

SAULĖS ELEKTRINIŲ PARKO ENERGINIO EFEKTYVUMO TYRIMAI

Naglis KAČINAS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas: naglis.kacinas@gmail.com

Kęstutis VENSLAUSKAS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas: kestutis.venslauskas@vdu.lt

Santrauka

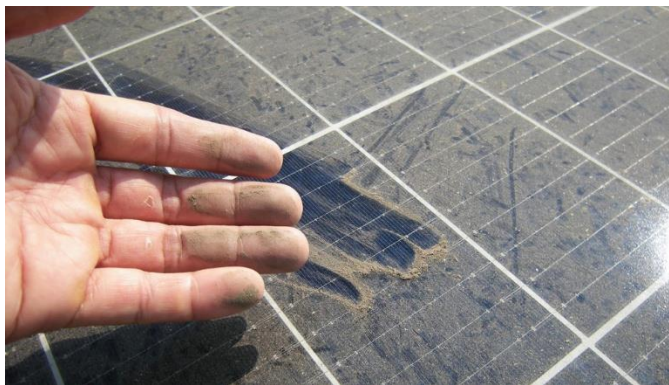
Šiame tyrime nagrinėjamas techninės priežiūros poveikis saulės elektrinių parko energijos vartojimo efektyvumui, daugiausia dėmesio skiriant parko naudingumo koeficiento vertinimui. Tyrime analizuojamas dulkių kaupimosi ir saulės elektrinės paviršiaus neigiamas poveikis saulės jėgainių parko efektyvumui. Tyrimas atliktas taikant eksperimentinį metodą, pagal kurį dvejus metus buvo renkami eksploataciniai duomenys. Vertinimas atliktas standartinėmis techninės priežiūros sąlygomis, palyginant su įgyvendintomis sustiprintos techninės priežiūros programos priemonėmis. Remiantis surinktais duomenimis, buvo apskaičiuotas naudingumo koeficientas ir atlikta statistinė analizė, kuri patvirtino, kad pagerinta saulės parko priežiūra turėjo teigiamą poveikį sistemos efektyvumui. Rezultatai parodė, kad parko naudingumo koeficientas padidėjo nuo 13,8 proc. iki 15,9 proc., todėl tai leido per metus papildomai pagaminti 1,5 GWh elektros energijos. Analizė patvirtino, kad saulės modulių plovimas ir įrangos priežiūra sumažina našumo nuostolius, pagerina sistemos veikimo laiką ir padidina energijos gamybos kiekį.

Reikšminiai žodžiai: saulės parkas, saulės elektrinė, naudingumo koeficientas, energijos gamyba.

Įvadas

Didelės galios fotovoltinės saulės elektrinės tapo pasauliniu atsinaujinančiosios energijos augimo pagrindu. Europoje pastaraisiais metais sparčiai augo saulės energijos pajėgumai. Nuo 2017 m. iki 2024 m. Pietryčių ir Rytų Europos šalys daugiau nei dešimt kartų padidino savo saulės elektrinių instaliuotos galios pajėgumus, tuo pademonstruodamos regiono įsipareigojimą naudoti švarią ir atsinaujinančią energiją. Esant tokiam augimui, siekiant patenkinti energijos paklausą ir įgyvendinti klimato kaitos tikslus, labai svarbu užtikrinti, kad šie saulės energijos parkai veiktų didžiausiu efektyvumu (European Commission, 2025).

