroniniu būdu*

Grinius, Ignas. Hibridinės vėjo ir saulės elektrinės su energijos kaupiklių sistema tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Tomas Deveikis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: atsinaujinantys energijos šaltiniai, hibridinė elektrinė, saulės energija, vėjo energija, kaupikliai, atsipirkimas, galios santykių optimizacija.

Kaunas, 2026. 52 p.

### **Santrauka**

Šiame darbe nagrinėjama hibridinė vėjo ir saulės elektrinė su energijos kaupiklių sistema. Tyrimo tikslas – nustatyti optimalų saulės elektrinės, vėjo elektrinės ir kaupiklio galios bei talpos santykį, įvertinant vietinės generacijos panaudojimą, importo iš tinklo sumažinimą ir ekonominį atsipirkimą. Darbe modeliuojama sistema, kurioje pagaminta elektros energija pirmiausia naudojama apkrovai dengti, generacijos perteklius kaupiamas energijos kaupiklyje, o eksportas į tinklą nevertinamas.

Tyrimui atlikti sudarytas valandinis hibridinės sistemos modelis. Saulės ir vėjo generacijai apskaičiuoti naudoti „PVGIS TMY“ meteorologiniai duomenys, o apkrovos, generacijos, kaupiklio įkrovos būsenos ir importo iš tinklo balansas vertintas valandiniu žingsniu. Kiekvienam nagrinėtam saulės elektrinės, vėjo elektrinės ir kaupiklio dydžių deriniui apskaičiuoti techniniai ir ekonominiai rodikliai: savų energijos reikmių pasidengimas, importas iš tinklo, ribojama perteklinė energija, investicija, metinės santaupos ir atsipirkimo trukmė.

Atlikus scenarijų analizę ir Pareto sprendinių atranką nustatyta, kad didėjant hibridinės elektrinės ir kaupiklio dydžiui savęs pasidengimo rodiklis didėja, tačiau kartu ilgėja atsipirkimo trukmė ir didėja perteklinės ribojamos energijos kiekis. Ekonominio vertinimo rezultatai parodė, kad didžiausia ekonominė nauda nebūtinai sutampa su didžiausiu vietinės generacijos panaudojimu, todėl optimalus sprendinys turi būti parenkamas kaip techninių ir ekonominių rodiklių kompromisas.

Grinius, Ignas. Study on Hybrid Wind and Solar Power Plants with Storage Systems. Master's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. dr. Tomas Deveikis; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): electrical engineering, engineering sciences.

Keywords: renewable energy sources, hybrid power plant, solar energy, wind energy, energy storage systems, payback period, power ratio optimization.

Kaunas, 2026. 52.

### **Summary**

In this thesis, a hybrid wind and solar power plant with an energy storage system is analysed. The aim of the study is to determine the optimal ratio between the capacity of the solar power plant, wind power plant and energy storage system, taking into account the utilisation of local generation, reduction of grid imports and economic payback. The modelled system assumes that the generated electricity is first used to cover the load, surplus generation is stored in the energy storage system, and electricity export to the grid is not considered.

A time-series model of the hybrid system with an hourly resolution was developed for the study. PVGIS TMY meteorological data were used to calculate solar and wind generation, while the balance between load, generation, battery state of charge and grid import was evaluated on an hourly basis. For each analysed combination of solar power capacity, wind power capacity and storage capacity, technical and economic indicators were calculated: self-sufficiency, grid import, curtailed surplus energy, investment cost, annual net savings and payback period.

The scenario analysis and Pareto solution selection showed that increasing the size of the hybrid power plant and the energy storage system increases the self-sufficiency indicator; however, it also extends the payback period and increases the amount of curtailed surplus energy. The economic assessment showed that the highest economic benefit does not necessarily coincide with the highest utilisation of local generation. Therefore, the optimal solution should be selected as a compromise between technical and economic indicators.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas</b> .....	<b>7</b>
<b>Paveikslų sąrašas</b> .....	<b>8</b>
<b>Santrumpų ir terminų sąrašas</b> .....	<b>9</b>
<b>Įvadas</b> .....	<b>10</b>
<b>1. Literatūros apžvalga hibridinių sistemų galių santykio optimizavimui</b> .....	<b>11</b>
<b>2. Metodinė dalis</b> .....	<b>23</b>
2.1. Matematinis fotovoltinės generacijos modelis .....	23
2.2. Matematinis vėjo elektrinės generacijos modelis .....	25
2.3. Kaupiklio įkrovos ir iškrovos logika .....	26
2.3.1. Kaupiklio dinaminis modelis .....	26
2.3.2. Valdymo strategija – vietinės AEI energijos panaudojimo didinimas be eksporto į tinklą .	26
<b>3. Eksperimentinė dalis</b> .....	<b>27</b>
3.1. Prielaidos .....	27
3.2. Optimizavimo uždavinio sprendimas .....	29
3.2.1. Sprendinių aibės sudarymas .....	29
3.2.2. Techninių ir ekonominių rodiklių apskaičiavimas .....	29
3.2.3. Pareto sprendinių nustatymas .....	30
3.3. Kompromisinių sprendinių parinkimas .....	30
3.3.1. Energetinio nepriklausomumo ir atsipirkimo optimizavimas .....	30
3.3.2. Ekonominis optimizavimas .....	32
<b>4. Rezultatai</b> .....	<b>33</b>
4.1. Optimizacijos tarp energetinio ir ekonomišką sprendinio rezultatai.....	33
4.2. Ekonominio optimizavimo rezultatai ir palyginimas .....	42
4.3. Modelio pritaikymas Vilniaus regione .....	45
<b>Išvados</b> .....	<b>48</b>
<b>Literatūros sąrašas</b> .....	<b>49</b>
<b>Informacijos šaltinių sąrašas</b> .....	<b>52</b>

## Lentelių sąrašas

1 lentelė. Šaltinių su pateiktais galių santykiais apibendrinimas.....	22
2 lentelė. Modeliavime naudojamos ekonominės prielaidos.....	28
3 lentelė. Sprendinių rezultatų suvestinė .....	45
4 lentelė. Sprendinių rezultatų palyginimas Klaipėdoje ir Vilniuje .....	47

## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b>	Kaupiklio SOC grafiko priklausomybė nuo atsižvelgimo į gyvavimo laikotarpį .....	12
<b>2 pav.</b>	Literatūroje esamų hibridinių energijos sistemų tipų pasiskirstymo diagrama [10] .....	13
<b>3 pav.</b>	Literatūroje esamų DI algoritmų tipų pasiskirstymo diagrama [10] .....	13
<b>4 pav.</b>	Tipinė hibridinės vėjo, saulės ir kaupiklių sistemos schema [16] .....	16
<b>5 pav.</b>	Išnagrinėtoje literatūroje metodikų pasiskirstymas .....	21
<b>6 pav.</b>	Nagrinėjamo objekto metinis apkrovos profilis .....	27
<b>7 pav.</b>	Nagrinėjamo objekto tipinė vasaros ir žiemos paros apkrova .....	27
<b>8 pav.</b>	NordPool biržos kainų mėnesiniai vidurkiai .....	28
<b>9 pav.</b>	Valandinio energijos balanso loginė schema .....	29
<b>10 pav.</b>	Tipinis pareto grafikas .....	30
<b>11 pav.</b>	Gauti saulės ir vėjo energijos gamybos duomenys .....	33
<b>12 pav.</b>	Mėnesinis apkrovos balansas .....	34
<b>13 pav.</b>	Mėnesinė prognozuota vėjo ir saulės gamyba, su pertekline energija .....	34
<b>14 pav.</b>	Gautas pasirinktas sprendinys pagal atsipirkimo laiką ir savąjį pasidengimą .....	35
<b>15 pav.</b>	Gautas pasirinktas sprendinys pagal atsipirkimą ir instaliuotą galią .....	35
<b>16 pav.</b>	Atsipirkimo laiko pasiskirstymas tarp filtruotų scenarijų .....	36
<b>17 pav.</b>	Atsipirkimo laiko pasiskirstymas tarp nefiltruotų scenarijų .....	36
<b>18 pav.</b>	Atsipirkimo laiko koreliacija su instaliuota galia ir kaupiklio talpa .....	37
<b>19 pav.</b>	Atsipirkimo laiko koreliacija su kaupiklio talpa .....	38
<b>20 pav.</b>	Saulės elektrinės galios įtaka atsipirkimo laikui .....	39
<b>21 pav.</b>	Vėjo elektrinės galios įtaka atsipirkimo laikui .....	39
<b>22 pav.</b>	Tipinės vasaros dienos apkrova, energija padengta iš AEI ir importas .....	40
<b>23 pav.</b>	Tipinės žiemos dienos apkrova, energija padengta iš AEI ir importas .....	41
<b>24 pav.</b>	Vasaros savaitės įkrovos ir iškrovos grafikas .....	41
<b>25 pav.</b>	Pasirinkto kompromisinio sprendinio atsipirkimo laikotarpio histograma .....	42
<b>26 pav.</b>	Ekonomiško sprendinio parinkimas Pareto fronto grafike .....	43
<b>27 pav.</b>	Tipinės žiemos dienos apkrova, energija padengta iš AEI ir importas ekonominiui sprendiniui .....	44
<b>28 pav.</b>	Tipinės vasaros dienos apkrova, energija padengta iš AEI ir importas ekonominiui sprendiniui .....	44
<b>29 pav.</b>	Sumodeliuota vėjo ir saulės generacija Vilniaus regione .....	45
<b>30 pav.</b>	Parinktas sprendinys Vilniaus regione .....	46
<b>31 pav.</b>	Mėnesinis balansas Vilniaus regione .....	46
<b>32 pav.</b>	Ekonomiško sprendinio parinkimas Vilniaus regionui .....	47

## Santrumpų ir terminų sąrašas

### Santrumpos:

AEI – atsinaujinantys energijos ištekliai.

AEŠ – atsinaujinantys energijos šaltiniai.

FV – fotovoltinė sistema.

SE – saulės elektrinė.

VE – vėjo elektrinė.

ESS – energijos kaupimo sistema.

BESS – baterijos energijos kaupimo sistema.

SOC – kaupiklio įkrovos būseną.

TMY – tipiniai meteorologiniai metai.

PVGIS – fotovoltinių geografinių informacinių duomenų sistema.

GHI – globalioji horizontalioji apšvita.

DNI – tiesioginė normalioji apšvita.

DHI – difuzinė horizontalioji apšvita.

POA – į modulio plokštumą krintanti apšvita.

NOCT – nominalioji darbinė modulio temperatūra.

MPPT – didžiausios galios taško sekimas.

LCOE – išlygintoji elektros energijos gamybos savikaina.

NPC – grynoji dabartinė sistemos kaina.

NPV – grynoji dabartinė vertė.

GA – genetinis algoritmas.

PSO – dalelių spiečiaus optimizavimas.

HOMER – hibridinių energijos sistemų modeliavimo ir optimizavimo programa.

HAES – hibridinė atsinaujinančių energijos šaltinių sistema.

HRES – hibridinė atsinaujinančios energijos sistema.

## Įvadas

Šiuolaikinėje energetikos sistemoje vis didesnis dėmesys skiriamas atsinaujinančių energijos šaltinių (toliau – AEŠ) plėtrai, siekiant sumažinti priklausomybę nuo iškastinio kuro, šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų bei užtikrinti energetinį saugumą [1]. Europos Sąjungoje 2022 m. energijos suvartojimas iš AEŠ siekė net 23 %, o iki 2030 m. numatyta, kad šis skaičius sieks 42,5 %. Tarp labiausiai paplitusių AEŠ – saulės ir vėjo energija – išsiskiria savo plačiu pritaikomumu, augančiu ekonominiu efektyvumu bei tvarumu. Saulės energija išsiskiria tuo, kad ji gali būti panaudojama už sąlyginai nedidelę investicijos kainą. Vėjo energija pasižymi geriausiais bendrais rezultatais įvertinus visus techninius, aplinkosaugos ir socialinius rodiklius [2].

Vis dėlto, ir saulės, ir vėjo energijos išteklių yra nepastovūs, priklauso nuo oro sąlygų ir metų laiko, o tai kelia iššūkių siekiant užtikrinti nuolatinį elektros energijos tiekimą [3]. Vienas iš būdų spręsti šiuos iššūkius – hibridinės sistemos, derinančios saulės ir vėjo elektrines su energijos kaupimo įrenginiais. Tokios sistemos leidžia išnaudoti skirtingų energijos išteklių tarpusavio papildomumą: laikotarpiams, kai saulės energijos išteklių yra mažesni, elektros gamybą gali kompensuoti vėjo elektrinės, o esant palankioms saulės spinduliuotės sąlygoms didesnę dalį energijos gali pagaminti fotovoltiniai moduliai [4]. Energijos kaupikliai (pvz., ličio jonų kaupikliai) tampa būtini stabilizuojant sistemą, mažinant tiekimo pertraukas ir nuostolius [5, 6]. Nepaisant to, hibridinių sistemų projektavimas reikalauja kruopštaus komponentų proporcijų derinimo. Pernelyg didelė vieno šaltinio dalis gali sukelti energijos perteklių ir nuostolius, o per maža – nepakankamą tiekimą. Šiame darbe bus tiriama optimalus santykis tarp vėjo, saulės ir kaupimo komponentų, užtikrinant energetinį efektyvumą, patikimumą bei ekonomiškumą konkrečiomis klimato sąlygomis.

**Darbo tikslas:** išsiaiškinti optimalų santykį tarp vėjo, saulės ir kaupiklio galių bei talpos energetinio efektyvumo ir ekonomiškumo atžvilgiu.

### Darbo uždaviniai:

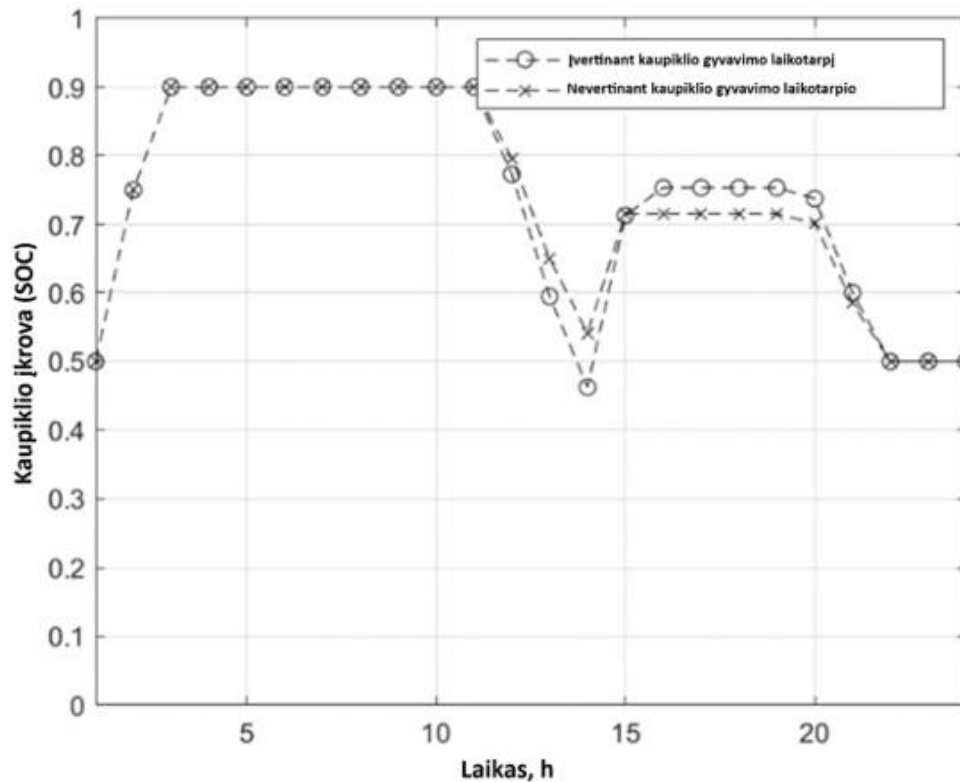
1. atlikti literatūros apžvalgą;
2. surinkti ir išanalizuoti reikiamus duomenis bei įrangą modeliavimui;
3. sumodeliuoti tiriamą sistemą;
4. atlikti bandymus, nustatant optimalius santykius tarp vėjo, saulės ir kaupiklio galių, bei kaupiklio talpos;
5. palyginti ir aptarti rezultatus.

## 1. Literatūros apžvalga hibridinių sistemų galių santykio optimizavimui

Hibridinės sistemos dydžių optimizavimas yra itin aktualus klausimas inžinerijoje. Tai gali prisidėti ir prie geresnių ekonominių faktorių, ir prie optimalaus tinklo balanso. Tinkamai optimizacijai pirmiausia svarbu aptarti tiriamos sistemos elementus, bei klimatą Lietuvoje. Visi elementai – saulės fotovoltiniai (toliau – FV) moduliai, keitiklių efektyvumas, vėjo turbinų efektyvumas, kaupiklių technologijos bei klimato savybės – apšvita, vėjo greitis, aplinkos temperatūra turės įtakos tyrimo rezultatams. Šiame skyriuje bus atlikta ankstesnių šios ir panašios tematikos mokslinių darbų apžvalga, palyginant juose taikytas metodologijas ir aptariant gautus rezultatus.

Shereiqis ir kt. [7] pasiūlė metodą, kaip, naudojant genetinį algoritmą su skaitmeniniu iteraciniu algoritmu, gauti optimalaus dydžio hibridinę sistemą. Pagal šį metodą fotovoltinių elementų ir kaupiklių dydį nustatė atsižvelgdami į vėjo jėgainių parko galią. Palyginus su ankstesniais tyrimais, šiame metode nustatant sistemos dydį neatsižvelgiama į apkrovos profilį. Nustatant optimalų sistemos dydį, remiamasi vėjo energijos slenkamuoju vidurkiu. Be to, pirmajame metodo etape naudojamas genetinis algoritmas, atsižvelgiant į Jenseno vėjo poveikio modelį, kad būtų gauti tikslesni ir pagrįstesni rezultatai. Tyrime daugiausia dėmesio skirta sistemos dydžiui nustatyti taip, kad būtų sumažinti vėjo jėgainių parko galios svyravimai ir padidintas jo patikimumas. Fotovoltinių elementų ir kaupiklių dydžių nustatymas yra sistemos sąnaudų ir patikimumo kompromiso klausimas, taikant skaitmeninį iteracinį metodą. Siūlomas metodas demonstruojamas Omano Sultanato vietovėje, naudojant realius duomenis, kai vėjo profilis yra kelių greičių ir krypčių. Pasirinktoje vietovėje palyginama vėjo jėgainių parko generuojama elektros energija taikant budrumo efekto modelį ir be jo. Pasirinkus optimalų sistemos dydį, vėjo ir fotovoltinės energijos derinio santykis buvo 2,64:1. Be to, kaupiklio galia sudarė 2,3 % visos sistemos vardinės galios.

Zhangas ir kt. [8] pasiūlė optimalaus planavimo modelį hibridiniams mikrotinklams su FV ir vėjo elektrinėmis bei kaupikliais, įvertinant kaupiklių gyvavimo laikotarpį. Optimalūs sprendiniai buvo nustatyti taikant daugiatakslę dalelių spiečiaus optimizaciją (angl. *Multi-Objective Particle Swarm Optimization*) daugiaobjektinei funkcijai, o hibridinio mikrotinklo kaina ir energijos tiekimo praradimo tikimybė (angl. *Loss of Power Supply*) buvo minimizuotos. Autoriai palygino keturis skirtingus atvejus, patikrino pasiūlytą modelį, atsižvelgiant į baterijos gyvavimo laikotarpį. Taip pat nustatė tikslų akumuliatorių skaičių. Įvertino didžiausios įkrovos (angl. *State of Charge*) poveikį kaupikliui. Gauti rezultatai parodė, kad kuo mažesnė įkrova (toliau – SOC), tuo didesnė hibridinio mikrotinklo kaina ir energijos tiekimo patikimumas. Paveiksle atvaizduota darbo autorių gautas kaupiklio SOC grafikas (1 pav.), kai neatsižvelgiama į kaupiklio gyvavimo laikotarpį, ir kai atsižvelgiama.

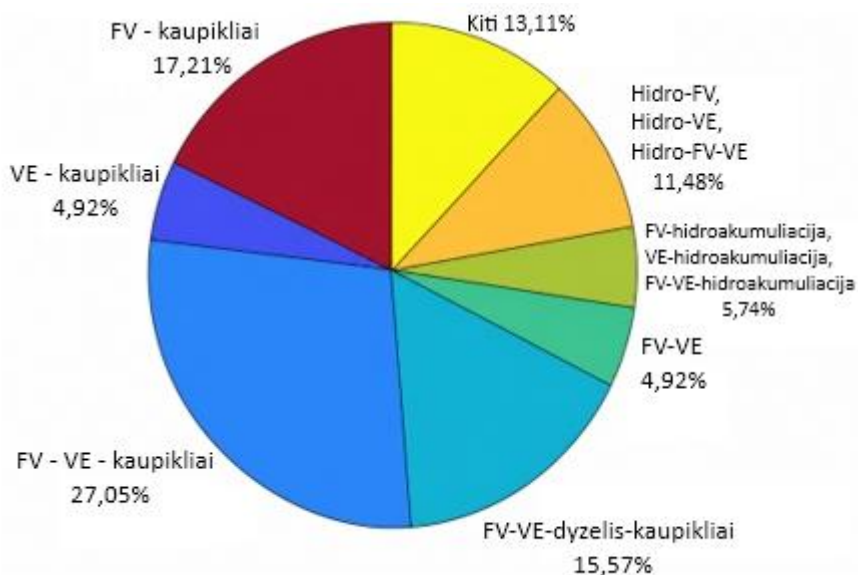


1 pav. Kaupiklio SOC grafiko priklausomybė nuo atsižvelgimo į gyvavimo laikotarpį

Yangas ir kt. [9] pasiūlė tipinių scenarijų generavimo metodą, skirtą izoliuoto mikrotinklo instaliuotų elektrinių galių konfigūravimui. Buvo analizuojami vėjo, apšvitos ir apkrovos svyravimų skirtumai. Apšvitos, apkrovos ir vėjo greičio duomenys per istorinį laikotarpį buvo sugrupuoti atsižvelgiant į erdvėlaikinę koreliaciją ir svyravimų charakteristikų skirtumus, o pasiūlytu metodu sukurti tipiniai scenarijai galėtų atspindėti istorinių duomenų svyravimus per laikotarpį. Tipinių scenarijų metodo, tradicinio laiko eilučių imitavimo metodo ir tipinės dienos mikrotinklo konfigūracijos metodo rezultatai buvo palyginti ir išanalizuoti, siekiant įvertinti kiekvienos konfigūracijos schemos veiksmingumą faktinėje veikloje. Rezultatai parodė, kad, palyginti su tipinės dienos metodu, tipiniai scenarijai, sukurti taikant grupavimo technologiją, gali atspindėti istorinių duomenų svyravimus, o tipinių scenarijų metodo konfigūracijos rezultatas gali atitikti faktinius mikrotinklo eksploatavimo reikalavimus. Lyginant su tipinės dienos metodu, tipinių scenarijų metodas tiksliau atspindi istorinių apkrovos, saulės ir vėjo energijos gamybos duomenų svyravimus, nes scenarijai sudaromi taikant duomenų grupavimo metodus. Dėl to šiuo metodu gauti mikrotinklo konfigūracijos rezultatai geriau atitinka faktines eksploatavimo sąlygas. Lyginant su tradiciniu metiniu modeliavimu, tipinių scenarijų metodas leidžia sumažinti planavimui reikalingų duomenų kiekį, išlaikant pakankamą skaičiavimo tikslumą, ir gali pagerinti metinio mikrotinklo eksploatavimo ekonominį įvertinimą. Autorius tyrimui naudojo *HOMER* programinę įrangą. Taip pat buvo nustatyta, kad optimaliausias variantas buvo vėjas, saulė, kaupiklių sistema, bei dyzelinis generatorius. Sistema be dyzelinio generatoriaus buvo neekonomiška arba nepakankamai patikima (t. y. per didelis nepatenkintas energijos poreikis arba labai didelis LCOE)

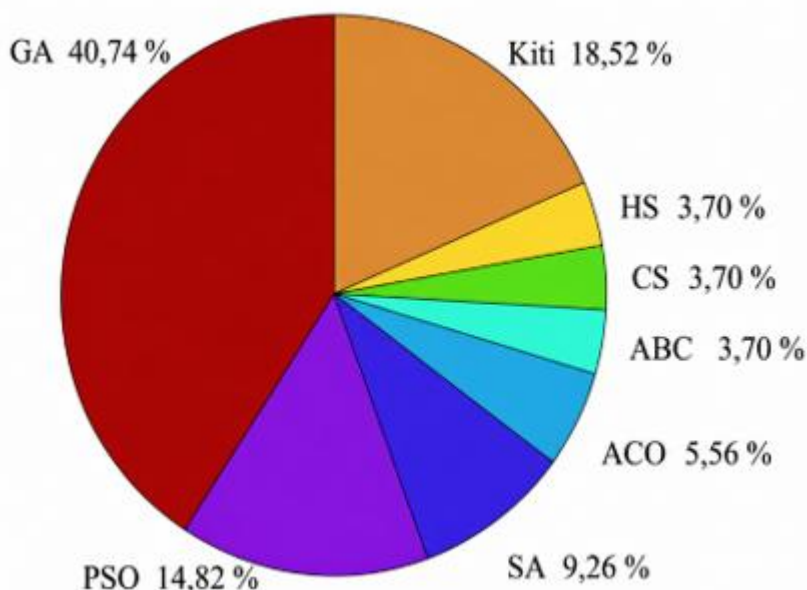
Lianas ir kt. [10] apžvelgė hibridinių atsinaujinančių energijos šaltinių elektrinių (toliau – HAES) instaliuotos galios parinkimo metodologijas. Autorius išskyrė nagrinėjamas hibridines sistemas,

kurios pateikiamos 2 paveiksle. Literatūroje daugiausia nagrinėjamos saulės, vėjo ir kaupiklių sistemos, kadangi jos yra dažniausiai taikomos praktikoje. Po jų eina saulės ir kaupiklių sistemos, kurios sudaro 17 % visų nagrinėtų tyrimų. Dar 15 % sudaro saulės, vėjo, dyzelio, kaupiklių sistemos. Šios trys hibridinės sistemos sudaro 60 % visų mokslinėje literatūroje analizuojamų tyrimų.



