

Eksperimentalno istraživanje uticaja klimatoloških parametara na temperaturu PV modula

Danijela Kardaš Ančić¹, Mirko Komatina², Petar Gvero¹, Bojan Knežević¹, Milan Pupčević¹

¹Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

²Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija

danijela.kardas@mf.unibl.org, mirkokomatina@gmail.com, petar.gvero@mf.unibl.org, bojan.knezevic@mf.unibl.org, milan.pupcevic@mf.unibl.org

Sažetak— Solarna energija je jedan od vodećih obnovljivih izvora energije zbog svog velikog potencijala, pristupačnosti cijena pojedinačnih sistema, nulte emisije i bez emisije buke. Sunčevo zračenje koje dopire na površinu fotonaponskog (PV) modula djelimično se transformiše u električnu energiju dok najveći dio zračenja se transformiše u toplotu. Kao posljedica toga, temperatura fotonaponskog modula raste što uzrokuje smanjenje njegove električne efikasnosti posebno na temperaturi iznad 25 °C. Ova studija predstavlja pregled izmjerenih temperatura PV modula u zavisnosti od izmjerenih klimatskih parametara. Eksperimentalna instalacija za istraživanje je projektovana, konstruisana i izgrađena tako da omogućuje mjerenje svih relevantnih parametara u stvarnom vremenu. Rezultati pokazuju da meteorološki parametri kao što su temperatura vazduha, sunčevo zračenje i brzina vjetra definišu i imaju značajan uticaj na temperaturu PV modula, a time i na proizvodnju električne energije.

Ključne riječi—temperatura PV modula; eksperimentalno istraživanje; meteorološki podaci; PV električna efikasnost;

I. UVOD

Globalni godišnji kapaciteti obnovljivih izvora energije povećali su se za skoro 50% na skoro 510 GW u 2023. godini, što je najbrža stopa rasta u posljednje dvije decenije [1]. EU predlaže povećanje godišnjih kapaciteta u Direktivi o obnovljivoj energiji na 45% do 2030. godine, u odnosu na 40% u prošlogodišnjem prijedlogu. Time bi se ukupni kapaciteti za proizvodnju obnovljive energije doveli na 1236 GW do 2030. godine, u poređenju sa 1067 GW predviđenih do 2030. godine [2]. U narednih pet godina očekuje se da će se postići nekoliko prekretnica u oblasti obnovljive energije [1]:

- 2025. godine obnovljivi izvori energije prevazilaze ugalj i postaju najveći izvor proizvodnje električne energije;
- proizvodnja električne energije iz solarnih PV će nadmašiti nuklearnu proizvodnju električne energije u 2025. i 2026. godini;
- u 2028. godini obnovljivi izvori energije čine preko 42% globalne proizvodnje električne energije, pri čemu će se udio vjetra i solarne energije udvostručiti na 25%.

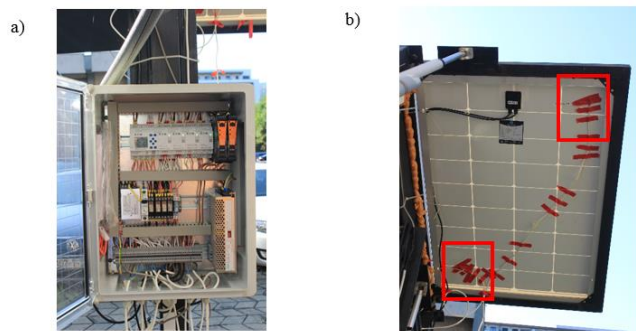
Globalno gledano, električna energija iz PV, predstavljala je tri četvrtine povećanja obnovljivih kapaciteta širom svijeta

