



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Vandeniui aušinamų saulės modulių efektyvumo tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Lukas Benediktas Kolgovas

Projekto autorius

Asist. Artūras Baronas

Vadovas

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Vandeniui aušinamų saulės modulių efektyvumo tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

Lukas Benediktas Kolgovas

Projekto autorius

Asist. Artūras Baronas

Vadovas

Prof. Audrius Jonaitis

Recenzentas

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Lukas Benediktas Kolgovas

Vandenių aušinamųjų saulės modulių efektyvumo tyrimas

Akademinių sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autorius 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.

Lukas Benediktas Kolgovas

Patvirtinta elektroniniu būdu

Kolgovas, Lukas, Benediktas. Vandeniui aušinamų saulės modulių efektyvumo tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas asist. dr. Artūras Baronas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: elektra, saulės moduliai, aušinimas vandeniu, saulės modulių efektyvumas.

Kaunas, 2024. 81 p.

Santrauka

Baigiamajame magistro darbe yra tiriamas vandeniui aušinamų saulės modulių efektyvumas. Tyrimo metu modeliuojamas aušinamų ir neaušinamų saulės modulių darbas ant sutapdinto stogo ir verifikuojami modeliavimo rezultatai pagal bandymo metu gautus rezultatus.

Apžvalginėje dalyje yra išnagrinėta šilumos įtaka saulės modulių efektyvumui ir apžvelgtos saulės modulių aušinimo technologijos bei jų įtaka saulės modulių efektyvumui.

Atliekant sistemos modeliavimą yra keičiamas saulės modulių posvyrio į horizontą kampas, azimuto kryptis bei vandens rezervuaro tūris. Atlikus iteracinius skaičiavimus įvertinama metinė aušinimo vandeniui įtaka saulės modulių efektyvumui, elektros energijos generacijai įvertinant vandens siurblio elektros energijos sąnaudas, efektyvumo skirtumui tarp aušinamų ir neaušinamų saulės modulių. Taip pat, įvertinama bendra saulės modulių aušinimo nauda.

Atlikus bandymą verifikuotas *PVsyst* naudojamo meteorologinio paketo atitikimas faktiniams Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos pateiktiems duomenims. Atliktas *PVsyst* saulės modulių elektros generacijos verifikavimas pagal 5 atsitiktinių saulės elektrinių 3 metų elektros energijos generacijos istorinių duomenų analizę. Galiausiai atliktas aušinamų SM modeliavimo rezultatų verifikavimas pagal bandymo metu surinktus duomenis 2023 metų rugpjūčio 6 ir rugsėjo 7 dienomis.

Kolgovas, Lukas, Benediktas. Efficiency Analysis of Water-Cooled Solar Panels. Master's Final Degree Project / supervisor assist. dr. Artūras Baronas; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: electricity, solar panels, water cooling, solar panel efficiency.

Kaunas, 2024. 81 p.

Summary

The final thesis investigates the efficiency of water-cooled solar modules by modeling the operation of cooled and uncooled solar modules on a pitched roof and conducting a test to validate the modeling results obtained.

The review section examines the heat impact on the efficiency of solar modules and reviews solar module cooling technologies and their impact on solar module efficiency. During system modeling, the angle of inclination of the solar modules towards the horizon, azimuth direction, and volume of the water reservoir are varied. After performing iterative calculations, the annual cooling water impact on the efficiency of solar modules is evaluated, considering the electricity generation while assessing the energy consumption of the water pump, the efficiency difference between cooled and uncooled modules. Additionally, the overall cooling benefit is assessed.

Upon conducting the test, the correspondence of the meteorological package used by *PVsyst* software to the actual data provided by the *Lithuanian Hydrometeorological Service* is validated. Furthermore, the *PVsyst* validation of solar module electricity generation is based on the analysis of 3 years of historical data from 5 random solar power plants. Finally, the validation of the results of modeling cooled solar modules is performed based on data collected during the test on August 6 and September 7 in a year 2023.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Santrumpų ir terminų sąrašas	11
Įvadas.....	12
1. Teorinė dalis.....	15
1.1. Fotovoltinis efektas	15
1.2. Fotovoltiniai elementai ir saulės moduliai.....	16
1.3. Temperatūros įtaka fotovoltinių elementų ir saulės modulių efektyvumui.....	20
1.4. Saulės modulių aušinimo metodai.....	23
1.4.1. Aktyvinis aušinimas oru	24
1.4.2. Aktyvinis galinės saulės modulių plokštumos aušinimas skysčiu panaudojant uždarą kontūrą.....	25
1.4.3. Aktyvinis priekinės ar galinės saulės modulio plokštumos aušinimas skysčiu panaudojant purkštukus.....	26
1.4.4. Pagrindinių aktyvinių saulės modulio aušinimo būdų apibendrinimas	27
2. „PVsyst“ ir šiluminių skaičiavimų modelis	31
2.1. „PVsyst“ programinis paketas	31
2.1.1. Vieno diodo modelis.....	31
2.1.2. Kintamųjų nustatymas	33
2.1.3. Kuomet žinomi pilnos I/U kreivės matavimų rezultatai.....	33
2.1.4. Kuomet žinomi tik duomenys iš saulės modulio techninių specifikacijų	34
2.1.5. Kiti kintamieji.....	34
2.1.6. Temperatūrinės korekcijos	35
2.1.7. Dirbtinio meteorologinių duomenų paketo formavimas	36
2.2. Šiluminis modelis	37
2.2.1. Šiluminių skaičiavimų modelis	37
2.2.2. Saulės modulių aušinimo poveikio įvertinimo skaičiavimai.....	43
3. Tyrimas.....	45
3.1. Tyrimo eiga	45
3.2. Azimuto ir posvyrio kampo įtaka	46
3.2.1. Aušinamo saulės modulio elektros generacija ir elektrinis efektyvumas.....	46
3.2.2. Aušinamo saulės modulio efektyvumo ir aušinimo sistemos naudos pokytis	51
3.3. Vandens rezervuaro įtaka	55
3.3.1. Aušinamo saulės modulio elektros generacija ir elektrinis efektyvumas.....	55
3.3.2. Aušinamo saulės modulio efektyvumo ir aušinimo sistemos naudos pokytis	59
3.4. Verifikavimas	63
3.4.1. „PVsyst“ modeliuojamos saulės modulio generacijos verifikavimas pagal faktinius duomenis.....	63
3.4.2. „PVsyst“ naudojamo meteorologinio paketo apšvietos į horizontalųjį paviršių verifikavimas	64
3.4.3. „PVsyst“ naudojamo meteorologinio paketo oro temperatūros verifikavimas	64
3.4.4. Duomenų surinkimas atliekant eksperimentą.....	65
3.4.5. Aušinamo saulės modulio generacijos verifikavimas	67
3.4.6. Aušinamo saulės modulio efektyvumo verifikavimas	68

3.4.7. Aušinamo ir neaušinamo saulės modulio efektyvumo skirtumo verifikavimas.....	70
3.4.8. Aušinamo ir neaušinamo saulės modulio efektyvumo skirtumo verifikavimas.....	71
Išvados	74
Literatūros sąrašas	75
Priedai.....	82
1 priedas. Saulės modulių azimuto ir posvyrio kampo įtakos su 50 l tūrio rezervuaru modeliavimo rezultatų duomenų paketas	83
2 priedas. Saulės modulių azimuto ir posvyrio kampo įtakos su 200 l tūrio rezervuaru modeliavimo rezultatų duomenų paketas	84
3 priedas. Saulės modulių azimuto ir posvyrio kampo įtakos su 800 l tūrio rezervuaru modeliavimo rezultatų duomenų paketas	85
4 priedas. Rugsėjo 7 dienos kontrolinio ir modeliuojamo neaušinamo saulės modulio rezultatų duomenų paketas verifikavimui	86
5 priedas. Rugsėjo 8 dienos kontrolinio ir modeliuojamo neaušinamo saulės modulio rezultatų duomenų paketas verifikavimui	87
7 priedas. Rugsėjo 7 dienos kontrolinio aušinamo saulės modulio rezultatų duomenų paketas verifikavimui	88
8 priedas. Rugsėjo 7 dienos modeliuojamo aušinamo saulės modulio rezultatų duomenų paketas verifikavimui	89
9 priedas. Rugsėjo 8 dienos kontrolinio aušinamo saulės modulio rezultatų duomenų paketas verifikavimui	90
10 priedas. Rugsėjo 8 dienos modeliuojamo aušinamo saulės modulio rezultatų Rugsėjo 8 dienos verifikavimui	91

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Fotovoltiniuose elementuose dažniausiai naudojamos medžiagos	15
1.2 lentelė. SM kainos ir efektyvumo kitimas laike	18
1.3 lentelė. Apžvelgtų mokslinių straipsnių rezultatų suvestinė	27
2.1 lentelė. Šiluminiame modelyje naudojami fiksuoti dydžiai ir jų vertės	42
3.1 lentelė. 50 l rezervuaro varianto $E_{SM,p}$ ir $\eta_{e,fund}$ procentinis skirtumas pagal SM azimuto ir posvyrio kampą	47
3.2 lentelė. 200 l rezervuaro varianto $E_{SM,p}$ ir $\eta_{e,fund}$ procentinis skirtumas pagal SM azimuto ir posvyrio kampą	49
3.3 lentelė. 800 l rezervuaro varianto $E_{SM,p}$ ir $\eta_{e,fund}$ procentinis skirtumas pagal SM azimuto ir posvyrio kampą	50
3.4 lentelė. 50 l rezervuaro varianto $\Delta\eta$ ir N_a procentinis skirtumas pagal SM azimuto ir posvyrio kampą	52
3.5 lentelė. 50 l rezervuaro varianto N_e , N_s , N_a ir E_{SM} verčių procentinis skirtumas	52
3.6 lentelė. 200 l rezervuaro varianto $\Delta\eta$ ir N_a procentinis skirtumas pagal SM azimuto ir posvyrio kampą	53
3.7 lentelė. 800 l rezervuaro varianto $\Delta\eta$ ir N_a procentinis skirtumas pagal SM azimuto ir posvyrio kampą	54
3.8 lentelė. 0° azimuto varianto $E_{SM,p}$ ir $\eta_{e,fund}$ procentinis skirtumas pagal rezervuaro tūrį	56
3.9 lentelė. -45° azimuto varianto $E_{SM,p}$ ir $\eta_{e,fund}$ procentinis skirtumas pagal rezervuaro tūrį	57
3.10 lentelė. -90° azimuto varianto $E_{SM,p}$ ir $\eta_{e,fund}$ procentinis skirtumas pagal rezervuaro tūrį	59
3.11 lentelė. 0° azimuto varianto $\Delta\eta$ ir N_a procentinis skirtumas priklausomai nuo rezervuaro tūrio	60
3.12 lentelė. -45° azimuto varianto $\Delta\eta$ ir N_a procentinis skirtumas priklausomai nuo rezervuaro tūrio	61
3.13 lentelė. -90° azimuto varianto $\Delta\eta$ ir N_a procentinis skirtumas priklausomai nuo rezervuaro tūrio	62
3.14 lentelė. „PVsyst“ modeliuojamos SM generacijos verifikavimas	63
3.15 lentelė. „PVsyst“ naudojamo meteorologinio paketo apšvietos į horizontalųjį paviršių verifikavimas	64
3.16 lentelė. „PVsyst“ naudojamo meteorologinio paketo vidutinės oro temperatūros verifikavimas	64
3.17 lentelė. Pagrindiniai komponentai naudojami eksperimente	65
3.18 lentelė. Modeliuojamų ir kontrolinių suminių $E_{SM,p}$ verčių palyginimas	68
3.19 lentelė. Modeliuojamų ir kontrolinių vidutinių $\eta_{e,fund}$ verčių palyginimas	70
3.20 lentelė. Modeliuojamų ir kontrolinių vidutinių $\Delta\eta$ verčių palyginimas	71
3.21 lentelė. Modeliuojamų ir kontrolinių vidutinių N_a verčių palyginimas	73

Paveikslų sąrašas

1 pav. Pagrindinių AEI bei anglies ir gamtinių dujų elektrinių suminės pasaulinės įrengtosios galios dalies kitimas laike procentais.....	13
1.1 pav. FE supaprastinta struktūra	14
1.2 pav. Fotovoltinio elemento I/U charakteristika ir užpildymo faktorius	17
1.3 pav. Gaminamų SM efektyvumo kitimas laike	18
1.4 pav. PERC technologijos FE apdorojimas	19
1.5 pav. Gaminamų SM kiekio pasiskirstymas pagal FE technologiją	20
1.6 pav. FE išilimą sukeliančių veiksnių įtaka pagal technologijos tipą	21
1.7 pav. FE I/U kreivės prie skirtingų FE temperatūrų bei pastovios apšvietos	22
1.8 pav. FE P/U kreivės prie skirtingų FE temperatūrų bei pastovios apšvietos.....	22
1.9 pav. Saulės modulių aušinimo technologijų medis	24
1.10 pav. SM sudarančių FE tipas, pagal panaudojimo moksliniuose tyrimuose dažnumą.....	29
1.11 pav. SM aušinančio fluido tipas, pagal panaudojimo moksliniuose tyrimuose dažnumą	29
2.1 pav. Vieno diodo modelio principinė schema	31
2.2 pav. SM I/U charakteristika.....	33
2.3 pav. R_s įtaka SM I/U kreivei.....	34
2.4 pav. SM P_{mgt} priklausomybė nuo FE temperatūros	36
2.5 pav. SM P_{mgt} korekcijos.....	36
2.6 pav. Principinė šiluminio modelio schema.....	37
2.7 pav. Aušinimo kanalo ir jo diferencialinio ilgio schema.....	37
3.1 pav. Loginė „PVsyst“ ir šiluminio modelio schema	46
3.2 pav. 50 l rezervuaro varianto $\Delta\eta_{e,fund}$ ir $E_{SM,p}$ pokyčio prie skirtingų SM posvyrio kampų ir azimuto krypčių rezultatai	47
3.3 pav. G ir $E_{SM,p}$ pokytis prie 50 l tūrio rezervuaro ir skirtingų SM posvyrio bei azimuto kampų	48
3.4 pav. 200 l rezervuaro varianto $\Delta\eta_{e,fund}$ ir $E_{SM,p}$ pokyčio prie skirtingų SM posvyrio kampų ir azimuto krypčių rezultatai	49
3.5 pav. 800 l rezervuaro varianto $\Delta\eta_{e,fund}$ ir $E_{SM,p}$ pokyčio prie skirtingų SM posvyrio kampų ir azimuto krypčių rezultatai	50
3.6 pav. 50 l rezervuaro varianto $\Delta\eta$ ir N_a pokyčio prie skirtingų SM posvyrio kampų ir azimuto krypčių rezultatai	51
3.7 pav. 200 l rezervuaro varianto $\Delta\eta$ ir N_a pokyčio prie skirtingų SM posvyrio kampų ir azimuto krypčių rezultatai	53
3.8 pav. 800 l rezervuaro varianto $\Delta\eta$ ir N_a pokyčio prie skirtingų SM posvyrio kampų ir azimuto krypčių rezultatai	54
3.9 pav. 0° azimuto $\Delta\eta_{e,fund}$ ir $E_{SM,p}$ pokyčio prie skirtingų rezervuaro tūrių rezultatai.....	56
3.10 pav. -45° azimuto $\Delta\eta_{e,fund}$ ir $E_{SM,p}$ pokyčio prie skirtingų rezervuaro tūrių rezultatai	57
3.11 pav. -90° azimuto $\Delta\eta_{e,fund}$ ir $E_{SM,p}$ pokyčio prie skirtingų rezervuaro tūrių rezultatai	58
3.12 pav. 0° azimuto varianto $\Delta\eta$ ir N_a pokyčio prie skirtingų rezervuaro tūrių rezultatai.....	60
3.13 pav. -45° azimuto varianto $\Delta\eta$ ir N_a pokyčio prie skirtingų rezervuaro tūrių rezultatai	61
3.14 pav. -90° azimuto varianto $\Delta\eta$ ir N_a pokyčio prie skirtingų rezervuaro tūrių rezultatai	62
3.15 pav. Eksperimento principinė schema	66
3.16 pav. Aušinamo SM kontrolinė ir modeliujama $E_{SM,p}$ rugpjūčio 6 dieną	67
3.17 pav. Aušinamo SM kontrolinė ir modeliujama $E_{SM,p}$ rugsėjo 7 dieną.....	68

3.18 pav. Aušinamo SM kontrolinė ir modeliuojama $\eta_{e,fund}$ rugpjūčio 6 dieną	69
3.19 pav. Aušinamo SM kontrolinė ir modeliuojama $\eta_{e,fund}$ rugsėjo 7 dieną	69
3.20 pav. Aušinamo SM kontrolinė ir modeliuojama $\Delta\eta$ rugpjūčio 6 dieną	70
3.21 pav. Aušinamo SM kontrolinė ir modeliuojama $\Delta\eta$ rugsėjo 7 dieną	71
3.22 pav. Aušinamo SM kontrolinė ir modeliuojama N_a rugpjūčio 6 dieną	72
3.23 pav. Aušinamo SM kontrolinė ir modeliuojama N_a rugsėjo 7 dieną	73

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

GHG – šiltnamio efektą sukeliančios dujos;

AEI – atsinaujinančiosios energetikos ištekliai;

FE – fotovoltinis elementas;

SM – saulės modulis;

SE – saulės elektrinė;

„PVsyst“ – programinis paketas skirtas fotovoltinių elementų, saulės modulių ir saulės elektrinių darbo analizei atlikti (angl. Photovoltaic (PV) System).

Įvadas

Žmonių populiacija pasaulyje 2020 metais pasiekė 7,8 mlrd. Nuo industrializacijos amžiaus pradžios žmonių kiekis padidėjo 7,8 karto. [1] Kartu su žmonių kiekio augimu, industrinių ir buitinių prietaisų elektrifikacija ir automatizacija didėjo, kartu didėjo ir energijos suvartojimas bei šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijos. Nuo industrializacijos amžiaus pradžios pasaulinis energijos suvartojimas padidėjo 33 kartus ir 2022 metais vidutiniškai pakilo 2% per metus. Paminėtina, kad, CO₂, CH₄ ir N₂O dujų koncentracijos atmosferoje nuo industrializacijos pradžios padidėjo atitinkamai 47, 156 ir 23 %. Energijos gavybos būdai dar vis didžiąja dalimi remiasi iškastiniu kuru: iš naftos išgaunama energija sudaro 31,6 %, iš anglių 26,7 %, o iš dujų 23,5 % viso globalaus energijos poreikio.

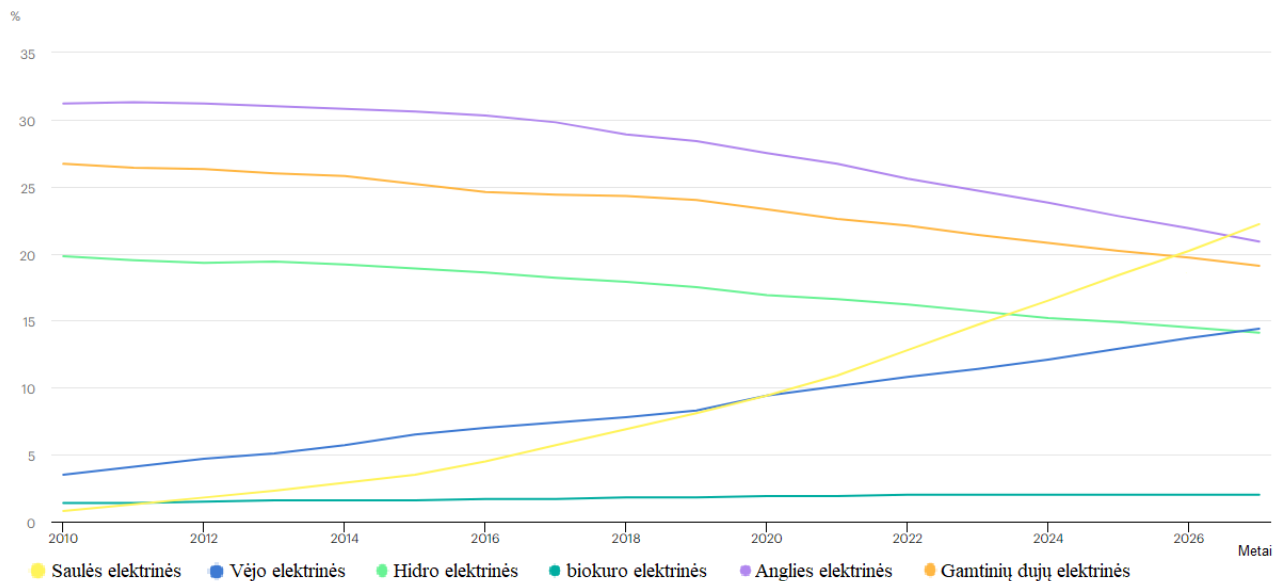
Klimato kaita taip pat yra laikoma viena iš didžiausių globalių sveikatos problemų 21-ame amžiuje, kadangi paveikia žmonių gyvenamąją aplinką, ekosistemą ir ryšį tarp žmogaus ir šių sistemų. Padariniai žmonių sveikatai kinta nuo stichinių nelaimių sukeltų traumų ir mirčių iki oro lašeliniu ir kitais būdais platinamų ligų dėl suprastėjusių higieninių sąlygų ir naujų ligų atsiradimo. Įvairiose šalyse atliktuose tyrimuose nustatyta, kad 2022 metais klimato kaitos padariniai per metus prideda apie 400 000 papildomų mirčių ir prognozuojama, kad šis skaičius toliau didės. Pagal esamas prognozes mirčių skaičius iki 2030 metų padidės iki 700 000 per metus [2].

Siekiant sumažinti klimato kaitos tempą yra taikomi įvairūs sprendiniai. Vienas iš pagrindinių sprendinių yra mažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų (angl. *Greenhouse gasses*, GHG) emisijas, kartu užtikrinant stabilų energijos tiekimą. GHG sudaro: CO₂, CH₄, N₂O ir F turinčios dujos. Pagal sektorių pasauliniame GHG išmetime į atmosferą pirmauja elektros generacija – 27,45 %, antroje vietoje yra transportas – 15,07 % ir trečioje vietoje yra pramonė – 12,24 % [3].

Atlikti tyrimai rodo, kad atsinaujinančiosios energetikos išteklių (toliau – AEI) plėtra gali reikšmingai sumažinti išmetamų šiltnamio dujų kiekį. Atliekami moksliniai tyrimai, vis griežtesnės išmetamų į atmosferą GHG dujų kontrolės susitarimai bei AEI technologijų subsidijavimas lemia spartėjančią šių technologijų plėtrą ir prognozuojama, kad pasaulinė įrengtoji AEI galia 2022–2027 metais augs 75 % (2400 GW) [4,5].

Pagrindiniai AEI energetikoje naudojami energijos ištekliai apima: vėjo, saulės, vandens, vandenynų, geotermiņę, biomasės ir biokuro energiją. Pasaulinėje elektros energijos generacijoje AEI energijos dalis 2021 metais buvo 28 %. Pagal AEI tipą ir įrengtąją galią dominavo hidro-energija – 16,6 %, saulės energija – 10,9 % ir vėjo energija – 10,1 %. Tačiau prognozuojama AEI energetikos plėtra rodo, kad nuo 2024 metų didžiausią įrengtąją galią turės saulės energetika – 16,5 %. Taip pat, prognozuojama, kad 2027 metais šio tipo AEI įrengtoji galia sudarys 22,2 % suminės pasaulinės įrengtosios galios ir bus lyderė tarp AEI bei lenks anglies ir dujų pasaulines sumines įrengtąsias galias. Pasaulinės suminės įrengtosios galios grafinis atvaizdavimas pateikiamas 1 paveiksle [5].

Lietuvoje 2021 metais AEI dalis bendrame galutiniame elektros energijos suvartojime buvo 20,9 %. Šis rodiklis buvo mažesnis nei buvo siekiamas Nacionalinėje energetinės nepriklausomybės strategijoje – 30 %. Minėta strategija įvardina, kad siekiamybė 2025 metais – 31,48 %, 2030 metais – 45 %, o 2050 metais – 100 %. Taigi Lietuvos elektros energetika vis labiau remsis AEI ir mažės jos priklausomybė nuo iškastinio kuro [6,7].



1 pav. Pagrindinių AEI bei anglies ir gamtinių dujų elektrinių suminės pasaulinės įrengtosios galios dalies kitimas laike procentais

Saulės elektrinių sektoriaus plėtra padeda mažinti GHG išmetimą į atmosferą, nes pakeičia energijos gavimą iš iškastinio kuro ir taip prisideda prie klimato kaitos tempo mažinimo, tačiau šio sektoriaus plėtra taip pat susiduria su tam tikrais sunkumais. Pavyzdžiui, ant žemės sklypų įrengiamos saulės elektrinės užima žemės plotą kuris galėtų būti naudojamas žemdirbystės tikslais. Taip pat, per visą saulės elektrinės eksploatacijos laikotarpį, kuris dažniausiai yra 25–30 metų, žemės derlingumas sumažėja, kas daro neigiamą įtaką tolimesniam žemės panaudojimui žemdirbystės tikslais [8].

Ant pastatų stogų įrengiamos elektrinės susiduria su ploto, kuriame saulės moduliai (toliau – SM) veiktų aukščiausiu efektyvumu, ribotumu. Lietuvoje prie ploto ribotumo problemos prisideda ir teisinis pastatų statybos reglamentavimas. Remiantis numatytais reikalavimais A++ energetinio efektyvumo pastatams, AEI numatyti projektuojant ir įrengti pastatuose yra privaloma nuo 2021 metų.[9] Tai lemia, kad pastatai suprojektuoti prieš šio reikalavimo įvedimą dažniausiai turi neoptimalius saulės elektrinėms stogus. Ant stogų esančių objektų išdėstymas meta šešėlius iš pietų ir taip mažina saulės elektrinės efektyvumą.

Saulės elektrinės efektyvumo didinimas yra vienas iš pagrindinių būdų spręsti užimamo ploto problemą. Būtent saulės modulių efektyvumo didinimas per aušinimą yra palankus norint patobulinti jau esamas sumontuotas ir eksploatuojamas saulės elektrines. Šiuo metu egzistuoja sistemos, kurios gali būti įrengiamos ant eksploatuojamų saulės modulių. Šis privalumas palengvina efektyvumo didinimo integraciją į saulės energetikos sektorių, nereikalauja, jog tik naujai projektuojamos elektrinės galėtų panaudoti šias technologijas. Antrinis nuvestos šilumos panaudojimas turi potencialą papildomai padidinti bendrą saulės modulių ir saulės elektrinės energetinį efektyvumą ir turėtų papildomą naudą vartotojui.

Taigi šio baigiamojo magistro **darbo tikslas** – ištirti saulės modulių aušinimo vandeniu įtaką saulės modulių efektyvumui.

Uždaviniai:

1. apžvelgti esamas saulės modulių aušinimo technologijas ir jų įtaką saulės modulių efektyvumui;
2. atlikti modeliavimą „PVsyst“ programiniu paketu ir šiluminiu modeliu bei įvertinti azimuto ir posvyrio kampo įtaką aušinamų saulės modulių efektyvumui ir jo skirtumui, aušinamų saulės modulių elektros energijos generacijai ir bendrai aušinimo naudai;
3. atlikti modeliavimą „PVsyst“ programiniu paketu ir šiluminiu modeliu bei įvertinti aušinimo rezervuaro tūrio įtaką aušinamų saulės modulių efektyvumui ir jo skirtumui, aušinamų saulės modulių elektros energijos generacijai ir bendrai aušinimo naudai;
4. patvirtinti „PVsyst“ programinio paketo modeliavimo duomenis įvertinant 5 atsitiktinių elektrinių istorinius duomenis, bandymo metu gautus duomenis ir Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos istorinius meteorologinius duomenis;
5. patvirtinti šiluminio modeliavimo duomenis įvertinant eksperimento metu gautus duomenis.

1. Teorinė dalis

1.1. Fotovoltinis efektas

Fotovoltinis efektas yra fizikinis reiškinys, kuris leidžia gaminti elektros energiją panaudojant saulės apšvietą. Šis reiškinys pirmą kartą nustatytas E.Bekerelio (Alexandre Edmond Becquerel) 1839 metais. [10] Fotovoltinį efektą galima paaiškinti remiantis silicio pavyzdžiu. Silicio atomas sudarytas iš keturiolikos protonų ir keturiolikos elektronų. Valentiniame (išoriniame) atomo sluoksnyje yra keturi elektronai. Kai yra formuojamas silicio monokristalas, atomai sudaro kovalentines jungtis su keturiais gretimais atomais. Kiekvienoje jungtyje silicio atomas dalijasi vienu iš keturių savo valentinių elektronų su gretimą atomu vienu iš keturių valentinių elektronų. Tai lemia, kad visų atomų valentinis sluoksnis yra iki galo užpildytas ir atomai yra stabilūs. Elektronai yra susieti valentinėje juostoje ir negali dreifuoti nuo vieno atomo link kito. Kad elektronai galėtų judėti nuo vieno atomo prie kito, jiems turi būti suteikta energija, tuomet elektronai gali (priklausomai nuo suteikto energijos kiekio) peršokti į laidumo juostą. Laidumo ir valentinės juostos energijų skirtumas yra vadinamas draudžiamąja juosta. Skirtingos medžiagos turi skirtingo pločio draudžiamąją juostą. Šios juostos plotis lemia fotovoltinio elemento tuščiosios veikos įtampą ir elemento veikimo efektyvumą [11].

1.1 lentelė. Fotovoltiniuose elementuose dažniausiai naudojamos medžiagos [11]

Medžiaga	Draudžiamosios juostos plotis, eV
CuInSe ₂	1,01
Si	1,11
InP	1,27
GaAs	1,4
CdTe	1,44

Platesnė draudžiamoji juosta lemia, kad tos medžiagos valentinių elektronų perkėlimui į laidumo juostą reikia daugiau energijos, t. y. valentiniams elektronams energiją perduoti turi trumpesnio ilgio šviesos banga. Atliekant natūrinius bandymus buvo nustatyta, kad iš saulės išspinduliuojami ir žemę pasiekiantys fotonai skiriasi turima energija. Fotonas, kurio energija mažesnė už draudžiamąją naudojamos medžiagos juostą, neperkels elektrono iš valentinės juostos į laidžiąją, o pereis kiaurai per puslaidininkį įtaisą arba energija bus perduodama šiluma. Fotonai, kurie turi energiją lygią draudžiamajai juostai perkelia elektroną iš valentinės juostos į laidžiąją, o elektrono vietoje lieka jungtis be vieno elektrono, kuri vadinama skylė. Fotonas, kuris turi didesnę už draudžiamosios juostos energiją, perkelti gali tik vieną elektroną, o perteklinė energija virsta šiluma [12].

Laidumo juostoje elektronų judėjimui yra reikalingas elektrinis laukas. Šis laukas gali būti sukuriama taikant silicio legiravimą. Į vieną silicio plokštelės pusę yra įterpiami boro atomai, o į kitą įterpiami fosforo atomai ir taip suformuojama *pn* sandūra. Suformavus sandūrą, sujungimo vietoje susidaro krūvininkų koncentracijos gradientai, kurie sukelia krūvininkų difuziją. Skylės iš *p* tipo puslaidininkio yra pernešamos į *n* tipo puslaidininkį, o elektronai iš *n* tipo puslaidininkio pernešami į *p* tipo. Šis reiškinys vyksta kol yra pasiekiamas įsotinimas. Paminėtina, kad, sujungime lieka labai maža koncentracija nesureagavusių neigiamą krūvį turinčių akceptorinių jonų ir teigiamą krūvį turinčių donorinių jonų. Skylės gali laisvai judėti, o akceptoriniai atomai yra stacionarūs puslaidininkio gardelėje. Analogiškas yra ir elektronų judėjimas iš *n* tipo į *p* tipo puslaidininkį. Šis krūvininkų judėjimas per sujungimą yra vadinamas difuzija. Jos rezultatas, kad sujungime susiformuoja erdvinio krūvio regionas, kuris sukuria elektrinį lauką, kurio kryptis yra iš skylių į

neigiamo krūvį. Išorinis elektrinis laukas sukelia krūvininkų dreifavimo srovę, kurios kryptis yra priešinga to pačio krūvininko difuzijos kryptiai [12].

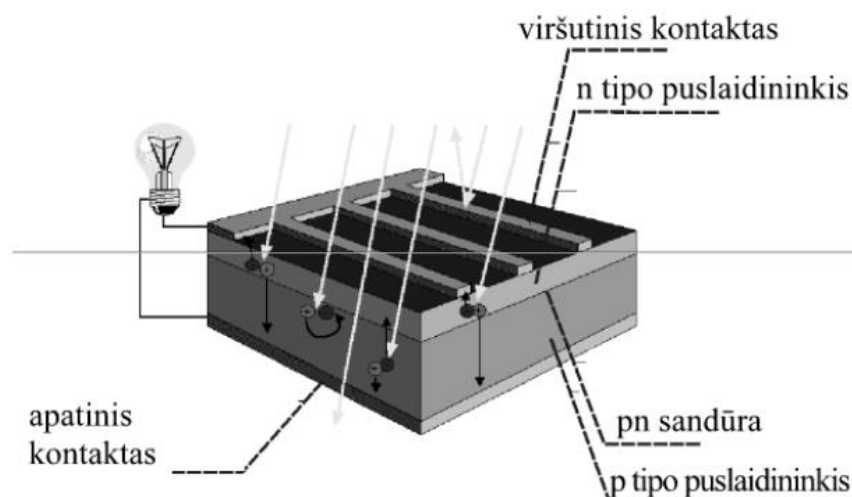
Kai fotonas sugeneruoja elektrono ir skylės porą, krūvininkai gali kirsti sandūrą arba susijungti su priešingu krūvininku. Paskutiniu atveju elektrono ir skylės pora yra prarandama. Jei krūvininkai veikiami elektrinio lauko kerta sandūrą, labiausiai tikėtina, kad jie ir pasilieka kitoje sandūros pusėje, tai sukuria potencialų skirtumą. Jeigu puslaidininkis įtaisas yra prijungiamas prie apkrovos, potencialų skirtumas sukuria elektros srovę, kuri teka per imtuvą ir atlieka darbą [13].

Taigi, fotovoltinis efektas yra fizikinis reiškinys, kuris apibūdina kaip saulės apšvieta puslaidininkiuose įtaisuose yra paverčiama į elektros energiją. Tokiu principu yra paremtas fotovoltinių elementų (toliau – FE) ir SM veikimas.

1.2. Fotovoltiniai elementai ir saulės moduliai

Šviesos energiją į elektros energiją verčiantis įtaisas yra vadinamas fotovoltiniu elementu. Tai yra puslaidininkinis įtaisas, kurio veikimas paremtas fotovoltiniu efektu.

FE struktūra kinta priklausomai nuo technologijos tipo. Paprasčiausias FE yra sudarytas iš *pn* sandūros, viršutinio ir apatinio kontakto. Struktūra pavaizduota 1.1 paveiksle.



1.1 pav. FE supaprastinta struktūra [14]

Kiekvieną FE apibūdina keli pagrindiniai parametrai:

- Naudingumo koeficientas η – santykis tarp saulės spinduliuotės energijos krentančios į FE paviršių ir FE gaminamos elektros energijos;
- Tuščiosios veikos įtampa U_0 – įtampa FE gnybtuose be išorinės apkrovos;
- Trumpojo jungimo srovė I_k , – srovė esant trumpajam jungimui tarp FE gnybtų (įtampa tarp gnybtų – artima 0, o srovė – maksimaliai vertei);
- Užpildymo faktorius FF – plotas po I/U voltamperinės charakteristikos kreive, atvaizduoja atitinka maksimalią FE galią;

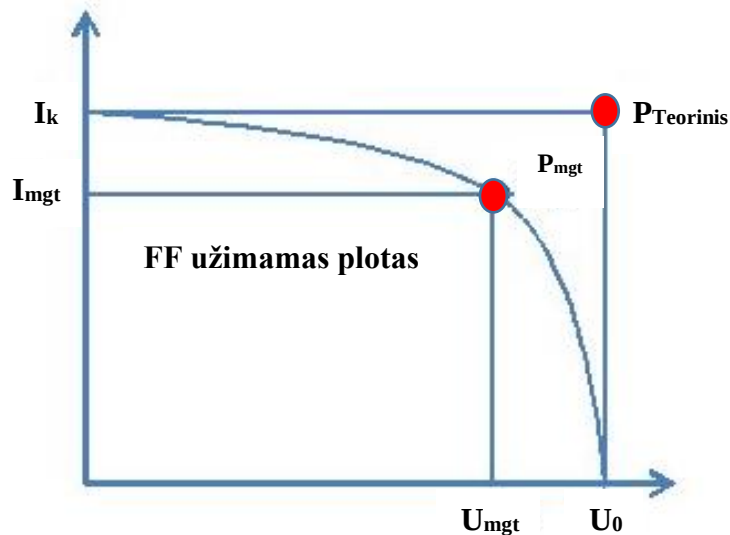
Užpildymo faktorius apibrėžia santykį tarp teorinės galios ir maksimalios realios galios ir grafiškai atitinka stačiakampio gretasienio arba kvadrato formos užimamą plotą po I/U voltamperine charakteristika (1.2 pav.), o apskaičiuojamas [14,15]:

$$FF = \frac{U_{mgt} \cdot I_{mgt}}{U_0 \cdot I_k} \cdot 100. \quad (1)$$

Čia:

U_{mgt} – elektros įtampa maksimalios galios darbo taške, V;

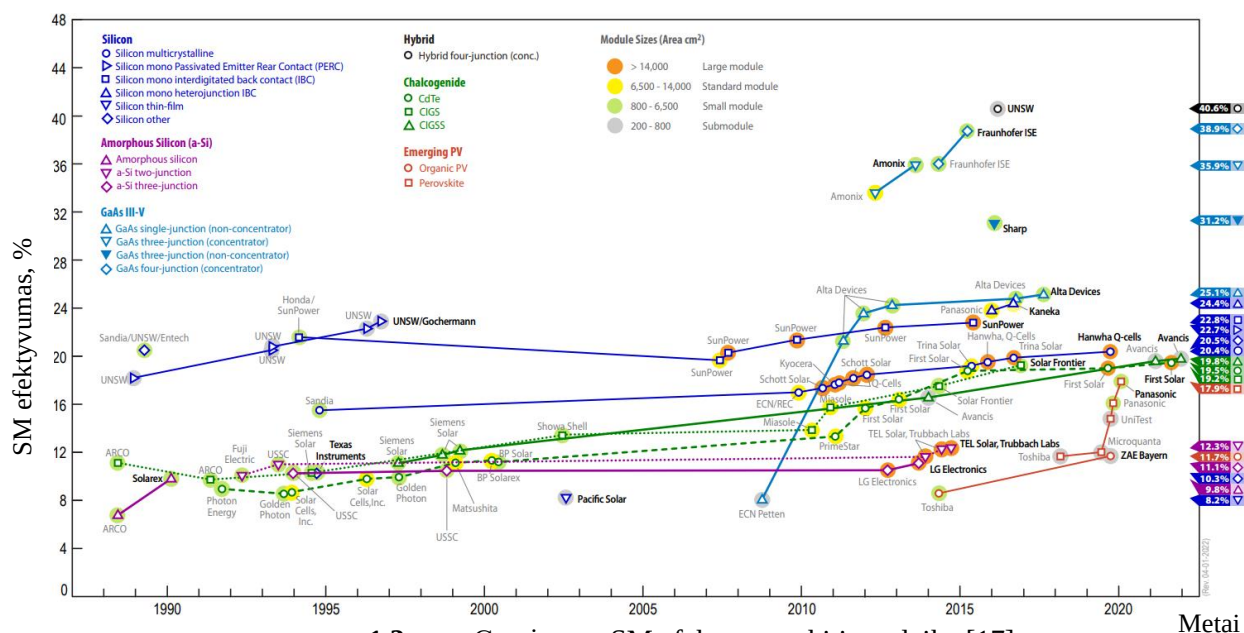
I_{mgt} – elektros srovė maksimalios galios darbo taške, A;



1.2 pav. Fotovoltinio elemento I/U charakteristika ir užpildymo faktorius [16]

Praktikoje individualūs FE dažniausiai yra jungiami į grupes nuosekliai ir (arba) lygiagrečiai ir patalpinus sujungtus FE į rėmą su galine siennele ir priekiniu stiklu gaunamas saulės modulis (SM). Tuomet, lygiagrečiai ir (arba) nuosekliai jungiami SM leidžia pasiekti reikiamas įtampos, srovės ir galios parametrų vertes konkrečiais pritaikymo atvejais (pvz. elektros energijos generacijai saulės elektrinėse).

Saulės moduliai skirstomi į tris kartas. Pirmajai kartai priklauso: galio arsenido (GaAs), multikristalinio silicio (mono-Si) ir polikristalinio silicio (poli-Si) technologijos. Antroji karta susideda iš plonasluoksnių technologijų FE ir modulių: amorfinio silicio (a-Si), kadmio telurido (CdTe), vario indžio selenido (CIS) bei vario indžio galio selenido (CIGS). Trečiajai kartai priskiriamos: sensibilizuotų dažiklių, organinės ir daugiasluoksnės technologijos. Saulės elektrinėse naudojamos pirmosios ir antrosios kartos technologijos SM. Kiekvienos technologijos SM efektyvumo kitimas laike pavaizduotas 1.3 paveiksle [17].



1.3 pav. Gaminamų SM efektyvumo kitimas laike [17]

Pasaulyje plačiausiai naudojami pirmos kartos kristalinio silicio (c-Si) SM. Šių SM dalis pasaulinėje SM rinkoje 2021 metais buvo 95 %. Apie 5 % pasaulinės SM ir FE rinkos sudaro plonasluoksnių SM ir FE technologijų produktai. Iš c-Si SM pasaulyje daugiausiai gaminama ir parduodama monokristalinio silicio (mono-Si) SM – 84 % [18].