**2 pav.** Literatūroje esamų hibridinių energijos sistemų tipų pasiskirstymo diagrama [10]

Šiuose tyrimuose taip pat kartais taikoma dirbtinio intelekto ir mašininio mokymo metodai. Moksliniuose straipsniuose dažniausiai taikomi dirbtinio intelekto algoritmai yra: genetiniai algoritmai (GA), dalelių spiečiaus optimizavimas (PSO), imituotas atvėsimas (SA), skruzdėlių kolonijos optimizavimas (ACO), dirbtinės bičių kolonijos algoritmas (ABC), harmonijos paieška (HS) ir gegutės paieškos algoritmas (CS). Procentine dalimi naudoti algoritmai išreikšti 3 paveiksle.



**3 pav.** Literatūroje esamų DI algoritmų tipų pasiskirstymo diagrama [10]

Iš duomenų akivaizdu, kad genetiniai algoritmai (toliau – GA) ir dalelių spiečiaus optimizavimas (toliau – PSO), yra dažniausi naudojami ir optimaliausi.

Ahado ir kt. [11] atliktame tyrime nustatyta, kad optimalus hibridinės saulės ir vėjo energijos sistemos su energijos kaupimo sistema derinys gali reikšmingai sumažinti priklausomybę nuo dyzelinių generatorių. Tyrėjai siūlo naudoti nuolatinės srovės (DC) konfigūraciją, kurioje kaupikliai padeda stabilizuoti įtampos svyravimus ir užtikrina patikimą energijos tiekimą. Optimalus sistemos variantas apima 312 kaupiklių, 30 kW galios keitiklį ir 90 kW bendrą galią, iš kurios 33 procentus sudaro vėjo jėgainės, o 67 procentus – saulės elektrinės. Autoriai teigia, kad kaupiklių kiekis turėtų būti nustatomas atsižvelgiant į vietinį atsinaujinančios energijos potencialą ir vartojimo pobūdį. Nustatyta, kad vėjo elektrinių integracija leidžia sumažinti reikalingą akumuliatorių kiekį, o vien tik vėjo energija pagrįstos sistemos yra ekonomiškai neefektyvios – jų bendros sąnaudos daugiau nei dvigubai viršija optimalų variantą. Tyrimas taip pat parodė, kad DC konfigūracija leidžia efektyviau išnaudoti energijos kaupimo sistemą nei AC atveju. Be to, nustatyta, jog optimalus rezultatas pasiekiamas tada, kai vėjo energijos dalis sudaro apie 33 procentus visos sistemos galios – toliau didinant šią dalį, sistemos našumas nebe gerėja. Autoriai daro išvadą, kad jų siūloma metodika gali būti naudinga projektuojant hibridines sistemas ir kitose, panašiomis sąlygomis pasižyminčiose vietovėse, t.y. panašiu klimatu ir apkrova kaip Pietų Korėja.

Luo ir kt. [12] atliktame tyrime nustatyta, kad optimizuojant NaS baterijos talpą izoliuoto tinklo sistemoje, kurioje elektros energija gaminama tik iš vėjo energijos, galima pasiekti didesnę sistemos patikimumą ir stabilumą. Tyrime pritaikytas genetikos algoritmas, kuris minimizuoja metines kaupiklio eksploatavimo ir kompensavimo už neišnaudotą energiją sąnaudas. Be to, pasiūlyta dviejų lygių valdymo strategija – aukštesnio lygmens dispečerinio balanso kontrolė ir žemesnio lygmens realaus laiko V/f valdymas. *Matlab/Simulink* testai Nan'ao saloje rodo, kad metodika veikia efektyviai ir stabiliai, nors avarinio režimo valdymas dar reikalauja papildomų tyrimų. Šio autoriaus tyrimas skiriasi nuo kitų tuo, kad naudota buvo tik vėjo energija ir kaupikliai. Verta paminėti, kad naudoti kaupikliai buvo NaS, kas nėra labai plačiai taikoma.

Hosseinalizadeho ir kt. [13] atliktame tyrime nustatyta, kad hibridinės atsinaujinančios energijos sistemos (HAES), sudarytos iš vėjo turbinų, saulės fotovoltinių modulių ir kaupiklių bei vandenilio kuro elementų (FC) kaip atsarginės sistemos, yra ekonomiškai efektyvesnės nei pavienės energijos sistemos, ypač nutolusiose vietovėse be elektros tinklų. Tyrime buvo sukurtas simuliacinis kompiuterinis modelis, leidžiantis optimizuoti komponentų derinius pagal sąnaudų ir patikimumo kriterijus. Modeliavimas buvo atliktas keturioms Irano vietovėms: Moaleman, Marvdasht, Nikouyeh ir Ghadamgah. Geriausius ekonominius rezultatus (mažiausią energijos sąnaudų rodiklį, LCOE – 0,54 \$/kWh) pasiekė Moaleman vietovė. Tyrimo rezultatai rodo, kad:

- hibridinės vėjo turbinų ir FV sistemos, kuriose kaupikliai kaupia perteklinę energiją nakties metu yra efektyviausios;
- kuro elementai (FC) dėl didelių pradinių investicijų ir trumpo tarnavimo laiko dažnai neatsiperka ir praktikoje nebūna pasirinkti ekonomiškiausiu variantu;
- nehibridinėse sistemose, ypač vėjo turbinų pagrindu veikiančiose, reikia žymiai didesnės kaupiklių talpos, kas didina priežiūros sąnaudas;

- tarp nehibridinių sistemų FV sistemos pasirodė ekonomiškesnės nei vėjo turbinos dėl stabilesnės saulės spinduliuotės ir mažesnių baterijų reikalavimų daugumoje Irano regionų.

Pagrindinė šio mokslinės literatūros šaltinio įžvalga yra ta, kad vandenilio kuro elementai praktikoje dažnai nėra ekonomiškai patrauklus sprendimas dėl didelių pradinių investicijų, riboto tarnavimo laikotarpio ir ilgo atsipirkimo laiko.

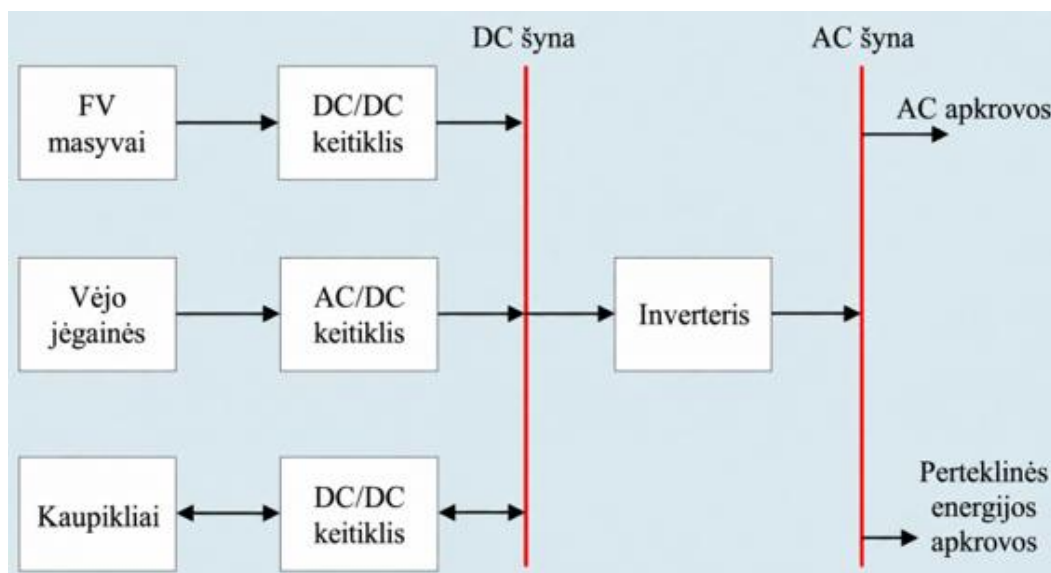
Ouldo Bilalo ir kt. [14] tyrime sukurta metodika, skirta autonominės hibridinės fotovoltinės, vėjo, dyzelinio generatoriaus ir kaupiklių sistemos optimaliam dydžiui nustatyti, pasitelkiant daugiatakslį genetinį algoritimą. Tyrimas atliktas Gandono vietovėje, naudojant vietinius saulės spinduliuotės, temperatūros ir vėjo greičio duomenis. Pagrindinis tikslas buvo sumažinti energijos savikainą (LCE) bei anglies dioksido emisijas. Analizės rezultatai parodė, kad mažėjant energijos savikainai dažnai didėja CO<sub>2</sub> emisijos. Pereinant nuo sprendimo A prie sprendimų B ir C, LCE sumažėjo atitinkamai 38 % ir 54 %, o CO<sub>2</sub> emisijos padidėjo 879,84 kg ir 3635,34 kg per metus. Verta paminėti, kad, kaupiklių sistema Gandono vietovėje buvo mažiau apkrauta – minimalus vidutinis kaupiklių įkrovos lygis siekė 77,58 % sprendinyje, kuriame buvo įtrauktas dyzelinis generatorius. Taip pat nustatyta, kad dyzelinio generatoriaus pasirinkimas ženkliai įtakoja optimalią sistemos konfigūraciją, todėl svarbu atidžiai parinkti įrangą, siekiant minimizuoti kaštus ir emisijas. Šiuo atveju:

- **Sprendimas A:** pasižymi aukšta energijos kaina (LCE) ir labai maža CO<sub>2</sub> emisija, nes dyzelinis generatorius naudojamas minimaliai (tik 4 valandas per metus). Dėl didelio vėjo turbinų ir kaupiklių skaičiaus sistema generuoja daug perteklinės energijos (48 %), o kaupikliai retai naudojami, todėl jų vidutinis įkrovos lygis yra aukštas.
- **Sprendimas B:** kompromisinis variantas, kuriame energijos kaina sumažėja 38 % lyginant su sprendimu A, tačiau CO<sub>2</sub> emisija padidėja dėl didesnio dyzelinio generatoriaus naudojimo (70 valandų per metus). Perteklinė energija sumažėja iki 30 %, o kaupiklių naudojimas išlieka ribotas, tačiau jos išsikrauna mažiau giliai nei sprendime A.
- **Sprendimas C:** turi žemiausią energijos kainą (LCE sumažėja 54 % lyginant su sprendimu A), tačiau CO<sub>2</sub> emisija yra didžiausia dėl intensyvaus dyzelinio generatoriaus naudojimo (980 valandų per metus). Vėjo turbinos visiškai nenaudojamos, o perteklinė energija yra mažiausia (19 %), kas rodo efektyvesnę energijos panaudojimą. Kaupiklių naudojimas išlieka ribotas, o jų minimalus įkrovos lygis yra 60 %.

A. Al-Shamm'as ir kt. [15] panaudojo *Harris Hawk Optimization* (HHO) algoritimą, siekdami optimizuoti hibridinės atsinaujinančios energijos mikrotinklo konfigūraciją, apimančią fotovoltinius modulius (FV), vėjo jėgaines, dyzelinius generatorius ir kaupiklius. Tyrimo tikslas buvo parinkti optimalų mikrotinklo dydį bendruomenei Saudo Arabijos šiaurės regione, minimalizuojant metines sistemos sąnaudas. HHO metodo veiksmingumas buvo palygintas su septyniais kitais metaheuristiniais algoritmais: *Grasshopper Optimization Algorithm* (GOA), *Cuckoo Search Optimizer* (CSO), genetiniu algoritmu (GA), *Big Bang–Big Crunch* (BBBC), *coyote* optimizatoriumi, *crow search* ir *Butterfly Optimization Algorithm* (BOA). Analizės rezultatai parodė, kad HHO algoritmas pasiekė geriausią sprendimą su mažiausiomis metinėmis sąnaudomis (149229,9 JAV dolerių), aplenkdamas kitus metodus. GOA ir CSO taip pat pasižymėjo geru rezultatu, tačiau BBBC, *crow search*, GA ir BOA algoritmai turėjo prastesnę efektyvumą – jie dažnai įstringa vietiniuose sprendimuose, pasižymi didelėmis svyravimų amplitudėmis ir ilgu konvergencijos laiku. Šios problemos ypač būdingos BBBC ir GA algoritmams, kurių sprendimų dispersija buvo didelė, o tai

rodo, kad jiems dažnai nepavyksta rasti globaliai optimalaus sprendimo. Autoriai rekomenduoja toliau tobulinti HHO metodą, siekiant pagerinti algoritmo sprendinių įvairovę paieškos erdvėje ir sumažinti skaičiavimo laiką.

Royus ir kt. [16] tyrime apžvelgiama architektūros, matematiniai modeliai, galios elektronikos konvertavimo topologijos, bei optimizacijos algoritmai. Autorių teigimu, pagrindinis hibridinių vėjo ir saulės energijos sistemų privalumas yra skirtingų generacijos profilių derinimas, leidžiantis užtikrinti tolygesnę elektros energijos gamybą. Kadangi vėjo ir saulės energija papildo viena kitą, hibridinė sistema turi keletą privalumų, palyginti su atskirai veikiančiomis saulės ar vėjo energijos technologijomis. Taip pat pastebima, kad vėjo ir saulės energijos sistemų veikimo pikas būna skirtingu paros ir metų laiku, todėl hibridinė vėjo ir saulės energijos sistema gali pagaminti daugiau energijos nei atskirai veikianči vėjo ar saulės energijos sistema. Tipinė hibridinės vėjo, saulės ir kaupiklių sistemos schema parodyta 4 paveiksle. Šioje schemoje vėjo jėgainė, fotovoltiniai moduliai ir energijos kaupimo sistema prijungiami prie bendros nuolatinės srovės (DC) šynos per atitinkamus galios keitiklius, kad būtų galima reguliuoti galią.



4 pav. Tipinė hibridinės vėjo, saulės ir kaupiklių sistemos schema [16]

Nagrinėjamame šaltinyje taip pat aptariama ir energijos kaupimo sistemos (toliau – ESS) įdiegus ESS į vėjo ir saulės energijos HRES architektūrą, taip pat galima gerokai sumažinti atsinaujinančiųjų išteklių nepastovumą. ESS visų pirma padeda teikti papildomas paslaugas: pikinio reguliavimo, įtampos svyravimų ir mirgėjimo mažinimo, harmonikų mažinimo, dažnio stabilumo, apkrovos išlyginimo ir pereinamųjų procesų stabilumo. Akumuliatoriai ir superkondensatoriai yra dažniausiai naudojami komponentai iš kelių rinkoje esančių ESS tipų. Rinkoje yra įvairių tipų įkraunamų baterijų, pavyzdžiui, švino rūgšties, nikelio-kadmio, ličio jonų ir ličio-polimero. Akumuliatoriaus konstrukcija priklauso nuo tam tikrų sistemos reikalavimų, pavyzdžiui, a) įtampos ir srovės, b) įkrovimo ir iškrovimo greičio ir trukmės, c) įkrovimo ir iškrovimo metu veikiančios temperatūros, d) tarnavimo laiko, išreikšto įkrovimo ir iškrovimo ciklų skaičiumi, e) kainos, dydžio ir svorio apribojimų.

Acakpovio ir kt. [17] atliktame tyrime buvo modeliuojamos, simuliuojamos ir vertinamos dvi atsinaujinančia energetika grįstos hibridinės energijos tiekimo sistemos, siekiant nustatyti tinkamiausią konfigūraciją konkrečiai vietai – Doderkope gyvenvietei Ganoje. Pirmoji sistema

apėmė vėjo jėgainę kartu su energijos kaupimo sistema, o antroji – vėjo jėgainę su vandenilio kuro elementu ir elektrolizeriu. Vertinimas buvo atliktas pagal tris pagrindinius kriterijus: grynąją dabartinę vertę (NPV), energijos sąnaudų vieneto kainą (COE) ir pagamintos elektros energijos kiekį. Simuliacijų rezultatai parodė, kad pirmoji sistema yra ekonomiškai pranašesnė, nes pasižymėjo mažiausiu NPV ir COE 25 metų projekto laikotarpiu. Vis dėlto antroji sistema pasirodė techniškai sklandesnė – perteklinė vėjo energija buvo efektyviai panaudojama vandenilio gamybai elektrolizės būdu, o sukauptas vandenilis buvo naudojamas elektros gamybai mažo vėjo laikotarpiais, taip pagerinant sistemos autonomiją. Nepaisant to, kuro elementų sistema pasižymėjo labai mažu šiltnamio efektą sukeliančių dujų (toliau – ŠESD) išmetimu, todėl ateityje galėtų būti ekonomiškai naudingesnė pasinaudojant anglies kreditais. Autoriai pažymi, kad reikalingi tolimesni tyrimai bei technologinė pažanga vandenilio kuro elementų srityje, siekiant, kad ši alternatyva taptų konkurencinga tradicinėms energijos kaupimo sistemoms.

Lawano ir Zainalo Abidino [18] atliktoje literatūros apžvalgoje nagrinėjami hibridiniai atsinaujinančios energijos šaltiniai, paremti saulės ir vėjo energijos integracija, ypatingą dėmesį skiriant jų modeliavimui, projektavimui bei optimizavimui. Tyrime aptiriamos tiek neprijungtos prie tinklo, tiek prijungtos sistemos, analizuojami jų konfigūracijos variantai (AC, DC bei mišrūs), komponentų sąveika ir eksploataavimo sąnaudos. Apžvalgoje išsamiai lyginami įvairūs optimizavimo metodai, įskaitant genetinius algoritmus, dalelių spiečiaus optimizaciją (PSO) ir programinę įrangą, tokią kaip *HOMER*. Taip pat aptariami pagrindiniai projektavimo kriterijai – patikimumas, sąnaudų efektyvumas, energijos tiekimo praradimų tikimybė (LPSP) ir vieneto savikaina (LCOE). Tyrimo autoriai teigia, kad norint pasiekti sisteminį balansą ir ekonomiškai efektyvų veikimą, optimali saulės ir vėjo energijos proporcija mišriose sistemose yra 72 % saulės ir 28 % vėjo energijos. Apibendrinant, labiausiai rekomenduojami optimizavimo metodai yra genetiniai algoritmai ir dalelių spiečiaus optimizacija (PSO), kurie pasižymi lankstumu ir geru sudėtingų, daugkriterinių sistemų sprendimo efektyvumu. Tarp programinės įrangos priemonių kaip patikimiausia ir plačiausiai taikoma įvardijama *HOMER* (angl. *Hybrid Optimization Model for Electric Renewables*), kuri leidžia atlikti tiek techninį, tiek ekonominį sistemų modeliavimą bei daugiakrikslę analizę.

Soudagaro M.E.M. ir kt. [19] atliktoje apžvalgoje analizuojami saulės ir vėjo energijos integracijos techniniai aspektai bei iššūkiai, kylantys ypač silpnuose tinkluose ar izoliuotose sistemose. Autoriai akcentuoja, jog dėl saulės ir vėjo energijos nepastovumo būtina siekti optimalios šių šaltinių integracijos, kuri leistų ne tik padidinti sistemos patikimumą, bet ir sumažinti eksploatacines sąnaudas. Tyrime teigiama, kad dažnio bei įtampos svyravimai, taip pat harmoniniai trikdžiai, daro reikšmingą poveikį tiek tinklui prijungtoms, tiek autonominėms sistemoms, o silpna infrastruktūra šiuos neigiamus reiškinius tik dar labiau sustiprina. Siekiant išvengti minėtų trikdžių, rekomenduojama hibridines sistemas projektuoti pasitelkiant pažangius, greitai reaguojančius valdiklius, taikyti optimizacijos metodus bei naudoti kompaktiškas galios elektronikos topologijas, tinkamas mažos galios buitiniams ar žemės ūkio elektros energijos poreikiams. Daug dėmesio skiriama pažangiems energijos valdymo metodams, tokiems kaip *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), kuris leidžia optimizuoti energijos gamybą pasitelkiant tokius algoritmus kaip „*hill-climb search*“, „*power signal feedback control*“ ar „*tip speed ratio*“. Šios technologijos, integruotos su daiktų internetu (IoT), suteikia galimybę sistemą valdyti efektyviai, be papildomų mechaninių komponentų. Papildomai straipsnyje aptiriamos ir esminės kliūtys, kurios riboja hibridinių atsinaujinančių energijos šaltinių sistemų (HRES) diegimą platesniu mastu. Viena svarbiausių kliūčių įvardijama aukšta pradinė investicijų kaina, ypač aktuali buitiniams reikmėms, kurios dažnai nulemia

potencialių naudotojų abejingumą tvariems sprendimams. Technologiškai HRES diegimas kelia iššūkių dėl būtinybės koordinuoti kelių energijos šaltinių nepastovumą, o tai reikalauja pažangių valdymo algoritmų bei sistemų. Erdvės ir žemės trūkumas tampa svarbiu ribojančiu veiksniu, ypač tankiai apgyvendintuose regionuose, kur saulės ir vėjo sistemų sinergija gali dar labiau apsunkinti infrastruktūros įrengimą. Hibridinėse sistemose padidėja techninės priežiūros poreikis ir rizika, jog vienos grandies sutrikimai gali paveikti visos sistemos veikimą. Kai kuriose šalyse išlieka ir kvalifikuotų specialistų trūkumas, apsunkinantis diegimo ir eksploatavimo procesus. Taip pat pabrėžiama, kad politinės ir reguliacinės aplinkos palaikymo stygiai bei sudėtingos leidimų išdavimo procedūros gali tapti papildomu barjeru. Energijos kaupimo technologijos, kurios būtinos užtikrinti nuolatinį tiekimą, šiandien vis dar susiduria su tokiais iššūkiais kaip aukšta kaina, ribotas tarnavimo laikas ar nepakankama talpa didesnio masto sistemoms. Integracija į esamus elektros tinklus taip pat išlieka komplikuota, kadangi daugelis tinklų nėra pritaikyti priimti kintamos generacijos šaltinių ar didesnio masto hibridinių konfigūracijų. Be to, kai kuriose šalyse ekonomiškai nenaudinga diegti HRES dėl subsidijuotų iškastinių šaltinių prieinamumo, o socialiniai ir kultūriniai veiksniai – tokie kaip vartotojų įpročiai ar skeptiškas požiūris į technologijas – gali reikšmingai sulėtinti plėtrą. Taip pat atkreipiamas dėmesys į aplinkosauginius aspektus, susijusius su kai kurių komponentų, pavyzdžiui, fotovoltinių modulių ar kaupiklių, gamyba bei eksploatavimu. Nepaisant šių barjerų, autoriai teigia, kad technologinės pažangos tempai bei didėjanti paklausa tvariems energijos sprendimams palaipsniui silpnina šias kliūtis. Visgi pabrėžiama, jog kiekviena šalis ar regionas turės savitų iššūkių, kuriuos reikės įveikti siekiant plačios HRES integracijos.

