



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Pagrindo paviršiaus spalvos ir albedo įtakos dvipusio  
saulės modulio bendrojo ir galinės pusės efektyvumo  
rodikliams tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Danielius Muchinas**

Projekto autorius

**Doc. Tomas Deveikis**

Vadovas

---

**Kaunas, 2026**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Pagrindo paviršiaus spalvos ir albedo įtakos dvipusio  
saulės modulio bendrojo ir galinės pusės efektyvumo  
rodikliams tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

---

**Danielius Muchinas**

Projekto autorius

**Doc. Tomas Deveikis**

Vadovas

**Doc. Gytis Svinkūnas**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2026**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

Danielius Muchinas

## **Pagrindo paviršiaus spalvos ir albedo įtakos dvipusio saulės modulio bendrojo ir galinės pusės efektyvumo rodikliams 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.

Danielius Muchinas

*Patvirtinta elektroniniu būdu*

Muchinas, Danielius. Pagrindo paviršiaus spalvos ir albedo įtakos dvipusio saulės modulio bendrojo ir galinės pusės efektyvumo rodikliams 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, dvipusė generacija, dvipusiai fotovoltiniai moduliai.

Kaunas, 2026. 60 p.

### **Santrauka**

Baigiamajame darbe nagrinėjamos dvipusių fotovoltinių modulių pagrindinės savybės, jų pritaikymo galimybės, atskleidžiami dvipusių fotovoltinių modulių veikimo principai ir efektyvumo rodiklių manipuliacijos būdai. Sudarytas *MATLAB* mišrus dvipusio fotomodulio modelis, kuris apdoroja jam pateikiamus kintančius duomenis ir susimuliuoja realistiškomis sąlygomis veikiančią fotomodulį ir jo charakteristikas, nustatytu kintančių duomenų laiko pjūviu.

Dauguma mokslinių tyrimų paviršius apibūdina tik pagal bendrą albedo koeficientą, neatlikdami išsamios paviršiaus spalvos moduliui analizės, kuri gali turėti įtakos atspindžiui į galinę fotovoltinio modulio pusę ir paveikti visos panelės energetinį efektyvumą.

Tyrimo metu ištiriama kaip teorinės, menamos pirminės spalvos bei praktikoje ir teorijoje aprašytos albedo, išreikštos per spalvinį spektrą, paveikia skirtingas pasirinkto fotomodulio efektyvumo charakteristikas, palyginami skirtingais metų laiko pjūviais gauti rezultatai bei analizuojami 20 skirtingų spalvų išreikštų per albedo modeliavimo rezultatai, ir nustatoma, kokios spalvos ir kokiomis tendencijomis yra naudingiausios.

Muchinas, Danielius. Study on Influence of Albedo and Ground Surface Color on Overall and Rear-Side Efficiency Indicators of Bifacial Solar Module. 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, bifacial generation, bifacial photovoltaic modules.

Kaunas, 2026. 60 p.

### **Summary**

This thesis examines the key characteristics of bifacial photovoltaic modules and their areas of applications, and explores the operating principles of bifacial photovoltaic modules as well as methods for optimizing their efficiency metrics. A complex MATLAB model of a bifacial photovoltaic module has been designed, which processes the input variable data and simulates the module operating under realistic conditions, along with its characteristics, based on a specified time series of variable data.

Most scientific studies characterize surfaces only by the overall albedo coefficient, without performing a detailed analysis of the surface color of the module, which can influence reflection onto the rear side of the photovoltaic module and affect the energy efficiency of the entire panel.

The study investigates how theoretical, assumed primary colors and albedo values described in practice and theory, expressed through the color spectrum, affect the various efficiency characteristics of the selected photovoltaic module. Results obtained across different seasonal time periods are compared, and the results of albedo simulations for 20 different colors are analyzed to determine which colors and in which patterns are most beneficial.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>7</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>8</b>
<b>Santrumpų ir terminų sąrašas .....</b>	<b>10</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>11</b>
<b>1. Literatūros analizė.....</b>	<b>12</b>
1.1. Saulės energija fotovoltiniuose moduluose.....	12
1.2. Temperatūros įtaka fotovoltinių modulių darbui.....	12
1.3. Dvipusiai saulės moduliai ir jų technologijos .....	14
1.3.1. Dvipusių fotomodulių celių struktūra.....	15
1.3.2. Konstrukciniai ir konfigūraciniai sprendimai dvipusiuose fotomoduluose .....	15
1.4. Paviršiaus albedo įtaka dvipusiams fotovoltiniams moduliams.....	17
1.4.1. Tipinės paviršių albedo reikšmės .....	17
1.5. Dvipusės generacijos indėlis .....	18
1.6. Komercinių dvipusių fotomodulių testavimas.....	19
1.6.1. Standartinės bandymo sąlygos .....	19
1.6.2. Dvipusis vardinis spinduliavimo intensyvumas .....	20
1.7. Tyrimų spragos ir aktualumas .....	20
<b>2. Metodologija .....</b>	<b>21</b>
2.1. Dviejų diodų schemas panaudojimas .....	21
2.1.1. Modulio galinės pusės apšvietos išskaidymo vertinimas .....	21
2.2. Dvipusiškumo koeficientas ir jo įtaka modulio galinei pusei .....	22
2.3. Paviršiaus albedo sulyginimas RGB spalvų skalei.....	22
2.4. Modelio lygio nustatymas .....	23
2.5. Maksimalaus galios taško sekimas (MPPT).....	23
2.6. Temperatūros įvertinimas .....	24
<b>3. Dvipusio fotovoltinio modulio kintančiomis sąlygomis su albedo valdymu modeliavimas 25</b>	<b>25</b>
3.1. Modeliavimo įrankiai .....	25
3.2. Modelyje naudojamų elementų paaiškinimai ir modeliavimo seka .....	25
3.3. Modelio validacija ir palyginimas su fotomodulio technine specifikacija STC sąlygomis .....	28
3.4. RGB–Albedo valdiklio patikrinimas ir verifikacija .....	30
3.5. Realių duomenų išgavimas naudojantis išorine programa <i>PVsyst</i> .....	33
3.6. Darbas su dinamišku modeliu, realių duomenų apdorojimas ir modeliavimo seka.....	34
<b>4. Modeliavimo rezultatai .....</b>	<b>36</b>
4.1. Vienos paros metuose su geriausiomis klimato sąlygomis, modeliuojant skirtingus albedo, rezultatų analizė.....	36
4.2. Žiemos ir vasaros sezonų, kintančiomis klimato sąlygomis, modeliuojant skirtingus albedo, rezultatų analizė.....	42
4.3. Visų kalendorinių metų, kintančiomis klimato sąlygomis, modeliuojant skirtingus albedo, rezultatų analizė.....	51
<b>Išvados .....</b>	<b>56</b>
<b>Informacijos šaltinių sąrašas .....</b>	<b>57</b>

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Skirtingų tipų fotovoltinių celių užpildymo koeficientai .....	13
<b>2 lentelė.</b> Skirtingų paviršių albedo pokytis [3] .....	17
<b>3 lentelė.</b> Modelyje panaudoti MATLAB bibliotekų elementai ir jų paaiškinimai .....	26
<b>4 lentelė.</b> Spalvinių RGB skaitinių verčių lentelė RGB–Albedo valdiklio patikrinimui .....	31
<b>5 lentelė.</b> Modeliavimo rezultatai RGB–Albedo valdikliui verifikuoti .....	33
<b>6 lentelė.</b> Paros dinamiško modelio su RGB–Albedo valdikliu simuliuojant realybės atitikmenis modeliavimo rezultatai .....	38
<b>7 lentelė.</b> Paros dinamiško modelio su RGB–Albedo valdikliu naudojant atsitiktiniai pasirinktų spalvų reikšmes modeliavimo rezultatai .....	40
<b>8 lentelė.</b> Žiemos dinamiško modelio su RGB–Albedo valdikliu simuliuojant realybės atitikmenis modeliavimo rezultatai .....	44
<b>9 lentelė.</b> Vasaros dinamiško modelio su RGB–Albedo valdikliu simuliuojant realybės atitikmenis modeliavimo rezultatai .....	45
<b>10 lentelė.</b> Palyginamųjų duomenų koeficientų lentelė vasaros ir žiemos modeliavimui su praktikoje pasitaikančiais RGB–Albedo atitikmenimis.....	46
<b>11 lentelė.</b> Žiemos dinamiško modelio su RGB–Albedo valdikliu naudojant atsitiktinai pasirinktų spalvų reikšmes modeliavimo rezultatai .....	48
<b>12 lentelė.</b> Vasaros dinamiško modelio su RGB–Albedo valdikliu naudojant atsitiktinai pasirinktų spalvų reikšmes modeliavimo rezultatai .....	48
<b>13 lentelė.</b> Palyginamųjų duomenų koeficientų lentelė vasaros ir žiemos modeliavimui su atsitiktinai pasirinktomis spalvomis naudojant RGB–Albedo valdiklį .....	50
<b>14 lentelė.</b> Matematinis 37 paveikslėlio analizės paaiškinimas .....	51
<b>15 lentelė.</b> Kalendorinių metų, dinamiško modelio su RGB–Albedo valdikliu, simuliuojant realybės atitikmenis, modeliavimo rezultatai .....	54
<b>16 lentelė.</b> Kalendorinių metų dinamiško modelio su RGB–Albedo valdikliu naudojant atsitiktinai pasirinktų spalvų reikšmes modeliavimo rezultatai.....	55

## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> Pagrindinių šilumos veiksnių efektyvumo priklausomybė nuo temperatūros [7].....	13
<b>2 pav.</b> Fotovoltinio modulio srovės priklausomybės nuo įtampos [11].....	14
<b>3 pav.</b> Fotovoltinio modulio galios priklausomybė nuo srovės kreivė [11].....	14
<b>4 pav.</b> Dvipusės ir vienpusės fotovoltinės celės struktūra [12].....	15
<b>5 pav.</b> Dvipusio ir vienpusio fotovoltinių modulių konstrukcinė struktūra [17].....	16
<b>6 pav.</b> Dvipusių fotovoltinių modulių montavimas aukštyje [19] .....	16
<b>7 pav.</b> Žemės albedo dedamosios ir montavimas dvipusių fotovoltinių modulių masyvuose [21] ..	18
<b>8 pav.</b> Galinės pusės indėlio $BG$ priklausomybė nuo albedo [25] .....	19
<b>9 pav.</b> Fotovoltinė schema su dviem diodais [31].....	21
<b>10 pav.</b> Rec. 709 spalvų erdvė $XY$ plokštumoje [33] .....	23
<b>11 pav.</b> Modelio parengimo sekos principinė schema .....	25
<b>12 pav.</b> STC sąlygų tyrimo modelio principinė struktūrinė schema.....	28
<b>13 pav.</b> Jinko Solar Tiger JKM450M 7RL3 TV I-U ir P-U charakteristikos [35].....	29
<b>14 pav.</b> Modeliuojamų STC sąlygų prie albedo 1 voltamperinė ir P-U charakteristikos.....	29
<b>15 pav.</b> Modifikuotas STC modelis su RGB–Albedo valdikliu ir išskaidytos spinduliuotės priėmimu .....	30
<b>16 pav.</b> I-U ir P-U charakteristikos modifikuotomis STC sąlygomis prie albedo 0 vertės (absoliučios juodos atitikmuo).....	31
<b>17 pav.</b> I-U ir P-U charakteristikos modifikuotomis STC sąlygomis prie albedo 0,202 vertės (žolės atitikmuo) .....	32
<b>18 pav.</b> I-U ir P-U charakteristikos modifikuotomis STC sąlygomis prie albedo 0,447 vertės (žvyro atitikmuo) .....	32
<b>19 pav.</b> $PV_{syst}$ išgautas saulės keliavimo ciklo grafikas.....	33
<b>20 pav.</b> Dinamiško modelio paruošto dirbti su realiais duomenimis principinė schema.....	34
<b>21 pav.</b> Temperatūros oscilografo rodmenys vienos dienos simuliacijai .....	35
<b>22 pav.</b> Generuojamos galios poroje $P(t)$ charakteristika prie albedo 0,202 vertės .....	36
<b>23 pav.</b> Paros modeliavimo galinės pusės indėlio bendrai fotovoltinio modulio generacijai grafikas prie albedo vertės 0,202.....	36
<b>24 pav.</b> Generuojamos galios poroje $P(t)$ charakteristika prie albedo 0,447 vertės .....	37
<b>25 pav.</b> Paros modeliavimo galinės pusės indėlio bendrai fotovoltinio modulio generacijai grafikas prie albedo vertės 0,447.....	37
<b>26 pav.</b> Paros vidutinio galinės pusės indėlio ir visos panelės maksimalios galios priklausomybės nuo albedo kreivė, modelyje albedo keitimui taikant praktikoje pasitaikančių paviršių RGB atitikmenis .....	39
<b>27 pav.</b> Per parą sugeneruotos energijos priklausomybės nuo albedo vertės grafikas, modelyje albedo keitimui taikant praktikoje pasitaikančių paviršių RGB atitikmenis.....	39
<b>28 pav.</b> Paros vidutinio galinės pusės indėlio ir visos panelės maksimalios galios priklausomybės nuo albedo kreivė, modelyje albedo keitimui taikant atsitiktinai pasirinktas spalvas.....	41
<b>29 pav.</b> Per parą sugeneruotos energijos priklausomybės nuo albedo vertės grafikas, modelyje albedo keitimui taikant atsitiktinai pasirinktas spalvas .....	41
<b>30 pav.</b> Generacijos žiemos sezonu $P(t)$ charakteristika prie albedo 0,202 vertės .....	42
<b>31 pav.</b> Mėnesiais išskaidytas ir visos žiemos suminis sugeneruotos energijos kWh grafikas prie albedo 0,202 vertės .....	42
<b>32 pav.</b> Generacijos žiemos sezonu $P(t)$ charakteristika prie albedo 0,863 vertės .....	43

<b>33 pav.</b> Mėnesiais išskaidytas ir visos žiemos suminis sugeneruotos energijos kWh grafikas prie albedo 0,863 vertės .....	43
<b>34 pav.</b> Vasaros ir žiemos sugeneruotos energijos palyginimo, prie praktikoje pasitaikančių RGB–Albedo valdikliu sugeneruotų albedo verčių, grafikas .....	46
<b>35 pav.</b> Vasaros ir žiemos sezonų palyginamųjų koeficientų grafikas prie praktikoje pasitaikančių RGB–Albedo valdikliu sugeneruotų albedo verčių .....	47
<b>36 pav.</b> Vasaros ir žiemos sugeneruotos energijos palyginimo, prie atsitiktinai pasirinktų spalvų RGB–Albedo valdikliu sugeneruotų albedo verčių, grafikas .....	49
<b>37. pav.</b> Vasaros ir žiemos sezonų palyginamųjų koeficientų grafikas prie atsitiktinai pasirinktų spalvų RGB–Albedo valdikliu sugeneruotų albedo verčių .....	50
<b>38 pav.</b> Visų kalendorinių metų $P(t)$ charakteristika prie albedo 0,202 vertės .....	51
<b>39 pav.</b> Mėnesiais išskaidytas ir visų kalendorinių metų suminis sugeneruotos energijos kWh grafikas prie albedo 0,202 vertės .....	52
<b>40 pav.</b> Visų kalendorinių metų $P(t)$ charakteristika prie albedo 0,863 vertės .....	52
<b>41 pav.</b> Mėnesiais išskaidytas ir visų kalendorinių metų suminis sugeneruotos energijos kWh grafikas prie albedo 0,863 vertės .....	53

## Santrumpų ir terminų sąrašas

### Santrumpos:

RGB – raudona, žalia, mėlyna;

MPPT – maksimalios galios taško sekimas;

NOCT – nominalioji elementų darbo temperatūra;

STC – standartinės bandymo sąlygos;

BNPI – dvipusis vardinis spinduliavimo intensyvumas;

BG – galinės pusės indėlis, dvipusės generacijos prieaugis;

AM – oro masė

GVF – žemės matomumo koeficientas

SVF – dangaus matomumo koeficientas

DAE – diferencinės algebrinės lygtys

FF – užpildymo koeficientas

## Įvadas

Kadangi aplinkos tarša, klimato kaita ir auganti elektros energijos paklausa tampa vis rimtesnės ir aktualesnės temos energetikos vystymuisi, atsinaujinančiosios energijos panaudojimas vis dar yra labai efektyvi priemonė ekologijai apsaugoti ir tvariai energetikos plėtrai užtikrinti. Saulės energija yra prieinamiausias atsinaujinančiosios energijos šaltinis pasaulyje. Saulės energijos gamybos technologija turi didelę mokslinių tyrimų vertę ir taikymo perspektyvas [1]. Pagrindinės priežastys, ribojančios šių technologijų plėtrą, nepaisant tinklo disbalanso, įtampos svyravimų ir kitų technologinių pasekmių tinklui yra nepakankamas energijos gamybos efektyvumas, didelis užimamas plotas ir didelės išlaidos [2]. Atsižvelgiant į tai, pastaraisiais metais vis daugiau dėmesio sulaukia dvipusės fotovoltinės technologijos.

Pagrindinis iššūkis optimizuojant dvipusės fotovoltinės sistemos veikimą yra tai, kad energijos gamyba iš galinės pusės yra labai jautri aplinkos veiksniams. Nors energijos generacija iš priekinės pusės yra palyginti nuspėjama remiantis saulės spinduliavimo intensyvumu, galinės pusės našumas labai priklauso nuo paviršiaus albedo – žemės paviršiaus atspindžio koeficiento. Praktikoje žemės paviršiai labai skiriasi spalva ir tekstūra – nuo tamsaus asfalto iki sniego, o tai gali padidinti energijos gamybą nuo 5 % iki daugiau nei 30 % [3]. Siekiant kuo tiksliau prognozuoti dvipusių fotovoltinių modulių galinės pusės generaciją, būtina suprasti kiekybinį ryšį tarp žemės vizualinių charakteristikų ir gaunamo energijos prieaugio.

**Darbo tikslas** – išanalizuoti pagrindo paviršiaus spalvos įtaką dvipusių fotomodulių efektyvumo rodikliams ir juos palyginti kintančiomis aplinkos sąlygomis.

### **Darbo uždaviniai:**

1. sukurti *MATLAB* programos aplinkoje tyrimui naudojamą modelį, leidžiantį keisti albedo ir atpažinti skirtingų spalvų išskiriamą atspindį (RGB–Albedo);
2. sumodeliuoti ir ištirti, kaip dažniausiai praktikoje pasitaikančios albedo reikšmės įtakoja nustatytomis ir kintančiomis sąlygomis veikiančio modelio efektyvumo charakteristikas;
3. ištirti, kaip modelyje pritaikomos atsitiktinai pasirinktų spalvų reikšmės, albedo vertę keičiant RGB–Albedo valdikliu, įtakoja nustatytomis ir kintančiomis sąlygomis veikiančio modelio efektyvumo charakteristikas;
4. išanalizuoti ir įvertinti modelyje keičiamų spalvinių parametrų ir albedo įtaką fotovoltinio modulio ir jo galinės pusės efektyvumo rodikliams.

## 1. Literatūros analizė

### 1.1. Saulės energija fotovoltiniuose moduluose

Saulės energija yra generuojama Saulės šerdyje, kurioje nuolat vyksta termobranduolinės sintezės reakcijos. Reakcijos metu 0,7 % vandenilio masės virsta spinduline energija. Saulė į erdvę išsispinduliuoja  $3,84 \cdot 10^{14}$  TW galios per sekundę. Nuo Saulės iki Žemės šviesos spinduliui reikia nukeliauti 150 milijonų kilometrų ir dėl atmosferinių ir kitų gamtinių bei kosminių veiksnių žemę pasiekia vidutiniškai apie  $1360 \text{ W/m}^2$  šviesa  $1 \text{ m}^2$  plotui [4].

Antrasis aspektas, į kurį reikia atsižvelgti, yra saulės padėties ir jos santykio su orientuota plokšte apskaičiavimas. Du pagrindiniai saulės padėties kintamieji yra saulės aukščio kampas  $\alpha_s$  ir saulės azimuto kampas  $\gamma_s$  [5]. Saulės aukščio kampas  $\alpha_s$  yra kampas tarp horizontalios plokštumos ir spindulio į saulę, o Saulės azimuto kampas  $\gamma_s$  yra spinduliuotės projekcijos kampinis poslinkis nuo šiaurės į horizontalią plokštumą.

Saulės energija yra pažabojama puslaidininkiniu principu. Saulės moduliai yra sudaryti iš mažesnių elementų – saulės celių. Pačios populiariausios saulės celės yra gaminamos iš silicio, antro dažniausiai Žemėje pasitaikančio elemento. Saulės celėje kristalinis silicis yra suspaustas tarp dviejų laidžių sluoksnių. Silicis yra atskirtas į  $p$  tipo silicį ir  $n$  tipo silicį.  $p$  tipas turi daugiau teigiamai įkrautų dalelių ir skylių, o  $n$  tipo silicis yra neigiamai įkrautas, turintis daugiau elektronų. Kartu silicis sudaro  $p$ - $n$  sandūrą.  $p$ - $n$  sandūra veikiama šviesos spindulio (fotono), turinčio pakankamai energijos išmušti elektroną, palieka skylę, išmušant elektroną iš valentinės juostos į laidumo juostą, sudarant sąlygą laisvam elektronui judėti nurodyta kryptimi. Tinkamai suformuota elektronų ir skylių srovė puslaidininkyje sukuria įtampą tarp dviejų sluoksnių – tai leidžia gauti elektros energiją iš saulės šviesos [4, 6]. Visą šį procesą perkėlus į didesnę skalę gaunamas fotovoltinis modulis.

Saulės elektrinėse pagaminamos elektros energijos kiekis priklauso nuo fotovoltinių modulių orientacijos į saulę. Didžiausias naudingumo faktorius įprastinėje saulės panelėje pasiekiamas, kai fotovoltinio modulio plokštuma su kryptimi į saulę sudaro  $90^\circ$ . Saulės elektrinių moduliams nejudant, optimaliausias kampas keičiasi, jį nusako geografinė platumas, metų laikas ir paros valanda. Norint išgauti maksimalią galią, optimalų kampą tarp modulių plokštumos ir horizonto reiktų keisti kas 1–2 savaites. Tokiu atveju saulės elektrinės efektyvumą galima padidinti nuo 5 % iki 8 % [4].

### 1.2. Temperatūros įtaka fotovoltinių modulių darbui

Temperatūra daro didelę įtaką saulės elementų efektyvumui, kuris, kylant temperatūrai, paprastai mažėja. Ši mažėjimą daugiausia lemia du pagrindiniai veiksniai. Pirma, saulės celės atvirosios grandinės įtampa  $V_{oc}$  paprastai mažėja kylant jos temperatūrai.  $V_{oc}$  reiškia didžiausią įtampą, kurią elementas gali generuoti be prijungtos apkrovos.  $V_{oc}$  mažėjimas yra susijęs su puslaidininkinės medžiagos vidinių nešiklių koncentracijos didėjimu, dėl kurio didėja elektronų ir skylių rekombinacija, o vėliau mažėja išėjimo įtampa [7]. Antra, temperatūra taip pat turi įtakos užpildymo faktoriui  $FF$  (angl. *fill factor*), rodančiam saulės elemento efektyvumą paverčiant saulės šviesą elektros energija. Aukštesnėje temperatūroje dėl padidėjusių varžos nuostolių celėje sumažėja  $FF$ , todėl sumažėja bendras efektyvumas [7, 8].

$$FF = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{P_{Max}}{U_{oc} \cdot I_{sc}}; \quad (1)$$

čia  $U_{MPP}$  – maksimalaus galios taško įtampa;  $I_{MPP}$  – maksimalaus galios taško srovė;  $V_{oc}$  – atviros grandinės įtampa;  $I_{sc}$  – trumpojo jungimo srovė.

$$Efektyvumas = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{P_{in}}; \quad (2)$$

čia  $P_{in}$  – paduodama galia (angl. *input power*).

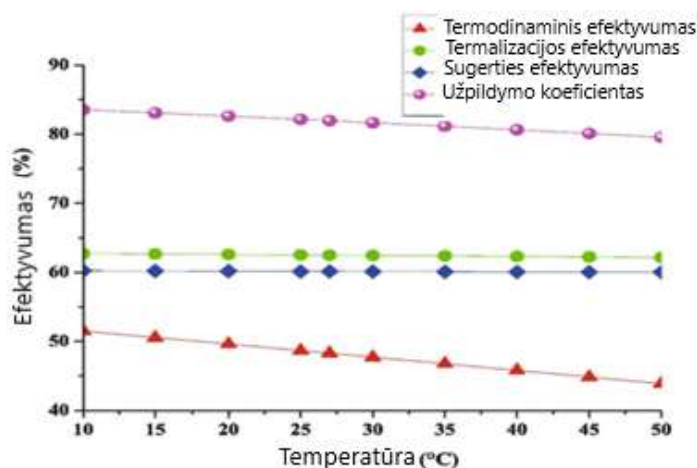
Remiantis daugelio mokslinių straipsnių, publikacijų ir mokslinių vadovėlių duomenimis, skirtingų tipų fotovoltinių celių užpildymo koeficientai  $FF$  skirtingoms saulės technologijoms gali skirtis dėl skirtingos pagaminimo technologijos ar gamintojo ypatybių, todėl apytikslės tipinės vertės vaizduojamos 1 lentelėje [9].

**1 lentelė.** Skirtingų tipų fotovoltinių celių užpildymo koeficientai

Technologija	Tipinis FF
Monokristalinis silicis	74–85 %
Polikristalinis silicis	70–80 %
Plonasluoksniai ( <i>thin-film</i> ) elementai	60–75 %

Užpildymo koeficientui  $FF$  esant žemesniam nei 60 %, gali reikšti nuostolius dėl vidaus varžos, medžiagų trūkumų ar kitų technologinių veiksnių.

Užpildymo koeficientas dažnai gali būti maišomas su naudingumo koeficientu, nes jis yra naudingumo koeficiento dedamoji. Pagrindinių šilumos veiksnių efektyvumo nuo temperatūros priklausomybių grafikas vaizduojamas (1 pav.).