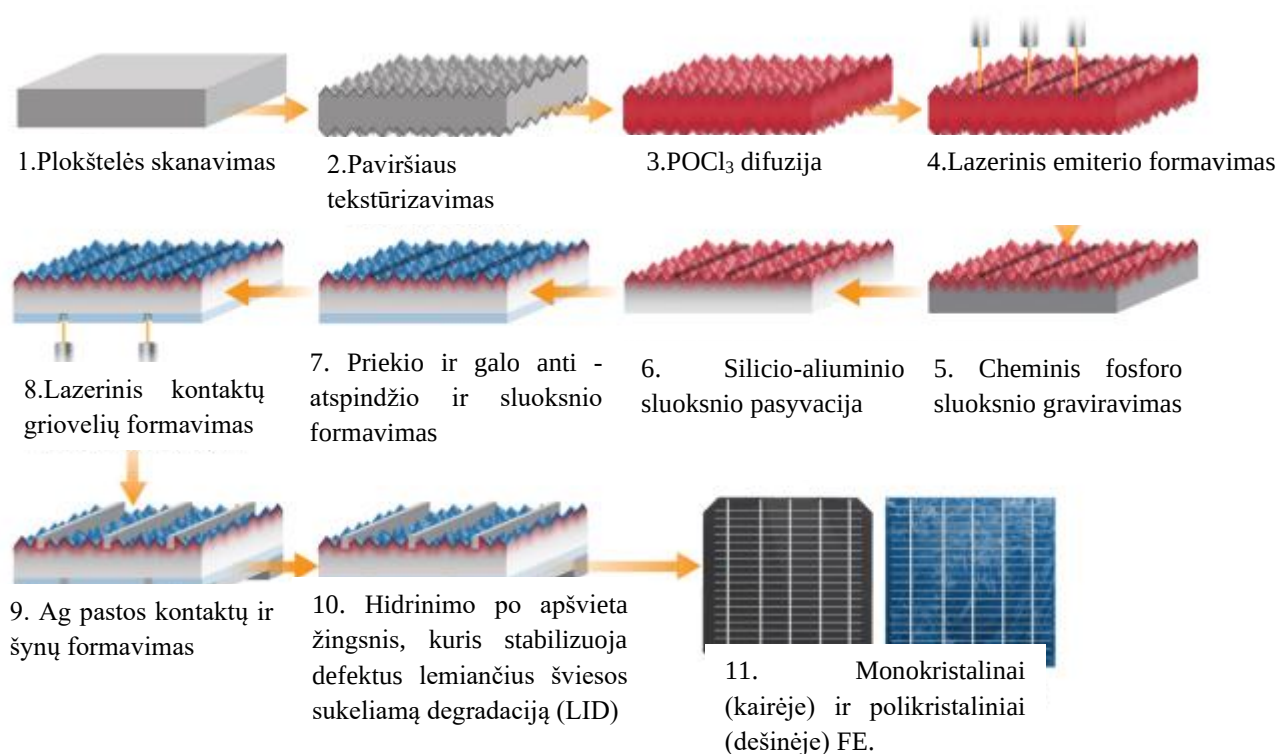
SM kainos ir FE technologijos laikui einant kinta. Optimizuojami gamybos procesai, kuriamos naujos technologijos, ne tik mažina SM kainas bet ir didina jų efektyvumą. 1.2 lentelėje pateikiami duomenys, kurie parodo kaip kito saulės modulių efektyvumas ir kaina (EUR/W) nuo 2010 iki 2020 metų. Kartu pateikiama kainų ir efektyvumo kitimo prognozė iki 2030 metų [19].

1.2 lentelė. SM kainos ir efektyvumo kitimas laike [19]

Metai	2010				
Elementų technologija	Mono Si, PERC	Dvipusis PERC	Si-IBC	PERT/PERL	SHJ
SM kaina, EUR/W	1,14	1,70	1,14	1,70	1,14
Efektyvumas prie STC, %	18	18	22	20	20
Šiluminis galios koeficientas, %/°C	-0,35	-0,25	-0,3	-0,4	-0,25
Metai	2020				
SM kaina, EUR/W	0,17	0,17	0,18	0,17	0,18
Efektyvumas prie STC, %	20,5	22	25	22	24
Šiluminis galios koeficientas, %/°C	-0,35	-0,25	-0,3	-0,4	-0,25
Metai	2030				
SM kaina, EUR/W	0,14	0,16	0,17	0,16	0,17
Efektyvumas prie STC, %	23	25	26	25	26
Šiluminis galios koeficientas, %/°C	-0,35	-0,25	-0,3	-0,4	-0,25

Pagal FE technologiją ilgą laiką dominavo aliuminio galinio paviršiaus lauko FE (angl. Al Back Surface Field, AL-BSF), tačiau per paskutinius tris metus tapo paklausesni pasyvuoto emiterio ir galinės pusės FE (angl. Passivated Emitter and Rear Cell, PERC) technologija. Ši technologija suteikia 1,0–1,5% didesnį efektyvumo koeficientą nei AL-BSF technologija. Kitos FE technologijos, kurios galėtų turėti dar didesnį efektyvumą yra integruoto galinio kontakto (angl. Integrated Back Contact, IBC), pasyvinto emiterio pilnai išsklaidytos bazės (angl. Passivated Emitter rear Totally Diffused, PERT), pasyvinto emiterio lokaliai išsklaidytos bazės (angl. Passivated Emitter rear Locally Diffused, PERL) ir silicio heterosandūros (angl. Silicon Heterojunction, SHJ) FE [19,20,22].

PERC technologijos FE konversijos procesas prasideda nustačius į gamybos liniją atvykstančios silicio plokštelės kokybę. Tuomet vykdomas *p*-tipo plokštelės drėgnas cheminis apdorojimas ir aukštos temperatūros POCl₃ difuzija, taip suformuojant *pn* sandūrą. Laseriu suformuojamas tinklelis, kuriame yra didesnė legiravimo medžiagų koncentracija. Virš šio tinklelio integruojami metaliniai kontaktai, tai suteikia efektyvumo padidėjimą. PERC apdorojimo procesas pateikiamas 1.4 paveiksle [19].

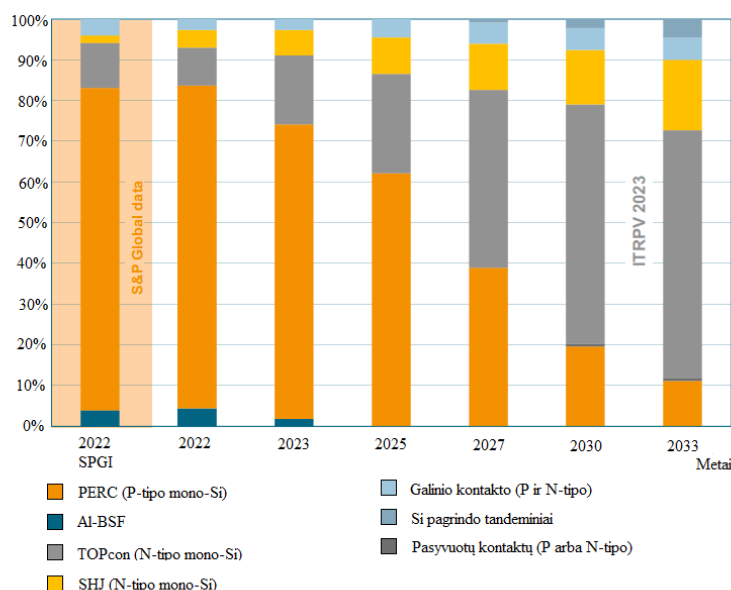


1.4 pav. PERC technologijos FE apdorojimas [19]

PERC technologijos efektyvumo pranašumas lyginant su AL-BSF FE architektūra susidaro dėl papildomo pasyvacijos sluoksnio FE galinėje pusėje. Tai dažniausiai įgyvendinama pasitelkiant plazminės garų depozicijos metodu (angl. Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD) arba atomų sluoksnio depozicijos metodu, kurių metu yra sukuriama papildoma pasyvacijos sluoksnis. Šis sluoksnis gali būti formuojamas ir priekyje dėl atspindžio sumažinimo ir gale dėl pasyvacijos. Pasyvacijos sluoksnis skirtas rekombinacijos, kurios metu prarandama naujai sukurta elektrono ir skylės pora, tikimybės sumažinimui [19,20].

PERC technologijos FE yra plačiausiai naudojami pasaulyje. 2022 metais šios technologijos FE sudarė apie 80 % pasaulinės FE rinkos. Prognozuojama, kad per ateinančius 10 metų šios technologijos paklausa mažės ir 2033 metais pasieks apie 10 %. Taip pat, prognozuojama, kad

labiausiai didės TOPcon (angl. Tunnel Oxide Passivated Contact) (priskiriama N-tipo mono-Si technologijai) technologijos panaudojimas. Prognozuojamas padidėjimas nuo apie 10 % 2022 metais iki apie 60 % 2033 metais. Skirtingų technologijų FE pasaulinė procentinė rinkos dalis atvaizduojama 1.5 paveiksle [21].



1.5 pav. Gaminamų SM kiekio pasiskirstymas pagal FE technologiją [21]

Taigi, šviesos energiją į elektros energiją verčiantis įtaisas yra vadinamas FE. Keletas lygiagrečiai ir (arba) nuosekliai sujungtų ir įrėmintų FE sudaro vieną SM. Kiekvienas SM turi keletą pagrindinių parametų, kaip: naudingumo koeficientas η , tuščiosios veikos įtampa U_0 , trumpojo jungimo srovė I_k , užpildymo faktorius FF, kurie pagrinde priklauso nuo FE plokštelių gamybos medžiagų, apdorojimo technologijos. Šiuo metu, pasaulyje populiariausi pirmos kartos PERC *p*-tipo mono-Si FE ir atitinkamai SM, todėl jie pasirenkami šiame tyrime. Prognozuojama, kad iki 2033 rinkos situacija keisis ir dominuos TOPcon *n*-tipo mono-Si bei SHJ *n*-tipo mono-Si SM.

1.3. Temperatūros įtaka fotoelementų ir saulės modulių efektyvumui

SM dažniausiai yra eksploatuojami lauko sąlygomis ir dirba dinamiškai kintančioje aplinkoje. Tai lemia, kad pačių saulės modulių darbo režimas dinamiškai kinta. Trumpojo jungimo srovė nežymiai didėja didėjant FE temperatūrai, o tuščiosios veikos įtampa kinta ženkliai. Tuščiosios veikos įtampos mažėjimas didėjant SM (FE) temperatūrai daro tiesioginę įtaką saulės modulio efektyvumui.

FE galios ir efektyvumo mažėjimas didėjant elemento temperatūrai fizikine prasme yra sietinas su [23]:

- padidėjusiu puslaidininkio kristalinės gardelės virpėjimu;
- sumažėjusiu krūvininkų mobilumu;
- sumažėjusiu *pn* sandūros draudžiamosios juostos plociu ir sumažėjusiu sandūros pajėgumu atskirti fotonų sukurtas elektronų ir skylių poras.

Fotosrovė kylant temperatūrai nežymiai didėja. Šio didėjimo priežastis yra didėjantys krūvininkų difuzijos atstumai puslaidininkio terpėje ir draudžiamosios juostos susiaurėjimas, kuris lemia tai, kad elektronų ir skylių poras sukuria ilgesnio bangos ilgio ir mažesnės energijos (nei žemesnės

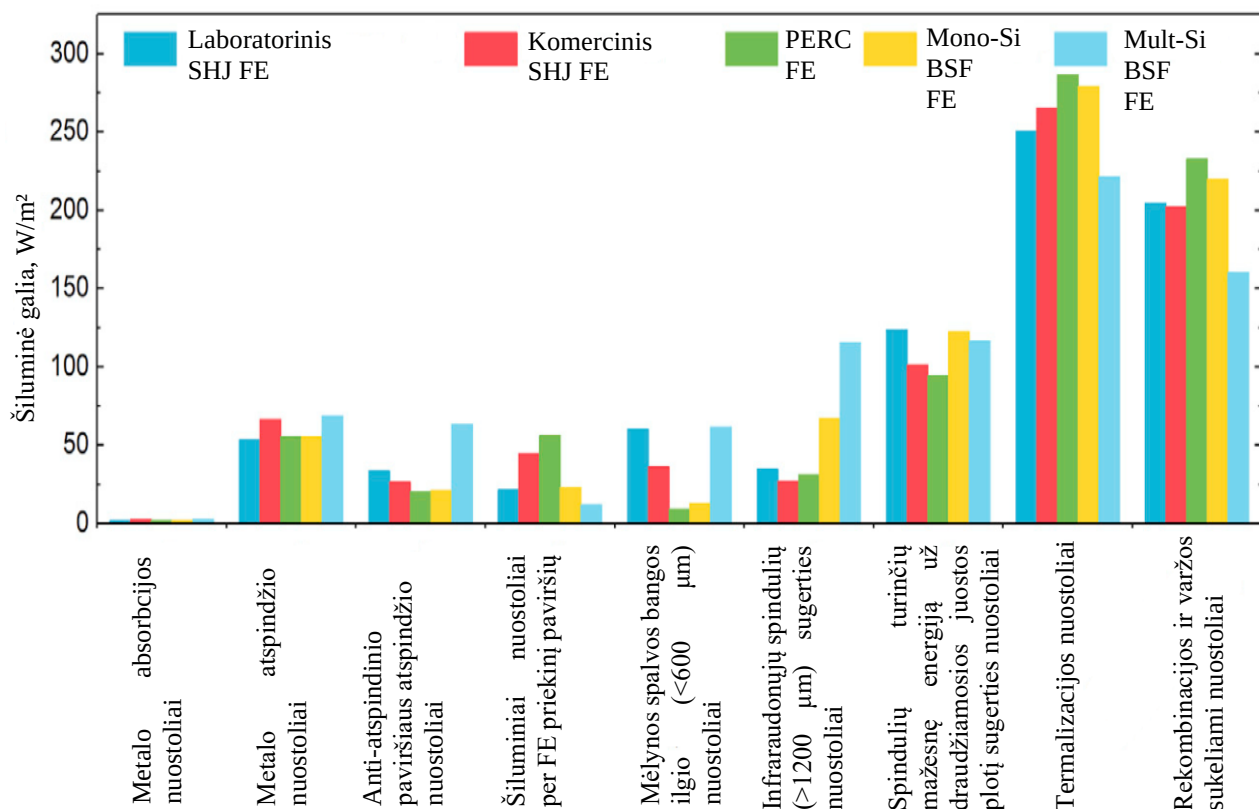
temperatūros FE) fotonai, o perteklinė energija išsiskirs šilumos pavidalu puslaidininkio terpėje. Fotosrovės padidėjimas yra labiau išreikštas GaAs, nei Si FE, tačiau yra neženklaus ir skaičiavimuose gali būti laikomas nepriklausomu nuo temperatūros. SM įšilimui papildomai įtaką daro gamyboje panaudojamų medžiagų savybės, konstrukcija, sumontavimo lokacija, šešėliavimas, SM efektyvumo nuostoliai ir oro sąlygos [23].

Taigi FE, o ir kartu SM, darbinė temperatūra daro įtaką jų voltamperinėms charakteristikoms ir efektyvumui. Šie reiškiniai taip pat parodo, kad elementų ir modulių aušinimas turi potencialą padidinti elektros energijos generaciją, todėl verta gilintis į metodus kurie gali sumažinti FE (SM) darbinę temperatūrą [23].

FE įšilimas yra žemesnis, kai:

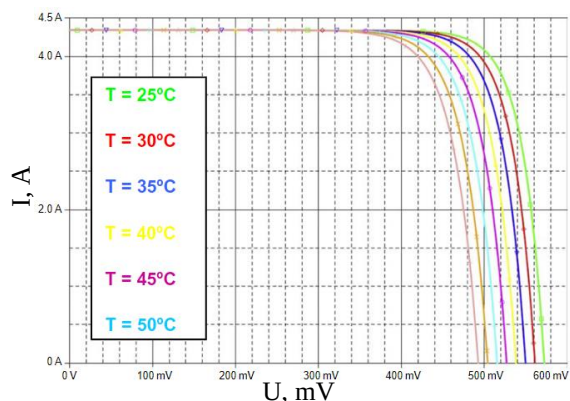
- pavyksta sumažinti neefektyvų fotonų sugėrimą, kuomet nėra sukurama elektrono ir skylės pora, o fotonas kiaurai kerta puslaidininkio gardelę arba perduoda savo energiją puslaidininkio gardelei šilumos pavidalu;
- pavyksta sumažinti fotonų sugeneruotų elektronų ir skylių rekombinaciją;
- pavyksta sumažinti foto srovę (Džiaulio šiluma, kurią generuoja srovė tekanti per *pn* sandūros nuosekliają varžą) ir parazitines sroves;
- įrengiant SM aušinimo įrenginius.

Didžiausią įtaką FE įšilimui prie pastovios apšvietos turi termalizacija – krūvininkų perteklinės energijos perdavimas puslaidininkiui, elektronų ir skylių rekombinacija bei varžos sukelti nuostoliai ir mažesnės energijos nei draudžiamos juostos plotis fotonų sugerties nuostoliai. Pagal SM naudojamų FE technologijos tipą, FE įšilimą sukeliantys fizikinių reiškinių įtakos dydžio pasiskirstymas atvaizduojamas 1.6 paveiksle [24,25].

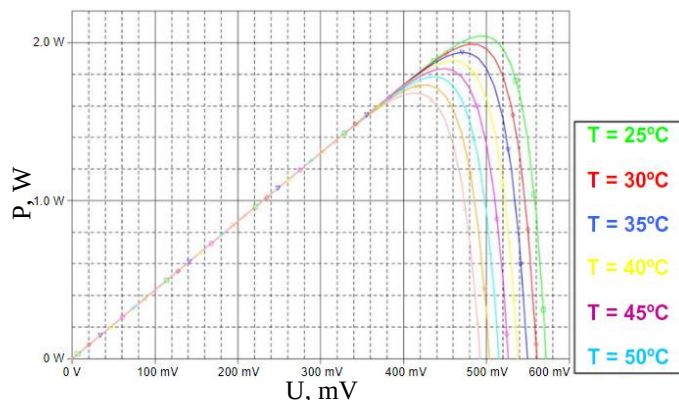


1.6 pav. FE įšilimą sukeliančių veiksnių įtaka pagal technologijos tipą [24]

Taip pat, FE ir SM įšilimo įtaką parodo FE I/U ir P/U charakteristikos. Atitinkamai 1.7 ir 1.8 paveiksluose parodyta, kaip kinta FE srovė, įtampa ir galia, kuomet kinta FE temperatūra, o saulės apšvieta išlieka pastovi.



1.7 pav. FE I/U kreivės prie skirtingų FE temperatūrų bei pastovios apšvietos [26]



1.8 pav. FE P/U kreivės prie skirtingų FE temperatūrų bei pastovios apšvietos [26]

Iš 7 ir 8 paveikslų matyti, kad esant pastoviai apšvietai ir didėjant FE (SM) temperatūrai, mažėja FE ir SM:

- galia – P_{mgt} ;
- tuščiosios veikos įtampa – U_0 ir darbo taško įtampa – U_d ;
- darbo taško srovė – I_d ;
- užpidymo faktorius – FF.

SM gamintojai techninėse specifikacijose nurodo pagrindinius SM elektrinius ir konstrukcijos parametrus. Elektriniai parametrai nurodomi prie:

- standartinių bandymo sąlygų (angl. Standart Test Conditions, STC): FE temperatūra lygi 25°C, apšvieta į SM paviršių yra lygi 1000W/m², oro masė atitinka 1,5 žemės atmosferos;
- nominalaus darbo FE temperatūros sąlygų (angl. Nominal Operating Cell Temperature, NOCT): oro temperatūra lygi 20°C, apšvieta į SM paviršių lygi 800W/m², oro masė lygi 1,5 atmosferos, vėjo greitis – 1 m/s.

Taip pat, specifikacijose nurodomi temperatūriniai koeficientai, kurie apibūdina kaip kinta elektriniai parametrai priklausomai nuo FE (SM) temperatūros. Pagrindiniai temperatūriniai koeficientai yra: [27]

- α – SM trumpojo jungimo srovės I_k dydžio priklausomybė nuo SM temperatūros, %/°C;

- β – tuščiosios veikos įtamos U_0 dydžio priklausomybė nuo SM temperatūros, $\%/^{\circ}\text{C}$;
- γ – SM didžiausios galios P_{mgt} dydžio priklausomybė nuo SM temperatūros, $\%/^{\circ}\text{C}$.

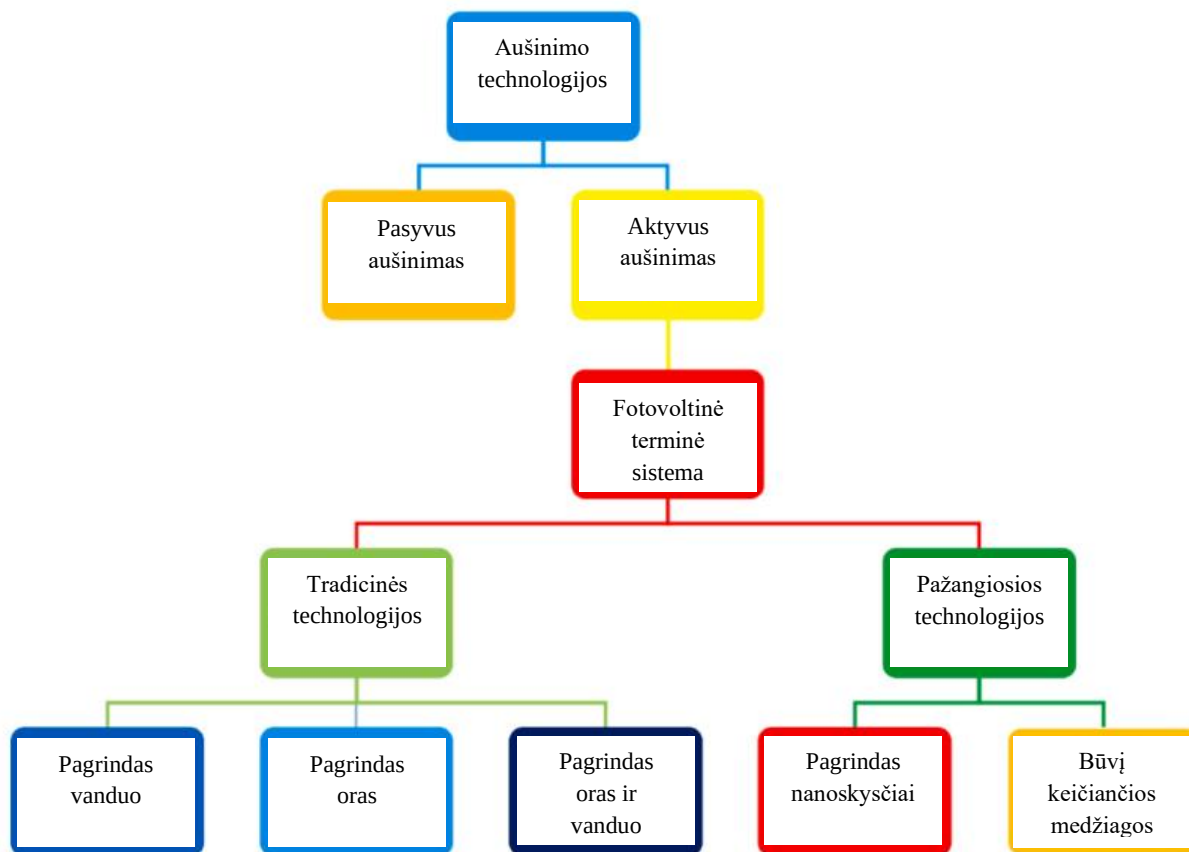
Taigi, SM darbinės sąlygos lemia, kad jų temperatūra nuolatos kinta. Didžiausią įtaką FE išilimui prie pastovios apšvietos turi termalizacija – krūvininkų perteklinės energijos perdavimas puslaidininkiui, elektronų ir skylių rekombinacija bei varžos sukelti nuostoliai ir mažesnės energijos nei draudžiamos juostos plotis fotonų sugerties nuostoliai. Padidėjusi FE (SM) temperatūra lemia FE (SM) galios, tuščiosios veikos bei darbo taško įtamos, darbo taško srovės ir užpildymo faktoriaus mažėjimą. Kiekvienas gamintojas SM techninėse specifikacijose nurodo SM elektrinius, konstrukcijos ir šiluminius parametrus, kurie yra esminiai siekiant įvertinti SM elektrinių parametru pokytį keičiantis SM temperatūrai.

1.4. Saulės modulių aušinimo metodai

Praktinis SM, eksploatavimas susiduria su trimis pagrindiniais iššūkiais, kuriuos sukuria darbinė aplinka: aukšta temperatūra, aukšta santykinė drėgmė ir modulių paviršiaus dulkėtumas. Dėl šių priežasčių kuriamos aušinimo ir valymo technologijos skirtingų tipų SM, kad būtų sumažinti patiriami efektyvumo nuostoliai. Pavyzdžiui, pirmos kartos silicio pagrindo technologijos SM patiria ženklus efektyvumo nuostolius, kuomet modulių temperatūra pakyla aukščiau 50°C . Plataus panaudojimo komerciškai pritaikoma ir ekonomiškai naudinga aušinimo technologija yra ypač reikalinga šiltuose ir drėgnuose kraštuose. Yra išskiriama keletas aušinimo technikų, kurios naudoja: įvairius fluidus, aušinimo fluido tėkmės lovelių konfigūracijas ir geometrijas bei skirtingus fluido tėkmės debitus.

Technologijos pagal pobūdį skiriamos į pasyvinės ir aktyvinės. Aktyvinės toliau gali būti skirstomos į konvencines ir pažangiąsias. Konvencinės aušinimo technologijos remiasi vandens, oro, vandens ir oro panaudojimu aušinimui. Pažangiosios technologijos remiasi fluidų su nano dalelėmis ir aušinimo medžiagų su kintančiu būviu panaudojimu. 1.9 paveiksle pateikiamas SM aušinimo technologijų medis [28,29].

Be temperatūros iššūkius kelia ir dulkėtumas, kuris kartu su dideliu santykinio oro drėgnumu daro ženklų įtaką SM efektyvumui. Gali būti blokuojama ir (ar) sklaidoma saulės apšvieta, susidaryti lokalūs karšti taškai SM, kurie taip pat neigiamai veiktų efektyvumą ir ilgainiui galėtų mechanškai ir elektriškai pažeisti SM. Nors ir yra valymo technologijų, kurios padeda sėkmingai nuvalyti SM nuo dulkių ar smėlio, tačiau didelė drėgmė ir kondensacija ant SM susimaišiusi su nešvarumais gali palikti nuosėdas (kuomet išdžiūva), kurias yra sudėtinga pašalinti nepažeidžiant SM priekinio paviršiaus. Todėl SM aušinimas ir valymas vienu metu padėtų sumažinti didelės santykinės drėgmės sukeliamus neigiamus SM efektyvumui padarinius [28,29].



1.9 pav. Saulės modulių aušinimo technologijų medis [29]

1.4.1. Aktyvinis aušinimas oru

Aktyviniai aušinimo metodai naudoja išorinį energijos šaltinį ir papildomą įrangą, pavyzdžiui siurblius ir (arba) ventiliatorius, kurių reikia fluido priverstinės konvekcijos sukūrimui. Šie metodai nors ir reikalauja papildomos įrangos ir energijos, tačiau SM aušina efektyviau nei pasyviniai metodai [28,30].

Aktyvus aušinimas oru – SM aušinimo metodas, kuomet oras yra varinėjamas ventiliatoriais arba siurbliais ir taip sukurama priverstinė oro konvekcija aplink (prie) SM.

2022 metais Ganoje atliktas mokslinis tyrimas [31] nustatė, kad priklausomai nuo pasirinktos aušinančiosios sistemos konstrukcijos, SM efektyvumas padidėjo 10 % ir 12,5 % atitinkamai naudojant galvanizuotų ortakių (angl. Galvanized Duct Forced Convection, GDFC) ir ortakių su aliuminio plokštelėmis hibrido (angl. Aluminium Fins Ducted Forced Convection, FDFC) aušinimo metodus. GDFC eksperimente priverstinės konvekcijos sudarymui panaudoti 2 nuolatinės srovės ventiliatoriai, kurių nominali galia yra po 0,72 W. Ortakio išmatavimai – 54 x 36 x 12 cm, šiluminis laidis – 18 W/m·K, mono-Si SM su 30W nominalia galia. FDFC eksperimente priverstinės konvekcijos sudarymui panaudoti tokie pat ventiliatoriai kaip ir GDFC eksperimente. Ortakio išmatavimai – 54 x 36 x 12 cm, plokštelių išmatavimai – 54 x 5 x 0,08 cm, šiluminis laidis – 205 W/m·K, mono-Si SM su 30 W nominalia galia. Lauko temperatūra svyravo tarp 24-34 °C.

2022 metais Egipte atliktas mokslinis tyrimas [32] nustatė, kad ventiliatoriais ir kompresoriumi aušinamų SM efektyvumas atitinkamai padidėjo 7,1 % ir 12,6 %. Atėmus priverstinei konvekcijai naudojamą galią, gaunamas bendras sistemos efektyvumo prieaugis atitinkamai 7 % ir 3,9 %. Tyrime

naudoti 340 W poli-Si SM. Priverstinei konvekcijai sudaryti panaudoti 8 vnt. 120 x 120 x 3,8 cm, 2,3 W nominalios galios ventiliatoriai. Kitoje tyrimo dalyje priverstinei konvekcijai sudaryti panaudotas kompresorius, kurio galios nustatymai yra 7, 11 ir 14 W. Tyrimo sąlygos: 950 W/m² apšvieta, vidutinė 38 °C lauko temperatūra ir kompresoriumi sudaryto oro srauto tekėjimo greitis – 2,7 m/s.

Kitame 2021 metais atliktame tyrime [33], kuriame buvo gilinamasi į SM valymo ir aušinimo suslėgtu oru galimybes, buvo nustatytas 3,53 %, 4,91 % ir 6,1 % SM efektyvumo padidėjimas priklausomai nuo suslėgto oro tekėjimo trukmės, kuri buvo atitinkamai 10 s, 15 s ir 20 s. Tyrimas buvo atliktas Jungtinėje Karalystėje ir naudojo duomenis apie SM dulkėtumą iš Indijos. Suslėgto oro purkštukai aušino priekinę SM dalį iš viršaus į apačią. Tyrimo metu naudoti mono-Si SM. Tyrimu metu nustatyta, kad valant ir aušinant SM šiuo metodu, efektyvumo padidėjimas dėl dulkių pašalinimo visomis tiriamomis aplinkybėmis buvo 2–3 kartus didesnis už efektyvumo padidėjimą dėl SM aušinimo efekto.

1.4.2. Aktyvinis galinės saulės modulių plokštumos aušinimas skysčiu panaudojant uždara kontūrą

Priverstinė konvekcija, kurią sukelia skysčio tekėjimas aušinimo kanalais, kurie yra pritaisyti ar suformuoti prie SM galinio paviršiaus yra SM aušinimo būdas, kuris turi potencialą nuvedamos nuo SM šilumos antriniam panaudojimui, pavyzdžiui karšto vandens ruošimui.

2022 metais Indijoje atliktas tyrimas [34] nustatė, kad SM galinės sienelės aušinimas SiO₂ pagrindo nanoskysčiu per aušinimo kanalus sumažino SM temperatūrą per 35 °C ir padidino vidutinį SM efektyvumą 17,3 %. Tyrimo naudotas 0,2 % pagal svorį koncentracijos nanoskystis, 330 W poli-Si SM su prie galinės sienelės pritvirtintais vamzdeliais, kuriais tekėjo nanoskystis. SM darbas ir temperatūros stebėtos nuo 9 h iki 16 h ir aukščiausia SM temperatūra buvo fiksuota apie 35 °C, o neaušinamo SM temperatūra tokiu metu turėjo siekti apie 75°C.

Kitas 2022 metais atliktas teorinis tyrimas [35] nustatė 17,79 % SM efektyvumo padidėjimą, kuomet galinė SM sienelė yra aušinama sudarant kanalą ant SM galinės pusės uždedant metalinę plokštę. Didžiausias šiluminis ir elektrinis efektyvumo padidėjimas nustatytas prie 0,0014 kg/s ir 15 °C vandens tėkmės. Taip pat, nustatyta, kad vandens tekėjimo greitį padidinus nuo 0,010 kg/s iki 0,014 kg/s prie įvadinės vandens temperatūros lygios 20°C, SM temperatūra vidutiniškai sumažėja atitinkamai per 19,25 °C ir per 18,04 °C. Kuomet įvadinė vandens temperatūra yra 15 °C, ir vandens tėkmė yra 0,010 kg/s ir 0,014 kg/s, SM temperatūra sumažėja atitinkamai 22,79 °C ir 24,11 °C. Tyrimas atliktas prie NOCT sąlygų – apšvieta 800W/m², oro temperatūra 20°C, vėjo greitis 1 m/s, panaudojant mono-Si SM, kurio galia pagal NOCT yra 241,9 W.

Jordanijoje 2021 metais atlikus tyrimą [36] nustatyta, kad aušinant SM galinę sienelę uždaru vandens kontūru ir panaudojant metalinę profiliuotą skardą, pavyko padidinti SM efektyvumą 10,2 %. Tyrimo naudoti poli-Si SM, sumontuoti 26° posvyrio kampu į horizontą. Vandens tėkmės greitis buvo pastovus – 4,2 l/min. SM efektyvumas didėjo, kuomet buvo mažesnė įvadinio vandens temperatūra. Prie 29 °C įvadinės vandens temperatūros, SM efektyvumas buvo 10 % didesnis lyginant su neaušinamu. O prie 31,5 °C įvadinės temperatūros SM efektyvumo padidėjimas buvo 6,2 % lyginant su neaušinamu SM.

Kitame 2019 metais Egipte atliktame tyrime [37] nustatytas 18,6 % – 28,3% SM efektyvumo padidėjimas, priklausomai nuo vandens debito šalia galinės SM sienelės. Tyrimo naudotas 250 W

poli-si SM su spinduliuotės koncentratoriais pagamintais iš aliuminio lakštų. Prie galinės SM sienelės pritvirtinti aliuminio vamzdeliai, kurie skirti SM aušinimui. SM vidutinė temperatūra buvo sumažinta nuo 72,5 °C iki 47,2 °C, 45,5 °C, 41,8 °C ir 39,3 °C atitinkamai, kai vandens debitas buvo 0,01 kg/s, 0,02 kg/s, 0,03 kg/s ir 0,04 kg/s, efektyvumas didėjo atitinkamai 18,6 %, 20,9 %, 23,5 % ir 28,3 %.

2021 metais Egipte atlikus tyrimą [38] nustatyta, kad aušinamo SM elektros energijos generacija padidėjo apie 14,1 %, o naudingumo koeficientas padidėjo nuo 17,4 % iki 19,8 %. Bandymų metu vanduo tekėjo per poli vinil chlorido (PVC) vamzdžius pritvirtintus prie galinės saulės modulio sienelės. Vandens tėkmės debitas buvo fiksuotas – 0,15 kg/s. SM temperatūra aušinant buvo sumažinta vidutiniškai 5-10 °C.

1.4.3. Aktyvinis priekinės ar galinės saulės modulio plokštumos aušinimas skysčiu panaudojant purkštukus

Priverstinė konvekcija, kurią sukelia skysčio tekėjimas per SM galinį ar priekinį paviršių yra SM aušinimo būdas, kuris turi potencialą padidinti SM efektyvumą jį ataušinant. Taip pat, jei aušinimas vyksta per priekinį SM paviršių, jis yra nuvalomas nuo nešvarumų, o tai lemia, kad sumažinama nešvarumų sukeliamą saulės spindulių refrakcija ir padidėja SM efektyvumas. Vandens purškimo kolektorius dažniausiai yra montuojamas aukščiausioje SM vietoje ir per suformuotas skylės, kurios yra nutolusios vienodu atstumu viena nuo kitos, purškia vandenį ant SM paviršiaus. Vanduo veikiamas žemės gravitacijos teka SM paviršiumi žemyn ir tekėdamas aušina SM. Apačioje yra įrengtas vandens surinkimo kolektorius į kurį subėga pašilęs vanduo. Vanduo toliau teką į talpyklą ir procesas kartojasi.

2022 metais Ankaroje atliktas tyrimas [39], nustatė, kad SM efektyvumas padidėja apie 13,69 % lyginant su neaušinamu SM. Tyrime panaudoti poli-Si saulės moduliai su 270 W nominalia galia pagal STC. Moduliai pakreipti optimaliu Ankaroje 34 laipsnių kampu į horizontą. SM viršuje sumontuotas vandens srauto paskirstytojas, kuris suformuoja vandens sroveles ant priekinio SM paviršiaus. Vandens tėkmė per SM paviršių aušina SM ir nuvalo dulkes, tačiau taip pat padidina refrakcijos sukeliamus nuostolius. SM galinės sienelės temperatūra vidutiniškai buvo sumažinta nuo 30,09 °C iki 28,21 °C lyginant su neaušinamu SM.

Kitas 2021 metais Irane atliktas tyrimas [40] pasiekė 33,3%, 27,7% ir 25,9% efektyvumo padidėjimą kuomet SM priekinis paviršius aušinamas atitinkamai nuolatinėmis 1,24 L/min/m² vandens čiurkšlėmis, 0,2 intervalais purškiamomis 0,12 L/min/m² vandens čiurkšlėmis, 1,0 intervalais purškiamomis 0,52 L/min/m² vandens čiurkšlėmis. SM paviršiaus temperatūra atitinkamai sumažėjo nuo 57,1 °C iki 24,8 °C nuolatinių čiurkšlių metode ir nuo 57,1 °C iki 26,5 °C 0,2 intervalų metode. 0,2 intervalų metodas sumažina vandens sunaudojimą iki 1/9 lyginant su nuolatinių čiurkšlių metodu. Tyrime panaudoti du mono-Si SM su 85 W nominalia galia.

Jungtiniuose Arabų Emyratuose 2022 metais tirtas galinio SM paviršiaus aušinimas vandens dulksna. [41]. Tyrimo metu nustatyta, kad SM efektyvumas vidutiniškai padidėjo 16,66 % lyginant su ataskaitine sistema be aušinimo. Pilnutinis sisteminis efektyvumo padidėjimas atėmus vandens dulksnos formavimui sunaudotą elektros energiją buvo 13,54 %. Tyrimo įrangos išdėstymas lėmė, kad aušinamos vandeniui ir natūraliąja konvekcija sistemos taip pat buvo vėsinamos vėjo tik per priekinę SM plokštumą, tuo tarpu galinė plokštuma abiejose sistemose buvo izoliuota dėžėse. Vandens dulksnos sudarymui vandens debitą formavo diafragminis 33 W nominalios galios siurblys su pastoviu 1,26 l/min vandens debitu ir 70 PSI slėgiu. Dulksną formavo 16 purkštukų su 0.4 mm

angomis. Tyrime naudoti du mono-Si SM po 50 W nominalios galios. Aušinamos ir atskaitinės sistemos galinių SM paviršių temperatūrų skirtumas vidutiniškai siekė 33,23 % (arba 27,73 °C) prie 767,77 W/m² apšvietos ir 31,94 % (arba 22,86 °C) prie 819,17 W/m² apšvietos.

2019 metais Jordanijoje atlikus tyrimą [42] nustatytas SM efektyvumo padidėjimas nuo 4 % iki 10 % priklausomai nuo apšvietos kuri atitinkamai kito nuo 400 W/m² iki 1000 W/m². Tyrime naudotas 60 W nominalios galios poli-Si SM. SM buvo aušinamas suformuojant vandens sroveles ant SM priekinio paviršiaus. Vandens debitą užtikrino 12 V nuolatinės srovės vandens siurblys su fiksuotu 4 l/min vandens debitu. Tiekiamo vandens temperatūra buvo fiksuota ties 25 °C ir atitiko vidutinę iš šulinio (gręžinio) tiekiamo vandens temperatūrą tame regione. Prie 1000 W/m² apšvietos aušinamo SM temperatūra buvo vidutiniškai apie 26 °C mažesnė lyginant su neaušinama sistema, kurioje SM tipinę vasaros dieną įkaito iki apie 58 °C.

Indijos ir Kroatijos mokslininkų bendro tyrimo [43] atlikto 2022 metais metu nustatytas vidutinis 15,42 % efektyvumo padidėjimas. Tyrimas taip pat atliko kompiuterinį aušinimo modeliavimą, kuris nustatė vidutinį 15,34 % efektyvumo padidėjimą. Tyrime naudoti mono-Si SM, kurie buvo aušinami vandens srovelėmis per SM priekinį paviršių. Tirtas 70 L/h – 500 L/h vandens tėkmės debitas. Atėmus debito sudarymui sunaudotą elektros energiją, gautas efektyvumo padidėjimas 14,57 % prie 500 L/h vandens debito, tačiau ties 190 L/h tėkmės debitu pastebimas efektyvumo didėjimo įsisotinimas ir tyrimo autoriai konstatuoja, kad optimalus vandens debitas yra apie 170 L/h, kuris suteikia SM efektyvumo padidėjimą lygų 12,8 %.

1.4.4. Pagrindinių aktyvinių saulės modulio aušinimo būdų apibendrinimas

Iš apžvelgtos mokslinės literatūros matyti, kad iš pagrindinių aktyvinių aušinimo metodų didžiausią efektyvumo padidėjimą sudaro aktyvus galinės plokštumos aušinimas skysčiu panaudojant uždara kontūrą ir aktyvus priekinės ar galinės plokštumos aušinimas skysčiu panaudojant purkštukus. Taip pat matyti, kad uždaro kontūro aušinimo metodas dažniausiai taikomas poli-Si technologijos SM, o aušinimas purkštukais dažniau taikomas mono-Si technologijos SM. Apžvelgtų mokslinių straipsnių duomenų santrauka pateikiama 1.3 lentelėje.