Bai ir kt. [20] nagrinėjo saulės ir vėjo hibridinių energijos sistemų optimizavimą, ypatingą dėmesį skirdami energijos svyravimams, kaštams ir saugumui. Atliktas Qingdao miesto atvejis parodė, kad optimalus saulės fotovoltinės galios santykis hibridinėje sistemoje siekia 0,71, o tai leido sumažinti elektros energijos kaštus 40 %, o energijos kaupimo sistemos – vandenilio bako – išlaidas 52 %. Autoriai teigia, kad energijos svyravimų vertinimas tik vienu laiko mastu gali klaidingai atspindėti sistemos energijos kaupimo efektyvumą, todėl būtina atsižvelgti į skirtingus laiko intervalus. Be to, vėjo ir saulės energijos santykio optimizavimas yra stabilus tarp skirtingų metų, tačiau energijos kaupimo talpos poreikis gali ženkliai skirtis. Taip pat atlikta jautrumo analizė parodė, kad vienintelis reikšmingas parametras, turintis įtakos optimaliai galios proporcijai, yra vėjo jėgainių nominalus greitis. Atsižvelgiant į šiuos rezultatus, autoriai siūlo skatinti vėjo ir saulės energijos sistemų derinimą, energijos kaupimo technologijų plėtrą bei vietinį atsinaujinančios energijos naudojimą.

Dalwadi ir kt. [21] tyrimo metu analizavo autonominę saulės-vėjo hibridinę energijos sistemą, kuri sujungia saulės ir vėjo energiją, siekiant užtikrinti patikimą ir nuolatinį energijos tiekimą. Naudojant tik vieną iš šių energijos šaltinių, energijos gamyba gali svyruoti, tačiau jų derinys suteikia stabilų energijos šaltinį. Pagrindinis tyrimo tikslas buvo optimizuoti šią autonominę hibridinę sistemą, maksimaliai išnaudojant atsinaujinančius energijos šaltinius ir minimaliai didinant bendras sistemos sąnaudas. Tyrime buvo naudojama *HOMER* programinė įranga. Ši programa leidžia supaprastinti energijos sistemų projektavimą tiek neprijungtoms, tiek prijungtoms prie tinklo sistemoms ir pateikia kaštų bei naudos analizę, taip padedant pasirinkti optimalų sistemos komponentų konfigūraciją pagal resursų prieinamumą, technines galimybes ir ekonominius rodiklius. Analizės vieta – Vadodara miestas (platumas 22°19' Š., ilguma 73°14' R.). Saulės spinduliuotės duomenys buvo imti iš NASA, vidutinis vėjo greitis – 3,74 m/s, o vidutinė saulės spinduliuotė – 5,53 kWh/m<sup>2</sup> per dieną. Simuliacijos rezultatai rodo, kad siūloma hibridinė sistema gali nuolat tiekti elektros energiją 5 kWh/dienai AC apkrovai visus metus. Sistemos jautrumo analizėje buvo vertinti vėjo greitis, saulės spinduliuotė, kuro

ir akumuliatorių kainos. Vienerių metų trukmės valandinės serijos simuliacijos leido atrinkti optimaliausią sistemos konfigūraciją, atitinkančią apkrovos poreikius. Atlikta analizė taip pat lygino tinklo prijungimo atstumą, kai ekonominiu požiūriu verta plėsti elektros tinklą arba diegti autonominę sistemą. Vertinant pagal bendrą grynąją dabartinę vertę (NPC), buvo nustatyti tokie lūžio taško atstumai: 3,45 km saulės sistemoms, 6,61 km vėjo jėgainėms ir 2,65 km saulės-vėjo hibridinėms sistemoms. Optimizacijos rezultatai parodė, kad Vadodaras regionui optimaliausia yra hibridinė sistema, sudaryta iš 2 kW saulės modulių ir 1 kW vėjo jėgainės, t. y. 2:1 saulės ir vėjo pajėgumų santykio. Pagal simuliacijos duomenis, energijos gamyboje dalis tenkanti saulės moduliams yra apie 61 %, o vėjo jėgainėms – 39 %. Šis sprendimas užtikrina mažiausias bendrąsias investicines ir eksploatacines išlaidas bei sumažintą energijos kainą iki 1,232 Rs/kWh. Sistema taip pat ženkliai sumažina anglies dioksido ir kitų teršalų išmetimą – nuo 80 % iki 90 % lyginant su tradicinėmis dyzelinėmis elektrinėmis. Nors pradinės investicijos į saulės-vėjo hibridinę sistemą yra didesnės už tradicinių dyzelinių generatorių, bendros energijos gamybos kaštai yra mažesni, nes eliminuojamos išlaidos, susijusios su elektros tinklo plėtra. Be to, tokia sistema yra ekologiška, reikalauja mažesnės priežiūros ir yra patikima bei ekonomiškai sprendžiant nuotolinių ar kaimo vietovių elektros tiekimo problemas.

Nigamo ir Kanto Sharma [22] tyrime buvo nagrinėjama saulės, vėjo ir hidroenergijos integracija į hibridinę energijos sistemą, siekiant užtikrinti pastovų elektros tiekimą ir padidinti sistemos patikimumą. Naudojant MPPT technologiją, buvo modeliuojamas ir analizuojamas dviejų skirtingų hibridinių sistemų veikimas *MATLAB* aplinkoje. Remiantis simuliacijų rezultatais, nustatyta, kad saulės-vėjo sistema pasirodė veiksmingesnė už saulės-hidro sistemą, tiek efektyvumo, tiek stabilumo požiūriu. Tyrimo naujovė – hibridinės energijos sistemos parametrų charakteristikų analizė, kuri padeda sumažinti harmonikus ir pagerinti elektros kokybę. Autoriai taip pat pažymi, kad toks modelis gali būti toliau plėtojamas siekiant įvertinti jo tinkamumą elektromobilių įkrovimui esant įvairioms sąlygoms. Taip pat paminėta, kad *HOMER* programinė įranga yra vienas pagrindinių įrankių, naudojamų hibridinių sistemų optimizavimui, leidžiantis įvertinti tokio tipo sistemų ekonomiškumą ir techninį tinkamumą. Autoriai pažymi, kad toks modelis gali būti toliau plėtojamas siekiant įvertinti jo tinkamumą elektromobilių įkrovimui esant įvairioms sąlygoms.

Sharmas ir kt. [23] nagrinėjo galimybę įdiegti tinklu sujungtą hibridinę atsinaujinančios energijos sistemą, skirtą universiteto miestelio poreikiams Indijoje, Kota mieste, tenkinti. Naudojantis *HOMER* programine įranga, buvo atlikta įvairių scenarijų analizė, keičiant saulės ir vėjo energijos sistemų galias. Optimalus sprendimas, kuriame lyginamoji energijos kaina (LCOE) beveik prilygo elektros įsigijimo iš tinklo kainai, buvo pasiektas naudojant 585 kW galios saulės modulius ir 15 kW galios vėjo turbiną. Bendra pagaminta atsinaujinančios energijos dalis siekė 46,98 %, o per metus buvo sugeneruota apie 924 141 kWh. Apskaičiuota, kad sistemos grynoji dabartinė vertė (NPC) 25 metų laikotarpiui siekia apie ₹221 mln., o metinė taupoma suma sudaro apie ₹8,3 mln. Autoriai daro išvadą, kad tokios hibridinės sistemos diegimas gali užtikrinti tvarią ir ekonomiškai pagrįstą elektros gamybą universitetiniam miesteliui. Kadangi Indija labai saulėta vietovė, santykis vėjas:saulė gavosi 1:39.

Mulleris ir kt. [24] taip pat atliko panašų tyrimą Indijoje. Autoriai nagrinėjo hibridinės atsinaujinančios energijos sistemos (HRES), apimančios saulės fotovoltinius modulius ir vėjo turbinas, diegimo galimybes akademinėje aplinkoje, naudojant *HOMER* programinę įrangą sistemų modeliavimui ir optimizavimui. Simuliacijų rezultatai parodė, kad optimaliausia sistemos konfigūracija yra 3007 kW galios FV sistema, dvi 1,5 MW galios vėjo turbinos bei 1927 kW keitiklis. Apskaičiuota, kad tokia sistema galėtų patenkinti 41,5 procento visos reikalingos elektros energijos,

iš kurios 19 procentų sudaro saulės energija, o 22,5 procento – vėjo energija. Sistemos įrengimas reikalautų apie 6,58 mln. JAV dolerių pradinės investicijos, tačiau metinės eksploatacinės išlaidos sumažėtų 40,8 procento, palyginti su esamu energijos tiekimu iš tinklo. Numatytas atsipirkimo laikotarpis – apie 10 metų. Tyrimas taip pat parodė, kad energijos kaupimo sistemų integravimas šiuo atveju nėra ekonomiškai pagrįstas dėl palankiai sutampančių saulės gamybos ir elektros apkrovos kreivių bei aukštos kaupimo įrangos kainos. Pastebėta, kad vėjo ir saulės energija tarpusavyje papildo viena kitą – pavyzdžiui, vasarą dominuoja vėjo energija, o pavasarį – saulės. Autoriai teigia, kad sistemos stabilumui palaikyti būtų naudinga papildomai integruoti bazinės galios generavimo šaltinį, pavyzdžiui, atliekų deginimo įrenginį. Šis sprendimas galėtų sumažinti priklausomybę nuo tinklo ir energijos kaupimo sistemų. Tyrimo išvados rodo, kad tokios hibridinės sistemos yra ekonomiškai ir ekologiškai pagrįstos, ypač regionuose, turinčiuose tinkamas saulės ir vėjo sąlygas, ir gali tapti svarbia priemone mažinant anglies dvideginio emisijas bei didinant energetinį savarankiškumą.

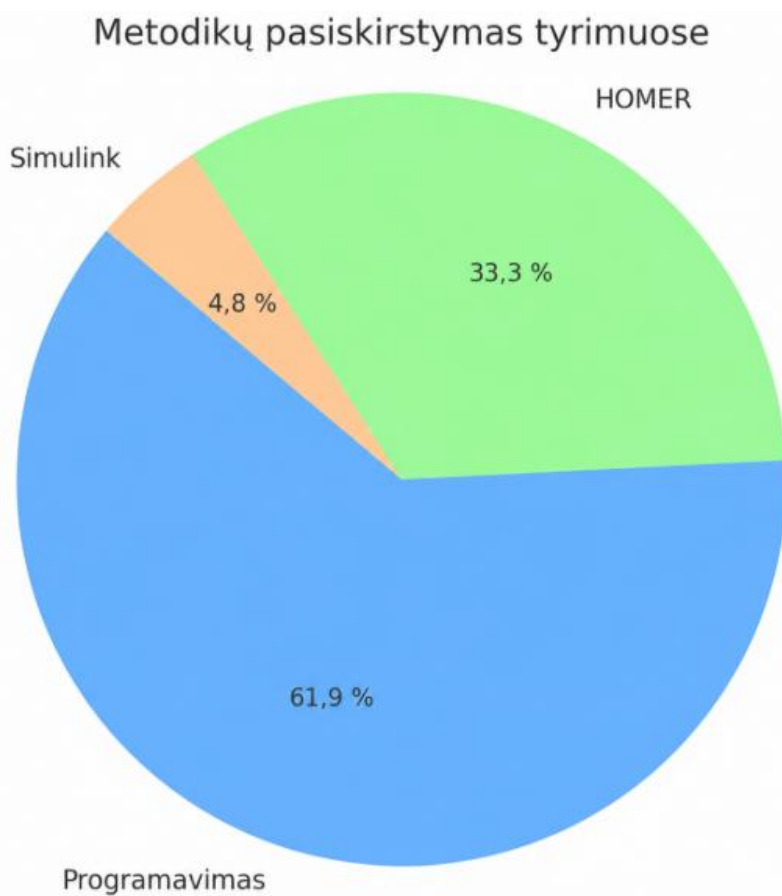
Lyginant Mullerio [23] ir Sharma [24] tyrimus, kurie abu buvo atliekami Indijos regione, bei naudojo saulės ir vėjo hibridinę sistemą be kaupiklių, rezultatai skiriasi. Sharma [23] rezultatuose teigia, kad optimaliausia sistema yra gaunama prie 1:39 santykiu, o Muller [24] optimaliausią sistemą parinko 3007 kW saulės, bei dvi 1,5 MW galios vėjo turbinos, todėl FV ir vėjo elektrinių galios santykis yra beveik 1:1.

A. Memonas ir kt. [25] savo darbe pasiūlė generalizuoto sumažinto gradientinio (GRG) metodo taikymą hibridinės atsinaujinančios energijos sistemos (HRES) komponentų dydžių optimizavimui. Tyrime lygintos dvi pagrindinės konfigūracijos: autonominė („*standalone*“) sistema, kurioje patikimumas buvo kintamas per LPSP (*loss of power supply probability*) intervalą nuo 0 iki 30 %, ir tinklu sujungta sistema be baterijų, kurioje energijos trūkumą dengė elektros pirkimas iš tinklo, o perteklius – pardavimas atsižvelgiant į dvi skirtingas pardavimo kainas (0 ir 0,029 \$/kWh). GRG metodas, įgyvendintas *Excel* „*Solver*“ įskiepyje, leido sumažinti sprendžiamų kintamųjų skaičių, naudojant lygybės tipo apribojimus, o netolyginiai apribojimai buvo įtraukti per „*slack*“ kintamuosius. Autoriai teigia, kad didinant LPSP, t. y. šiek tiek mažinant sistemos patikimumą, energijos savikaina (COE) ženkliai krinta, nes toleruotinas nedidelis apkrovos neaptarnavimo lygis leidžia sumažinti saulės, vėjo ir baterijų talpumą. Pavyzdžiui, visiškai patikima sistema (LPSP = 0 %) reikalauja didžiausios baterijų ir vėjo jėgainių galios, tuo tarpu 98 % patikimumo atveju optimalių komponentų talpa sumažėja, suteikiant priimtina kompromisą tarp COE, komponentų dydžių ir nedidelio perteklinės energijos lygio. Autorius savo gautus rezultatus naudojant GRG metodą palygino su *HOMER* simuliacijos rezultatais ir jis pasitvirtino.

Niveditha ir Singaravel [26] analizavo galimybę pasiekti patikimą, švarią ir prieinamą energiją naudojant saulės ir vėjo išteklių hibridizavimą Net Zero Energy (NZE) principu veikiančių pastatų grupėje (NZEBS). Energijos tiekimui užtikrinti svarbų vaidmenį atlieka ne tik fotovoltinės (FV) ir vėjo jėgainės, bet ir energijos kaupimo sistema, kuri leidžia subalansuoti gamybos ir suvartojimo neatitikimus. Tyrimo tikslas – optimaliai parinkti šių komponentų dydžius, taikant NSGA-II algoritmu pagrįstą daugiatakslę optimizaciją, kurioje atsižvelgiama į tris kriterijus: metinę sistemos kainą (ACS), galios tiekimo praradimo tikimybę (LPSP) bei bendrą energijos mainų su tinklu apimtį (TET), kuri yra svarbi siekiant mažinti apkrovą elektros tinklui. Tyrimo metu naudoti valandiniai saulės spinduliuotės ir vėjo greičio duomenys iš Viralimalai vietovės Tamilnade (Indija). Gauti optimizavimo sprendiniai analizuoti dviem patikimumo lygiais: LPSP = 0 % ir LPSP = 0,1 %. Esant visiškai patikimai sistemai (LPSP = 0), siūlomos metodikos nustatytas optimalus komponentų dydis buvo 28,7 kW FV, 3,8 kW vėjo ir net 854,5 kWh talpos baterijų sistema, o bendros metinės sąnaudos

sudarė 33 794,88 USD. Palyginimui, taikant tik dviejų tikslų (ACS ir LPSP) optimizavimą, FV galia siekė net 54,3 kW, vėjo – 18,6 kW, o baterijų talpa buvo tik 125,7 kWh, tačiau metinė kaina siekė tik 7683 USD. Nors abiem atvejais buvo pasiektas NZE balansas (metinė gamyba viršijo metinį suvartojimą), skirtumai kaupiklių dydžiuose rodo skirtingus energijos valdymo strategijos pasirinkimus. Antrojo atvejo, kai leidžiamas LPSP=0,1, optimizavimo rezultatai rodo žymiai sumažėjusią BS talpą – 83,6 kWh siūlomos metodikos atveju ir 69,1 kWh pagal dviejų tikslų metodiką. Abu sprendiniai taip pat pasiekė NZE balansą, tačiau pasiūlyto metodo rezultatai pasižymėjo mažesniu bendru energijos mainų kiekiu su tinklu, t. y. sumažintu TET. Šis rodiklis svarbus, nes didelės perteklinės generacijos eksportas ar deficito importas iš tinklo sukelia papildomą apkrovą tinklo infrastruktūrai. Išvados patvirtina, kad įtraukus trečią optimizavimo kriterijų – TET – galima efektyviau sumažinti priklausomybę nuo tinklo, išlaikant ekonomiškumą ir pakankamą patikimumo lygį. Tyrimas parodė, kad pasiūlyta trijų tikslų optimizavimo metodika gali būti sėkmingai pritaikoma įvairiuose geografiniuose kontekstuose, jei turimi atitinkami saulės ir vėjo duomenys. Ji taip pat gali būti taikoma didesnio masto sistemoms, tokioms kaip NZE bendruomenės ar mikrogridai. Kaupikliai šiame kontekste išlieka esminiu elementu – tiek siekiant sumažinti energijos trūkumus, tiek reguliuoti pertekliaus paskirstymą, tačiau jų talpa ir poreikis kinta priklausomai nuo leidžiamo patikimumo lygio bei energijos mainų strategijos.

Peržvelgus nagrinėta literatūrą, metodikų pasiskirstymas linksta tarp *HOMER* ir programavimo (DI priemonių, *Matlab/Simulink*). Metodikų išraiškos procentais pateikiamos 5 paveiksle.



**5 pav.** Išnagrinėtoje literatūroje metodikų pasiskirstymas

Siekiant palyginti literatūroje pateikiamus hibridinių sistemų dydžių parinkimo rezultatus, 1 lentelėje apibendrinti tie nagrinėti šaltiniai, kuriuose pateiktas konkretus saulės, vėjo ir kaupimo komponentų santykis arba optimali sistemos konfigūracija. Iš lentelės matyti, kad optimalūs santykiai ženkliai priklauso nuo vietovės klimato sąlygų, apkrovos profilio, sistemos prijungimo tipo ir taikomo optimizavimo kriterijaus.

1 lentelė. Šaltinių su pateiktais galių santykiais apibendrinimas

<b>Autorius</b>	<b>Sistema</b>	<b>Optimizavimo metodas</b>	<b>Gautas SE:VE santykis</b>	<b>Kaupiklio įsivertinimas</b>
Shereiqi ir kt. [7]	VE, SE ir BESS	Genetinis algoritmas (GA) ir iteracinis metodas	2,64:1	BESS galia sudarė tik 2,3% visos sistemos galios
Ahadi ir kt. [11]	VE, SE ir BESS	Hibridinės sistemos konfigūracijos optimizavimas	2:1	Dydis nepateiktas, nurodyta, kad vėjo integracija mažina kaupiklių kiekį
Lawan ir Zainal Abidin [18]	VE ir SE	GA, PSO, HOMER	2,6:1	Kaupiklio santykis nepateiktas
Bai ir kt. [20]	VE, SE ir BESS	Optimizavimo modelis ir jautrumo analizė	2,45:1	Kaupimo poreikis vertintas, tačiau konkretus santykis nepateiktas
Dalwadi ir kt. [21]	VE ir SE	HOMER	2:1	Kaupiklio santykis nepateiktas
Sharma ir kt. [23]	VE ir SE	HOMER	39:1	Kaupiklis neakcentuojamas
Muller ir kt. [24]	VE, SE ir BESS	HOMER	1:1	BESS sudarė 32% visos sistemos galios
Niveditha ir Singaravel [26]	VE, SE ir BESS	NSGA-II daugiatakslė optimizacija, LPSP = 0	7,55:1	BESS talpa sudarė 2629% visos sistemos galios (26,3 kWh : 1 kW instaliuotos galios)
Niveditha ir Singaravel [26]	VE, SE ir BESS	ACS ir LPSP, LPSP = 0	2,92:1	BESS talpa sudarė 172,4% visos sistemos galios (1,72 kWh : 1 kW instaliuotos galios)

## 2. Metodinė dalis

### 2.1. Matematinis fotovoltinės generacijos modelis

Saulės šviesos energijos elektrinės generuojama galia priklauso nuo kelių pagrindinių veiksnių:

1. į modulio plokštumą patenkančios spinduliuotės;
2. modulio elektros konversijos efektyvumo ir jo temperatūros;
3. sistemos nuostolių.

Saulės padėtis apibūdinama dviem kampais, zenito ( $\theta_z$ ), bei azimuto ( $\gamma_s$ ).

Zenito kampas apskaičiuojamas:

$$\cos(\theta_z) = \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega); \quad (1)$$

Čia  $\phi$  – geografinė platumas,  $\delta$  – saulės deklinacija,  $\omega$  – saulės valandinis kampas ( $0^\circ$  vidurdienį).

Saulės deklinacija apskaičiuojama pagal formulę:

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin\left(\frac{360^\circ}{365}(284 + n)\right); \quad (2)$$

Čia  $n$  – metų dienos skaičius.

Saulės azimuto kampas apskaičiuojamas:

$$\sin(\gamma_s) = \frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\sin(\theta_z)}; \quad (3)$$

Zenito ir azimuto kampai vėliau naudojami nustatyti tiesioginės spinduliuotės kampinį santykį su moduliu.