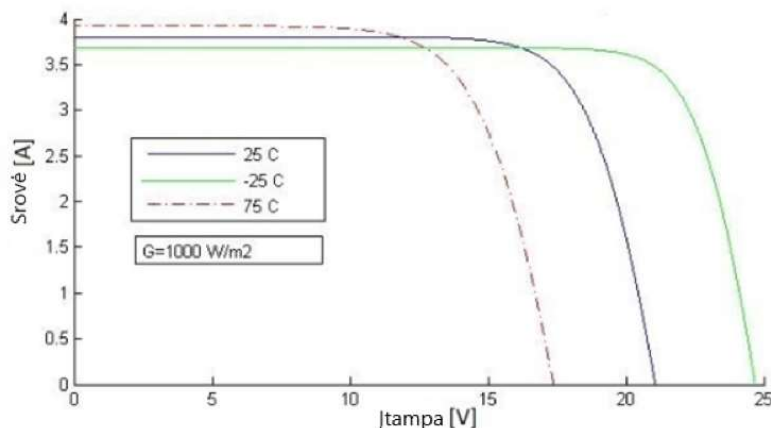


**1 pav.** Pagrindinių šilumos veiksnių efektyvumo priklausomybė nuo temperatūros [7]

Didžiausią įtaką fotovoltinio modulio efektyvumui daro terminiai nuostoliai, tai neišnaudota saulės energija ir užpildymo koeficientas  $FF$ , kuriam įtakos turi fotovoltinio modulio temperatūra. Remiantis paveikslėliu (1 pav.), termalizacijos efektyvumas ir šviesos sugėrimo efektyvumas, kuomet elektronai yra peržadinami ir vaizduoja kiek pats fotonas išspinduliuoja energijos į šilumą kinta labai mažai.

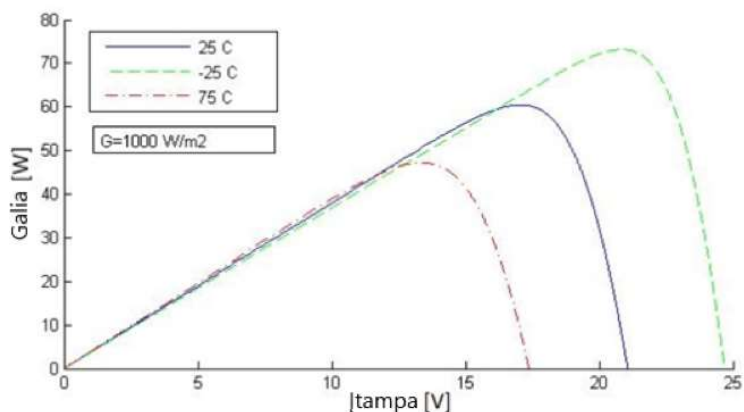
Įprastas fotovoltinis modulis į elektros energiją paverčia 6-20 % krintančios saulės spinduliuotės, priklausomai nuo saulės elementų tipo ir klimato sąlygų. Likusi krintančios saulės spinduliuotės dalis

paverčiama į šilumą, kuri gerokai padidina fotovoltinio modulio temperatūrą ir sumažina fotovoltinio modulio efektyvumą [10, 11]. Srovės priklausomybės nuo įtampos, veikiant saulės panelę tam tikra temperatūra grafikas, yra viena pagrindinių saulės elektrinių darbo charakteristikų (2 pav.).



2 pav. Fotovoltinio modulio srovės priklausomybės nuo įtampos [11]

Temperatūra nedaro didelės įtakos elektros srovei, tačiau veikia įtampą neigiamai, o P–U charakteristika veikiant saulės panelę tam tikra temperatūra parodo, kaip įtampa įtakoja maksimalų galios tašką (3 pav.).



3 pav. Fotovoltinio modulio galios priklausomybė nuo srovės kreivė [11]

Kylant temperatūrai maksimalus galios taškas krenta kartu su įtampa. Abiems charakteristikoms nustatyta apšvietos konstanta  $1000 \text{ W/m}^2$  [11]. Prie minimalios neigiamos temperatūros, šiluminiai nuostoliai tampa mažiausi, maksimali galia didžiausia ir atvirosios grandinės įtampa didžiausia. Realiomis sąlygomis, saulėtą dieną,  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  lauko temperatūra yra siekiamybė, o su naujausiomis technologijomis ir aušinimu šią temperatūrą laboratorijos sąlygomis galima dar stipriau sumažinti.

### 1.3. Dvipusiai saulės moduliai ir jų technologijos

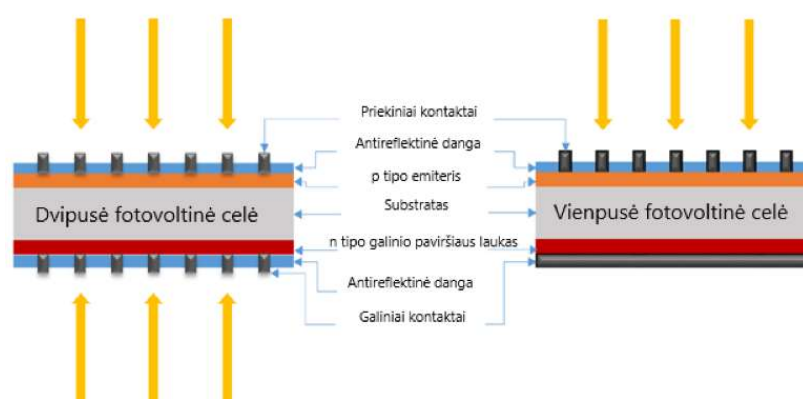
Dvipusiai fotovoltiniai moduliai yra pažangi saulės energijos konversijos technologija, leidžianti gaminti elektrą iš fotovoltinių modulių priekinės ir galinės pusės. Skirtingai nuo įprastinių vienpusių modulių, kurie sugeria saulės spindulius tik priekinėje pusėje, dvipusiai moduliai yra sukurti taip, kad sugertų papildomą spinduliavimą, atspindėtą nuo aplinkinių paviršių į galinę modulio pusę.

## Dvipusių fotovoltinių modulių veikimo principas

Dvipusės saulės celės veikimo fizikinis principas išlieka toks pat kaip ir tradicinių kristalinių silicio fotovoltinių celių. Fotonai, atsitrenkiantys į puslaidininkio medžiagą, sukuria elektronų ir skylių poras  $p-n$  jungtyje. Jungtyje esantis elektrinis laukas atskiria šiuos krūvio nešiklius, dėl to elektros srovė teka per išorinę grandinę. Tačiau didžiausias skirtumas yra tai, kad dvipusių celių struktūra leidžia fotonams absorbuotis iš abiejų elemento pusių, todėl papildoma srovė generuojama ir iš galinės pusės spinduliuotės [12].

### 1.3.1. Dvipusių fotomodulių celių struktūra

Dvipusės saulės celės paprastai naudoja metalinius tinklelius priekinėje ir galinėje pusėse, o ne ištisiniu aliuminio paviršių, kuris paprastai naudojamas vienpusėse fotovoltinės celės gale. Įprastinėse vienpusėse silicio celėse galinė pusė paprastai būna padengta, visą plotą užimančiu aliuminio paviršiumi (Al-BSF), kuris pagerina nešiklių surinkimą ir atspindėjimą, bet blokuoja spinduliuotę, patenkančią iš galinės celės pusės. Kitą vertus, dvipusėse celėse naudojamos simetriškos arba pusiau simetriškos kontaktinės struktūros, leidžiančios fotonams pasiekti aktyvią puslaidininkio sritį iš abiejų elemento pusių [13] (4 pav.).



4 pav. Dvipusės ir vienpusės fotovoltinės celės struktūra [12]

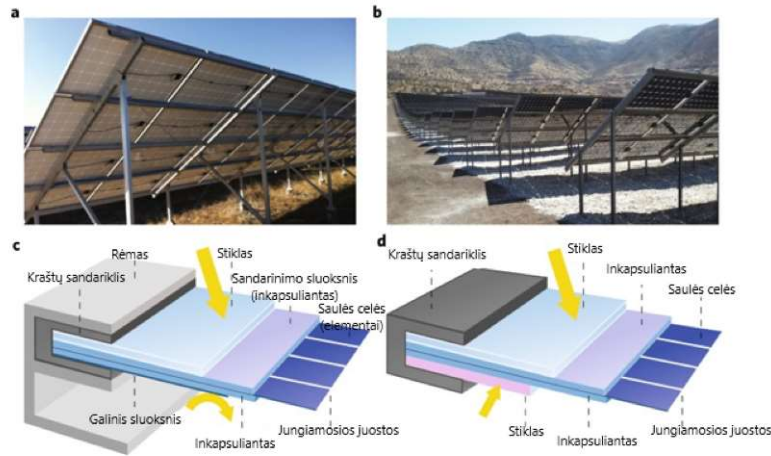
Kad būtų galima sugerti šviesą iš galinės pusės, dvipusių elementų galinė struktūra yra suprojektuota, kaip smulkus tinklelis, panašus į priekinės pusės kontaktus. Šis tinklelis surenka krūvio nešiklius palikdamas pakankamai atvirą plotą, kad į elementą galėtų patekti krintanti šviesa. Tarpai negali būti per maži, nes sumažinus metalinio tinklelio storį gali padidėti serijos varža ir sumažėti srovės surinkimo efektyvumas, todėl galinio laidžiojo tinklelio geometrija, turi būti kruopščiai optimizuota, kad būtų išlaikyta optinio ir elektrinio našumo pusiausvyra [14].

Be to, dvipusiai saulės moduliai dažnai turi skaidrius, laidžius sluoksnius arba dielektrines pasyviausias dangas, kurios pagerina šviesos pralaidumą ir sumažina optinius nuostolius. Tokie sprendiniai prisideda prie didesnio galinio paviršiaus efektyvumo ir pagerina bendrą modulio našumą, lyginant su tradiciniais vienpusiais dizainais [15].

### 1.3.2. Konstrukciniai ir konfigūraciniai sprendimai dvipusiųse fotomoduliuose

Dvipusės fotovoltinės plokštės nuo tradicinių fotovoltinių plokščių skiriasi savo savybe hermetizuoti bei savo konstrukcija. Įprastinėse vienpusėse plokštėse naudojamas polimerinis galinis sluoksnis,

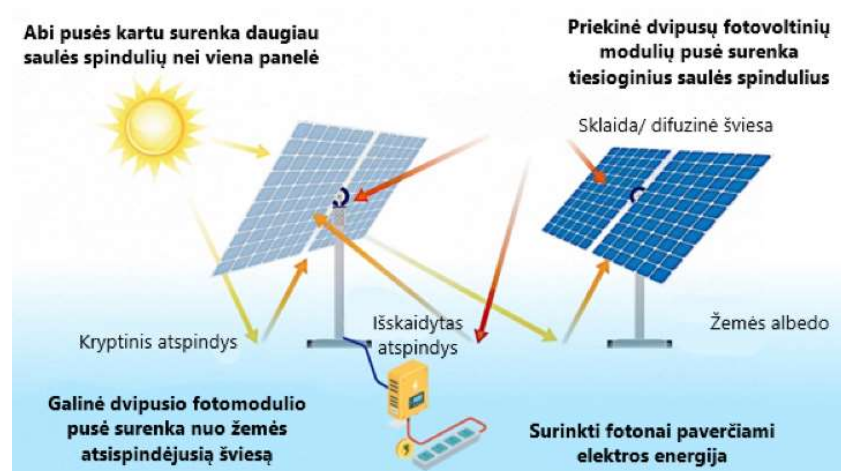
kuris blokuoja į plokštės galinę pusę patenkančią spinduliuotę. Dvipusėse plokštėse naudojamas dvigubas stiklas (stiklas-stiklas) arba skaidrus galinis sluoksnis, kad šviesa galėtų prasiskverbti į plokštės galinę pusę [16] (5 pav.).



5 pav. Dvipusio ir vienpusio fotovoltinių modulių konstrukcinė struktūra [17]

Stiklas-stiklas konfigūracija šiuo metu yra plačiausiai naudojama dvipusių modulių architektūra. Šioje konstrukcijoje saulės elementai yra įdėti tarp dviejų stiklo sluoksnių, kurie užtikrina didesnę mechaninį stiprumą, atsparumą aplinkos veiksniams ir ilgesnį tarnavimo laiką. Stiklas-stiklas moduliai taip pat pasižymi mažesniu susidėvėjimo greičiu ir didesniu atsparumu drėgmės įsiskverbimui, lyginant su įprastais moduliais [18].

Kitas svarbus dvipusio modulio konstrukcijos aspektas – montavimo konfigūracija. Siekiant maksimaliai padidinti apšvietimą iš galinės pusės, moduliai paprastai montuojami ant pakeltų montavimo konstrukcijų, tokio montavimo supaprastintą paaiškinimą galima matyti 6 paveikslėlyje.



6 pav. Dvipusių fotovoltinių modulių montavimas aukštyje [19]

Šios konstrukcijos leidžia atspindėtam spinduliavimui nuo žemės paviršiaus pasiekti modulio galinę pusę. Be to, eilių tarpas ir pasvirimo kampai yra optimizuoti taip, kad būtų sumažintas šešėlis tarp modulių eilių ir maksimaliai padidintas šviesos surinkimas iš abiejų pusių [20].

#### 1.4. Paviršiaus albedo įtaka dvipusiams fotovoltiniams moduliams

Vienas iš svarbiausių aplinkos parametru, turinčių įtakos dvipusių fotovoltinių modulių veikimui, yra aplinkinio paviršiaus atspindžio koeficientas. Skirtingai nuo įprastų vienpusių modulių, kurie konvertuoja tik tiesioginį ir išsklaidytą spinduliavimą, kuri gauna priekinis paviršius, dvipusiai fotovoltiniai moduliai gali generuoti elektrą iš abiejų plokštės pusių. Dėl šios savybės spinduliavimas, atspindėtas nuo žemės ar aplinkinių paviršių, tampa svarbiu papildomu energijos šaltiniu. Atspindėto spinduliavimo kiekis pirmiausia priklauso nuo paviršiaus atspindžio koeficiento, žinomo kaip albedo.

##### 1.4.1. Tipinės paviršių albedo reikšmės

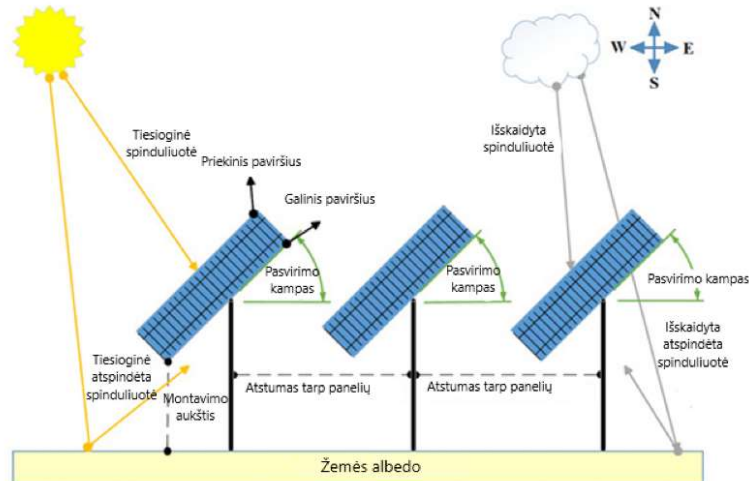
Albedo apibrėžiamas, kaip paviršiaus atspindėtos saulės spinduliuotės ir paviršiaus sugeriamos spinduliuotės santykis. Tai matavimo vienetų neturintis parametras, kurio vertė svyruoja nuo 0 iki 1, kur 0 reiškia visiškai sugeriantį paviršių, o 1 – puikiai atspindintį paviršių. Praktikoje daugumos natūralių ir dirbtinių paviršių albedo vertės svyruoja nuo 0,05 iki 0,9, priklausomai nuo jų medžiagos sudėties, tekstūros ir spalvos. Pavyzdžiui, tamsių paviršių, tokių kaip asfaltas, albedo vertės paprastai yra nuo 0,05 iki 0,10, o šviesesnių paviršių, tokių kaip betonai, vertės gali siekti maždaug 0,30–0,40. Sniegu padengti paviršiai pasižymi itin aukštomis albedo vertėmis, dažnai viršijančiomis 0,70, o tai žymiai padidina atspindėtą spinduliavimą, kuri gauna dvipusių fotovoltinių modulių galinę pusę [3].

Remiantis Tarptautinės Energijos Agentūros (IEA) publikacija „*Bifacial Photovoltaic Modules and Systems: Experience and Results from International Research and Pilot Applications 2021*“ pateikiama dažiausiai praktikoje sutinkamų paviršių albedo santykių lentelė [3].

2 lentelė. Skirtingų paviršių albedo pokytis [3]

Paviršiaus pavadinimas	Albedo
Žolė	0,15–0,26
Sniegas	0,55–0,98
Juoda dirva	0,08–0,13
Molis	0,16–0,23
Smėlis	0,21–0,6
Asfalto danga (nauja)	0,09
Asfalto danga (susidėvėjusi)	0,18

Albedo įtaka bendram dvipusio modulio gaunamam spinduliavimo intensyvumui gali būti labai didelė. Keletas eksperimentinių ir modeliavimo tyrimų parodė, kad nuo žemės atspindėtas spinduliavimo intensyvumas gali padidinti bendrą dvipusių sistemų energijos išėigą 5–30 %, palyginti su vienpusiais moduliais, sumontuotais panašiomis sąlygomis. Šio padidėjimo dydis labai priklauso nuo montavimo būdo, paviršiaus atspindžio koeficiento, montavimo aukščio ir atstumų tarp modulių eilių. 7 paveiksle pavaizduotas dvipusių fotomodulių masyvo paaiškinamasis brėžinys [3].



7 pav. Žemės albedo dedamosios ir montavimas dvipusių fotovoltinių modulių masyvuose [21]

Didesnis montavimo aukštis paprastai leidžia didesnei atspindėtos spinduliuotės daliai pasiekti modulio galinį paviršius, taip pagerinant dvipusio modulio našumą.

Be natūralių žemės paviršių, dvipusėse fotovoltinėse instaliacijose vis dažniau naudojamos dirbtinės atspindžios medžiagos, siekiant sąmoningai padidinti galinio paviršiaus spinduliavimą. Pavyzdžiui: žvyras, atspindinčios membranos ir specialiai suprojektuotos dangos, dengiamos ant žemės paviršių. Šios medžiagos gali žymiai padidinti sistemos našumą, padidindamos instaliacijos vietos efektyvų albedo [22]. Dideliuose saulės energijos parkuose buvo įrodyta, kad padidinus žemės atspindžio koeficientą pagerėja energijos gamyba, o papildomos investicijos, palyginti su kitomis sistemos modifikacijomis, yra minimalios [23].

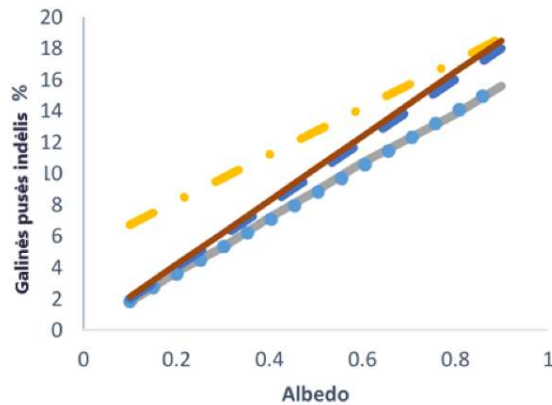
### 1.5. Dvopusės generacijos indėlis

Dvopusių fotovoltinių modulių našumo didinimas paprastai vertinamas naudojant parametą, vadinamą dvopusės generacijos prieaugiu arba galinės pusės indėliu. Dvopusės generacijos prieaugis rodo santykinę energijos gamybos padidėjimą pridėjus galinės generacijos indėlį, lyginant su lygiaverte vienvuse generacija, veikiant identiškais aplinkos sąlygomis [24]. Paprastai jis apibrėžiamas kaip dvopusės generacijos išėjimo ir vienvusės generacijos išėjimo santykis.

$$BG = \frac{E_{dvipusis} - E_{vienpusis}}{E_{vienpusis}}; \quad (3)$$

čia  $E_{dvipusis}$  – dvipusio fotovoltinio modulio sugeneruota energija;  $E_{vienpusis}$  – vienvusio fotomodulio sugeneruota energija.

Mokslininkai nagrinėjant dvopusės generacijos prieaugio priklausomybę nuo paviršiaus albedo nustatė, kad tipinėmis aplinkos sąlygomis, dvopusės generacijos prieaugis, didinant albedo vertę didėja beveik tiesiškai [25] (8 pav.).



**8 pav.** Galinės pusės indėlio *BG* priklausomybė nuo albedo [25]

Paviršiaus albedo didinant nuo 0,2 iki 0,5, bendras sistemos energijos našumas gali padidėti maždaug 10–15 %. Šis ryšys pabrėžia tikslaus žemės atspindžio modeliavimo svarbą prognozuojant dvipusių fotovoltinių sistemų našumą [24, 25].

Dėl šių priklausomybių dvipusės generacijos fotovoltinės sistemos reikalauja sudėtingesnių veikimo modelių nei įprastos vienpusės sistemos. Todėl norint tiksliai prognozuoti dvipusio indėlio dydį, reikia vienu metu įvertinti optinius, geometrinius ir elektrinius veiksnius.

## 1.6. Komercinių dvipusių fotomodulių testavimas

Komerciniai fotovoltiniai moduliai vertinami naudojant standartizuotas bandymo procedūras, siekiant užtikrinti patikimą jų elektrinio veikimo palyginimą. Šios procedūros apibrėžia aplinkos sąlygas, kuriomis matuojamos modulio srovės ir įtampos charakteristikos bei vardinė galia. Nors įprasti fotovoltiniai moduliai charakterizuojami pagal standartines bandymo sąlygas (toliau – STC), dvipusiams moduliams reikalingi papildomi metodai, nes jie gali generuoti elektrą tiek iš priekinės, tiek iš galinės pusės.

### 1.6.1. Standartinės bandymo sąlygos

Standartinės bandymo sąlygos – tai visuotinai pripažintas etalonas, naudojamas fotovoltinių įrenginių veikimui įvertinti ir objektyviai palyginti skirtingas PV technologijas, įskaitant monokristalines, polikristalines ir plonasluoksnes fotovoltines celes kontroliuojamomis bei atkartojamomis sąlygomis. STC sąlygomis nustatomos konkrečios konstantos: 25 °C elementų temperatūra, 1000 W/m<sup>2</sup> apšvietos intensyvumas, oro masės koeficientas *AM* 1,5 [26]. Šios sąlygos skirtos užtikrinti laboratorinių matavimų nuoseklumą.

Pagal tarptautiniu mastu pripažintą praktiką, sukurtą Tarptautinės Elektrotechnikos Komisijos, dvipusių fotomodulių STC matavimai paprastai remiasi prielaida, kad apšvita yra 1000 W/m<sup>2</sup> priekinėje pusėje ir 0 W/m<sup>2</sup> galinėje pusėje, o tai reiškia, kad deklaruota STC galia atitinka tik priekinės pusės apšvietimą. Šis metodas užtikrina atgalinį suderinamumą su vienpusių modulių charakteristikomis ir leidžia sąžiningai palyginti skirtingas technologijas duomenų lapuose, konkursuose ir sertifikavimo procesuose [27]. Tačiau papildomi parametrai, tokie kaip dvipusiškumo koeficientas, nustatomi lyginant priekinę ir galinę pusę, jas matuojant atskirai, paprastai

kontroliuojamomis laboratorinėmis sąlygomis su vienodu ir aiškiai apibrėžtu galiniu spinduliavimu [28].

Kadangi realiose instaliacijose galinis spinduliavimas labai priklauso nuo konkrečios vietos veiksnių, tokių kaip žemės albedo, montavimo aukštis, pasvirimo kampas ir masyvo tarpai, jo negalima standartizuoti taip pat, kaip priekinio spinduliavimo [26].

### **1.6.2. Dvipusis vardinis spinduliavimo intensyvumas**

Dvipusis vardinis spinduliavimo intensyvumo standartas (toliau – BNPI) buvo įvestas siekiant įveikti tik priekinės pusės STC apribojimus, kai jie taikomi dvipusiams fotovoltiniams moduliams, kurie kitaip neatsižvelgia į sistemingą galinės pusės spinduliavimo intensyvumo įtaką. BNPI apibrėžia fiksuotas sąlygas, pagal kurias daroma prielaida, kad abipusio modulio priekinė ir galinė pusės apšviečiamos vienu metu, paprastai  $1000 \text{ W/m}^2$  priekinėje pusėje ir  $135 \text{ W/m}^2$  galinėje pusėje, o tai atitinka maždaug 13,5 % galinės pusės spinduliavimo. BNPI sąlygomis nurodyta galia atspindi bendrą abiejų modulio pusių elektrinį indėlį, o ne tik priekinės pusės našumą [3, 26, 29]. Pasirinkta galinės pusės spinduliavimo vertė nėra skirta atspindėti universalias eksploataavimo sąlygas, o yra vidutinis ir konservatyvus atskaitos taškas, leidžiantis gauti atkartojamus bandymo rezultatus, išvengiant optimistinių prielaidų apie vietos albedo [30]. Todėl BNPI taikymas užtikrina standartizuotą kompromisą tarp realizmo ir palyginamumo, padeda gerinti technologijų vertinimą, našumo modeliavimą, neįtraukiant vietos specifinių veiksnių.

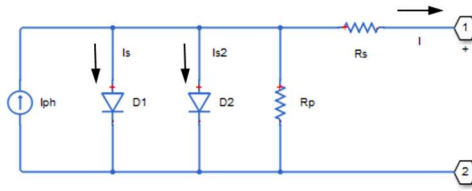
### **1.7. Tyrimų spragos ir aktualumas**

Apžvelgti moksliniai tyrimai parodė, kad paviršiai su didesniais albedo koeficientais, tokie kaip sniegas, baltas smėlis ar betonas, gali žymiai padidinti dvipusių fotovoltinių modulių generaciją, padidindami apšvietą į galinę modulio pusę. Todėl daugelis mokslinių tyrimų yra paremti įvairių paviršių tipų įtakos dvipusių fotomodulių veikimui principu. Tačiau dauguma šių tyrimų paviršius apibūdina tik pagal bendrą albedo koeficientą, neatlikdami išsamios paviršiaus spalvos įtakos moduliui analizės, kuri gali turėti įtakos atspindžiui į galinę fotovoltinio modulio pusę ir paveikti visos panelės energetinį efektyvumą.