Pagrindinis saulės energijos gamybos sistemos rodiklis yra jos naudingumo koeficientas, kuris apibrėžiamas kaip faktiškai išgaunamos energijos ir didžiausios galimos išgauti energijos per tam tikrą laikotarpį santykis (PVCASE team, 2024). Didesnis naudingumo koeficientas rodo, kad saulės šviesa efektyviau paverčiama elektros energija. Norint pateisinti dideles investicijas į fotovoltinę infrastruktūrą ir maksimaliai padidinti energijos gamybą iš kiekvieno įrengto galios vieneto, būtina pasiekti aukštą naudingumo koeficientą (PVCASE team, 2024). Tačiau saulės elektrinių parko naudingumo koeficientą lemia ne tik saulės šviesa ir technologija, bet ir eksploataciniai veiksniai. Saulės elektrinių veikimo laikas gali sumažėti dėl įrangos gedimų arba techninės priežiūros prastovų, o tai tiesiogiai mažina jos naudingumo koeficientą. Aplinkos veiksniai, tokie kaip dulkės, purvas ir šiukšlių kaupimasis (užsiteršimas) ant saulės modulių paviršių, palaipsniui mažina saulės modulių efektyvumą. Kad taip neatsitiktų, reikia atlikti saulės elektrinių priežiūros darbus (NREL, 2023). Laikui bėgant net plonas dulkių sluoksnis gali gerokai sumažinti saulės energijos absorbciją. Tyrimai rodo, kad įprastomis sąlygomis susikaupusios dulkės gali sumažinti fotovoltinių modulių efektyvumą 15–25 proc. (BEARWORX, 2024). Ekstremaliais atvejais (pavyzdžiui, dykumos aplinkoje arba ilgai nesirūpinant) nuostoliai gali siekti 40 proc. ir daugiau, todėl būtina reguliariai atlikti fotomodulių plokščių ir aptarnavimo įrangos priežiūrą. 1 pav. pateiktas pavyzdys, koku dulkių sluoksniu gali būti padengtas saulės fotomodulis.



1 pav. Saulės parke esantis fotovoltinis modulis, ant kurio paviršiaus susikaupęs didelis dulkių kiekis (UBSolar).
Fig.1. A photovoltaic module in a solar park with a large amount of dust on its surface (UBSolar).

Toks užsiteršimas yra vienas svarbiausių veiksnių, mažinančių fotovoltinės sistemos našumą, todėl, jeigu parkas nėra prižiūrimas, per metus prarandama vidutiniškai 3–5 proc. energijos nuo maksimaliai galimos gauti energijos

(BEARWORX, 2024). Norint išlaikyti aukštą efektyvumą, būtina reguliariai valyti saulės paneles atliekant techninę priežiūrą. Reguliari techninė priežiūra apima ne tik modulių valymą, bet ir elektros komponentų, sekimo sistemų bei kitos infrastruktūros patikrą ir remontą. Tokia praktika užtikrina, kad sistema veiktų su minimaliais trikdžiais ir optimaliai efektyviai. Galima teigti, kad techninė priežiūra yra esminis saulės elektrinių efektyvumo veiksnys, kuris gali užkirsti kelią ilgesnėms prastovoms ir mažinti naudingumo nuostolius. Techninė priežiūra daro tiesioginę įtaką saulės elektrinių naudingumo koeficientui ir bendram pagamintos energijos kiekiui (NREL, 2023).

Tyrimo tikslas – ištirti techninės priežiūros įtaką saulės parko energiniam efektyvumui.

Iškeltam tikslui pasiekti sprendžiami šie **uždaviniai**:

1. Išanalizuoti mokslinę literatūrą ir apžvelgti naujausius tyrimus, susijusius su saulės elektrinių energijos gamybos efektyvumu.
2. Atlikti eksperimentinį tyrimą, siekiant nustatyti energijos gamybos kiekio priklausomybę nuo atliekamų priežiūros darbų.
3. Nustatyti modulių paviršiaus užterštumo įtaką pagamintos elektros energijos kiekiui.

Tyrimų objektas ir metodika

Atliktas lyginamojo atvejo tyrimas 50 MW instaliuotos galios saulės energijos parke. Tyrimas atliktas pagal planą, kai saulės elektrinė nuo paleidimo iš pradžių stebėta standartinėmis techninės priežiūros sąlygomis, o vėliau buvo sudaryta sutartis reguliariai saulės elektrinės priežiūrai. Siekiant užtikrinti mokslinį tikslumą, tiek prieš, tiek po laikotarpio buvo analizuojamas tas pats sezoninis laikotarpis. Toks metų trukmės duomenų rinkimas abiejose techninės priežiūros intervencijos pusėse padeda išlyginti trumpalaikius orų svyravimus ir suteikia teisingą palyginimo pagrindą. Siekiant užtikrinti atkuriamumą ir skaidrumą, visi metodai ir matavimai buvo suderinti su nustatytais fotovoltinių įrenginių eksploatacinių savybių analizės pramonės standartais.