Spinduliuotė ant horizontalios ir pasvirusios plokštumos skaičiuojama pagal formulę:

$$GHI = DNI \cos(\theta_z) + DHI; \quad (4)$$

Čia GHI – globali horizontali spinduliuotė, bendras saulės spinduliuotės kiekis, patenkantis ant horizontalios plokštumos, sudarytas iš tiesioginės ir difuzinės dalių [ $W/m^2$ ], DNI – tiesioginė normali spinduliuotė, tiesioginė saulės spinduliuotė, krintanti statmenai paviršiui, nukreiptam į saulę. Tai spinduliuotė tiesiai iš saulės disko, be atmosferos sklaidymo [ $W/m^2$ ], DHI – difuzinė horizontali spinduliuotė, tai atmosferoje išsklaidyta saulės šviesa, pasiekianti horizontalų paviršių iš viso dangaus skliauto, ne tiesiogiai iš saulės, [ $W/m^2$ ].

Siekiant įvertinti spinduliuotę ant pasvirusios fotovoltinio modulio plokštumos (posvyrio kampas  $\beta$ , azimutas  $\gamma_m$ ), taikomas Liu–Jordano modelis:

$$\frac{H_t}{H_g} = \left(1 - \frac{H_d}{H_g}\right) R_b + \frac{H_d}{H_g} R_d + R_r; \quad (5)$$

Čia  $H_t$  – spinduliuotė ant pasvirusios plokštumos,  $H_g$  – spinduliuotė ant horizontalios plokštumos,  $H_d$  – difuzinė horizontali spinduliuotė,  $R_b$  – tiesioginės spinduliuotės korekcijos koeficientas,  $R_d$  – difuzinės spinduliuotės korekcijos koeficientas,  $R_r$  – atspindėtos spinduliuotės koeficientas.

$$R_b = \frac{\cos(\theta_i)}{\cos(\theta_z)}; \quad (6)$$

Čia  $\theta_i$  – įstrižo kritimo kampas:

$$\begin{aligned} \cos(\theta_i) = & \sin(\delta) \sin(\phi) \cos(\beta) - \sin(\delta) \cos(\phi) \sin(\beta) \cos(\gamma) \\ & + \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(\beta) \cos(\omega) + \cos(\delta) \sin(\phi) \sin(\beta) \cos(\gamma) \cos(\omega) \\ & + \cos(\delta) \sin(\beta) \sin(\gamma) \sin(\omega); \end{aligned} \quad (7)$$

$$R_d = \frac{1 + \cos(\beta)}{2}; \quad (8)$$

$$R_r = \rho \frac{1 - \cos(\beta)}{2}; \quad (9)$$

Čia  $\rho$  – paviršiaus albedas, grunto tipiškai 0,2, žolės 0,3.

Fotovoltinio modulio temperatūra:

$$T_{FV} = T_{aplinkos} + \frac{H_t}{800} (NOCT - 20); \quad (10)$$

Čia NOCT – nominali darbinė temperatūra [ $^{\circ}C$ ],  $T_{aplinkos}$  – aplinkos temperatūra [ $^{\circ}C$ ].

Kadangi darbe naudojami PVGIS TMY duomenys, kuriuose pateikiamos spinduliuotės dedamosios GHI, DNI bei DHI, Liu-Jordan modelis realizuojamas tiesiogiai sumuojant dedamąsias:

$$G_{b,POA}(t) = DNI(t) \cos(\theta_i); \quad (11)$$

$$G_{d,POA}(t) = DHI(t) \left( \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right); \quad (12)$$

$$G_{r,POA}(t) = \rho GHI(t) \left( \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right); \quad (13)$$

$$G_{POA}(t) = G_{b,POA}(t) + G_{d,POA}(t) + G_{r,POA}(t); \quad (14)$$

Čia  $G_b$  – tiesioginė spinduliuotės dedamoji į modulio plokštumą [ $W/m^2$ ],  $G_d$  – difuzinė spinduliuotės dedamoji į modulio plokštumą [ $W/m^2$ ],  $G_r$  – nuo žemės atspindėta spinduliuotės dedamoji į modulio plokštumą [ $W/m^2$ ],  $G_{POA}$  – suminė saulės spinduliuotė, patenkanti į fotovoltinio modulio plokštumą [ $W/m^2$ ].

Modulio efektyvumo priklausomybė nuo temperatūros apskaičiuojama pagal formulę:

$$\eta(T_{FV}) = \eta_{STC} (1 - \beta(T_{FV} - 25^{\circ}C)); \quad (15)$$

Momentinė FV normalizuota 1 kWp galia laikui bėgant apskaičiuojama:

$$P_{FV,1kWp}(t) = \frac{G_{POA}(t)}{1000} \cdot (1 + \gamma_P(T_{FV}(t) - 25)) \cdot PR; \quad (16)$$

Čia  $\gamma_p$  – modulio galios temperatūrinis koeficientas [ $\%/^{\circ}\text{C}$ ], PR – sistemos našumo koeficientas (įprastai 0,75-0,9),  $T_{\text{FV}}$  – fotovoltinio modulio celės temperatūra [ $^{\circ}\text{C}$ ].

## 2.2. Matematinis vėjo elektrinės generacijos modelis

Vėjo elektrinės generuojama galia priklauso nuo vėjo greičio, oro tankio, rotoriaus aerodinaminių savybių bei generatoriaus nuostolių. Vėjo turbinos modeliavimas šiuolaikinėje literatūroje remiasi momentinės kinetinės energijos srauto prie rotoriaus paviršiaus įvertinimu ir aerodinamine galios koeficiento analize. Vėjas, kurio greitis  $v(t)$  laiko momentui  $t$ , turi kinetinę energiją:

$$E_k(t) = \frac{1}{2} \rho S v(t)^3; \quad (17)$$

Čia  $\rho$  – oro tankis ( $1,225 \text{ kg/m}^3$  esant  $15^{\circ}\text{C}$ , 1 atm),  $S$  – rotoriaus plotas,  $v(t)$  – vėjo greitis tam tikru laiko momentu  $t$ .

Dėl aerodinaminių nuostolių turbina niekada negali paimti visos energijos. Teoriškai didžiausia įmanoma vėjo energijos dalis, kurią galima paversti mechanine energija, vadinama Betzo riba:

$$C_{p,\text{max}} = 0,593; \quad (18)$$

Realiuose įrenginiuose  $C_p$  svyruoja tarp 0,25 ir 0,48.

Oro tankis apskaičiuojamas pagal idealiųjų dujų būsenos lygtį:

$$\rho = \frac{p}{RT}; \quad (19)$$

Čia  $p$  – atmosferos slėgis,  $T$  – absoliutinė temperatūra,  $R = 287,05 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

Kadangi galios kreivės paprastai pateikiamos esant standartiniam oro tankiui  $\rho_0 = 1,225 \text{ kg/m}^3$ , taikoma efektyvaus vėjo greičio korekcija:

$$v_{pat} = v_h \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{1/3}; \quad (20)$$

Čia  $v_h$  – vėjo greitis stebulės aukštyje.

Tarp įjungimo ir vardinio greičio galios priklausomybė aproksimuojama kubine funkcija:

$$P_n(v) = \left( \frac{v(t)^3 - v_{on}^3}{v_{vard}^3 - v_{on}^3} \right); \quad (21)$$

Čia  $v(t)$  – vėjo greitis tam tikru laiko momentu.

Meteorologiniai duomenys įprastai pateikiami 10 m aukštyje. Vėjo elektrinės dažniausiai montuojamos 30-120 m aukštyje, todėl vėjo greitis turi būti koreguojamas pagal galios profilį:

$$v_h(t) = v_{10}(t) \left( \frac{h}{10} \right)^{\alpha}; \quad (22)$$

Čia  $\alpha$  – Hellmano indeksas, nustatomas pagal paviršiaus šiurkštumą.

Vėjo elektrinės generuojama galia nustatoma pagal galios kreivę, kuri aprašo santykį tarp vėjo greičio stebulės aukštyje ir išvystomos galios.

$$P_{VT}(t) = \begin{cases} 0, & v(t) < v_{on} \\ P_{vard} \cdot P_n(v), & v_{on} \leq v(t) < v_{vard} \\ P_{vard}, & v_{vard} \leq v(t) < v_{off}; \\ 0, & v(t) \geq v_{off} \end{cases} \quad (23)$$

Čia  $v_{on}$  – įsijungimo greitis,  $v_{vard}$  – vardinis greitis,  $v_{off}$  – išsijungimo greitis.

Kadangi yra siekiama sukurti plačiai pritaikomą modelį, ir apskaičiuoti specifinę gamybą 1 kW instaliuotos galios, specifinės vėjo turbino galio kreivė neimama. Modelyje daroma prielaida, kad vardinis vėjo greitis yra 10,5 m/s, įsijungimo greitis 3 m/s, o išsijungimo greitis 25 m/s. Priimama, kad turbina stovės 100 m aukštyje.

### 2.3. Kaupiklio įkrovos ir iškrovos logika

#### 2.3.1. Kaupiklio dinaminis modelis

Elektros energijos kaupimo įrenginys (EEKI) modeliuojamas naudojant būsenos kintamąjį – sukauptos elektros energijos lygį (angl. State of Charge, SOC). SOC kitimas skaičiuojamas diskrečiais valandiniais laiko žingsniais pagal formulę:

$$SOC(t+1) = SOC(t) + \eta_{i\dot{kr}} P_{i\dot{kr}}(t) \Delta t - \frac{1}{\eta_{iškr}} P_{iškr}(t) \Delta t; \quad (24)$$

Čia  $P_{iškr}(t)$  – kaupiklio iškrovimo galia,  $P_{i\dot{kr}}(t)$  – kaupiklio įkrovimo galia,  $\eta_{i\dot{kr}}$  – įkrovos naudingumo koeficientas,  $\eta_{iškr}$  – iškrovos naudingumo koeficientas,  $\Delta t = 1$  val.

SOC ribojamas techninėmis kaupiklio ribomis:

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max}; \quad (25)$$

Kur  $SOC_{max}$  atitinka nominalią kaupiklio talpą, o  $SOC_{min}$  nustatomas pagal leistiną iškrovimo gylį (DoD). Kaupiklio galios ribojamos:

$$0 \leq P_{i\dot{kr}}(t) \leq P_{i\dot{kr},max}, 0 \leq P_{iškr}(t) \leq P_{iškr,max}; \quad (26)$$

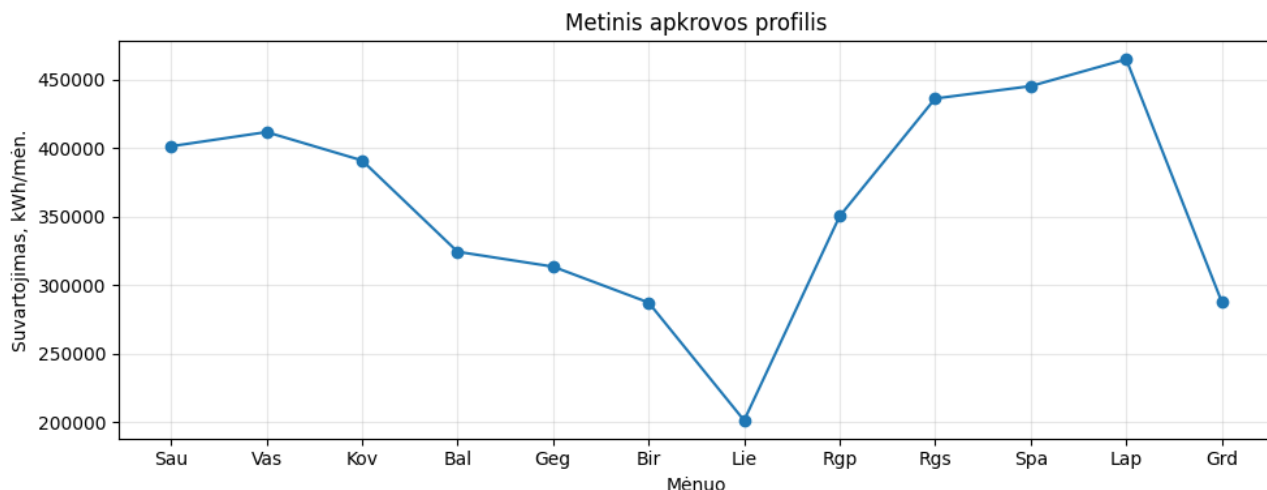
#### 2.3.2. Valdymo strategija – vietinės AEI energijos panaudojimo didinimas be eksporto į tinklą

Šioje strategijoje kaupiklis naudojamas siekiant padidinti vietoje suvartojamos atsinaujinančių energijos išteklių generacijos dalį ir sumažinti elektros energijos pirkimą iš tinklo. Modelyje daroma prielaida, kad perteklinė energija į tinklą nėra eksportuojama, todėl po apkrovos padengimo ir kaupiklio įkrovimo likusi generacija yra apribojama. Valdymas atliekamas pagal šias taisykles:

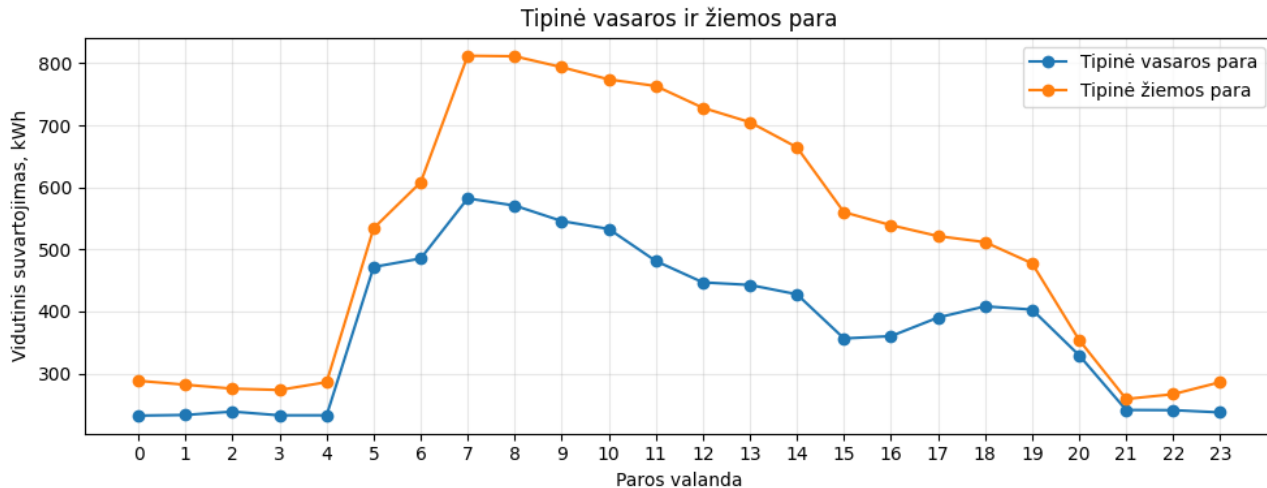
1. Jei atsinaujinančių energijos išteklių generacija  $P_{AEI}(t)$  viršija apkrovą  $L(t)$ , apkrova pirmiausia padengiama tiesiogiai iš AEI generacijos.
2. Likęs generacijos perteklius naudojamas kaupikliui įkrauti, kol pasiekama maksimali įkrovos būseną įvertinant leistiną kaupiklio įkrovimo galią.
3. Jei kaupiklis pilnas arba generacijos perteklius viršija leistiną įkrovimo galią, likusi energija laikoma apribota.
4. Jei  $P_{AEI}(t) < L(t)$ , trūkstama apkrovos dalis dengiama iš kaupiklio, kol pasiekama minimali įkrovos būseną, įvertinant leistiną iškrovimo galią.
5. Jei kaupiklio energijos nepakanka, likusi apkrovos dalis dengiama iš tinklo.

### 3. Eksperimentinė dalis

Eksperimentinėje dalyje palyginama įvairių instaliuotų galių santykiai ir parenkamas optimaliausias taškas. Tai daroma prie realaus apkrovos profilio, su realiais meteorologiniais duomenimis paimtais iš PVGIS TMY. Tiriama objekto vietovė – Klaipėda. 6 paveiksle pateikta nagrinėjimo objekto metinė apkrova, o 7 paveiksle pateikta tipinės vasaros bei žiemos dienos apkrovos.



6 pav. Nagrinėjamo objekto metinis apkrovos profilis

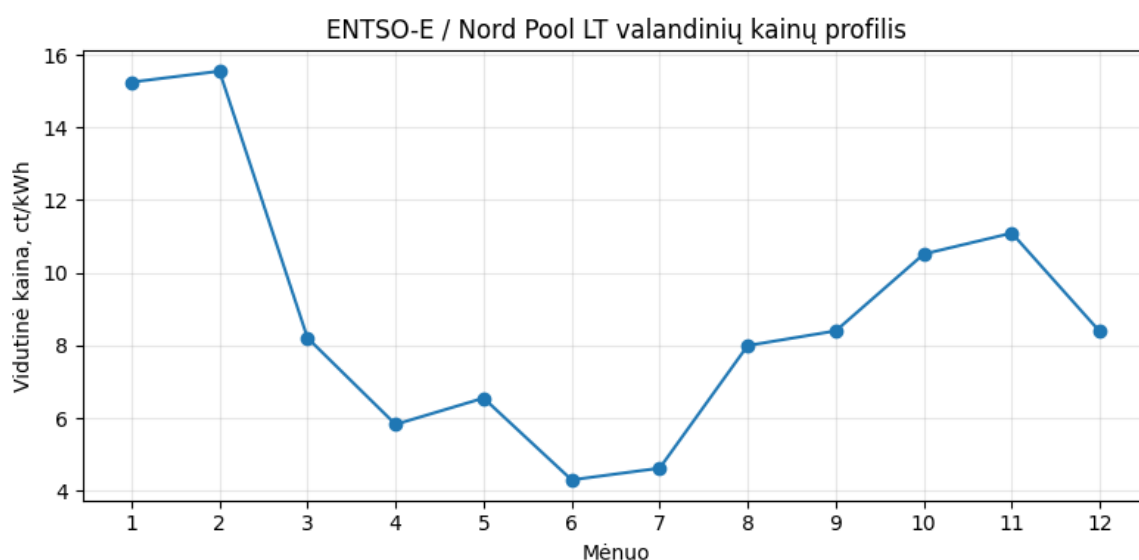


7 pav. Nagrinėjamo objekto tipinė vasaros ir žiemos paros apkrova

#### 3.1. Prielaidos

Šiame darbe hibridinės saulės ir vėjo elektrinės generacija modeliuojama naudojant PVGIS tipinių meteorologinių metų (TMY) valandinius duomenis. Siekiant suderinti skaičiavimų detalumą su duomenų prieinamumu ir užtikrinti skaičiavimo stabilumą, taikomos šios prielaidos ir supaprastinimai:

1. Naudojami PVGIS TMY duomenys laikomi reprezentatyviais daugiametei tipinei meteorologinei situacijai nagrinėjamoje vietovėje.
2. Skaičiavimai atliekami valandiniu žingsniu, t.y. laikoma, kad per kiekvieną valandą meteorologiniai dydžiai (spinduliuotė, temperatūra, vėjo greitis, slėgis) yra pastovūs.
3. Saulės modulių plokštuma modelyje laikoma fiksuota: pasvirimo kampas  $\beta = 25^\circ$ , azimutas  $\gamma = 180^\circ$  (orientacija į pietus). Sekimo sistemos nenumatomos.
4. Modulių (fotovoltinių celių) temperatūra apskaičiuojama naudojant NOCT metodą. NOCT laikoma pastovi ir lygi  $45^\circ\text{C}$ , o šiluminiai mainai su vėju ir montavimo konstrukcija detalai nemodeliuojami.
5. Skaičiuojama specifinė generacija, normalizuota 1 kW įrengtai galiai (1 kWp).
6. Elektros kaina imama valandinėmis reikšmėmis iš NordPool biržos. Prie jos pridodamas fiksuota 5 ct/kWh dedamoji. 8 paveiksle pavaizduotas NordPool biržos kainų grafikas iš 2026 ir 2025 m.



**8 pav.** NordPool biržos kainų mėnesiniai vidurkiai

2 lentelėje pateikiamos modeliavime naudojamos ekonominės prielaidos.

2 lentelė. Modeliavime naudojamos ekonominės prielaidos

Rodiklis	Reikšmė	Vienetai
FV kaina	400	€/kWp
VE kaina	1200	€/kWp
Kaupiklio kaina	300	€/kWh
Metinės eksploatacinės sąnaudos	1	% nuo pradinės investicijos per metus

## 3.2. Optimizavimo uždavinio sprendimas

### 3.2.1. Sprendinių aibės sudarymas

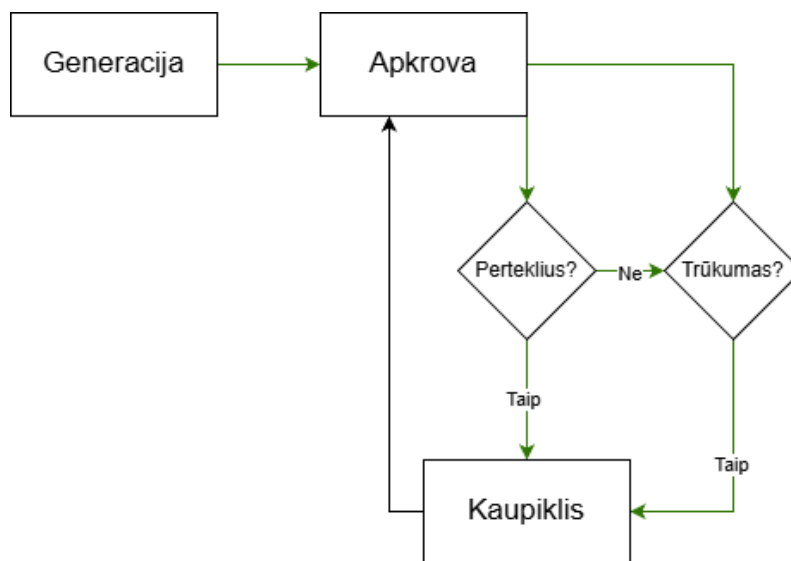
Hibridinės energijos sistemos dydžiai parenkami taikant deterministinių scenarijų perrinkimo metodą. Optimizuojami trys pagrindiniai parametrai: saulės elektrinės instaliuota galia  $P_{FV}$ , vėjo elektrinės instaliuota galia  $P_{VE}$  ir kaupiklio talpa  $E_k$ . Kiekvienam iš šių parametru sudaromas galimų reikšmių rinkinys, o visi galimi deriniai sudaromi naudojant Dekarto sandaugą. Tyrimė simuliuojama 342899 scenarijų.

Kiekvienam scenarijui sudaromas valandinis energijos balansas, naudojant specifinius FV ir vėjo gamybos profilius, normalizuotus vienam įrengtos galios kilovatui. Bendra generacija apskaičiuojama kaip:

$$E(t) = P_{FV} \cdot e_{FV}(t) + P_{VE} \cdot e_{VE}(t); \quad (27)$$

Čia  $e$  – energijos gamyba per 1 kW instaliuotos galios [kWh].

Ši generacija lyginama su apkrovos profiliu, o energijos perteklius arba trūkumas kompensuojamas kaupiklio pagalba. Kaupiklio būseną (SOC) atnaujinama kiekvieną valandą, atsižvelgiant į įkrovimo ir iškrovimo naudingumus bei galios apribojimus. Modelyje laikoma, kad perteklinė energija negali būti eksportuojama į tinklą, todėl jei baterija pilnai įkrauta, perteklinė generacija laikoma ribojama.