2023 godine [1]. Kao deo REPowerEU plana, Strategija EU za solarnu energiju ima za cilj da do 2025. godine instalira preko 320 GW fotonaponskih panela (više nego udvostručivši se u odnosu na 2020.) i skoro 600 GW do 2030. [3]. Solarni fotonaponski paneli (PV) će dominirati u proizvodnji solarne energije od sada do 2050. godine [4]. Temperatura je jedna od fizičkih veličina koje imaju značajan uticaj na performanse fotonaponskih modula. Temperatura PV ćelije veća od 25 °C negativno utiče na električnu efikasnost PV modula [5] [6]. Ovo je veliki nedostatak solarne fotonaponske tehnologije. Kada temperatura fotonaponskih ćelija pređe 25 °C, električna efikasnost počinje da opada 0,4 – 0,65 %/°C [7] [8]. Tipični PV modul pretvara 6 – 23 % solarne energije u električnu energiju, dok se ostatak pretvara u toplotu, u zavisnosti od vrste tehnologije fotonaponskih ćelija i meteoroloških uslova [9] [10]. Faktori životne sredine imaju najveći uticaj na rad fotonaponskih sistema. Najvažniji faktori životne sredine su: sunčevo zračenje, vjetar, temperatura vazduha, akumulacija prašine, zaprljanost i efekat sijenčenja [11] [12] [13] [14] [15]. Temperatura zadnje površine fotonaponskog modula (T_m) i temperatura fotonaponske ćelije (T_c) mogu se razlikovati za visoke intenzitete sunčevog zračenja [16]. Pri solarnom zračenju od 1000 W/m², ova temperaturna razlika je tipično 2 do 3 °C. Za module sa ravnim pločama sa toplotno izolovanim zadnjom površinom, ova temperaturna razlika može se pretpostaviti da je nula [17]. S obzirom da je za analiziranu lokaciju prosječno dnevno sunčevo zračenje manje od 700 W/m², ove razlike su zanemarene i usvojeno je $T_c = T_m = T_{PV}$.

II. EKSPERIMENTALNA INSTALACIJA

Eksperimentalna instalacija je dizajnirana i napravljena na način da se može mjeriti temperatura fotonaponskog modula u realnom vremenu uzimajući u obzir relevantne meteorološke parametre kao što su temperatura vazduha, intenzitet sunčevog zračenja i brzina vjetra. Eksperimentalna instalacija (Sl. 1.) za ovu studiju se nalazi u dvorištu Mašinskog fakulteta u Banjoj Luci (44.46282 N, 17.11502 E) a meteorološka stanica je na krovu zgrade. Za eksperiment je izabran monokristalni PV sistem tip SZ-100-36M (Tabela 1). Tehničke specifikacije PV modula su date u tabeli 1. Temperatura modula je mjerena sa dva PT100 termopara postavljena na zadnjoj strani PV modula u dvije tačke. Ove lokacije su izabrane da bi se utvrdila razlika u distribuciji temperature preko panela. Za pozicioniranje termoparova izabrane su dve dijametralno različite tačke

(lijevi ugao dole i gornji desni, slika 1, b). Za dalju analizu korištena je srednja vrijednost ove dvije temperature. Tačnost PT100 je $\pm (0.15 + 0.002 \text{ k } |T|) ^\circ\text{C}$ za opseg od - 50 do 300 $^\circ\text{C}$.



Sl. 1. Eksperimentalna instalacija (a - EASY – E4 – UC – 12 RC1; b – pozicija termoparova)

TABELA I. TEHNIČKA SPECIFIKACIJA PV MODULA

Standardni testni uslovi ("STC") AM = 1.5, E = 1000 W/m ² , T _C = 25 $^\circ\text{C}$	
Maksimalna snaga	100 W
Vrsta ćelija/efikasnost	monokristalne / 17.66 %
Maksimalna struja (I_{mpp})	5.41 A
Maksimalni napon (V_{mpp})	18.50 V
Napon otvorenog kola (V_{oc})	22.50 V
Struja otvorenog kola (I_{sc})	5.92 A
Radna temperatura	- 40 $^\circ\text{C}$ ÷ + 80 $^\circ\text{C}$
Dimenzije panela	1020 x 670 x 35 mm

Podaci su prikupljeni u periodu od 3 dana (15. - 17.7.2023.) od 9:45 do 15:55 sa intervalom snimanja od 10 minuta i pohranjeni su putem EASI-E4-UC-12RC1 akvizicije podataka. Za ove analize izabran je mjesec jul kao najtopliji mjesec u godini za analizirano geografsko područje. Mjerenja su vršena 3 dana za redom kako bi se dobili relevantni podaci u zavisnosti od promjena meteoroloških parametara. Meteorološke podatke, uključujući intenzitet sunčevog zračenje, temperaturu okoline i brzinu vjetra, su mjereni meteorološkom stanicom Luft VS10. Tehnički podaci za meteorološku stanicu dati su u tabeli 2.