1.3 lentelė. Apžvelgtų mokslinių straipsnių rezultatų suvestinė

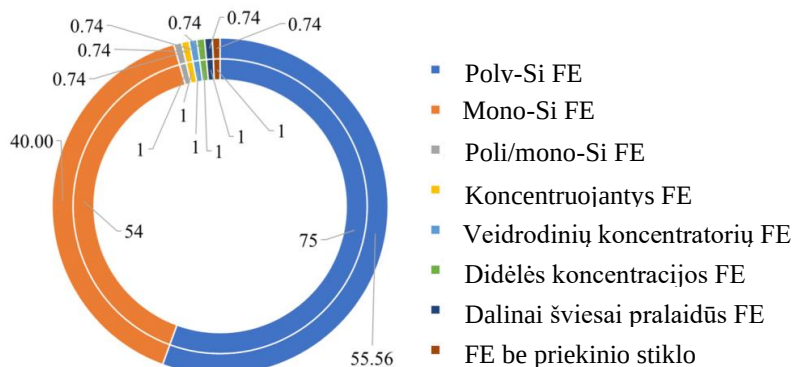
Šaltinio numeracija	Tyrimo metai	SM tipas	Aušinimo tipas	Fluidas	Temperatūros sumažėjimas, °C	SM efektyvumo padidėjimas, %	SM efektyvumo padidėjimo Vidurkis, %
[31]	2022	Mono-Si	Ortakiai SM gale su aliuminio plokštelėmis (GDFC)	Oras	-	12,5	9,58
[32]	2022	Poli-Si	Ventiliatoriai ir suslėgtas oras	Oras	-	7,1 ir 12,6	
[33]	2021	Mono-Si	Suslėgtas oras	Oras	-	6,1	

[34]	2022	Poli-Si	Uždaro kontūro aušinimo kanalai SM galinėje pusėje	Nano skystis	35	17,3	17,54
[35]	2022	Mono-Si	Uždaro kontūro aušinimo kanalai SM galinėje pusėje	Vanduo	24,11	17,79	
[36]	2021	Poli-Si	Uždaro kontūro aušinimo kanalas su profiliuotos skardos struktūra SM galinėje pusėje	Vanduo	-	10,2	
[37]	2019	Poli-Si	Uždaro kontūro aušinimo aliumininiai vamzdžiai SM galinėje pusėje	Vanduo	33,2	28,3	
[38]	2021	-	Uždaro kontūro aušinimo PVC vamzdžiai SM galinėje pusėje	Vanduo	-	14,1	
[39]	2022	Poli-Si	SM priekinio paviršiaus aušinimas vandens srovelėmis	Vanduo	30,09	13,69	17,81
[40]	2021	Mono-Si	SM priekinio paviršiaus aušinimas vandens srovelėmis	Vanduo	46,3	33,3	
[41]	2022	Mono-Si	SM galinio paviršiaus aušinimas vandens dulksna	Vanduo	-	16,66	
[42]	2019	Poli-Si	SM priekinio paviršiaus aušinimas vandens srovelėmis	Vanduo	26	10	

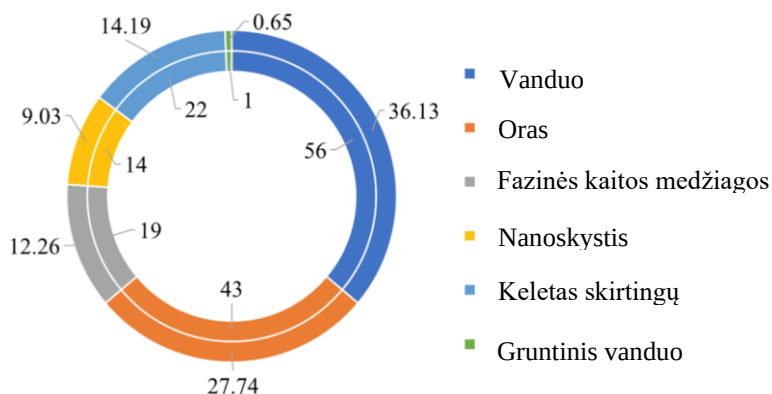
[43]	2022	Mono-Si	SM priekinio paviršiaus aušinimas vandens srovelėmis	Vanduo	-	15,42	
------	------	---------	--	--------	---	-------	--

Pagal apžvelgtą mokslinę literatūrą matyti, kad vidutiniškai didžiausią efektyvumo padidėjimą turėjo SM priekinės/galinės sienelės aušinimas vandens srovelėmis/dulksna – 17,81 %. Šis aušinimo būdas turi pranašumą prieš kitus apžvelgtus aušinimo būdus, kadangi priekinės sienelės aušinimo būdas taip pat nuvalo SM paviršių nuo nešvarumų ir tai padidina efektyvumą. SM galinės sienelės aušinimas uždaru kontūru turėjo vidutiniškai 17,54 % efektyvumo padidėjimą. Šis būdas yra tinkamiausias siekiant panaudoti nuo SM nuvedamą šilumą ir taip padidinant tiek terminės tiek elektros sistemos energetinį efektyvumą. Paminėtina, kad absoliuti dauguma mokslinių straipsnių nagrinėtoje srityje nagrinėja SM efektyvumo padidėjimą bandymų metodais, kuriuose aušinimo sistemos šiluminis įsisotinimas yra nykstamai mažas arba nevertinama. Tai lemia didesnes gaunamas efektyvumo padidėjimo vertes lyginant su bandymo metodais kuriuose minėtas reiškinys būtų vertinamas [44].

Taip pat, apžvalginis aušinimo būdų tyrimas, kuriame buvo analizuotos 208 publikacijos, iš kurių 14 buvo knygos, 34 apžvalginiai ir 160 mokslinių straipsnių nustatė, kad aktyvinės aušinimo sistemos statistiškai SM aušina geriau nei pasyvinės technologijos – vidutiniškai 19,19 % didesnis temperatūros kritimas ir 21,12 % didesnis SM efektyvumo padidėjimas. Taip pat, apžvalgoje nustatyta, kad daugiausiai tyrimuose naudoti poli-Si ir mono-Si SM. O aušinimo fluidas dažniausiai pasirinktas vanduo arba oras. Procentinis FE tipo ir aušinančio fluido pasiskirstymas pateikiamas 1.10 ir 1.11 paveiksle [45].



1.10 pav. SM sudarančių FE tipas, pagal panaudojimo moksliniuose tyrimuose dažnumą [45]



1.11 pav. SM aušinančio fluido tipas, pagal panaudojimo moksliniuose tyrimuose dažnumą [45]

Atsižvelgiant į apžvelgtą literatūrą ir nustatyta, kad iš aušinimo metodų dažniausiai buvo tiriami aktyvinio aušinimo vandenių metodai. Taip pat, nustatyta, kad dažniausiai šiuose tyrimuose buvo naudojami poli-Si SM. Atkreiptinas dėmesys, kad absoliuti dauguma tyrimų yra atlikta šiltesniuose klimatuose nei Lietuvos. SM aušinimas panaudojant uždara aušinančio vandens kontūrą turi didesnę potencialią antriniam nuvedamos šilumos panaudojimui, pavyzdžiui, sumažinti išlaidas už karšto vandens ruošimą. Įvertinus visus paminėtus aspektus, nuspręsta ištirti SM efektyvumo pokytį juos aušinant vandenių panaudojant uždara kontūrą ir nuvedamos šiluminės energijos potencialą.

2. „PVsyst“ ir šiluminių skaičiavimų modelis

2.1. „PVsyst“ programinis paketas

SM charakteristikų darbinėmis sąlygomis modeliavimas yra svarbus etapas prižiūrint SM darbą ir nustatant gedimus automatizuotų sistemų pagalba. Šio tyrime, modeliavimo tikslas yra gauti duomenis apie elektrinių parametrų arba charakteristikų pokyčius realiomis darbinėmis sąlygomis. Gauti duomenys toliau gali būti panaudojami prognozuojant SM generuojamą galią, energijos kiekį, meteorologinius ir šiluminius duomenis darbinės aplinkos sąlygomis.

Duomenų gautų modeliavimo metu ir duomenų surinktų iš SM eksploatacinėmis sąlygomis palyginimas padeda diagnozuoti saulės modulių gedimus. Todėl yra svarbu panaudoti išsamius modelius, kurie kuo tiksliau modeliuoja saulės modulių darbą. Vienas iš tokių modelių randamas programiniame pakete „PVsyst“ [46].

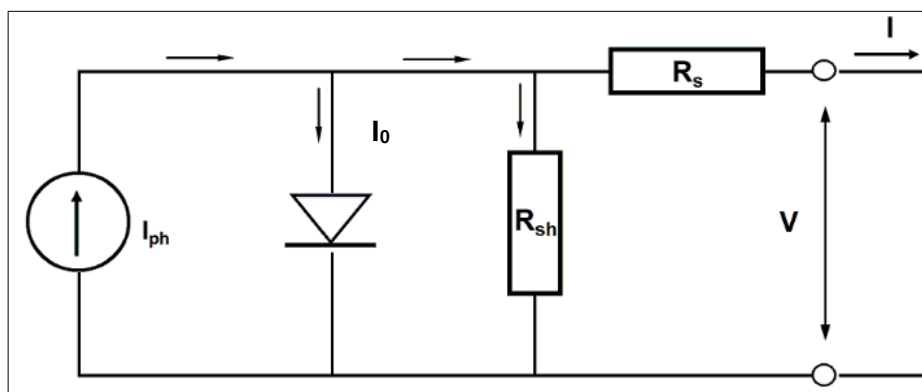
Šiame skyriuje: bus nagrinėjamas „PVsyst“ programinis paketas ir aprašomas šiluminis modelis. Rezultatai gauti pritaikant šiuos modelius bus analizuojami ir pateikiami tolimesniuose skyriuose ir prieduose.

2.1.1. Vieno diodo modelis

Atliekant FE charakteristikų modeliavimą vienas iš dažniausiai naudojamų yra vieno diodo modelis (angl. One Diode Model). Šis modelis dar vadinamas penkių parametrų modeliu (angl. Five Parameter Model). Modelyje yra vertinami 5 parametrai: apšvietos sukeliama foto srovė I_{ph} , diodo atgalinė soties srovė I_0 , šunto varža R_{sh} , nuosekioji varža R_s ir diodo kokybės koeficientas γ , kuris naudojamas Šoklio diodo lygtyje [46].

Atliekant FE modeliavimą ir siekiant padidinti modeliavimo rezultatų tikslumą dar gali būti naudojamas ir dviejų diodų modelis. Tačiau „PVsyst“ programiniame pakete naudojamas vieno diodo modelis. Tai daroma remiantis gamintojų pateikiamų FE ir SM parametrų tikslumu ir nereikšmingais SM modeliavimo rezultatų skirtumais tarp vieno diodo ir dviejų diodų modelių [46,47].

Schematiškai vieno diodo modelis gali būti atvaizduojamas, kaip pateikta 2.1 paveiksle.



2.1 pav. Vieno diodo modelio principinė schema [48]

Pagrindinė vieno diodo modelio matematinė išraiška prie standartinių bandymo sąlygų yra [49]:

$$I = I_{ph,STC} - I_{0,STC} \left(e^{\frac{q \cdot (U + R_s \cdot I)}{N_{FE,s} \cdot \gamma_d \cdot k \cdot T_{FE}}} - 1 \right) - \frac{U + R_s \cdot I}{R_{sh}}. \quad (2)$$

Čia:

I – FE srovė, A;

U – FE įtampa, V;

$I_{ph,STC}$ – foto srovė prie standartinių bandymo sąlygų, A;

$I_{0,STC}$ – diodo atgalinė soties srovė prie standartinių bandymo sąlygų, A;

γ_d – diodo kokybės koeficientas;

q – elektrono krūvis, C;

k_B – Bolcmano konstanta, J/K;

T_{FE} – FE temperatūra, K;

R_s – nuosekioji varža (sudaro silicio plokštelės kontaktai ir sujungimo šynelių varžos), Ω ;

R_{sh} – lygiagrečioji varža (sudaro silicio plokštelės nehomogeniškumas ir elemento kraštų efektas), Ω ;

$N_{FE,s}$ – nuosekliai sujungtų FE skaičius SM, vnt.

Lygiagrečioji ir nuosekioji varža daro neigiamą įtaką FE naudingumo faktoriui. Idealiu atveju R_s turėtų būti lygi nuliui, o R_{sh} begalybei. Praktikoje FE R_s kinta nuo 0,05 Ω iki 0,5 Ω , o $R_{sh} > 10 \Omega$. Vieno diodo modelio lygtį be minėtų penkių įvertinamų parametrų yra du nežinomieji parametrai, kurie yra skaičiuojami modeliavimo metu: I – FE srovė ir U – FE įtampa. Taip pat, įvertinamos 2 lygtį ir po lygtimi aprašytos fizikinės konstantos [49].

Vieno diodo modelyje taikoma prielaida, kad foto srovė yra idealiai proporcinga saulės apšvietai. Taip pat, foto srovei neženklia įtaka, lyginant su apšvietos įtaka, turi temperatūra, o įtaką nusakantis koeficientas nurodomas FE arba SM gamintojo. Trumpojo jungimo srovės temperatūrinis koeficientas μ_k nurodo tiesioginę srovės priklausomybę nuo temperatūros pokyčio ir dažniausiai būna apie +0,05 %/°C. Taigi, kintant darbinės aplinkos sąlygoms, foto srovė bus nustatoma atsižvelgiant į ataskaitinę apšvietos G_{STC} ir foto elemento temperatūros $T_{FE,STC}$ reikšmę. Tuomet foto srovė skaičiuojama: [49]

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{STC}} \cdot (I_{ph,STC} + \mu_k (T_{FE} - T_{FE,STC})). \quad (3)$$

Čia:

G – apšvieta modeliuojamomis sąlygomis, W/m²;

G_{STC} – apšvieta standartinėmis bandymo sąlygomis, W/m²;

$T_{FE,STC}$ – foto elemento temperatūra standartinėmis bandymo sąlygomis, K;

μ_k – trumpojo jungimo srovės temperatūrinis koeficientas, A/°C;

Diodo atgalinė soties srovė kinta priklausomai nuo temperatūros ir pokytis yra įvertinamas pagal:

$$I_0 = I_{0,STC} \left(\frac{T_{FE}}{T_{FE,STC}} \right)^3 \cdot e^{\left(\left(\frac{q \cdot E_g}{\gamma_d \cdot k_B} \right) \left(\frac{1}{T_{FE,STC}} - \frac{1}{T_{FE}} \right) \right)}. \quad (4)$$

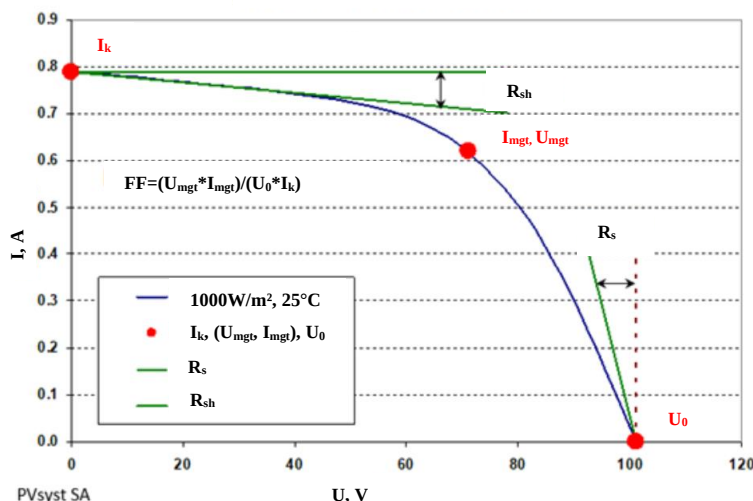
Čia:

E_g – puslaidininkio medžiagos energijos lygmuo (Si yra 1.12 eV), eV;

Spektrinės sklaidos įtaka programiniame pakete nevertinama, kadangi Si ir CIS technologijų FE ir SM įtaka yra nereikšmingai maža lyginant su kitomis technologijomis [49].

2.1.2. Kintamųjų nustatymas

Turint ataskaitinę saulės apšvietą ir FE temperatūrą vieno diodo modelis tampa modeliu su 5 nežinomaisiais. I_{ph} , STC , R_{sh} ir R_s įtaka SM I/U charakteristikai vizualiai atvaizduojama 2.2 paveiksle.

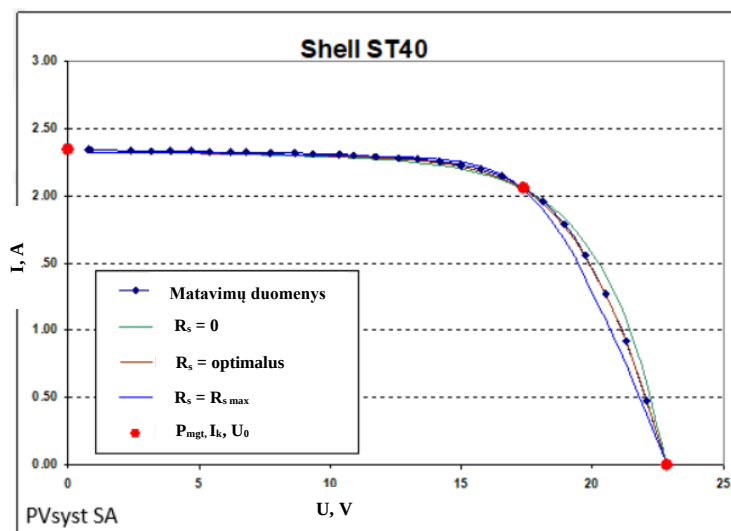


2.2 pav. SM I/U charakteristika [50]

I_{ph} , STC fotosrovės dydis yra pastovus nepriklausomai nuo įtampos. R_{sh} lygiagrečiosios varžos sukelti srovės nuostoliai (2 lygties $\frac{U+R_s \cdot I}{R_{sh}}$ dedamoji) atitinka O_{mo} dėsnį: tai yra linijinio srovės didėjimo priklausomai nuo įtampos funkcija. R_s nuoseklioji varža nusako įtampos kritimą lyginant vidinę FE įtampą ($U + R_s \cdot I$) su U_0 . Šis įtampos kritimas taip pat atitinka O_{mo} dėsnį [50].

2.1.3. Kuomet žinomi pilnos I/U kreivės matavimų rezultatai

R_{sh} , kreivės (I/U) taške, kai vyksta trumpasis jungimas ir teka srovė I_k , yra atvirkščiai priklausoma nuo I/U kreivės pokyčio ties I_k darbo tašku. Kristalinio Si SM R_{sh} yra pakankamai aukšta (I/U kreivė ties I_k tašku yra gulsčia), todėl šios varžos sukelti nuostoliai yra pakankamai žemi ir jų tikslumas neturi ženklios įtakos skaičiavimams. Taigi, įvertinus R_{sh} lieka 4 kintamieji kuriuos reikia nustatyti. Iš ataskaitinės STC I/U kreivės matavimų duomenų gali būti ekstrapoliuojamos $I_{k,STC}$, $I_{mgt,STC}$, $U_{mgt,STC}$ ir $U_{0,STC}$ vertės. Tuomet galime 2 lygtį parašyti 3 skirtingiems darbo režimams: $U=0V$ ir $I=I_k$, $U=U_{mgt}$ ir $I=I_{mgt}$, bei $U=U_0$ ir $I=0$ A. Tiksliai U_{mgt} įtampa nėra svarbi ir yra priimtina kaip artima maksimaliai vertei. Taip gaunamos 3 skirtingos lygtys. Kad išspręsti šią lygčių sistemą, reikia vienam iš 4 parametrų priskirti pasirinktiną vertę. Pradžioje fiksuojama $R_n=0\Omega$. Prie šių sąlygų išsprendžiama lygčių sistema ir gaunama I/U kreivė, kai $R_s=0\Omega$. Tuomet padidinama R_s vertė ir lygčių sistema perskaičiuojama, taip gaunant kitą I/U kreivę. Procesas kartojamas kol lygčių sistema tampa neišsprendžiama. Ribinė R_s vertė apibrėžia parametą, kuris vadinamas $R_{s,MAX}$ ir yra maksimali R_s varža. Tikroji R_s vertė yra tarp šių kraštutinių verčių ir yra galutinai patikslinama ją keičiant, kol gaunama I/U kreivė artimiausiai atitinka išmatuotos I/U kreivės duomenis. Vizualus kreivių pokytis pateikiamas 2.3 paveiksle. [50]



2.3 pav. R_s įtaka SM I/U kreivei [50]

2.1.4. Kuomet žinomi tik duomenys iš saulės modulio techninių specifikacijų

Šiuo atveju neturimi pilnos I/U kreivės duomenys, todėl reikia kitais metodais nustatyti R_s ir R_{sh} vertes. Pradžioje pasirenkama R_{sh} vertė apskaičiuojama pagal formulę:

$$R_{sh} = \frac{U_{mgt}}{(0,2 \cdot (I_k - I_{mgt}))}. \quad (5)$$

Taip apribojama $R_{s,max}$ vertė. Tolimesniuose skaičiavimuose R_{sh} gali būti padidinama, jeigu nebus pasiekiamas reikiamas žemos apšvietos efektyvumas. Šioje skaičiavimų stadijoje apie varžą R_s pakankamai informacijos nėra. Tolimesnėje analizėje bus aprašoma, kad R_s varža turi ženklų įtaką SM efektyvumui prie žemos apšvietos, todėl R_s varža yra nustatoma atsižvelgiant į išmatuotą žemos apšvietos efektyvumo vertę. [50]

2.1.5. Kiti kintamieji

Be techninėse specifikacijose pateikiamų duomenų papildomai „PVsyst“ programinio paketo vieno diodo modelis reikalauja keleto papildomų parametrų. Vienas iš jų yra R_{sh} varža. Pagal standartinės vertės hipotezę, kuri yra pasirinkta „PVsyst“ programiniame pakete R_{sh} apibrėžiama pagal 2 formulę. Pasitelkus duomenis iš ilgalaikių bandymų ir tyrimų darbinėmis sąlygomis su skirtingomis SM technologijomis, pastebėta, kad R_{sh} eksponentiškai didėja kuomet apšvieta mažėja. Ši priklausomybė lemia du papildomus parametrus kurie turi būti apibrėžti. Pirmasis yra eksponentės dedamoji $R_{sh,exp}$, kuri remiantis ilgalaikiais matavimais yra lygi 5,5 ir yra reikšmingai nekintanti nepriklausomai nuo SM technologijos, todėl yra nemodifikuojama ir laikoma konstanta [51].

Kitas parametras yra R_{sh} kreivės taškas $R_{sh,0}$ prie 0 apšvietos. Nustatyta, kad šis parametras yra stabilus su plonasluoksnių FE technologijomis (apie 12 kartų didesnis už R_{sh} prie 1000 W/m² apšvietos) ir mažiau stabilus su Si technologijos FE – apie 4 kartus didesnis pagal bandymus darbinėmis sąlygomis ir 8 kartus didesnis už R_{sh} pagal bandymus atliekamus patalpų viduje esančiuose stenduose prie žemos apšvietos. Tačiau Si technologijų FE R_{sh} turi palyginti su R_s mažą įtaką FE maksimalios galios taško vertei ir netikslumai dažniausia atsveriami per R_s koregavimą, kuri turi didesnę įtaką FE galingumui [51].

R_s varža yra pagrindinis parametras kuris apibrėžia SM žemos apšvietos efektyvumą lyginant su STC išmatuotu efektyvumu. Todėl patogu naudoti efektyvumo duomenis prie žemos apšvietos sąlygų, kurių gavimo bandymai yra standartizuoti ir būtini gauti sertifikavimą pagal IEC 61853, kad nustatyti

R_s vertę. Standartiškai „PVsyst“ programiniame pakete Si technologijos SM R_s nustatomas toks, kad žemos apšvietos reliatyvus efektyvumas būtų -3 % (200 W/m²). Šis veiksmas ne visada yra įmanomas kadangi anksčiau aprašyta $R_{s,max}$ vertė gali riboti R_s vertės dydį. Tokiu atveju yra padidinama R_{sh} vertė, kuri atitinkamai padidina $R_{s,max}$ vertę. Jeigu šio veiksmo nepakanka, turi būti neženkliai padidinamas U_0 prie STC. Atliekant eksperimentus pastebėta, kad U_{mgt} ir U_0 santykis yra ženkliai mažesnis eksperimentiniuose duomenyse nei yra gaunamas techninėse specifikacijose. [51]

Įdedant SM modelį į PVsyst programinio paketo duomenų bazę atsižvelgiama ar gamintojas pateikė detalią ataskaitą, kurioje aprašyti bandymų pagal IEC 61853 duomenys atlikti trečiosios šalies. Jei duomenys pateikimi, jie yra išanalizuojami ir R_s ir R_{sh} yra nustatomos, kad artimiausiai atitiktų šių bandymų rezultatus. [51]

Temperatūrinė P_{mgt} priklausomybė taip pat nusakoma vieno diodo modelyje. Tačiau, labai retai techninėse specifikacijose pateikiamas γ koeficientas tiksliai atitinka vieno diodo modelyje modeliuojamą įtaką. Tam, kad būtų patikslinamas techninėse specifikacijose duotas koeficientas programiniame pakete atliekama linijinė korekcija, kaip funkcija nuo temperatūros, γ vertei. Gaunamas parametras μ_γ , kuris yra reguliuojamas „PVsyst“ programiniame pakete kol pasiekiamas bandymuose nustatyta μP_{mgt} galia. μP_{mgt} yra pateikiamas gamintojų ir nusako kokio statumo yra SM galios ir temperatūros priklausomybės kreivė [51].

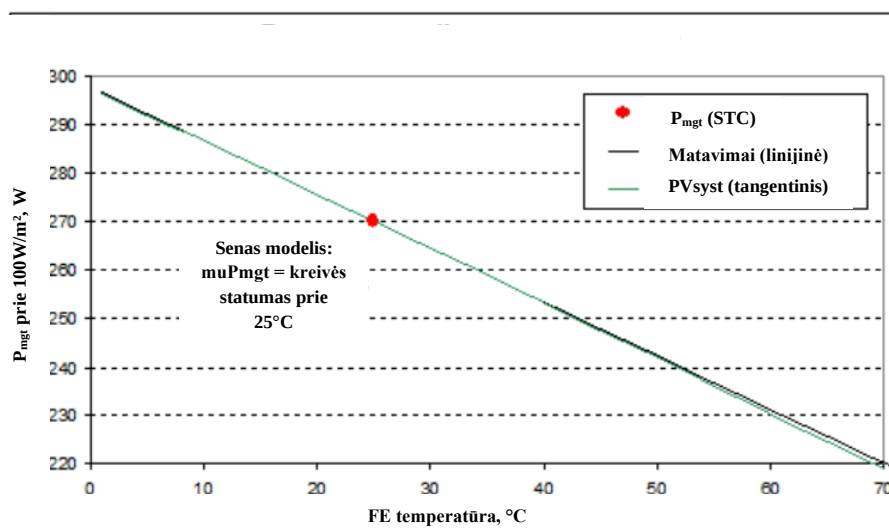
Dauguma laboratorijų po bandymų pateikia 5 parametrus, kurie yra ir „PVsyst“ modelyje: R_s , R_{sh} , R_{shExt} , R_{sh0} ir $\mu\Gamma$. IEC 61853 standartas reikalauja, kad I/U kreivė būtų išmatuota 23 skirtinguose apšvietos ir temperatūros sąlygomis. Tai reiškia, kad užpildoma lentelė kurioje aprašomi minėti 5 parametrai prie skirtingų sąlygų. Tačiau, taikant tokį metodą matavimų paklaidos turi reikšmingą įtaką rezultatams, taip 23 eksperimentiniai sąlygų taškai nėra pakankami tiksliai apibrėžti visus parametrus, kadangi skiriasi šių kintamųjų priklausomybių nuo temperatūros ir apšvietos tipas (linijinės, eksponentinės). „PVsyst“ modelyje R_{shExt} , R_{sh0} ir $\mu\Gamma$ parametrai yra traktuojami kaip pastovūs. Analizuojamas tik darbas prie žemos apšvietos prie 25°C temperatūros. Bet kuriam SM, nesvarbu kokia galios klasė, pasirenkamas R_s ir vėliau keliamas R_{sh} , kad būtų atkuriamas bandymų prie žemos apšvietos rezultatas. Taip pat, atsižvelgiama į tai, kad I_k priklausomybė nuo apšvietos dažnu atveju nėra tiesinė. 1% apšvietos pokytis lemia 1% reliatyvaus efektyvumo pokytį. Taigi pradžioje analizuojama I_k priklausomybė nuo apšvietos ir koreguojamą apšvieta, kad būtų linijinės priklausomybės su išmatuota I_k [51].

2.1.6. Temperatūrinės korekcijos

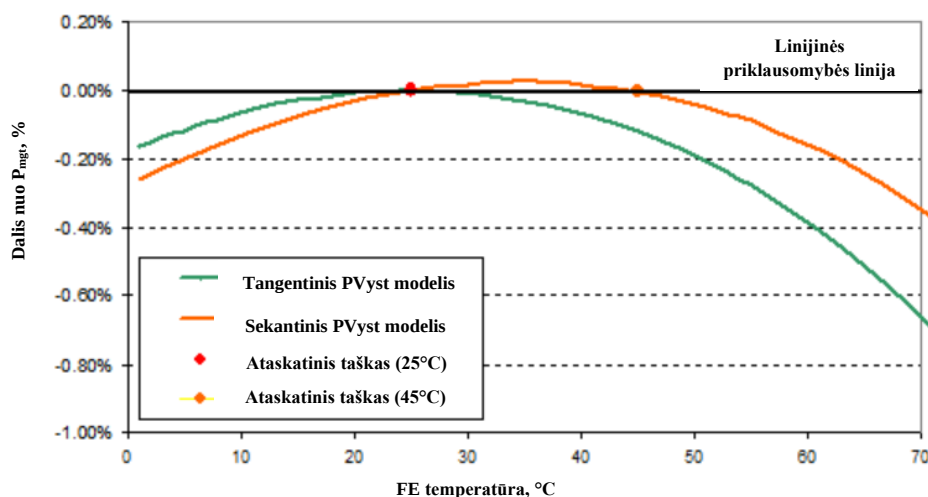
Standartiniame vieno diodo modelyje I_0 priklausomybė nuo temperatūros aprašoma 4 formulėje pateikta lygtimi. I_0 priklauso nuo eksponentinės temperatūros dedamosios, E_g ir γ . Anksčiau aprašytas γ yra vienas iš 5 vieno diodo modelio kintamųjų, kuris priklauso nuo R_s , o pastarasis gali kisti nuo 0 iki $R_{s,max}$.

Pagal laboratorijose atliktus matavimus P_{mgt} priklausomybė nuo temperatūros yra linijinė. μP_{mgt} kuris yra apibrėžiamas SM gamintojų nusako šios kreivės statumą. Vieno diodo modeliavimo metu apskaičiuojama priklausomybė nėra pilnai linijinė. Iki 6.25 versijos „PVsyst“ atlikdavo temperatūrinės priklausomybės tangentines korekcijas prie 25°C. Taip gaunamos P_{mgt} atitikimo su linijinės priklausomybės hipoteze vertės: -0.03 % prie 35 °C, -0.12 % prie 45 °C, -0.28 % prie 55°C. Nuo 6.26 versijos PVsyst parenka sekantinę kreivę, kurią apibrėžia 25°C ir 45°C temperatūros. Šis būdas padidina modeliavimo tikslumą lyginant su tangentine priklausomybe prie realių darbinių

sąlygų. Taip pasiekiamas tikslumas kuris lemia simuliuojamos metinės generacijos nuostolius tarp - 0.1 % ir -0.2 % lyginant su matavimo duomenimis [53].



2.4 pav. SM P_{mgt} priklausomybė nuo FE temperatūros [53]



2.5 pav. SM P_{mgt} korekcijos [53]

2.1.7. Dirbtinio meteorologinių duomenų paketo formavimas

„PVsyst“ programiniame pakete suformuojamas dirbtinis duomenų paketas, kuriame mėnesinė meteorologinė informacija yra transformuojama į valandinę. Šis žingsnis yra būtinas, nes skaičiavimuose gaunamos momentinės vertės (arba pseudo-momentinės, tai yra valandos vidurkiai). Minėtas žingsnis svarbus ir transpozicijos modelyje, kadangi jam įtaką daro saulės geometrija. Duomenų paketo formavimas vyksta panaudojant *Meteonorm 8.1* algoritimą, kuris yra integruotas į „PVsyst“ programinį paketą [54].

2.2. Šiluminis modelis

Šiluminis modelis yra skirtas įvertinti SM aušinimo poveikį, nuvestinos šiluminės energijos potencialą bei SM elektrinio efektyvumo ir generuojamos elektros energijos pokytį. Modeliavimas atliekamas „Excel“ programiniame pakete.

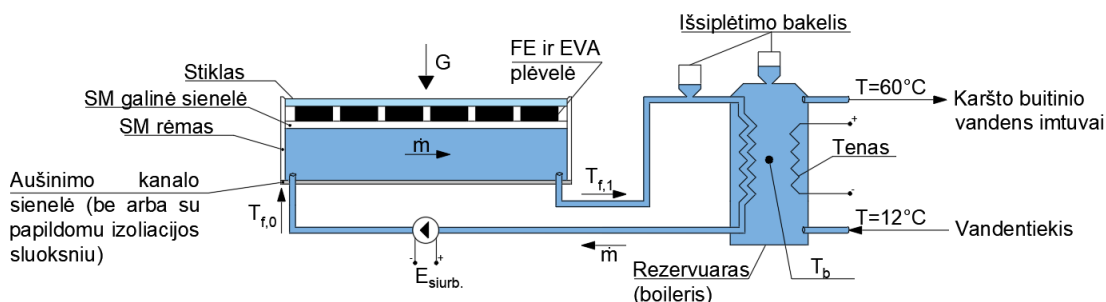
2.2.1. Šiluminių skaičiavimų modelis

Šiluminio modelio skaičiavimo metodika remiasi moksliniuose straipsniuose [55,56,57,58,59,60,61,62,63] aprašytomis metodikomis ir yra detalizuojama toliau šiame skyrelyje.

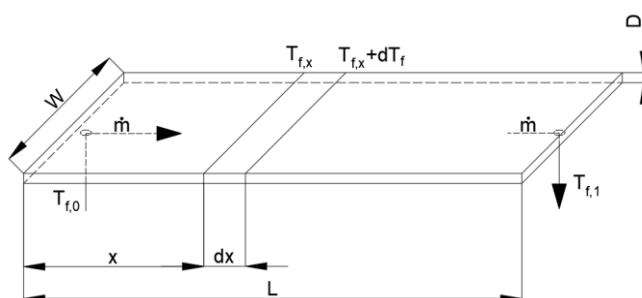
Šiluminiame modeliavime yra taikomas keletas prielaidų:

- sistema yra kvazi-stabilioje būsenoje;
- etileno vinil acetato optinis pralaidumas yra artimas 100%;
- temperatūrinis gradientas tarp SM sluoksnių yra nevertinamas;
- vandens tėkmė per aušinimo kanalą yra tolygi ir vyksta pilnu tūriu.

Principinė modeliujamos sistemos tipo schema atvaizduojama 2.6 paveiksle. Modelis yra pritaikytas šilumos nuvedimui ir potencialiam antriniam panaudojimui karšto buitinio vandens ruošimui. Schemoje atvaizduojamas tipinis potencialus tokios sistemos panaudojimas namų ūkiuose. Tyrimo metu modeliujamas nuvedamos šilumos kiekis panaudojamas įvertinti kiek vandens temperatūra pakyla rezervuare dienos metu. Skaičiavimuose taikoma prielaida, kad buitinio karšto vandens vartojimas yra didžiausias anksti ryte ir vakare, tad analizuojamame 8–19 valandos intervale visas nuvedamas šilumos kiekis lemia aušinimo sistemoje esančio vandens temperatūros didėjimą. Šis skaičiavimas yra svarbus, nes nuo rezervuaro vandens įšilimo priklauso temperatūrinė aušinimo sistemos įsisotinimas, o nuo jos priklauso kokia yra aušinimo įtaka SM efektyvumui.



2.6 pav. Principinė šiluminio modelio schema



2.7 pav. Aušinimo kanalo ir jo diferencialinio ilgio schema [55]

Energijos balanso lygtis stiklas-poli vinil fluorida sienelė (galinė SM sienelė) [55,58]:

$$\tau_g[\alpha_c\beta_c G + \alpha_T(1 - \beta_c)G]W dx = [U_t(T_c - T_a) + U_T(T_c - T_{bs})]W dx + \tau_g\beta_c\eta_{el}GW dx. \quad (6)$$

Čia:

τ_g – stiklo šviesos laidumo koeficientas;

β_c – FE paviršiaus užpildymo koeficientas;

α_c – FE šviesos sugerties koeficientas;

G – saulės apšvieta krintanti į FE paviršių;

α_T – galinės SM sienelės šviesos sugerties koeficientas;

W – SM plotis;

U_t – suminis šilumos perdavimo nuo FE į atmosferą koeficientas;

U_T – laidžiojo šilumos perdavimo koeficientas nuo FE per galinę sienelę į tekančią vandenį

T_c – FE/SM temperatūra, K;

T_{bs} – galinės SM sienelės temperatūra, K;

T_a – oro temperatūra, K;

dx – SM ilgio diferencialas;

τ_c – FE šviesos laidumas;

η_{el} – elektrinis FE efektyvumas.

Šios lygties dedamosios gali būti supaprastintai įvardinamos taip [55]:

[Saulės energija kuri pasiekia FE/SM] =
[Bendri šiluminiai nuostoliai nuo FE paviršiaus į atmosferą] +
[Suminis šilumos perdavimas nuo FE į galinės sienelės paviršių] +
[SM elektros energijos generacija];

Laidžiojo šilumos perdavimo koeficientas nuo FE per galinę sienelę SM į tekančią vandenį skaičiuojamas [55]:

$$U_T = \left[\frac{L_{si}}{K_{si}} + \frac{L_T}{K_T} \right]^{-1}. \quad (7)$$

Čia:

L_{si} – FE storis, m;

K_{si} – šiluminis FE laidumas, W/m·K;

L_T – galinės SE sienelės storis, m;

K_T – šiluminis galinės SM sienelės laidumas, W/m·K.

Šiluminis perdavimo koeficientas nuo FE per SM priekinį paviršių (stiklą) į atmosferą randamas [55, 58, 60]:

$$U_t = \left[\frac{L_g}{K_g} + \frac{1}{h_{conv,t}} + \frac{1}{h_{rad}} \right]^{-1}. \quad (8)$$

Čia:

L_g – priekinės SM sienelės stiklo storis, m;

K_g – šiluminis priekinės SM sienelės stiklo laidumas, W/m·K;

$h_{conv,t}$ – konvekcinis šilumos perdavimo koeficientas priekinei/galinei SM sieniei, W/m²·K;

h_{rad} – šilumos spinduliavimo perdavimo koeficientas, W/m²·K.

Konvekcinis šilumos perdavimo koeficientas randamas [55]:

$$h_{conv,t} = 2.8 + 3V_w. \quad (9)$$

Čia:

V_w – vėjo greitis ties SM priekine sienele, m/s.

Šilumos spinduliavimo perdavimo koeficientas randamas [55, 57]:

$$h_{rad} = \varepsilon_g \sigma (T_s + T_c)(T_s^2 + T_c^2). \quad (10)$$

Čia:

ε_g – SM šiluminio spinduliavimo koeficientas;

σ – Stefano ir Boltzmano konstanta, $W/(m^2 \cdot K^4)$;

T_s – efektinė dangaus skliauto temperatūra, K.

Efektinė dangaus skliauto temperatūra randama [55]:

$$T_s = T_a - 6. \quad (11)$$

Energijos balanso lygtis galinei SM sienelei [55, 58, 60]:

$$U_T = (T_{bs} + T_c)W \, dx = h_f(T_{bs} - T_f)W \, dx. \quad (12)$$

Čia:

h_f – konvekcinis šilumos perdavimo koeficientas vandeniui, $W/m^2 \cdot K$;

T_f – tekančio vandens temperatūra; K

Energijos balanso lygtis tekančiam vadeniui per vėsavimo kanalą [55, 58]:

$$\dot{m}C_p \left(\frac{dT_f}{dx} \right) dx + U_b(T_f + T_a)W \, dx = h_f(T_f + T_a)W \, dx. \quad (13)$$

Čia:

U_b – Šilumos perdavimo koeficientas iš vandens per aušinimo kanalo galinę sienelę į atmosferą, $W/(m^2 K)$.

Tekančio vandens debitas randamas [55,56]:

$$\dot{m} = \rho V_{in} A_d. \quad (14)$$

Čia:

V_{in} – vandens tėkmės greitis, m/s;

A_d – aušinimo kanalo skerspjūvio plotas statmenai tėkmės kryptiai, m^2 .

Konvekcinis šilumos perdavimo koeficientas vandeniui tekančiam stačiakampio gretasienio formos kanalu randamas [62]:

$$h_f = \frac{Nu}{D_h} k. \quad (15)$$

Čia:

Nu – Nuselto skaičius;

k – vandens šiluminis laidis, $W/(m \cdot K)$;

D_h – hidraulinis aušinimo kanalo diametras, m;

Hidraulinis aušinimo kanalo diametras randamas [62]:

$$D_h = \frac{4WD}{2W+2D} \quad (16)$$

Čia:

D – aušinimo kanalo gylis, m;

Nuselto skaičius randamas [61, 62]:

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}. \quad (17)$$

Čia:

Re – Reinoldso skaičius;

Pr – Prandtlio skaičius.

Reinoldso skaičius randamas [62]:

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu}. \quad (18)$$

Čia:

ρ – vandens tankis prie ataskaitinės temperatūros, kg/m³;

v – vandens tėkmės greitis kanale, m/s;

μ – vandens dinaminė klampa prie ataskaitinės temperatūros, Pa · s.

Prandtlio skaičius randamas [62]:

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k}. \quad (19)$$

Čia:

C_p – savitoji vandens šiluma, J/(kg·°C).

Šilumos perdavimo koeficientas iš vandens per aušinimo kanalo galinę sienelę į atmosferą randamas [55]:

$$U_b = \left[\frac{L_i}{K_i} + \frac{1}{h_{conv,t}} \right]^{-1}. \quad (20)$$

Čia:

L_i – aušinimo kanalo galinės sienelės izoliacijos storis, m;

K_i – šiluminis izoliacijos laidumas, W/m·K.

FE temperatūra apskaičiuojama [55,57]:

$$T_c = \frac{(\alpha\tau)_{ef}G + U_t T_a + U_T T_{bs}}{U_t + U_T}. \quad (21)$$

Čia:

$(\alpha\tau)_{ef}$ – šviesos laidumo ir sugerties koeficientas priklausantis nuo tiesioginės ir difuzinės apšvietos proporcijų.

Galinės SM sienelės temperatūra skaičiuojama [55,57]:

$$T_{bs} = \frac{h_{p1}(\alpha\tau)_{ef}G + U_{tT}T_a + h_f T_f}{U_{tT} + h_f}. \quad (22)$$

Čia:

H_{p1} – koeficientas, kuris apibrėžia nuostolius kylančius dėl skirtingų sluoksnių sudarančių SM ir esančių tarp FE ir atmosferos bei FE ir vandens tėkmės aušinimo kanale.

U_{tT} – suminis šilumos perdavimo koeficientas nuo SM priekinio stiklo iki galinės sienelės, $W/(m^2 \cdot K)$;

T_f – vandens temperatūra, $^{\circ}C$.