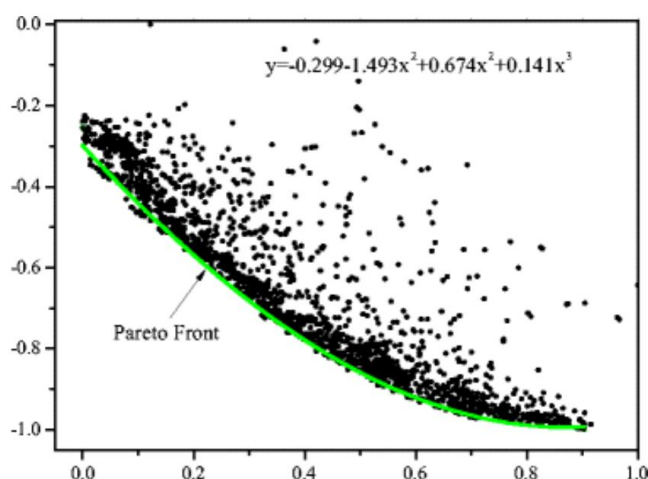
9 pav. Valandinio energijos balanso loginė schema

### 3.2.2. Techninių ir ekonominių rodiklių apskaičiavimas

Kiekvienam scenarijui apskaičiuojami techniniai ir ekonominiai rodikliai. Techniniai rodikliai apima metinę vietoje panaudotą energiją, tinklo importą ir vietinės energijos pasidengimo koeficientą, apibrėžiamą kaip apkrovos dalis, padengta vietine generacija ir kaupikliu. Metinės sutaupytos išlaidos nustatomos lyginant nagrinėjamą scenarijų su baziniu atveju be vietinės generacijos, kai visa elektros energija perkama iš tinklo. Remiantis investicijos dydžiu ir metinėmis sutaupytais išlaidomis apskaičiuojamas atsipirkimo laikas.

### 3.2.3. Pareto sprendinių nustatymas

Kadangi siekiama tiek didesnio vietinės energijos panaudojimo, tiek trumpesnio investicijos atsipirkimo laiko, sistemos parinkimo uždavinys laikomas daugiakriteriniu. Visi apskaičiuoti scenarijai pavaizduojami dviejų kriterijų erdvėje: savęs pasidengimo koeficiento ir paprasto atsipirkimo laiko ašyse. Sprendinys laikomas dominuojamu, jei egzistuoja kitas sprendinys, kuris užtikrina ne blogesnę vietinį energijos pasidengimą ir tuo pačiu trumpesnę arba tokį pat atsipirkimo laiką, o bent pagal vieną kriterijų yra geresnis. Pareto sprendinių aibę sudaro visi nedominuojami sprendiniai, kurie atspindi optimalų kompromisą tarp techninių ir ekonominių rodiklių. Tokiu būdu iš visos sprendinių aibės atmetami akivaizdžiai neefektyvūs variantai, o tolimesnei analizei paliekami tik racionalūs kompromisiniai sprendiniai.



10 pav. Tipinis pareto grafikas

## 3.3. Kompromisinio sprendinio parinkimas

### 3.3.1. Energetinio nepriklausomumo ir atsipirkimo optimizavimas

Iš Pareto sprendinių aibės galutinis sprendinys parenkamas taikant normalizuotą atstumo iki idealaus sprendinio funkciją. Šis metodas leidžia palyginti skirtingų matavimo vienetų rodiklius ir įvertinti kompromisą tarp energetinio savarankiškumo, ekonominio efektyvumo ir sistemos dydžio. Kadangi nagrinėjami rodikliai turi skirtingus vienetus, prieš atliekant galutinį sprendinio parinkimą jie normalizuojami į intervalą nuo 0 iki 1. Atsipirkimo laikas bei savęs pasidengimo rodikliai normalizuojami pagal 28 formulę:

$$T_i^* = \frac{T_i - T_{min}}{T_{max} - T_{min}}, \quad SP_i^* = \frac{SP_i - SP_{min}}{SP_{max} - SP_{min}}; \quad (28)$$

Čia  $i$  – scenarijaus indeksas;  $T_i$  –  $i$ -tojo scenarijaus paprastas atsipirkimo laikas (metais);  $T_{min}$ ,  $T_{max}$  – atitinkamai mažiausia ir didžiausia atsipirkimo laiko reikšmė Pareto sprendinių aibėje;  $T_i^*$  – normalizuota  $i$ -tojo scenarijaus atsipirkimo laiko reikšmė;  $SP_i$  –  $i$ -tojo scenarijaus savęs pasidengimo koeficientas;  $SP_{min}$  ir  $SP_{max}$  – mažiausia ir didžiausia savęs pasidengimo reikšmė Pareto sprendinių aibėje;  $SP_i^*$  – normalizuota savivartos reikšmė. Kadangi didesnis savęs pasidengimas yra geresnis scenarijus, didesnė  $SP_i^*$  reikšmė reiškia geresnį rezultatą.

Papildomai įvertinamas sistemos dydis, nes labai didelės instaliuotos galios arba kaupiklio talpos gali dirbtinai padidinti savęs pasidengimą, tačiau kartu reikšmingai didina investiciją ir gali bloginti ekonominį racionalumą ir realistiškumą. Sistemos dydžio rodiklis sudaromas iš suminės atsinaujinančių energijos išteklių galios ir kaupiklio talpos:

$$P_{AEI,i} = P_{FV,i} + P_{VE,i}; \quad (29)$$

$$P_{AEI,i}^* = \frac{P_{AEI,i} - P_{AEI,min}}{P_{AEI,max} - P_{AEI,min}}; \quad (30)$$

$$C_{bat,i}^* = \frac{C_{bat,i} - C_{bat,min}}{C_{bat,max} - C_{bat,min}}; \quad (31)$$

$$D_i^* = w_1 P_{AEI,i}^* + w_2 C_{bat,i}^*; \quad (32)$$

Čia  $P_{FV,i}$  – saulės elektrinės instaliuota galia, kWp;  $P_{VE,i}$  – vėjo elektrinės instaliuota galia, kWp;  $P_{AEI,i}$  – suminė AEI instaliuota galia, kWp;  $C_{bat,i}$  – kaupiklio talpa, kWh;  $D_i^*$  – normalizuotas sistemos dydžio rodiklis,  $w$  – kriterijaus svoris. Šiame darbe suminė AEI galia ir kaupiklio talpa sistemos dydžio rodiklyje vertinamos vienodais svoriais po 0,5.

Idealus sprendinys būtų toks, kuriame atsipirkimo laikas yra mažiausias, savęs pasidengimas didžiausias, o sistemos dydis kuo mažesnis. Todėl kiekvienam Pareto sprendiniui apskaičiuojamas geometrinis atstumas iki idealaus taško:

$$K_i = \sqrt{(T_i^*)^2 + (1 - SP_i^*)^2 + (\lambda D_i^*)^2 + \alpha T_i^*}; \quad (33)$$

čia  $K_i$  – galutinė  $i$ -tojo scenarijaus kompromisinio vertinimo funkcijos reikšmė;  $\lambda$  – sistemos dydžio baudos koeficientas;  $\alpha$  – papildomas atsipirkimo laiko baudos koeficientas.

Pirmasis funkcijos narys įvertina geometrinį atstumą iki idealaus sprendinio. Kuo mažesnė  $K_i$  reikšmė, tuo scenarijus yra arčiau pageidaujamo kompromiso: trumpo atsipirkimo, didelio savęs pasidengimo ir mažesnio sistemos dydžio. Papildomas narys  $\alpha T_i^*$  įtraukiamas siekiant išvengti sprendinių, kurių savęs pasidengimas yra didelis, tačiau atsipirkimo laikas neproporcingai ilgas. Taip galutinis sprendinys nėra parenkamas vien pagal maksimalų techninį padengimą, bet išlaiko ekonominį racionalumą.

Galutiniu kompromisiniu sprendiniu laikomas tas Pareto aibės scenarijus, kurio vertinimo funkcijos reikšmė yra mažiausia:

$$K_{kompr} = \min(K_i); \quad (34)$$

Galutiniam sprendiniui parinkti palyginami keli Pareto sprendinių atrankos metodai: A – artimiausias 2D idealiam taškui, B – Pareto ribos alkūnės taškas, C – 3 kriterijų kompromisinė funkcija su sistemos

dydžio ir atsipirkimo bauda. Galutiniu šiame darbe laikomas C metodo sprendinys, nes jis papildomai įvertina ne tik atsipirkimą ir savęs pasidengimą, bet ir sistemos dydžio racionalumą.

### 3.3.2. Ekonominis optimizavimas

Ekonominio sprendinio optimizavimo tikslas – nustatyti tokį hibridinės elektrinės galios santykį, kuris per pasirinktą analizės laikotarpį generuotų didžiausią ekonominę naudą. Šiame darbe ekonominiam vertinimui pasirinktas 10 metų laikotarpis, todėl optimalus sprendinys parenkamas ne pagal trumpiausią atsipirkimo laiką, o pagal didžiausią sukauptą grynąjį pelną per 10 metų.

Kiekvienam nagrinėjamam scenarijui apskaičiuojama pradinė investicija, metinės santaupos dėl sumažėjusio elektros energijos importo bei metinės eksploatacinės sąnaudos. Kadangi nagrinėjamas scenarijus be eksporto į tinklą, ekonominė nauda gaunama tik iš tos energijos dalies, kuri yra panaudojama vietoje apkrovai dengti. Perteklinė ribojama energija ekonominės vertės nesukuria.

Metinis grynasis pinigų srautas apskaičiuojamas:

$$CF = S - OPEX; \quad (35)$$

$$S = \sum_{t=1}^{8760} E_{vart}(t) \cdot c_{el}(t); \quad (36)$$

Čia  $CF$  – metinis grynasis pinigų srautas [€/metus],  $S$  – metinės santaupos [€/metus],  $OPEX$  – metinės eksploatacinės sąnaudos [€/metus],  $E_{vart}$  – vietoje panaudota elektros energija konkrečiu laiku  $t$  [kWh],  $c_{el}$  – elektros energijos kaina konkrečiu laiku [€/kWh].

Tuomet 10 metų sukauptas grynasis pelnas įvertinamas:

$$P_{10} = 10 \cdot CF - CAPEX; \quad (37)$$

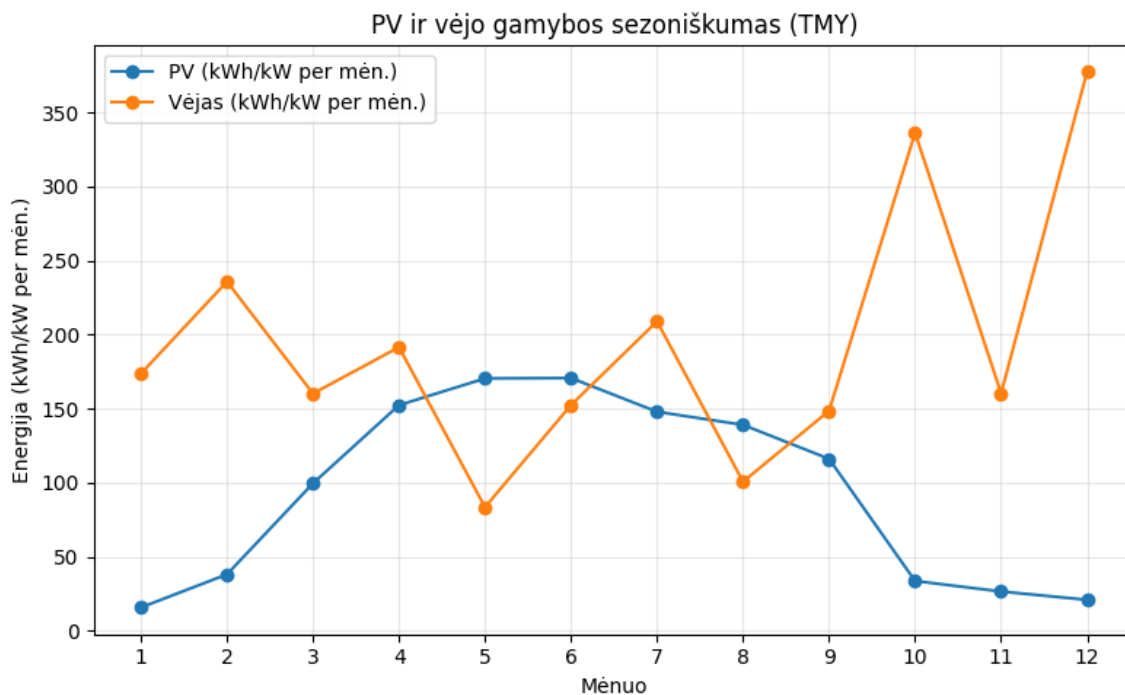
Čia  $P_{10}$  – sukauptas grynasis pelnas per 10 metų [€],  $CAPEX$  – pradinė investicija [€].

Ekonominiu požiūriu optimaliu laikomas tas scenarijus, kurio  $P_{10}$  reikšmė yra didžiausia.

Toks kriterijus leidžia įvertinti ne tik tai, ar sistema atsiperka, bet ir tai, kuris galios derinys po nustatyto laikotarpio sukuria didžiausią finansinę naudą. Dėl šios priežasties ekonominis sprendinys gali skirtis nuo kompromisinio arba techninio sprendinio: jis nebūtinai užtikrina didžiausią savęs pasidengimą, tačiau yra racionaliausias vertinant investicijos grąžą per 10 metų.

## 4. Rezultatai

11 paveiksle pateikta saulės ir vėjo elektrinių specifinė energijos gamyba pagal mėnesio vidurkius, apskaičiuota iš TMY valandinių duomenų. Matyti ryškus sezoniškumo skirtumas: saulės generacija didžiausia šiltuoju metų laikotarpiu, o vėjo generacija – šaltuoju. Toks generacijos pasiskirstymas pagrindžia hibridinės sistemos taikymą, siekiant tolygesnio energijos tiekimo per metus.



11 pav. Gauti saulės ir vėjo energijos gamybos duomenys

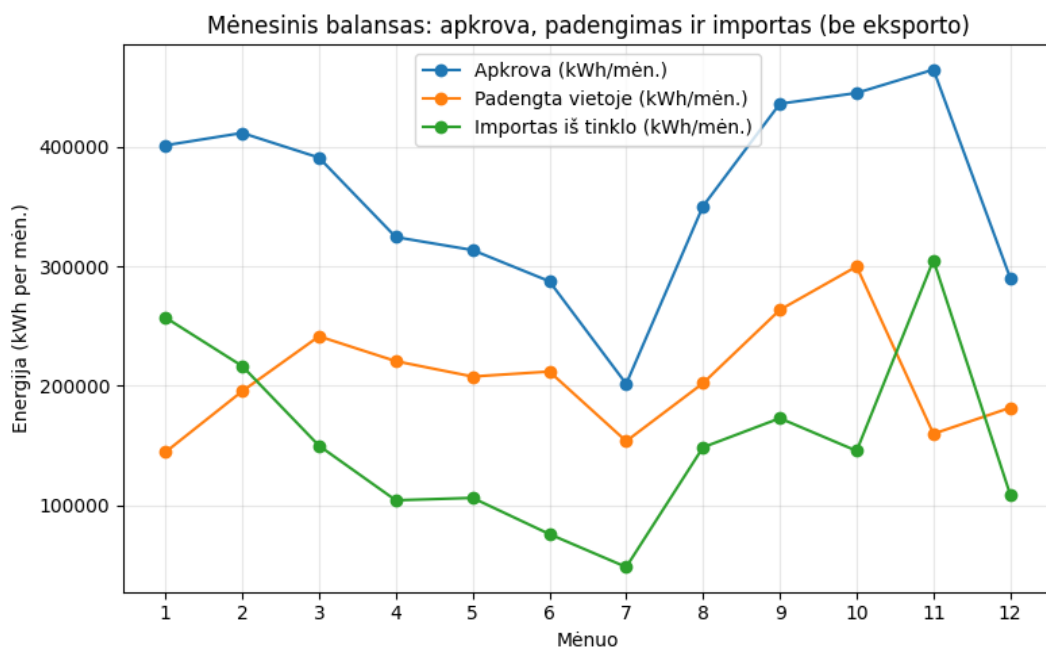
### 4.1. Optimizacijos tarp energetinio ir ekonomišką sprendinio rezultatai

12 paveiksle pateiktas mėnesinis energijos balansas nagrinėjamam sistemos scenarijui. Matyti, kad dalis apkrovos padengiama vietine generacija ir kaupikliu, tačiau tam tikrais laikotarpiais reikalingas ir elektros energijos importas iš tinklo. Nors tame pačiame mėnesyje gali būti stebimas tiek energijos importas, tiek pertekliaus ribojimas, tai nėra prieštaravimas, nes sprendimai priimami valandiniu žingsniu: dienos metu gali susidaryti perteklius, o nakties metu – energijos trūkumas.

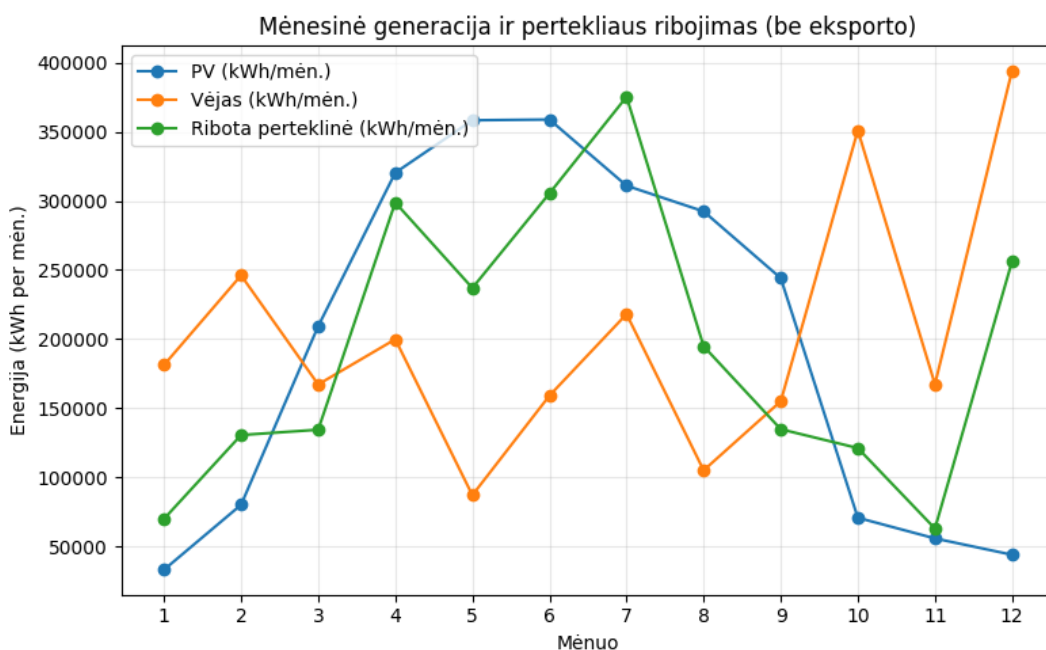
13 paveiksle pateikta pasirinkto hibridinės elektrinės scenarijaus mėnesinė saulės ir vėjo elektrinių generacija bei ribojamos perteklinės energijos kiekis, kai elektros energijos eksportas į tinklą nėra vertinamas. Saulės elektrinės gamyba pasižymi aiškiu sezoniškumu: mažiausia generacija stebima žiemos mėnesiais, o didžiausia – pavasario ir vasaros laikotarpiu, ypač gegužės–birželio mėnesiais. Vėjo elektrinės generacija yra mažiau tolygi ir kinta priklausomai nuo vėjo išteklių atskirais mėnesiais, tačiau didesnės reikšmės matomos žiemos ir rudens laikotarpiais.

Ribota perteklinė energija atsiranda tada, kai bendra saulės ir vėjo elektrinių generacija viršija apkrovos ir kaupiklio sugėrimo galimybes. Kadangi nagrinėjamame modelyje eksportas į tinklą nėra leidžiamas, nepanaudota generacijos dalis yra ribojama. Didžiausi ribojamos energijos kiekiai matomi tais mėnesiais, kai saulės elektrinės generacija yra didelė ir kartu yra reikšminga vėjo

elektrinės gamyba. Tai rodo, kad be eksporto dalis pagamintos atsinaujinančios energijos negali būti panaudojama vietoje.



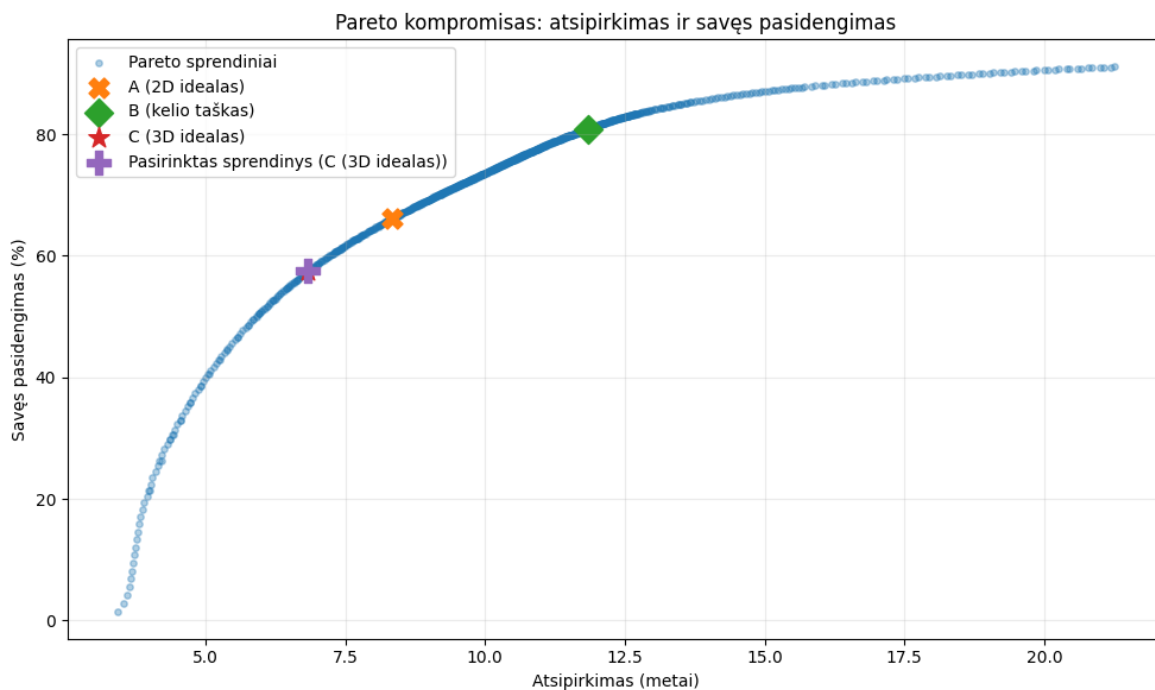
12 pav. Mėnesinis apkrovos balansas



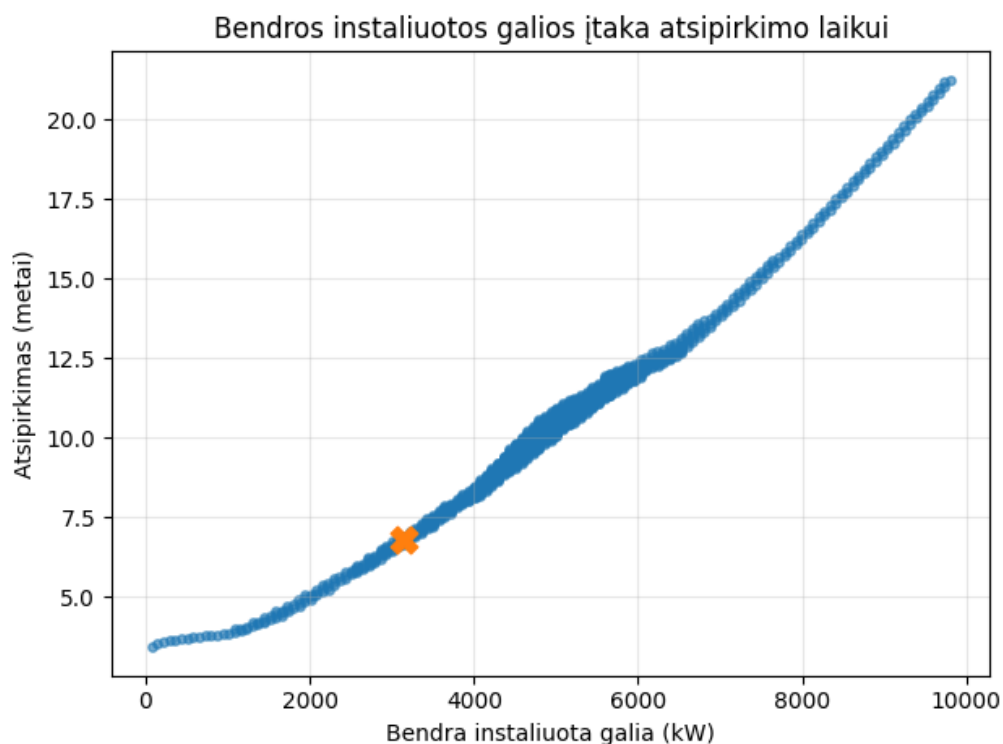
13 pav. Mėnesinė prognozuota vėjo ir saulės gamyba, su pertekline energija

Pagal gautą tašką, kuris pateikiamas 14 paveiksle ir 15 paveiksle parinktas optimizacijos sprendinys – 2101 kWp saulės, 1043 kW vėjo, bei 348 kWh kaupiklis. Atitinkamai gaunasi 6,04:3:1 santykis.