TABELA II. TEHNIČKA SPECIFIKACIJA METEOROLOŠKE STANICE

Temperatura vazduha	PTC, - 40 ÷ + 60 $^\circ\text{C}$ ($\pm 1,0$ $^\circ\text{C}$)
Solarno zračenje	Silicijum - piranometar, 0 ÷ 1500 W/m ² (± 10 % or ± 120 W/m ²)
Brzina vjetra	0 ÷ 40 m/s (± 1 m/s or 5 %)

III. REZULTATI I DISKUSIJA

Tabela 3. prikazuje maksimalne i minimalne vrijednosti meteoroloških parametara koji su izmjereni tokom eksperimentalnog istraživanja. Mjerenja su pokazala da se sunčevo zračenje (G), temperatura okoline (Ta) i brzina vjetra (v) kreću u rasponu od 457 – 822.3 W/m², 34.8 – 40.8 $^\circ\text{C}$ i 1.3 – 13.5 km/h, respektivno.

TABELA III. MAKSIMALNE I MINIMALNE VRIJEDNOSTI IZMJERENIH METEOROLOŠKIH PARAMETARA

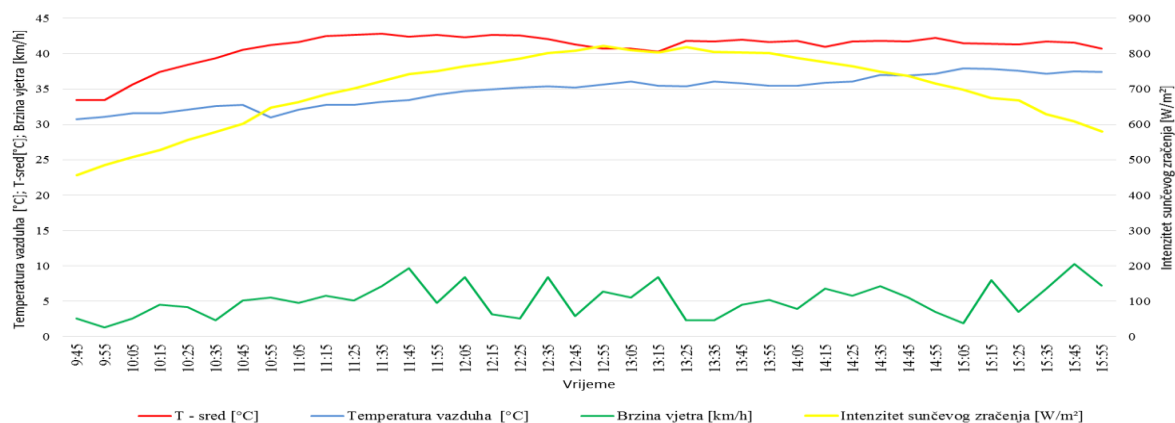
Day		G _T (W/m ²)	T _a ($^\circ\text{C}$)	v (km/h)
15.7.2023.	Max	822.3	37.9	10.3
	Min	457	30.7	1.3
16.7.2023.	Max	810.4	39	13.5
	Min	453.3	32.7	1.6
17.7.2023.	Max	806.7	40.8	9.3
	Min	461	34.8	1.6

U tabeli 4. su date srednje dnevne vrijednosti meteoroloških podataka (temperatura vazduha, brzina vjetra i intenzitet sunčevog zračenja) za cijeli period mjerenja kao i srednja dnevna izmjerena temperatura PV modula.