Šviesos laidumo ir sugerties koeficientas randamas [55]:

$$(\alpha\tau)_{ef} = \tau_g[\alpha_c\beta_c + \alpha_T(1 - \beta_c) - \beta_c\eta_{el}]. \quad (23)$$

Nuostolių koeficientas H_{p1} randamas [55]:

$$H_{p1} = \frac{U_T}{U_T + U_t}. \quad (24)$$

Suminis šilumos perdavimo koeficientas U_{tT} randamas [55]:

$$U_{tT} = \frac{U_T U_t}{U_T + U_t}. \quad (25)$$

Diferencinė lygtis T_f skaičiavimui gaunama įstačius 12 lygtį į 8 lygtį [55]:

$$\frac{dT_f}{dx} + \left(\frac{WU_L}{\dot{m}C_p}\right)(T_f - T_a) = \frac{Wh_{p1}h_{p2}(\alpha\tau)_{ef}G}{\dot{m}C_p}. \quad (26)$$

Čia:

U_L – šilumos perdavimo suminis koeficientas nuo SM į aplinką, $W/(m^2 \cdot K)$;

h_{p2} – nuostolių kylančių dėl SM poli vinil fluorido galinės sienelės ir vandens tekančio aušinimo kanalu kontakto koeficientas.

Nuostolių koeficientas h_{p2} randamas [55]:

$$H_{p2} = \frac{h_f}{U_{tT} + h_f}. \quad (27)$$

Suminis šilumos perdavimo koeficientas nuo SM stiklo į aušinimo kanale tekančią vandenį randamas [55]:

$$U_{tf} = \frac{U_{tT}h_f}{U_{tT} + h_f}. \quad (28)$$

Suminis šilumos perdavimo nuo SM į aplinką koeficientas randamas [55]:

$$U_L = U_b + U_{tf}. \quad (29)$$

Galiausiai atlikus visus aprašytus skaičiavimus gali būti skaičiuojama vandens ištekančio iš SM aušinimo kanalo temperatūra [55, 59]:

$$T_{f,1} = \left(T_a + \frac{h_{p1}h_{p2}(\alpha\tau)_{ef}G}{U_L}\right)\left(1 - e^{\left(\frac{-WU_L L}{\dot{m}C_p}\right)}\right) + T_{f,0}e^{\left(\frac{-WU_L L}{\dot{m}C_p}\right)}. \quad (30)$$

Čia:

L – vėsimo kanalo ilgis (lygus SM ilgiui), m;

$T_{f,0}$ – į SM aušinimo kanalą įtekančio vandens temperatūra, K.

Tuomet, gali būti randamas nuvedamos nuo SM šiluminės energijos kiekis pasitelkiant formulę [55, 59]:

$$\dot{Q}_u = \dot{m}C_p(T_{f,1} - T_{f,0}). \quad (31)$$

Modelyje naudojamos konstantos, kurios išlieka pastovios nepriklausomai nuo modeliujamos situacijos. Šių dydžių suvestinė pateikiama 2.1 lentelėje:

2.1 lentelė. Šiluminiame modelyje naudojami fiksuoti dydžiai ir jų vertės [55, 57, 58, 59, 60]

Pavadinimas	Vertė
Saulės modulis	Monokristalinis PERC 375W
Saulės modulio išmatavimai $L \times W \times D$, mm	1765x1048x35
Saulės modulio galios pokyčio koeficientas γ , %/°C	-0.38
FE storis L_{si} , m	$180 \cdot 10^{-6}$
FE šiluminis laidis K_{si} , W/(m·K)	149
SM galinės sienelės storis L_T , m	$5 \cdot 10^{-4}$
SM galinės sienelės šiluminis laidis K_T , W/(m·K)	0,1583
SM priekinio stiklo storis L_g , m	$32 \cdot 10^{-3}$
SM priekinio stiklo šiluminis laidis K_g , W/(m·K)	1
Stefano ir Boltzmano konstanta σ , W/(m ² ·K ⁴)	$5,67 \cdot 10^{-8}$
SM šiluminio spinduliavimo koeficientas, ϵ_g	0,88
Stiklo šviesos laidumo koeficientas τ_g	0,95
FE šviesos sugerties koeficientas, α_c	0,85
FE paviršiaus užpildymo koeficientas β_c	0,83
Galinės SM sienelės šviesos sugerties koeficientas α_T	0,5
μ , kg/(m·s)	Modelis parenka pagal vandens temperatūrą
k , W/(m·K)	Modelis parenka pagal vandens temperatūrą
C_p , J/(kg ·°C)	4186
ρ , kg/m ³	1000
d_{vv} , m	0,0326
$T_{f,0}$, °C	12
Boilerio (rezervuaro) šiluminiai nuostoliai per parą, kWh	1,75
Vandens siurblio galia, W	90
Maksimalus siurblio našumas, kg/s	3,3
Šiluminių nuostolių nuo SM iki boilerio (rezervuaro) koeficientas	0,88

2.2.2. Saulės modulių aušinimo poveikio įvertinimo skaičiavimai

Šiluminio modelio skaičiavimai atliekami panaudojant valandinius duomenis iš „PVsyst“ programinio paketo. Skaičiavimai atliekami kiekvienai dienai valandos tikslumu. Atlikus visų metuose esančių dienų skaičiavimus iš gautų rezultatų toliau skaičiuojami rodikliai apibūrinantys aušinimo įtaką SM veikimui. Aušinimo sistemos tūris nustatomas:

$$V_s = V_{SM} + V_b + V_v. \quad (32)$$

Čia:

V_{SM} – vėsinimo kanalo tūris, m^3 ;

V_b – boilerio tūris, m^3 ;

V_v – vamzdžių tūris, m^3 .

Vamzdžių tūris randamas:

$$V_v = \pi \left(\frac{d_{vv}}{2} \right)^2 L_v. \quad (33)$$

Čia:

d_{vv} – vamzdžio vidinis diametras, m;

L_v – vamzdžių ilgis, m.

Vamzdžių ilgis metrais nustatomas:

$$L_v = 2(N_{SM}W) + 10. \quad (34)$$

Čia:

N_{SM} – nuosekliai aušinamų SM kiekis, vnt.

Šiluminiame modelyje vertinama, kad iš SM aušinimo kanalo ištekęs vanduo teka link boilerio, kur atiduodama šiluma karšto buitinio vandens ruošai. Visas nuvestas šilumos kiekis boilerio nepasiekia, nes vyksta šiluminiai nuostoliai. Šie nuostoliai modelyje vertinami 12% [63]. Tuomet kiekvienai valandai perskaičiuojamas nuo SM nuvedamas ir boilerį pasiekiantis šilumos kiekis:

$$\dot{Q}_{u,p} = 0.88\dot{Q}_u. \quad (35)$$

Perskaičiavus nuvedamą šilumos kiekį atsiranda galimybė apskaičiuoti vandens temperatūrą boileryje:

$$T_b = T_{f,0} + \frac{(\dot{Q}_{u,p} - Q_{bn,v})}{V_s \rho C_p}. \quad (36)$$

Čia:

$Q_{bn,v}$ – boilerio šiluminiai nuostoliai per valandą, kWh.

Sekančios valandos skaičiavimuose $T_{f,0}$ skaičiuojamas kaip praeitos valandos T_b . Dienos skaičiavimų pradžioje (pirmas skaičiavimas) naudojama $T_{f,0} = 12^\circ C$ temperatūra. Kiekvienos valandos skaičiavimai atliekami atliekant 20 iteracijų.

Kiekvieną valandą perskaičiuota temperatūra T_c , įvertintinus SM šiluminės galios degradacijos koeficientą γ , apibrėžia potencialų generuojamos elektros energijos prieaugį arba sumažėjimą. Šiluminiame modelyje apskaičiuojamos T_c įtaka elektros energijos generacijai skaičiuojama:

$$E_{SM,p} = E_{SM,PVsyst} \left(1 - \left(\frac{\gamma}{100} (T_{c,PVsyst} - T_c)\right)\right) - E_{siurb.} \quad (37)$$

Čia:

$E_{SM, PVsyst}$ – PVsyst programiniu paketu prognozuojama SM elektros generacija, kWh;

$T_{c, PVsyst}$ – FE ir SM temperatūros duomenys iš programinio PVsyst paketo duomenų, K;

$E_{siurb.}$ – vandens siurblio naudojama elektros energija, kWh.

SM metinis elektrinis efektyvumas randamas:

$$\eta_{el} = \frac{\sum E_{SM}}{\sum GA_{SM}} \cdot 100. \quad (38)$$

Čia:

E_{SM} – SM (-ių) valandinė elektros energijos generacija, kWh;

A_{SM} – SM (-ių) suminis priekinio paviršiaus plotas, m².

Paruošiamo karšto buitinio vandens atitikmuo m³, kuomet nuo SM nuvedama šiluma panaudojama vandens šildymui nuo 12 iki 60°C randamas:

$$F = \frac{\dot{Q}_{u,p}}{c_p \cdot 1000 \text{ kg} \cdot (60^\circ\text{C} - 12^\circ\text{C})}. \quad (39)$$

Nuvedamos ir panaudojamos šilumos energijos finansinė nauda randama:

$$N_{\xi} = \dot{Q}_{u,p} \cdot 0,1164 \frac{\text{EUR}}{\text{kWh}}. \quad (40)$$

Čia:

0,1164 – išvestinis dydis gautas iš istorinių buto karšto buitinio vandens suvartojimo sąskaitų (2019–2021 metų duomenys), kuris apibrėžia 1 kWh šilumos energijos kainą šildant buitinį karštą vandenį nuo 12 iki 60°C, EUR/kWh.

Panaudojamos elektros energijos finansinė nauda randama:

$$N_e = (E_{SM,PVsyst} - E_{SM,p}) \cdot 0,93 \cdot 0,25 \frac{\text{EUR}}{\text{kWh}}. \quad (41)$$

Čia:

0,25 – pasirinkta 1 kWh elektros energijos kaina, EUR/kWh;

0,93 – koeficientas apibrėžiantis skirtumą tarp SM generuojamos energijos ir elektros energijos patiekiamos į kintamos srovės tinklą. Skaičius išvestas iš „PVsyst“ programinio paketo atliktų simuliacijų duomenų.

SM aušinimo nauda gaunama:

$$N_a = N_e + N_{\xi}. \quad (42)$$

3. Tyrimas

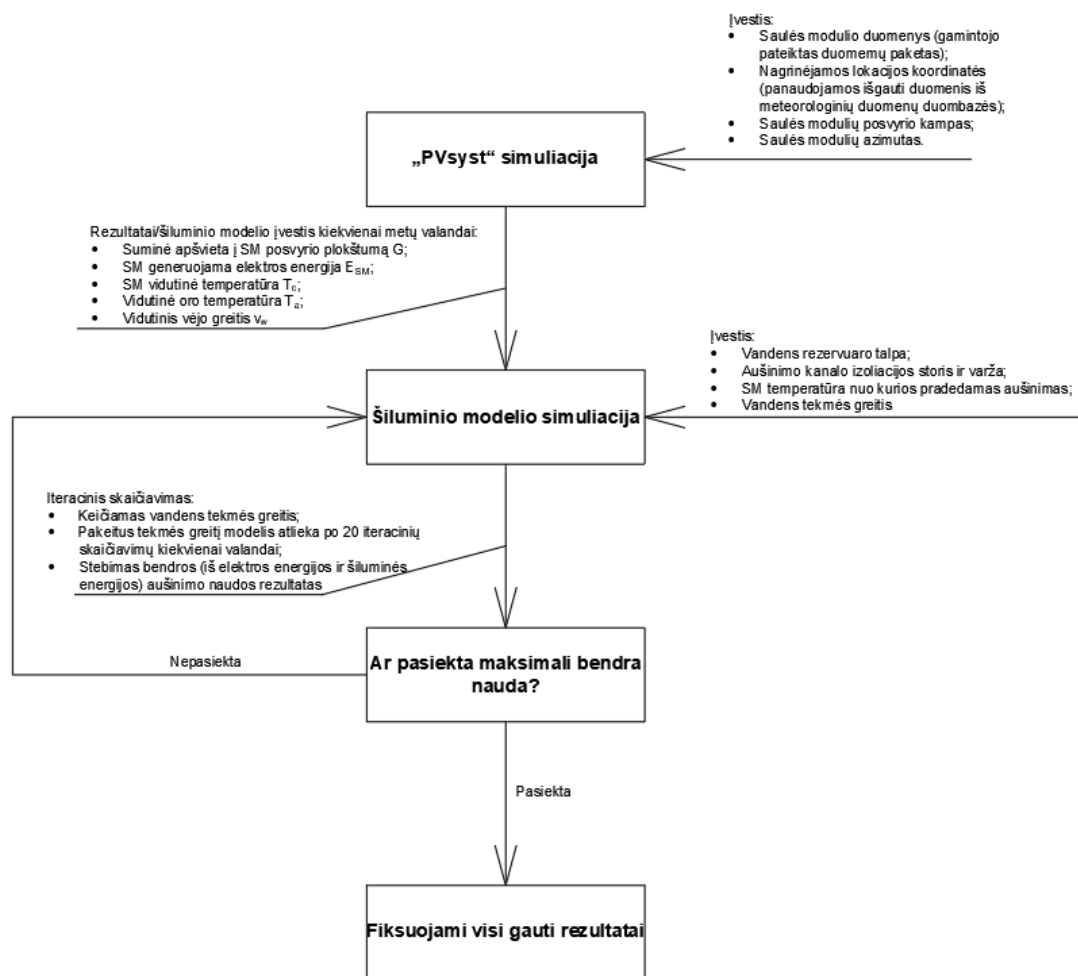
Tyrimo tikslas yra nustatyti aušinamų SM efektyvumo pokytį lyginant su neaušinamais SM ir pokyčio koreliaciją su SM azimuto, posvyrio kampu ir vandens rezervuaro tūriu panaudojant „PVsyst“ ir šiluminį modelį, bei verifikuoti gautus rezultatus.

3.1. Tyrimo eiga

Tyrimas susideda iš 4 pagrindinių etapų:

- atliekamos „PVsyst“ simuliacijos 5, 15, 30, 35, 40, 45, 60, 75, 90 posvyrio kampams prie 0, -45 ir -90 laipsnių azimuto. Vilniuje simuliuojamas 1 SM darbas (išvestinis dydis iš elektrinės simuliacijų, kurią sudaro 14 SM po 375 W ir 5 kW inverteris). Iš simuliacijų gaunami valandiniai simuliuojamų metų duomenys: suminė apšvieta į SM posvyrio plokštumą, SM generuojama elektros energija (nuolatinės srovės pusėje), SM temperatūra, oro temperatūra ir vėjo greitis;
- „PVsyst“ simuliacijų duomenys yra įvedami į šiluminį modelį, kuris pagal šiuos duomenis modeliuoja aušinamo SM temperatūros pokytį priklausomai nuo modelyje apibrėžtų sąlygų. Šiluminiame modelyje prie kiekvienos SM posvyrio ir azimuto kampo kombinacijos yra atliekami iteraciniai skaičiavimai keičiant vandens tėkmės greitį (atitinkamai kinta ir debitas) kol nustatoma didžiausia šiluminės ir elektros generacijos padidėjimo suminė nauda. Analogiškai atliekami iteraciniai skaičiavimai prie skirtingų vandens rezervuarų tūrių;
- atliekama gautų rezultatų verifikavimas: „PVsyst“ programinio paketo simuliuojami elektros energijos generacijos rezultatai lyginami su 5 atsitiktinių saulės elektrinių Vilniuje istoriniais 3 metų duomenis ir eksperimentiniais duomenis iš bandymo ant plokščio stogo. Šiluminio modelio rezultatai lyginami su bandymo ant plokščio stogo metu išmatuotais duomenimis. Taip pat, palyginami „PVsyst“ modelyje esantys meteorologiniai duomenys su 3 metų faktiniais *Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos* (toliau – LHMT) meteorologiniais duomenis;
- gauti rezultatai sisteminami, pateikiami grafiškai, apibendrinami ir nustatomos koreliacijos.

Grafiškai loginė „PVsyst“ ir šiluminio modelio schema pateikiama 3.1 paveiksle. Pilni gautų modeliavimo rezultatų duomenų paketai, pagal kuriuos atliekama analizė 3.2 ir 3.3 poskyriuose, pateikiami 1–3 prieduose.



3.1 pav. Loginė „PVsyst“ ir šiluminio modelio schema

3.2. Azimuto ir posvyrio kampo įtaka

Atlikus simuliacijas prie 0, -45 (pietryčiai) ir -90 (rytai) laipsnių azimuto bei 5, 15, 30, 35, 40, 45, 60, 75 ir 90 laipsnių SM posvyrio gauti rezultatai apie SM elektrinio efektyvumo pokytį, bendros aušinimo naudos dydį,

Nagrinėjant azimuto ir posvyrio įtaką fiksuoti įvesties duomenys, prie kiekvieno iš jų yra perskačiuojamos visos keičiamos įvesties kombinacijos, yra:

- vandens rezervuaro talpa (50 l, 200 l ir 800 l, pagal dažnai praktikoje sutinkamus boilerių tūrius).

Nagrinėjant SM azimuto ir posvyrio kampo įtaką keičiami įvesties duomenys yra:

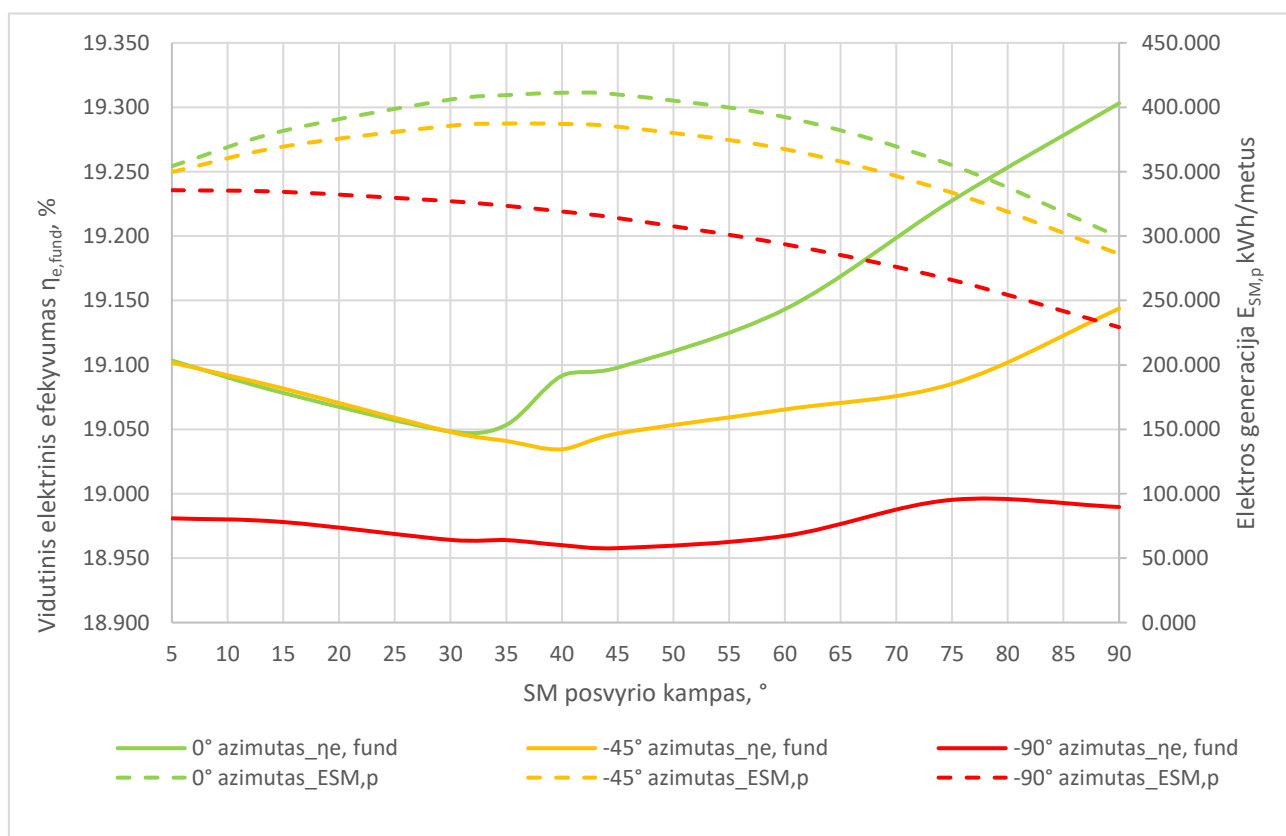
- SM azimutas, laipsniais;
- SM posvyrio kampas, laipsniais;
- vandens tekės greitis v , m/s.

3.2.1. Aušinamo saulės modulis elektros generacija ir elektrinis efektyvumas

Nagrinėjant 50 l vandens rezervuaro tūrio variantą gaunami rezultatai pateikiami 3.2 paveiksle. Didžiausia aušinamo SM elektros generacija $E_{SM,p}$ pasiekama ties 40° posvyrio kampu ir 0° azimutu bei 35° posvyrio kampu ir -45° azimutu atitinkamai 411,277 kWh ir 387,342 kWh. -90° azimuto atveju didžiausia generacija pasiekama prie 5° posvyrio kampo – 335,635 kWh ir didinant posvyrio

kampą generacija mažėja. Šis pokytis glaudžiai siejasi su apšvietos į SM paviršiaus plotą dydžiu, kuris esant -90° azimutui yra didžiausias prie 5° posvyrio ir didinant posvyrį mažėja.

Mažiausias aušinamų SM vidutinis efektyvumas $\eta_{e,fund}$ esant optimaliam posvyrio kampui ir azimutui (pagal generuojamą energiją) pasiekiamas prie -90° azimuto ir 5° posvyrio kampo – 18,98 %. Kuomet azimutas yra -45° , optimalus SM posvyrio kampas yra 35° , o $\eta_{e,fund}$ – 19,04 %. Kuomet azimutas yra 0° , optimalus SM posvyrio kampas yra 40° , o $\eta_{e,fund}$ – 19,09 %. Pastebima koreliacija tarp $E_{SM,p}$ ir $\eta_{e,fund}$, kuri yra ypač išreikšta prie 0 ir -45° azimuto – didėjant $E_{SM,p}$ mažėja $\eta_{e,fund}$ ir atvirkščiai. Ties -90° azimutu šis ryšys pasireiškia tik $45-75^\circ$ posvyrio kampo diapazone, o kituose režimuose mažėjant generacijai mažėja ir efektyvumas. Taip pat, esant 0° ir -45° azimutui $\eta_{e,fund}$ vertės yra artimos iki 35° SM posvyrio kampo. Didėjant posvyrio kampui didėja ir $\eta_{e,fund}$ atskirtis tarp minėtų azimuto kampų. Tam įtakos turi apšvietos į SM paviršių vertės, kurios, kaip pastebėta, yra didžiausios prie 0° azimuto ir $35-40^\circ$ SM posvyrio kampo, todėl 0° ir $35-40^\circ$ SM posvyrio kampo situacijoje yra didžiausias potencialas padidinti SM η_e , nes šioje situacijoje SM patirs didžiausius šilumos sukeltus efektyvumo nuostolius.



3.2 pav. 50l rezervuaro varianto $\Delta\eta_{e,fund}$ ir $E_{SM,p}$ pokyčio prie skirtingų SM posvyrio kampų ir azimuto krypčių rezultatai

Optimalaus varianto (pagal $E_{SM,p}$) rezultatų pokytis tarp skirtingų azimuto krypčių ir posvyrio kampų pateikiamas 3.1 lentelėje ir parodo koks yra ΔE_{SM} ir $\Delta\eta_{e,fund}$ procentinis skirtumas prie optimalių SM posvyrio kampų prie skirtingų azimuto kampų.

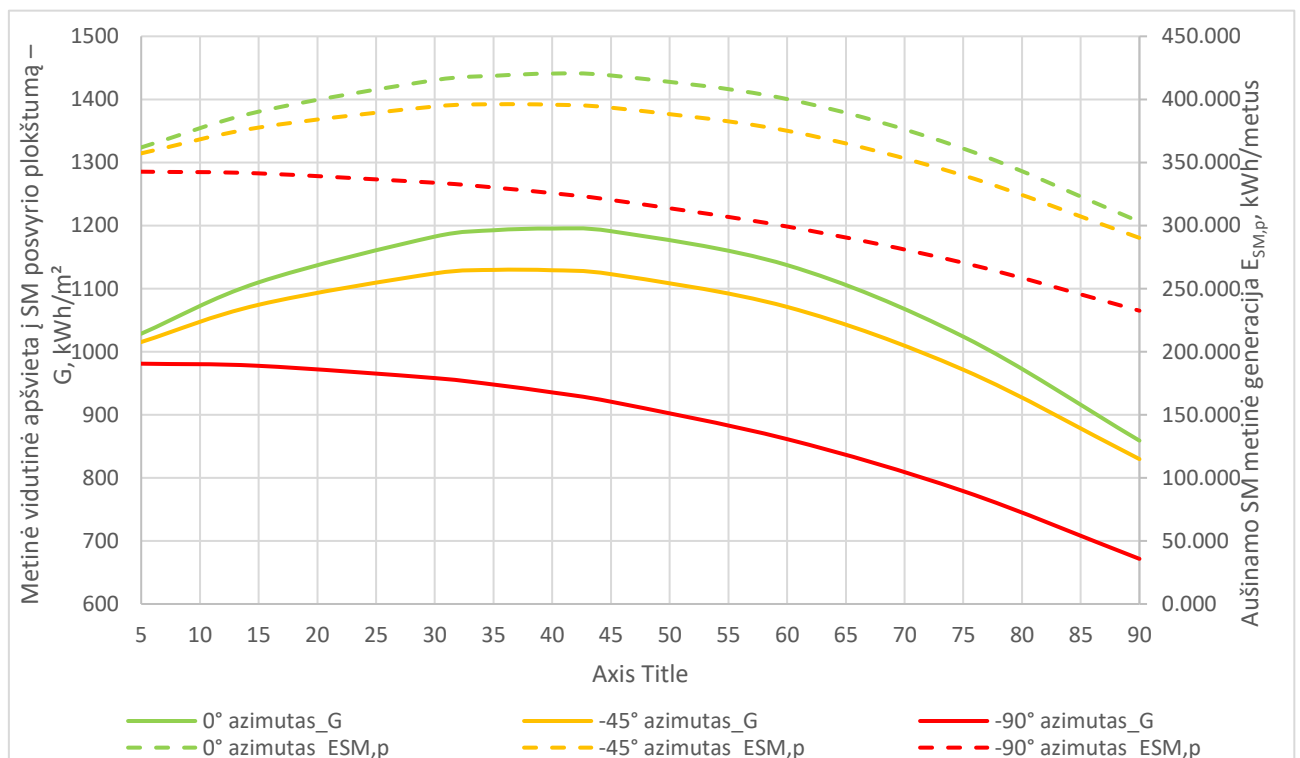
3.1 lentelė. 50 l rezervuaro varianto $E_{SM,p}$ ir $\eta_{e,fund}$ procentinis skirtumas pagal SM azimuto ir posvyrio kampą

Azimutas, laipsniais	SM posvyrio kampas, laipsniais	$E_{SM,p}$, kWh	$\Delta E_{SM,p}$, %	$\eta_{e,fund}$, %	$\Delta\eta_{e,fund}$, %
0	40	411,277	0	19,09	0

-45	35	387,342	-5,82	19,04	-0,267
-90	5	335,635	-18,4	18,91	-0,953

Pagal gautus rezultatus matyti, kad azimuto didinimas turi neigiamą įtaką ΔE_{SM} ir $\Delta \eta_{e,fund}$ pokyčiui lyginant su optimaliu variantu, kuris turi didžiausią $E_{SM,p}$. Taip pat, pastebėta, kad didinant azimutą nuokrypį nuo pietų krypties mažėja optimalus SM posvyrio į horizontą kampas, o tai koreliuoja su apšvietos į SM paviršių duomenimis, t.y. prie didesnių azimuto kampo verčių esant mažesniai SM posvyrio į horizontą kampui dienos metu į SM paviršių krenta didesnė suminė apšvieta, nei esant didesniam posvyrio kampui, kuomet didžioji apšvietos dalis krenta pirmoje dienos pusėje (prie neigiamos vertės azimuto kampo, kuris rodo rytų–pietryčių kryptį).

3.3 paveiksle pateikiama, kaip kinta apšvieta į SM paviršių bei $E_{SM,p}$ prie skirtingų posvyrio kampų ir azimutų, kai rezervuaras yra 50l talpos (tačiau priklausomybė analogiška, pagal 1–6 priede pateikiamą pilną duomenų paketą, ir su kitais nagrinėjamais tūriais). Iš grafiko matoma, kad apšvieta G ir $E_{SM,p}$ koreliuoja tarpusavyje. Didžiausia aušinamų SM elektros generacija pasiekama prie didžiausių apšvietos verčių G .

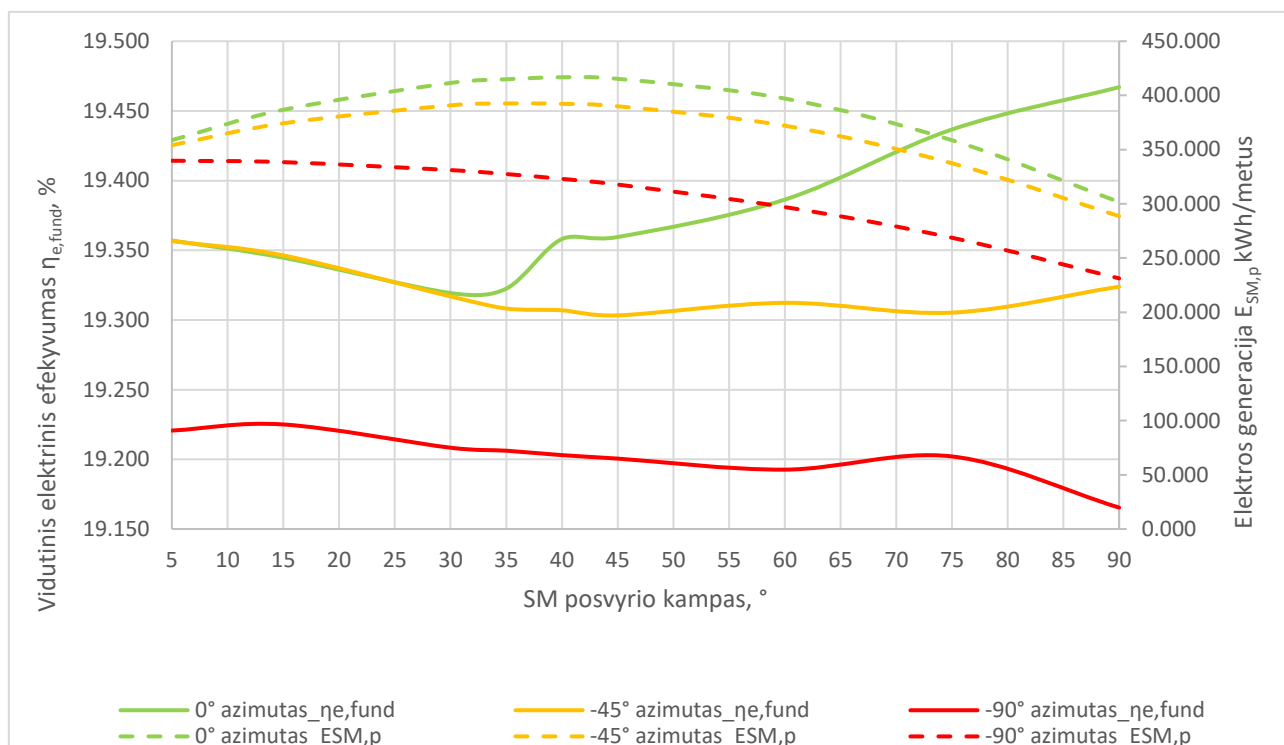


3.3 pav. G ir $E_{SM,p}$ pokytis prie 50 l tūrio rezervuaro ir skirtingų SM posvyrio bei azimuto kampų

Nagrinėjant 200 l vandens rezervuaro tūrio variantą gaunami rezultatai pateikiami 3.4 paveiksle. Didžiausia aušinamo SM elektros generacija $E_{SM,p}$ pasiekama ties 40° posvyrio kampui ir 0° azimutu bei 35° posvyrio kampui ir -45° azimutu atitinkamai 416,766 kWh ir 392,565 kWh. -90° azimuto atveju didžiausia generacija pasiekama prie 5° posvyrio kampo – 339,767 kWh ir didinant posvyrio kampą generacija mažėja. Šis pokytis glaudžiai siejasi su apšvietos į SM paviršiaus plotą dydžiu, kuris esant -90° azimutui yra didžiausias prie 5° posvyrio ir didinant posvyrio kampą mažėja.

Mažiausias aušinamų SM vidutinis efektyvumas $\eta_{e,fund}$ prie tuo atveju optimalaus kampo ir azimuto (pagal generuojamą energiją) pasiekiamas prie -90° azimuto ir 5° posvyrio kampo – 19,22 %. Kuomet azimutas yra -45°, optimalus SM posvyrio kampas yra 35°, o $\eta_{e,fund}$ – 19,31 %. Kuomet azimutas yra

0°, optimalus SM posvyrio kampas yra 40°, o $\eta_{e,fund}$ – 19,36 %. Taip pat, pastebima koreliacija tarp $E_{SM,p}$ ir $\eta_{e,fund}$, kuri yra ypač ryškiai išreikšta prie 0 ir -45° azimuto – didėjant $E_{SM,p}$ mažėja $\eta_{e,fund}$ ir atvirkščiai. Ties -90° azimutu šis ryšys pasireiškia tik 5-10° ir 60-75° posvyrio kampo režyje, o kituose režiuose mažėjant generacijai mažėja ir efektyvumas.



3.4 pav. 200l rezervuaro varianto $\Delta\eta_{e,fund}$ ir $E_{SM,p}$ pokyčio prie skirtingų SM posvyrio kampų ir azimuto krypčių rezultatai

Optimalaus varianto (pagal $E_{SM,p}$) rezultatų pokytis tarp skirtingų azimutų ir posvyrio kampų pateikiamas 3.2 lentelėje ir parodo koks yra ΔE_{SM} ir $\Delta\eta_{e,fund}$ procentinis skirtumas prie optimalių SM posvyrio kampų prie skirtingų azimutų.

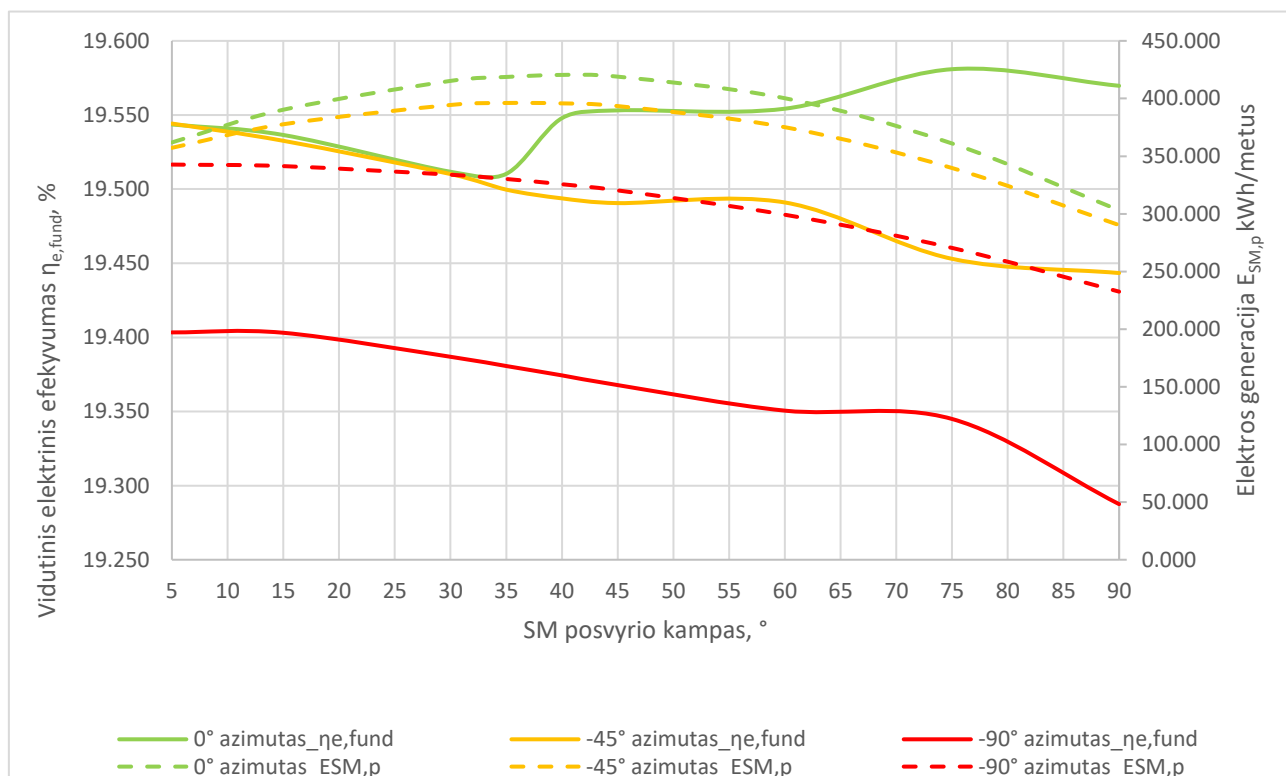
3.2 lentelė. 200 l rezervuaro varianto $E_{SM,p}$ ir $\eta_{e,fund}$ procentinis skirtumas pagal SM azimuto ir posvyrio kampą

Azimutas, laipsniais	SM posvyrio kampas, laipsniais	$E_{SM,p}$, kWh	$\Delta E_{SM,p}$, %	$\eta_{e,fund}$, %	$\Delta\eta_{e,fund}$, %
0	40	416,766	0	19,36	0
-45	35	392,565	-5,81	19,31	-0,258
-90	5	339,767	-18,5	19,22	-0,708

Pagal gautus rezultatus matyti, kad azimuto didinimas turi neigiamą įtaką ΔE_{SM} ir $\Delta\eta_{e,fund}$ pokyčiui lyginant su optimaliu variantu, kuris turi didžiausią $E_{SM,p}$.

Nagrinėjant 800 l vandens rezervuaro tūrio variantą gaunami rezultatai pateikiami 3.5 paveiksle. Didžiausia aušinamo SM elektros generacija $E_{SM,p}$ pasiekama ties 40° posvyrio kampu ir 0° azimutu bei 35° posvyrio kampu ir -45° azimutu atitinkamai 420,486 kWh ir 396,126 kWh. -90° azimuto atveju didžiausia generacija pasiekama prie 5° posvyrio kampo – 342,709 kWh ir didinant posvyrio kampą generacija mažėja. Šis pokytis glaudžiai siejasi su apšvietos į SM paviršiaus plotą dydžiu, kuris esant -90° azimutui yra didžiausias prie 5° posvyrio ir didinant posvyrį mažėja.

Mažiausias elektrinis aušinamų modulių vidutinis efektyvumas $\eta_{e,fund}$ prie tuo atveju optimalaus kampo ir azimuto (pagal generuojamą energiją) pasiekiamas prie -90° azimuto ir 5° posvyrio kampo – 19,07 %. Kuomet azimutas yra -45° , optimalus SM posvyrio kampas yra 35° , o $\eta_{e,fund}$ – 19,5 %. Kuomet azimutas yra 0° , optimalus SM posvyrio kampas yra 40° , o $\eta_{e,fund}$ – 19,548%. Taip pat, pastebima koreliacija tarp $E_{SM,p}$ ir $\eta_{e,fund}$, kuri yra ypač išreikšta prie 0° azimuto – didėjant $E_{SM,p}$ mažėja $\eta_{e,fund}$ ir atvirkščiai. Ties -45° azimutu šis ryšys egzistuoja ties $40-60^\circ$ SM posvyrio kampais, o likusiuose režiuose nepasireiškia ir efektyvumas mažėja didinant kampą nepriklausomai nuo to ar generacija didėja ar mažėja. -90° azimutu ryšys yra artimas -45° azimutui ir pastebimas efektyvumo mažėjimas didinant SM posvyrio kampą su išimti kuri pasireiškia $60-70^\circ$ posvyrio kampo diapozone, kai mažėjant generacijai didėja efektyvumas.



3.5 pav. 800l rezervuaro varianto $\Delta\eta_{e,fund}$ ir $E_{SM,p}$ pokyčio prie skirtingų SM posvyrio kampų ir azimuto krypčių rezultatai

Optimalaus varianto (pagal $E_{SM,p}$) rezultatų pokytis tarp skirtingų azimutų ir posvyrio kampų pateikiamas 3.3 lentelėje ir parodo ΔE_{SM} ir $\Delta\eta_{e,fund}$ procentinį pokytį prie optimalių SM posvyrio ir azimuto kampų.

3.3 lentelė. 800 l rezervuaro varianto $E_{SM,p}$ ir $\eta_{e,fund}$ procentinis skirtumas pagal SM azimuto ir posvyrio kampą

Azimutas, laipsniais	SM posvyrio kampas, laipsniais	$E_{SM,p}$, kWh	$\Delta E_{SM,p}$, %	$\eta_{e,fund}$, %	$\Delta\eta_{e,fund}$, %
0	40	420,486	0	19,58	0
-45	35	396,126	-5,79	19,50	-0,429
-90	5	342,709	-18,5	19,40	-0,924

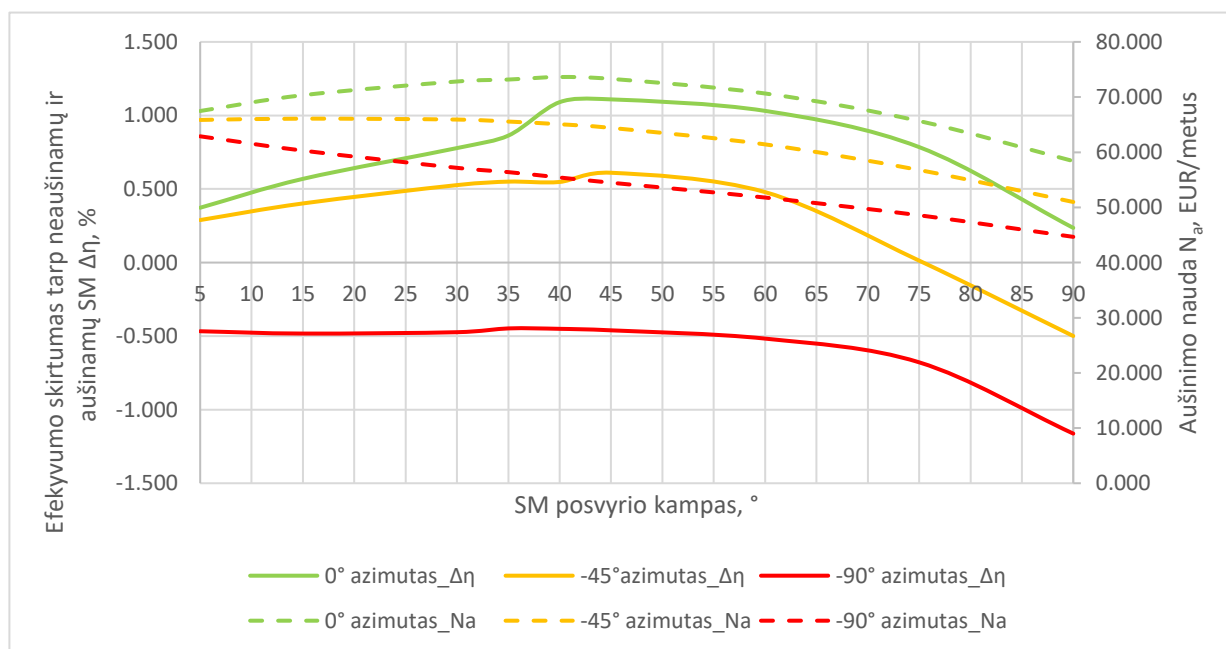
Pagal gautus rezultatus matyti, kad azimuto kampo didinimas turi neigiamą įtaką ΔE_{SM} ir $\Delta\eta_{e,fund}$ pokyčiui lyginant su optimaliu variantu, kuris turi didžiausią $E_{SM,p}$.