## 2. Metodologija

### 2.1. Dviejų diodų schemos panaudojimas

Modelyje naudojama *Simscape Electrical* dviejų diodų schema fotovoltiniam moduliui matematiškai aprašyti (9 pav.).



9 pav. Fotovoltinė schema su dviem diodais [31]

Vieno diodo modelis yra plačiai naudojamas moksliniuose darbuose dėl savo paprastumo. Pasirinktas dviejų diodų modelis, nepaisant ilgesnio modeliavimo ir sudėtingesnių skaičiavimų, užtikrina didesnę tikslumą. Dviejų diodų saulės panelės srovė apskaičiuojama taip:

$$I = I_{ph} - I_{s1} \cdot \left[ \left( e^{\frac{(V+I \cdot R_s)}{(N_1 \cdot V_t)}} - 1 \right) \right] - I_{s2} \cdot \left[ \left( e^{\frac{(V+I \cdot R_s)}{(N_2 \cdot V_t)}} - 1 \right) \right] - \frac{(V + I \cdot R_s)}{R_p}; \quad (4)$$

čia  $I_{ph}$  – fotosrovė;  $I_{s1}$  – pirmojo diodo įsisotinimo srovė;  $I_{s2}$  – antrojo diodo įsisotinimo srovė;  $R_p$  – šunto varža;  $R_s$  – vidinė varža;  $N$  – idealumo koeficientas;

$V_T$  – terminė įtampa,  $\frac{kT}{q}$ ;

kur  $q$  – elektrono krūvis;  $n$  – diodo idealumo koeficientas;  $k$  – Bolcmano konstanta;  $T$  –  $p$ - $n$  sandūros absoliuti temperatūra. Daugeliu atvejų šiai lygčiai supaprastinti naudojamas terminės įtampos apibrėžimas [32].

#### Fotosrovės priklausomybė nuo apšviestumo

Vertinant fotosrovės priklausomybę nuo apšviestumo įvertinama, jog dvipusis saulės modulis šviesos spindulius gali sugerti iš dviejų pusių:

$$I_{ph} = \frac{G_{eff}}{G_{STC}} \cdot [I_{sc,STC} + K_i \cdot (T_{cell} - T_{ref})]; \quad (5)$$

$$G_{eff} = G_{front} + G_{rear} \cdot \varphi; \quad (6)$$

čia  $G_{eff}$  – efektinė apšvieta;  $G_{front}$  – priekinės pusės apšvieta;  $G_{rear}$  – galinės pusės apšvieta;  $\varphi$  – dvipusiškumo koeficientas;  $I_{sc}$  – trumpojo jungimo srovė;  $K_i$  – srovės temperatūrinis koeficientas;  $T_{cell}$  – celės temperatūra;  $T_{ref}$  – temperatūros bazinė reikšmė 25 °C.

Efektinis arba suminis apšviestumas nusakomas, kaip priekinės ir galinės pusės apšviestumo suma su prielaida, jog galinė pusė turi dvipusiškumo koeficientą, kuris nusako kiek galinė pusė yra netobula lyginant su priekine.

##### 2.1.1. Modulio galinės pusės apšvietos išskaidymo vertinimas

Norint modelį padaryti kuo tikslesnį, galinės pusės apšvieta yra skaidoma, įvertinant žemės matomumo koeficientą ir dangaus matomumo koeficientą.

Žemės matomumo koeficientas nurodo kokią dalį žemės atspindžio sugeria modulio galinė pusė ir įvertina aukščio ir pasvirimo kampo faktorius. Žemės matomumo koeficientas apskaičiuojamas naudojantis tokia formule:

$$GVF = \left( \frac{h}{h + 0.5} \right) \cdot \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right); \quad (7)$$

čia  $GVF$  – žemės matomumo koeficientas;  $h$  – modulio aukštis virš žemės;  $\beta$  – panelės pasvirimo kampas.

Dangaus matomumo koeficientas aprašomas remiantis izotropinio dangaus modeliavimu, parodančiu kiek dangaus skliauto mato galinė modulio pusė:

$$SVF = \frac{1 - \cos \beta}{2}; \quad (8)$$

čia  $SVF$  – dangaus matomumo koeficientas.

Skirtingi matomumo koeficientai, dėl montavimo ypatumų įveda pakraipas apšvietai ir leidžia modeliui matematiškai apskaičiuoti, kokią dalį atspindėjusios spinduliuotės realiai sugauna modulio galinė pusė. Išvedama suminės galinės pusės apšvietos formulė:

$$G_{rear\_suminė} = (G_h \cdot \alpha \cdot GVF) + (G_h \cdot 0.15 \cdot SVF); \quad (9)$$

čia  $G_h$  – suminė horizontali apšvietai;  $\alpha$  – albedo.

Šie matomumo koeficientai leidžia tiksliau apskaičiuoti galinės pusės apšvietumą, įvertinant žiemos metu prailgėjusių šviesos spindulių krentančią šviesą, kuri pasiekia tik galinę panelės pusę bei įvertina ant žemės nuo panelės krentantį šešėlį ir albedo įtaką.

## 2.2. Dvipusiškumo koeficientas ir jo įtaka modulio galinei pusei

Nors esant dideliame albedo, galinė apšvietai savo dydžiu gali būti panaši į priekinę, galinės pusės elektrinis atsakas paprastai yra mažesnis. Ši asimetrija, kuri matoma ir puslaidininkinėje struktūroje, vadinama dvipusiškumo koeficientu, apibrėžiamu, kaip galinės pusės srovės ir priekinės pusės srovės santykis, esant vienodam apšvietos stipriui.

Efektinė galinės pusės apšvietai *Simulink* modeliuose išreiškiama per papildomos dedamosios funkciją, kuri aprašoma taip:

$$G_{rear\_eff} = \eta_{dvipusiškumo} \cdot G_{rear\_suminė}; \quad (10)$$

Ši sąlyga atsižvelgia į optinius nuostolius dėl galinio kapsuliavimo, metalizavimo ir struktūrinės asimetrijos celių konstrukcijoje.

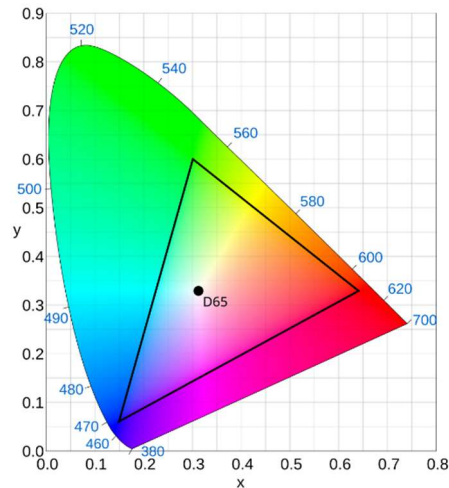
## 2.3. Paviršiaus albedo sulyginimas RGB spalvų skalei

Paviršiaus albedo, apibrėžiamas, kaip atspindėtos ir krintančios spinduliuotės santykis tam tikrame spektriniame diapazone. Bendra forma albedo yra spektrinis dydis, kuriam reikalingi bangos ilgio skiriamieji atspindžio duomenys. Tačiau praktikoje tokie duomenys retai prieinami, ypač apie savavališkus paviršius.

Siekiant išspręsti šį apribojimą, pagrindo paviršiaus albedo apytiksliai apskaičiuojamas naudojant RGB spalvų reikšmes, darant prielaidą, jog paviršius gali būti LED ekranas:

$$R_n = \frac{R}{255}, G_n = \frac{G}{255}, B_n = \frac{B}{255}; \quad (11)$$

Raudonos, žalios ir mėlynos paviršiaus spalvos dedamosios vertinamos pagal Rec. 709 standartą, vizualizacija pavaizduota 10 paveikslėlyje.



10 pav. Rec. 709 spalvų erdvė XY plokštumoje [33]

Tada, efektyvus albedo dydis apytiksliai lygus:

$$\alpha = 0.2989R_n + 0.5870G_n + 0.114B_n; \quad (12)$$

Ši formulė pagrįsta ITU-R BT.709 skaistumo apibrėžimu, kuris atspindi svertinį matomo atspindžio integravimą. Nors RGB vienareikšmiškai neapibrėžia spektrinio atspindžio, tačiau daugelio natūralių ir dirbtinių paviršių skaistis stipriai koreliuoja su plokštumos atspindžio koeficientu.

Šio palyginimo tikslas nėra atkurti tikslų spektrinį albedo, o pateikti nuoseklų skaliarinį įvertį, kuris leistų kontroliuojamai palyginti skirtingas paviršiaus spalvas esant vienodoms ir kintančioms apšvietimo sąlygoms.

#### 2.4. Modelio lygio nustatymas

Dažniausiai mokslinėje literatūroje galima sutikti dviejų lygių modelius – celės arba modulio. Vieno komercinio fotovoltinio modulio schemoje atskiros celės yra sujungiamos nuosekliai. Todėl modulio įtampa skaičiuojama taip:

$$V_{modulio} = N_s \cdot V_{celės}; \quad (13)$$

čia  $N_s$  yra nuosekliai sujungtų elementų skaičius.

#### 2.5. Maksimalaus galios taško sekimas (MPPT)

Kintant apšvietimo sąlygoms, darbinis taškas nuolat kinta, todėl modeliuose yra reikalingas MPPT algoritmas [34]. Dvipusiuose moduluose MPPT tampa dar svarbesnis, nes  $G_{eff}$  gali viršyti standartinius  $1000 \text{ W/m}^2$ . Padidėjus fotosrovei  $I_{ph}$ , I–U kreivė pakyla į viršų, o tai reiškia, kad optimali

įtampa šiek tiek pasislenka. Be tikslaus sekimo, papildoma galinės pusės apšvieta nebūtų pilnai paversta elektros energija, o dalis jos virstų nuostoliais pačiame modulyje.

Kadangi tiksliai susimuliuoti dvipusę saulės panelę reikia kelių tarpusavyje sujungtų sistemų, triukšmo ir stebėjimo (angl. *Pertrub and observe*) algoritmas matuoja ir palaiko vienodą, tačiau kintančią įtampą visoje panelėje.

## 2.6. Temperatūros įvertinimas

Teorijoje darbinės temperatūros nustatymui dažnai naudojama formulė:

$$T_c = T_{amb} + \left( \frac{NOCT - 20}{800} \right) \cdot G_{eff}; \quad (14)$$

čia *NOCT* – temperatūra, kuria modulis pasiekia apšvietai esant  $800 \text{ W/m}^2$  ir aplinkos temperatūrai esant  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Tačiau simuliuojant sudėtingesnius modelius darbinės temperatūros formulė modifikuojama pagal modelyje nustatytus kintamuosius ir išpildymą:

$$T_c = T_{amb} + \frac{G_{front} + G_{rear\_eff}}{800} \cdot (NOCT - 20); \quad (15)$$

Ši formulė transformuojama dėl išskaidytos galinės spinduliuotės.

### 3. Dvpusio fotovoltinio modulio kintančiomis sąlygomis su albedo valdymu modeliavimas

Šiame darbe sukurtas saulės panelės lygmens, dvipusio fotovoltinio modulio modelis, įgyvendintas *MATLAB – Simulink* bei susietas su *Simscape Electrical* aplinka. Modelio tikslas – kiekybiškai įvertinti, kaip žemės ar pagrindo paviršiaus spalva per atspindžio koeficientą albedo, kuris matematiškai transformuotas iš *RGB* spalvų spektro, daro įtaką dvipusio saulės modulio galinės pusės, ir atitinkamai, viso dvipusio fotovoltinio modulio efektyvumo charakteristikoms.

#### 3.1. Modeliavimo įrankiai

Modelis sukurtas naudojant *MATLAB R2025b* programinę įrangą ir jos priedus:

##### *Simulink*

*Simulink* naudojamas signalų apdorojimui ir algebriniams skaičiavimams (galios skaičiavimui), I–U ir P–U charakteristikų vizualizavimui.

##### *Simscape Electrical*

*Simscape Electrical* naudojamas fizinių fotovoltinių elementų implementavimui, srovės ir įtampos matavimams, netiesinių diferencialinių algebrinių lygčių (DAE) sprendimui.

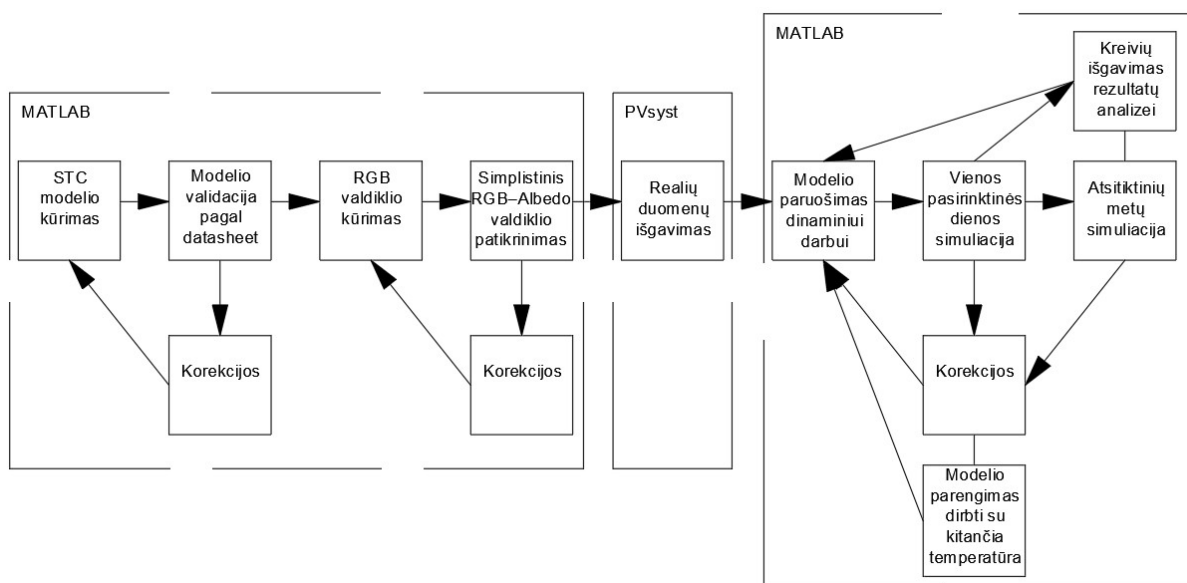
##### *PVsyst*

*PVsyst* naudojamas realių duomenų išgavimui, duomenų eksportavimui iš *PVsyst* ir importavimui į *MATLAB*

#### 3.2. Modelyje naudojamų elementų paaiškinimai ir modeliavimo seka

Kadangi modeliavimas turi kelis etapus, šiame poskyryje kategorizuojami, aprašomi ir paaiškinami tam tikri modelyje iš bibliotekų panaudojami elementai bei modelio loginė seka.

Modelio parengimo sekos principinė schema pateikta 11 paveikslėlyje.


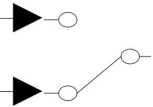
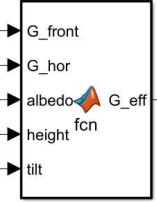
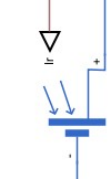
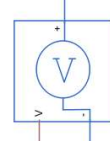
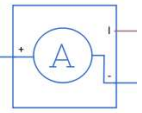
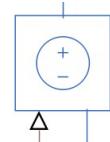
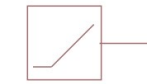
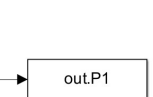


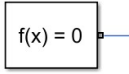
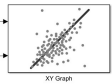

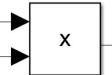
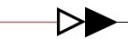

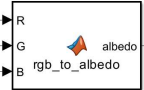

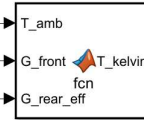
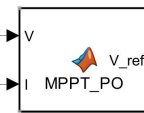
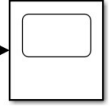
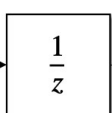
11 pav. Modelio parengimo sekos principinė schema

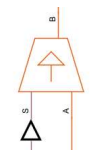
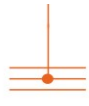
Šios principinės schemos tikslas – parodyti modeliavimo etapus užtikrinant modelio atkuriamumą.

Modeliavimui naudojami įvairių *MATLAB* bibliotekų elementai, kurie aprašomi 3 lentelėje.

**3 lentelė.** Modelyje panaudoti MATLAB bibliotekų elementai ir jų paaiškinimai

Elemento pavadinimas angl.	Elemento piktograma	Elemento pavadinimas	Bibliotekos pavadinimas	Elemento reikšmė
Validacijai naudojamo modelio etapo elementų aprašas				
Constant		Konstanta	Simulink / Sources	Generuoja nekintamą signalą, kuris tarnauja, kaip atskaitos taškas, nustatymas (angl. setpoint) arba fizikinė konstanta.
Switch		Perjungiklis	Simulink / Signal Routing	Veikia, kaip loginis mazgas, kuris pagal valdymo signalą nukreipia duomenis iš vieno šaltinio į kitą (atitinka if-else logiką programavime).
MATLAB Function		MATLAB funkcija	Simulink / User-Defined Functions	Leidžia į Simulink aplinką įtraukti tekstinį MATLAB kodą sudėtingoms matematinėms operacijoms, kurių neįmanoma atlikti standartiniais blokais.
PV Array		Saulės modulių masyvas	Simscape/Electrical / Specialized Power Systems	Matematinis modelis, skaičiuojantis srovės ir įtampos priklausomybę pagal fotovoltinio elemento lygtį, įvertinant saulės apšvietą ir temperatūrą.
Voltage Measurement		Voltmetras	Simscape/Electrical / Specialized Power Systems	Idealus voltmetras, kuris konvertuoja potencialų skirtumą tarp dviejų mazgų į Simulink duomenų signalą tolimesniam apdorojimui.
Current Measurement		Ampermetras	Simscape/Electrical / Specialized Power Systems	Idealus ampermetras, kuris matuoja srovės srautą per šaką ir paverčia jį matematine reikšme.
Controlled Voltage Source		Valdomas įtampos šaltinis	Simscape/Electrical / Specialized Power Systems	Aktyvus elektrinis elementas, kurio gnybtų įtampa tiksliai atitinka paduodamą valdymo signalą (naudojamas maitinimui arba apkrovos imitacijai).
Ramp		Tiesiškai kintantis signalas	Simulink / Sources	Generuoja tiesiškai didėjantį arba mažėjantį signalą laiko atžvilgiu, naudojamas dinaminėms sistemoms testuoti visame jų veikimo diapazone.
To/From Workspace		Siuntimas į/iš darbalaukio	Simulink / Sinks	Duomenų kaupiklis, kuris perkelia simuliacijos metu sugeneruotus masyvus į/iš MATLAB atminties vėlesniam grafikų braižymui ar statistikai.

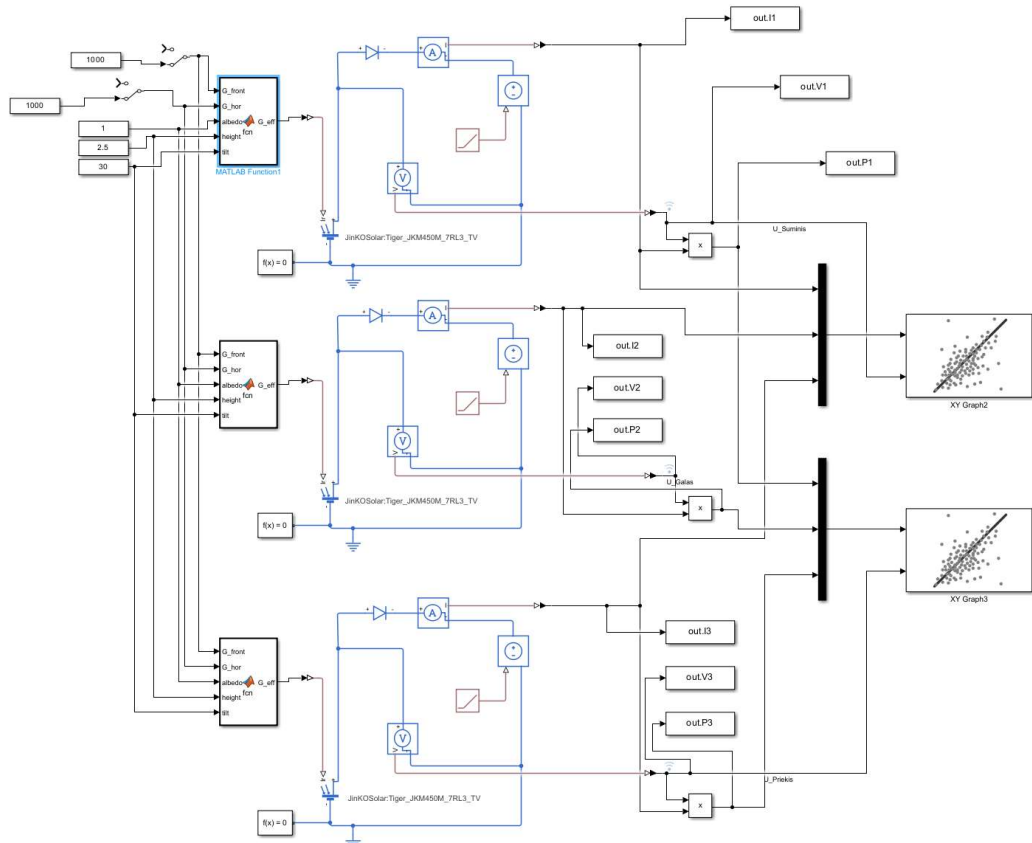
Elemento pavadinimas angl.	Elemento piktograma	Elemento pavadinimas	Bibliotekos pavadinimas	Elemento reikšmė
Solver Configurator		Skaiciuotuvo konfigūраторius	Utilities	Būtinasis blokas bet kuriai Simscape grandinei – jis apibrėžia skaitmeninius algoritmus, kuriais bus sprendžiamos diferencialinės lygtys.
XY Graph		XY grafikas	Simulink / Sinks	Braižo I–U ir P–U charakteristikas.
Mux		Signalų tankintuvas	Simulink / Signal Routing	Sugrupuoja kelis atskirus signalus į vieną „vektorių“, kad modelis vizualiai būtų tvarkingesnis ir būtų galima perduoti kelis duomenis vienu laidu.
Product		Daugybės blokas	Simulink / Math Operations	Atlieka elementarią arba matricinę dviejų ar daugiau signalų daugybą.
PS-Simulink Converter		PS-Simulink keitiklis	Simscape / Utilities	Konvertuoja fizikinį Simscape signalą į paprastą matematinį Simulink signalą.
Simulink-PS Converter		Simulink-PS keitiklis	Simscape / Utilities	Paverčia matematinius duomenis į fizikinį dydį, turintį matavimo vienetus.
RGB-Albedo išpildymui papildomai naudojamų elementų aprašas				
MATLAB Function (rgb_to_albedo)		RGB konvertavimo funkcija	Simulink / User-Defined Functions	Vykdo matematinį algoritmą, kuris paverčia RGB vertes į vieną albedo koeficientą ( $\alpha$ ).
Slider		Slankiklis	Simulink / Dashboard	Leidžia vartotojui realiu laiku keisti RGB–Albedo spalvų komponentus (0–255).
Transformuotos modelio schemas dinamiškam darbui elementų aprašas				
MATLAB Function (T_kelvin)		Temperatūros skaičiavimo funkcija	Simulink / User-Defined Functions	Apskaičiuoja saulės celės temperatūrą ( $T_c$ ) pagal aplinkos temperatūrą ir apšvietą, ir konvertuoja ją į Kelvinus.
MATLAB Function (MPPT_PO)		Maksimalios galios taško sekiklis (P&O)	Simulink / User-Defined Functions	Algoritmas Perturb and Observe. Jis nuolat ieško tokios įtampos, prie kurios saulės modulis generuoja didžiausią galią, reaguodamas į besikeičiančią apšvietą.
Scope		Oscilografas	Simulink / Sinks	Vizualizavimo įrankis, rodantis kintančius signalus (srovę, įtampą, galią) laiko ašyje.
Unit Delay		Vienetinio takto vėlinimas	Simulink / Discrete	Būtinasis diskretinio valdymo elementas. Jis išsaugo praėjusio laiko momento vertę.

Elemento pavadinimas angl.	Elemento piktograma	Elemento pavadinimas	Bibliotekos pavadinimas	Elemento reikšmė
Controlled Temperature Source		Valdomas temperatūros šaltinis	Simscape / Thermal/Sources	Veikia, kaip idealus šilumos šaltinis, kuris palaiko temperatūrą pagal įėjimo signalą.
Thermal Reference		Terminis atskaitos taškas	Simscape / Thermal / Elements	Tai „šiluminė žemė“. Ji simbolizuoja absoliutų nulį arba aplinką, į kurią nurodomi visi temperatūrų skirtumai. Be jos Simscape negali išspręsti šiluminių lygčių.

Šie elementai naudojami viso modeliavimo metu, vienus keičiant kitais priklausomai nuo modeliavimo etapo.

### 3.3. Modelio validacija ir palyginimas su fotomodulio technine specifikacija STC sąlygomis

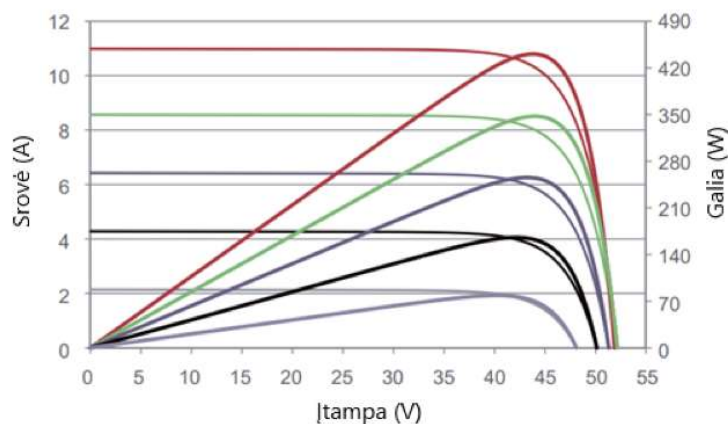
Struktūrinė principinė tiriamojo darbo schema sukurta *Matlab – Simulink* aplinkoje, naudojantis *Simscape* ir *Simscape Electrical* bibliotekomis pavaizduota 12 paveiksle. Sukurtas dvipusio fotovoltinio modulio modelis leidžia tirti, kaip skirtingi optiniai ir geometriniai veiksniai veikia modulio skirtingų pusių bei bendras panelės elektrines charakteristikas STC sąlygomis.