Saulės parko veiklos duomenys buvo renkami naudojant SCADA stebėjimo sistemą, energijos skaitiklius ir įtampos keitiklių rodmenis. Pagrindinius duomenis sudarė valandinis energijos kiekis, saulės energinė apšvieta ir visi užregistruoti parko prastovos atvejai. Pirmais metais buvo atliekama tik reguliari pagrindinė techninė priežiūra (pavyzdžiui, prireikus buvo atliekami korekciniai remonto darbai), buvo laikomasi įprastinio veiklos scenarijaus. Antrais metais buvo įdiegta sustiprintos techninės priežiūros programa. Šią programą sudarė modulių valymas (2 kartus per metus valant po didelio dulkių ar žiedadulkių kiekio), įprastiniai įtampos keitiklių ir laidų patikrinimai, žolės pjovimas, prevencinis senstančių komponentų keitimas ir greitesnis reagavimas į atsiradusius gedimus. Buvo vedamas visos techninės priežiūros veiklos žurnalas, kad atliktus darbus būtų galima susieti su eksploataciniais duomenimis.

Kiekvieno laikotarpio saulės elektrinės naudingumo koeficientas (η) buvo apskaičiuotas pagal lygtį:

$$\eta = (E_{\text{fakt}} / E_{\text{max}}) \cdot 100 \%, \quad (1)$$

čia: η – naudingumo koeficientas, %; E_{fakt} – faktinis energijos gamybos kiekis per tiriamą laikotarpį, kWh; E_{max} – didžiausias galimas elektros energijos kiekis per tą patį laikotarpį, kWh.

Metinę didžiausią galimą elektros energijos kiekį, atsižvelgiant į instaliuotą galią, saulės spinduliuotę ir naudingumo koeficientą galima apskaičiuoti pagal lygtį:

$$E_{\text{max}} = A \cdot r \cdot H \cdot PR, \quad (2)$$

čia: A – bendras saulės modulių plotas, m^2 ; r – saulės modulių efektyvumas; H – metinis vidutinis saulės energijos kiekis, $\text{kWh}/(\text{m}^2/\text{metus})$; PR – našumo koeficientas, $PR = 0,7$.

Kiekvienais metais visa faktiškai pagaminta elektros energija buvo padalinta iš teorinio ir taip gautas metinis naudingumo koeficientas. Siekiant ištirti sezoninius dėsningumus, taip pat buvo apskaičiuoti mėnesio naudingumo koeficientai. Atskirdami techninės priežiūros poveikį nuo saulės šviesos svyravimų, rezultatai buvo patikrinti su apšvietos duomenimis. Buvo apskaičiuotas naudingumo santykis (faktinė galia ir tikėtina galia pagal apšvietą), tai parodo, kad reikšmingas naudingumo padidėjimas iš tiesų būtų susijęs su technine priežiūra, o ne dėl didesnės apšvietos skirtingais metais. Duomenys buvo apdorojami ir analizuojami naudojant „Python“ skaitmeniniams skaičiavimams ir „Pandas“ duomenų tvarkymo įrankius, taip užtikrinant skaičiavimų atkartojamumą. Lygiagrečiai buvo naudojama „Microsoft Excel“ programa.

Naudotas statistinis dviejų imčių t-testas mėnesiniams energinio efektyvumo rodikliams prieš ir po techninės priežiūros.

Po vienerių metų, kuriais buvo vykdoma tik standartinė techninė priežiūra, saulės elektrinės parko metinis naudingumo koeficientas buvo 13,8 proc. Šis bazinis naudingumo koeficientas atitinka numatytą fiksuoto posvyrio fotovoltinės sistemos vidutinio klimato zonoje diapazoną. Tikėtina, kad šį vidutinį efektyvumą lėmė keli veiksniai. Užterštumo laikotarpiai (dulkių ir žiedadulkių kaupimasis sausaisiais mėnesiais) ir nedidelės įrangos prastovos. Jėgainės našumas pastebimai sumažėjo vėlyvą pavasarį ir vasarą, o tai sutapo su retais lietumis ir dideliu dulkių kaupimusi ant saulės modulių (kaip rodo aukšti užterštumo indekso rodmenys stebėjimo duomenyse). Iš techninės priežiūros žurnalų ir SCADA duomenų taip pat matyti, kad dėl inverterio gedimų ir kitų problemų kelias dienas buvo prastovos, o tai dar

labiau sumažino naudingumo koeficientą. Šie pastebėjimai atitinka žinomą įtaką saulės elektrinių našumui, pavyzdžiui, dėl numatomų prastovų ir užterštumo tiesiogiai sumažėja generuojama galia, taigi, ir naudingumo koeficientas.