Toks santykis rodo, kad sistema labiau orientuota į saulės generaciją, vėjo elektrinė veikia kaip papildomas šaltinis, o kaupiklis skirtas trumpalaikiam energijos balansavimui.

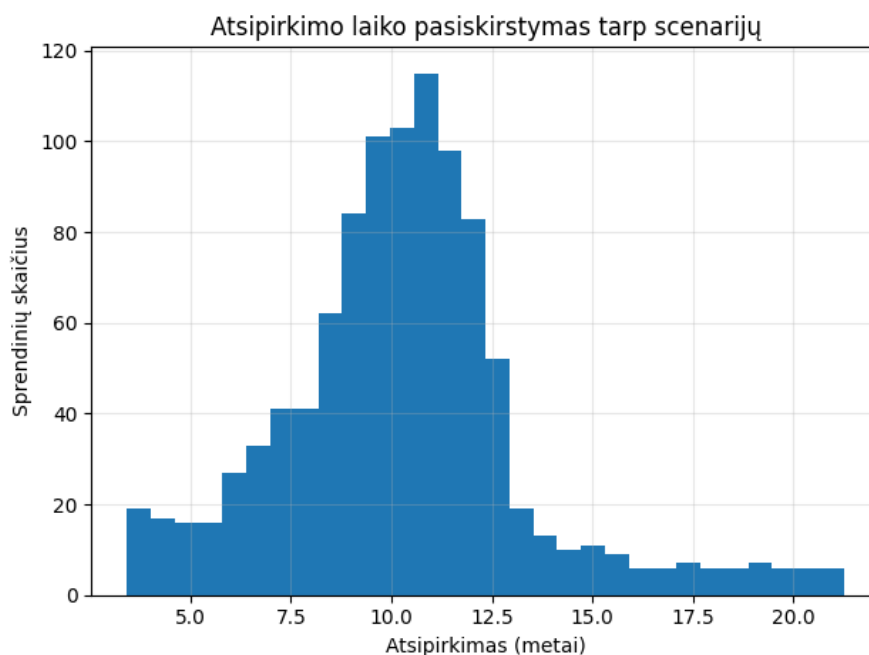


14 pav. Gautas pasirinktas sprendinys pagal atsipirkimo laiką ir savąjį pasidengimą

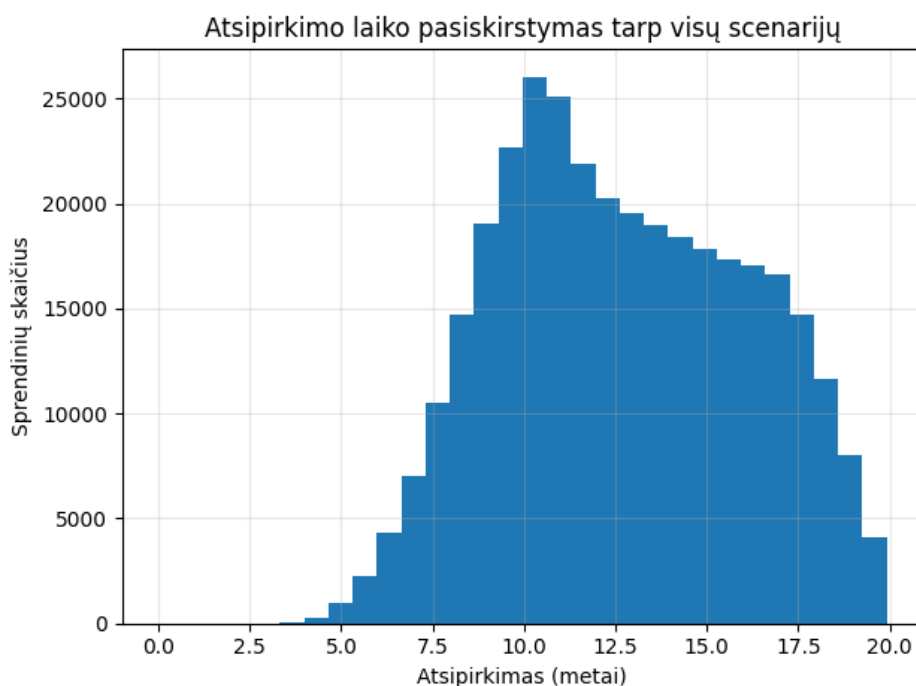


15 pav. Gautas pasirinktas sprendinys pagal atsipirkimą ir instaliuotą galią

Gauti rezultatai yra išrinkti iš skaičiuotų 342899 scenarijų, kurie pagal Pareto principą buvo išfiltruoti į 1026 geriausius sprendinius. Atsipirkimo laiko pasiskirstymas tarp išfiltruotų scenarijų pavaizduotas 16 paveiksle iš histogramos matyti, kad didžioji dalis atrinktų scenarijų susitelkia maždaug 7.5–12.5 metų atsipirkimo intervale. Tai rodo, kad taikyta bauda už per dideles sistemas ir pernelyg ilgą atsipirkimo laiką veikia tikslingai, nes labai ilgo atsipirkimo scenarijai tarp atrinktų sprendinių sudaro tik nedidelę dalį. 17 paveiksle pavaizduotas atsipirkimo laiko pasiskirstymas tarp visų galimų scenarijų, be filtravimo.

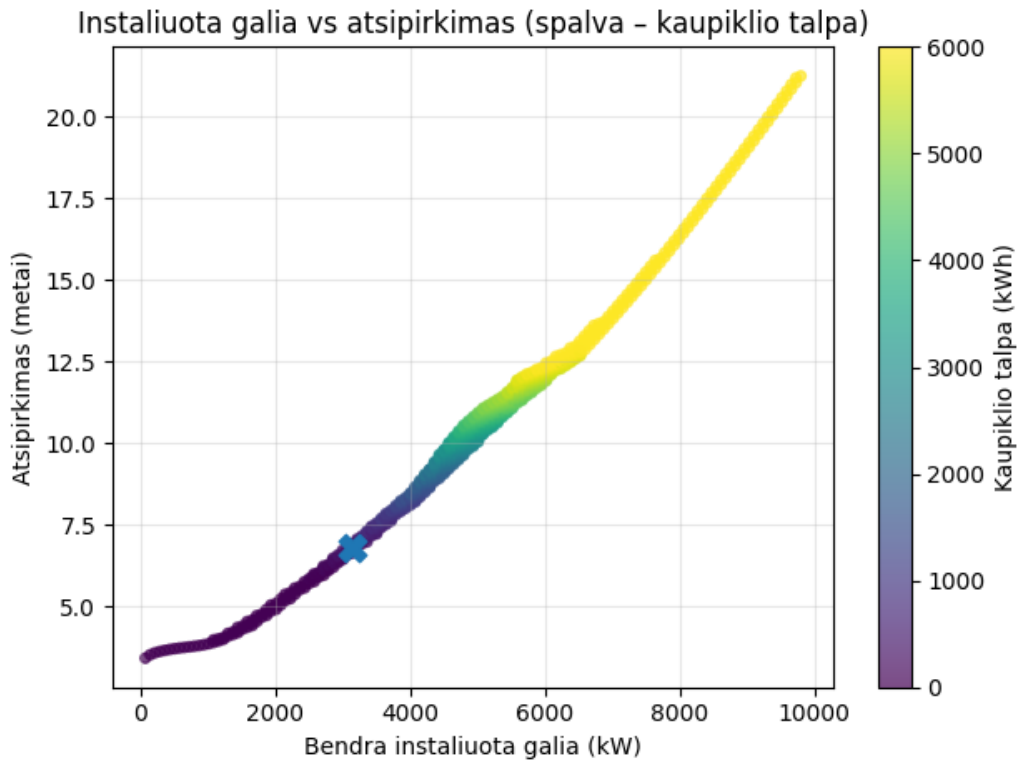


16 pav. Atsipirkimo laiko pasiskirstymas tarp filtruotų scenarijų



17 pav. Atsipirkimo laiko pasiskirstymas tarp nefiltruotų scenarijų

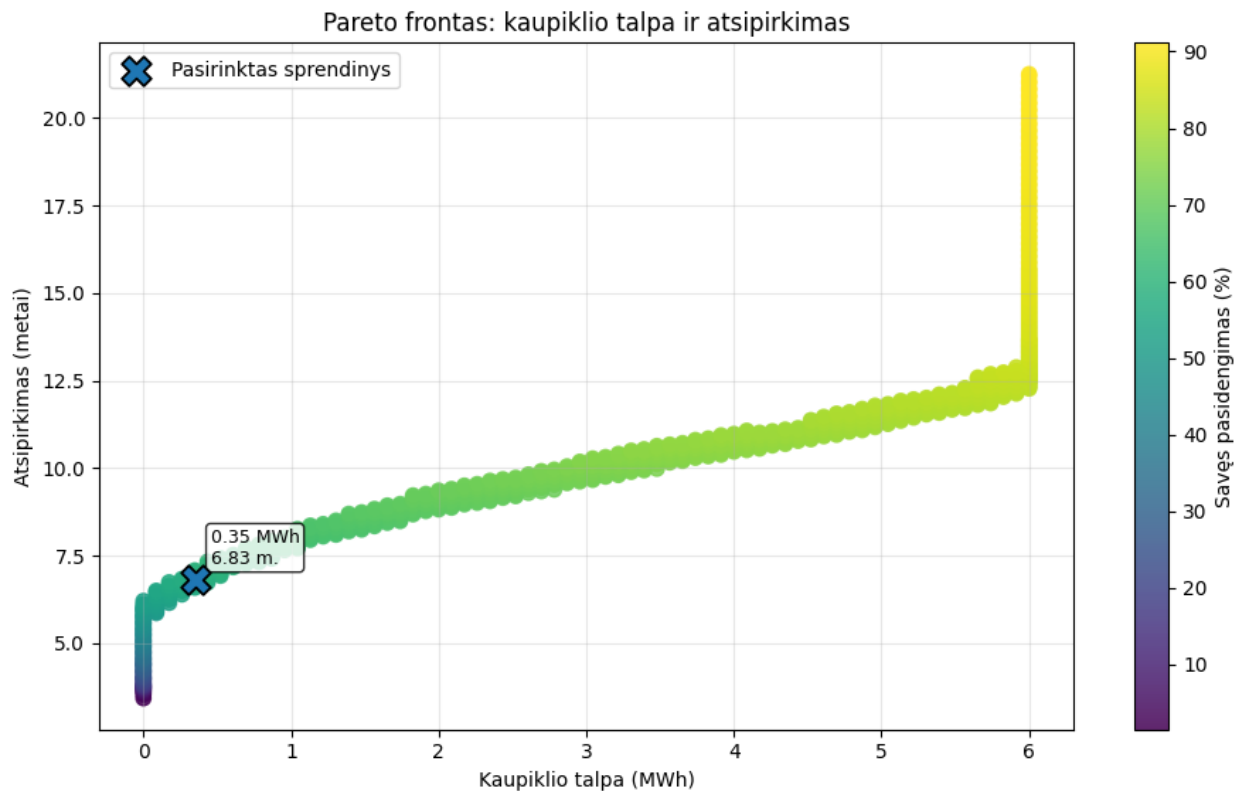
18 paveiksle pateikta atsipirkimo laiko priklausomybė nuo bendros instaliuotos saulės ir vėjo elektrinių galios, papildomai spalva žymint kaupiklio talpą. Matyti, kad didėjant sistemos mastui, atsipirkimo laikas nuosekliai ilgėja, ypač viršijus tam tikrą instaliuotos galios ribą.



**18 pav.** Atsipirkimo laiko koreliacija su instaliuota galia ir kaupiklio talpa

19 paveiksle pateikiama Pareto fronto priklausomybė tarp kaupiklio talpos ir atsipirkimo trukmės, o spalva rodo savęs pasidengimo rodiklį. Iš grafiko matyti, kad didėjant kaupiklio talpai savęs pasidengimas didėja, tačiau kartu ilgėja ir atsipirkimo trukmė. Tai reiškia, kad didesnis kaupiklis leidžia geriau panaudoti vietinę generaciją, bet dėl didesnės investicijos ekonomiškai tampa mažiau patrauklus.

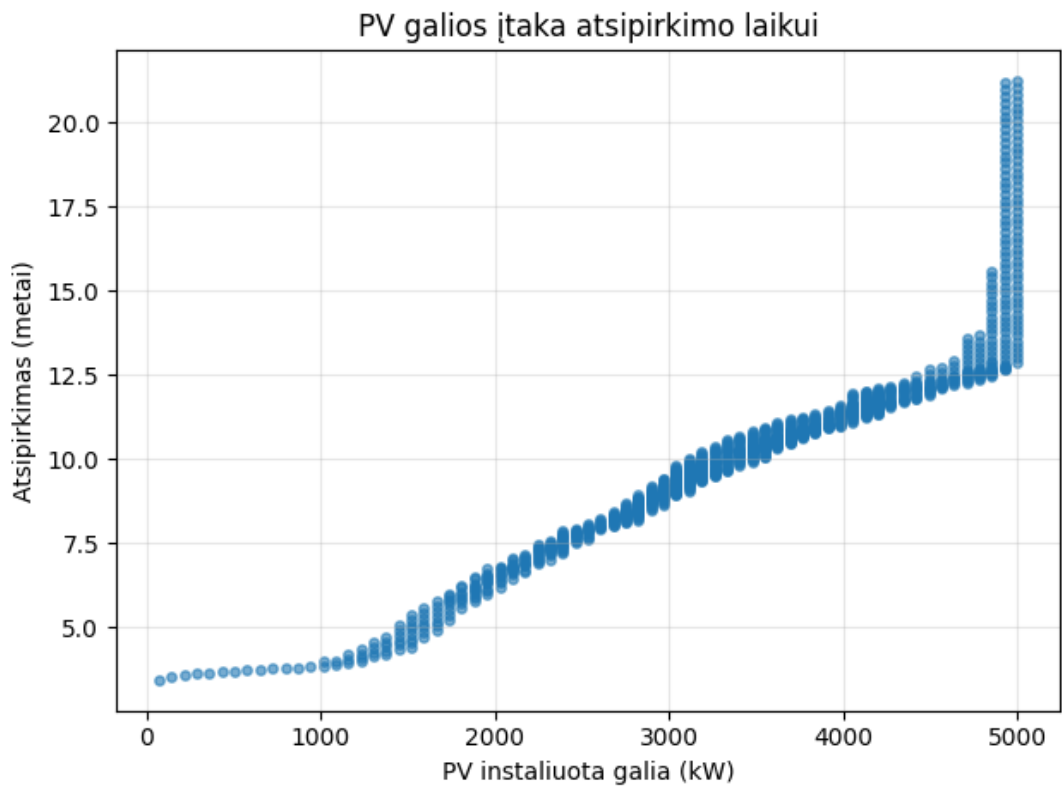
Pasirinktas sprendinys yra ties santykinai maža kaupiklio talpa – apie 0,35 MWh, o jo atsipirkimo trukmė siekia apie 6,85 metų. Tai rodo, kad C kompromisinė metodika parinko ne maksimalų savęs pasidengimą, o ekonomiškai pagrįstą kaupiklio dydį, kuriame papildoma kaupiklio talpa dar nesukelia reikšmingo atsipirkimo pablogėjimo.



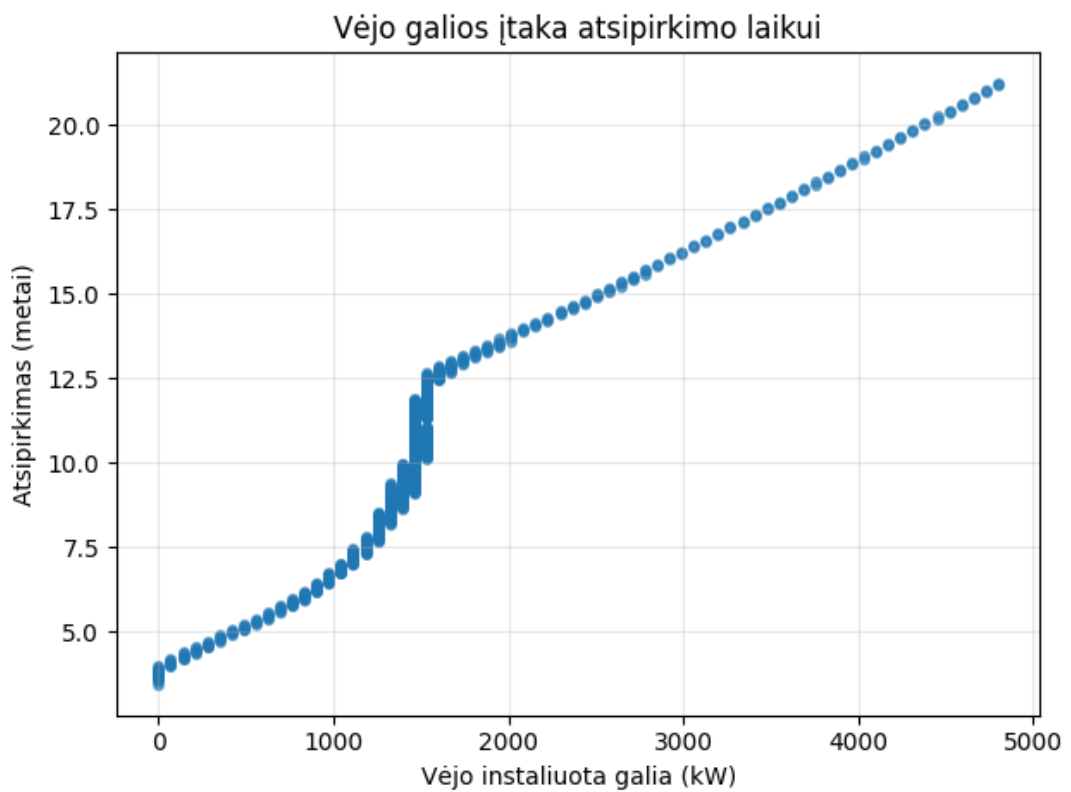
**19 pav.** Atsipirkimo laiko koreliacija su kaupiklio talpa

Atlikus papildomą analizę, 20 ir 21 paveiksle pateikiama saulės ir vėjo elektrinių galios priklausomybė nuo atsipirkimo trukmės. 20 paveiksle matyti, kad didėjant saulės elektrinės instaliuotai galiai atsipirkimo trukmė ilgėja. Mažesnių galių intervale papildoma FV galia dar efektyviai mažina importą iš tinklo, tačiau pasiekus didesnes galias dalis generacijos pradeda viršyti apkrovos ir kaupiklio sugėrimo galimybes. Kadangi eksportas į tinklą nėra vertinamas, ši perteklinė energija ribojama, todėl papildoma investicija nebesukuria proporcingos ekonominės naudos.

21 paveiksle vėjo elektrinės galios įtaka atsipirkimui yra ryškesnė ir nuoseklesnė. Didėjant vėjo elektrinės galiai, atsipirkimo trukmė ilgėja, nes vėjo elektrinės vienetinė investicinė kaina šiame darbe yra didesnė už saulės elektrinės kainą. Be to, papildoma vėjo generacija ne visada gali būti panaudojama vietoje, todėl didesnės vėjo galios scenarijai tampa ekonomiškai mažiau palankūs.



**20 pav.** Saulės elektrinės galios įtaka atsipirkimo laikui



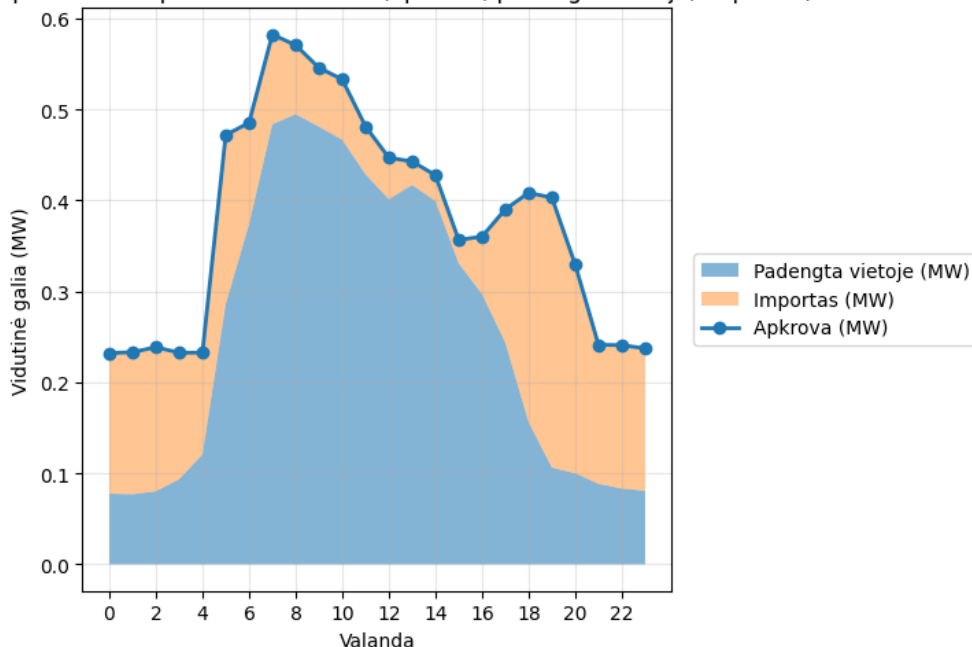
**21 pav.** Vėjo elektrinės galios įtaka atsipirkimo laikui

22 ir 23 paveiksluose pateikiami C kompromisinio sprendinio tipinės vasaros ir žiemos dienos galios balansai. Grafikuose mėlyna kreivė rodo apkrovą, mėlyna užpildyta sritis – vietoje padengtą apkrovos dalį, o oranžinė sritis – importą iš tinklo.