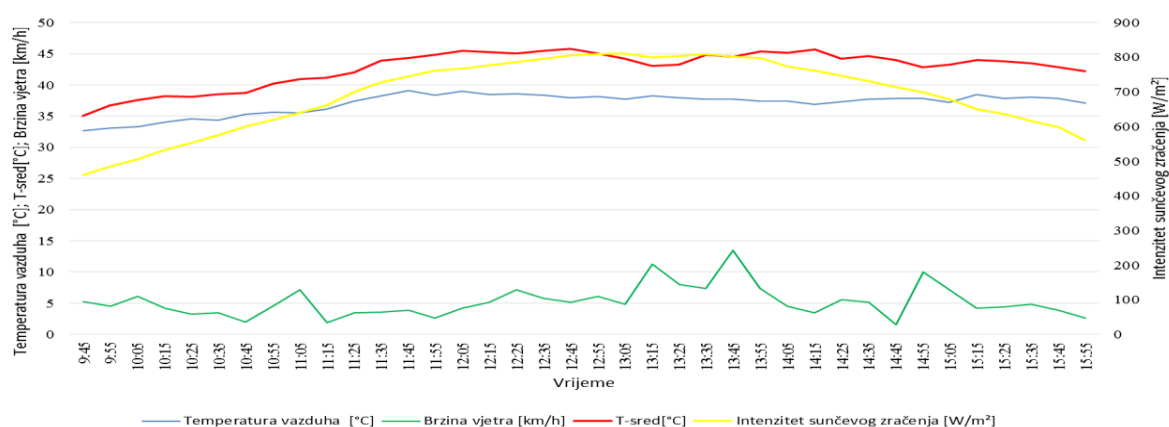
TABELA IV. SREDNJE DNEVNE IZMJERENE VRIJEDNOSTI METEOROLOŠKIH PARAMETARA KAO I SREDNJA DNEVNA TEMPERATURA PV MODULA

	15.7.2023.	16.7.2023.	17.7.2023.
Srednji dnevni intenzitet sunčevog zračenja [W/m ²]	703.62	698.15	686.63
Srednja dnevna temperatura vazduha [$^\circ\text{C}$]	34.71	36.99	38.72
Srednja dnevna brzina vjetra [km/h]	5.10	5.34	4.67
Srednja dnevna temperatura PV modula [$^\circ\text{C}$]	40.86	42.43	42.59

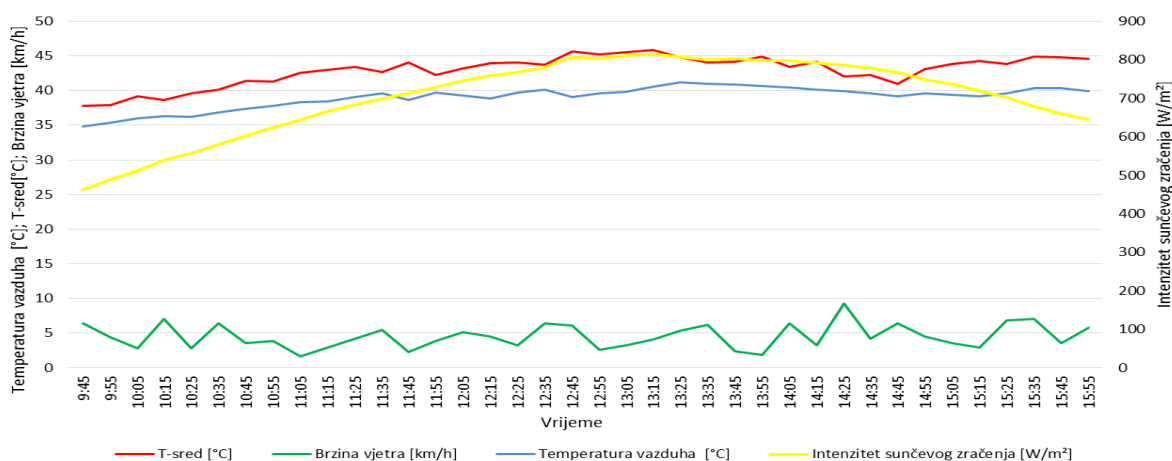
Kao što se može vidjeti u tabeli 4, najviša izmjerena temperatura PV modula odgovara danu sa najvišom temperaturom vazduha i najnižom brzinom vjetra (dan 17.7.2023.). Najniža izmjerena temperatura PV modula odgovara danu sa najnižom temperaturom vazduha i većom brzinom vjetra (15.7.2023.). Vrijednosti intenziteta sunčevog zračenja bile su relativno bliske tokom cijelog mjerenog perioda. Na Sl. 2, 3 i 4 dat je grafički prikaz izmjerenih vrijednosti temperature PV modula i meteoroloških podataka za cijeli period mjerenja.



Sl. 2. Izmjerene vrijednosti meteoroloških parametara i temperature PV modula na dan 15.7.2023.



Sl. 3. Izmjerene vrijednosti meteoroloških parametara i temperature PV modula na dan 16.7.2023.



Sl. 4. Izmjerene vrijednosti meteoroloških parametara i temperature PV modula na dan 17.7.2023.