Taigi, prie visų nagrinėtų variantų pastebima, kad didžiausios metinės E_{SM} ir $\eta_{e,fund}$ vertės pasiekiamos prie tų pačių azimuto kryptų ir posvyrio kampų. Didžiausias ΔE_{SM} skirtumas tarp 0° ir -45° azimuto pastebimas 50 l rezervuaro variante ir yra -5,82 %. Didžiausias ΔE_{SM} skirtumas tarp 0° ir -90° azimuto pastebimas 800 l rezervuaro variante ir yra -18,5 %. Mažiausias $\Delta \eta_{e,fund}$ skirtumas tarp 0° ir -45° azimuto pastebimas 200l rezervuaro variante ir yra -0,258 %, o mažiausias $\Delta \eta_{e,fund}$ skirtumas tarp 0° ir -90° azimuto pastebimas taip pat prie 200l rezervuaro variante ir yra -0,708 %. Visais variantais didžiausios E_{SM} ir $\eta_{e,fund}$ vertės pasiekiamos prie 0° azimuto ir 40° SM posvyrio į horizonto kampo. Tai koreliuoja su apšvietos į SM paviršių vertėmis, t. y. prie šių sąlygų jos yra didžiausios.

3.2.2. Aušinamo saulės modulio efektyvumo ir aušinimo sistemos naudos pokytis

Nagrinėjant 50 l vandens rezervuaro tūrio variantą gaunami rezultatai pateikiami 3.6 paveiksle. Didžiausias aušinamo SM ir neaušinamo SM efektyvumo skirtumo $\Delta \eta$ pokytis pasiekiamas ties 45° posvyrio kampu ir 0° azimutu bei 45° posvyrio kampu ir -45° azimutu atitinkamai 1,109 % ir 0,611 %. -90° azimuto atveju efektyvumo pokytis yra neigiamas ir mažiausias efektyvumo sumažėjimas $\Delta \eta$ pasiekiamas prie 35° posvyrio kampo yra -0,447 %. Pastebimos neigiamos $\Delta \eta$ vertės kuomet modeliuojamas -45° azimuto variantas ir SM posvyrio kampai yra $75-90^\circ$ bei -90° azimuto variantas su visais nagrinėjamas SM posvyrio kampais. Šios vertės indikuoja, kad SM aušinimas prie minėtų orientacijų ir posvyrio kampų yra nenaudingas ir mažina SM efektyvumą bei elektros energijos generaciją. Šis reiškinys yra sietinas su SM vidutinėmis temperatūromis ir indikuoja, kad antroje dienos pusėje neaušinami SM patiria mažesnis nuostolius už aušinamus SM, nes aušinami SM turi aukštesnę vidutinę temperatūrą šiame laiko režyje dėl rezervuare esančio vandens temperatūros.

Didžiausia SM aušinimo vidutinė bendra nauda N_a pasiekama prie 0° azimuto ir 40° posvyrio kampo – 73,635 EUR/metus. Kuomet azimutas yra -45° , optimalus SM posvyrio kampas yra 15° , o N_a – 66,087 EUR/metus. Kuomet azimutas yra -90° , optimalus SM posvyrio kampas yra 5° , o N_a – 62,885 EUR/metus. Bendra nauda visais variantais išlieka teigiama, dėl nuvedamos šilumos energijos komponentės N_s (ryšys tarp N_a , N_e ir N_s pateiktas 42 formulėje).



3.6 pav. 50l rezervuaro varianto $\Delta \eta$ ir N_a pokyčio prie skirtingų SM posvyrio kampų ir azimuto kryptų rezultatai

Optimalaus varianto (pagal $E_{SM,p}$) rezultatų procentinis skirtumas tarp skirtingų azimutų ir posvyrio kampų pateikiamas 3.4 lentelėje ir parodo $\Delta\eta$ ir N_a procentinis skirtumas prie optimalių SM posvyrio kampų prie skirtingų azimutų.

3.4 lentelė. 50 l rezervuaro varianto $\Delta\eta$ ir N_a procentinis skirtumas pagal SM azimuto ir posvyrio kampą

Azimutas, laipsniais	SM posvyrio kampas, laipsniais	$\Delta\eta$, %	$\Delta\Delta\eta$, %	N_a , EUR	ΔN_a , %
0	40	1,091	0	73,635	0
-45	35	0,550	-49,6	65,560	-11,0
-90	5	-0,467	-143,0	62,885	-14,6

Pagal gautus rezultatus matyti, kad azimuto didinimas turi neigiamą įtaką $\Delta\eta$ ir N_a pokyčiui lyginant su optimaliu variantu, kuris turi didžiausią $E_{SM,p}$. Taip pat, pastebėta, kad didinant azimutą nuokrypį nuo pietų krypties mažėja optimalus SM posvyrio į horizontą kampas.

N_a sudarančių komponentių N_e ir N_s bei neauštinamo SM generuojamos elektros energijos E_{SM} vertės rezultatai ir procentiniai skirtumas pateikiami 3.5 lentelėje.

3.5 lentelė. 50 l rezervuaro varianto N_e , N_s , N_a ir E_{SM} verčių procentinis skirtumas

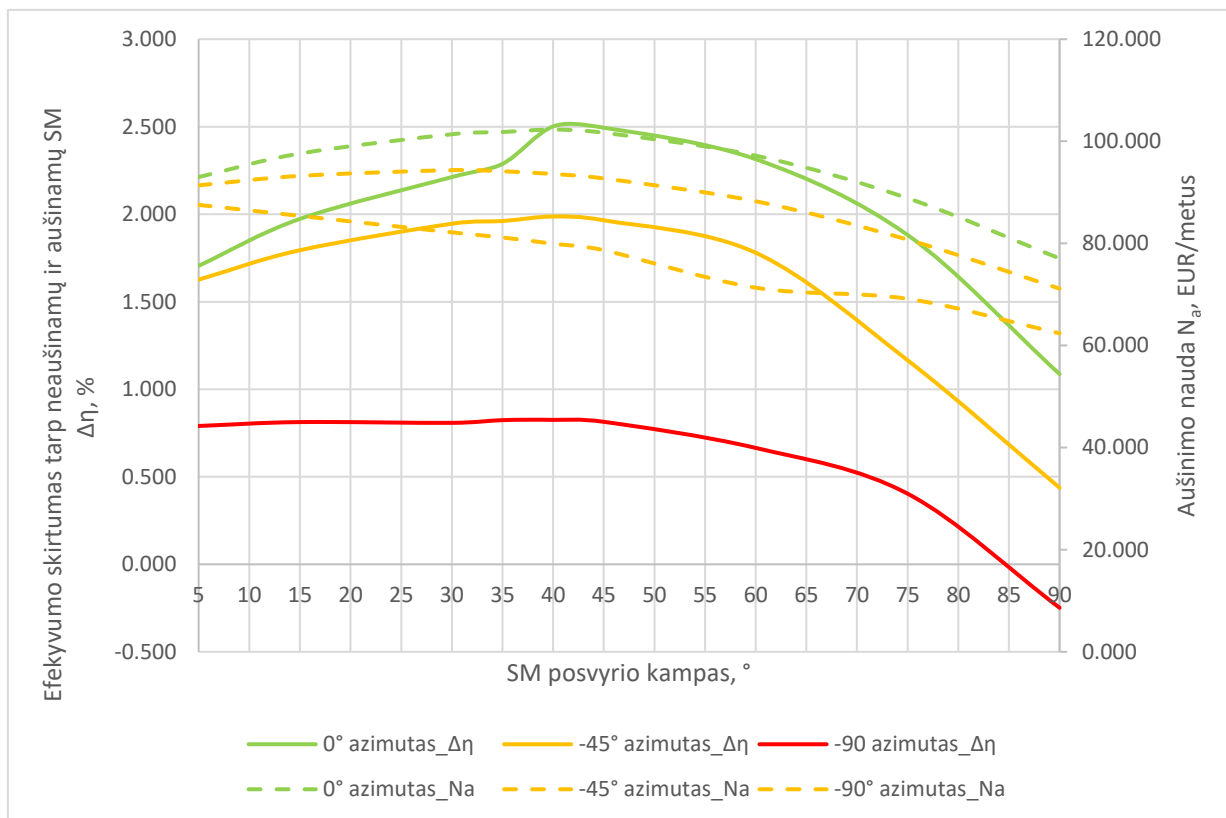
Azimutas, laipsniais	SM posvyrio kampas, laipsniais	N_e , EUR/metus	ΔN_e , %	N_s , EUR/metus	ΔN_s , %	N_a , EUR/metus	ΔN_a , %	E_{SM} energijos vertė, EUR/metus	ΔE_{SM} vertė, %
0	40	-1,45	0	75,09	0	73,635	0	97,075	0
-45	35	-1,94	-33,8	67,50	-10,1	65,560	-11,0	91,999	-5,23
-90	5	-2,42	-66,9	65,30	-13,0	62,885	-14,6	80,455	-17,1

Pagal gautus rezultatus matyti, kad didėjant SM azimutui aušinimo nauda N_a mažėja ir tuo pačiu mažėja abi komponentės N_e ir N_s bei E_{SM} vertė. Taip pat, pastebėta, kad N_e turi didžiausią procentinį pokytį didinant azimuto kampą. ΔN_a procentinis pokytis yra didesnis už ΔE_{SM} vertės procentinį pokytį, kuomet azimutas didinamas iki -45° . Skirtumas tarp 0° ir -90° azimuto rezultatų rodo didesnę ΔE_{SM} procentinį skirtumą lyginant su atitinkamomis N_a vertėmis. Iš rezultatų taip pat matoma, kad N_e vertės yra ženkliai mažesnės už N_s vertes. Tai indikuoja, kad nagrinėjamoje sistemoje pagrindinė nauda gaunama iš nuvedamos šiluminės energijos ir analogiškas ryšys pastebimas visuose nagrinėjamuose rezervuaro tūriuose.

Nagrinėjant 200 l vandens rezervuaro tūrio variantą gaunami rezultatai pateikiami 3.7 paveiksle. Didžiausias aušinamo SM ir neauštinamo SM efektyvumo skirtumo $\Delta\eta$ pokytis pasiekiamas ties 40° posvyrio kampu ir 0° azimutu bei 40° posvyrio kampu ir -45° azimutu atitinkamai 2,502 % ir 1,987 %. -90° azimuto atveju efektyvumo pokytis yra teigiamas, kai SM posvyrio kampas yra iki 85° . Didžiausias $\Delta\eta$ prie -90° azimuto pasiekiamas prie 40° SM posvyrio, tačiau 35° SM posvyrio kampas turi panašią įtaką prie to paties azimuto kampo atitinkamai $\Delta\eta = 0,825$ % ir $\Delta\eta = 0,824$ %. Pastebimos neigiamos $\Delta\eta$ vertės kuomet modeliuojamas -90° azimuto variantas ir SM posvyrio kampai yra 85° – 90° . Šios vertės indikuoja, kad SM aušinimas prie minėtų orientacijų ir posvyrio kampų yra nenaudingas ir mažina SM efektyvumą bei elektros energijos generaciją. Su šiuo rezervuaro tūriu -45° azimuto variantas turi teigiamas $\Delta\eta$ vertes su visais nagrinėjamais SM posvyrio kampais.

Didžiausia aušinamų SM vidutinė bendra nauda N_a pasiekama prie 0° azimuto ir 40° posvyrio kampo – 102,285 EUR/metus. Kuomet azimutas yra -45° , optimalus SM posvyrio kampas yra taip pat 30° ,

o N_a – 94,351 EUR/met. Kuomet azimutas yra -90° , optimalus SM posvyrio kampas yra 5° , o N_a – 87,542 EUR/met.



3.7 pav. 200 l rezervuaro varianto $\Delta\eta$ ir N_a pokyčio prie skirtingų SM posvyrio kampų ir azimuto krypčių rezultatai

Optimalaus varianto (pagal $E_{SM,p}$) rezultatų pokytis tarp skirtingų azimutų ir posvyrio kampų pateikiamas 3.6 lentelėje ir parodo $\Delta\eta$ ir N_a procentinius skirtumus prie optimalių SM posvyrio kampų prie skirtingų azimutų.

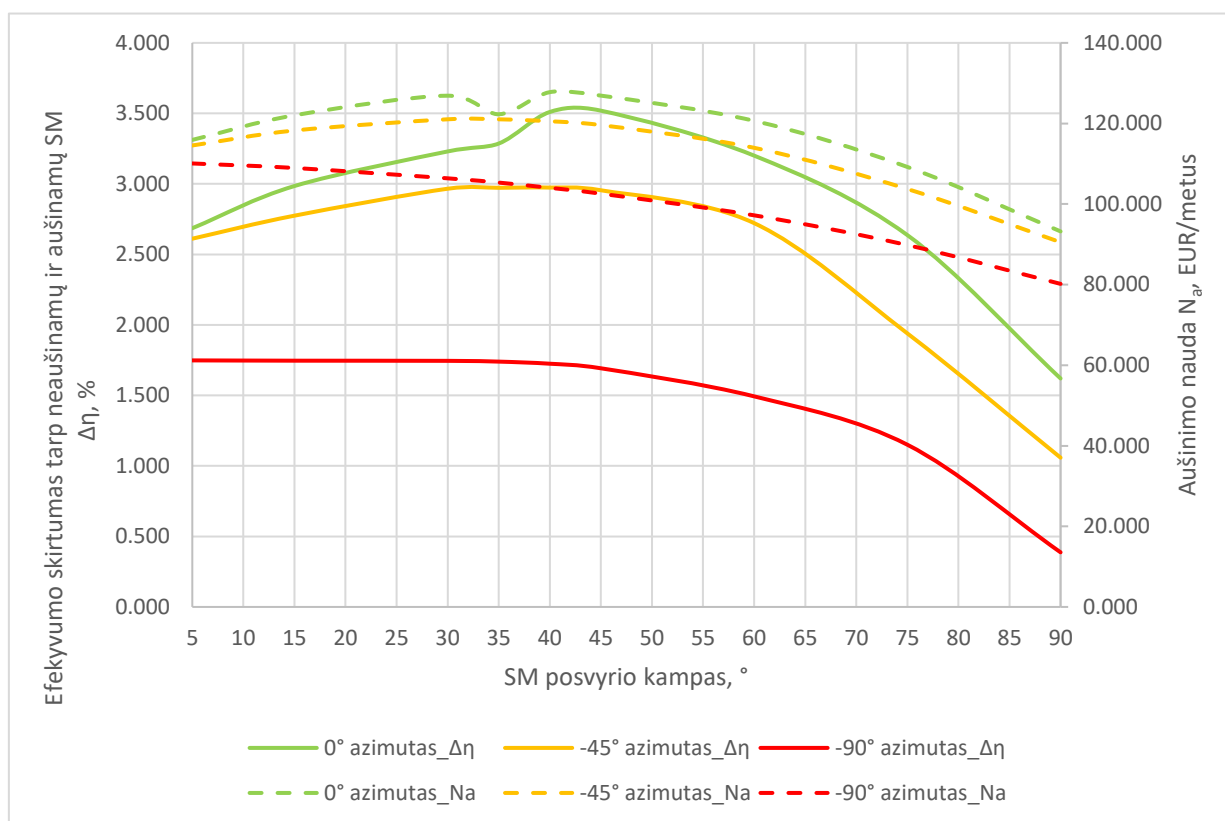
3.6 lentelė. 200 l rezervuaro varianto $\Delta\eta$ ir N_a procentinis skirtumas pagal SM azimuto ir posvyrio kampą

Azimutas, laipsniais	SM posvyrio kampas, laipsniais	$\Delta\eta$, %	$\Delta\Delta\eta$, %	N_a , EUR	ΔN_a , %
0	40	2,502	0	102,285	0
-45	35	1,961	-21,6	94,121	-8,00
-90	5	0,790	-68,4	87,542	-14,4

Pagal gautus rezultatus matyti, kad azimuto didinimas turi neigiamą įtaką $\Delta\eta$ ir N_a pokyčiui lyginant su optimaliu variantu, kuris turi didžiausią $E_{SM,p}$. Taip pat, pastebėta, kad didinant azimutą nuokrypį nuo pietų krypties mažėja optimalus SM posvyrio į horizontą kampas.

Nagrinėjant 800 l vandens rezervuaro tūrio variantą gaunami rezultatai pateikiami 3.8 paveiksle. Didžiausias aušinamo SM ir neaušinamo SM efektyvumo skirtumo $\Delta\eta$ pokytis pasiekiamas ties 45° posvyrio kampu ir 0° azimutu bei 40° posvyrio kampu ir -45° azimutu atitinkamai 3,519 % ir 2,974 %. -90° azimuto didžiausias $\Delta\eta$ prie -90° – 1,748 %. Su šiuo rezervuaro tūriu visi SM azimuto ir posvyrio kampo variantai turi teigiamas $\Delta\eta$ vertes.

Didžiausia aušinamų SM vidutinė bendra nauda N_a pasiekama prie 0° azimuto ir 40° posvyrio kampo – 127,08 EUR/metus. Kuomet azimutas yra -45° , optimalus SM posvyrio kampas yra 30° , o N_a – 121,036 EUR/metus. Kuomet azimutas yra -90° , optimalus SM posvyrio kampas yra 5° , o N_a – 110,850 EUR/metus.



3.8 pav. 800l rezervuaro varianto $\Delta\eta$ ir N_a pokyčio prie skirtingų SM posvyrio kampų ir azimuto krypčių rezultatai

Optimalaus varianto (pagal $E_{SM,p}$) rezultatų pokytis tarp skirtingų azimutų ir posvyrio kampų pateikiamas 3.7 lentelėje ir parodo $\Delta\eta$ ir N_a procentinius skirtumus prie optimalių SM posvyrio kampų prie skirtingų azimutų.

3.7 lentelė. 800 l rezervuaro varianto $\Delta\eta$ ir N_a procentinis skirtumas pagal SM azimuto ir posvyrio kampą

Azimutas, laipsniais	Posvyrio kampas, laipsniais	$\Delta\eta$, %	$\Delta\Delta\eta$, %	N_a , EUR	ΔN_a , %
0	40	3,510	0	127,772	0
-45	35	2,972	-15,3	121,029	-5,3
-90	5	1,748	-50,2	110,073	-13,9

Pagal gautus rezultatus matyti, kad azimuto didinimas turi neigiamą įtaką $\Delta\eta$ ir N_a pokyčiui lyginant su optimaliu variantu, kuris turi didžiausią $E_{SM,p}$.

Taigi, prie visų nagrinėtų variantų pastebima, kad didžiausios metinės $\Delta\eta$ ir N_a vertės pasiekiamos prie tų pačių azimuto krypčių ir posvyrio kampų ir matoma koreliacija su 3.2.1 poskyryje aprašytu E_{SM} ir $\eta_{e,fund}$ pokyčiu. Didžiausias $\Delta\Delta\eta$ skirtumas tarp 0° ir -45° azimuto pastebimas 50 l rezervuaro variante ir yra -49,6 %. Didžiausias $\Delta\Delta\eta$ skirtumas tarp 0° ir -90° azimuto pastebimas taip pat 50 l rezervuaro variante ir yra -143,0 %. Mažiausias ΔN_a skirtumas tarp 0° ir -45° azimuto pastebimas 800 l rezervuaro variante ir yra -5,3 %, o mažiausias ΔN_a skirtumas tarp 0° ir -90° azimuto pastebimas taip

pat prie 800l rezervuaro variante ir yra -13,9 %. Visais variantais didžiausios $\Delta\eta$ ir N_a vertės pasiekiamos prie 0° azimuto ir 40° SM posvyrio į horizonto kampo. Tai koreliuoja su 3.2.1 skyrelyje gautais ΔE_{SM} ir $\Delta\eta_{e,fund}$ rezultatais.

3.3. Vandens rezervuaro tūrio įtaka

Atlikus simuliacijas prie 0° , -45° (pietryčiai) ir -90° (rytai) laipsnių azimuto bei 5, 15, 30, 35, 40, 45, 60, 75 ir 90 laipsnių SM posvyrio gauti rezultatai apie SM elektrinio efektyvumo pokytį, bendros aušinimo naudos dydį,

Nagrinėjant azimuto ir posvyrio įtaką fiksuoti įvesties duomenys, prie kiekvieno iš jų yra perskaičiuojamos visos keičiamos įvesties kombinacijos, yra:

- SM azimuto kryptis (0° , -45° ir -90°).

Nagrinėjant SM azimuto ir posvyrio kampo įtaką keičiami įvesties duomenys yra:

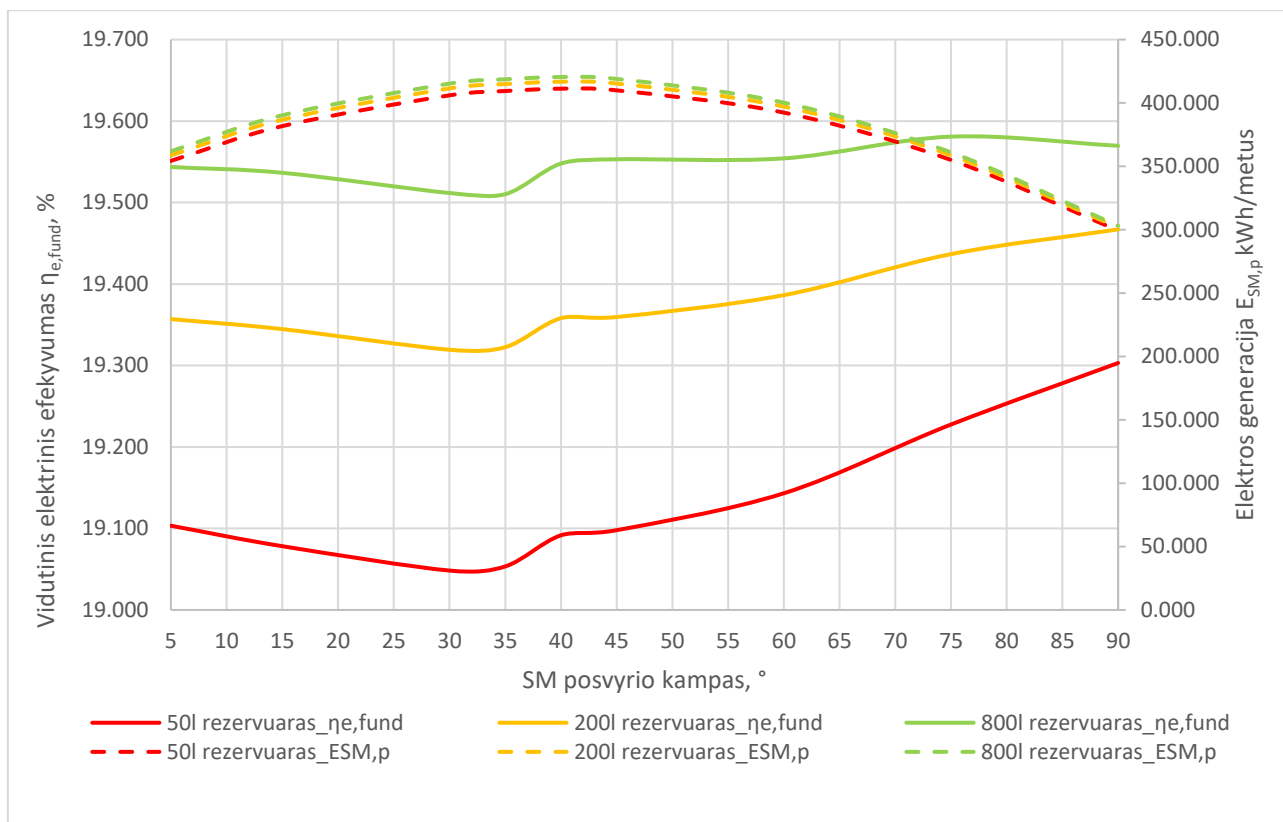
- vandens rezervuaro talpa (50, 200, 800l);
- SM posvyrio kampas, laipsniais;
- vandens tekės greitis v , m/s.

Toliau pateikiama gautų rezultatų analizė.

3.3.1. Aušinamo saulės modulio elektros generacija ir elektrinis efektyvumas

Nagrinėjant 0° SM azimuto variantą prie skirtingų rezervuaro tūrių gaunami rezultatai pateikiami 3.9 paveiksle. Didžiausia aušinamo SM elektros generacija $E_{SM,p}$ pasiekama ties 40° posvyrio kampu su visais nagrinėjamais rezervuaro tūriais. 50 l, 200 l bei 800 l tūrio variantuose generacija $E_{SM,p}$ yra atitinkamai 411,277 kWh, 414,913 kWh ir 416,766 kWh. Generacijos pokytis priklausomai nuo SM posvyrio kampo koreliuoja su apšvietos į SM paviršiaus plotą dydžiu, didžiausia generacija išgaunama prie didžiausios apšvietos į SM paviršių G . G priklausomybė nuo kampo ir azimuto pateikta anksčiau 3.3 paveiksle.

Mažiausias elektrinis aušinamų modulių vidutinis efektyvumas $\eta_{e,fund}$ prie tuo atveju optimalaus kampo ir azimuto (pagal generuojamą energiją) pasiekiamas prie 50 l rezervuaro tūrio ir 40° posvyrio kampo – 19,09 %. Kuomet rezervuaro tūris yra 200 l, optimalus SM posvyrio kampas yra 40° , o $\eta_{e,fund}$ – 19,36 %. Kuomet rezervuaro tūris yra 800 l, optimalus SM posvyrio kampas yra 40° , o $\eta_{e,fund}$ – 19,55 %. Taip pat, pastebima koreliacija tarp $E_{SM,p}$ pokyčio tarp skirtingų rezervuaro tūrių ir $\eta_{e,fund}$ pokyčio tarp skirtingų rezervuaro tūrių. Skirtumas tarp $E_{SM,p}$ tarp skirtingų tūrių kintant SM posvyrio kampui mažėja (kreivės yra labiau suglaustos), tuo pačiu tas pats reiškinys pastebimas su $\eta_{e,fund}$ kreivėmis. Didžiausias $\eta_{e,fund}$ pokytis taip pat koreliuoja su rezervuaro tūriu, t. y. didėjant tūriui išgaunamas didesnis efektyvumas. Šis reiškinys yra sietinas su aušinimo sistemos gebėjimu aušinti SM, t. y. prie didesnių tūrių temperatūrinis sistemos įsisotinimas pasiekiamas vėliau ir sistema geba efektyviau aušinti SM.



3.9 pav. 0° azimuto $\Delta\eta_{e,fund}$ ir $E_{SM,p}$ pokyčio prie skirtingų rezervuaro tūrių rezultatai

Optimalaus varianto (pagal $E_{SM,p}$) rezultatų pokytis tarp skirtingų azimuto ir posvyrio kampų pateikiamas 3.8 lentelėje ir parodo ΔE_{SM} ir $\Delta\eta_{e,fund}$ skirtumą išreikštą procentais prie optimalių SM posvyrio kampų prie nagrinėjamų rezervuaro tūrių.

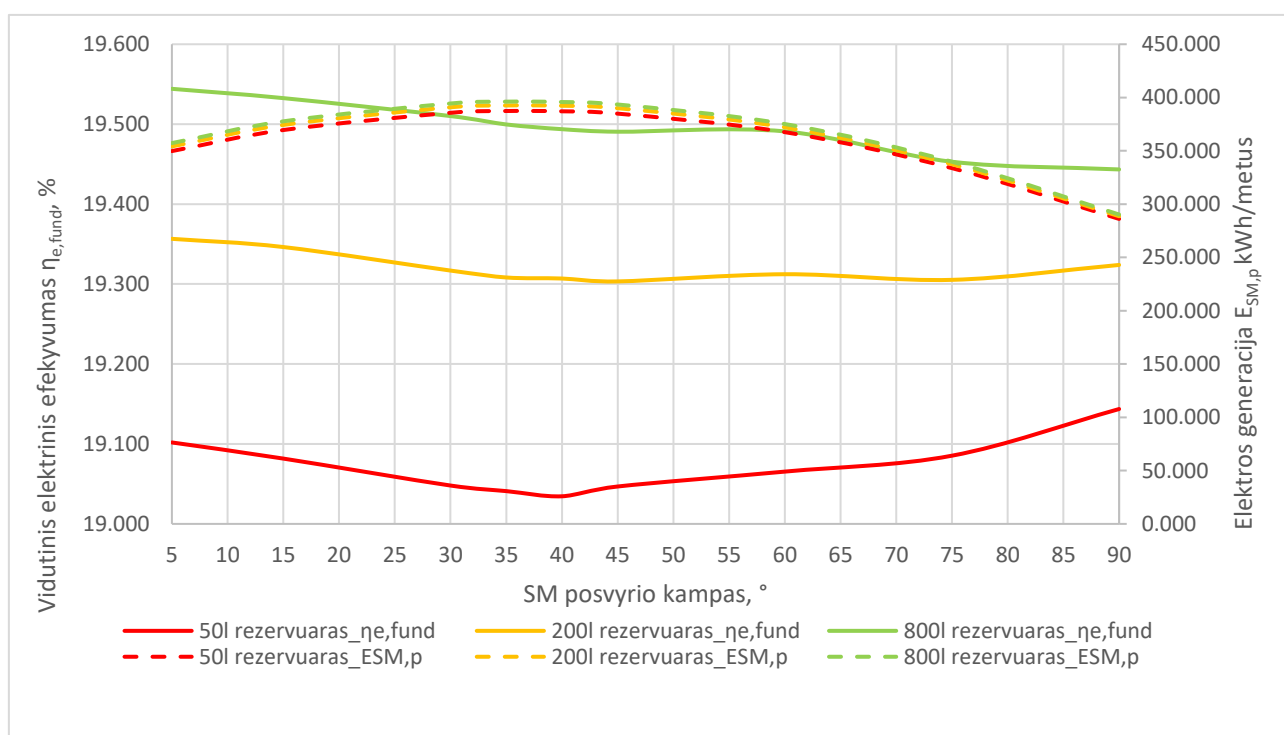
3.8 lentelė. 0° azimuto varianto $E_{SM,p}$ ir $\eta_{e,fund}$ procentinis skirtumas pagal rezervuaro tūrį

Rezervuaro tūris, l	SM posvyrio kampas, laipsniais	$E_{SM,p}$, kWh/metus	$\Delta E_{SM,p}$, %	$\eta_{e,fund}$, %	$\Delta\eta_{e,fund}$, %
50	40	411,277	0	19,09	0
200	40	416,766	1,34	19,36	1,39
800	40	420,486	2,24	19,49	2,11

Pagal gautus rezultatus matyti, kad rezervuaro tūrio didinimas turi teigiamą įtaką ΔE_{SM} ir $\Delta\eta_{e,fund}$ pokyčiui lyginant su optimaliu variantu, kuris turi didžiausią $E_{SM,p}$. Taip pat, pastebima, kad prie kiekvieno nagrinėjamo rezervuaro tūrio optimalus SM posvyrio kampas yra 40°. Potencialus efektyvumo padidėjimas yra didžiausias prie 800 l rezervuaro tūrio, šis rezultatas gali būti aiškinamas efektyvesniu SM aušinimu, dėl didesnio vandens tūrio sistemoje, kuris lemia didesnę reikiamą apšvietos į SM paviršių G kiekį, kad būtų pasiekiamas sistemos šiluminis įsisotinimas (kuomet lyginant su neaušinamo SM variantu yra patiriami efektyvumo nuostoliai, nes SM temperatūra aušinamoje sistemoje yra aukštesnė, lyginant su neaušinamu SM nagrinėjamame laiko momente).

Nagrinėjant -45° SM azimuto variantą prie skirtingų rezervuaro tūrių gaunami rezultatai pateikiami 3.10 paveiksle. Didžiausia aušinamo SM elektros generacija $E_{SM,p}$ pasiekama ties 35° posvyrio kampu su visais nagrinėjamais rezervuaro tūriais. 50 l, 200 l bei 800 l tūrio variantuose generacija $E_{SM,p}$ yra atitinkamai 387,342 kWh, 392,565 kWh ir 396,126 kWh.

Mažiausias elektrinis aušinamų modulių vidutinis efektyvumas $\eta_{e,fund}$ prie tuo atveju optimalaus kampo ir azimuto (pagal generuojamą energiją) pasiekiamas prie 50 l rezervuaro tūrio ir 35° posvyrio kampo – 19,04 %. Kuomet rezervuaro tūris yra 200 l, optimalus SM posvyrio kampas yra 35°, o $\eta_{e,fund}$ – 19,31 %. Kuomet rezervuaro tūris yra 800l, optimalus SM posvyrio kampas yra 35°, o $\eta_{e,fund}$ – 19,50 %. Taip pat, pastebima koreliacija su 0° azimuto varianto rezultatais, kuomet skirtumas tarp $E_{SM,p}$ tarp skirtingų tūrių kintant SM posvyrio kampui mažėja (kreivės yra labiau suglaustos), tuo pačiu šis reiškinys pastebimas su $\eta_{e,fund}$ kreivėmis. Lyginant su 0° azimuto variantu, 50 l $\eta_{e,fund}$ pokyčio kreivė turi tendenciją mažėti didinant SM posvyrio kampą ir efektyvumo skirtumai tarp skirtingų SM posvyrio kampų yra mažesnis. 200 l ir 800 l tūrio variantų $\eta_{e,fund}$ kreivės skiriasi nuo 0° varianto, ties 40° posvyrio kampu nebėra ryškaus efektyvumo padidėjimo ir efektyvumo kitimas toliau didėjant SM posvyrio kampui yra mažesnis nei 0° azimuto atveju. Didžiausias $\eta_{e,fund}$ pokytis taip pat koreliuoja su rezervuaro tūriu, t. y. didėjant tūriui išgaunamas didesnis efektyvumas. Šis reiškinys yra sietinas su aušinimo sistemos gebėjimu aušinti SM ir paaiškinamas analogiškai kaip ir 0° azimuto variante.



3.10 pav. -45° azimuto $\Delta\eta_{e,fund}$ ir $E_{SM,p}$ pokyčio prie skirtingų rezervuaro tūrių rezultatai

Optimalaus varianto (pagal $E_{SM,p}$) rezultatų pokytis tarp skirtingų azimuto ir posvyrio kampų pateikiamas 3.9 lentelėje ir parodo ΔE_{SM} ir $\Delta\eta_{e,fund}$ skirtumą išreikštą procentais prie optimalių SM posvyrio kampų prie nagrinėjamų rezervuaro tūrių.

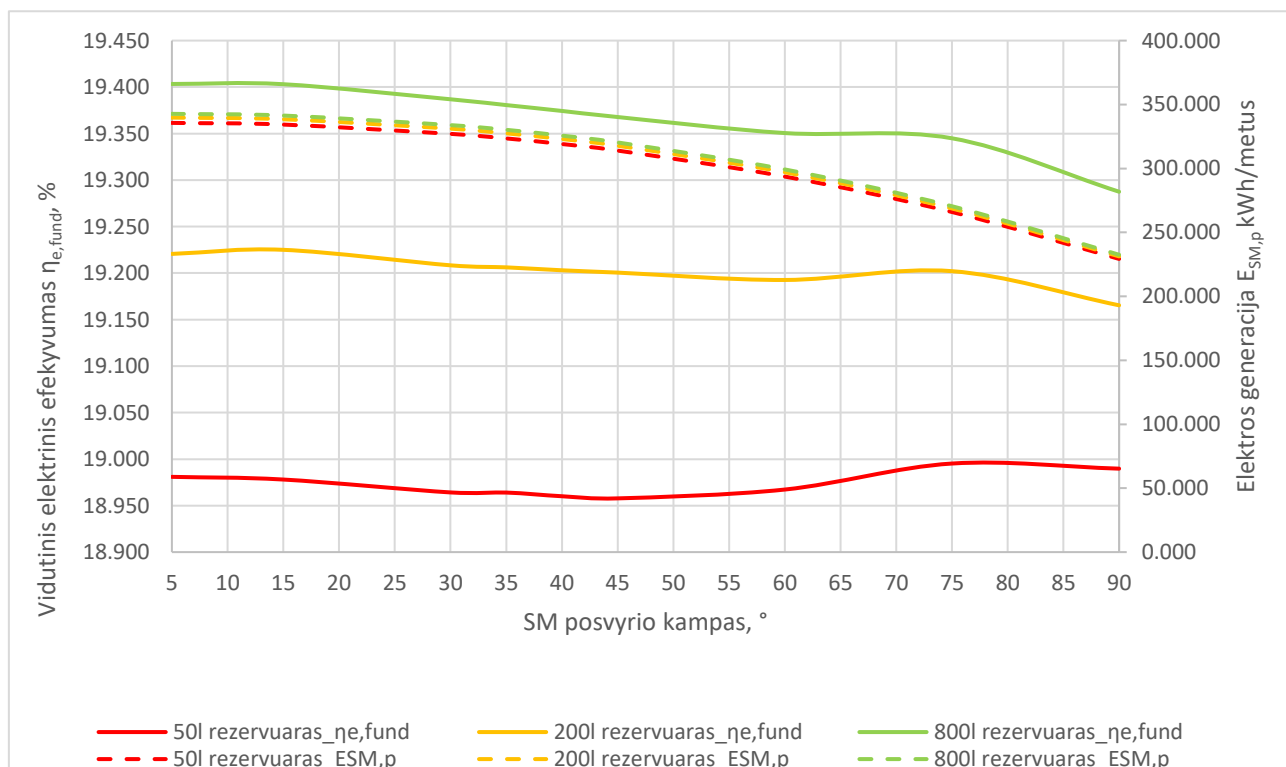
3.9 lentelė. -45° azimuto varianto $E_{SM,p}$ ir $\eta_{e,fund}$ procentinis skirtumas pagal rezervuaro tūrį

Rezervuaro tūris, l	SM posvyrio kampas, laipsniais	$E_{SM,p}$, kWh/metus	$\Delta E_{SM,p}$, %	$\eta_{e,fund}$, %	$\Delta\eta_{e,fund}$, %
50	35	387,342	0	19,041	0
200	35	392,565	1,35	19,308	1,40
800	35	396,126	2,27	19,500	2,41

Pagal gautus rezultatus matyti, kad rezervuaro tūrio didinimas turi teigiamą įtaką ΔE_{SM} ir $\Delta \eta_{e,fund}$ pokyčiui lyginant su optimaliu variantu, kuris turi didžiausią $E_{SM,p}$. Taip pat, pastebima, kad prie kiekvieno nagrinėjamo rezervuaro tūrio optimalus SM posvyrio kampas yra 35° ir šis rezultatas sietinas su sumine apšvieta į SM plokštumą, kuri didinant azimuto kampą yra didesnė prie mažesnio SM posvyrio kampo. Potencialus efektyvumo padidėjimas yra didžiausias prie 800 l rezervuaro tūrio, kaip ir 0° azimuto variante, šis rezultatas gali būti aiškinamas analogiškai kaip 0° azimuto variante.

Nagrinėjant -90° SM azimuto variantą prie skirtingų rezervuaro tūrių gaunami rezultatai pateikiami 3.11 paveiksle. Didžiausia aušinamo SM elektros generacija $E_{SM,p}$ pasiekama ties 5° posvyrio kampu su visais nagrinėjamais rezervuaro tūriais. 50 l, 200 l bei 800 l tūrio variantuose generacija $E_{SM,p}$ yra atitinkamai 335,635 kWh, 339,767 kWh ir 342,709 kWh.

Mažiausias elektrinis aušinamų modulių vidutinis efektyvumas $\eta_{e,fund}$ prie tuo atveju optimalaus kampo ir azimuto (pagal generuojamą energiją) pasiekiamas prie 50l rezervuaro tūrio ir 5° posvyrio kampo – 18,981 %. Kuomet rezervuaro tūris yra 200 l, optimalus SM posvyrio kampas yra 5° , o $\eta_{e,fund}$ – 19,22 %. Kuomet rezervuaro tūris yra 800 l, optimalus SM posvyrio kampas yra 5° , o $\eta_{e,fund}$ – 19,40 %. Taip pat, pastebima koreliacija, kaip ir prie 0° bei -45° azimuto, skirtumas tarp $E_{SM,p}$ tarp skirtingų tūrių kintant SM posvyrio kampui mažėja (kreivės yra labiau suglaustos), tuo pačiu tas pats reiškinys pastebimas su $\eta_{e,fund}$ kreivėmis. Lyginant su 0° azimuto variantu, 50 l $\eta_{e,fund}$ pokyčio kreivė turi tendenciją mažėti didinant SM posvyrio kampą ir efektyvumo skirtumai tarp skirtingų SM posvyrio kampų yra mažesnis. 200 l ir 800 l tūrio variantų $\eta_{e,fund}$ kreivės taip pat skiriasi nuo 0° ir -45° azimuto varianto, efektyvumo kitimas mažesnis (kreivė yra plokštesnė) nei 0° ir -45° azimuto atveju. Didžiausias $\eta_{e,fund}$ pokytis taip pat koreliuoja su rezervuaro tūriu, kaip ir 0° ir -45° azimuto atveju, ir paaiškinamas analogiškai.



3.11 pav. -90° azimuto $\Delta \eta_{e,fund}$ ir $E_{SM,p}$ pokyčio prie skirtingų rezervuaro tūrių rezultatai

Optimalaus variantą (pagal $E_{SM,p}$) rezultatų pokytis tarp skirtingų azimutų ir posvyrio kampų pateikiamas 3.10 lentelėje ir parodo ΔE_{SM} ir $\Delta \eta_{e,fund}$ skirtumą išreikštą procentais prie optimalių SM posvyrio kampų prie nagrinėjamų rezervuaro tūrių.