22 paveiksle matyti, kad vasaros dieną vietinės generacijos panaudojimas yra didžiausias dienos metu, kai saulės elektrinės generacija sutampa su didesne apkrova. Tuo metu importas iš tinklo sumažėja, tačiau ryto, vakaro ir nakties valandomis dalis apkrovos vis tiek dengiama iš tinklo. Tai rodo, kad net ir vasaros laikotarpiu kaupiklio ir generacijos nepakanka visai apkrovai padengti visos paros metu.

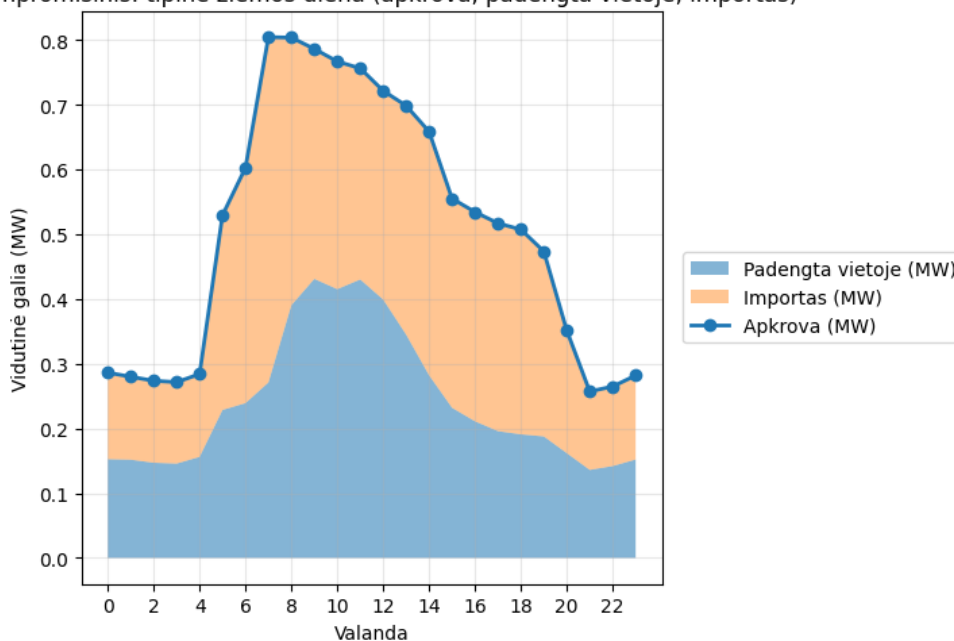
23 paveiksle žiemos dienos grafike matyti didesnę priklausomybę nuo tinklo. Vietoje padengiama apkrovos dalis yra mažesnė, ypač didesnės apkrovos valandomis, todėl importas iš tinklo sudaro reikšmingą energijos balanso dalį. Tai siejama su mažesne saulės elektrinės generacija žiemos laikotarpiu ir ribotomis kaupiklio galimybėmis padengti ilgesnius generacijos trūkumo periodus.

C kompromisinis: tipinė vasaros diena (apkrova, padengta vietoje, importas)



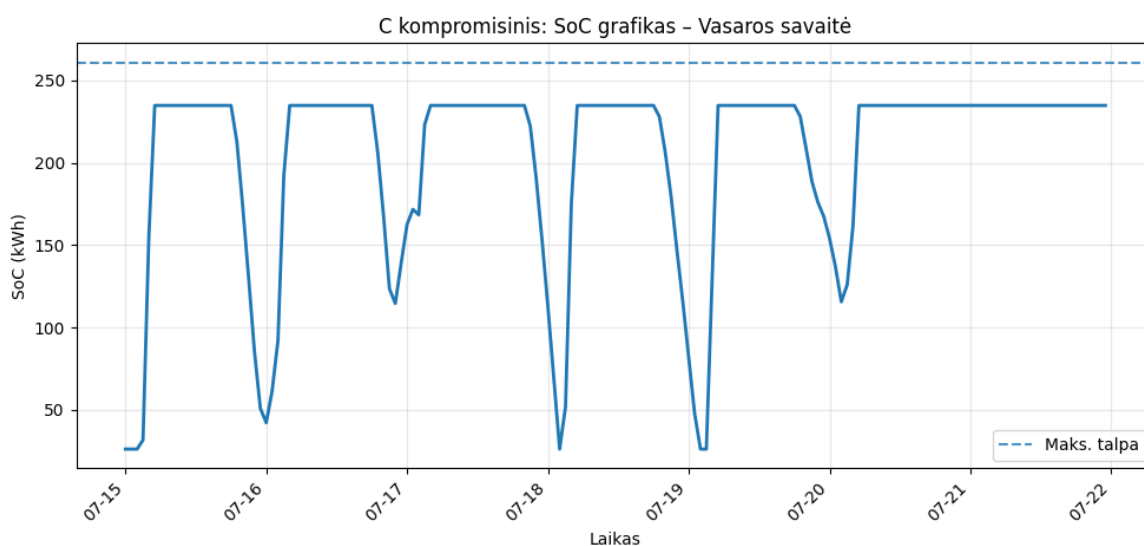
22 pav. Tipinės vasaros dienos apkrova, energija padengta iš AEI ir importas

C kompromisinis: tipinė žiemos diena (apkrova, padengta vietoje, importas)



23 pav. Tipinės žiemos dienos apkrova, energija padengta iš AEI ir importas

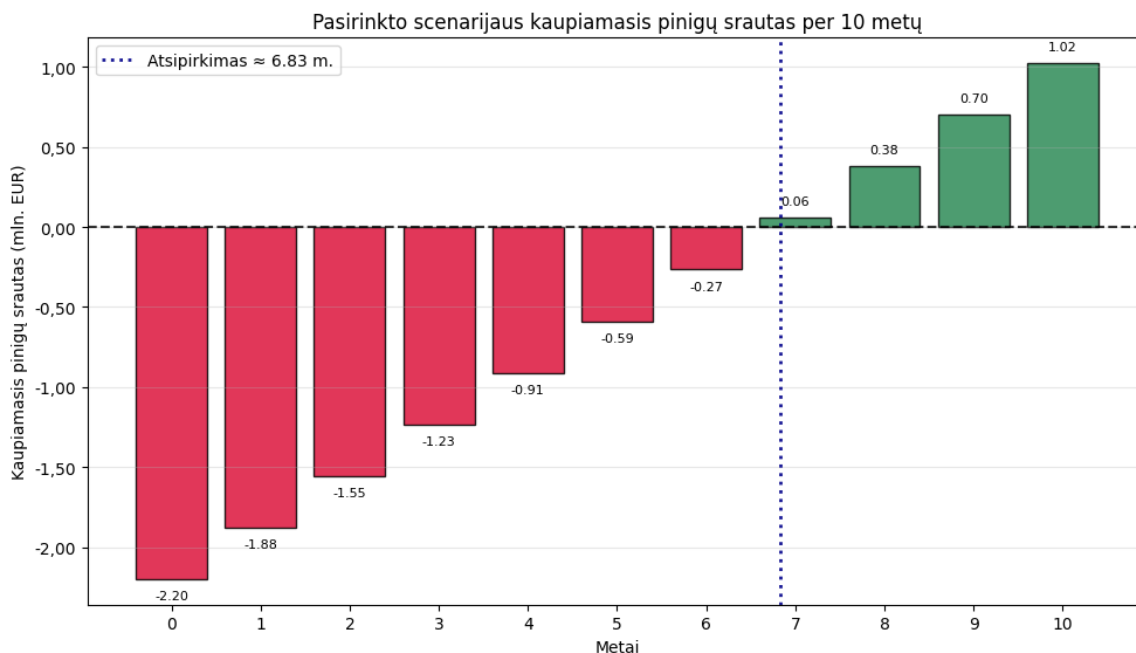
24 paveiksle pateikiamas C kompromisinio sprendinio kaupiklio įkrovos būsenos kitimas tipinę vasaros savaitę. Matyti, kad kaupiklis daugiausia veikia paros ciklu: dienos metu, kai saulės elektrinės generacija viršija apkrovą, kaupiklis greitai įkraunamas, o vakaro ir nakties valandomis iškraunamas apkrovai dengti. Dažnas viršutinės įkrovos ribos pasiekimas rodo, kad vasaros laikotarpiu generacijos perteklius yra didesnis už pasirinkto kaupiklio sugėrimo galimybes.



24 pav. Vasaros savaitės įkrovos ir iškrovos grafikas

25 paveiksle pateikiamas pasirinkto C kompromisinio scenarijaus kaupiamasis pinigų srautas per 10 metų laikotarpį. Nuliniais metais įvertinama pradinė investicija, todėl pinigų srautas yra neigiamas ir

siekia apie –2,20 mln. Eur. Vėlesniais metais dėl sumažėjusio elektros energijos importo iš tinklo sukuriama metinė grynosios sutaupos, todėl kaupiamasis pinigų srautas palaipsniui didėja.



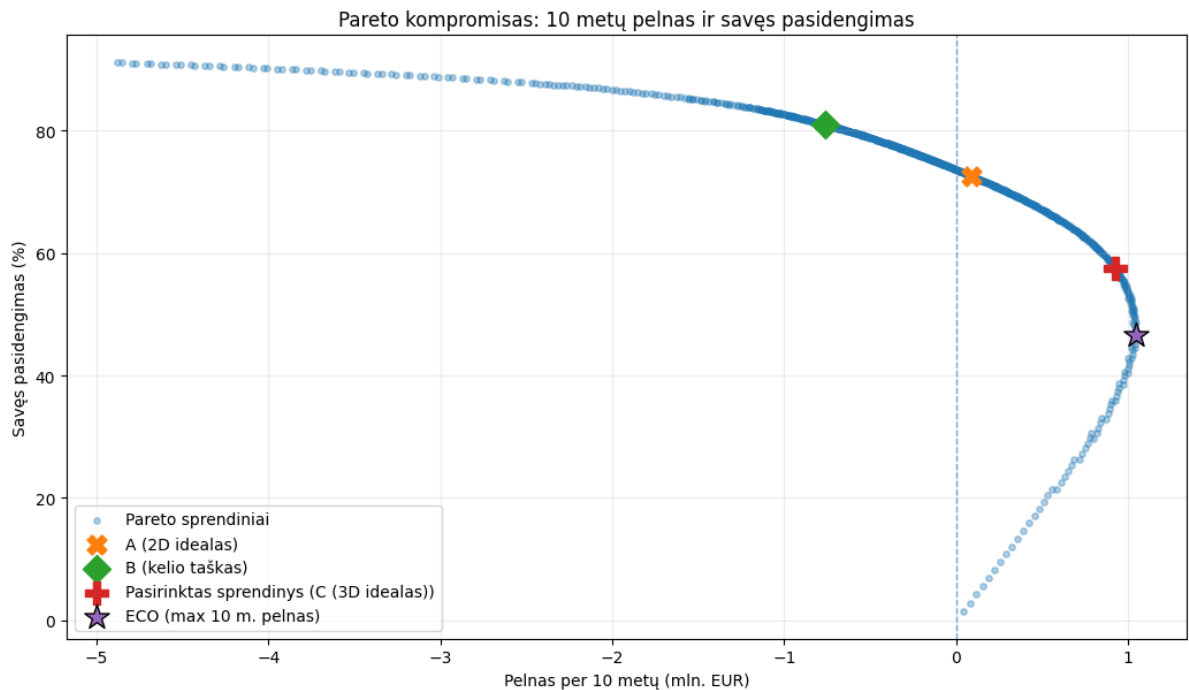
25 pav. Pasirinkto kompromisinio sprendinio atsipirkimo laikotarpio histograma

#### 4.2. Ekonominio optimizavimo rezultatai ir palyginimas

Šiame poskyryje nagrinėjamas ekonominio optimizavimo rezultatas. Ekonomiškai optimaliu sprendiniu laikomas tas scenarijus, kuris per 10 metų laikotarpį sukuria didžiausią grynąjį pelną, įvertinus pradinę investiciją, metines eksploatacijos sąnaudas ir sutaupymus dėl sumažėjusio elektros energijos importo iš tinklo. Toks vertinimas leidžia palyginti, ar didesnė hibridinės elektrinės ir kaupiklio sistema ekonomiškai pagrįsta, ar papildoma investicija nebesukuria proporcingos finansinės naudos.

26 paveiksle pateikiamas Pareto kompromisas tarp 10 metų pelno ir savęs pasidengimo rodiklio. X ašyje parodytas sukauptas 10 metų pelnas, o Y ašyje – savęs pasidengimas. Iš grafiko matyti, kad didėjant savęs pasidengimui ekonominis rezultatas blogėja: aukščiausią savęs pasidengimą turintys scenarijai per 10 metų tampa nuostolingi arba sukuria mažesnę ekonominę naudą. Tai rodo, kad didesnis energetinis savarankiškumas reikalauja didesnių investicijų, kurios ne visada atsiperka per nagrinėjamą laikotarpį.

Ekonominis sprendinys, pažymėtas “ECO” tašku, parinktas pagal didžiausią 10 metų pelną. Šis taškas yra dešinėje grafiko pusėje, todėl pasižymi geriausiu ekonominiu rezultatu, tačiau jo savęs pasidengimo rodiklis yra mažesnis nei A, B ar C kompromisinių sprendinių. Tai reiškia, kad ekonomiškai optimalus variantas nebūtinai maksimaliai padidina vietinės generacijos panaudojimą. Pasirinktas C kompromisinis sprendinys yra tarp ekonominio ir didesnio savęs pasidengimo sprendinių, todėl jis vertinamas kaip subalansuotas variantas tarp finansinės naudos ir techninio sistemos savarankiškumo.



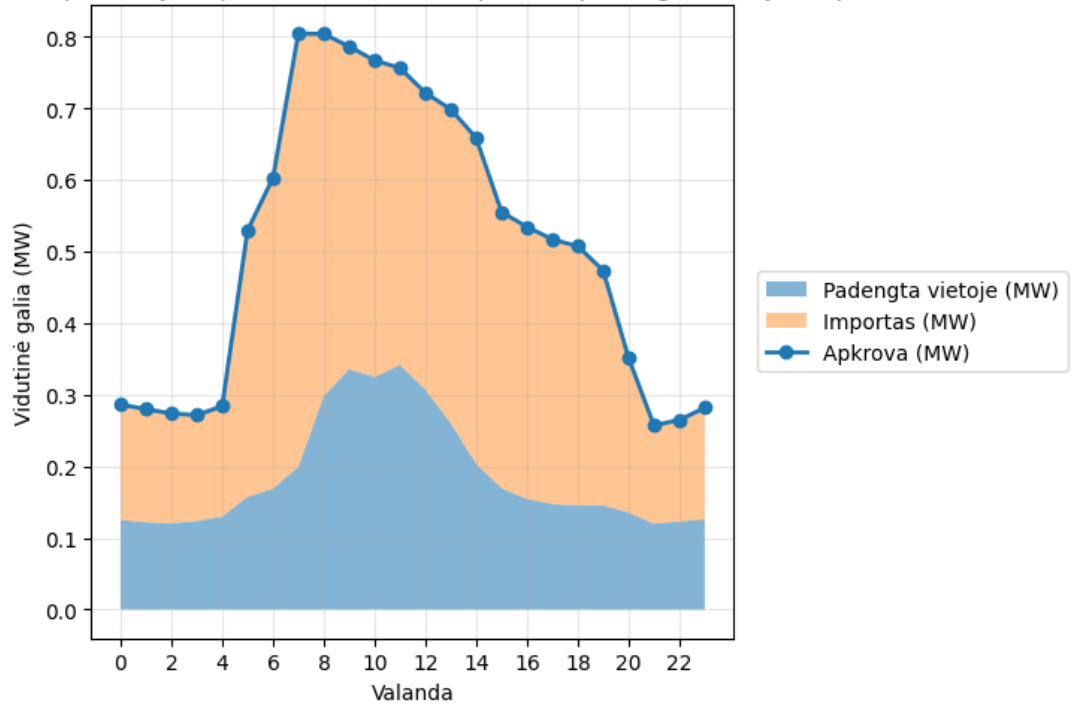
26 pav. Ekonomišką sprendinį parinkimas Pareto fronto grafike

27 ir 28 paveiksluose pateikiami ekonominio sprendinio tipinės žiemos ir vasaros dienos galios balansai. Grafikuose matyti apkrova, vietoje padengta apkrovos dalis ir importas iš tinklo. Ekonominio sprendinio atveju sistema parinkta pagal didžiausią 10 metų pelną, todėl pagrindinis tikslas yra ne maksimalus savęs pasidengimas, o kuo geresnis finansinis rezultatas.

Žiemos dienos grafike matyti, kad didelė apkrovos dalis dengiama importu iš tinklo. Vietoje padengiama tik dalis apkrovos, nes žiemos laikotarpiu saulės generacija yra mažesnė, o ekonomiškai parinktas sistemos dydis nėra orientuotas į maksimalų importo sumažinimą. Vasaros dienos grafike vietinės generacijos panaudojimas yra didesnis, ypač dienos metu, kai saulės elektrinės gamyba sutampa su apkrovos piku. Vis dėlto ryto, vakaro ir nakties valandomis išlieka importas iš tinklo.

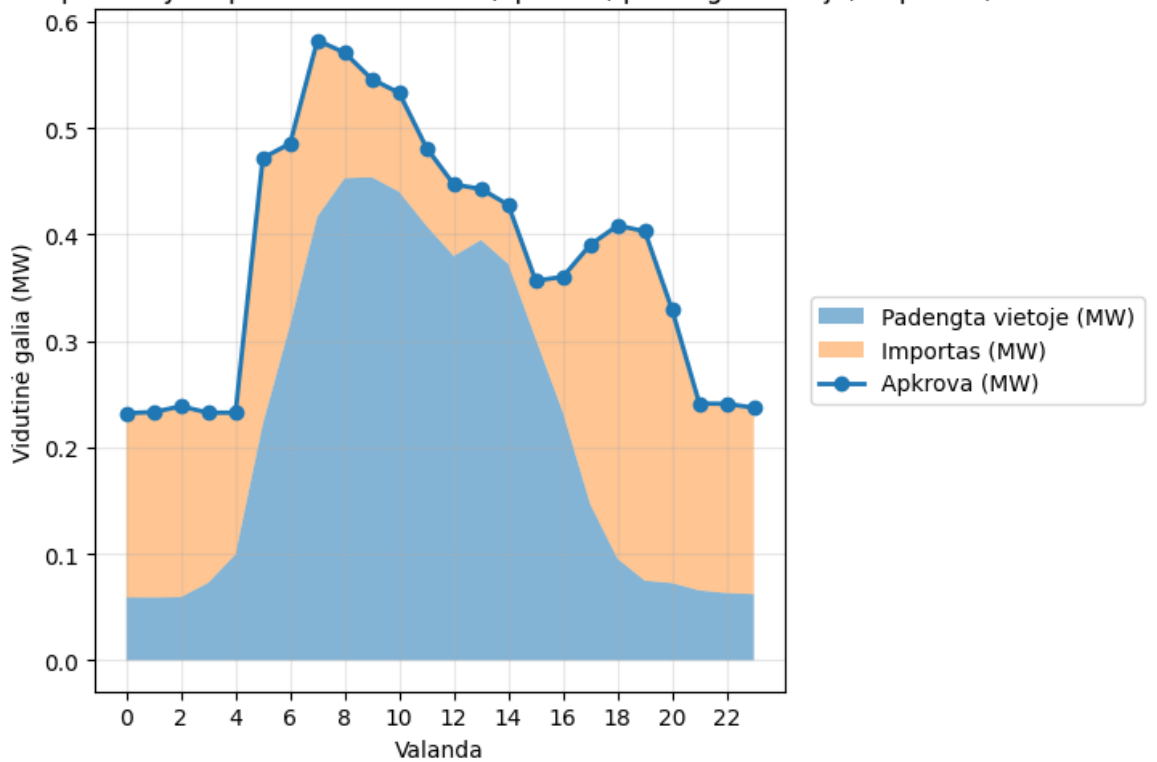
Lyginant su C kompromisiniu sprendiniu, ekonominis sprendinys pasižymi mažesniu vietinės generacijos padengimu ir didesne priklausomybe nuo tinklo, tačiau jis yra finansiškai palankesnis per 10 metų laikotarpį. C kompromisinis sprendinys geriau didina savęs pasidengimą ir mažina importą, tačiau dėl didesnės arba kitaip subalansuotos sistemos investicijos jo ekonominis rezultatas nėra maksimalus. Tai parodo pagrindinį skirtumą tarp šių dviejų atrankų: ekonominis sprendinys prioritetą teikia pelnui, o C kompromisinis sprendinys – balansui tarp ekonomikos ir energetinio savarankiškumo.

Ekonominis sprendinys: tipinė žiemos diena (apkrova, padengta vietoje, importas)



27 pav. Tipinės žiemos dienos apkrova, energija padengta iš AEI ir importas ekonominiui sprendiniui

Ekonominis sprendinys: tipinė vasaros diena (apkrova, padengta vietoje, importas)



28 pav. Tipinės vasaros dienos apkrova, energija padengta iš AEI ir importas ekonominiui sprendiniui

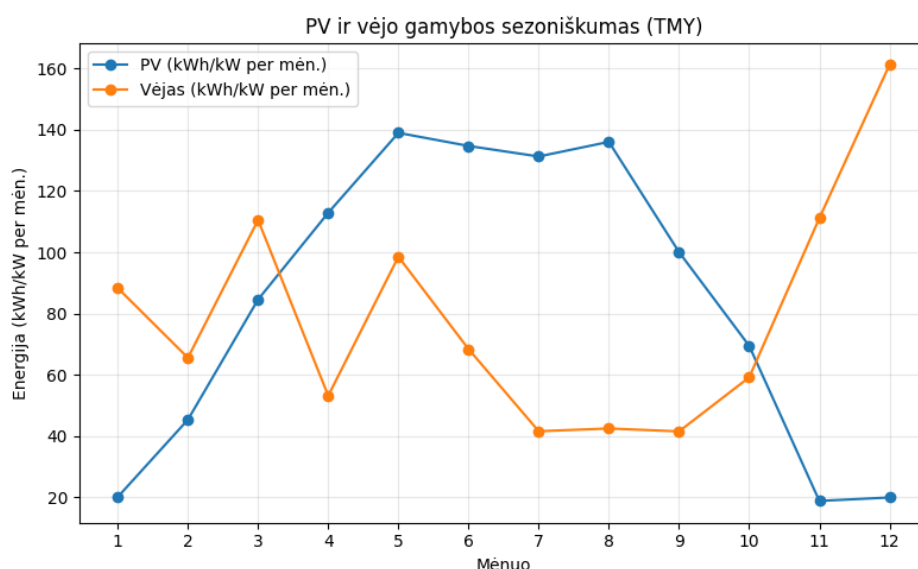
3 lentelėje pateikta pasirinktų Pareto sprendinių suvestinė, kurioje palyginami A, B, C kompromisinis ir ekonominis ECO variantai. Iš lentelės matyti, kad didėjant savęs pasidengimo rodikliui paprastai didėja ir reikalinga instaliuota FV, vėjo bei kaupiklio talpa, tačiau kartu mažėja 10 metų pelnas. B sprendinys pasižymi didžiausiu savęs pasidengimu – 80,89 %, tačiau per 10 metų ši hibridinė elektrinė neatsipirks.