12 pav. STC sąlygų tyrimo modelio principinė struktūrinė schema

Atliekant modeliavimą STC sąlygomis, saulės panelės bloke nustatoma standartinė testavimo temperatūra, kuri yra 25 °C bei priekinės pusės apšvietos vertė 1000 W/m<sup>2</sup>.

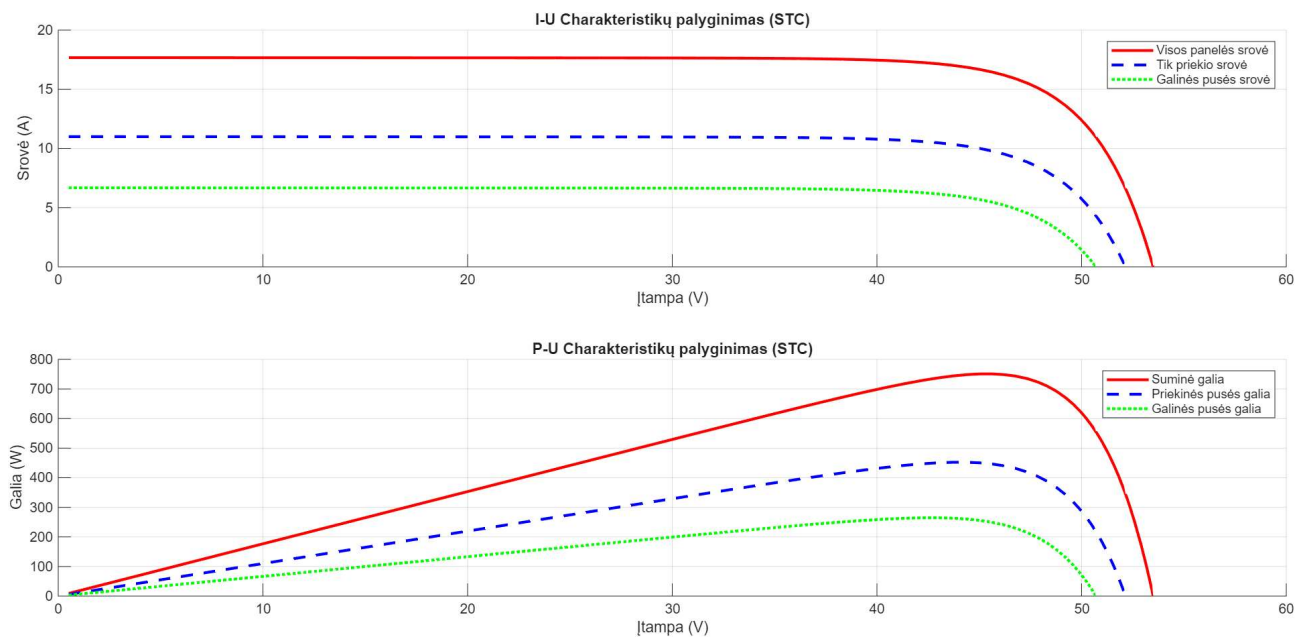
Įrodyti modelio validumą galima atkuriant konkretaus pasirinkto saulės modulio specifikacijų lape nurodytas P-U ir I-U kreives. Pasirinktas dvipusis (angl. *bifacial*) 8 keičiamų parametrų saulės modulis *Jinko Solar Tiger JKM450M 7RL3 TV* iš *Simscape Electrical* bibliotekos. Šio saulės modulio I-U ir P-U charakteristikos pateiktos 13 paveikslėlyje.



**13 pav.** Jinko Solar Tiger JKM450M 7RL3 TV I-U ir P-U charakteristikos [35]

Iš specifikacijų lapo grafiko, dėl STC reikalavimų, galime matyti tik priekinės pusės charakteristikas, tačiau remiantis anksčiau apžvelgta literatūra, galinės pusės prieaugis priklausomai nuo testavimo sąlygų gali siekti iki 80 % priekinės pusės vertės. Tokia vertė realybėje yra optimistiška ir įgyvendinama tik laboratorijos sąlygomis, tačiau gali įrodyti modelio validumą prie STC sąlygų.

Pasirinktojo fotovoltinio modulio dvipusiškumo koeficientas yra 0,7, kas reiškia, jog tobulomis sąlygomis turėtume išgauti gamintojo deklaruotą  $70 \pm 5$  % prieaugį prie priekinės pusės generacijos, albedo vertei esant vienetui. Modeliavimo I-U ir P-U kreivės pavaizduotos 14 paveikslėlyje.



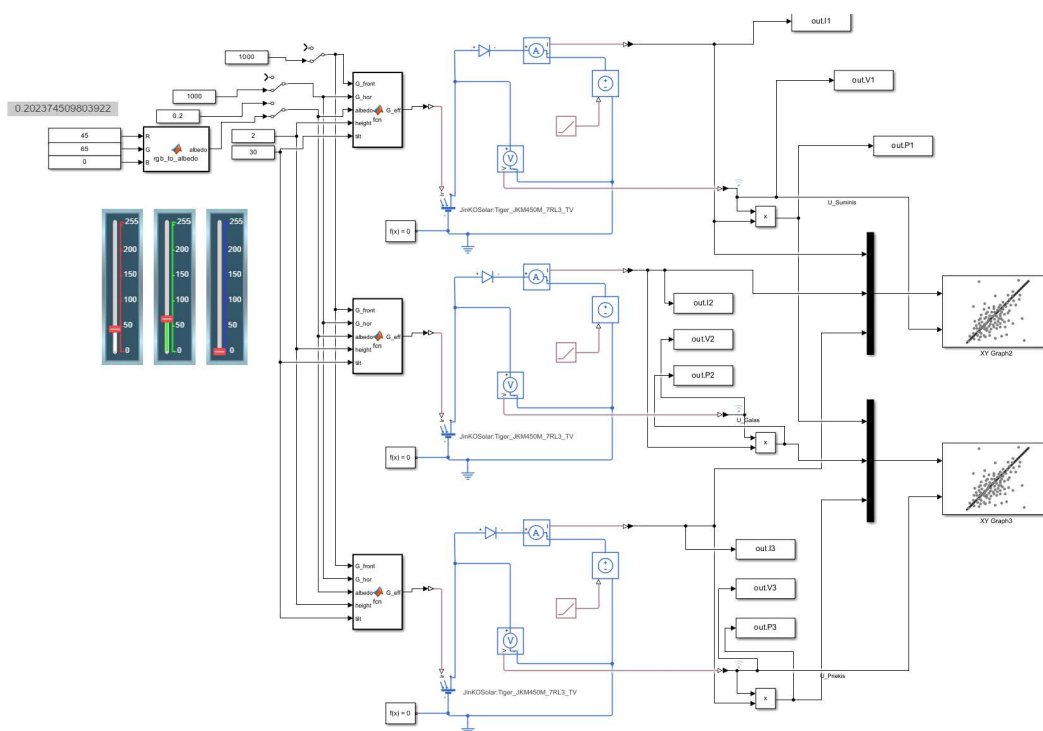
**14 pav.** Modeliuojamų STC sąlygų prie albedo 1 voltamperinė ir P-U charakteristikos

Šiuose modeliavimo grafikuose matomas 66,01 % antrosios pusės prieaugis prie  $\phi = 0,7$ , kuomet albedo yra 1, tačiau modelyje gali būti paklaidos dėl saulės modulio bloko itin tikslaus skaičiavimo. Grafikas patenka į gamintojo deklaruotus režius, o skaičiavimai atliekami su *Simscape* bibliotekoje detalai gamintojo užpildytais panelės duomenimis, kas garantuoja didesnę modelio tikslumą už praktinius bandymus. STC sąlygomis sumodeliuotos panelės maksimali suminė galia siekia 751,07 W, o priekinės pusės maksimali galia siekia 452,258 W, kas reiškia 0,5 % paklaidą ir tolesniuose modeliavimo žingsniuose apibrėš viršutinę panelės galimybių ribą.

### 3.4. RGB–Albedo valdiklio patikrinimas ir verifikacija

Modelis pagrindžiamas spalvų teorija. RGB skalei esant 0, 0, 0, paviršiaus spalva yra absoliuti juoda, kuri 100 % sugeria visą saulės energiją. Tokiu atveju tiriamo modelio, modulio galinės pusės fotosrovė būtų 0 ir gaunamas bendros galios rezultatas būtų lygus tik iš pilnu pajėgumu pagal STC sąlygas veikiančios priekinės pusės. Parinkus RGB vertes – 255, 255, 255, gaunama absoliučioji balta, kurios fizikinė savybė yra visiškai, 100 % atspindėti šviesos srautą, kaip tobulas veidrodis. Toks atvejis tobulomis sąlygomis yra optimalus ir saulės modulis pasiekia savo maksimalų galios tašką.

Ši teorija naudojama tik įrodyti, kad valdiklis veikia, tačiau nebūtų tikslinga jį naudoti tyrimuose su kintančiais parametrais, todėl galinės apšvietos formulė yra skaidoma į dvi dedamąsias, kurios aprašomos metodologijoje. Viena dedamoji yra atsakinga už atspindį nuo žemės į galinę pusę, o kita už sugeriamą spinduliuotę iš dangaus. Tik pirmoji dedamoji vertina albedo reikšmę savo skaičiavimuose, tad apeinama sąlyga, jog galinė pusė saulės spindulius gauna 100 % tik nuo žemės ar pagrindo paviršiaus. Modelis su RGB–Albedo valdikliu vaizduojamas 15 paveikslėlyje.



15 pav. Modifikuotas STC modelis su RGB–Albedo valdikliu ir išskaidytos spinduliuotės priėmimu

Kad būtų galima nekomplikuotai keisti darbo režimus tarp konstantos ir RGB–Albedo valdiklio, naudojami perjungėjo, jungiklio (angl. *switch*) blokai. Įrodyti valdiklio validumui panaudojamos

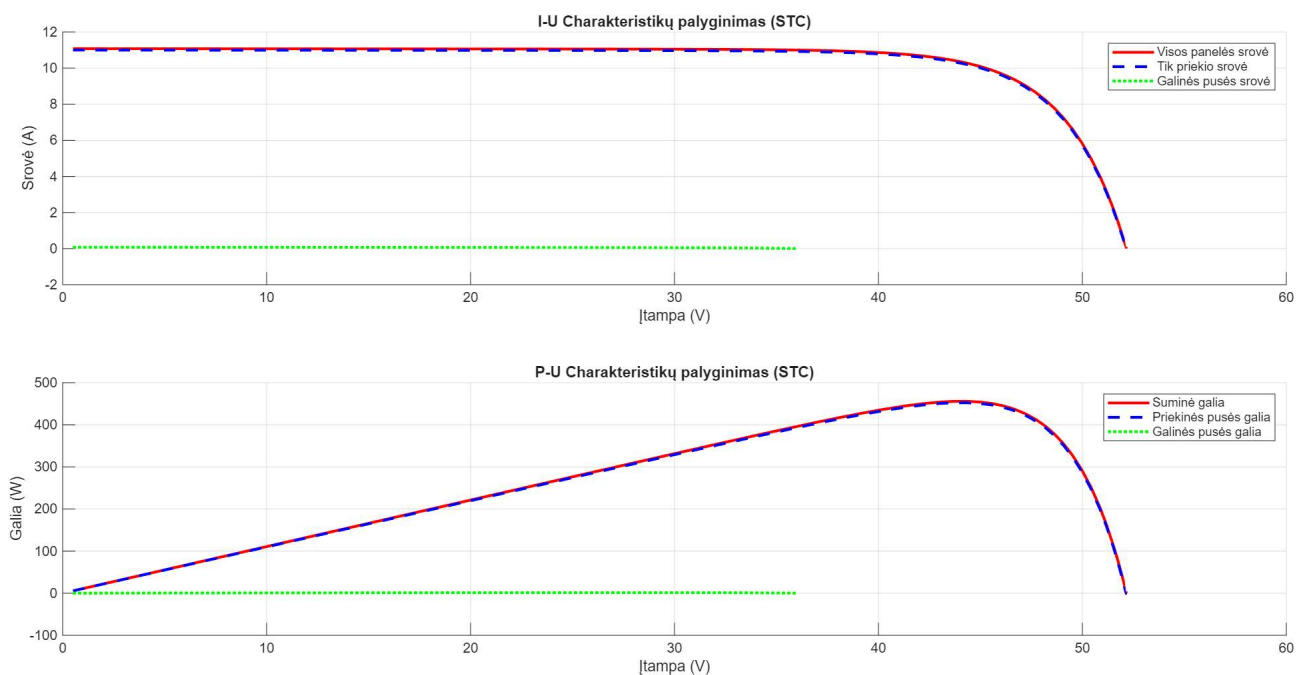
mokslinių straipsnių analizėje apžvelgtos, dažnai pasitaikančios albedo vertės, kurios yra lyginamos su jų RGB atitikmeniu.

Konkrečiai fizinei paviršiaus spalvai paversti į RGB formatą, naudojama skaičiuoklė, kurios pirminiai rezultatai surašomi į 4 lentelę. Šios spalvos parinktos taip, kad atitiktų mokslinėje literatūroje randamas, realybei artimas reikšmes.

**4 lentelė.** Spalvinių RGB skaitinių verčių lentelė RGB–Albedo valdiklio patikrinimui

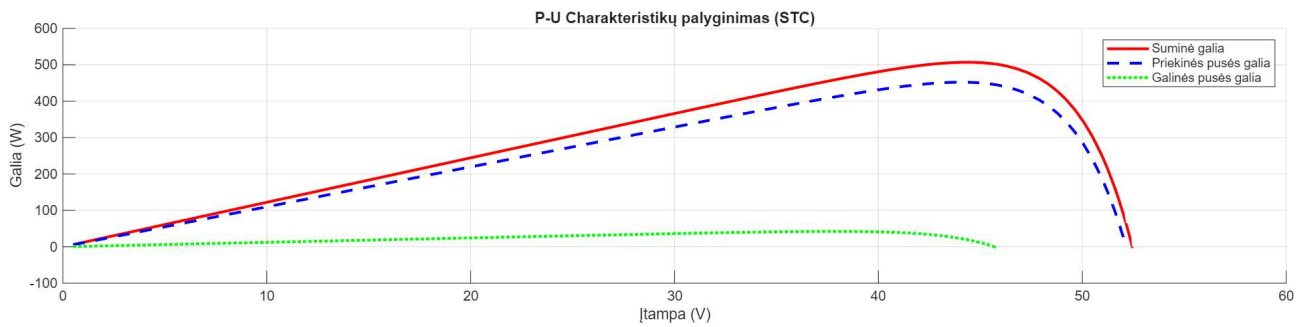
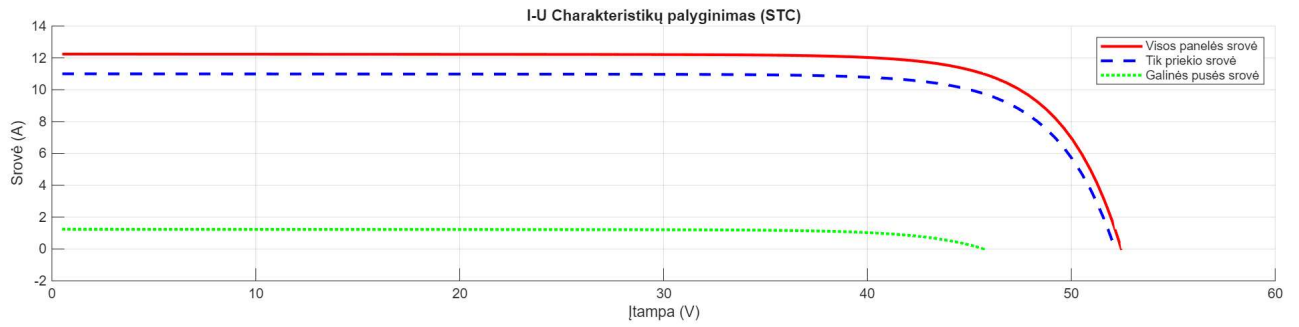
Fizinė spalva	Pavadinimas	Kodas, R, G, B	Albedo vertė
	Absoliuti juoda	0, 0, 0	0
	Žolės atitikmuo	45, 65, 0	0,202
	Žvyro atitikmuo	125, 115, 80	0,447
	Absoliuti balta	255, 255, 255	1

Kadangi albedo prilyginome vienetui atliekant STC modelio validaciją, modeliuojamos tik 2–4 lentelės eilutės. Gautos charakteristikos pateiktos 16–18 paveikslėliuose.



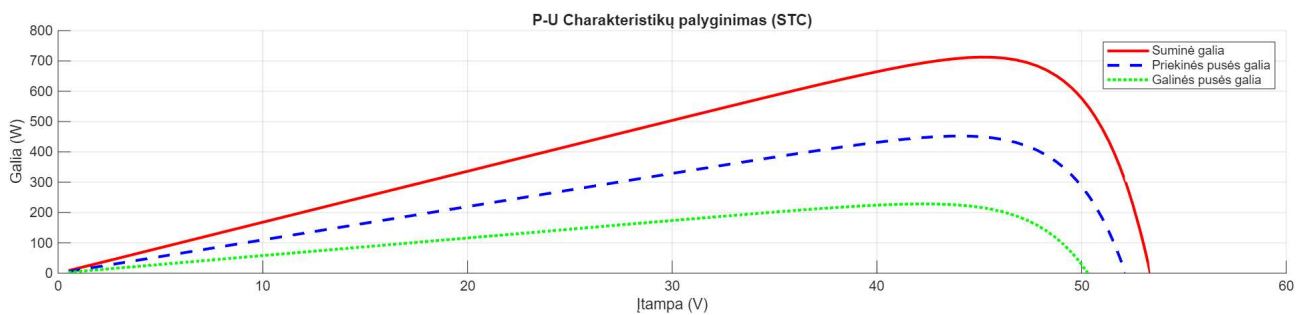
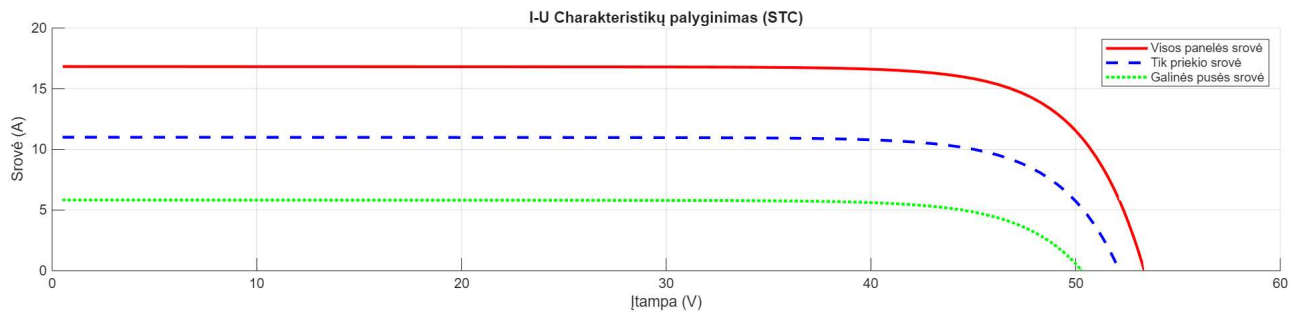
**16 pav.** I-U ir P-U charakteristikos modifikuotomis STC sąlygomis prie albedo 0 vertės (absoliučios juodos atitikmuo)

Modeliuojat absoliučios juodos pagrindo paviršių, kuomet RGB yra 0, 0, 0, matomas labai mažas galinės pusės indėlis, kuris siekia 0,76 %, taip yra dėl fotovoltinio modulio pozicijos plokštumoje. Fotovoltinis modulis iškeltas į 2 m aukštį ir yra pakreiptas 30 ° kampu, kas dėl išskaidytos  $G_{rear\_suminė}$  yra teisinga, nes apšvieta išreiškiama ne tik per žemės matomumo faktorių, bet ir dangaus matomumo faktorių.



17 pav. I-U ir P-U charakteristikos modifikuotomis STC sąlygomis prie albedo 0,202 vertės (žolės atitikmuo)

Literatūroje tiriant skirtingų paviršių albedo įtaką dvipusių fotovoltinių modulių galinės pusės indėliui, dažnai modeliuojamas pagrindas – žolė. Jis pasižymi albedo vertėmis 0,15–0,26. Modelyje modeliuojamos žolės spalvos  $\alpha$  yra 0,2 ir atitinka mokslinėje literatūroje užfiksuotas galinio indėlio vertes (angl. *bifacial gain*), kurios yra 10–11 %. Tiriamas modelis pasiekia didesnę vertę, kuri yra 12,08 %, dėl anksčiau minėtos galinės pusės apšvietos išskaidymo.



18 pav. I-U ir P-U charakteristikos modifikuotomis STC sąlygomis prie albedo 0,447 vertės (žvyro atitikmuo)

Taip pat su moksline literatūra palyginamas ir žvyro atitikmuo, kurio albedo vertė modelyje yra 0,447, o pasiektas galinės pusės indėlis 25,97 %. Palyginant su literatūroje tiriamomis albedo 0,5–0,55, prie kurių gautas galinės pusės priaugis kinta tarp 23,3–39 %, modelyje gauta vertė atitinka teoriją.

Šie grafikai parodo albedo tiesioginę priklausomybę nuo atspindimo pagrindo paviršiaus spalvos, prisirišant prie realių fizikinių verčių. Simuliuojant absoliučiai juodą paviršių, matomas tik labai minimalus galinės pusės darbas, tačiau keičiant pagrindo albedo, prisirišant tik prie literatūroje ištestuotų paviršių, ir juos palyginant su spalvos atitikmeniu, gaunamos realistiškos vertės. Valdiklio testavimo rezultatai pateikiami 5 lentelėje.

**5 lentelė.** Modeliavimo rezultatai RGB–Albedo valdikliui verifikuoti

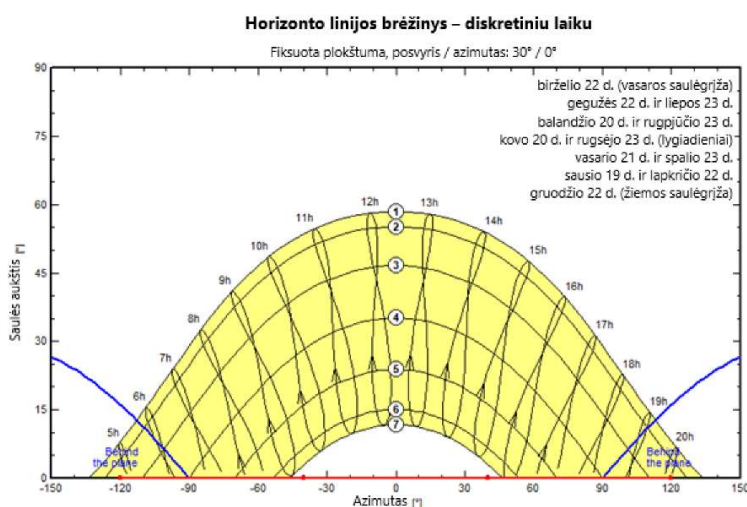
Fizinė spalva	Pavadinimas	Kodas, R, G, B.	Albedo vertė	Visos panelės maksimali galia, W	Galinės pusės indėlis, %
	Absoliuti juoda	0, 0, 0	0	455,72	0,76
	Žolės atitikmuo	45, 65, 0	0,202	507,13	12,08
	Žvyro atitikmuo	125, 115, 80	0,447	569,72	25,97
	Absoliuti balta	255, 255, 255	1	751,07	66,03

Šios vertės STC sąlygomis su kintamu albedo rodo, kad kuo paviršius yra šviesesnis ar skalesnis, tuo didesnę įtaką bendros panelės generacijai daro galinė pusė [36], o albedo valdymas Albedo-RGB valdikliu tiesiogiai koreliuoja su realiomis reikšmėmis ir moksline literatūra.

### 3.5. Realių duomenų išgavimas naudojantis išorine programa *PVsys*

Sugeneruoti realius duomenis pasinaudota *PVsys* programine įranga, kadangi ją naudoja projektavimo tikslais ir ja yra remiamasi daugelyje mokslinių straipsnių bei praktikoje. *PVsys* naudojamas užduoties principu, tai reiškia, kad modelis pirma yra atliekamas kitoje programinėje įrangoje, kuri yra griežtuose režiuose, kurių laikomasi vėliau modeliuojant *Simulink* aplinkoje.

*PVsys* užduodama užduotis, kaip geometriškai turėtų būti laikoma panelė, kokioje lokacijoje ji turėtų atsirasti. Pagal tai gaunami saulės keliavimo ciklo rezultatai (19 pav.).