Antraisiais tyrimo metais, kai buvo įtraukta sustiprintos techninės priežiūros programa, dėl priežiūros buvo gauti geresni veiklos rezultatai, kurie buvo pastebimi. Naudingumo koeficientas padidėjo iki 15,9 proc., o tai parodo didesnę panaudotų gamybos pajėgumų dalį. 1 lentelėje apibendrinti mėnesiniai naudingumo koeficientai prieš techninės priežiūros įvedimą į saulės parką ir po įvedimo. Įgaliojus reguliarių valymą ir aktyvų remontą, kiekvieną mėnesį pastebima didėjimo tendencija. Pastebėtina, kad vasaros mėnesiais (birželis–rugpjūtis) koeficientas padidėjo daugiausiai. Liepos mėnesį naudingumo koeficientas padidėjo nuo 22 proc. iki 25 proc. įvedus techninę priežiūrą – 3 procentiniais punktais, o tai atitinka maždaug 13–15 proc. didesnę mėnesio energijos gamybą. Žiemos mėnesiais, kurių naudingumo koeficientas ir taip buvo žemas dėl ribotos saulės energinės apšvietos, padidėjimas buvo mažesnis – tik apie 1–2 proc. Tyrimo metu buvo filtruojami trys apšvietos rodmenys ir imamas tas pats dienų skaičius iš tų pačių mėnesių, kai buvo užfiksuoti šie apšvietos duomenys: 400–500 W/m², 600–700 W/m² ir 700–800 W/m². Koeficiento padidėjimas buvo nustatomas remiantis apšvietos duomenimis ir dienų kiekiu, kuriose buvo pasiektos apšvietos normos. Pagal apšvietos filtrą tomis dienomis pagamintą energijos kiekį, buvo išskaičiuojamas koeficiento padidėjimas ir sugeneruotos elektros energijos kiekis per tam tikrą dienų skaičių. Per metus dėl techninės priežiūros priemonių metinis naudingumo koeficientas padidėjo apie 2,1 proc., o tai reiškia, kad 50 MW instaliuotos galios elektrinė papildomai pagamina daugiau kaip 1,5 GWh energijos, šis skaičius gautas sulyginus dvejus pastaruosius metus ir jų sugeneruotus energijos kiekius imant tik tas tris apšvietos grupes, paminėtas anksčiau.

Techninės priežiūros įvedimas į parką rodo, kad ir nedidelis naudingumo koeficiento padidinimas gali žymiai padidinti per metus pagaminamos elektros energijos kiekį dideliame saulės energijos parke.

1 lentelė. Mėnesinis saulės elektrinių parko naudingumo koeficientas prieš techninę priežiūrą ir po (Gatner, 2025)
Table 1. Monthly capacity factor of the solar park before and after maintenance (Gatner, 2025)

Mėnesis	η prieš priežiūrą (%)	η po priežiūros (%)
Sausis	5	6
Vasaris	7	9
Kovas	14	17
Balandis	19	21
Gegužė	21	23
Birželis	22	25
Liepa	23	26
Rugpjūtis	20	23
Rugsėjis	16	18
Spalis	10	12
Lapkritis	6	7
Gruodis	3	4
Metinis vidurkis:	13,8	15,9