3 lentelė. Sprendinių rezultatų suvestinė

Sprendinys	Instaliuota FV galia, kW	Instaliuota VE galia, kW	Instaliuota kaupiklio talpa, kWh	Savęs pasidengimo rodiklis, %	Atsipirkimo laikotarpis, metai	Pelnas per 10 metų, mln. €	Santykis SE:VE:BESS
A (2D idealas)	2826	1252	1391	66,19	8,35	0,605	2,26:1:1,11
B (kelio taškas)	4058	1530	5565	80,89	11,85	-0,802	2,65:1:3,64
C (kompromisinis 3D idealas)	2101	1043	348	57,46	6,83	1,021	6,04:3:1
ECO (pelniškiausias variantas)	1594	696	0	46,64	5,57	1,171	2,29:1:0

### 4.3. Modelio pritaikymas Vilniaus regione

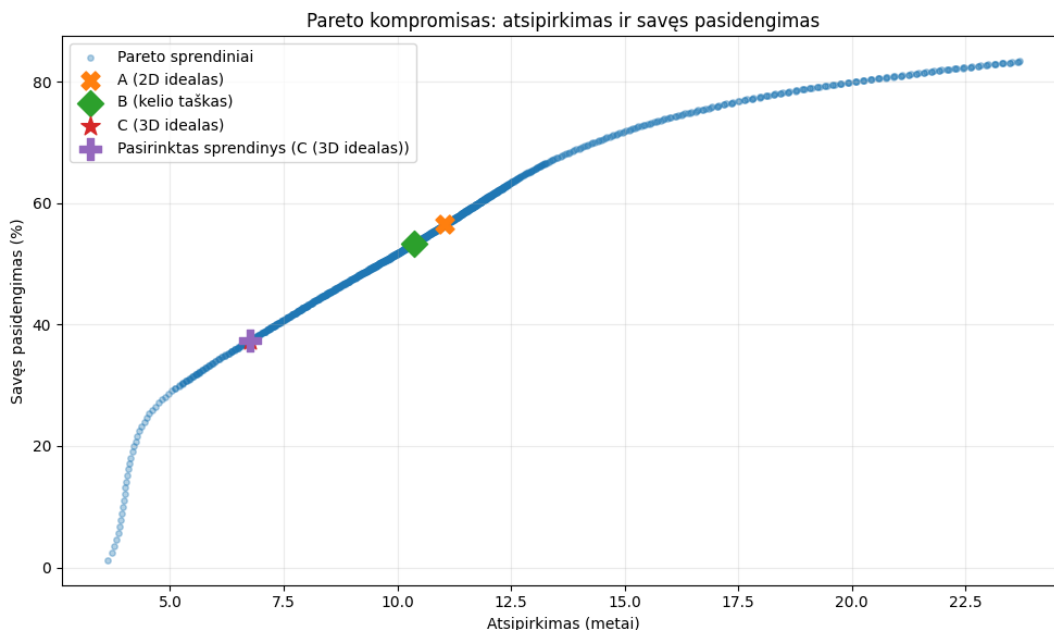
Siekiant patikrinti modelį, imamas dar vienas atvejis Vilniaus regione. Daroma prielaida, kad apkrova išlieka vienoda, kaip ir praeitais nagrinėtais atvejais, keičiamas tik vienas kintamasis – meteorologiniai duomenys. Jie imami iš Vilniaus regiono pagal PVGIS TMY. 29 paveiksle pateikiama šio regiono sumodeliuota saulės bei vėjo specifinė gamyba.



29 pav. Sumodeliuota vėjo ir saulės generacija Vilniaus regione

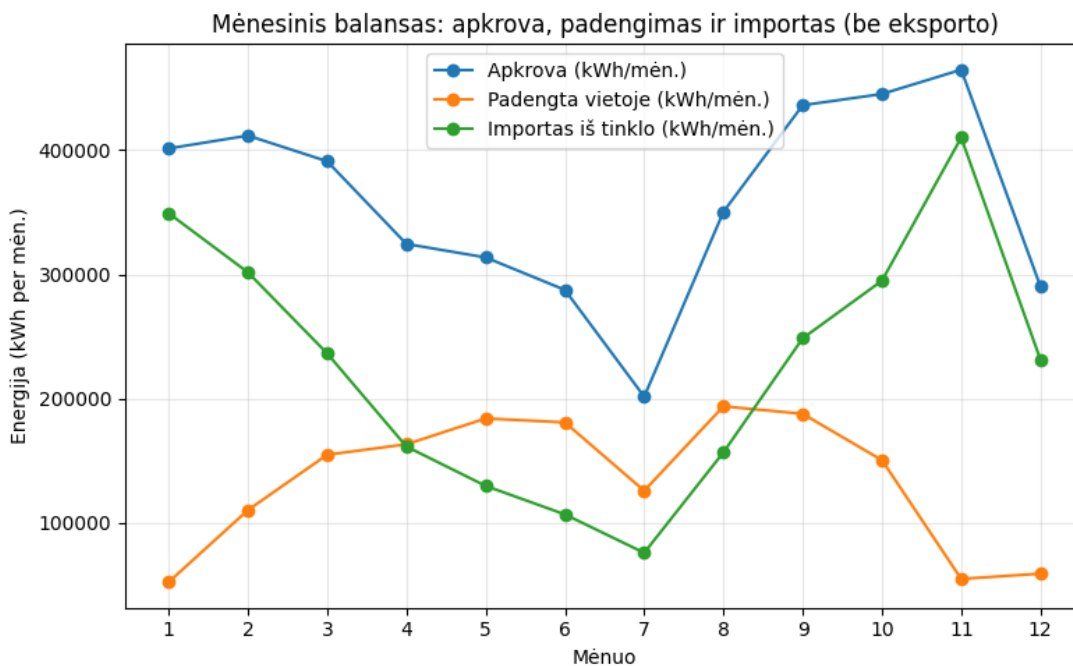
Šiuo atveju gauta metinė VE generacija per 1 kW yra 941,87 kWh, o saulės 1012 kWh. Lyginant su Klaipėda, saulės generacija išlieka panaši, tačiau vėjo generacija daugiau nei dvigubai nukrito. 30

paveikslo Pareto sprendinių aibėje matoma, kad modelio parinktas sprendinys pasidengia tik 37,43 % apkrovos iš vietinės generacijos, dėl sumažėjusio vėjo patrauklumo. 31 paveiksle atvaizduota nagrinėjamas mėnesis balansas.



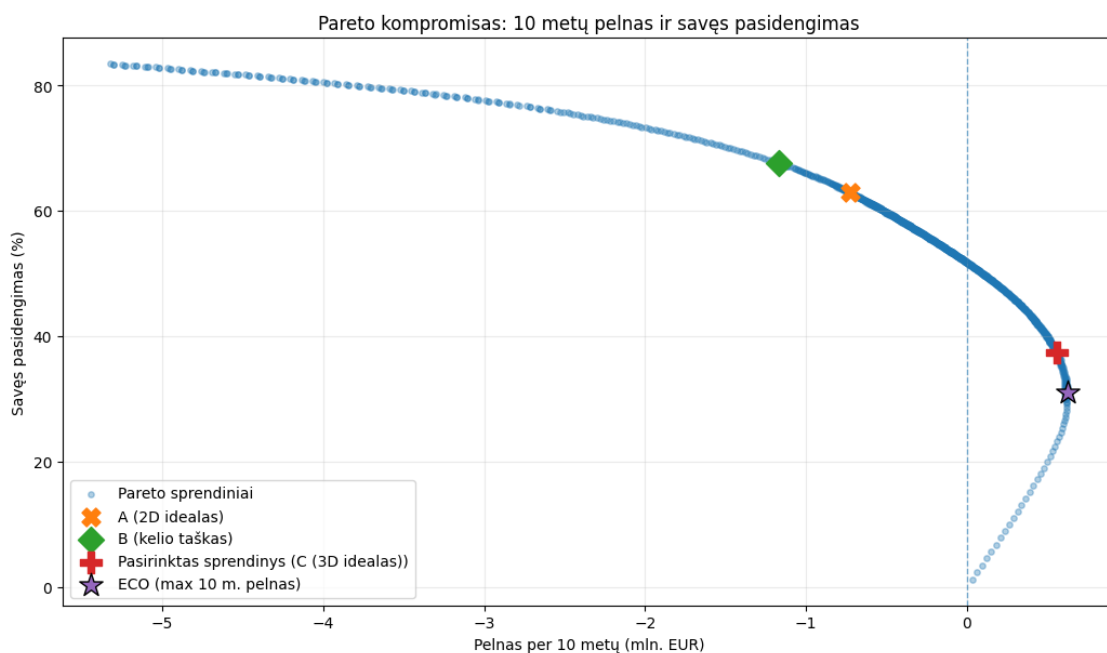
30 pav. Parinktas sprendinys Vilniaus regione

Gautas sprendinys – 2722 kW saulės elektrinė, 122 kW vėjo elektrinė, bei 608 kWh talpos kaupiklis. Kadangi Vilniaus regione vėjo greitis yra žymiai mažesnis nei Klaipėdoje, modelis parinko žymiai mažesnę vėjo instaliuotą galią. Šiuo atveju hibridinės elektrinės instaliuotų galių santykis SE:VE:BESS gautas 22,31:1:5.



31 pav. Mėnesinis balansas Vilniaus regione

32 paveiksle pateiktas ekonominis sprendinys Vilniaus regionui, t.y. sprendinys su kuriuo gautas didžiausias pelnas per 10 metų.



32 pav. Ekonomiško sprendinio parinkimas Vilniaus regionui

Parinktas ekonominis sprendinys – 2215 kW saulės elektrinė, 0 kW vėjo elektrinė, bei 228 kWh talpos kaupiklis. Išreikšta santykiu atitinka 9,71:0:1. Lyginant su Klaipėda, šiuo atveju gautas ekonomiškiausias sprendinys yra be vėjo elektrinės, o Klaipėdoje ekonomiškiausias buvo be kaupiklio. Taip yra todėl, nes Vilniaus regione vėjo greitis sąlyginai mažas, o investicijos kaina aukščiausia. 4 lentelėje pateikiama suvestinė, lyginant Vilniaus ir Klaipėdos kompromisinių sprendinių bei ekonomiškiausių sprendinių rezultatus.

4 lentelė. Sprendinių rezultatų palyginimas Klaipėdoje ir Vilniuje

Sprendinys	Instaliuota FV galia, kW	Instaliuota VE galia, kW	Instaliuota kaupiklio talpa, kWh	Savęs pasidengimo rodiklis, %	Atsipirkimo laikotarpis, metai	Pelnas per 10 metų, mln. €	Santykis SE:VE:BESS
C kompromisinis Klaipėda	2101	1043	348	57,46	6,83	1,021	6,04:3:1
C kompromisinis Vilnius	2722	122	608	37,43	6,75	0,681	22,31:1:5
ECO Klaipėda	1594	696	0	46,64	5,57	1,171	2,29:1:0
ECO Vilnius	2215	0	228	31,02	5,42	0,806	9,71:0:1

## Išvados

1. Darbe sudarytas hibridinės saulės ir vėjo elektrinės su energijos kaupikliu valandinis modelis, leidžiantis įvertinti saulės ir vėjo generaciją, apkrovos padengimą vietine energija, importą iš tinklo, kaupiklio įkrovos būseną ir ribojamą perteklinę energiją. Modeliavimas atliktas naudojant PVGIS TMY meteorologinius duomenis, NordPool biržos kainas ir valdymo strategiją, kai perteklinė energija į tinklą neeksportuojama.
2. Atlikus scenarijų analizę nustatyta, kad be atidavimo į tinklą hibridinės sistemos ekonominį efektyvumą riboja ne tik instaliuotos galios dydis, bet ir generacijos bei apkrovos nesutapimas laike. Net ir tais mėnesiais, kai susidaro didelis saulės ar vėjo generacijos perteklius, dalis apkrovos vis tiek turi būti dengiama importu iš tinklo, nes perteklius susidaro kitomis valandomis nei energijos poreikis. Todėl vien tik didesnės generacijos galios ar kaupiklio talpos parinkimas neužtikrina proporcingo importo sumažėjimo ir ekonominės naudos augimo.
3. Pagal „C“ kompromisinio 3D idealo metodiką parinktas subalansuotas sprendinys: 2101 kWp saulės elektrinė, 1043 kWp vėjo elektrinė ir 348 kWh kaupiklis. Šio sprendinio santykis SE:VE:BESS yra apie 6,04:3:1, savęs pasidengimo rodiklis siekia 57,46 %, atsipirkimo laikotarpis – 6,83 metų, o 10 metų pelnas – 1,021 mln. Eur. Šis variantas laikomas optimaliu kompromisu tarp didesnio vietinės generacijos panaudojimo ir ekonominio atsipirkimo.
4. Ekonomiškai pelningiausias „ECO“ sprendinys yra mažesnės galios sistema be kaupiklio: 1594 kW saulės elektrinė, 696 kW vėjo elektrinė ir 0 kWh kaupiklis. Šio sprendinio savęs pasidengimo rodiklis yra 46,64 %, atsipirkimo laikotarpis – 5,57 metų, o 10 metų pelnas – 1,171 mln. Eur. Tai rodo, kad nagrinėtomis ekonominėmis prielaidomis kaupiklis didina savęs pasidengimą, tačiau nebūtinai padidina finansinę naudą.
5. Palyginus „C“ kompromisinį ir „ECO“ sprendinius nustatyta, kad optimalus hibridinės sistemos dydis priklauso nuo pasirinkto tikslo. Jeigu prioritetą yra didžiausias 10 metų pelnas, palankiausias yra „ECO“ sprendinys be kaupiklio, kuris per 10 metų sutaupys 0,15 mln. Eur. daugiau. Jeigu siekiama didesnio energetinio savarankiškumo ir mažesnės priklausomybės nuo tinklo, tinkamesnis yra „C“ kompromisinis sprendinys su kaupikliu, kadangi nepaaukojus daug pelno, savęs pasidengimo rodiklis padidinamas virš 10 %.
6. Palyginus modelio rezultatus Klaipėdos ir Vilniaus regionuose, kompromisinių sprendinių savęs pasidengimo rodiklis skiriasi per 20,03 %, o ekonominių sprendinių skiriasi per 15,62 %. Atsipirkimo laikotarpiai abiejuose regionuose gauti panašūs, tačiau Klaipėdos regione buvo pasiekti didesni pelno ir savęs pasidengimo rodikliai. Tai parodo, kad modelis geba įvertinti skirtingas meteorologines sąlygas ir parinkti logiškus FV-VE-BESS sistemos sprendinius, o Klaipėdos regione tokia sistema yra palankesnė dėl geresnių vėjo energijos sąlygų.

## Literatūros sąrašas

1. P. Utkarsh; T. Singha; N. Bhattacharjee; D. Jana ir R. Chowdhury. Integrating Battery Energy Storage Systems for Enhanced Grid Reliability and Renewable Energy Management. *Iš: 2025 8th International Conference on Electronics, Materials Engineering & Nano-Technology (IEMENTech)*, pp. 1–5.2025..
2. P. Han; P. Li; X. Xie ir J. Zhang. Coordinated Optimization of Power Rating and Capacity of Battery Storage Energy System with Large-Scale Renewable Energy. *Iš: 2022 IEEE 6th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, pp. 189–193.2022..
3. SHIVARAMA KRISHNA, K. ir SATHISH KUMAR, K. A review on hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, t. 52 (2015), p. 907–916. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115008345>.
4. J. Zhang; N. Zhang ir Y. Ge. Energy Storage Placements for Renewable Energy Fluctuations: A Practical Study. *IEEE Transactions on Power Systems*, t. 38 (2023), nr. 5, p. 4916–4927.
5. DEMIRTAS, O. Evaluating the Best Renewable Energy Technology For Sustainable Energy Planning. *International Journal of Energy Economics and Policy*, t. 3 (2013), p. 23–33. Prieiga per internetą: [https://www.researchgate.net/publication/285773953\\_Evaluating\\_the\\_Best\\_Renewable\\_Energy\\_Technology\\_For\\_Sustainable\\_Energy\\_Planning](https://www.researchgate.net/publication/285773953_Evaluating_the_Best_Renewable_Energy_Technology_For_Sustainable_Energy_Planning) [žiūrėta Jun 14, 2025].
6. CHEN, J.; SU, F.; JAIN, V.; SALMAN, A.; TABASH, M. ir kt. Does Renewable Energy Matter to Achieve Sustainable Development Goals? The Impact of Renewable Energy Strategies on Sustainable Economic Growth. *Frontiers in Energy Research*, t. 10 (2022), p. 829252. Prieiga per internetą: [https://www.researchgate.net/publication/359568344\\_Does\\_Renewable\\_Energy\\_Matter\\_to\\_Achieve\\_Sustainable\\_Development\\_Goals\\_The\\_Impact\\_of\\_Renewable\\_Energy\\_Strategies\\_on\\_Sustainable\\_Economic\\_Growth](https://www.researchgate.net/publication/359568344_Does_Renewable_Energy_Matter_to_Achieve_Sustainable_Development_Goals_The_Impact_of_Renewable_Energy_Strategies_on_Sustainable_Economic_Growth) [žiūrėta Jun 14, 2025].
7. AL SHEREIQI, A.; AL-HINAI, A.; ALBADI, M. ir AL-ABRI, R. Optimal Sizing of a Hybrid Wind-Photovoltaic-Battery Plant to Mitigate Output Fluctuations in a Grid-Connected System. *Energies*, t. 13 (2020), nr. 11, p. 3015. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/11/3015> [žiūrėta Jun 17, 2025].
8. ZHANG, N.; YANG, N. ir LIU, J. Optimal Sizing of PV/Wind/Battery Hybrid Microgrids Considering Lifetime of Battery Banks. *Energies*, t. 14 (2021), nr. 20, p. 6655. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/20/6655> [žiūrėta Jun 17, 2025].
9. YANG, D.; JIANG, C.; CAI, G. ir HUANG, N. Optimal sizing of a wind/solar/battery/diesel hybrid microgrid based on typical scenarios considering meteorological variability. *IET Renewable Power Generation*, t. 13 (2019), nr. 9, p. 1446–1455. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.5944>.
10. LIAN, J.; ZHANG, Y.; MA, C.; YANG, Y. ir CHAIMA, E. A review on recent sizing methodologies of hybrid renewable energy systems. *Energy Conversion and Management*, t. 199 (2019), p. 112027. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890419310337> [žiūrėta Jun 18, 2025].

11. AHADI, A.; KANG, S. ir LEE, J. A novel approach for optimal combinations of wind, PV, and energy storage system in diesel-free isolated communities. *Applied Energy*, t. 170 (2016), p. 101–115. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916302665> [žiūrėta Jun 18, 2025].
12. LUO, Y.; SHI, L. ir TU, G. Optimal sizing and control strategy of isolated grid with wind power and energy storage system. *Energy Conversion and Management*, t. 80 (2014), p. 407–415. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689041400106X> [žiūrėta Jun 18, 2025].
13. HOSSEINALIZADEH, R.; SHAKOURI G, H.; AMALNICK, M. S. ir TAGHIPOUR, P. Economic sizing of a hybrid (PV–WT–FC) renewable energy system (HRES) for stand-alone usages by an optimization-simulation model: Case study of Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, t. 54 (2016), p. 139–150. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115010163> [žiūrėta Jun 18, 2025].
14. BILAL, B. O.; SAMBOU, V.; KÉBÉ, C. M. F.; NDIAYE, P. A. ir NDONGO, M. Methodology to Size an Optimal Stand-Alone PV/wind/diesel/battery System Minimizing the Levelized cost of Energy and the CO2 Emissions. *Energy Procedia*, t. 14 (2012), p. 1636–1647. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610211045656> [žiūrėta Jun 18, 2025].
15. A. ALTURKI, F.; M. H. FARH, H.; A. AL-SHAMMA’A, A. ir ALSHARABI, K. Techno-Economic Optimization of Small-Scale Hybrid Energy Systems Using Manta Ray Foraging Optimizer. *Electronics*, t. 9 (2020), nr. 12, p. 2045. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/2079-9292/9/12/2045> [žiūrėta Jun 18, 2025].
16. ROY, P.; HE, J.; ZHAO, T. ir SINGH, Y. V. Recent Advances of Wind-Solar Hybrid Renewable Energy Systems for Power Generation: A Review. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, t. 3 (2022), p. 81–104. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9684974> [žiūrėta Jun 18, 2025].
17. ACAKPOVI, A.; ADJEI, P.; NWULU, N. ir ASABERE, N. Y. Optimal Hybrid Renewable Energy System: A Comparative Study of Wind/Hydrogen/Fuel-Cell and Wind/Battery Storage. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, t. 2020 (2020), nr. 1, p. 1756503. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1155/2020/1756503>.
18. LAWAN, S. M.; ABIDIN, W. A. W. Z.; LAWAN, S. M. ir ABIDIN, W. A. W. Z. A Review of Hybrid Renewable Energy Systems Based on Wind and Solar Energy: Modeling, Design and Optimization. Iš: *Wind Solar Hybrid Renewable Energy System* IntechOpen, 2020. Prieiga per internetą: <https://www.intechopen.com/chapters/67556> [žiūrėta Jun 18, 2025].
19. SOUDAGAR, M. E. M.; RAMESH, S.; KHAN, T. M. Y.; ALMAKAYEEL, N.; RAMESH, R. ir kt. An overview of the existing and future state of the art advancement of hybrid energy systems based on PV-solar and wind. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, t. 19 (2024), p. 207–216. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctad123> [žiūrėta Jun 18, 2025].

20. BAI, M.; LIU, S.; QI, M.; LIU, S.; SHU, C. ir kt. Optimization of wind-solar hybrid system based on energy stability of multiple time scales and uncertainty of renewable resources. *Energy*, t. 313 (2024), p. 133790. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544224035680> [žiūrėta Jun 19, 2025].
21. P. Dalwadi; V. Shrinet; C. R. Mehta ir P. Shah. Optimization of Solar-Wind Hybrid System for Distributed Generation. Iš: *2011 Nirma University International Conference on Engineering*, pp. 1–4.2011..
22. NIGAM, A. ir SHARMA, K. K. Integration of Hybrid Energy Model with Solar PV, Hydro & Wind Turbine by using MATLAB/Simulink. , pp. 228–232.2022-03. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9751856> [žiūrėta Jun 19, 2025].
23. Y. Sharma; B. K. Saxena ir S. Mishra. Feasibility Analysis of Energy Sustainable Campus using PV-Wind Hybrid Power System. Iš: *2020 12th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN)*, pp. 234–238.2020..
24. MULLER, D. C.; SELVANATHAN, S. P.; CUCE, E. ir KUMARASAMY, S. Hybrid solar, wind, and energy storage system for a sustainable campus: A simulation study. *Science and Technology for Energy Transition*, t. 78 (2023), p. 13. Prieiga per internetą: <https://www.stet-review.org/articles/stet/abs/2023/01/stet20220047/stet20220047.html> [žiūrėta Jun 19, 2025].
25. MEMON, S. A.; UPADHYAY, D. S. ir PATEL, R. N. Optimal configuration of solar and wind-based hybrid renewable energy system with and without energy storage including environmental and social criteria: A case study. *Journal of Energy Storage*, t. 44 (2021), p. 103446. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X21011300> [žiūrėta Jun 19, 2025].
26. NIVEDITHA, N. ir RAJAN SINGARAVEL, M. M. Optimal sizing of hybrid PV–Wind–Battery storage system for Net Zero Energy Buildings to reduce grid burden. *Applied Energy*, t. 324 (2022), p. 119713. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261922010054> [žiūrėta Jun 18, 2025].

### Informacijos šaltinių sąrašas

1. <https://www.pvsyst.com/help/physical-models-used/irradiation-models/albedo.html>
2. [https://www.pvsyst.com/help-pvsyst7/performance\\_ratio.htm](https://www.pvsyst.com/help-pvsyst7/performance_ratio.htm)
3. <https://www.entsoe.eu/data/transparency-platform/>
4. [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis/pvgis-releases/pvgis-53/pvgis-5-tools/pvgis-typical-meteorological-year-tmy-generator\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis/pvgis-releases/pvgis-53/pvgis-5-tools/pvgis-typical-meteorological-year-tmy-generator_en)