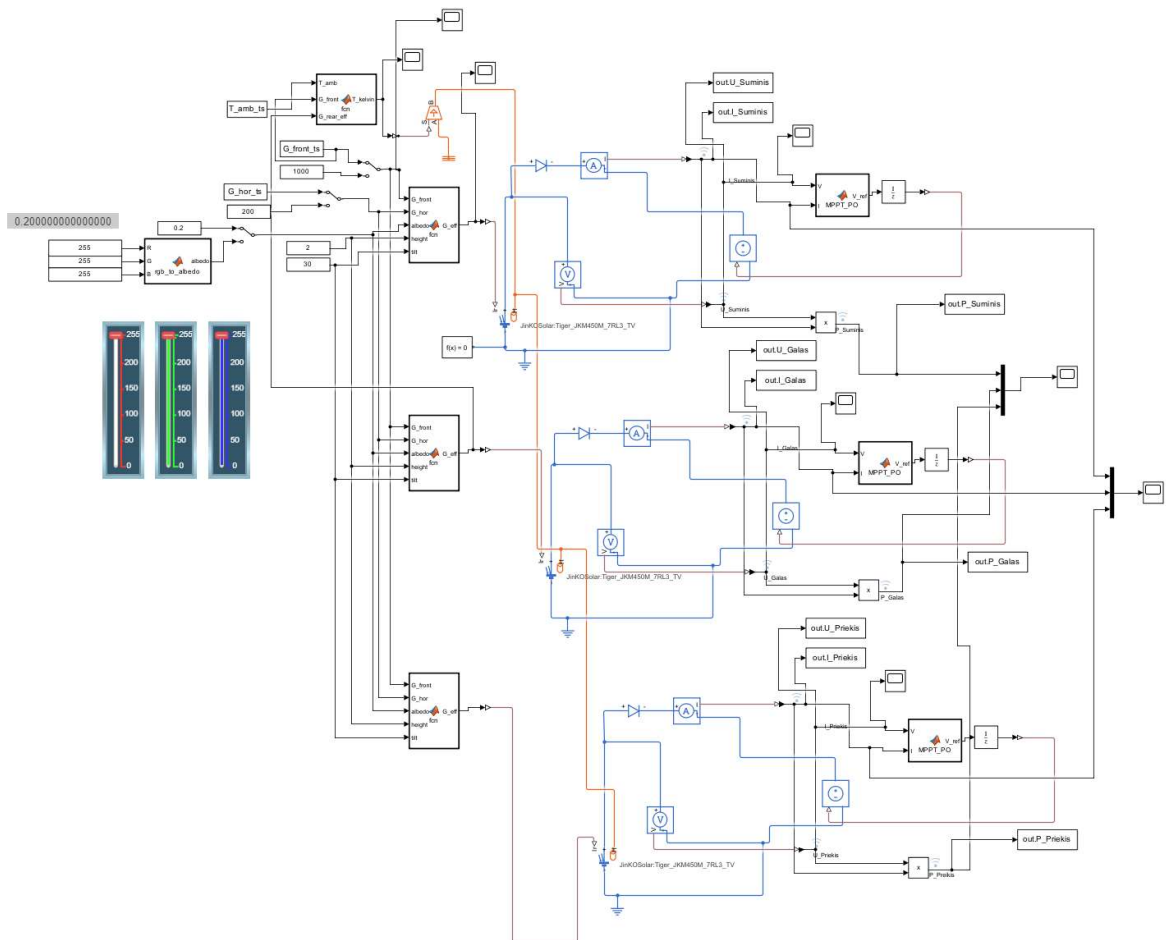
**19 pav.** *PVsys* išgautas saulės keliavimo ciklo grafikas

Taip pat *PVsyst* gali pateikti ir daug kitų modelio duomenų, tačiau tyrimo limitacija tirti vieną panelę, neleidžia tiesiogiai palyginti skirtingų sistemų, nes *PVsyst* naudoja inverterius, dėl kurių modeliavimas su viena panele programiškai nėra leidžiamas. Iš *PVsyst* išgauti lokacijos apšvietos duomenys, spinduliuojant į žemės paviršių ir į priekinę masyvo pusę bei aplinkos temperatūra, kurią *MALAB* modelyje *MATLAB* funkcijos blokas matematinio būdu transformuoja į temperatūros priėmimo sistemai tinkamas vertes.

Kadangi praktikoje *PVsyst* duomenys yra pakankamai patikimi naudoti komerciniam projektavimui, šie duomenys ištraukiami *Excel* formatu ir naudojami viso *MATLAB* modeliavimo metu. Jie traktuojami, kaip niekuo neišsiskiriančių metų apšvietos ir temperatūros duomenys. *Excel* formatu eksportuotos vertės valandų tikslumu.

### 3.6. Darbas su dinamišku modeliu, realių duomenų apdorojimas ir modeliavimo seka

Norint modelį padaryti dinamišku, adaptuojamas *STC* sąlygų modelis su realistiškų sąlygų išlygomis (20 pav.).

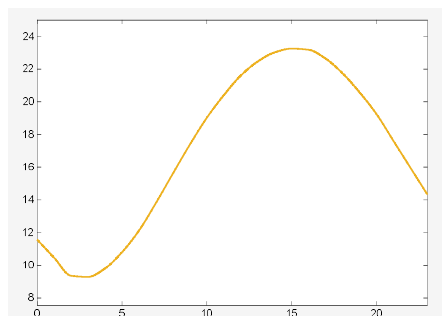


20 pav. Dinamiško modelio paruošto dirbti su realiais duomenimis principinė schema

Kone svarbiausias veiksnys dinamiškame modelyje yra atskirų matavimo sistemų suderinamumas. Kadangi matavimai šiame modelyje atliekami atskiriems blokams, kurie reprezentuoja priekinės ir galinės pusių bei bendros saulės panelės charakteristikas, naudojami *MATLAB Function (MPPT\_PO)* blokai, kurie matuoja ir palaiko vienodą, tačiau kintančią įtampą visoje panelėje. MPPT blokas

neleidžia galinei pusei dirbti kaip vartotojui, esant dideliame debesuotumui arba aukštomis temperatūroms.

Prieš importuojant realius duomenis į modelį reikia pasirinkti *To/From Workspace* blokais, kadangi jie leidžia algoritmui realius duomenis perduoti į simuliacinį modelį bei iš jo. Patys duomenys iš *Excel* aplinkos į *MATLAB* ir vėliau į *Simulink* perkeliama kodo pagalba. Pasitikrinti ar modelis tinkamai priima duotus duomenis galima naudojant oscilografo (angl. *Scope*) blokus, kurie realiu laiku parodo pasirinkto įėjimo ar išėjimo vertę. Pavyzdį galima matyti 21 paveikslėlyje.



**21 pav.** Temperatūros oscilografo rodmenys vienos dienos simuliacijai

Kad *MATLAB* modelis būtų itin tikslus, panelės aukštis ir pakreipimo kampas negali skirtis nuo susimuliuotų *PVsyst*, nes tokiu atveju apšvietos ir temperatūros vertės bus netikslios.

RGB–Albedo įgyvendinimui pasitelkiama ta pati blokų sistema, kaip STC sąlygomis, kadangi prieš leidžiant apšvietą į panelės įėjimo jungtį, yra *MATLAB* funkcijos blokas. Jis aprašo panelės geometriją ir montavimo ypatumus pagal *PVsyst* modelio užduotį ir išskaido apšvietą galinėje pusėje taip, kad žiemos metu, esant ilgesniems šviesos spinduliams ties horizontu, galinė pusė sugertų spinduliuotę iš dangaus, o ne tik iš atspindžio.

Transformuotas modelis yra dinamiškas ir pritaikytas dirbti su keliais kintamaisiais tuo pačiu metu, taip pat turi funkciją grįžti prie konstantų. Modeliuojant paros simuliaciją ir metų simuliaciją, esminis skirtumas yra, kaip apšvieta skirtingu metų laiku ir dienų debesuotumu lems žemės paviršiaus atsispindėjimą, ir kaip tai atsispindės dvipusio fotovoltinio modulio efektyvumo charakteristikose. Taip pat svarbu, kaip pagrindo spalva reaguos į tuos pasikeitimus prieš atmušant šviesos spindulį į panelės galinę pusę.

Dinamiško modelio modeliavimas atliekamas keliais laiko pjūviais:

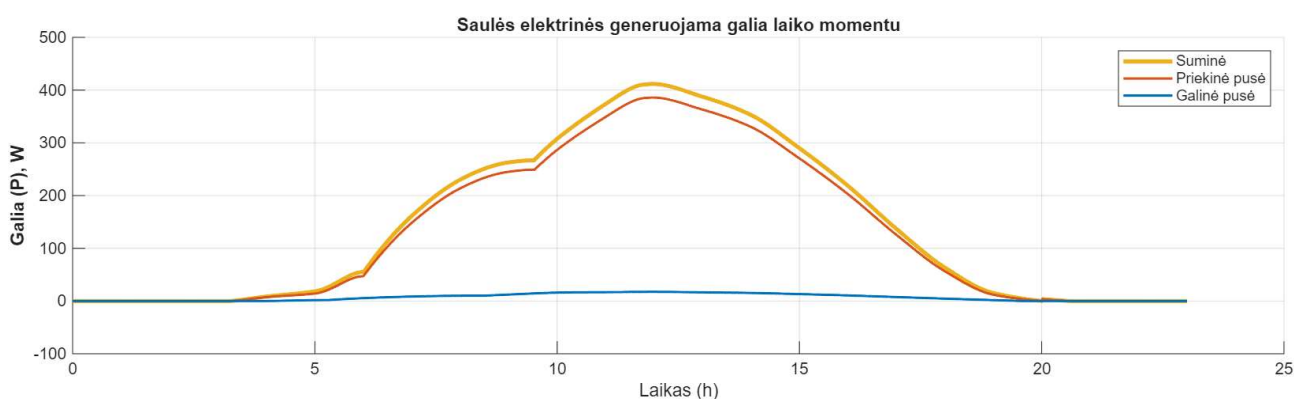
- Geriausios paros metuose modeliavimas. Kuomet klimato sąlygos yra optimalios ir leidžia parodyti modeliuojamos panelės pikines vertes be anomalijų.
- Žiemos ir vasaros modeliavimas. Žiemos modelis skirtas parodyti ilgesnėje perspektyvoje generuojamas vertes prasčiausiomis metų sąlygomis. Vasaros modelis skirtas parodyti geriausio metų laiko generacijos skirtumus lyginant su žiemos laikotarpiu.
- Visų metų modeliavimas. Visų metų modelis leidžia nustatyti ilgalaikį efektyvumą ir stebėti pokyčius ilgesnėje perspektyvoje, į tai įtraukiant visus metų laikus.

Modelis realiu laiku stebi temperatūrą, srovę, įtampą galią ir iš jų sudaro esminius grafikus, atlieka skaičiavimus, kuriais remiantis galima atlikti efektyvumo rodiklių priklausomybės nuo pagrindo spalvos ir albedo, modeliui susimuliuojant realistiškas sąlygas, analizę.

## 4. Modeliavimo rezultatai

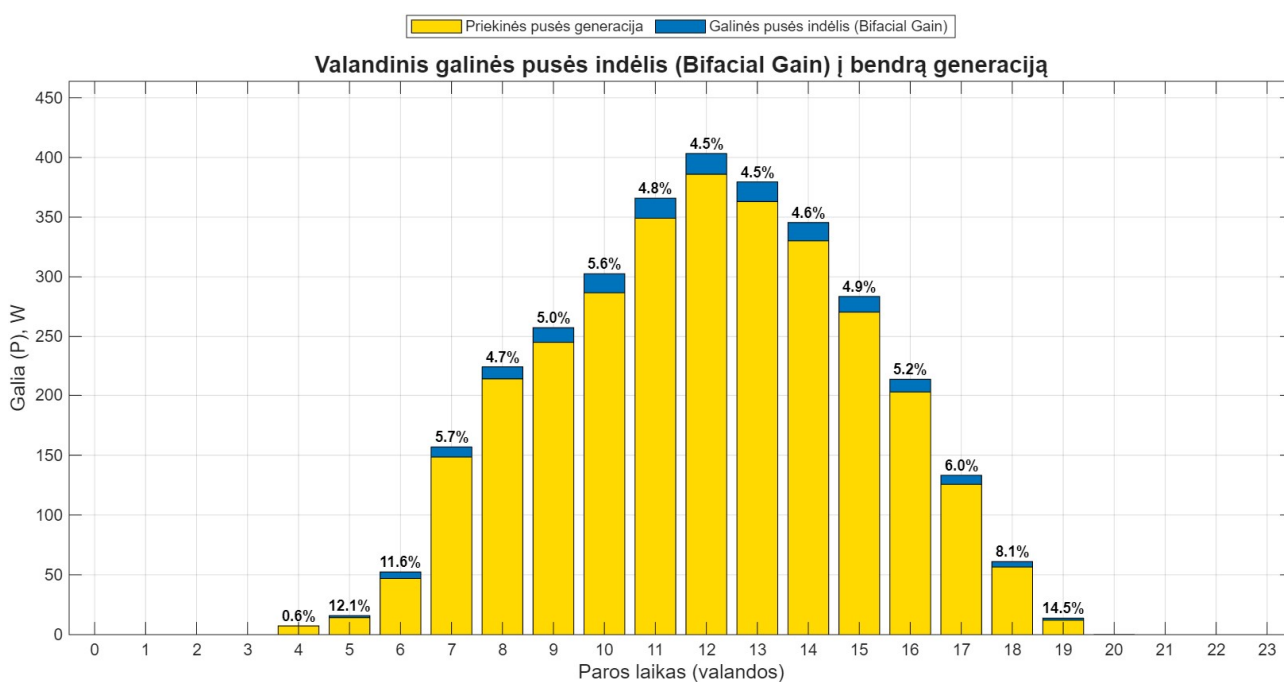
### 4.1. Vienos paros metuose su geriausiomis klimato sąlygomis, modeliuojant skirtingus albedo, rezultatų analizė

Statistiškai, pagal oro sąlygas, geriausia para yra turinti aukščiausią apšvietą prie žemiausios aplinkos temperatūros – birželio 21d. Geriausios paros aplinkos temperatūra vidutiniškai yra 17,1 °C, didžiausia temperatūra pasiekama 15 valandą – 23,25 °C, maksimali dienos apšvieta yra 951,4 W/m<sup>2</sup> pasiekama 12 paros valandą. Simuliacijos prie 0,2 albedo gaunamas P(t) grafikas (22 pav.).



22 pav. Generuojamos galios paroje P(t) charakteristika prie albedo 0,202 vertės

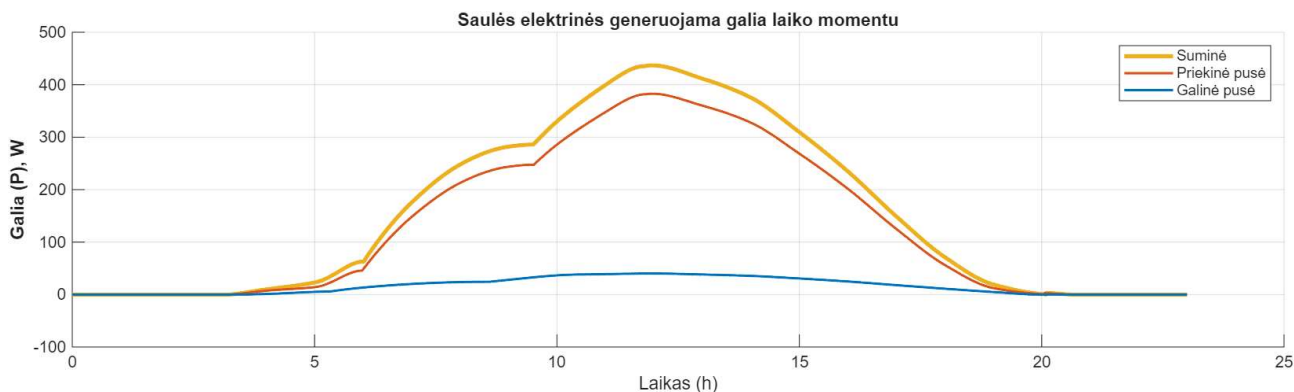
Atsitiktinės dienos, apšvietos piko metu, gaunama didžiausia panelės generuojama galia, kuri siekia 411,65 W. Modelyje vertinami terminiai veiksniai, todėl matoma mažesnė galinės pusės pikinė generacija 17,4 W. Toliau, 23 paveikslėlyje vaizduojamas galinės pusės indėlio bendrai generacijai grafikas.



23 pav. Paros modeliavimo galinės pusės indėlio bendrai fotovoltinio modulio generacijai grafikas prie albedo vertės 0,202

Šiame grafike apskaičiuotas ir pateiktas kiekvienos valandos galinės fotovoltinio modulio pusės indėlis išreikštas procentais. Grafike matomas didžiausias galinės pusės indėlis 14,5 %, 19 valandą, kuomet saulė nebesudaro optimalaus kampo su priekine fotovoltinio modulio puse, tačiau galinė pusė generuoja savo pikines vertes. Toks rezultatas matomas ir dėl šiluminių nuostolių, nes jie įtakoja priekinę ir galinę fotomodulio puses. Apskaičiuotas vidutinis dienos indėlis 6,41 %. Apšvietai esant optimaliu kampu su priekine puse, temperatūra pasiekia savo maksimalią vertę ir didžiausius terminius nuostolius, dėl to galinės pusės natūraliai mažesnę generaciją, šie nuostoliai veikia labiau.

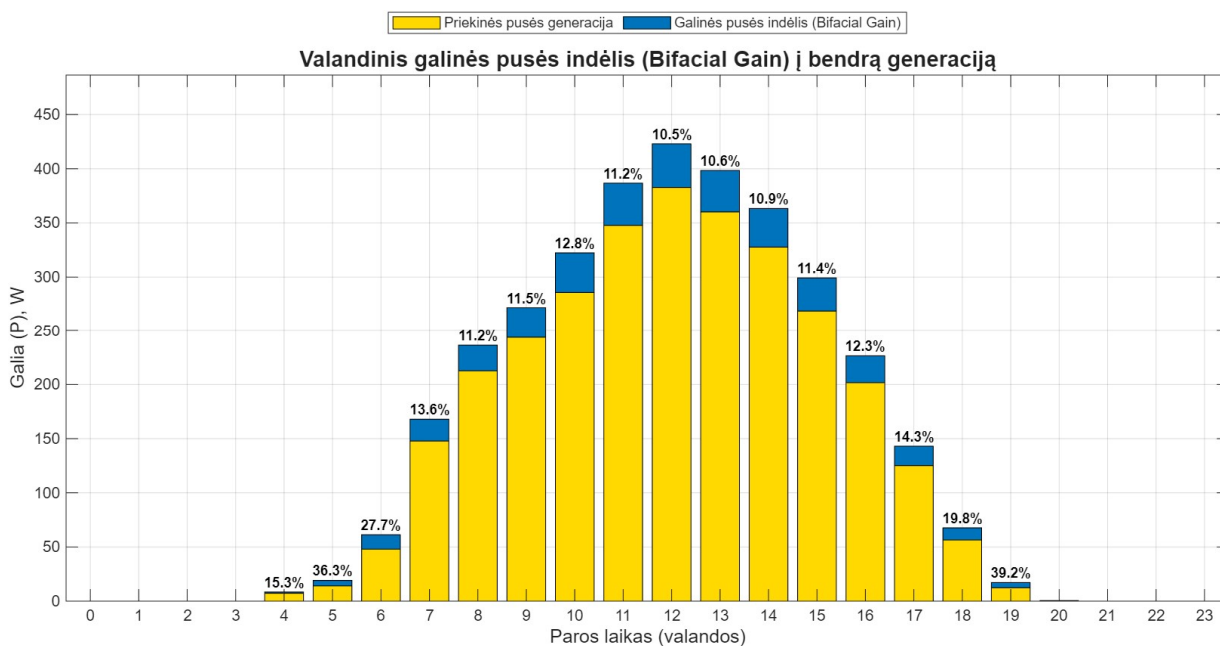
Toliau modeliuojamas didesnis albedo. Remiantis metodologija panaudojame RGB–Albedo valdiklį, albedo vertę išreiškiant 0,447. Gaunamas P(t) grafikas vaizduojamas 24 paveikslėlyje.



24 pav. Generuojamos galios paroje P(t) charakteristika prie albedo 0,447 vertės

Grafike matomas akivaizdus galinės pusės priaugis lyginant su žemesne albedo verte. Maksimali viso fotomodulio galia siekia 436,9 W, kas yra arti gamintojo dokumentacijoje deklaruotų 450 W STC sąlygomis. Galinės pusės optimalus galios taškas yra 40,25 W.

Vertinant galinės pusės indelį 25 paveikslėlyje galima matyti akivaizdų kilimą.



25 pav. Paros modeliavimo galinės pusės indėlio bendrai fotovoltinio modulio generacijai grafikas prie albedo vertės 0,447

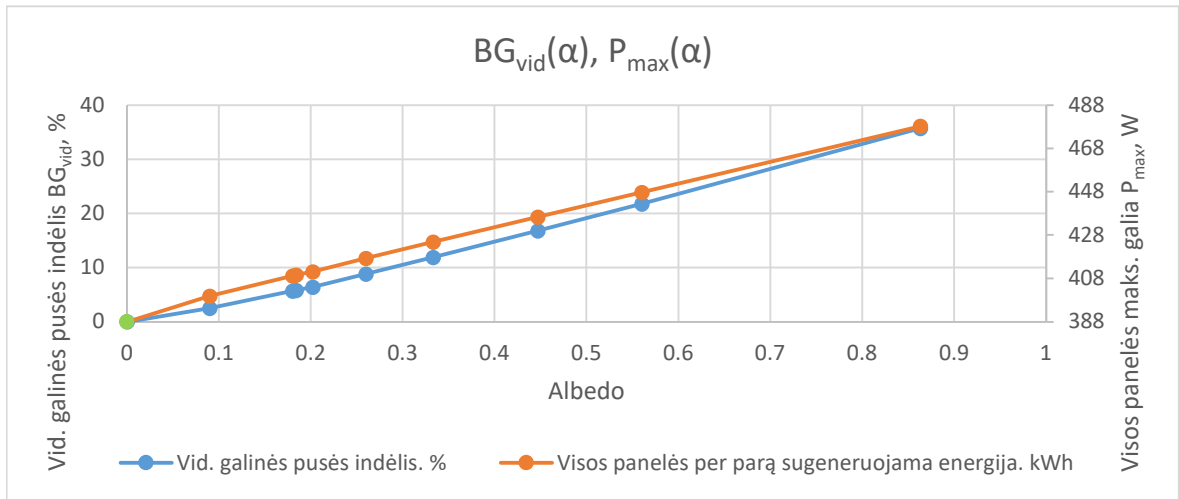
Didžiausias galinės pusės indėlis pasikartojančiai matomas 19 valandą, kuomet saulė pradeda leistis ir didesnė spindulių dalis pasiekia galinės pusės paviršių. Didžiausias galinės pusės indėlis yra 39,2 %, tačiau vidutinis dienos indėlis yra 16,8 %. Toks rezultatas matomas atsižvelgiant į terminius nuostolius ir kiek jie gali įtakoti panelės efektyvumą.

Daugiau dinamiškame paros modelyje gaunamų rezultatų, tiriant skirtingas RGB kombinacijas, naudojant RGB–Albedo valdiklį, yra surašoma į 6 lentelę.

**6 lentelė.** Paros dinamiško modelio su RGB–Albedo valdikliu simuliuojant realybės atitikmenis modeliavimo rezultatai

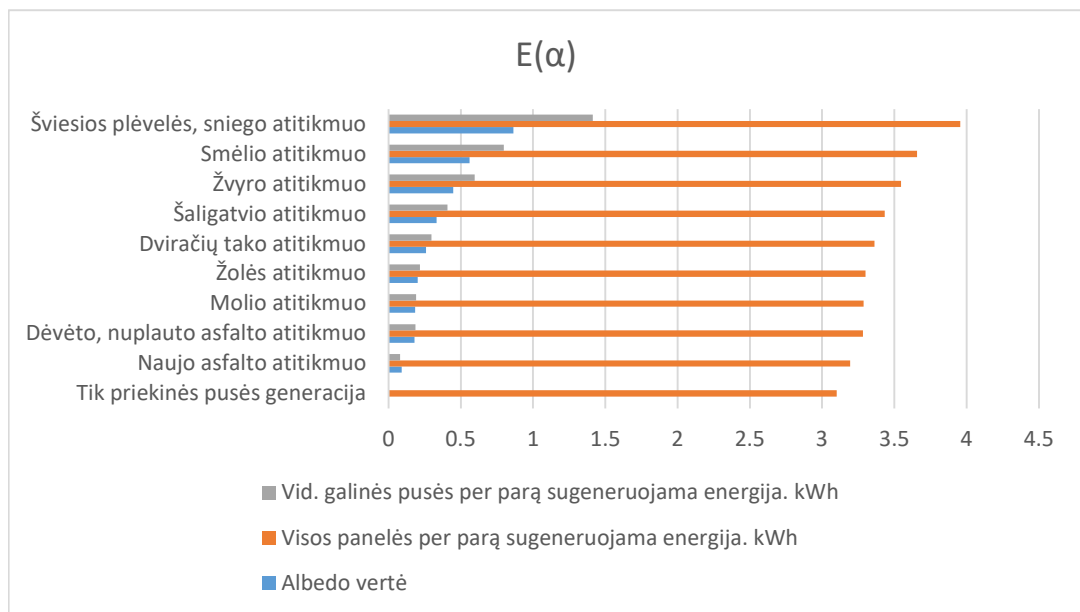
Fizinė spalva	Pav.	RGB vertė	Albedo $\alpha$ vertė	Visos panelės maks. galia $P_{max}$ , W	Visos panelės per parą sugeneruojama energija, $E_{sum}$ , kWh	Vid. galinės pusės indėlis, $BG_{vid}$ , %	Vid. galinės pusės per parą sugeneruojama energija, $E_{vid\_galo}$ , kWh
X	Tik priekinės pusės generacija	X	X	388,499	3,102	X	X
	Naujo asfalto atitikmuo	23, 23, 23	0,09	400,333	3,193	2,52	0,08
	Dėvėto, nuplauto asfalto atitikmuo	46, 46, 46	0,18	409,626	3,282	5,67	0,186
	Molio atitikmuo	72, 38, 28	0,184	410,04	3,286	5,81	0,191
	Žolės atitikmuo	45, 65, 0	0,202	411,65	3,301	6,41	0,216
	Dviračių tako atitikmuo	102, 51, 51	0,26	417,784	3,362	8,82	0,297
	Šaligatvio atitikmuo	85, 85, 85	0,333	425,305	3,434	11,89	0,408
	Žvyro atitikmuo	125, 115, 80	0,447	436,9	3,547	16,8	0,596
	Smėlio atitikmuo	160, 140, 110	0,56	448,26	3,658	21,78	0,797
	Šviesios plėvelės, sniego atitikmuo	220, 220, 220	0,863	478,771	3,957	35,73	1,414

Šioje lentelėje pateiktos praktikoje ir moksliniuose straipsniuose konkrečioms medžiagoms priskirtų albedo reikšmių išraiškos RGB skalėje bei gauti modeliavimo rezultatai. Grafiškai atvaizduoti rezultatai pateikiami 26–27 paveikslėliuose. Grafikuose galima palyginti vienpusės generacijos rezultatus su dvipusės generacijos rezultatais bei skirtingų spalvų tarpusavio skirtumus.