3.10 lentelė. -90° azimuto varianto $E_{SM,p}$ ir $\eta_{e,fund}$ procentinis skirtumas pagal rezervuaro tūrį

Rezervuaro tūris, l	SM posvyrio kampas, laipsniais	$E_{SM,p}$, kWh/metus	$\Delta E_{SM,p}$, %	$\eta_{e,fund}$, %	$\Delta \eta_{e,fund}$, %
50	5	335,635	0	18,98	0
200	5	339,767	1,23	19,22	1,26
800	5	342,709	2,11	19,40	2,22

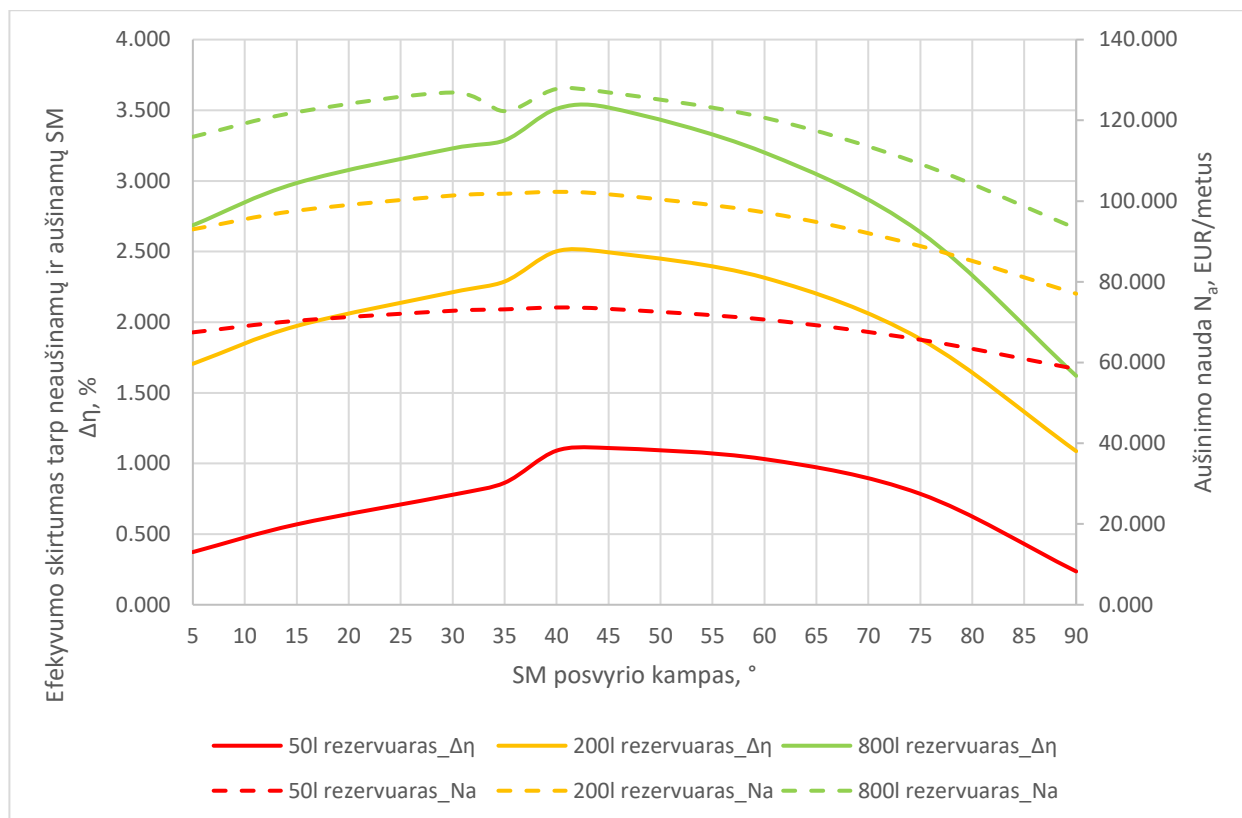
Pagal gautus rezultatus matyti, kad rezervuaro tūrio didinimas turi teigiamą įtaką ΔE_{SM} ir $\Delta \eta_{e,fund}$ pokyčiui lyginant su optimaliu variantu, kuris turi didžiausią $E_{SM,p}$. Taip pat, pastebima, kad prie kiekvieno nagrinėjamo rezervuaro tūrio optimalus SM posvyrio kampas yra 5° ir šis rezultatas sietinas su sumine apšvieta į SM plokštumą, kuri didinant azimuto kampą yra didesnė prie mažesnio SM posvyrio kampo. Potencialus efektyvumo padidėjimas yra didžiausias prie 800 l rezervuaro tūrio, kaip ir 0° azimuto variante, šis rezultatas gali būti aiškinamas analogiškai kaip 0° azimuto variante.

Taigi, prie visų nagrinėtų variantų pastebima, kad didžiausios metinės E_{SM} ir $\eta_{e,fund}$ vertės pasiekiamos prie tų pačių rezervuarų tūrių. Didžiausias ΔE_{SM} skirtumas tarp 50 l ir 200 l rezervuaro tūrio pastebimas -45° azimuto variante ir yra 1,23 %. Didžiausias ΔE_{SM} skirtumas tarp 50 l ir 800 l rezervuaro tūrio pastebimas 0° azimuto variante ir yra 2,24 %. Mažiausias $\Delta \eta_{e,fund}$ skirtumas tarp 50 l ir 200 l rezervuaro tūrio pastebimas -90° azimuto variante ir yra 1,26 %, o mažiausias $\Delta \eta_{e,fund}$ skirtumas tarp 50 l ir 800 l rezervuaro tūrio variantų pastebimas prie 0° azimuto ir yra 2,11 %. Visais rezervuaro tūrio variantais didžiausios E_{SM} ir $\eta_{e,fund}$ vertės pasiekiamos prie 0° azimuto ir 40° SM posvyrio į horizonto kampo. Tai koreliuoja su apšvietos į SM paviršių vertėmis, t.y. prie šių sąlygų jos yra didžiausios.

3.3.2. Aušinamo saulės modulio efektyvumo ir aušinimo sistemos naudos pokytis

Nagrinėjant 0° SM azimuto variantą prie skirtingų rezervuaro tūrių gaunami rezultatai pateikiami 3.12 paveiksle. Didžiausias aušinamo SM elektros efektyvumo pokytis $\Delta \eta$ pasiekiamas su 800 l rezervuaru prie 45° posvyrio kampo ir 200 l rezervuaru bei 40° posvyrio kampu atitinkamai 3,519 % ir 2,502 %. 50 l rezervuaro atveju didžiausias efektyvumo pokytis yra pasiekiamas prie 45° posvyrio kampo $-1,09$ %. Pastebimos teigiamos $\Delta \eta$ vertės su visais nagrinėjamais rezervuarų tūriais.

Didžiausia aušinamų SM vidutinė bendra nauda N_a pasiekama prie 800 l rezervuaro ir 40° posvyrio kampo – 127,08 EUR/metus. Kuomet rezervuaras yra 200 l, optimalus SM posvyrio kampas yra 40° , o N_a – 102,46 EUR/metus. Kuomet rezervuaras yra 50 l, optimalus SM posvyrio kampas yra 40° , o N_a – 75,09 EUR/metus. Bendra nauda visais nagrinėjamais variantais išlieka teigiama.



3.12 pav. 0° azimuto varianto $\Delta\eta$ ir N_a pokyčio prie skirtingų rezervuaro tūrių rezultatai

Optimalaus varianto (pagal $E_{SM,p}$) rezultatų procentinis skirtumas tarp skirtingų nagrinėtų rezervuaro tūrių pateikiamas 3.11 lentelėje ir parodo $\Delta\eta$ ir N_a procentinį skirtumą prie optimalių SM posvyrio kampų

3.11 lentelė. 0° azimuto varianto $\Delta\eta$ ir N_a procentinis skirtumas priklausomai nuo rezervuaro tūrio

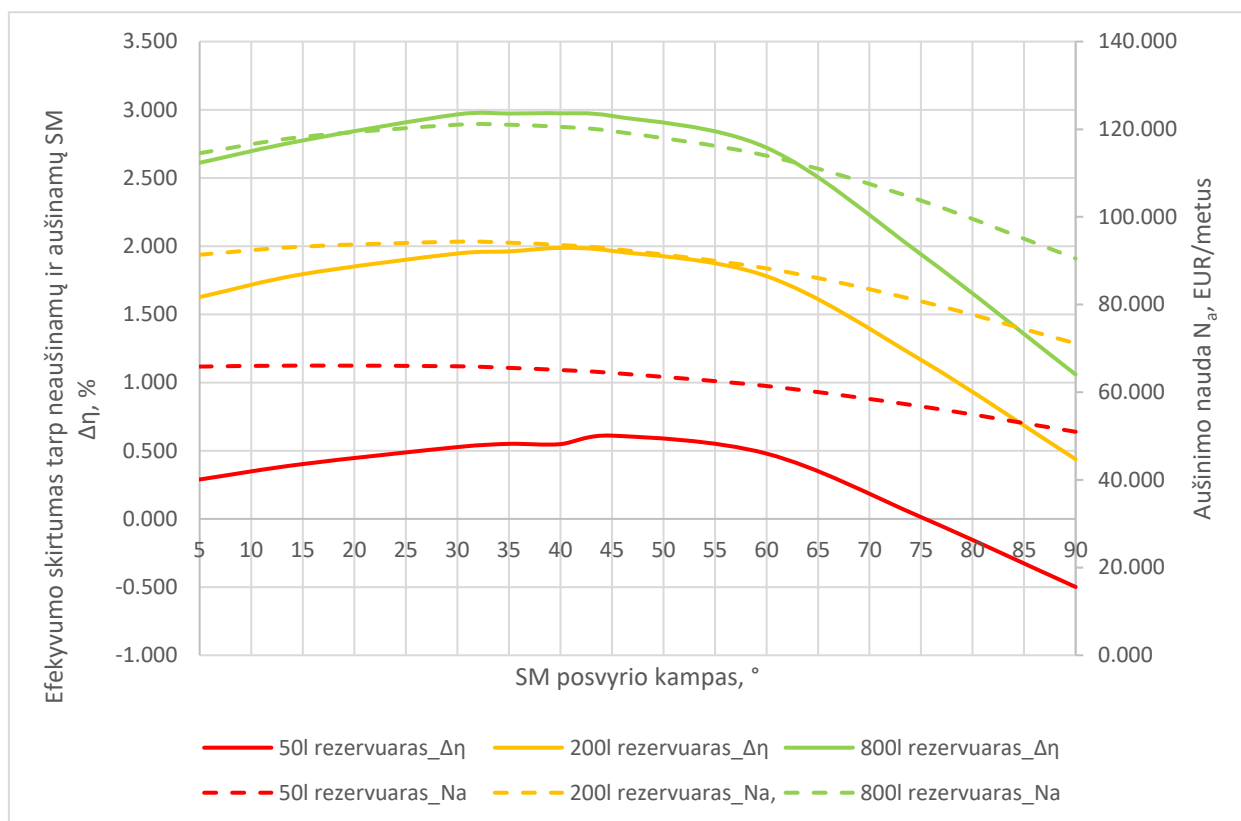
Rezervuaro tūris, l	SM posvyrio kampas, laipsniais	$\Delta\eta$, %	$\Delta\Delta\eta$, %	N_a , EUR/metus	ΔN_a , %
50	40	1,091	0	75,09	0
200	40	2,502	129	102,46	36,5
800	40	3,510	222	127,08	69,2

Pagal gautus rezultatus matyti, kad rezervuaro tūrio didinimas turi teigiamą įtaką $\Delta\eta$ ir N_a pokyčiui lyginant su optimaliu variantu, kuris turi didžiausią $E_{SM,p}$. Taip pat, pastebėta, kad didžiausios $\Delta\eta$ ir N_a vertės prie skirtingų rezervuaro tūrių gaunamos prie 40° SM posvyrio kampo.

Nagrinėjant -45° SM azimuto variantą prie skirtingų rezervuaro tūrių gaunami rezultatai pateikiami 3.13 paveiksle. Didžiausias aušinamo SM elektros efektyvumo pokytis $\Delta\eta$ pasiekiamas su 800 l rezervuaru prie 35° posvyrio kampo ir 200 l rezervuaru bei 40° posvyrio kampu atitinkamai 2,974 % ir 1,987 %. 50 l rezervuaro atveju didžiausias efektyvumo pokytis yra pasiekiamas prie 45° posvyrio kampo -0,611 %. Taip pat, pastebimas neigiamas efektyvumo pokytis, kuomet rezervuaras yra 50 l ir SM posvyrio kampas yra daugiau nei 75°.

Didžiausia aušinamų SM vidutinė bendra nauda N_a pasiekama prie 800 l rezervuaro ir 30° posvyrio kampo – 121,036 EUR/metus, tačiau 35° nauda yra artima – 121,029 EUR/metus. Kuomet rezervuaras yra 200 l, optimalus SM posvyrio kampas yra 30°, o N_a – 94,351 EUR/metus, tačiau 35° variantas yra artimas N_a – 94,121 EUR/metus. Kuomet rezervuaras yra 50 l, optimalus SM posvyrio

kampas yra 15° , o N_a – 67,99 EUR/metus. Bendra nauda visais nagrinėjamais variantais išlieka teigiama.



3.13 pav. -45° azimuto varianto $\Delta\eta$ ir N_a pokyčio prie skirtingų rezervuaro tūrių rezultatai

Optimalaus varianto (pagal $E_{SM,p}$) rezultatų procentinis skirtumas tarp skirtingų nagrinėtų rezervuaro tūrių pateikiamas 3.12 lentelėje ir parodo $\Delta\eta$ ir N_a procentinį skirtumą prie optimalių SM posvyrio kampų.

3.12 lentelė. -45° azimuto varianto $\Delta\eta$ ir N_a procentinis skirtumas priklausomai nuo rezervuaro tūrio

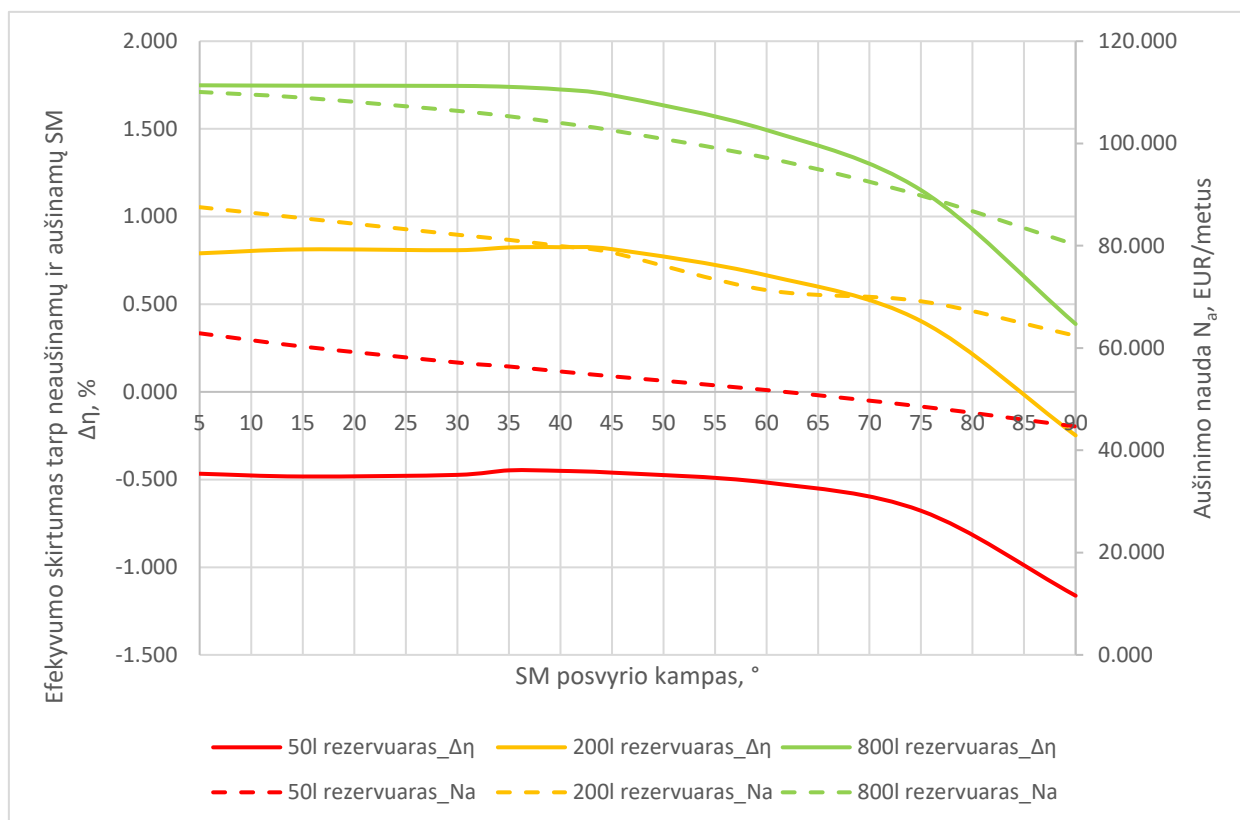
Rezervuaro tūris, l	SM posvyrio kampas, laipsniais	$\Delta\eta$, %	$\Delta\Delta\eta$, %	N_a , EUR/metus	ΔN_a , %
50	35	0,55	0	67,50	0
200	35	2,00	257	94,85	40,5
800	35	2,97	440	120,93	79,2

Pagal gautus rezultatus matyti, kad rezervuaro tūrio didinimas turi teigiamą įtaką $\Delta\eta$ ir N_a pokyčiui lyginant su optimaliu variantu, kuris turi didžiausią $E_{SM,p}$. Taip pat, pastebėta, kad didžiausios $\Delta\eta$ ir N_a vertės prie skirtingų rezervuaro tūrių gaunamos prie 35° SM posvyrio kampo.

Nagrinėjant -90° SM azimuto variantą prie skirtingų rezervuaro tūrių gaunami rezultatai pateikiami 3.14 paveiksle. Didžiausias aušinamo SM elektros efektyvumo pokytis $\Delta\eta$ pasiekiamas su 800 l rezervuaru prie 5° posvyrio kampo ir 200 l rezervuaru bei 40° posvyrio kampu atitinkamai 1,748 % ir 0,825 %. 50 l rezervuaro atveju efektyvumo pokytis yra neigiamas prie visų nagrinėjamų SM posvyrio kampų, o mažiausias neigiamas efektyvumo pokytis yra pasiekiamas prie 35° posvyrio kampo – -0,447 %.

Didžiausia aušinamų SM vidutinė bendra nauda N_a pasiekama prie 800 l rezervuaro ir 5° posvyrio kampo – 110,073 EUR/metus. Kuomet rezervuaras yra 200 l, optimalus SM posvyrio kampas yra 5° ,

o N_a – 87,542 EUR/metus. Kuomet rezervuaras yra 50 l, optimalus SM posvyrio kampas yra 5° , o N_a – 62,885 EUR/metus.



3.14 pav. -90° azimuto varianto $\Delta\eta$ ir N_a pokyčio prie skirtingų rezervuaro tūrių rezultatai

Optimalaus varianto (pagal $E_{SM,p}$) rezultatų procentinis skirtumas tarp skirtingų nagrinėtų rezervuaro tūrių pateikiamas 3.13 lentelėje ir parodo $\Delta\eta$ ir N_a procentinį skirtumą prie optimalių SM posvyrio kampų.

3.13 lentelė. -90° azimuto varianto $\Delta\eta$ ir N_a procentinis skirtumas priklausomai nuo rezervuaro tūrio

Rezervuaro tūris, l	SM posvyrio kampas, laipsniais	$\Delta\eta$, %	$\Delta\Delta\eta$, %	N_a , EUR/metus	ΔN_a , %
50	5	-0,467	0	62.885	0
200	5	0,790	69,2	87.542	39,2
800	5	1,748	274	110.073	75,0

Pagal gautus rezultatus matyti, kad rezervuaro tūrio mažinimas turi neigiamą įtaką $\Delta\eta$ ir N_a pokyčiui lyginant su optimaliu variantu, kuris turi didžiausią $E_{SM,p}$. Taip pat, pastebėta, kad didžiausios $\Delta\eta$ ir N_a vertės prie skirtingų rezervuaro tūrių gaunamos prie 5° SM posvyrio kampo.

Taigi, prie visų nagrinėtų variantų pastebima, kad didžiausios metinės $\Delta\eta$ ir N_a vertės pasiekiamos prie tų pačių rezervuarų tūrių ir matoma koreliacija su 3.3.1 poskyryje aprašytu E_{SM} ir $\eta_{e,fund}$ pokyčiu. Didžiausias $\Delta\Delta\eta$ skirtumas tarp 50 l ir 200 l rezervuarų tūrių pastebimas -45° azimuto variante ir yra -257% . Didžiausias $\Delta\Delta\eta$ skirtumas tarp 50 l ir 800 l rezervuarų tūrių pastebimas taip pat -45° azimuto variante ir yra 440% . Mažiausias ΔN_a skirtumas tarp 50 l ir 200 l rezervuarų tūrių pastebimas 0° azimuto variante ir yra $36,5\%$, o mažiausias ΔN_a skirtumas tarp 50 l ir 800 l rezervuarų tūrių pastebimas taip pat 0° azimuto variante ir yra $69,2\%$. Visais variantais didžiausios $\Delta\eta$ ir N_a vertės

pasiekiamos prie 800l rezervuaro tūrio ir koreliuoja su 3.3.1 skyrelyje analizuotais ΔE_{SM} ir $\Delta \eta_{e,fund}$ rezultatais.

3.4. Verifikavimas

Verifikavimo tikslas yra nustatyti „PVSyst“ programinio paketo naudojamų bendrosios apšvietos į horizontalųjį paviršių, oro temperatūros, prognozuojamos SM elektros energijos generacijos duomenų atitikimą su išmatuotais duomenimis, taip pat, nustatyti šiluminio modelio skaičiavimų rezultatų atitikimą bandymo metu gautiems rezultatams. Bandymo metu surinktų rezultatų duomenų paketas pateikiamas 4-10 prieduose.

3.4.1. „PVSyst“ modeliuojamos saulės modulio generacijos verifikavimas pagal faktinius duomenis

Modeliuojamos SM generacijos verifikavimas atliekamas panaudojant 5 atsitiktinių saulės elektrinių SM generacijos duomenis. Duomenų paketas sudarytas iš 3 metų valandinių matavimų duomenų. Surinkus ir apdorojus SM generacijos duomenis jie yra lyginami su „PVSyst“ modeliavimo duomenimis. Rezultatai pateikiami 3.14 lentelėje.

3.14 lentelė. „PVSyst“ modeliuojamos SM generacijos verifikavimas

SM tipas	Lokacija	Įrengimo vieta	Vidutinis išmatuotas E_{SM} , kWh/metus	„Pvsyst“ modeliuojamas E_{SM} , kWh/metus	MAPE, %
Mono-Si, PERC, 330W	Vilniaus m. (54.794220, 25.363318)	Šlaitinis stogas, posvyris – 35°, azimutas – -20°	9946,588	9904,114	0,427
Mono-Si, PERC, 370W	Vilniaus m. (54.764225, 25.254261)	Šlaitinis stogas, posvyris – 45°, azimutas – 35°	7799,837	7687,778	1,437
Mono-Si, PERC, 370W	Vilniaus m. (54.677003, 25.390665)	Šlaitinis stogas, posvyris – 10°, azimutas – -5°	4384,874	4483,173	2,242
Mono-Si, PERC, 370W	Vilniaus m. (54.677003, 25.390665)	Šlaitinis stogas, posvyris – 15°, azimutas – -105°	5789,994	5627,025	2,815
Mono-Si, PERC, 450W	Vilniaus m. (54.597473, 25.265751)	Antžeminė SE, posvyris – 35°, azimutas – 0°	7131,474	7118,983	0,175

Pagal gautus rezultatus matyti, kad mažiausia vidutinė absoliutinė procentinė paklaida (toliau – MAPE) buvo žemiausia antžeminės SE atveju prie 35° SM posvyrio ir 0° azimuto kampų. Visi SM įrengtų ant šlaitinio stogo rezultatai turėjo didesnes prognozuojamos ir realios generuojamos energijos paklaidas. Šis skirtumas tarp skirtingų SE įrengimo būdų gali būti paaiškinamas per SM įšilimo modeliavimo ir realių sąlygų skirtumus. Antžeminių SE SM turi tendenciją aušintis efektyviau nei ant stogo esantys SM. Taip pat, visose simuliacijose gaunamas rezultatas yra mažesnis už matavimų duomenis.

Modeliuojamų ir faktinių duomenų paklaidos taip pat priklauso nuo SE modelio tikslumo (pastatų, šešėliuojančių objektų, SM posvyrio kampo ir azimuto atitikimo realioms duomenims). Paminėtina,

kad „PVsyst“ programiniame pakete naudojami meteorologiniai duomenys iš 2007–2017 metų, kurie yra vidutiniai ir nebūtiniai tiksliai atitinka paskutinių trijų metų laikotarpyje surinktus duomenis.

3.4.2. „PVsyst“ naudojamo meteorologinio paketo apšvietos į horizontalų paviršių verifikavimas

„PVsyst“ naudojamo „Meteonorm 8.1“ meteorologinio paketo apšvietos į horizontalų paviršių verifikavimas atliekamas panaudojant paskutinių 3 metų valandinius apšvietos duomenis gautus iš LHMT. Surinkus ir apdorojus faktinius duomenis jie yra lyginami su „PVsyst“ modeliavimo duomenimis tyrime nagrinėjamoje vietovėje. Rezultatai pateikiami 3.15 lentelėje.

3.15 lentelė. „PVsyst“ naudojamo meteorologinio paketo apšvietos į horizontalų paviršių verifikavimas

Lokacija	Linijinis atstumas nuo LHMT Vilniaus meteorologinės stoties nagrinėjamos vietovės, km	Išmatuota G_h , $W/m^2/metus$	„Meteonorm 8.1“ G_h , $W/m^2/metus$	MAPE, %
Vilniaus m. (54.718958, 25.317530)	16.81	1081.800	1028.928	4.887

Pagal gautus rezultatus matyti, kad suminė apsieta į horizontalų paviršių naudojama „PVsyst“ programiniame pakete yra mažesnė nei išmatuotas 3 paskutinių metų vidurkis. „PVsyst“ programiniame pakete naudojami meteorologiniai duomenys iš 2007–2017 metų, todėl yra galimas neatitikimas tarp šių duomenų.

3.4.3. „PVsyst“ naudojamo meteorologinio paketo oro temperatūros verifikavimas

„PVsyst“ naudojamo „Meteonorm 8.1“ meteorologinio paketo vidutinės oro temperatūros verifikavimas atliekamas panaudojant paskutinių 3 metų valandinius oro temperatūros duomenis gautus iš LHMT kovo–spalio mėnesiais. Surinkus ir apdorojus faktinius duomenis jie yra lyginami su „PVsyst“ modeliavimo duomenimis tyrime nagrinėjamoje vietovėje. Rezultatai pateikiami 3.16 lentelėje.

3.16 lentelė. „PVsyst“ naudojamo meteorologinio paketo vidutinės oro temperatūros verifikavimas

Lokacija	„Meteonorm 8.1“ 2007–2017 metai	2021 metai		2022 metai		2023 metai		2021–2023 metai	
	Vidutinis T_a , modeliuojamas , °C	Vidutinis, T_a , °C	MAPE lyginant su simuliacija, %	Vidutinis, T_a , °C	MAPE lyginant su simuliacija, %	Vidutinis, T_a , °C	MAPE lyginant su simuliacija, %	Vidutinis, T_a , °C	MAPE lyginant su simuliacija, %
Vilniaus m. (54.718958, 25.317530)	11,614	11,864	2,107	11,652	0,326	12,927	10,157	12,148	4,393

Pagal gautus rezultatus matyti, kad vidutinė oro temperatūra naudojama „PVsyst“ programiniame pakete yra mažesnė nei išmatuotas 3 paskutinių metų vidurkis ir atskirų metų minėtame intervale vidurkiai. 2023 metų vidutinės temperatūros paklaida ypač išsiskiria iš 2021 ir 2022 metų rezultatų, tai indikuoja, kad 2023 metų kovo–spalio laikotarpis buvo neįprastai šiltas, lyginant su 2007-2017 metų duomenimis. Todėl verifikuojant šiluminį modelį tolimesniame poskyryje simuliacijose yra naudojami išmatuoti LHMT meteorologiniai duomenys (oro temperatūra, apšvieta į horizontalųjį paviršių) nagrinėjamomis dienomis, kad pasiekti tikslesnį pirminių sąlygų sudarymą simuliacijose.

3.4.4. Duomenų surinkimas atliekant eksperimentą

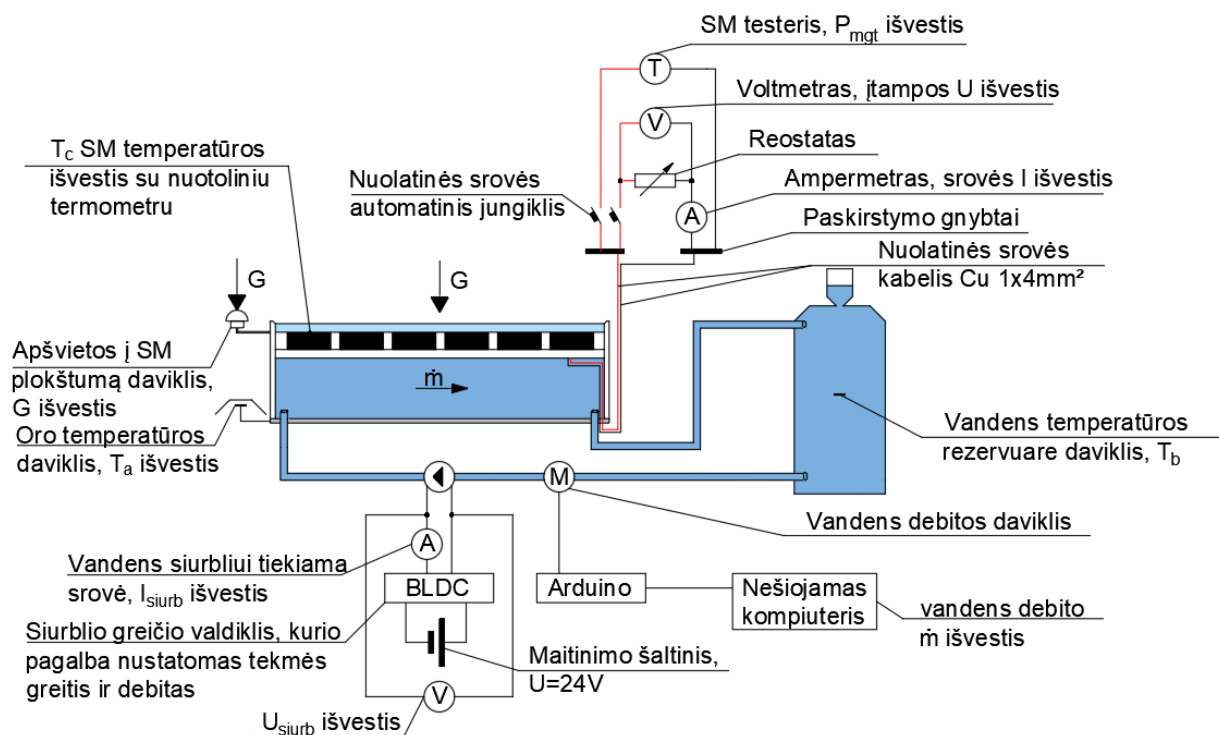
Eksperimentas atliekamas siekiant nustatyti aušinamo SM šiluminio modelio tikslumą. Eksperimentas susideda iš neaušinamo kontrolinio SM ir aušinamo SM įrengtų ant sutapdinto stogo Vilniuje. Eksperimento metu nagrinėjami 30° ir 15° SM posvyrio kampai prie 0° azimuto atitinkamai 2023 metų rugpjūčio 6 dieną ir 2023 metų rugsėjo 7 dieną. Matavimai atliekami kas valandą nuo 8:00 iki 19:00 valandos. Eksperimente naudojama įranga pateikiama 3.17 lentelėje.

3.17 lentelė. Pagrindiniai komponentai naudojami eksperimente

Pavadinimas	Parametrai	Jautrumas	Paklaida
Saulės moduliai 375W, mono-Si, PERC	$P=375\text{W}$, $I_{\text{mgt}}=10.89\text{A}$, $U_{\text{mgt}}=34.44\text{V}$, $U_0=41.4\text{V}$, $\eta=20.3$, $\gamma=-0.38\%/^{\circ}\text{C}$, 1765x1048x35mm (LxWxD)	-	-
SM montavimo konstrukcija	Posvyris – 15°	-	-
SM montavimo modifikuota konstrukcija	Posvyris – 30°	-	-
Plieno lakštas	1790x1070x3mm	-	-
Reostatas (aušinamam SM)	$R=11.48\Omega$, $I=20\text{A}$	-	-
Reostatas (kontroliniam SM)	$R=8\Omega$, $I=15.81\text{A}$	-	-
Nuolatinės srovės automatiniai jungikliai	1 polius, C40A	-	-
Vandens siurblys	$P=90\text{W}$, $\dot{m}=200\text{l/min}$, vandens pakėlimo aukštis iki 6m	-	-
Siurblio valdiklis BLDC	$U=5\text{--}36\text{V}$, $I=15\text{A}$, greičio valdymas 0–100%	-	-
Voltmetrai	$U=0\text{--}100\text{V}$, $f=2\text{Hz}$	0.1 V	±1 %
Ampermetrai	$I=0\text{--}50\text{A}$, $f=2\text{Hz}$	0.01 A	±1 %
Temperatūros davikliai su LCD ekranais	$T=-50\text{--}110^{\circ}\text{C}$	0.1 °C	±1 %
SM temperatūros matavimo bekontaktis termometras	$T=0.1\text{--}99.9^{\circ}\text{C}$	0.1 °C	±0.2 °C
Vandens srauto daviklis	$\dot{m}=1\text{--}30\text{l/min}$	-	±10 %
„Arduino UNO“ mikrovaldiklis (vandens srauto davikliui)	-	-	-
Nešiojamas kompiuteris	-	-	-
SM testeriai*	$P=5\text{--}800\text{W}$, $U=12\text{--}60\text{V}$, $I=0\text{--}35\text{A}$	0.1 W, 0.01 V, 0.01 A	-
Apšvietos matavimo prietaisas (piranometras)	$G=0\text{--}1999\text{W/m}^2$	1 W/m ²	5 %
Vamzdžių šiluminė izoliacija	Poli etileno izoliacija, 42x25mm, šilumos laidumo koeficientas $K=0.035\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$	-	-

Rezervuaro šiluminė izoliacija	Stiklo vata, 30mm, šilumos laidumo koeficientas $K=0.060 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$	-	-
Vamzdžiai	Poli propileno, D40	-	-
Rezervuaras	Polimerinė statinė, 50l tūrio su užsukamu dangčiu	-	-

Principinė eksperimento schema aušinamam SM pateikiama 3.15 paveiksle. Kontrolinio neaušinamo SM principinė schema yra identiška viršutinėje dalyje (3.15 pav.), t. y. elektrinių parametų surinkimui be hidraulinės dalies komponentų ir hidraulinės dalies elektrinių parametų surinkimo.



3.15 pav. Eksperimento principinė schema

Eksperimentinių duomenų surinkimo seka:

1. aušinamo SM sistemoje papildoma vandeniu (tyrimo metu pastebėtas nežymus vandens pratekėjimas ($\leq 0,25 \text{ l/h}$) per nuolatinės srovės kabelių išvesties iš aušinimo kanalo vietas);
2. įjungiami davikliai ir vandens siurblys;
3. nustatomas vandens tėkmės greitis;
4. panaudojant automatinius jungiklius įjungiama reostato grandinė;
5. abu reostatai yra reguliuojami, kol pasiekama didžiausia galia (srovės I ir įtampos U sandauga). Šis taškas yra maksimaliai, kiek leidžia reostatų varžos vertės ir mažiausias pokytis, artimas maksimalios galios taškui P_{mgt} . Tyrimo metu pastebėta, kad didžiausios maksimalios galios taško paklaidos, lyginant su SM testerio duomenimis, gautos ryto ir vakaro laikotarpiu bei buvo pasiektas krašutinės reostatų varžos pozicijos;
6. laikas – 7:00 valanda;
7. laukiama 45 minutes;
8. per 15-20 minučių nurašomi daviklių duomenys, perjungiama SM testerio grandinė ir surenkamos P_{mgt} , I , U , U_0 , $U_{siurb.}$, $I_{siurb.}$, $\dot{m}$, G , T_a , T_c ir T_b vertės;
9. atgal įjungiama reostato grandinė ir vėl nustatoma varžą kuri lemia didžiausią SM srovės I ir įtampos U sandaugą, kuri yra SM galia artima maksimalaus galios taško P_{mgt} vertei;
10. toliau kartojami 5-8 žingsniai iki 19 valandos.

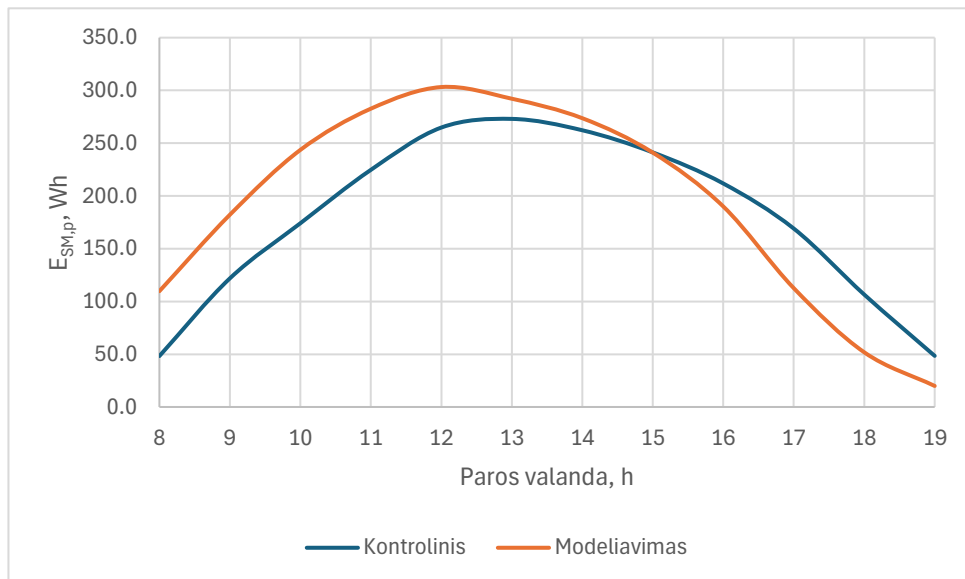
Gaunami rezultatai analizuojami 3.4.5–3.4.8 skyreliuose ir pilnas duomenų paketas pateikiamas 4–10 prieduose.

3.4.5. Aušinamo saulės modulio generacijos verifikavimas

Rugpjūčio 6 dieną atliktas bandymas su 30° SM posvyrio kampu. Perskaičiuotos SM elektros generacijos modeliavimo bei eksperimentiniai (kontroliniai) rezultatai pateikiami 3.16 paveiksle.

Pagal gautas kreives matyti, kad tarp 8 ir 15 valandos faktinė SM generacija buvo mažesnė už modeliavimo, o po 15 valandos ji buvo didesnė už sumodeliuota. Pastebimas grafikų pasislinkimas 1 valanda, t.y. maksimalios generacijos vertės pasiekiamos 1 valanda vėliau faktinių matavimų metu. Tai siejasi su SM krypties nustatymo įrengimo metu paklaidomis. Faktiniai apšvietos ir generacijos duomenys indikuoja, kad eksperimento metu įrengti SM galėjo turėti ~5–10 laipsnių pakreipimą į vakarų pusę lyginant su modeliuojama situacija. Suminė per nagrinėjamą laiko intervalą sugeneruota $E_{SM,p}$ yra didesnė modeliavimo rezultatuose (≈ 2303 Wh), nei faktinių matavimų rezultatuose (≈ 2131 Wh).

Pastebėta, kad simuliuojamas vandens siurblio elektros energijos suvartojimas buvo mažesnis už faktiškai išmatuotą. Tai gali būti paaiškinama tuo, kad praktikoje vandens siurblio galia ir sukuriamas vandens debitas nėra susiję tiesine priklausomybe, kaip yra vertinama modelyje, o priklausomybės kreivė turi linkį, t.y. dėl susidarančių kelio hidraulinių nuostolių ir vandens siurblio efektyvumo prie skirtingų darbo režimų, dažnu atveju praktikoje reikia didesnės siurblio galios, kad pasiekti reikiamą vandens debitą lyginant su situacija, jei ši priklausomybė būtų linijinė. Faktinė vidutinė siurblio galia buvo 10,2 W, o simuliacijų metu buvo 5,2 W.



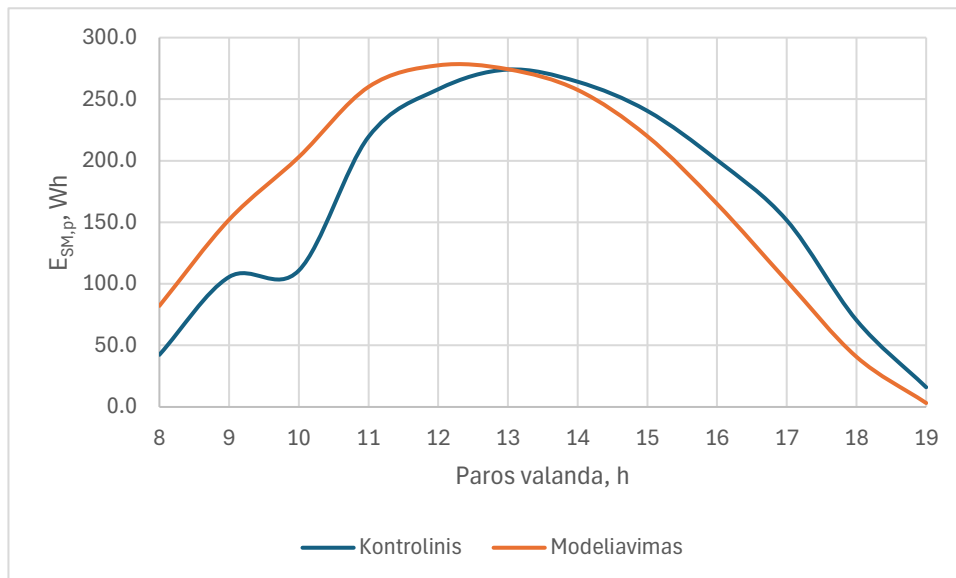
3.16 pav. Aušinamo SM kontrolinė ir modeliuojama $E_{SM,p}$ rugpjūčio 6 dieną

Rugsėjo 7 dieną atliktas bandymas su 15° SM posvyrio kampu. Perskaičiuotos SM elektros generacijos $E_{SM,p}$ modeliavimo bei eksperimentiniai (kontroliniai) rezultatai pateikiami 3.17 paveiksle.