Geresnius rezultatus galima paaiškinti konkrečiais techninės priežiūros veiksmais, kurių buvo imtasi techninės priežiūros metu. Ypač didelę įtaką turėjo reguliarius paviršiaus valymas – pašalinus dulkių ir nešvarumų sluoksnius, saulės moduliai galėjo geriau ir daugiau surinkti saulės šviesos. Lauko stebėjimų metu pastebėta, kad modulių stiklas, kuris anksčiau patapdavo matinis, po kiekvieno valymo pasidarydavo skaidresnis, o tai duomenyse rodydavo didesnę energijos generaciją. Iškart po valymo jėgainės galia išauga apie 10–15 proc., palyginti su praėjusios savaitės (prieš saulės modulių valymą) rodikliais. Tai atitinka pašalintus nešvarumų nuostolius, kurie sausuoju laikotarpiu siekia apie 10 proc. produkcijos (šis skaičius atitinka bendruosius su dulkėmis susijusių nuostolių lūkesčius). Patobulinus įrangos priežiūrą (skubiai pašalinus inverterio gedimus), sumažėjo sistemos prastovos laikas. Metais, kai buvo nevykdoma saulės parko priežiūra, buvo užfiksuota 17 parko gedimų, skaičius nėra didelis, tačiau tam įtakos turi parko naujumas ilgainiui dėl susidėvėjimo gedimų gali daugėti. Parkas tuo metu, kai turėjo gedimus, prarado apie 54 MWh elektros energijos. Antraisiais metais, kai buvo vykdoma techninė priežiūra, užfiksuoti 9 gedimai, dėl kurių susidarė 20 MWh energijos praradimas. Labiau prižiūrimas ir greičiau tvarkomas parkas tiesiogiai leido pagaminti daugiau energijos ir taip prisidėjo prie naudingumo koeficiento padidėjimo. Duomenys rodo, kad techninės priežiūros programa padidino parko efektyvumą.

Išvados

Šis tyrimas rodo, kad kruopšti priežiūra gerokai didina saulės elektrinių parko efektyvumą. Įvedus reguliarių valymą ir aktyvų remontą, elektrinės naudingumo koeficientas padidėjo nuo 13,8 proc. iki 15,9 proc., o tai reiškia, kad per metus papildomai buvo pagaminta apie 1,5 GWh elektros energijos. Toks naudingumo koeficiento padidėjimas rodo, kad saulės elektrinė veikia stabiliau, efektyviau ir arčiau savo maksimalaus potencialo. Svarbu, kad šis padidėjimas buvo pasiektas neatnaujinant techninės įrangos ar nedidinant pajėgumų, o tiesiog optimizuojant eksploataavimo ir priežiūros darbus. Iš esmės esamas saulės energijos šaltinis veikė geriau, nes buvo sumažinti nuostoliai, kurių buvo galima išvengti. Tai išryškina pagrindinę išvadą: techninė priežiūra – tai ne tik veiklos palaikymas, bet ir aktyvus energijos gamybos

efektyvumo didinimas. Saulės elektrinių parke (vidutinio dulkiškumo ir reguliaraus sezoninio lietaus / sniego) valymo nauda yra apie 2–3 proc. padidėjęs metinis našumas.

Literatūra

1. Solar energy. European Commission, 2025. https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/solar-energy_en. Žiūrėta 2025 04 02.
1. PVCASE team. *PV plant performance: challenges and solutions for large-scale solar projects*. 2024. <https://pvcase.com/blog/pv-performance/>
2. NREL, National Renewable Energy Laboratory. *Utility-Scale PV 2023*, https://atb.nrel.gov/electricity/2023/utility-scale_pv
3. Schill, C., Anderson, A., Baldus-Jeursen, C., Burnham, L., Micheli, L., Parlevliet, D., ... & Urrejola, E. (2022). Soiling Losses—Impact on the Performance of Photovoltaic Power Plants. *International Energy Agency*. <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2023/01/IEA-PVPS-T13-21-2022-REPORT-Soiling-Losses-PV-Plants.pdf>
4. Bearworx team 2024. *How frequently should you arrange for solar panel cleaning to ensure optimal efficiency?* 2024. <https://bearworx.in/how-often-schedule-solar-panel-cleaning-optimal-efficiency>
5. Gatner. Tirtos parko SCADA duomenys 2025. Duomenų bazė. <https://europeanenergy.gatner-webportal.com/signin>

ENERGY EFFICIENCY STUDIES ON SOLAR FARMS

Astract

This study examines the impact of maintenance on the energy efficiency of a solar park, focusing on its efficiency factor. The study highlights how dust accumulation, component failures and unplanned downtime negatively affect the efficiency of a solar park. An experimental approach was used, collecting data for two years, initially under standard maintenance conditions, and then following an enhanced maintenance programme. The capacity factor was calculated from the operational data and statistical analysis confirmed the effect of the maintenance improvements. The results showed a significant increase in the capacity factor of the fleet, from 13.8% to 15.9%, resulting in an additional 1.5 GWh of electricity production per year. The analysis confirmed that the cleaning of the solar modules and maintenance of the equipment reduced the efficiency losses, improved system uptime and increased energy production.

Keywords: solar park, solar power plant, efficiency factor, energy production