**26 pav.** Paros vidutinio galinės pusės indėlio ir visos panelės maksimalios galios priklausomybės nuo albedo kreivė, modelyje albedo keitimui taikant praktikoje pasitaikančių paviršių RGB atitikmenis

Tiriant albedo įtaką maksimalios galios taškui, oranžinėje kreivėje matomas tiesinis augimas. Kuo didesnis albedo tomis pačiomis aplinkos sąlygomis pasiekiamas, tuo didesnė maksimali galia gali būti išgauta. Vienpusė generacija, pasirinktos dienos sąlygomis, piko metu, pasiekia 388,499 W, o pridėdant albedo kintamąjį, kreivė pradeda tiesiškai kisti. Tiriant pagrindo paviršių apdengtą sniegu, balta plėvele, gaunamas maksimalus galios taškas 478,771 W. Matomas tiesiškai, tačiau nežymiai kintantis ryšys tarp dažniausiai aplinkoje pasitaikančių paviršių albedo ribose tarp 0,19–0,202. Tad galima teigti, jog skirtumas tarp asfalto, molio ir žolės yra nežymus. Galinės pusės indėlis keičiant albedo kinta beveik lygiagrečiai  $P_{max}(\alpha)$  grafikui ir rodo tiesioginę galinės pusės indėlio ir maksimalios visos panelės išgaunamos galios  $P_{max}$  koreliaciją. Šių kreivių įtaka viena kitai nėra visiškai tiesioginė dėl modelio dangaus matomumo koeficiento  $SVF$ .





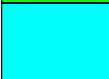






**27 pav.** Per parą sugeneruotos energijos priklausomybės nuo albedo vertės grafikas, modelyje albedo keitimui taikant praktikoje pasitaikančių paviršių RGB atitikmenis

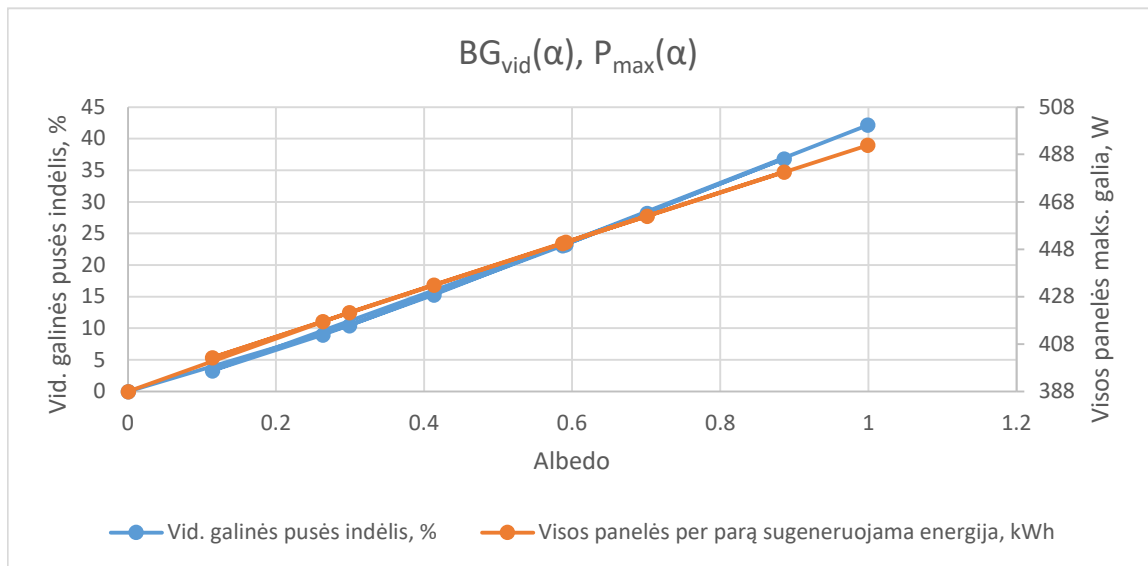
Šiame grafike matoma sugeneruotos galios priklausomybė nuo skirtingų pagrindo spalvų atitikmenų RGB–Albedo. Didinant albedo matomas galinės pusės sugeneruotos galios prieaugis, lyginant tik su priekinės pusės generacija. Daugiausia energijos fotovoltinio modulio galinė pusė sugeneravo imituojant sniego, šviesios plėvelės pagrindą 1,414 kWh, o mažiausiai, naudojant naujai pakloto asfalto pagrindo paviršiaus spalvos 0,09 albedo – 0,08 kWh. Tai reiškia, kad 0,773 albedo skirtumas gali padidinti galinės pusės generaciją 1,33 kWh per parą.

Atsitiktinai pasirinktų pagrindo spalvų RGB skalėje rezultatai, modeliuojant geriausią parą metuose, pateikiami 7 lentelėje.

**7 lentelė.** Paros dinamiško modelio su RGB–Albedo valdikliu naudojant atsitiktinai pasirinktų spalvų reikšmes modeliavimo rezultatai

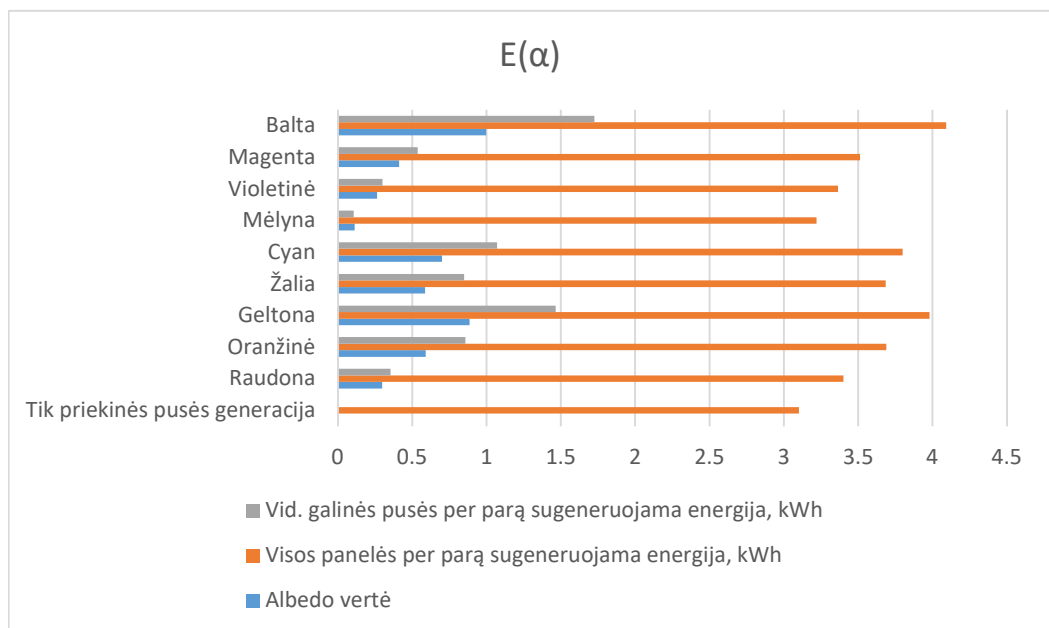
Fizinė spalva	Pav.	RGB vertė	Albedo $\alpha$ vertė	Visos panelės maks. galia $P_{max}$ , W	Visos panelės per parą sugeneruojama energija, $E_{sum}$ , kWh	Vid. galinės pusės indėlis, $B_{G_{vid}}$ , %	Vid. galinės pusės per parą sugeneruojama energija, $E_{vid\_galo}$ , kWh
X	Tik priekinės pusės generacija	X	X	388,499	3,102	X	X
	Raudona	255, 0, 0	0,299	421,789	3,401	10,44	0,355
	Oranžinė	255, 127, 0	0,591	451,512	3,689	23,26	0,858
	Geltona	255, 255, 0	0,886	481,09	3,979	36,83	1,465
	Žalia	0, 255, 0	0,587	451,082	3,685	23,08	0,85
	Cyan	0, 255, 255	0,701	462,52	3,799	28,22	1,072
	Mėlyna	0, 255, 0	0,114	402,792	3,219	3,31	0,106
	Violetinė	127, 0, 255	0,263	418,097	3,365	8,96	0,302
	Magenta	255, 0, 255	0,413	433,43	3,512	15,31	0,538
	Balta	255, 255, 255	0,999	492,416	4,091	42,16	1,725

Pritaikytų atsitiktinai pasirinktų spalvų pagrindo paviršiaus modeliavimui rezultatų lentelės duomenys apdorojami ir pateikiami grafiškai 28–29 paveikslėliuose.



**28 pav.** Paros vidutinio galinės pusės indėlio ir visos panelės maksimalios galios priklausomybės nuo albedo kreivė, modelyje albedo keitimui taikant atsitiktinai pasirinktas spalvas

Spalvas matematinio būdu išreiškiant per albedo, gaunamos vertės nuo 0,114 iki 0,999. Per albedo manipuliuojant žemės matomumo koeficientą  $GVF$ , pakinta apšvietos į galinę fotomodulio pusę dedamoji. Pagrindo spalvos keitimas RGB–Albedo valdikliu patvirtina  $BG_{vid}$  bei  $P_{max}$  tiesinę priklausomybę nuo albedo – kuo spalva yra arčiau baltos, tuo mažiau nuostolių patiriama ir tuo daugiau atspindima į galinę panelės pusę, dėl spalvos savybės sugerti šviesos spindulius. Naudojant visiškai baltą paviršiaus spalvą, pasiekama aukščiausia galios pikinė vertė 492,416 W, mažiausia vertė, gauta naudojant mėlyną atspalvį 402,792 W. Remiantis šiais duomenimis patvirtinama, kad kuo tamsesnis atspalvis, arba kuo toliau atspalvis yra nuo baltos, tuo galinės pusės generacija yra mažesnė.



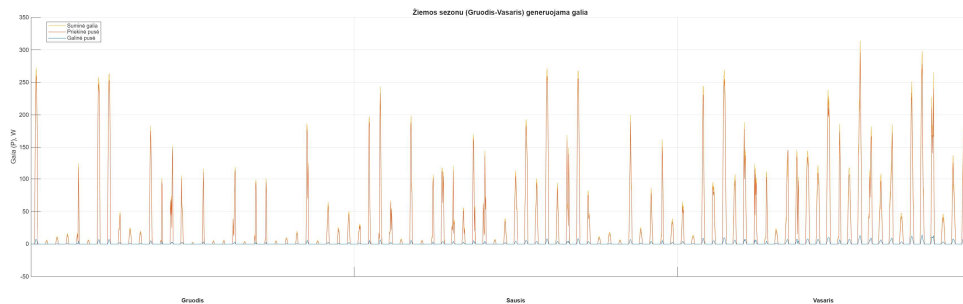
**29 pav.** Per parą sugeneruotos energijos priklausomybės nuo albedo vertės grafikas, modelyje albedo keitimui taikant atsitiktinai pasirinktas spalvas

Šiame grafike matoma atsitiktinai pasirinktų spalvų albedo verčių, gaunamų po RGB–Albedo valdiklio skaičiavimų,  $E(\alpha)$  rezultatai. Patvirtinant teoriją, jog kuo spalva yra arčiau baltos ir albedo 1, tuo medžiaga geriau atspindi šviesos spindulius į galinę fotovoltinio modulio pusę. Modeliuojant baltą pagrindo paviršių sugeneruojama daugiausiai energijos 4,091 kWh, iš kurių 42,16 % sugeneruoja galinė pusė, o modeliuojant mėlyną spalvą, sugeneruojama 3,219 kWh per parą. Vienpusis tokio tipo modulis sugeneruoja tik 3,102 kWh, kas parodo 0,989 kWh pranašumą numatytosios dienos modelyje.

#### 4.2. Žiemos ir vasaros sezonų, kintančiomis klimato sąlygomis, modeliujant skirtingus albedo, rezultatų analizė

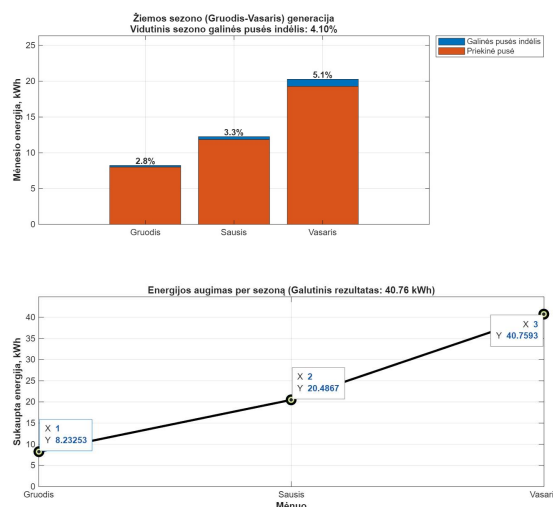
Rezultatų analizei pasirinkti du kontrastiškiausi metų sezonai. Tai yra metų sezonas su mažiausiai tiesioginės apšvietos ir trumpiausiu saulės virš horizonto laiku – žiema, bei priešingas, šviesiausias ir ilgiausiai saulės šviesą virš horizonto išlaikantis sezonas – vasara.

Modeliuojamos skirtingos albedo vertės skirtingu metų laikų sąlygomis. 0,202 albedo žiemos sezono  $P(t)$  modeliavimo rezultatai vaizduojami 30 paveikslėlyje.



30 pav. Generacijos žiemos sezonu  $P(t)$  charakteristika prie albedo 0,202 vertės

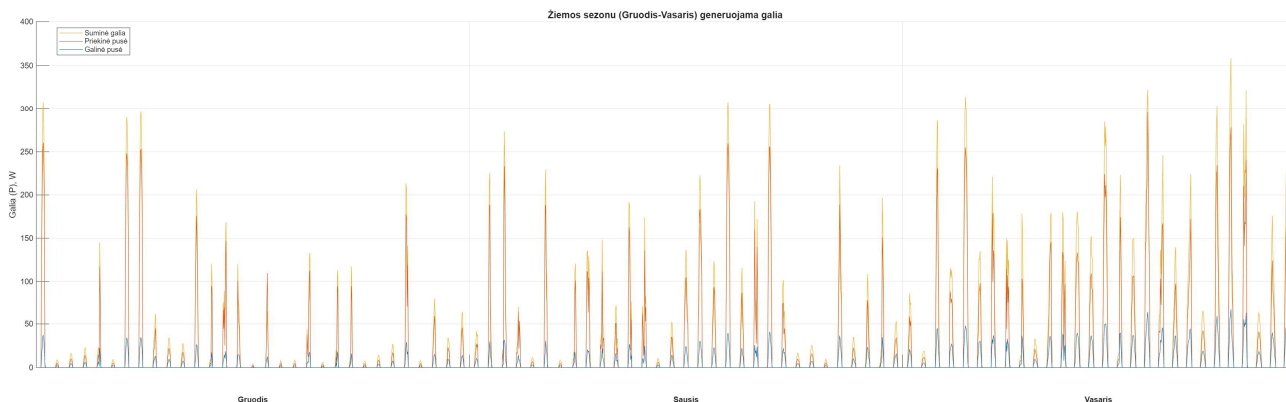
Grafikas vaizduoja žiemos metų laiko fotovoltinio modulio generaciją. Matoma maksimali 313 W generacija vasario mėnesio viduryje. Gryna saulėtų valandų trukmė 657,3 h apskaičiuota, kai galia yra daugiau 1 W. Tuo pačiu principu vidutinė viso fotovoltinio modulio galia dienos metu 63,74 W. Toliau apskaičiuota mėnesinė ir viso sezono suminė generacija vaizduojama 31 paveikslėlyje.



31 pav. Mėnesiais išskaidytas ir visos žiemos suminis sugeneruotos energijos kWh grafikas prie albedo 0,202 vertės

Bendra viso sezono generacija prie albedo 0,202 vertės yra 40,76 kWh. Didžiausią vidutinį galinės pusės generacijos indėlį 5,1 % fotomodulio simuliacija rodo vasario mėnesį.

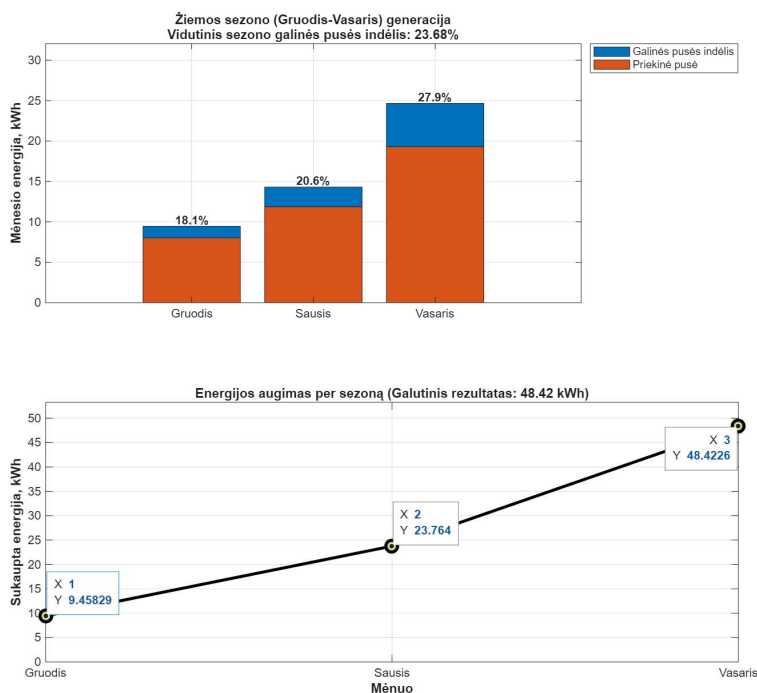
Kone svarbiausias aspektas, norint palyginti galinės pusės efektyvumą, yra praktikoje dažnai sutinkamos baltos plėvelės ant montuojamo pagrindo modeliavimas. Suimituoti sniegui, baltos plėvelės efektui RGB–Albedo valdiklio vertės nustatytos 220, 220, 220, o gaunama albedo reikšmė 0,863. Modeliavimo P(t) rezultatų grafikas pateikiamas 32 paveikslėlyje.



**32 pav.** Generacijos žiemos sezonu P(t) charakteristika prie albedo 0,863 vertės

Mėlynai pavaizduotos kreivės rodo padidėjusią galinės pusės ir tuo pačiu viso fotomodulio generaciją. 0,863 albedo grafiką lyginant su 0,202 albedo rezultatais, vidutinė generacija pakilo iš 63,74 W iki 75,44 W, kas rodo 15,51 % padidėjimą.

Toliau vertinama apskaičiuota mėnesinė ir viso sezono suminė generacija, kuri vaizduojama 33 paveikslėlyje.



**33 pav.** Mėnesiais išskaidytas ir visos žiemos suminis sugeneruotos energijos kWh grafikas prie albedo 0,863 vertės

Suminė fotovoltinio modulio bendrai sugeneruotos energijos suma siekia 48,42 kWh, kas yra 15,82 % daugiau, lyginant su žolės pagrindo paviršiaus modeliavimu. Taip pat matomas išaugęs galinės pusės indėlis visais mėnesiais, vasario mėnesį siekiant 27,9 %. Tai yra 22,8 % daugiau, nei įprastinio dažniausiai pasitaikančio montavimo pagrindo paviršiaus – žolės. Vidutinis žiemos sezono galinės pusės indėlis siekia 23,68 % viso bendro fotomodulio generacijos.

Daugiau dinamiškame vasaros ir žiemos sezonų modeliuose gaunamų rezultatų, tiriant skirtingas RGB kombinacijas, naudojant RGB–Albedo valdiklį, yra surašoma į 8–9 lenteles.

**8 lentelė.** Žiemos dinamiško modelio su RGB–Albedo valdikliu simuliuojant realybės atitikmenis modeliavimo rezultatai

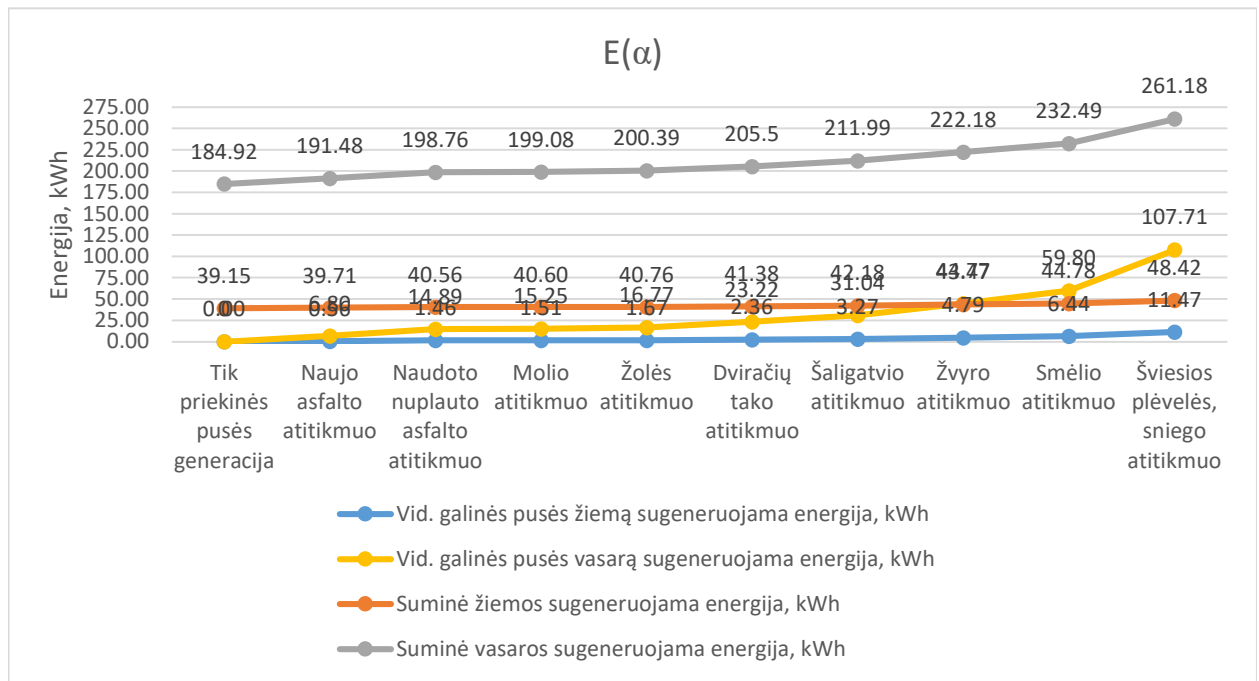
Fizinė spalva	Pav.	RGB vertė	Albedo $\alpha$ vertė	Visos panelės maks. galia $P_{max}$ , W	Suminė žiemos sugeneruojama energija, $E_{sum}$ , kWh	Vid. galinės pusės indėlis, $BG_{vid}$ , %	Vid. galinės pusės per žiemą sugeneruojama energija, $E_{vid\_galo}$ , kWh
X	Tik priekinės pusės generacija	X	X	296,713	39,15	X	X
	Naujo asfalto atitikmuo	23, 23, 23	0,09	304,239	39,71	1,42	0,56
	Dėvėto, nuplauto asfalto atitikmuo	46, 46, 46	0,18	312,122	40,56	3,6	1,46
	Molio atitikmuo	72, 38, 28	0,184	312,458	40,6	3,71	1,506
	Žolės atitikmuo	45, 65, 0	0,202	313,763	40,76	4,1	1,671
	Dviračių tako atitikmuo	102, 51, 51	0,26	318,762	41,38	5,7	2,359
	Šaligatvio atitikmuo	85, 85, 85	0,333	324,913	42,18	7,74	3,265
	Žvyro atitikmuo	125, 115, 80	0,447	334,817	43,47	11,02	4,79
	Smėlio atitikmuo	160, 140, 110	0,56	340,938	44,78	14,37	6,435
	Šviesios plėvelės, sniego atitikmuo	220, 220, 220	0,863	358,3	48,42	23,68	11,466

Toliau, 9 lentelėje, vaizduojami vasaros metų sezono rezultatai prie tų pačių RGB–Albedo valdiklio verčių.

**9 lentelė.** Vasaros dinamiško modelio su RGB–Albedo valdikliu simuliuojant realybės atitikmenis modeliavimo rezultatai

Fizinė spalva	Pav.	RGB vertė	Albedo $\alpha$ vertė	Visos panelės maks. galia $P_{max}$ , W	Suminė vasaros sugeneruojama energija, $E_{sum}$ , kWh	Vid. galinės pusės indėlis, $BG_{vid}$ , %	Vid. galinės pusės per vasarą sugeneruojama energija, $E_{vid\_galo}$ , kWh
X	Tik priekinės pusės generacija	X	X	459,778	184,92	X	X
	Naujo asfalto atitikmuo	23, 23, 23	0,09	480,019	191,48	3,55	6,798
	Dėvėto, nuplauto asfalto atitikmuo	46, 46, 46	0,18	500,253	198,76	7,49	14,887
	Molio atitikmuo	72, 38, 28	0,184	501,164	199,08	7,66	15,25
	Žolės atitikmuo	45, 65, 0	0,202	504,555	200,39	8,37	16,773
	Dviračių tako atitikmuo	102, 51, 51	0,26	518,147	205,5	11,13	23,222
	Šaligatvio atitikmuo	85, 85, 85	0,333	534,663	211,99	14,64	31,035
	Žvyro atitikmuo	125, 115, 80	0,447	560,388	222,18	20,15	44,769
	Smėlio atitikmuo	160, 140, 110	0,56	585,664	232,49	25,72	59,796
	Šviesios plėvelės, sniego atitikmuo	220, 220, 220	0,863	654,587	261,18	41,24	107,711

Šių skirtingų kalendorinių metų sezonų rezultatai tarpusavyje palyginami 34–35 paveikslėliuose.