Pagal gautas kreives matyti, kad tarp 8 ir 13 valandos faktinė SM generacija buvo mažesnė už modeliavimo, o po 13 valandos ji buvo didesnė už sumodeliuota. Taip pat, pastebimas grafikų pasislinkimas 1 valanda, kaip ir rugpjūčio 6 dienos bandyme. Suminė per nagrinėjamą laiko intervalą

sugeneruota $E_{SM,p}$ yra didesnė simuliacijos rezultatuose (≈ 2038 Wh), nei faktinių matavimų rezultatuose (≈ 1948 Wh), tendencija tokia pati kaip ir rugpjūčio 6 dienos bandyme.

Taip pat, pastebėta, kad simuliuojamas vandens siurblio elektros energijos suvartojimo vertės buvo mažesnės už faktiškai išmatuotas vertes ir ta pati tendencija pastebima ir rugpjūčio 6 dienos bandymo rezultatuose. Faktinė vidutinė siurblio galia buvo 9,08 W, o simuliacijų metu – 4,7 W.



3.17 pav. Aušinamo SM kontrolinė ir modeliuojama $E_{SM,p}$ rugsėjo 7 dieną

Faktinių ir simuliuojamų duomenų paklaidos gaunamos lyginant minėtus duomenis rugpjūčio 6 ir rugsėjo 7 dieną pateikiamos 3.18 lentelėje.

3.18 lentelė. Modeliuojamų ir kontrolinių suminių $E_{SM,p}$ verčių palyginimas

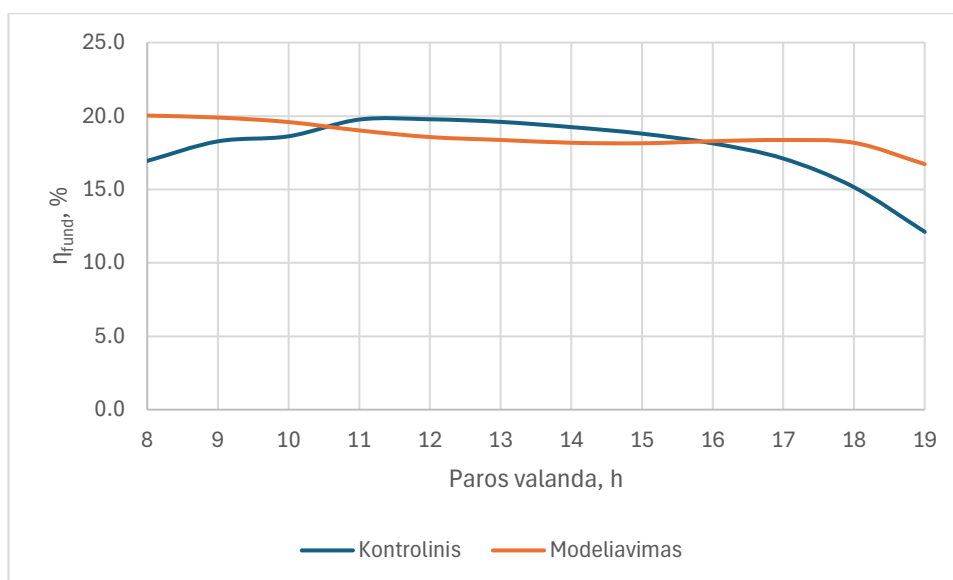
Diena	Kontrolinis suminis $E_{SM,p}$, Wh	Modeliuojamas suminis $E_{SM,p}$, Wh	MAPE, %
Rugpjūčio 6	2131	2302	4,59
Rugsėjo 7	1948	2038	8,04

Pagal gautus rezultatus matyti, kad didesnė vidutinė absoliutinė procentinė paklaida gaunama rugsėjo 7 dieną. Tai gali būti aiškinama tuo, kad šią dieną ryte ir vakare buvo pastebėtas neženklus debesuotumas bei ryte buvo pastebėta rasa ant SM ir šie reiškiniai padidino modeliavimo ir faktinių rezultatų skirtumus.

3.4.6. Aušinamo saulės modulio efektyvumo verifikavimas

Rugpjūčio 6 dieną atliktas bandymas su 30° SM posvyrio kampu. Aušinamo SM efektyvumo modeliavimo bei eksperimentiniai (kontroliniai) rezultatai pateikiami 3.18 paveiksle.

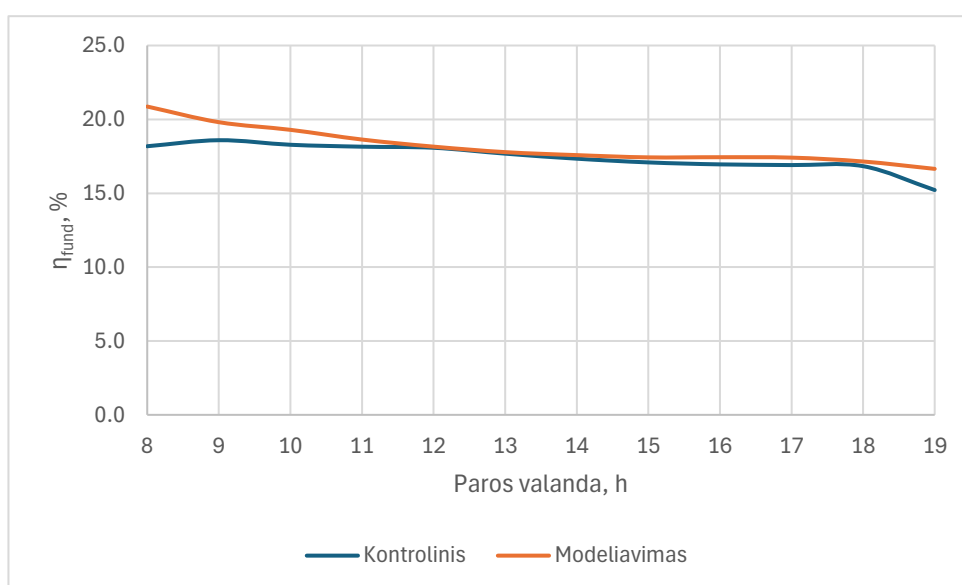
Pagal gautas kreives matyti, kad visame nagrinėjamame laiko intervale faktinis aušinamo SM efektyvumas buvo žemesnis už sumodeliuotą. Didžiausias skirtumas tarp efektyvumų pastebimas 8–11 valandą ir 19 valandą.



3.18 pav. Aušinamo SM kontrolinė ir modeliujama $\eta_{e,fund}$ rugpjūčio 6 dieną

Rugsėjo 7 dieną atliktas bandymas su 15° SM posvyrio kampu. Aušinamo SM efektyvumo modeliavimo bei eksperimentiniai (kontroliniai) rezultatai pateikiami 3.19 paveiksle.

Pagal gautas kreives matyti, kad laiko intervale nuo 8 iki 10:30 valandos bei nuo 16 iki 19 valandos faktinis aušinamo SM efektyvumas buvo žemesnis už sumodeliuotą. Tarp 10:30 ir 16 valandos faktinis efektyvumas buvo didesnis. Didžiausias skirtumas tarp efektyvumų pastebimas 8–10:30 valandos bei 16–19 valandos intervale. Efektyvumui įtaką daro, tai kad faktiniai matavimai rodo mažesnę rezervuaro temperatūrą, taip pat mažesnę apšvietą, laiko intervale, kuriame kontrolinių duomenų kreivė yra virš modeliavimo duomenų kreivės. Tai reiškia, kad faktiškai šiame laiko intervale buvo mažesnis sistemos šiluminis įsisotinimas ir tai prisidėjo prie didesnių efektyvumo verčių.



3.19 pav. Aušinamo SM kontrolinė ir modeliujama $\eta_{e,fund}$ rugsėjo 7 dieną

Faktinių ir modeliavimo rezultatų paklaidos gaunamos lyginant minėtus duomenis rugpjūčio 6 dieną ir rugsėjo 7 dieną pateikiamos 3.19 lentelėje.

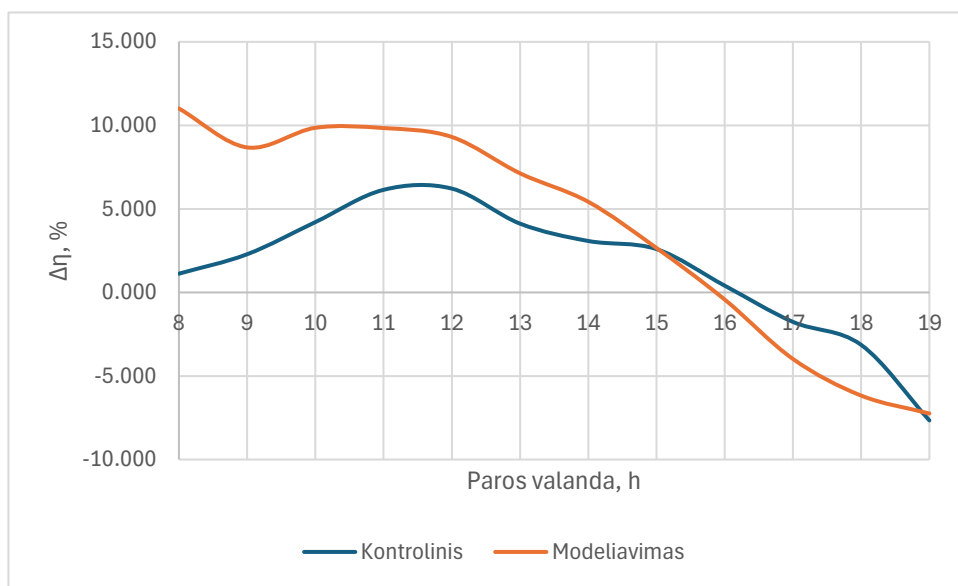
3.19 lentelė. Modeliuojamų ir kontrolinių vidutinių $\eta_{e, fund}$ verčių palyginimas

Diena	Vidutinis kontrolinis $\eta_{e, fund}$, %	Vidutinis modeliuojamas $\eta_{e, fund}$, %	MAPE, %
Rugpjūčio 6	17,4	18,2	4,57
Rugsėjo 7	17,8	18,6	10,07

Pagal gautus duomenis matyti, kad didesnė vidutinė absoliutinė procentinė paklaida gaunama rugpjūčio 6 dieną. Tai gali būti paaiškinama analogiškais reiškiniais kaip ir 3.4.5 skyrelyje.

3.4.7. Aušinamo ir neaušinamo saulės modulio efektyvumo skirtumo verifikavimas

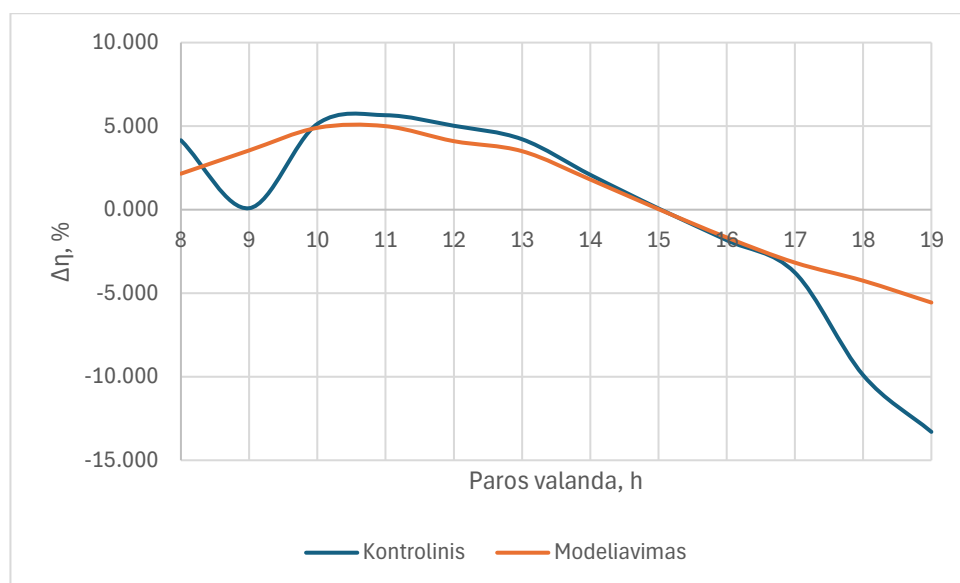
Rugpjūčio 6 dieną atliktas bandymas su 30° SM posvyrio kampu. Aušinamo ir neaušinamo SM efektyvumo skirtumo modeliavimo bei eksperimentiniai (kontroliniai) rezultatai pateikiami 3.20 paveiksle. Pagal gautas kreives matyti, kad laiko intervale iki 15 valandos eksperimento metu išmatuoto aušinamo ir neaušinamo SM efektyvumo skirtumas buvo žemesnis už modeliavimo metu gautą skirtumą. Tačiau nuo 15 valandos pastebima, kad faktinės efektyvumo skirtumo vertės tampa didesnės už sumodeliuotas. Didžiausias skirtumas tarp efektyvumų pastebimas 8–15 valandos intervale ir 18 valandą.



3.20 pav. Aušinamo SM kontrolinė ir modeliuojama $\Delta\eta$ rugpjūčio 6 dieną

Rugsėjo 7 dieną atliktas bandymas su 15° SM posvyrio kampu. Aušinamo ir neaušinamo SM efektyvumo skirtumo modeliavimo bei eksperimentiniai (kontroliniai) rezultatai pateikiami 3.21 pav.

Pagal gautas kreives matyti, kad apie 9 valandą ir nuo 17 valandos eksperimento metu išmatuoto aušinamo ir neaušinamo SM efektyvumo skirtumas buvo žemesnis už modeliavimo metu gautą skirtumą.



3.21 pav. Aušinamo SM kontrolinė ir modeliujama $\Delta\eta$ rugsėjo 7 dieną

Faktinių ir modeliavimo rezultatų paklaidos gaunamos lyginant minėtus duomenis rugpjūčio 6 dieną ir rugsėjo 7 dieną pateikiamos 3.20 lentelėje.

3.20 lentelė. Modeliuojamų ir kontrolinių vidutinių $\Delta\eta$ verčių palyginimas

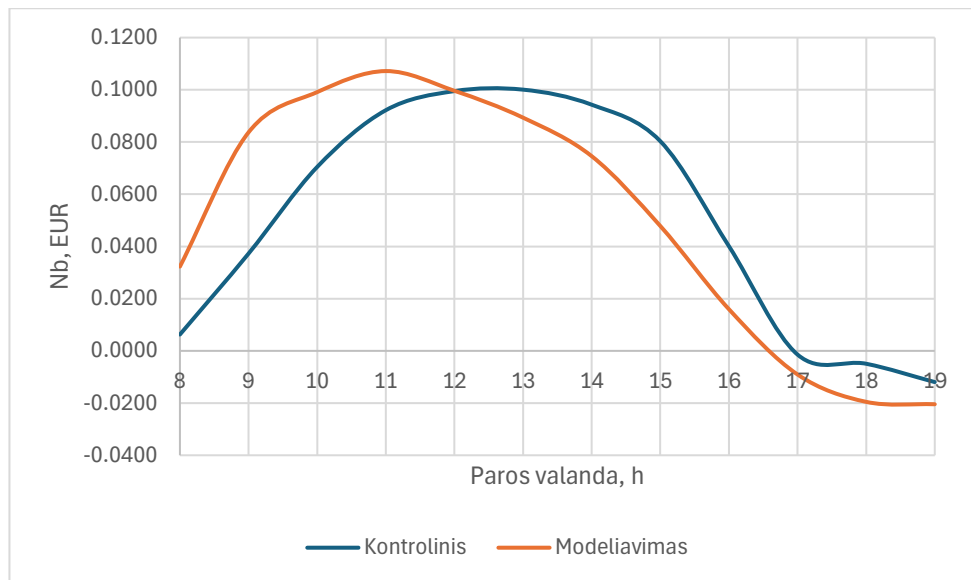
Diena	Vidutinis kontrolinis $\Delta\eta$, %	Vidutinis modeliujamas $\Delta\eta$, %	Absoliutinis skirtumas, %
Rugpjūčio 6	1,47	3,84	2,37
Rugsėjo 7	-0,339	0,866	1,205

Pagal gautus rezultatus matyti, kad didesnis skirtumas tarp modeliujamo ir faktinio aušinamų SM efektyvumo padidėjimo lyginant su modeliujamu neaušinamų ir aušinamų SM efektyvumu, buvo didesnis rugpjūčio 6 dieną. Tam įtaką galėjo daryti aukštesnės bandymo pradžios faktinės rezervuaro temperatūros ir aukštesnės faktinės rezervuaro temperatūros antroje dienos pusėje dėl aukštesnės T_a , kurią sukelia įkaitusi bituminė stogo danga.

3.4.8. Saulės modulio aušinimo bendros naudos verifikavimas

Rugpjūčio 6 dieną atliktas bandymas su 30° SM posvyrio kampu. Aušinamo ir neaušinamo SM efektyvumo skirtumo modeliavimo bei eksperimentiniai (kontroliniai) rezultatai pateikiami 3.22 paveiksle.

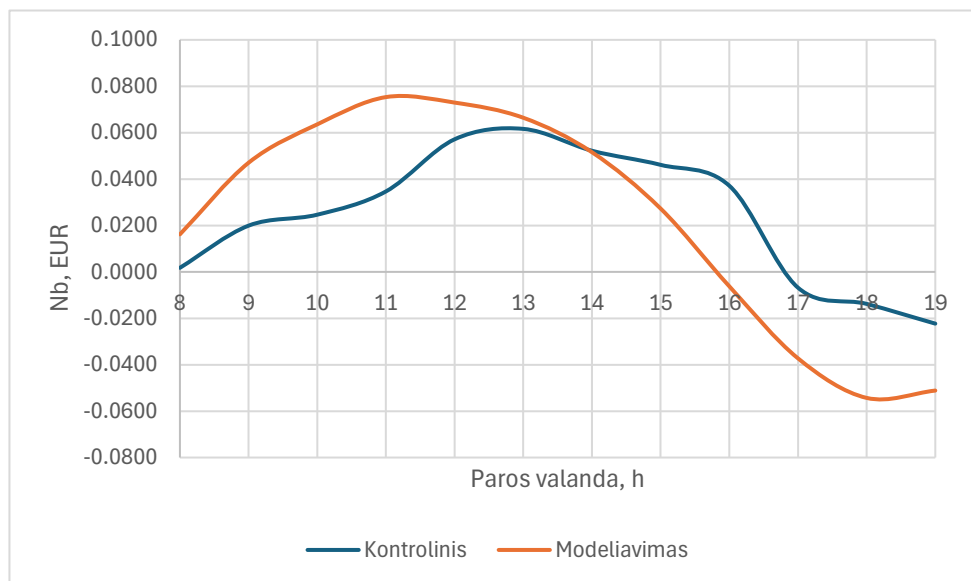
Pagal gautas kreives matyti, kad eksperimento metu išmatuotos bendros aušinimo SM naudos kreivė yra pasislinkus į dešinę lyginant su modeliavimo rezultatų kreive. Iki 12 valandos bandymo metu gauti naudos rezultatai yra mažesni už modeliavimo metu gautus rezultatus. Nuo 12 valandos situacija pasikeičia ir faktiniai rezultatai rodo didesnę bendrą naudą už modeliavimo metu gautus rezultatus. Šis kreivių pasislinkimas galimai yra sukliamas SM azimuto nustatymo bandymo metu paklaidos, t. y. SM galimai buvo pasukti $5-10^\circ$ į vakarų kryptį lyginant su modeliavimo kryptimi, dėl azimuto nustatymo programos mobiliajame telefone paklaidos. Pastebima, kad antroje dienos pusėje matomas staigesnis bendros naudos mažėjimas bandymo metu surinktuose duomenyse, tai indikuoja, kad temperatūrinis sistemos įsisotinimas buvo pasiektas vėliau nei bandymo metu ir išgaunamas naudingos šilumos kiekis sparčiau mažėjo.



3.22 pav. Aušinamo SM kontrolinė ir modeliuojama N_a rugpjūčio 6 dieną

Rugsėjo 7 dieną atliktas bandymas su 15° SM posvyrio kampu. Aušinamo ir neaušinamo SM efektyvumo skirtumo modeliavimo bei eksperimentiniai (kontroliniai) rezultatai pateikiami 3.23 paveiksle.

Pagal gautas kreives matyti, kad eksperimento metu išmatuotos bendros aušinimo SM naudos kreivė taip pat yra pasislinkus į dešinę lyginant su modeliavimo rezultatų kreive. Iki ~ 14 valandos bandymo metu gauti naudos rezultatai yra mažesni už modeliavimo metu gautus rezultatus. Nuo ~ 14 valandos situacija pasikeičia ir faktiniai rezultatai indikuoja didesnę bendrą naudą už modeliavimo metu gautus rezultatus. Šis kreivių pasislinkimas galimai yra sukeliamas dėl analogiškų priežasčių kaip ir rugpjūčio 6 bandymo aprašyme. Bandymo pradžioje ir pabaigoje matomas kreivės išsikraipymas sukeliamas meteorologinių reiškinių, t.y. ryte buvo pastebėtas ženklus rasos kiekis ant SM bei nežymus debesuotumas, o vakare taip pat pastebėtas neženklus debesuotumas.



3.23 pav. Aušinamo SM kontrolinė ir modeliuojama N_a rugsėjo 7 dieną

Faktinių ir modeliavimo rezultatų paklaidos gaunamos lyginant minėtus duomenis rugpjūčio 6 dieną ir rugsėjo 7 dieną pateikiami 3.21 lentelėje.

3.21 lentelė. Modeliuojamų ir kontrolinių suminių N_a verčių palyginimas

Diena	Kontrolinė suminė bendra aušinamo SM nauda N_a, EUR	Modeliuojama suminė bendra aušinamo SM nauda N_a, EUR	MAPE, %
Rugpjūčio 6	0,602	0,601	0,25
Rugsėjo 7	0,292	0,272	7,14

Pagal gautus rezultatus matyti, kad didesnė N_a buvo išgauta rugpjūčio 6 dieną, rugsėjo 7 dieną. Didesnė paklaida tarp bandymo ir modeliavimo rezultatų buvo rugsėjo 7 dieną – 7,14 %, nei rugpjūčio 6 dieną – 0,25 %. Tiek rugpjūčio 6 tiek rugpjūčio 7 dienomis bandymo metu gautos duomenų vertės buvo didesnės už modeliavimo. Tai gali būti paaiškinama patiriamais mažesniais šiluminiais nuostoliais, kadangi bendros naudos didžiąją dalį sudaro nuvestos šilumos nauda. Gauti rezultatai indikuoja, kad patiriami šiluminiai nuostoliai vamzdžių sistemoje buvo žemesni nei apibrėžti šiluminiame modelyje (12 %). Taip pat, prie žemesnių šiluminių nuostolių prisidėjo aukštesnė oro temperatūra bandymo metu, kuri susidaro dėl bituminės stogo dangos įkaitimo ir turi reikšmingą įtaką antroje dienos pusėje.

Išvados

1. Atlikus literatūros šaltinių analizę pastebėta, kad efektyviausi saulės modulių aušinimo metodai yra galinio paviršiaus aušinimas vandeniu sukuriant uždara kontūrą ir saulės modulių priekinio ir (arba) galinio paviršiaus aušinimas vandeniu panaudojant purkštukus. Pasiektas vidutinis efektyvumo padidėjimas atitinkamai – 17,54 % ir 17,81 %, tačiau pirmasis metodas yra palankesnis nuvedamos šiluminės energijos antriniam panaudojimui;
2. Atliktos simuliacijos „PVsyst“ programiniu paketu ir šiluminiu modeliu prie skirtingų saulės modulio azimuto ir posvyrio į horizontą kampų bei skirtingų aušinimo rezervuaro tūrių. Nustatyta, kad didėjant azimuto kampui, mažėja optimalus, pagal $E_{SM,p}$ vertę, saulės modulių posvyrio kampas. Prie -45° azimuto optimalus posvyris – 35° , o prie -90° azimuto – 5° . Pastebima, kad keičiantis azimuto kampui nuo -45° iki -90° $\Delta E_{SM,p}$ skirtumas lyginant su 0° azimuto vertėmis atitinkamai yra $-5,79\%$ ir $-18,5\%$, $\Delta \eta_{e,fund}$ skirtumas atitinkamai yra $-0,429\%$ ir $-0,924\%$, $\Delta \Delta \eta$ skirtumas atitinkamai yra $-15,3\%$ ir $-50,2\%$, o N_a pokytis atitinkamai yra $-5,28\%$ ir $-13,9\%$;
3. Atliktos simuliacijos „PVsyst“ programiniu paketu ir šiluminiu modeliu ir nustatyta, kad $E_{SM,p}$, $\eta_{e,fund}$, $\Delta \eta$ ir N_a vertės didėja, kuomet yra didinamas vandens rezervuaro tūris. Didėjant rezervuaro tūriui nuo 50 iki 800 l ir esant 0° azimuto kampui, optimalus, pagal $E_{SM,p}$ vertę, saulės modulių posvyrio kampas išlieka tas pats – 40° . Pastebima, kad keičiantis rezervuaro tūriui nuo 200 l iki 800 l, $\Delta E_{SM,p}$ skirtumas lyginant su 50 l rezervuaro tūrio vertėmis atitinkamai yra $1,34\%$ ir $2,24\%$, $\Delta \eta_{e,fund}$ skirtumas atitinkamai yra $1,39\%$ ir $2,11\%$, $\Delta \Delta \eta$ skirtumas atitinkamai yra 129% ir 222% , o N_a pokytis atitinkamai yra $36,5\%$ ir $69,2\%$;
4. Atlikus simuliacijas ir 5 atsitiktinių saulės elektrinių Vilniuje 2021–2023 metų istorinių duomenų analizę nustatyta, kad „PVsyst“ programinis paketas simuliuoja E_{SM} metinės sumines vidutines vertes, kurių MAPE, gauta lyginant su istoriniais duomenimis, kinta $0,175\text{--}2,24\%$ ribose ir visais atvejais yra mažesnė simuliacijose. Apšvietos į horizontalųjį paviršių duomenys naudojami „PVsyst“ programiniame pakete, lyginant su LHMT 2021–2023 metų vidurkais yra didesni ir turi MAPE – $4,89\%$. Vidutinės oro temperatūros duomenų „PVsyst“ programiniame pakete atitikimas yra įvertintas MAPE – $4,39\%$ ir yra didesnis istoriniuose duomenys. Tam įtakos turi ypatingai šilti orai 2023 metais;
5. Atlikus eksperimentą and sutapdinto stogo Vilniuje nustatyta, kad prie 50 l rezervuaro tūrio, 0° azimuto ir 30° saulės modulių posvyrio kampo rugpjūčio 6 dieną $E_{SM,p}$ buvo mažesnis už modeliuojamą ir MAPE buvo $4,59\%$. Rugsėjo 7 dieną prie 0° azimuto ir 15° saulės modulio posvyrio kampo $E_{SM,p}$ taip pat buvo mažesnis atliekant bandymą ir MAPE buvo $8,04\%$. $\eta_{e,fund}$ taip pat buvo žemesnis tiek rugpjūčio 6 tiek rugsėjo 7 dienos bandyme, o MAPE atitinkamai buvo $4,57\%$ ir $8,04\%$. $\Delta \eta$ absoliutinis procentinis skirtumas tarp modeliuojamų ir faktinių duomenų pagal bandymų datą atitinkamai buvo $2,37\%$ ir $1,21\%$. N_a bandymo metu gautos vertės yra didesnės nei modeliavimo metu gautos vertės. Tai indikuoja, kad bandymo metu buvo patiriami mažesni šiluminiai nuostoliai nei buvo apibrėžiami modelyje. Skirtumas tarp modeliuojamų ir faktinių duomenų rugpjūčio 6 ir rugsėjo 7 dienomis buvo atitinkamai $0,25\%$ ir $7,14\%$.

Literatūros sąrašas

1. United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2021). Global Population. *Growth and Sustainable Development*. UN DESA/POP/2021/TR/NO. 2, ISBN 978-92-1-1483505. Prieiga per: <https://www.un.org/development/desa/pd/content/global-population-growth> [Žiūrėta 2023-11-10];
2. Qi Zhao, Pei Yu, Rahini Mahendran, Wenzhong Huang, Yuan Gao, Zhengyu Yang, Tingting Ye, Bo Wen, Yao Wu, Shanshan Li, Yuming Guo, Global climate change and human health: Pathways and possible solutions, *Eco-Environment & Health*, 2022. Psl. 53-62, ISSN 2772-9850. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772985022000072> [Žiūrėta 2023-11-10];
3. Crippa, M., Guizzardi, D., Pagani, F., Banja, M., Muntean, M., Schaaf E., Becker, W., Monforti-Ferrario, F., Quadrelli, R., Risquez Martin, A., Taghavi-Moharamli, P., Köykkä, J., Grassi, G., Rossi, S., Brandao De Melo, J., Oom, D., Branco, A., San-Miguel, J., Vignati, E., GHG emissions of all world countries, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023. ISBN 978-92-68-07550-0. Prieiga per: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2023 [Žiūrėta 2023-11-10];
4. Fenf, H. and S. Wanyun. What really drives the deployment of renewable energy? A global assessment of 118 countries. *Energy Research & Social Science*. University of South Florida: department of Sociology and university of Alabama: department of Geography, 2021, vol. 72 (101880). ISSN 2214-6296. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214629620304552> [Žiūrėta 2022-06-13];
5. International Energy Agency (IEA), *Renewables 2022*, IEA, Paris.. Prieiga per: <https://www.iea.org/reports/renewables-2022> [Žiūrėta 2023-11-10];
6. International Energy Agency (IEA), *Lithuania 2021 Energy Policy Review*, IEA, Paris. Prieiga per: <https://www.iea.org/reports/lithuania-2021> [Žiūrėta 2023-11-10];
7. LIETUVOS RESPUBLIKOS SEIMAS. Lietuvos Respublikos nacionalinės energetinės nepriklausomybės strategija. Lietuvos Respublikos seimas: Vilnius, 2012. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.429490/asr> [Žiūrėta 2022-06-11];
8. Abidur Rahman, Omar Farrok, Md Mejbaul Haque, Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants: Solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, tidal, ocean, and osmotic, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022. ISSN 1364-0321. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403212200199X> [Žiūrėta 2022-06-10];
9. LIETUVOS RESPUBLIKOS SEIMAS. Dėl statybos techninio reglamento str 2.01.02:2016 „Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas“ patvirtinimo. Lietuvos Respublikos seimas: Vilnius, 2016 [Žiūrėta 2022-06-11]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/15767120a80711e68987e8320e9a5185/asr>
10. Francesco Asdrubali, Umberto Desideri, Handbook of Energy Efficiency in Buildings, Chapter 7 - High Efficiency Plants and Building Integrated Renewable Energy Systems, Butterworth-Heinemann, 2019. 441-595 psl., ISBN 9780128128176. Prieiga per:

- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128128176000401> [Žiūrėta 2022-06-11];
11. Angel Antonio and Bayod-Rújula. Solar Hydrogen Production: *Chapter 8 - Solar photovoltaics (PV)*. Electrical Engineering Department, University of Zaragoza, Zaragoza, Spain, 2019, pp. 238-243. ISBN 9780128148532. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128148532000084> [Žiūrėta 2022-06-09];
 12. Dwivedi, Sudhanshu. Fabrication and Manufacturing Process of Solar Cell: *Chapter 1*, 2020. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/346346808_Fabrication_and_Manufacturing_Process_of_Solar_Cell_Chapter_1 [Žiūrėta 2021-06-08];
 13. Jadhav, Ghanshyam. *Classical Explanation of Photoelectric Effect*. 2022. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/358002652_Classical_Explanation_of_Photoelectric_Effect [Žiūrėta 2022-06-09];
 14. Petrauskas, Gytis ir Vytautas Adomavičius. *Saulės energijos naudojimas elektrai gaminti*. Kaunas: Technologija, 2012, pp. 35-51. ISBN 9786090207529.
 15. Severine Wiysahnyuy Yufenyuy, Ghislain Mengounou Mengata, Leandre Nneme Nneme, Influence of the nature of lamp on model parameters of PV modules operating in an indoor environment, *Energy Reports*, Volume 10, 2023. 4374-4388 psl., ISSN 2352-4847. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484723015032> [Žiūrėta 2022-06-11];
 16. Sharma, Dinesh and Purohit, Ghanshyam. Analysis of the Effect of Fill Factor on the Efficiency of Solar PV System for Improved Design of MPPT. Iš: Conference: 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-6) At: Kyoto, Japan, 2014. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/269390463_Analysis_of_the_Effect_of_Fill_Factor_on_the_Efficiency_of_Solar_PV_System_for_Improved_Design_of_MPPT [Žiūrėta 2022-06-08];
 17. Pastuszek, Justyna & Węgierek, Paweł. Photovoltaic Cell Generations and Current Research Directions for Their Development, 2022. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/ma15165542> [Žiūrėta 2022-06-05];
 18. Neha Kumari, Sanjay Kumar Singh, Sanjay Kumar, A comparative study of different materials used for solar photovoltaics technology, *Materials Today: Proceedings*, Volume 66, Part 8, 2022. 3522-3528 psl., ISSN 2214-7853. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322044212> [Žiūrėta 2022-06-05];
 19. Brittany L. Smith, Michael Woodhouse, Kelsey A. W. Horowitz, Timothy J. Silverman, Jarett Zuboy, and Robert M. Margolis. *Photovoltaic (PV) Module Technologies: 2020 Benchmark Costs and Technology Evolution Framework Results.*, Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2021. NREL/TP-7A40-78173. Prieiga per: <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/78173.pdf> [Žiūrėta 2022-06-05];
 20. Vítězslav Benda, Trevor M. Letcher, Vasilis M. Fthenakis. 9 - Crystalline Silicon Solar Cell and Module Technology, *A Comprehensive Guide to Solar Energy Systems*, Academic

- Press, 2018. 181-213 psl., ISBN 9780128114797. Prieiga per:
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811479-7.00009-9> [Žiūrėta 2022-06-05];
21. Markus Fischer, Michael Woodhouse, Puzant Baliozian, Jutta Trube. International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV), VDMA e.V., Germany, 2023. Prieiga per:
<https://www.vdma.org/international-technology-roadmap-photovoltaic> [Žiūrėta 2022-06-05];
 22. Benda V. and L. Černá. PV cells and modules – State of the art, limits and trends. *Heliyon*. Praha: Czech Technical University, 2020, vol. 6 (12). ISSN 2405-8440. Prieiga per:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844020325093> [Žiūrėta 2022-06-04];
 23. E. Radziemska. The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells, *Renewable Energy*. Department of Apparatus and Chemical Machinery, Chemical Faculty, Technical University of Gdansk, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdansk, Poland, 2002. Volume 28, Issue 1, p.p 1-12, ISSN 0960-1481. Prieiga per:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148102000150> [Žiūrėta 2022-06-04];
 24. Lujia Xu, Wenzhu Liu, Haohui Liu, Cangming Ke, Mingcong Wang, Chenlin Zhang, Erkan Aydin, Mohammed Al-Aswad, Konstantinos Kotsovos, Issam Gereige, Ahmed Al-Saggaf, Aqil Jamal, Xinbo Yang, Peng Wang, Frédéric Laquai, Thomas G. Allen, Stefaan De Wolf, Heat generation and mitigation in silicon solar cells and modules, *Joule*, Volume 5, Issue 3, 2021. 631-645 psl., ISSN 2542-4351. Prieiga per:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S254243512100043X> [Žiūrėta 2022-06-04];
 25. Hamid Heidarzadeh, Ali Rostami, Mahboubeh Dolatyari, Management of losses (thermalization-transmission) in the Si-QDs inside 3C–SiC to design an ultra-high-efficiency solar cell, *Materials Science in Semiconductor Processing*, Volume 109, 2020. ISSN 1369-8001. Prieiga per:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369800119311606> [Žiūrėta 2022-06-04];
 26. Angel Antonio, Bayod-Rújula. Solar Hydrogen Production: *Chapter 8 - Solar photovoltaics (PV)*. Electrical Engineering Department, University of Zaragoza, Zaragoza, Spain, 2019, pp. 252-259. ISBN 9780128148532. Prieiga per:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128148532000084> [Žiūrėta 2022-06-09];
 27. Fabiano Perin Gasparin, Felipe Detzel Kipper, Fernando Schuck de Oliveira, Arno Krenzinger, Assessment on the variation of temperature coefficients of photovoltaic modules with solar irradiance, *Solar Energy*, Volume 244, 2022. 126-133 psl., ISSN 0038-092X. Prieiga per:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X22006028> [Žiūrėta 2022-06-09];
 28. Akbar Maleki, Arman Haghighi, Mamdouh el Haj Assad, Ibrahim Mahariq, Mohammad Alhuyi Nazari. A review on the approaches employed for cooling PV cells: *Solar Energy*. p.p. 170-185, 2020. ISSN 0038-092X. Prieiga per:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X20309245> [Žiūrėta 2022-06-04];

29. Tareq Salameh, Di Zhang, Adel Juaidi, Abdul Hai Alami, Ismael Al-Hinti, Abdul Ghani Olabi. Review of solar photovoltaic cooling systems technologies with environmental and economical assessment. *Journal of Cleaner Production*, Volume 326, 2021. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621036027> [Žiūrėta 2022-06-02];
30. Pushpendu Dwivedi, K. Sudhakar, Archana Soni, E Solomin, I Kirpichnikova, Advanced cooling techniques of P.V. modules: A state of art, *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 21, 2020. ISSN 2214-157X. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X19305416> [Žiūrėta 2022-06-02];
31. Abdulhadi Abdallah, Richard Opoku, Charles K.K. Sekyere, Samuel Boahen, Kofi O. Amoabeng, Felix Uba, George Y. Obeng, Francis K. Forson, Experimental investigation of thermal management techniques for improving the efficiencies and leveled cost of energy of solar PV modules, *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 35, 2022. ISSN 2214-157X. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X22003793> [Žiūrėta 2022-06-02];
32. Ahmed Hussien, Abdelgalil Eltayesh, Hesham M. El-Batsh, Experimental and numerical investigation for PV cooling by forced convection, *Alexandria Engineering Journal*, Volume 64, 2023. 427-440 psl., ISSN 1110-0168. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016822005932> [Žiūrėta 2022-06-02];
33. Dacheng Li, Marcus King, Mark Dooner, Songshan Guo, Jihong Wang, Study on the cleaning and cooling of solar photovoltaic panels using compressed airflow, *Solar Energy*, Volume 221, 2021. 433-444 psl., ISSN 0038-092X. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X21003376> [Žiūrėta 2022-06-02];
34. Kedri Janardhana, A. Sivakumar, R. Suresh, C. Ramesh, A. Syed Musthafa, Satyendra Vishwakarma, Analyzing thermal performance of a solar PV using a nanofluid, *Materials Today: Proceedings*, Volume 69, Part 3, 2022. 1126-1129 psl., ISSN 2214-7853. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322053494> [Žiūrėta 2022-06-02];
35. Mehmet Ali Yildirim, Artur Cebula, Maciej Sułowicz, A cooling design for photovoltaic panels – Water-based PV/T system, *Energy*, Volume 256, 2022. ISSN 0360-5442. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544222015572> [Žiūrėta 2022-06-02];
36. Mohamed R. Gomaa, Waleed Hammad, Mujahed Al-Dhaifallah, Hegazy Rezk, Performance enhancement of grid-tied PV system through proposed design cooling techniques: An experimental study and comparative analysis, *Solar Energy*, Volume 211, 2020. 1110-1127 psl., ISSN 0038-092X. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X2031121X> [Žiūrėta 2022-06-02];
37. Nabil A.S. Elminshawy, M. El-Ghandour, Y. Elhenawy, M. Bassyouni, D.G. El-Damhogi, Mohammad F. Addas, Experimental investigation of a V-trough PV concentrator integrated with a buried water heat exchanger cooling system, *Solar Energy*, Volume 193, 2019. 706-714 psl., ISSN 0038-092X. Prieiga per:

- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X19309971> [Žiūrėta 2022-06-02];
38. S.M. Shalaby, M.K. Elfakharany, B.M. Moharram, H.F. Abosheisha, Experimental study on the performance of PV with water cooling, *Energy Reports*, Volume 8, Supplement 1, 2022. 957-961 psl., ISSN 2352-4847. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721013020> [Žiūrėta 2022-06-02];
 39. Erdoğan, İsmail & Bilen, Kemal & Kivrak, Sinan, Experimental Investigation of The Efficiency of Solar Panel Over Which Water Film Flows, *Journal of Polytechnic*, 2023. 10.2339/politeknik.1163785. Prieiga per: <https://doi.org/10.2339/politeknik.1163785> [Žiūrėta 2022-06-02];
 40. Amirhosein Hadipour, Mehran Rajabi Zargarabadi, Saman Rashidi, An efficient pulsed-spray water cooling system for photovoltaic panels: Experimental study and cost analysis, *Renewable Energy*, Volume 164, 2021. 867-875 psl., ISSN 0960-1481. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148120314294> [Žiūrėta 2022-06-02];
 41. Fahad Faraz Ahmad, Zafar Said, Ahmed Amine Hachicha, Experimental performance evaluation of closed loop mist/fog cooling system for photovoltaic module application, *Energy Conversion and Management: X*, Volume 14, 2022. ISSN 2590-1745. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590174522000496> [Žiūrėta 2022-06-02];
 42. Odeh, Saad & Behnia, M., Improving Photovoltaic Module Efficiency Using Water Cooling, *Heat Transfer Engineering*, 30, 2009. 499-505 psl. Prieiga per: <https://doi.org/10.1080/0145763080252921> [Žiūrėta 2022-06-02];
 43. Martin Raju, Rakesh Narayana Sarma, Abhilash Suryan, Prasanth P. Nair, Sandro Nižetić, Investigation of optimal water utilization for water spray cooled photovoltaic panel: A three-dimensional computational study, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Volume 51, 2022. ISSN 2213-1388. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138822000273> [Žiūrėta 2022-06-02];
 44. Sampurna Panda, Manoj Gupta, Babita Panda, Chitraklekha Jena, Lipika Nanda, Arjyadhara Pradhan, C.S. Malvi. A review on advanced cooling techniques for photovoltaic panel: *Materials Today: Proceedings*. Poornima University, Jaipur, India, 2022. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322031145> [Žiūrėta 2022-06-02];
 45. Kemal Bilen, İsmail Erdoğan, Effects of cooling on performance of photovoltaic/thermal (PV/T) solar panels: A comprehensive review, *Solar Energy*, Volume 262, 2023, 111829, ISSN 0038-092X. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X23004541> [Žiūrėta 2022-06-02];
 46. Santiago Silvestre, Chapter 7 - Strategies for Fault Detection and Diagnosis of PV Systems, *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*, Elsevier, 2018. 231-255 psl., ISBN 9780128129593. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812959-3.00007-1> [Žiūrėta 2024-01-16];

47. John A. Duffie, William A. Beckman. Solar Engineering of Thermal Processes. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 2013. Prieiga per internetą: [https://www.sku.ac.ir/Datafiles/BookLibrary/45/John%20A.%20Duffie,%20William%20A.%20Beckman\(auth.\)-Solar%20Engineering%20of%20Thermal%20Processes,%20Fourth%20Edition%20\(2013\).pdf](https://www.sku.ac.ir/Datafiles/BookLibrary/45/John%20A.%20Duffie,%20William%20A.%20Beckman(auth.)-Solar%20Engineering%20of%20Thermal%20Processes,%20Fourth%20Edition%20(2013).pdf) [Žiūrėta 2024-04-01];
48. Leonardo Jonas Piotrowski, Marcelo Godoy Simões, Felix Alberto Farret. Feasibility of water-cooled photovoltaic panels under the efficiency and durability aspects: *Solar Energy*. Volume 207, p.p. 103-109, ISSN 0038-092X, 2020. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X20307015> [Žiūrėta 2022-06-02];
49. Andre Mermoud, Michel Volloz, Bruno Wittmer, Michele Oliosi, Agnes Bridel et al. *Standard one-diode-model*, PVsyst SA, Switzerland. Prieiga per internetą: https://www.pvsyst.com/help/index.html?pvmodule_model.htm [Žiūrėta 2024-04-01];
50. Andre Mermoud, Michel Volloz, Bruno Wittmer, Michele Oliosi, Agnes Bridel et al. *Determination of parameters*, PVsyst SA, Switzerland. Prieiga per internetą: https://www.pvsyst.com/help/index.html?pvmodule_parameters.htm [Žiūrėta 2024-04-01];
51. Andre Mermoud, Michel Volloz, Bruno Wittmer, Michele Oliosi, Agnes Bridel et al. *Parameters besides Datasheets*, PVsyst SA, Switzerland. Prieiga per internetą: https://www.pvsyst.com/help/index.html?pvmodule_modelparameters.htm [Žiūrėta 2024-04-01];
52. Andre Mermoud, Michel Volloz, Bruno Wittmer, Michele Oliosi, Agnes Bridel et al. *Rseries and Rshunt determination procedure*, PVsyst SA, Switzerland. Prieiga per internetą: https://www.pvsyst.com/help/index.html?pvmodule_rserie_rshunt_determ.htm [Žiūrėta 2024-04-01];
53. Andre Mermoud, Michel Volloz, Bruno Wittmer, Michele Oliosi, Agnes Bridel et al. *Temperature behaviour correction*, PVsyst SA, Switzerland. Prieiga per internetą: https://www.pvsyst.com/help/index.html?pvmodule_corrtemper.htm [Žiūrėta 2024-04-01];
54. Andre Mermoud, Michel Volloz, Bruno Wittmer, Michele Oliosi, Agnes Bridel et al. *Synthetic data generation*, PVsyst SA, Switzerland. Prieiga per internetą: https://www.pvsyst.com/help/index.html?models_meteo_synthetic_data_generation.htm [Žiūrėta 2024-04-01];
55. F. Sarhaddi, S. Farahat, H. Ajam, A. Behzadmehr, Exergetic performance assessment of a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector, 2010. *Energy and Buildings*, Volume 42, Issue 11, Pages 2184-2199, ISSN 0378-7788. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778810002276> [Žiūrėta 2024-04-01];
56. A. K. Azad, Salma Parvin, Photovoltaic thermal (PV/T) performance analysis for different flow regimes: A comparative numerical study, 2023. *International Journal of Thermofluids*, Volume 18, 100319, ISSN 2666-2027. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666202723000381> [Žiūrėta: 2024-04-07];

57. A. B. Kasaeiana, M. Dehghani Mobarakhehb, S. Golzaria, M. M. Akhlaghia. Energy and Exergy Analysis of Air PV/T Collector of Forced Convection with and without Glass Cover, Iranas, 2013. Prieiga per: https://www.ije.ir/article_72164.html [Žiūrėta: 2024-04-07]
58. H. Ben cheikh el hocine, K. Touafek, F. Kerrou, H. Haloui, A. Khelifa. Model Validation of an Empirical Photovoltaic Thermal (PV/T) Collector, 2015. Energy Procedia, Volume 74, Pages 1090-1099, ISSN 1876-6102. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215015179> [Žiūrėta: 2024-04-07];
59. Swapnil Dubey, G.N. Tiwari. Thermal modeling of a combined system of photovoltaic thermal (PV/T) solar water heater, 2008. Solar Energy, Volume 82, Issue 7, Pages 602-612, ISSN 0038-092X. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X08000340> [Žiūrėta: 2024-04-07];
60. Y. Chaibi, T. El Rhafiki, R. Simón-Allué, I. Guedea, Cardamas Luaces, O. Charro Gajate, T. Kousksou, Y. Zeraouli, Physical models for the design of photovoltaic/thermal collector systems, 2021. Solar Energy, Volume 226, Pages 134-146, ISSN 0038-092X. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X21007003> [Žiūrėta: 2024-04-07];
61. T.T. Chow, Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model, 2003. Solar Energy, Volume 75, Issue 2, Pages 143-152, ISSN 0038-092X. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X03002512> [Žiūrėta: 2024-04-07];
62. Amnart Boonloi, Withada Jedsadaratanachai. CFD analysis on heat transfer characteristics and fluid flow structure in a square duct with modified wavy baffles, Case Studies in Thermal Engineering, Volume 29, 2022. ISSN 2214-157X. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X21008236> [Žiūrėta: 2024-04-07];
63. Ali M. El-Nashar. Heat loss through the piping of a large solar collector field, 2006. Energy, Volume 31, Issue 12, Pages 2020-2035, ISSN 0360-5442. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544205001751> [Žiūrėta: 2024-04-07].

Priedai

- 1 priedas. Saulės modulių azimuto ir posvyrio kampo įtakos su 50 l tūrio rezervuaru modeliavimo rezultatų duomenų paketas;
- 2 priedas. Saulės modulių azimuto ir posvyrio kampo įtakos su 200 l tūrio rezervuaru modeliavimo rezultatų duomenų paketas;
- 3 priedas. Saulės modulių azimuto ir posvyrio kampo įtakos su 800 l tūrio rezervuaru modeliavimo rezultatų duomenų paketas;
- 4 priedas. Rugsėjo 7 dienos kontrolinio ir modeliuojamo neaušinamo saulės modulio rezultatų duomenų paketas verifikavimui;
- 5 priedas. Rugsėjo 8 dienos kontrolinio ir modeliuojamo neaušinamo saulės modulio rezultatų duomenų paketas verifikavimui;
- 7 priedas. Rugsėjo 7 dienos kontrolinio aušinamo saulės modulio rezultatų duomenų paketas verifikavimui;
- 8 priedas. Rugsėjo 7 dienos modeliuojamo aušinamo saulės modulio rezultatų duomenų paketas verifikavimui;
- 9 priedas. Rugsėjo 8 dienos kontrolinio aušinamo saulės modulio rezultatų duomenų paketas verifikavimui;
- 10 priedas. Rugsėjo 8 dienos modeliuojamo aušinamo saulės modulio rezultatų Rugsėjo 8 dienos verifikavimui.

Azimut as, °	Kamp as, °	Siurbl io galia, W	Saulės modul ių skaiči us, vnt.	Boilerio talpa (rezervua ro), l	Optimal us vandens tėkmės greitis v, m/s	Sistem os tūris V _s , m ³	Vande ns debita s m, kg/s	Metin ė viduti nė apšvie ta į SM posvyr io kamp ą – G, kWh/ m ²	Į SM posvyrio kampą ir modulio plotą krintanti energiją, kWh/me tus	Neaušina mų SM el. generacij a E _{SM} , kWh/met us	Aušinam ų SM el. generacij a E _{SM,a} , kWh/me tus	Aušinamų SM el. perskaičiu ota generacija E _{SM,p} , kWh/met us	ESM ir E _{SM,p} generaci jos skirtum as, %	E _{SM} ir E _{SM,p} generacij os skirtuma s, kWh/me tus	Neaušina mų SM elektrinis efektyvu mas η _{e,neaus.} , %	Aušinamo SM elektrinis fundament alus efektyvuma s η _{e,fund.} , %	Efektyvu mo skirtuma s tarp η _e ir η _{e,fund.} , Δη, %	Vandens šildymui panaudoti nas šilumos kiekis Q _{u,p} , kWh/met us	Paruošia mo karšto (12-60°) vandens kiekio atitikmu o, m ³ /metus	E _{SM,p} ir E _{SM} elektro s energij os skirtu mo vertė N _e , EUR/ metus	Nuveda mos šiluminė s energijos vertė N _s , EUR/me tus	Aušinam ų SM bendra nauda N _a , EUR/me tus	E _{SM} energijos vertė, EUR/me tus
0	5	3.4	1	50	0.00346	0.125	0.127	1029	1903	362.097	363.447	354.300	-2.153	-7.797	19.032	19.103	0.373	595.180	10.664	-1.81	69.29	67.475	84.188
	15	3.7			0.00373		0.137	1110	2053	389.489	391.705	381.765	-1.983	-7.724	18.970	19.078	0.569	619.669	11.103	-1.80	72.14	70.343	90.556
	30	3.9			0.00398		0.146	1183	2187	413.436	416.654	406.040	-1.789	-7.396	18.901	19.048	0.778	640.330	11.473	-1.72	74.54	72.825	96.124
	35	4			0.00409		0.150	1193	2206	416.685	420.282	409.418	-1.744	-7.267	18.890	19.053	0.863	643.089	11.522	-1.69	74.87	73.176	96.879
	40	4			0.00405		0.149	1195	2211	417.528	422.081	411.277	-1.495	-6.240	18.886	19.092	1.091	644.983	11.556	-1.45	75.09	73.635	97.075
	45	4			0.00406		0.149	1191	2203	416.144	420.760	409.953	-1.488	-6.191	18.888	19.098	1.109	641.964	11.502	-1.44	74.73	73.295	96.753
	60	3.9			0.00391		0.143	1137	2104	398.595	402.705	392.403	-1.554	-6.192	18.948	19.143	1.031	619.243	11.095	-1.44	72.09	70.650	92.673
	75	3.5			0.00351		0.129	1024	1894	361.320	364.155	355.057	-1.733	-6.263	19.078	19.228	0.785	576.485	10.329	-1.46	67.11	65.656	84.007
	90	2.9			0.00294		0.108	859	1589	305.991	306.712	299.280	-2.193	-6.711	19.258	19.303	0.236	515.006	9.227	-1.56	59.95	58.394	71.143
-45	5	3.4			0.0034		0.125	1015	1878	357.722	358.756	349.754	-2.227	-7.968	19.047	19.102	0.289	581.618	10.421	-1.85	67.71	65.857	83.170
	15	3.6			0.00364		0.134	1074	1987	377.703	379.221	369.502	-2.171	-8.200	19.005	19.082	0.402	584.058	10.465	-1.91	67.99	66.087	87.816
	30	3.8			0.00388		0.142	1124	2079	394.014	396.089	385.681	-2.115	-8.333	18.948	19.048	0.527	582.929	10.444	-1.94	67.86	65.924	91.608
	35	3.9			0.00393		0.144	1130	2090	395.695	397.872	387.342	-2.111	-8.354	18.937	19.041	0.550	579.840	10.389	-1.94	67.50	65.560	91.999
	40	3.9			0.00392		0.144	1129	2089	395.384	397.551	387.071	-2.103	-8.314	18.931	19.035	0.548	575.580	10.313	-1.93	67.01	65.073	91.927
	45	4			0.00401		0.147	1123	2077	393.233	395.634	384.909	-2.117	-8.324	18.931	19.047	0.611	569.922	10.211	-1.94	66.35	64.412	91.427
	60	3.8			0.00383		0.140	1071	1981	375.896	377.696	367.534	-2.225	-8.362	18.975	19.065	0.479	544.318	9.753	-1.94	63.37	61.423	87.396
	75	3.5			0.00353		0.129	971	1797	342.905	342.949	333.766	-2.665	-9.139	19.083	19.085	0.013	505.951	9.065	-2.12	58.90	56.776	79.725
	90	3			0.00304		0.112	830	1535	295.280	293.806	286.111	-3.105	-9.169	19.240	19.144	-0.499	456.226	8.174	-2.13	53.11	50.980	68.653
-90	5	3.3			0.00336		0.123	981	1815	346.044	344.429	335.635	-3.008	-10.409	19.070	18.981	-0.467	560.965	10.051	-2.42	65.30	62.885	80.455
	15	3.3			0.00337		0.124	978	1808	344.844	343.180	334.327	-3.050	-10.517	19.070	18.978	-0.483	538.936	9.656	-2.45	62.74	60.295	80.176
	30	3.4			0.00344		0.126	958	1772	337.706	336.108	327.072	-3.149	-10.634	19.054	18.964	-0.473	512.325	9.179	-2.47	59.64	57.170	78.517
	35	3.4			0.00344		0.126	948	1753	334.010	332.515	323.499	-3.147	-10.511	19.049	18.964	-0.447	505.456	9.056	-2.44	58.84	56.399	77.657
	40	3.4			0.00343		0.126	935	1730	329.560	328.075	319.116	-3.169	-10.444	19.046	18.960	-0.450	496.916	8.903	-2.43	57.85	55.421	76.623
	45	3.4			0.00341		0.125	921	1703	324.362	322.869	313.982	-3.200	-10.381	19.045	18.958	-0.460	488.679	8.756	-2.41	56.89	54.476	75.414
	60	3.3			0.00331		0.121	861	1593	303.781	302.211	293.675	-3.327	-10.106	19.066	18.967	-0.517	465.012	8.332	-2.35	54.13	51.785	70.629
	75	3			0.00306		0.112	779	1441	275.566	273.697	265.962	-3.485	-9.604	19.125	18.995	-0.678	436.421	7.819	-2.23	50.81	48.573	64.069
	90	2.7			0.00269		0.099	672	1242	238.669	235.895	229.266	-3.940	-9.404	19.213	18.990	-1.163	402.420	7.210	-2.19	46.85	44.662	55.491

Azimut as, °	Kamp as, °	Siurblio galia, W	Saulės modulio skaičius, vnt.	Boilerio talpa (rezervuaro), l	Optimalus vandens tėkmės greitis v, m/s	Sistemos tūris V _s , m ³	Vandens debitas m, kg/s	Metinė vidutinė apšvieta į SM posvyrio kampą – G, kWh/m ²	Į SM posvyrio kampą ir modulio plotą krintanti energija, kWh/met us	Neaušina mų SM el. generacija E _{SM} , kWh/met us	Aušina mų SM el. generacija E _{SM,a} , kWh/me tus	Aušina mų SM el. perskaičiuota generacija E _{SM,p} , kWh/met us	ESM ir E _{SM,p} generacijos skirtumas, %	E _{SM} ir E _{SM,p} generacijos skirtumas, kWh/me tus	Neaušina mų SM elektrinis efektyvumas η _{e,neaus.} , %	Aušinamo SM elektrinis fundament alus efektyvumas η _{e,fund.} , %	Efektyvumo skirtumas tarp η _e ir η _{e,fund.} , Δη, %	Vandens šildymui panaudoti nas šilumos kiekis Q _{u,p} , kWh/met us	Paruošiamo karšto (12-60°) vandens kiekio atitikmuo, m ³ /metus	E _{SM,p} ir E _{SM} elektros energijos skirtumo vertė N _e , EUR/ metus	Nuvedamos šiluminės energijos vertė N _s , EUR/me tus	Aušina mų SM bendra nauda N _a , EUR/me tus	E _{SM} energijos vertė, EUR/me tus
0	5	3.6	1	200	0.00360	0.275	0.132	1029	1903	362.097	368.272	358.745	-0.926	-3.352	19.032	19.357	1.705	805.570	14.433	-0.78	93.78	93.002	84.188
	15	3.9			0.00390		0.143	1110	2053	389.489	397.175	386.770	-0.698	-2.720	18.970	19.345	1.973	843.894	15.120	-0.63	98.24	97.610	90.556
	30	4.1			0.00415		0.152	1183	2187	413.436	422.582	411.502	-0.468	-1.934	18.901	19.319	2.212	874.705	15.672	-0.45	101.83	101.380	96.124
	35	4.2			0.00425		0.156	1193	2206	416.685	426.218	414.913	-0.425	-1.772	18.890	19.322	2.288	878.154	15.734	-0.41	102.23	101.819	96.879
	40	4.2			0.00420		0.154	1195	2211	417.528	427.972	416.766	-0.182	-0.762	18.886	19.358	2.502	880.145	15.770	-0.18	102.46	102.285	97.075
	45	4.2			0.00420		0.154	1191	2203	416.144	426.524	415.331	-0.195	-0.813	18.888	19.360	2.494	875.015	15.678	-0.19	101.87	101.676	96.753
	60	4			0.00405		0.149	1137	2104	398.595	407.821	397.139	-0.365	-1.456	18.948	19.386	2.315	837.783	15.011	-0.34	97.53	97.192	92.673
	75	3.6			0.00363		0.133	1024	1894	361.320	368.116	358.699	-0.725	-2.621	19.078	19.437	1.881	768.517	13.769	-0.61	89.47	88.858	84.007
	90	3			0.00304		0.112	859	1589	305.991	309.317	301.627	-1.426	-4.364	19.258	19.467	1.087	670.580	12.015	-1.01	78.07	77.051	71.143
-45	5	3.5			0.00355		0.130	1015	1878	357.722	363.540	354.130	-1.004	-3.591	19.047	19.357	1.626	792.087	14.192	-0.84	92.21	91.376	83.170
	15	3.8			0.00381		0.140	1074	1987	377.703	384.481	374.297	-0.902	-3.406	19.005	19.346	1.794	807.620	14.470	-0.79	94.02	93.228	87.816
	30	4			0.00403		0.148	1124	2079	394.014	401.681	390.858	-0.801	-3.157	18.948	19.317	1.946	816.773	14.634	-0.73	95.09	94.351	91.608
	35	4			0.00406		0.149	1130	2090	395.695	403.456	392.565	-0.791	-3.131	18.937	19.308	1.961	814.749	14.598	-0.73	94.85	94.121	91.999
	40	4.1			0.00410		0.150	1129	2089	395.384	403.241	392.267	-0.788	-3.118	18.931	19.307	1.987	810.146	14.515	-0.72	94.31	93.589	91.927
	45	4			0.00409		0.150	1123	2077	393.233	400.962	390.011	-0.819	-3.222	18.931	19.303	1.966	802.932	14.386	-0.75	93.47	92.724	91.427
	60	3.9			0.00395		0.145	1071	1981	375.896	382.587	372.096	-1.011	-3.800	18.975	19.312	1.780	765.700	13.719	-0.88	89.14	88.256	87.396
	75	3.6			0.00364		0.134	971	1797	342.905	346.902	337.424	-1.598	-5.481	19.083	19.305	1.166	704.515	12.623	-1.27	82.02	80.742	79.725
	90	3.1			0.00313		0.115	830	1535	295.280	296.572	288.643	-2.248	-6.637	19.240	19.324	0.438	624.423	11.188	-1.54	72.69	71.149	68.653
-90	5	3.4			0.00344		0.126	981	1815	346.044	348.779	339.767	-1.814	-6.277	19.070	19.221	0.790	764.519	13.698	-1.46	89.00	87.542	80.455
	15	3.5			0.00349		0.128	978	1808	344.844	347.646	338.469	-1.849	-6.375	19.070	19.225	0.813	746.241	13.370	-1.48	86.87	85.392	80.176
	30	3.5			0.00354		0.130	958	1772	337.706	340.435	331.127	-1.948	-6.579	19.054	19.208	0.808	718.905	12.881	-1.53	83.69	82.162	78.517
	35	3.5			0.00354		0.130	948	1753	334.010	336.761	327.474	-1.957	-6.536	19.049	19.206	0.824	710.216	12.725	-1.52	82.68	81.161	77.657
	40	3.5			0.00354		0.130	935	1730	329.560	332.279	323.023	-1.984	-6.537	19.046	19.203	0.825	699.704	12.537	-1.52	81.46	79.937	76.623
	45	3.5			0.00354		0.130	921	1703	324.362	327.003	317.768	-2.033	-6.594	19.045	19.201	0.814	688.892	12.343	-1.53	80.20	78.664	75.414
	60	3.4			0.00340		0.125	861	1593	303.781	305.801	297.025	-2.224	-6.756	19.066	19.193	0.665	653.337	11.706	-1.69	73.02	71.327	70.629
	75	3.1			0.00315		0.116	779	1441	275.566	276.677	268.708	-2.489	-6.858	19.125	19.202	0.403	607.672	10.888	-1.59	70.74	69.148	64.069
	90	2.7			0.00277		0.102	672	1242	238.669	238.077	231.246	-3.110	-7.424	19.213	19.165	-0.248	550.750	9.868	-1.73	64.12	62.390	55.491

Azimutas, °	Kampas, °	Siurblio galia, W	Saulės modulių skaičius, vnt.	Boilerio talpa (rezervuaris), l	Optimalus vandens tėkmės greitis v, m/s	Sistemos tūris V _s , m ³	Vandens debitas m, kg/s	Metinė vidutinė apšvieta į SM posvyrio kampą – G, kWh/m ²	Į SM posvyrio kampą ir modulio plotą krintanti energija, kWh/metus	Neašinamų SM el. generacija E _{SM} , kWh/metus	Aušinamų SM el. generacija E _{SM,a} , kWh/metus	Aušinamų SM el. perskaičiuota generacija E _{SM,p} , kWh/metus	ESM ir E _{SM,p} generacijos skirtumas, %	E _{SM} ir E _{SM,p} generacijos skirtumas, kWh/metus	Neašinamų SM elektrinis efektyvumas η _{e,neaus.} , %	Aušinamo SM elektrinis fundamentalus efektyvumas η _{e,fund.} , %	Efektyvumo skirtumas tarp η _e ir η _{e,fund.} , Δη, %	Vandens šildymui panaudotas šilumos kiekis Q _{u,p} , kWh/metus	Paruošiamo karšto (12-60°) vandens kiekio atitikmuo, m ³ /metus	E _{SM,p} ir E _{SM} elektros energijos skirtumo vertė N _e , EUR/metus	Nuvedamos šiluminės energijos vertė N _s , EUR/metus	Aušinamų SM bendra nauda N _a , EUR/metus	E _{SM} energijos vertė, EUR/metus
0	5	3.7	1	800	0.00374	0.875	0.137	1029	1903	362.097	371.822	361.917	-0.050	-0.180	19.032	19.544	2.686	996.074	17.847	-0.04	115.96	115.917	84.188
	15	4			0.00405		0.149	1110	2053	389.489	401.115	390.300	0.208	0.811	18.970	19.537	2.985	1046.555	18.751	0.19	121.84	122.024	90.556
	30	4.3			0.00430		0.158	1183	2187	413.436	426.790	415.300	0.451	1.864	18.901	19.512	3.230	1086.249	19.462	0.43	126.46	126.890	96.124
	35	4.4			0.00438		0.162	1193	2206	416.685	430.361	418.683	0.483	2.015	18.890	19.510	3.286	1089.863	19.527	0.50	121.78	122.286	96.879
	40	4.3			0.00437		0.160	1195	2211	417.516	432.168	420.486	0.711	2.970	18.885	19.548	3.510	1091.620	19.559	0.69	127.08	127.772	97.072
	45	4.4			0.00443		0.162	1191	2203	416.144	430.789	418.974	0.680	2.830	18.888	19.553	3.519	1084.493	19.431	0.66	126.25	126.910	96.753
	60	4.2			0.00420		0.154	1137	2104	398.595	411.352	400.265	0.419	1.671	18.948	19.554	3.200	1033.026	18.509	0.39	120.26	120.649	92.673
	75	3.7			0.00378		0.139	1024	1894	361.320	370.847	361.034	-0.079	-0.286	19.078	19.581	2.637	938.609	16.817	-0.07	109.27	109.202	84.007
	90	3.1			0.00311		0.114	859	1589	305.991	310.948	303.051	-0.961	-2.940	19.258	19.570	1.620	806.497	14.450	-0.68	93.89	93.205	71.143
-45	5	3.7			0.00370		0.136	1015	1878	357.722	367.064	357.250	-0.132	-0.472	19.047	19.544	2.611	984.857	17.646	-0.11	114.65	114.543	83.170
	15	3.9			0.00393		0.144	1074	1987	377.703	388.183	377.670	-0.009	-0.033	19.005	19.533	2.775	1015.877	18.201	-0.01	118.26	118.256	87.816
	30	4.2			0.00420		0.154	1124	2079	394.014	405.700	394.411	0.101	0.396	18.948	19.510	2.966	1038.894	18.614	0.09	120.94	121.036	91.608
	35	4.2			0.00422		0.155	1130	2090	395.695	407.456	396.126	0.109	0.430	18.937	19.500	2.972	1038.766	18.612	0.10	120.93	121.029	91.999
	40	4.2			0.00424		0.156	1129	2089	395.384	407.143	395.784	0.101	0.400	18.931	19.494	2.974	1034.594	18.537	0.09	120.44	120.536	91.927
	45	4.2			0.00425		0.156	1123	2077	393.233	404.852	393.463	0.058	0.229	18.931	19.491	2.955	1026.823	18.398	0.05	119.54	119.592	91.427
	60	4.1			0.00413		0.151	1071	1981	375.896	386.127	375.149	-0.199	-0.747	18.975	19.491	2.722	980.402	17.566	-0.17	114.13	113.960	87.396
	75	3.7			0.00376		0.138	971	1797	342.905	349.557	339.759	-0.917	-3.146	19.083	19.453	1.940	897.338	16.078	-0.73	104.46	103.733	79.725
	90	3.2			0.00323		0.118	830	1535	295.280	298.405	290.218	-1.714	-5.062	19.240	19.443	1.059	787.590	14.111	-1.18	91.69	90.511	68.653
-90	5	3.5			0.00358		0.131	981	1815	346.044	352.094	342.709	-0.964	-3.335	19.070	19.403	1.748	952.177	17.060	-0.78	110.85	110.073	80.455
	15	3.6			0.00361		0.132	978	1808	344.844	350.866	341.366	-1.009	-3.478	19.070	19.403	1.746	942.817	16.892	-0.81	109.76	108.950	80.176
	30	3.6			0.00368		0.135	958	1772	337.706	343.600	333.916	-1.122	-3.790	19.054	19.387	1.745	921.406	16.509	-0.88	107.27	106.385	78.517
	35	3.6			0.00366		0.134	948	1753	334.010	339.821	330.211	-1.137	-3.799	19.049	19.381	1.740	912.289	16.345	-0.88	106.20	105.321	77.657
	40	3.6			0.00366		0.135	935	1730	329.560	335.244	325.667	-1.181	-3.893	19.046	19.374	1.725	901.276	16.148	-0.91	104.92	104.017	76.623
	45	3.6			0.00365		0.134	921	1703	324.362	329.852	320.323	-1.245	-4.040	19.045	19.368	1.692	889.139	15.931	-0.94	103.51	102.570	75.414
	60	3.5			0.00352		0.129	861	1593	303.781	308.318	299.226	-1.500	-4.555	19.066	19.351	1.493	844.044	15.123	-1.06	98.26	97.201	70.629
	75	3.2			0.00327		0.120	779	1441	275.566	278.736	270.458	-1.854	-5.108	19.125	19.345	1.150	781.678	14.005	-1.19	91.00	89.812	64.069
	90	2.8			0.00287		0.105	672	1242	238.669	239.594	232.512	-2.580	-6.158	19.213	19.287	0.387	701.083	12.561	-1.43	81.62	80.185	55.491

Kontrolinis neaušinamas SM, azimutas – 0°, posvyrio kampas – 15°														
Data – 2023-09-07	SM testerio duomenys				Davikliai			Piranometras		„PVsyst“ modeliavimas				
Valanda	E _{SM} /P _{mgt} , Wh/W	U _{mgt} , V	I _{mgt} , A	U ₀ , V	T _c °C	T _b , °C	T _a , °C	G, W/m²	η _e , %	G, W/m²	T _a , °C	E _{SM} /P _{mgt} , Wh/W	η _e , %	T _c °C
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	49.35	35.29	1.4	39.67	13.1	-	10.4	164	16.3	234.35	15.7	84.99	19.6	22.2
9	114.5	34.49	3.32	40.28	15.6	-	12.9	339	18.3	426.19	18.2	151.46	19.2	31.1
10	114	33.36	3.42	39.53	21.8	-	15.6	348	17.7	573.27	18.8	198.01	18.7	39.1
11	216.2	32.67	6.62	39.5	32.1	-	20.4	625	18.7	752.49	19.5	252.09	18.1	46.4
12	254.3	32.86	7.74	39.12	36.7	-	23.5	730	18.8	821.73	20.6	271.09	17.8	49.7
13	271.7	32.35	8.4	38.95	38.5	-	24.8	781	18.8	821.22	20.9	269.59	17.7	50.8
14	267.8	32.16	8.33	38.65	41.2	-	25.5	768	18.9	779.83	21.6	257.56	17.9	49.6
15	249.5	32.24	7.74	38.58	43.6	-	24.9	718	18.8	669.26	21.5	224.54	18.1	46.1
16	213.6	32.28	6.62	38.98	37.6	-	24	625	18.5	501.62	21.3	172.51	18.6	39.8
17	167	32.57	5.13	38.98	35.9	-	23.5	508	17.8	315.2	20.4	110.58	19.0	32.7
18	88.35	32.97	2.68	38.62	31.3	-	23.1	284	16.8	135.13	16.0	47.45	19.0	25.3
19	28.95	32.53	0.89	37.5	22.8	-	22.8	112	14.0	25.534	14.2	8.36	17.7	16.9
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Kontrolinis neaušinamas SM, azimutas – 0°, posvyrio kampas – 30°														
Data – 2023-08-06	SM testerio duomenys				Davikliai			Piranometras		„PVsyst“ modeliavimas				
Valanda	ESM/P _{mgt} , Wh/W	U _{mgt} , V	I _{mgt} , A	U ₀ , V	T _c °C	T _b , °C	T _a , °C	G, W/m²	η _e , %	G, W/m²	T _a , °C	ESM/P _{mgt} , Wh/W	η _e , %	T _c °C
0	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-
1	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-
8	57.7	33.96	1.7	40.37	26.2	-	17.1	174	18.0	297.78	25.8	103.550	18.8	44.528
9	129.1	33.89	3.9	40.31	26.8	-	19.6	384	18.2	511.4	27.7	172.436	18.2	53.433
10	176.8	31.93	5.5	39.18	37.3	-	24.6	545	17.5	697.29	29.6	226.507	17.6	60.631
11	221.2	31.13	7.1	37.89	49.2	-	31.4	699	17.1	835.16	30.5	262.093	17.0	64.76
12	258.9	30.98	8.4	37.53	52.7	-	34.1	822	17.0	918.34	31.2	282.121	16.6	64.925
13	272.0	30.91	8.8	36.94	58.1	-	36.1	866	17.0	903.86	32.2	277.536	16.6	64.173
14	264.2	30.62	8.6	36.91	58.4	-	36.2	849	16.8	857.57	32.3	264.514	16.7	60.685
15	245.1	30.32	8.1	37.10	56.7	-	36.0	796	16.7	763.9	31.6	239.879	17.0	53.952
16	221.2	30.74	7.2	37.25	55.2	-	35.4	708	16.9	605.2	30.9	196.071	17.5	44.319
17	182.5	31.33	5.8	38.10	47.3	-	35.2	573	17.2	365.88	30.6	122.714	18.1	37.187
18	120.5	31.63	3.8	38.51	43.5	-	34.5	375	17.4	179.84	29.7	60.800	18.3	32.701
19	63.5	32.90	1.9	39.42	35.0	-	32.0	208	16.5	81.596	28.8	27.093	18.0	29.497
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Kontrolinis aušinamas SM, azimutas – 0°, posvyrio kampas – 15°																			
Data – 2023-09-07	SM testerio duomenys				Davikliai			Piranometras	Vandens siurblys				Skaičiavimai						
Valanda	$E_{SM}/P_{mgt}, Wh/W$	U_{mgt}, V	I_{mgt}, A	U_0, V	$T_c, ^\circ C$	$T_b, ^\circ C$	$T_a, ^\circ C$	$G, W/m^2$	I_{siur}, A	U_{siurb}, V	P_{siurb}, W	$\dot{m}, kg/s$	$E_{SM,P}, Wh$	Vandens šildymui panaudotinas šilumos kiekis $\dot{Q}_{u,p}, Wh$	$\eta_{e, fund}, \%$	Tarp kontrolinio aušinamo ir neaušinamo SM $\Delta\eta, \%$	N_e, EUR	N_s, EUR	N_b, EUR
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	51.4	35.61	1.44	41.84	12.5	12.2	10.4	164	0.38	23.9	9	0.172	42.4	29.1	16.9	2.2	-0.002	0.003	0.002
9	114.6	35.24	3.25	41.51	15.6	13.5	12.9	339	0.38	23.9	9	0.172	105.6	189.0	18.3	3.5	-0.002	0.022	0.020
10	119.9	34.74	3.45	41.25	19.8	15.0	15.6	348	0.38	23.9	9	0.171	110.9	218.0	18.6	4.9	-0.001	0.025	0.025
11	228.4	34.59	6.60	40.78	21.0	17.0	20.4	625	0.38	23.9	9	0.171	219.4	291.4	19.8	5.0	0.001	0.034	0.035
12	267.1	34.34	7.78	40.16	23.1	20.3	23.5	730	0.38	24	9	0.17	258.1	483.3	19.8	4.1	0.001	0.056	0.057
13	283.2	33.45	8.47	39.61	30.5	23.9	24.8	781	0.38	24	9.1	0.17	274.1	524.7	19.6	3.5	0.001	0.061	0.062
14	273.4	32.96	8.29	39.08	34.5	27.1	25.5	768	0.38	24.1	9.2	0.17	264.2	455.7	19.2	1.8	-0.001	0.053	0.052
15	249.7	32.36	7.72	38.77	39.5	29.9	24.9	718	0.38	24.1	9.2	0.171	240.5	414.2	18.8	0.0	-0.002	0.048	0.046
16	209.7	32.45	6.46	38.80	38.8	32.3	24	625	0.38	24.1	9.2	0.171	200.5	345.2	18.1	-1.7	-0.003	0.040	0.037
17	160.7	32.60	4.93	38.94	37.5	32.1	23.5	508	0.38	24	9.1	0.171	151.6	-27.6	17.1	-3.2	-0.004	-0.003	-0.007
18	79.6	32.69	2.43	39.03	36.8	31.5	23.1	284	0.38	24	9.1	0.17	70.5	-82.8	15.2	-4.3	-0.004	-0.010	-0.014
19	25.1	32.89	0.76	39.21	35.2	30.4	22.8	112	0.38	24	9.1	0.171	16.0	-165.7	12.1	-5.6	-0.003	-0.019	-0.022
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Modeliuojamas aušinamas SM, azimutas – 0°, posvyrio kampas – 15°													
Data – 2023-09-07	Modeliavimas												
Valanda	ESM/P _{mgt} , Wh/W	T _G , °C	T _b , °C	T _a , °C	G, W/m²	P _{siurb} , W	m, kg/s	ESM,P, Wh	Vandens šildymui panaudotinas šilumos kiekis Q _{u,p} , Wh	η _{e, fund} , %	N _e , EUR	N _s , EUR	N _b , EUR
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	86.8	16.6	13.0	15.7	234	4.7	0.172	82.1	144.7	20.0	-0.001	0.017	0.016
9	156.8	21.8	15.8	18.2	426	4.7	0.172	152.1	402.7	19.9	0.000	0.047	0.047
10	207.7	26.2	19.5	18.8	573	4.7	0.172	203.0	536.2	19.6	0.001	0.062	0.064
11	264.7	33.2	23.8	19.5	752	4.7	0.172	260.0	631.3	19.0	0.002	0.073	0.075
12	282.2	38.9	28.0	20.6	822	4.7	0.172	277.5	613.9	18.6	0.001	0.071	0.073
13	279.0	41.6	31.9	20.9	821	4.7	0.172	274.3	561.2	18.4	0.001	0.065	0.066
14	262.2	44.8	34.9	21.6	780	4.7	0.172	257.5	443.1	18.2	0.000	0.052	0.052
15	224.6	46.0	36.6	21.5	669	4.7	0.172	219.9	243.7	18.1	-0.001	0.028	0.027
16	169.6	44.2	36.3	21.3	502	4.7	0.172	164.9	-38.2	18.3	-0.002	-0.004	-0.006
17	107.1	41.1	34.3	20.4	315	4.7	0.172	102.4	-303.6	18.4	-0.002	-0.035	-0.037
18	45.4	36.5	31.1	16.0	135	4.7	0.172	40.7	-453.0	18.2	-0.002	-0.053	-0.054
19	7.9	31.6	28.2	14.2	26	4.7	0.172	3.2	-429.0	16.7	-0.001	-0.050	-0.051
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Kontrolinis aušinamas SM, azimutas – 0°, posvyrio kampas – 30°																			
Data – 2023-08-06	SM testerio duomenys				Davikliai			Piranometras	H2O siurblys				Suskaičiuota						
Valanda	$E_{SM}/P_{mgt}, Wh/W$	U_{mgt}, V	I_{mgt}, A	U_0, V	$T_c, ^\circ C$	$T_b, ^\circ C$	$T_a, ^\circ C$	$G, W/m^2$	I_{siur}, A	U_{siurb}, V	P_{siurb}, W	$\dot{m}, kg/s$	$E_{SM,P}, Wh$	Vandens šildymui panaudotinas šilumos kiekis $\dot{Q}_{u,p}, Wh$	$\eta_e, fund, \%$	Tarp kontrolinio aušinamo ir neaušinamo SM $\Delta\eta, \%$	N_e, EUR	N_s, EUR	N_b, EUR
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	58.4	34.69	1.68	41.01	20.2	17.0	17.1	174	0.42	24.1	10.1	0.194	48.3	72.7	18.2	18.2	-0.002	0.008	0.006
9	132.0	34.18	3.86	40.56	24.4	19.3	19.6	384	0.42	24.1	10.1	0.194	121.9	334.3	18.6	18.6	-0.002	0.039	0.037
10	184.2	33.62	5.48	40.06	29.1	23.5	24.6	545	0.42	24.1	10.1	0.194	174.1	610.5	18.3	18.3	-0.001	0.071	0.070
11	234.8	33.37	7.04	39.84	31.1	28.9	31.4	699	0.42	24.2	10.1	0.193	224.7	784.9	18.2	18.2	0.001	0.091	0.092
12	275.0	33.24	8.27	39.72	32.2	34.7	34.1	822	0.42	24.2	10.2	0.193	264.8	843.0	18.1	18.1	0.001	0.098	0.100
13	283.2	32.51	8.71	39.07	38.3	40.6	36.1	866	0.42	24.2	10.2	0.192	273.0	857.5	17.7	17.7	0.000	0.100	0.100
14	272.3	31.88	8.54	38.51	43.5	46.2	36.2	849	0.42	24.2	10.1	0.192	262.2	813.9	17.3	17.3	0.000	0.095	0.094
15	251.5	30.80	8.17	37.54	52.5	51.0	36.0	796	0.42	24.1	10.2	0.193	241.3	697.7	17.1	17.1	-0.001	0.081	0.080
16	222.1	30.56	7.27	37.33	54.5	53.5	35.4	708	0.43	24.2	10.3	0.192	211.8	363.4	17.0	17.0	-0.002	0.042	0.040
17	179.3	30.47	5.88	37.25	55.2	53.6	35.2	573	0.42	24.1	10.2	0.192	169.1	14.5	16.9	16.9	-0.003	0.002	-0.001
18	116.7	30.34	3.85	37.14	56.3	53.5	34.5	375	0.42	24.1	10.2	0.193	106.5	-14.5	16.8	16.8	-0.003	-0.002	-0.005
19	58.6	30.56	1.92	37.33	54.5	53.0	32.0	208	0.42	24.1	10.2	0.193	48.4	-72.7	15.2	15.2	-0.004	-0.008	-0.012
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Modeliuojamas aušinamas SM, azimutas – 0°, posvyrio kampas – 30°													
Data – 2023-08-06	Modeliavimas												
Valanda	$E_{SM}/P_{mgt}, Wh/W$	$T_c, ^\circ C$	$T_b, ^\circ C$	$T_a, ^\circ C$	$G, W/m^2$	P_{siurb}, W	$\dot{m}, kg/s$	$E_{SM,P}, Wh$	Vandens šildymui panaudotinas šilumos kiekis $\dot{Q}_{u,p}, Wh$	$\eta_e, fund, \%$	N_e, EUR	N_s, EUR	N_b, EUR
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	115.0	21.7	15.8	25.8	298	5.2	0.194	109.8	265.0	20.9	0.001	0.031	0.032
9	187.4	27.5	20.6	27.7	511	5.2	0.194	182.2	699.4	19.8	0.002	0.081	0.084
10	248.8	34.7	26.3	29.6	697	5.2	0.194	243.6	817.3	19.3	0.004	0.095	0.099
11	287.9	40.3	32.3	30.5	835	5.2	0.194	282.7	879.5	18.6	0.005	0.102	0.107
12	308.4	46.2	37.9	31.2	918	5.2	0.194	303.2	813.7	18.2	0.005	0.095	0.100
13	297.3	49.9	43.0	32.2	904	5.2	0.194	292.1	738.2	17.8	0.003	0.086	0.089
14	278.9	53.7	47.3	32.3	858	5.2	0.194	273.7	622.5	17.6	0.002	0.072	0.075
15	246.3	55.1	50.1	31.6	764	5.2	0.194	241.1	408.6	17.4	0.000	0.048	0.048
16	195.2	54.8	51.1	30.9	605	5.2	0.194	190.0	149.2	17.4	-0.001	0.017	0.016
17	117.8	53.4	50.7	30.6	366	5.2	0.194	112.6	-57.5	17.4	-0.002	-0.007	-0.009
18	57.0	51.8	49.7	29.7	180	5.2	0.194	51.8	-149.9	17.1	-0.002	-0.017	-0.020
19	25.1	49.9	48.6	28.8	82	5.2	0.194	19.9	-161.3	16.7	-0.002	-0.019	-0.020
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-