**34 pav.** Vasaros ir žiemos sugeneruotos energijos palyginimo, prie praktikoje pasitaikančių RGB–Albedo valdikliu sugeneruotų albedo verčių, grafikas

Iš dviejų metų sezonų, vasaros ir žiemos sugeneruotos galios kilovatvalandėmis priklausomybės nuo albedo rezultatų grafiko, matomas didžiulis rezultatų skirtumas. Suminės sugeneruojamos energijos kiekis skiriasi apie 5 kartus, vertėmis vasarą 184,92–261,18 kWh, ir žiemą 39,15–48,42 kWh. Tačiau vertinant tik priekinę generaciją, skirtumas yra 145,77 kWh, kas yra 4,723 karto, o vertinant suminę generaciją, su šviesios plėvelės, sniego atitikmeniu, skirtumas tarp žiemos ir vasaros generacijos yra 215,76 kWh arba 5,456 karto. Matoma vasaros generacijos didėjimo tendencija. Plačiau analizuojant šios kreivės rezultatus išvedama papildoma 10 lentelė ir jos vizualizavimo grafikas (35 pav.).

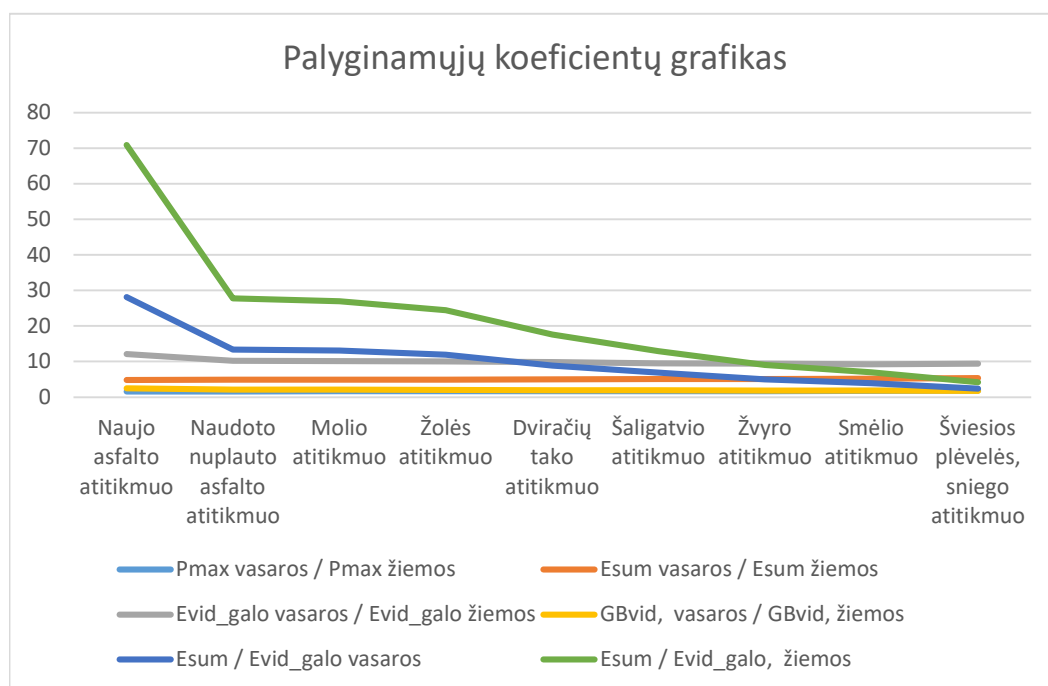
**10 lentelė.** Palyginamųjų duomenų koeficientų lentelė vasaros ir žiemos modeliavimui su praktikoje pasitaikančiais RGB–Albedo atitikmenimis

Fizinė spalva	Pav.	$E_{sum} / E_{vid\_galo}$ vasaros	$E_{sum} / E_{vid\_galo}$ , žiemos	$P_{max}$ vasaros / $P_{max}$ žiemos	$E_{sum}$ vasaros / $E_{sum}$ žiemos	$E_{vid\_galo}$ vasaros / $E_{vid\_galo}$ žiemos	$BG_{vid}$ , vasaros / $BG_{vid}$ , žiemos
	Naujo asfalto atitikmuo	28,167	70,911	1,578	4,822	12,139	2,500
	Dėvėto, nuplauto asfalto atitikmuo	13,351	27,781	1,603	4,900	10,197	2,081
	Molio atitikmuo	13,054	26,959	1,604	4,903	10,126	2,065
	Žolės atitikmuo	11,947	24,393	1,608	4,916	10,038	2,041
	Dviračių tako atitikmuo	8,849	17,541	1,625	4,966	9,844	1,953

Fizinė spalva	Pav.	$E_{sum} / E_{vid\_galo} \text{ vasaros}$	$E_{sum} / E_{vid\_galo}, \text{ žiemos}$	$P_{max} \text{ vasaros} / P_{max} \text{ žiemos}$	$E_{sum} \text{ vasaros} / E_{sum} \text{ žiemos}$	$E_{vid\_galo} \text{ vasaros} / E_{vid\_galo} \text{ žiemos}$	$BG_{vid}, \text{ vasaros} / BG_{vid}, \text{ žiemos}$
	Šaligatvio atitikmuo	6,831	12,919	1,646	5,026	9,505	1,891
	Žvyro atitikmuo	4,963	9,075	1,674	5,111	9,346	1,828
	Smėlio atitikmuo	3,888	6,959	1,718	5,192	9,292	1,790
	Šviesios plėvelės, sniego atitikmuo	2,425	4,223	1,827	5,394	9,394	1,742

$P_{max} \text{ vasaros} / P_{max} \text{ žiemos}$  ir  $E_{sum} \text{ vasaros} / E_{sum} \text{ žiemos}$  koeficientai didėja, kas parodo, jog didėjant albedo, vasaros sąlygos dėl mažo debesuotumo ir didesnės apšvietos yra palankesnės panelėje išgauti didesnę galią ir sugeneruoti daugiau energijos.  $E_{vid\_galo} \text{ vasaros} / E_{vid\_galo} \text{ žiemos}$  ir  $BG_{vid}, \text{ vasaros} / BG_{vid}, \text{ žiemos}$  koeficientai mažėjantys, kas rodo, jog proporcingai žiemą didesnę dalį darbo atlieka galinė pusė.

$E_{sum} / E_{vid\_galo} \text{ vasaros}$  ir  $E_{sum} / E_{vid\_galo} \text{ žiemos}$  koeficientų rezultatams analizuoti naudojamas 35 paveikslėlyje pateiktas koeficientų grafikas.



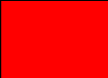







**35 pav.** Vasaros ir žiemos sezonų palyginamųjų koeficientų grafikas prie praktikoje pasitaikančių RGB–Albedo valdiklių sugeneruotų albedo verčių

Palyginamųjų koeficientų lentelė padeda nustatyti modelio tendencijas. Lyginant vasaros ir žiemos  $E_{sum} / E_{vid\_galo}$  koeficientus matoma mažėjanti tendencija, žalia kreivė artėja prie tamsiai mėlynosios, kas parodo, jog didėjantis albedo sumažina visos panelės ir galinės pusės tarpusavio generacijų

skirtumą, taip pat žiemos grafikas leidžiasi žemyn labiau nei vasaros, kas reiškia, jog didėjantis albedo žiemos modeliavime, galinės pusės indėliui daro didesnę įtaką.

Atsitiktinai pasirinktų spalvų RGB skalėje, modeliuojant žiemos ir vasaros metų sezonus, rezultatai pateikiami 11–12 lentelėse.

**11 lentelė.** Žiemos dinamiško modelio su RGB–Albedo valdikliu naudojant atsitiktinai pasirinktų spalvų reikšmes modeliavimo rezultatai

Fizinė spalva	Pav.	RGB vertė	Albedo $\alpha$ vertė	Visos panelės maks. galia $P_{max}$ , W	Suminė žiemos sugeneruojama energija, $E_{sum}$ , kWh	Vid. galinės pusės indėlis, $BG_{vid}$ , %	Vid. galinės pusės žiemą sugeneruojama energija, $E_{vid\_galo}$ , kWh
X	Tik priekinės pusės generacija	X	X	296,713	39,15	X	X
	Raudona	255, 0, 0	0,299	322,035	41,81	6,78	2,835
	Oranžinė	255, 127, 0	0,591	333,862	45,17	15,36	6,938
	Geltona	255, 255, 0	0,886	360,234	48,69	24,36	11,86
	Žalia	0, 255, 0	0,587	333,468	45,11	15,23	6,87
	Cyan	0, 255, 255	0,701	343,733	46,46	18,66	8,669
	Mėlyna	0, 255, 0	0,114	306,226	39,93	1,97	0,787
	Violetinė	127, 0, 255	0,263	319,021	41,42	5,78	2,364
	Magenta	255, 0, 255	0,413	331,571	43,08	10,02	4,347
	Balta	255, 255, 255	0,999	370,531	50,1	27,96	14,008

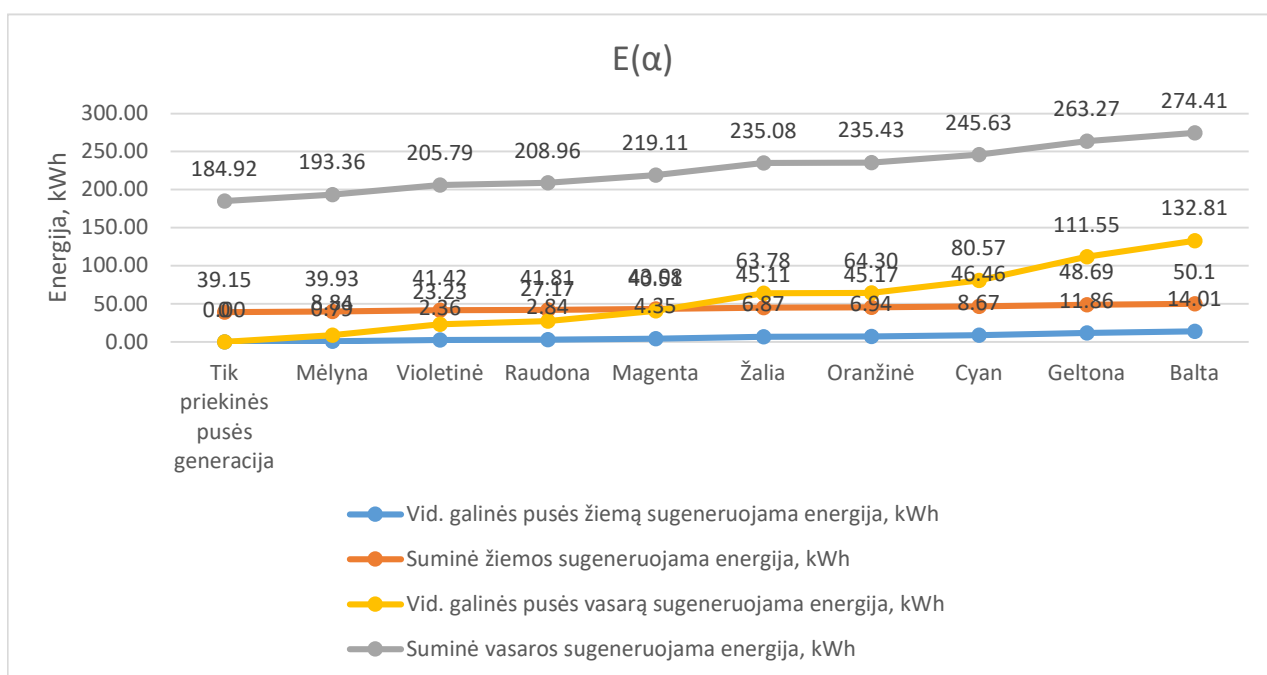
Toliau, 12 lentelėje, vaizduojami vasaros metų sezono rezultatai prie tų pačių RGB–Albedo valdiklio atsitiktinai pasirinktų RGB verčių.

**12 lentelė.** Vasaros dinamiško modelio su RGB–Albedo valdikliu naudojant atsitiktinai pasirinktų spalvų reikšmes modeliavimo rezultatai

Fizinė spalva	Pav.	RGB vertė	Albedo $\alpha$ vertė	Visos panelės maks. galia $P_{max}$ , W	Suminė vasaros sugeneruojama energija, $E_{sum}$ , kWh	Vid. galinės pusės indėlis, $BG_{vid}$ , %	Vid. galinės pusės per vasarą sugeneruojama energija, $E_{vid\_galo}$ , kWh
X	Tik priekinės	X	X	459,778	184,92	X	X

Fizinė spalva	Pav.	RGB vertė	Albedo $\alpha$ vertė	Visos panelės maks. galia $P_{max}$ , W	Suminė vasaros sugeneruojama energija, $E_{sum}$ , kWh	Vid. galinės pusės indėlis, $BG_{vid}$ , %	Vid. galinės pusės per vasarą sugeneruojama energija, $E_{vid\_galo}$ kWh
	pusės generacija						
	Raudona	255, 0, 0	0,299	526,903	208,96	13	27,165
	Oranžinė	255, 127, 0	0,591	593,09	235,43	27,31	64,296
	Geltona	255, 255, 0	0,886	659,996	263,27	42,37	111,547
	Žalia	0, 255, 0	0,587	592,112	235,08	27,13	63,777
	Cyan	0, 255, 255	0,701	617,897	245,63	32,83	80,567
	Mėlyna	0, 255, 0	0,114	485,345	193,36	4,57	8,837
	Violetinė	127, 0, 255	0,263	518,853	205,79	11,29	23,234
	Magenta	255, 0, 255	0,413	552,673	219,11	18,49	40,513
	Balta	255, 255, 255	0,999	686,204	274,41	48,4	132,814

Šių skirtingų kalendorinių metų sezonų rezultatai tarpusavyje palyginami 36–37 paveikslėliuose.



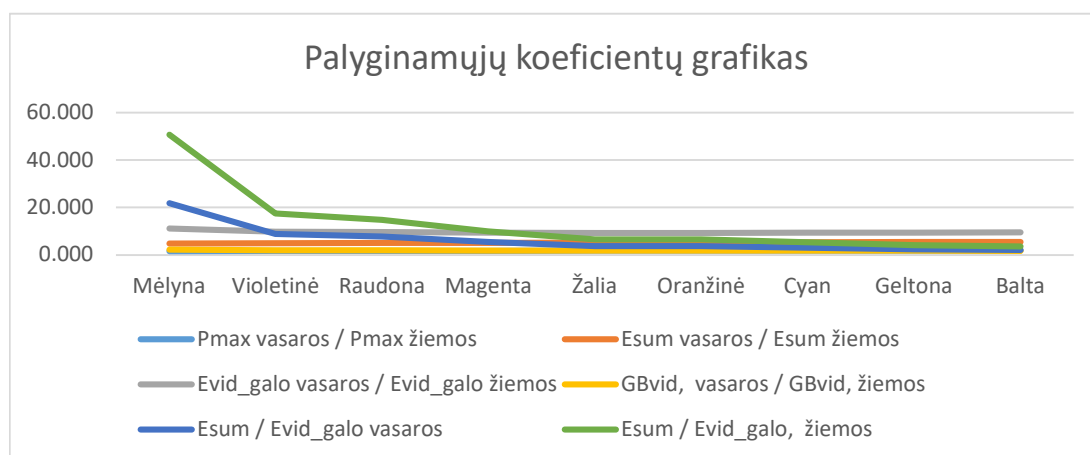
36 pav. Vasaros ir žiemos sugeneruotos energijos palyginimo, prie atsitiktinai pasirinktų spalvų RGB–Albedo valdikliu sugeneruotų albedo verčių, grafikas

Grafikas parodo, kaip vasaros ir žiemos sezonais kito sugeneruotos energijos vertė, priklausomai nuo pagrindo paviršiaus albedo, naudojant atsitiktinai pasirinktas spalvas RGB–Albedo valdiklyje. Matoma analogiška tendencija, kaip ir teoriškai patikrintuose albedo bandymuose, kuo spalvos skaitis didesnis (t.y. kuo spalva yra arčiau baltos), tuo didesnė per sezoną sugeneruojama energija iš fotomodulio išgaunama. Lyginant skirtingų pagrindo spalvų efektyvumą galima matyti, jog geltona ir balta spalvos, generaciją veikia geriau nei sniego, šviesios plėvelės atitikmenys, vasaros metu sugeneruojant 263,27–274,41 kWh, kai naudojant šviesios plėvelės atitikmenį sugeneruojama tik 261,18 kWh energijos. Taip yra dėl RGB–Albedo valdiklio logikos, žalios spalvos atspindžio dedamąją sustiprinti, dėl spalvos skaisčio dėsnų. Praktikoje tokių eksperimentų nėra, todėl tokį rezultatą įvertinti yra sudėtinga, tačiau moksliskai pagrįsti, kodėl geltona spalva energetiškai yra naudingesnė už mėlyną, galima. Toliau skirtingos spalvos analizuojamos 13 lentelėje ir 37 paveikslėlyje.

**13 lentelė.** Palyginamųjų duomenų koeficientų lentelė vasaros ir žiemos modeliavimui su atsitiktinai pasirinktomis spalvomis naudojant RGB–Albedo valdiklį

Fizinė spalva	Pav.	$E_{sum} / E_{vid\_galo} \text{ vasaros}$	$E_{sum} / E_{vid\_galo} \text{ žiemos}$	$P_{max} \text{ vasaros} / P_{max} \text{ žiemos}$	$E_{sum} \text{ vasaros} / E_{sum} \text{ žiemos}$	$E_{vid\_galo} \text{ vasaros} / E_{vid\_galo} \text{ žiemos}$	$BG_{vid} \text{ vasaros} / BG_{vid} \text{ žiemos}$
	Mėlyna	21,881	50,737	1,585	4,842	11,229	2,320
	Violetinė	8,857	17,521	1,626	4,968	9,828	1,953
	Raudona	7,692	14,748	1,636	4,998	9,582	1,917
	Magenta	5,408	9,910	1,667	5,086	9,320	1,845
	Žalia	3,686	6,566	1,776	5,211	9,283	1,781
	Oranžinė	3,662	6,511	1,776	5,212	9,267	1,778
	Cyan	3,049	5,359	1,798	5,287	9,294	1,759
	Geltona	2,360	4,105	1,832	5,407	9,405	1,739
	Balta	2,066	3,577	1,852	5,477	9,481	1,731

Lentelėje pateikti rezultatai rodo analogiškas tendencijas, kaip ir 10 lentelėje, todėl 37 paveikslėlyje vaizduojamas grafikas lyginamas su 35 paveikslėliu.



**37. pav.** Vasaros ir žiemos sezonų palyginamųjų koeficientų grafikas prie atsitiktinai pasirinktų spalvų RGB–Albedo valdikliu sugeneruotų albedo verčių

$P_{max}$  vasaros /  $P_{max}$  žiemos,  $E_{sum}$  vasaros /  $E_{sum}$  žiemos,  $E_{vid\_galo}$  vasaros /  $E_{vid\_galo}$  žiemos ir  $BG_{vid}$ , vasaros /  $BG_{vid}$  žiemos koeficientai kinta analogišku dėsniu, kaip 10 lentelėje ir 35 paveikslėlyje. Tačiau atkreipiant dėmesį į vasaros ir žiemos  $E_{sum} / E_{vid\_galo}$  koeficientus matomas mažesnis duomenų diapazonas bei geresni šviesesnių atspalvių rezultatai visuose koeficientuose, kas pagrindžia teoriją, jog didinant albedo reikšmę spalviniu RGB–Albedo valdikliu, žiemos rezultatai vis labiau priartėja prie vasaros. Matematinė išraiška pateikta 14 lentelėje.

**14 lentelė.** Matematinis 37 paveikslėlio analizės paaiškinimas

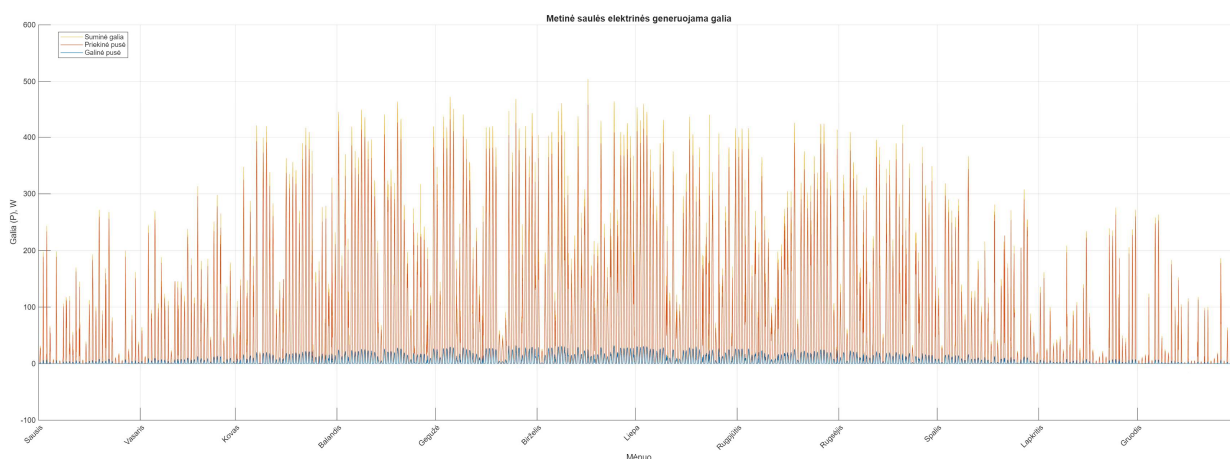
Išraiška/Spalvinis žymėjimas, atitikmuo			
$E_{sum} / E_{vid\_galo}$ vasaros	2,425	2,36	2,066
$E_{sum} / E_{vid\_galo}$ , žiemos	4,223	4,105	3,577
Koeficientų skirtumas $\frac{E_{sum} žiemos}{E_{vid\_galo} žiemos} - \frac{E_{sum} vasaros}{E_{vid\_galo} vasaros}$	1,798	1,745	1,51

Lyginant koeficientų skirtumus tarp šviesios plėvelės, sniego ir geltonos bei baltos pagrindo spalvų,  $E_{sum} / E_{vid\_galo}$  žiemos ir  $E_{sum} / E_{vid\_galo}$  vasaros koeficientų skirtumas iš 1,798 sumažėja iki 1,745–1,51, kas parodo sumažėjusį žalios ir mėlynos kreivių atstumą galutinėse (šviesiausiose) spalvų spektro vertėse ir matematiškai pagrindžia, jog žiemos grafikas artėja prie vasaros.

#### 4.3. Visų kalendorinių metų, kintančiomis klimato sąlygomis, modeliuojant skirtingus albedo, rezultatų analizė

Atliekant metinės generacijos simuliaciją, naudojami visų metų valandiniai duomenys. Pagal metinį grafiką galima pasitikrinti geriausią ir prasčiausią dieną generacijos atžvilgiu, taip pat įvertinti sezoniškumo tendencijas, tačiau tik iš platesnės perspektyvos. Dažniausiai metinių simuliacijų tikslas yra stebėti ilgalaikius efektus, įvertinant kuo daugiau kintamųjų.

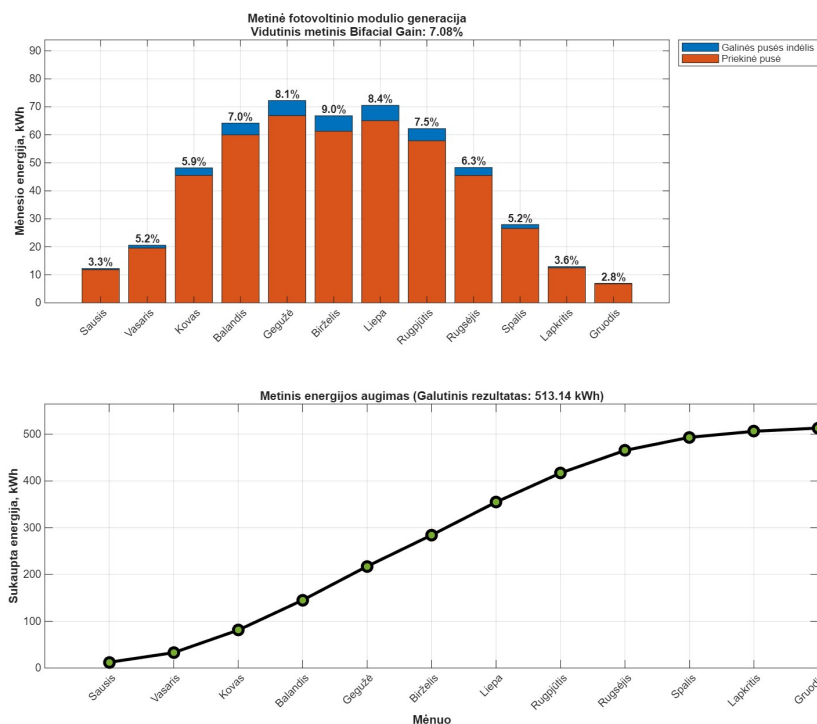
Visų metų, kiekvienos dienos, generuojamos valandos tikslumu galios grafikas prie albedo 0,202 vaizduojamas 38 paveikslėlyje.



**38 pav.** Visų kalendorinių metų P(t) charakteristika prie albedo 0,202 vertės

Visų metų grafike matoma mažesnė generacija žiemos sezonu, lyginant su šiltaisiais metų sezonais, taip pat mėlynai pavaizduota galinės pusės generacija yra didesnė vasaros sezonu. Matomos didžiausios ir mažiausios generacijos dienos. Vidurkinė metų dienos galia 124,16 W.

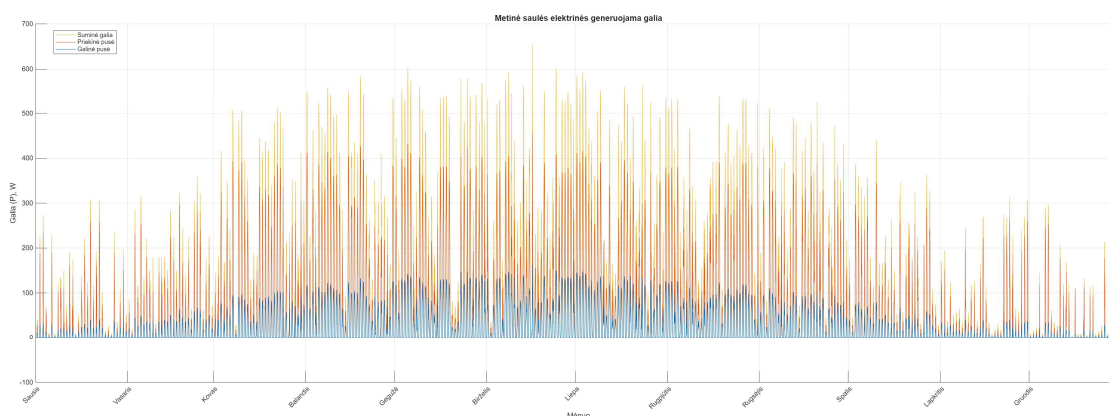
Išskaidytos metinės generacijos į mėnesius rezultatai pateikiami 39 paveikslėlyje.



**39 pav.** Mėnesiais išskaidytas ir visų kalendorinių metų suminis sugeneruotos energijos kWh grafikas prie albedo 0,202 vertės

Didžiausias galinės pusės indėlis metuose matomas birželio mėnesį ir yra 9 %. Matomas žymiai mažesnis prieaugis žiemos laikotarpiu, kuomet tiesioginių saulės spindulių yra žymiai mažiau, vertinant, kad albedo yra 0,2 ir apšvieta yra sumažėjusi, daug apsiniaukusių dienų. Vidutinis galinės pusės indėlis yra 7,08 %. Bendrai per visus metus sugeneruota energija yra 513,14 kWh, kreivė labiausiai kyla šiltuoju metų laiku, kas dar kartą patvirtina, jog fotovoltinis modulis, net patirdamas daugiau šiluminių nuostolių, gauna daugiau apšvietos, kuri pavirsta į naudingą energiją.

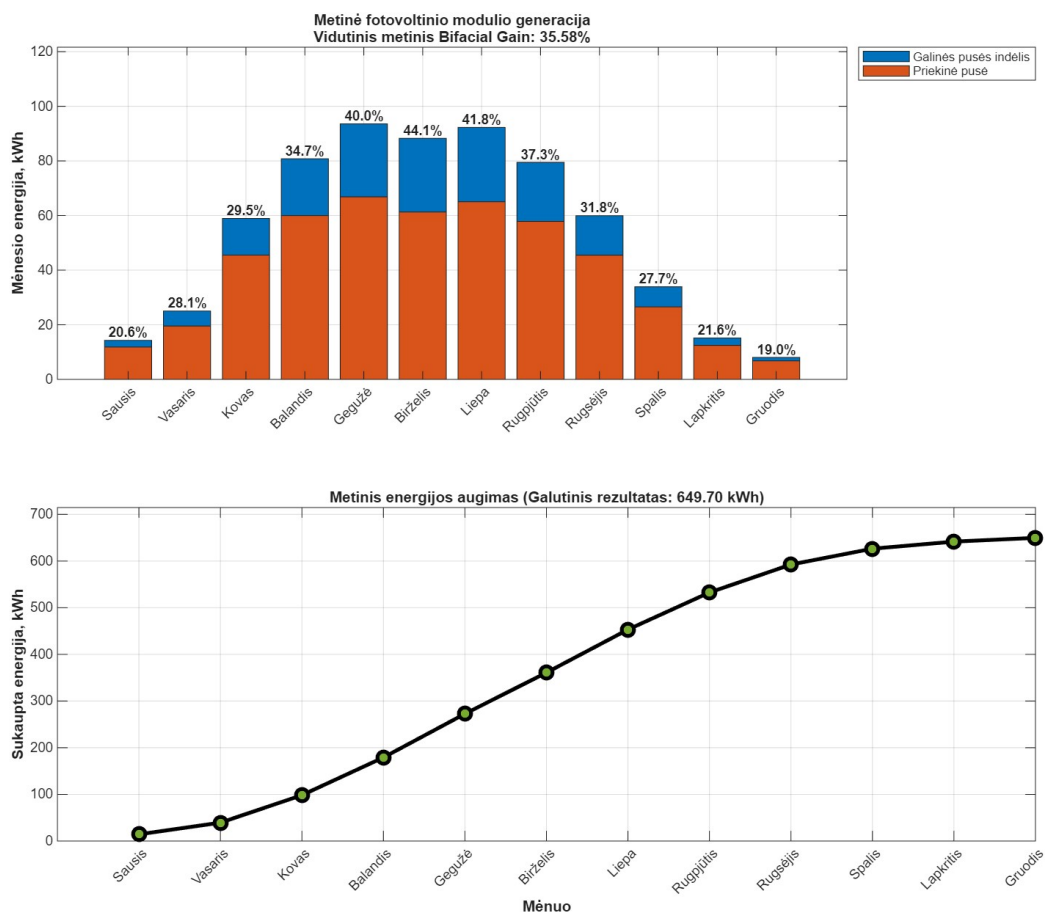
Simuliuojant skirtingus paviršius svarbu įvertinti jų skaitį ilguoju laikotarpiu, todėl pamodeliuojamas albedo 0,863, kaip 4.2 poskyryje, kad būtų galima analizuoti baltosios plėvelės energetinį atsiperkamumą, lyginant su žolės paviršiumi. Metinis P(t) grafikas pavaizduotas 40 paveikslėlyje.



**40 pav.** Visų kalendorinių metų P(t) charakteristika prie albedo 0,863 vertės

Padidinus albedo prie baltos plėvelės, sniego pagrindo paviršiaus albedo verčių, matomas ženklus galinės pusės generacijos priaugis. Bendrai viso fotomodulio generuojama galia ženkliai pakyla, momentinės galios pikas pasiekiamas birželio mėnesį, vasarą, ir siekia 649,7 W. Mėlynos kreivės visais mėnesiais pakyla priklausomai nuo temperatūros nuostolių ir saulės padėties, debesuotumo. Vidutinė dienos galia 158,71 W ir yra 34,55 W daugiau nei prie albedo 0,202.

Išskaidytos mėnesiais generacijos rezultatai pateikiami 41 paveikslėlyje, juos galima palyginti su 0,202 albedo verčių simuliacija.



**41 pav.** Mėnesiais išskaidytas ir visų kalendorinių metų suminis sugeneruotos energijos kWh grafikas prie albedo 0,863 vertės

Metinė suminė viso fotovoltinio modulio generacija iš 513,14 kWh pakilo į 649.7 kWh, tai yra 21,01 % skirtumas. Vidutinis metų galinės pusės indėlis prie 0,863 albedo pasiekia 35,58 %, kuomet albedo 0,202 iteracija pasiekė tik 7,08 %. Analizuojant birželio mėnesio rezultatus matomas didžiausias galinės pusės indėlis 44,1 %, dėl palankiausios temperatūros ir apšvietos santykio, kuris daro įtaką ir šiluminiam nuostoliams.

Daugiau skirtingų iteracijų naudojant skirtingas RGB–Albedo vertes pateikiama 15 lentelėje.










**15 lentelė.** Kalendorinių metų, dinamiško modelio su RGB–Albedo valdikliu, simuliuojant realybės atitikmenis, modeliavimo rezultatai

Fizinė spalva	Pav.	RGB vertė	Albedo $\alpha$ vertė	Visos panelės maks. galia $P_{max}$ , W	Suminė metų sugeneruojama energija, $E_{sum}$ , kWh	Vid. galinės pusės indėlis, $BG_{vid}$ , %	Vid. galinės pusės per metus sugeneruojama energija, $E_{vid\_galo}$ , kWh
X	Tik priekinės pusės generacija	X	X	459,778	479,2	X	X
	Naujo asfalto atitikmuo	23, 23, 23	0,09	480,019	493,27	2,94	14,502
	Dėvėto, nuplauto asfalto atitikmuo	46, 46, 46	0,18	500,253	509,54	6,33	32,254
	Molio atitikmuo	72, 38, 28	0,184	501,164	510,24	6,48	33,064
	Žolės atitikmuo	45, 65, 0	0,202	505,095	513,64	7,19	36,931
	Dviračių tako atitikmuo	102, 51, 51	0,26	518,147	524,61	9,48	49,733
	Šaligatvio atitikmuo	85, 85, 85	0,333	534,663	539,07	12,49	67,33
	Žvyro atitikmuo	125, 115, 80	0,447	560,388	561,96	17,27	97,05
	Smėlio atitikmuo	160, 140, 110	0,56	585,664	585,27	22,14	129,579
	Šviesios plėvelės, sniego atitikmuo	220, 220, 220	0,863	654,587	649,7	35,58	231,163

Analizuojant kalendorinių metų modeliavimo rezultatus, matomas didžiausias 35,58 % vidutinis galinės pusės indėlis šviesios plėvelės, sniego atitikmens modeliavime. Lyginant su įprastiniu, to paties gamintojo ir nominalo vienpusiu fotovoltiniu moduliu, suminė sugeneruota energija gali išaugti per 170,5 kWh, dėl teoriškai teisingai pasirinktos montavimo pagrindo paviršiaus spalvos. Taip pat matomas metų vidutinis galinės pusės indėlio išsilyginimas, vertinant likusiuosius metų sezonus bei žiemos 23,68 % ir vasaros 41,24 %. Metinis 35,58 % vidutinis galinės pusės generacijos prieaugis prie 0,863 albedo yra artimas praktikos rezultatus apžvelgiančių organizacijų rekomendacijoms ir tyrimams.

Toliau, atsitiktinai pasirinktų spalvų, RGB–Albedo valdikliu sugeneruotų albedo verčių, dinamiškame modelyje, iteruojant kalendorinius metus, rezultatai pateikiami 16 lentelėje.

**16 lentelė.** Kalendorinių metų dinamiško modelio su RGB–Albedo valdikliu naudojant atsitiktinai pasirinktų spalvų reikšmes modeliavimo rezultatai

Fizinė spalva	Pav.	RGB vertė	Albedo $\alpha$ vertė	Visos panelės maks. galia $P_{max}$ , W	Suminė metų sugeneruojama energija, $E_{sum}$ , kWh	Vid. galinės pusės indėlis, $BG_{vid}$ , %	Vid. galinės pusės per metus sugeneruojama energija, $E_{vid\_galo}$ kWh
X	Tik priekinės pusės generacija	X	X	459,778	479,2	X	X
	Raudona	255, 0, 0	0,299	526,903	532,28	11,08	58,977
	Oranžinė	255, 127, 0	0,591	593,09	591,91	23,52	139,217
	Geltona	255, 255, 0	0,886	659,996	654,58	36,6	239,576
	Žalia	0, 255, 0	0,587	592,112	591,15	23,36	138,093
	Cyan	0, 255, 255	0,701	617,897	615,01	28,34	174,294
	Mėlyna	0, 255, 0	0,114	485,345	497,44	3,81	18,952
	Violetinė	127, 0, 255	0,263	518,853	525,26	9,61	50,477
	Magenta	255, 0, 255	0,413	552,673	555,11	15,84	87,929
	Balta	255, 255, 255	0,999	686,204	679,51	41,8	284,035

Metinės simuliacijos rezultatuose, praktiškai palankiausios geltonos pagrindo paviršiaus spalvos, suminė per metus sugeneruota energija yra 654,58 kWh ir nuo šviesios plėvelės pagrindo paviršiaus atitiktens sugeneruota energija skiriasi per 4,503 kWh. Tai nėra palankus ir žymus rezultatas, nes išgauti artimą baltai spalvai paviršių, pramonėje yra paprasčiau. Baltos spalvos analizuoti negalima, nes tai yra realybėje neišgaunama spalva, medžiaga, 0,999 albedo yra tik teorinis taškas patikrinti modelio galimybes. Tokiomis sąlygomis galima pasiekti 41,8 % metų vidutinį galinės pusės indėlį ir išgauti 679,51 kWh energijos.

## Išvados

1. Sudarytas *MATLAB–Simulink–Simscape* mišrus, dinamiškas modelis, kuris leidžia keisti albedo vertes nuo 0 iki 1 per RGB išskiriamos šviesos teorinį koeficientą, susimuliuotomis realistiškoms aplinkos sąlygomis, albedo dedamąją naudojant išskaidytos (realistiškos) apšvietos funkcijoje.
2. Susimuliuoti trys scenarijai, realistiškoms sąlygomis veikiant *Jinko Solar Tiger JKM450M 7RL3 TV* panelę, kai RGB-Albedo valdikliu pritaikytos praktikoje dažniausiai pasitaikančios albedo vertės 0,09–0,863. Nustatyta, kad minėtai paneli dirbant 24 h geriausios klimato atžvilgiu dienos sąlygomis, vidutinis galinės pusės indėlis, priklausomai nuo paviršiaus kito nuo 2,25 % iki 35,73 %. Atliekant vasaros ir žiemos sezonų modeliavimą, su tomis pačiomis albedo vertėmis, žiemą, prie didžiausios albedo vertės 0,863 sugeneruota 48,42 kWh, iš kurių 23,68 % sugeneravo galinė pusė, o vasarą sugeneruota 261,18 kWh, kai galinė pusė sugeneravo 41,24%. Visų kalendorinių metų simuliacijoje,  $BG_{vid}$ , priklausomai nuo paviršiaus, svyravo 2,94–35,58 %.
3. *Jinko Solar Tiger JKM450M 7RL3 TV* panelę veikiant identiškoms aplinkos sąlygomis, modelyje į RGB-Albedo valdiklį paduodant atsitiktinai pasirinktų spalvų RGB vertes, geriausios metų dienos modeliavime, pagrindo spalvos, kaip teorinė geltona pasiekia 36,83 % galinės pusės indėlį. Modeliuojant vasaros ir žiemos sezonus, naudojant tas pačias pagrindo paviršiaus spalvas, gaunami galinės pusės indėliai yra aukštesni nei 24,36 % žiemą, ir 42,37 % vasarą. Tyrime mažiausiai atspindinti pagrindo paviršiaus spalva – mėlyna, kurią modeliuojant, galinės pusės indėlis pasiekia tik 1,97–4,57 %. Metinėje generacijoje tendencijos išlieka analogiškos, modeliuojant su geltonos spalvos pagrindo paviršiumi, galinė pusė vidutiniškai sugeneruoja 36,6 % visos energijos, o naudojant mėlyną paviršių 3,81 %.
4. Atlikus tyrimo metu gautų rezultatų analizę, nustatyta, kad kuo pagrindo paviršiaus spalva yra arčiau baltosios, tiriamų spalvų spektre, tuo suminė galinės pusės apšvieta  $G_{rear\_suminė}$  ir vidutinė galinės pusės generacija  $E_{vid\_galo}$  yra didesnės, tai nustatoma tiriant su realių, teoriškai ištirtų albedo verčių atitikmenimis, ir nustatoma per  $BG_{vid}$  ir  $P_{max}$  tiesines priklausomybes nuo albedo. Nors vasarą patiriami didesni terminiai nuostoliai, tačiau vertinant visas atsitiktinių spalvų ir praktinių paviršių variacijas, tarp žiemos ir vasaros sezonų,  $E_{vid\_galo}$  skiriasi vidutiniškai 10 kartų, o  $E_{sum}$  daugiau nei 5 kartus. Didėjant albedo,  $BG_{vid}$  koeficientas tarp vasaros ir žiemos rodo mažėjančią tendenciją, kas parodo, jog žiemą didėjant albedo, galinės pusės indėlis kyla greičiau ir efektyviau nei vasarą, tačiau šis reiškinys metų eigoje išsilygina ir didelės reikšmės ilgalaikėje perspektyvoje neturi.

## Informacijos šaltinių sąrašas

1. ZHONG, J.; ZHANG, W.; XIE, L.; ZHAO, O.; WU, X. ir kt. Development and challenges of bifacial photovoltaic technology and application in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, t. 187 (2023), p. 113706. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032123005634>.
2. Emmvee. *What are the Advantages of Bifacial Solar Panels*. Emmvee, November 17, 2025. Prieiga per internetą: <https://www.emmveepv.com/blogs/advantages-of-bifacial-solar-panels>.
3. Joshua S. Stein, Sandia National Laboratories, USA Christian Reise, Fraunhofer ISE, Freiburg, Germany Johanna Bonilla Castro, TÜV Rheinland, Cologne, Germany Gabi Friesen, SUPSI, Switzerland Giosuè Maugeri, RSE, Italy Elías Urrejola, ATAMOSTEC, Chile Samuli Ranta, TUAS, Finland. *Bifacial Photovoltaic Modules and Systems: Experience and Results from International Research and Pilot Applications 2021*. IEA PVPS. April, 2021. Prieiga per internetą: [https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/04/IEA-PVPS-T13-14\\_2021-Bifacial-Photovoltaic-Modules-and-Systems-report.pdf](https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/04/IEA-PVPS-T13-14_2021-Bifacial-Photovoltaic-Modules-and-Systems-report.pdf) [žiūrėta May 2, 2026].
4. GYTIS PETRAUSKAS, V. A. *Saulės energijos naudojimas elektrai gaminti*. KTU Leidykla „Technologija“, 2012. Prieiga per internetą: <https://ebooks.ktu.edu/product/555818> [žiūrėta May 2, 2026].
5. ROSA-CLOT, M. ir TINA, G. M. Chapter 2 - Photovoltaic Electricity. Iš: *Submerged and Floating Photovoltaic Systems*, p. 13–32. Academic Press, 2018. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128121498000028>.
6. VACLOVAS BARTKEVIČIUS, A. D. *Taikomoji elektronika*. KTU Leidykla „Technologija“, 2012. Prieiga per internetą: <https://ebooks.ktu.edu/product/555818> [žiūrėta May 2, 2026].
7. SHAKER, L. M.; AL-AMIERY, A. A.; HANOON, M. M.; AL-AZZAWI, W. K. ir KADHUM, A. A. H. Examining the influence of thermal effects on solar cells: a comprehensive review. *Sustainable Energy Research*, t. 11 (2024), nr. 1, p. 6. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1186/s40807-024-00100-8> [žiūrėta May 2, 2026].
8. SINGH, P. ir RAVINDRA, N. M. Temperature dependence of solar cell performance—an analysis. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, t. 101 (2012), p. 36–45. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024812000931> [žiūrėta May 2, 2026].
9. WANG, L.; ZHOU, Z.; ZHANG, T.; CHEN, X. ir LU, M. High Fill Factors of Si Solar Cells Achieved by Using an Inverse Connection Between MOS and PN Junctions. *Nanoscale Research Letters*, t. 11 (2016), p. 453. Prieiga per internetą: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5056919/> [žiūrėta May 2, 2026].
10. DUBEY, S.; SARVAIYA, J. N. ir SESHADRI, B. Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World – A Review. *Energy Procedia*, t. 33 (2013), p. 311–321. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610213000829> [žiūrėta May 2, 2026].

11. Mohamed Amer Chaaban. *AE 868: Commercial Solar Electric Systems*. PennState College of Earth and Mineral Sciences: . Prieiga per internetą: <https://courses.ems.psu.edu/ae868/node/878> [žiūrėta May 2, 2026].
12. MOUHIB, E.; MICHELI, L.; ALMONACID, F. M. ir FERNÁNDEZ, E. F. Overview of the Fundamentals and Applications of Bifacial Photovoltaic Technology: Agrivoltaics and Aquavoltaics. *Energies*, t. 15 (2022), nr. 23, p. 8777. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/23/8777> [žiūrėta May 2, 2026].
13. PATTELATH, M. S.; GIRIPUNJE, S. M. ir VERMA, A. K. A Review of Photovoltaic Cell Generations and Simplified Overview of Bifacial Photovoltaic Cell Technology. *Applied Solar Energy*, t. 59 (2023), nr. 5, p. 621–646. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.3103/S0003701X23600911> [žiūrėta May 2, 2026].
14. LIANG, T. S.; PRAVETTONI, M.; DELINE, C.; STEIN, J. S.; KOPECEK, R. ir kt. A review of crystalline silicon bifacial photovoltaic performance characterisation and simulation. *Energy & Environmental Science*, t. 12 (2019), nr. 1, p. 116–148. Prieiga per internetą: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/ee/c8ee02184h> [žiūrėta May 2, 2026].
15. BADRAN, G. ir DHIMISH, M. A comparative study of bifacial versus monofacial PV systems at the UK's largest solar plant. *Clean Energy*, t. 8 (2024), nr. 4, p. 248–260. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1093/ce/zkae043> [žiūrėta May 2, 2026].
16. MOUHIB, E.; MICHELI, L.; ALMONACID, F. M. ir FERNÁNDEZ, E. F. Overview of the Fundamentals and Applications of Bifacial Photovoltaic Technology: Agrivoltaics and Aquavoltaics. *Energies*, t. 15 (2022), nr. 23, p. 8777. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/23/8777> [žiūrėta May 2, 2026].
17. KOPECEK, R. ir LIBAL, J. Towards large-scale deployment of bifacial photovoltaics. *Nature Energy*, t. 3 (2018), nr. 6, p. 443–446. Prieiga per internetą: <https://www.nature.com/articles/s41560-018-0178-0> [žiūrėta May 2, 2026].
18. DA SILVA, M. K.; GUL, M. S. ir CHAUDHRY, H. Review on the Sources of Power Loss in Monofacial and Bifacial Photovoltaic Technologies. *Energies*, t. 14 (2021), nr. 23, p. 7935. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/23/7935> [žiūrėta May 2, 2026].
19. MISHRA, S. *A Complete Guide on Bifacial Solar Panels*. [2025-07-28]. Prieiga per internetą: <https://solarsquare.in/blog/bifacial-solar-panel/> [žiūrėta May 2, 2026].
20. SUN, X.; KHAN, M. R.; DELINE, C. ir ALAM, M. A. Optimization and performance of bifacial solar modules: A global perspective. *Applied Energy*, t. 212 (2018), p. 1601–1610. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917317567> [žiūrėta May 2, 2026].
21. DINCER, F. ir OZER, E. Optimization of Rear-Side Energy Contribution in Bifacial PV Panels: A Parametric Analysis on Albedo, Tilt, Height, and Mounting Configuration. *Energies*, t. 18 (2025), nr. 16, p. 4443. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/16/4443> [žiūrėta May 2, 2026].

22. ALMARSHOUD, A. F.; ABDEL-HALIM, M. A.; ALMASRI, R. A. ir ALSHWAIREKH, A. M. Experimental Study of Bifacial Photovoltaic Module Performance on a Sunny Day with Varying Backgrounds Using Exergy and Energy Analysis. *Energies*, t. 17 (2024), nr. 21, p. 5456. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/21/5456> [žiūrėta May 2, 2026].
23. *Bifacial Solar is Ready for Prime Time - Knowledge - DS New Energy*. Jul 21, 2020. Prieiga per internetą: <https://www.dsneg.com/info/bifacial-solar-is-ready-for-prime-time-47808817.html> [žiūrėta May 2, 2026].
24. HALWANI, S.; HAMID, A.; AHMAD, F. F. ir HUSSEIN, M. Comparative analysis of experimental and modelling of bifacial PV panel: a step towards digital twin. *International Journal of Thermofluids*, t. 29 (2025), p. 101377. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666202725003234> [žiūrėta May 2, 2026].
25. PELAEZ, S. A.; DELINE, C.; MACALPINE, S. M.; MARION, B.; STEIN, J. S. ir kt. Comparison of Bifacial Solar Irradiance Model Predictions With Field Validation. *IEEE Journal of Photovoltaics*, t. 9 (2019), nr. 1, p. 82–88. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8534404> [žiūrėta May 2, 2026].
26. HUANG, X.; WANG, H.; HAN, H.; GUO, T.; NIU, H. ir kt. Measurement reproducibility of STC-corrected maximum power of photovoltaic modules under dynamic outdoor conditions: definition, calculation, and application in power degradation evaluation. *Renewable Energy* (2026), p. 125870. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148126006968> [žiūrėta May 2, 2026].
27. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *Terrestrial Photovoltaic (Pv) Modules –Design Qualification and Type Approval.*, -02, 2021. Prieiga per internetą: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/101264/158b8ce0f27040268e421132bed50126/IEC-61215-1-2021.pdf> [žiūrėta May 2, 2026].
28. *Iec Ts 60904-1-2:2024*. [2024. Prieiga per internetą: <https://webstore.iec.ch/en/publication/71709> [žiūrėta May 2, 2026].
29. MUÑOZ-CERÓN, E.; MORENO-BUESA, S.; LELOUX, J.; AGUILERA, J. ir MOSER, D. Evaluation of the bifaciality coefficient of bifacial photovoltaic modules under real operating conditions. *Journal of Cleaner Production*, t. 434 (2024), p. 139807. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623039653> [žiūrėta May 2, 2026].
30. *Power Rating and Qualification of Bifacial PV Modules.*, 2018. Prieiga per internetą: <https://www.pv-tech.org/technical-papers/power-rating-and-qualification-of-bifacial-pv-modules/> [žiūrėta May 2, 2026].
31. MathWorks. *Photovoltaic Solar Cell – Solar-Induced Current*. [2026. Prieiga per internetą: <https://www.mathworks.com/help/sps/ref/solarcell.html>.

32. BADER, S.; MA, X. ir OELMANN, B. One-diode photovoltaic model parameters at indoor illumination levels – A comparison. *Solar Energy*, t. 180 (2019), p. 707–716. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X19300623> [žiūrėta May 2, 2026].
33. BAKER, S. *The Pointer's Gamut - the Coverage of Real Surface Colors by RGB Color Spaces and Wide Gamut Displays.*, -02-19, 2014. Prieiga per internetą: [https://tftcentral.co.uk/articles/pointers\\_gamut](https://tftcentral.co.uk/articles/pointers_gamut) [žiūrėta May 2, 2026].
34. RAZONGLES, G.; SICOT, L.; JOANNY, M.; GERRITSEN, E.; LEFILLASTRE, P. ir kt. Bifacial Photovoltaic Modules: Measurement Challenges. *Energy Procedia*, t. 92 (2016), p. 188–198. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216304830> [žiūrėta May 2, 2026].
35. JINKOSOLAR HOLDING CO., L. *Jingo Solar Tiger JKM450M 7RL3 TV Datasheet*. JinkoSolar Holding Co., Ltd., 2020. Prieiga per internetą: <https://www.jinkosolar.com/uploads/TR%20JKM445-465M-7RL3-TV-A1.1-EN.pdf> [žiūrėta May 2, 2026].
36. SUN, X.; KHAN, M. R.; DELINE, C. ir ALAM, M. A. Optimization and performance of bifacial solar modules: A global perspective. *Applied Energy*, t. 212 (2018), p. 1601–1610. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917317567> [žiūrėta May 2, 2026].