Kao što se može videti na Sl. 2, 3 i 4., maksimalna vrednost izmjerene temperature PV modula odgovara maksimalnom dnevnom sunčevom zračenju i padu brzine vjetra. Kako brzina vjetra raste, temperatura PV modula se smanjuje. Ovi eksperimentalni rezultati potvrđuje uticaj vjetra

na konvektivno hlađenje fotonaponskog modula. U prvom dijelu dana raste intenzitet sunčevog zračenja, kao i temperatura vazduha i temperatura fotonaponskih modula. Temperaturna kriva PV modula prati krivu raspodele sunčevog zračenja sa maksimalnim i minimalnim

vrijednostima. Može se zaključiti da u prvom delu dana na temperaturu PV modula najveći uticaj ima intenzitet sunčevog zračenja sa uticajem brzine vjetra. U drugom dijelu dana (poslije 14 časova) temperatura vazduha i brzina vjetra imaju veći uticaj na temperaturu PV modula nego intenzitet sunčevog zračenje.

IV. ZAKLJUČAK

Analizirajući eksperimentalne podatke, može se zaključiti da je temperatura fotonaponskog modula iznad 25 °C tokom cijelog mjerenog perioda sa značajnim uticajem meteoroloških parametara. Minimalne i maksimalne vrijednosti izmjerene temperature PV modula odgovaraju minimalnim i maksimalnim vrijednostima mjerenih meteoroloških parametara (intenzitet sunčevog zračenja, temperatura vazduha i brzina vjetra). S obzirom na klimatske promjene, sve toplija ljeta sa izuzetno visokim temperaturama vazduha i intenzitetom sunčevog zračenja, može se očekivati da će temperatura PV modula biti iznad 25 °C skoro pola godine. Uzimajući u obzir izmjerene visoke temperature PV modula, za neka buduća istraživanja analiziraće se mogućnosti hlađenja i njegov uticaj na temperaturu PV panela i njegove performanse.

ZAHVALNICA

The authors acknowledge the support of the European Research Executive Agency (REA) for funding this research under the project "ENPOWER – Enhancing Scientific Capacity for Energy Poverty (101160253 — ENPOWER — HORIZON-WIDERA-2023-ACCESS-02)".

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or European Research Executive Agency (REA). Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

The authors acknowledge the support of the Science Fund of the Republic of Serbia, Grant No. 4344, "Forward-Looking Framework for Accelerating Households" Green Energy Transition – FF GreEN and by the Ministry of Science, Technological Development and Innovation of the Republic of Serbia; grant number 451-03-137/2025-03/200105.

LITERATURA

- [1] Renewables 2023 - Analysis and forecast to 2028, International Energy Agency Report (2024)
- [2] REPowerEU Plan, European Commission (2022).
- [3] EU Solar Energy Strategy, European Commission, Brussels (2022)
- [4] The future of Solar energy, MIT (2015)
- [5] A. Nouar, „Methodology for predicting the PV module temperature based on actual and estimated weather data“, *Energy Conversion and Management: X*, 14, (2022)
- [6] I. Santiago, D. Trillo-Montero, M. Moreno-Garcia, V. Pallares-Lopez, J.Luna-Rodriguez, „Modeling of photovoltaic cell temperature losses: a review and a practice case in South Spain“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, (2018), pp. 70-89

- [7] M. Sharaf, A.S. Huzayyin, M.S.Yousef, „Performance enhancement of photovoltaic cells using phase change material (PCM) in winter“, *Alexandria Engineering Journal*, (2022) pp. 4229–4239
- [8] H.Gürbüz, S. Demitürk, H. Akcay, Ü. Topalci, „Experimental investigation on electrical power and thermal energy storage performance of a solar hybrid PV/T-PCM energy conversion system“, *Journal of Building Engineering*, 69 (2023)
- [9] C.B. Yoong, „Optimal orientation and tilting angle of PV panels considering shading and temperature effects“, *Lee Kong Chian Faculty of Engineering and Science University Tunku Abdul Rahman, Ph.D thesis* (2023)
- [10] M. Fouad, L.A. Shihata, E.I. Morgan, „An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80 (2017) pp. 1499–1511
- [11] M. Nezamisavjbolaghi, E. Davodian, A. Bouich, M. Tlemcani, O. Mesbahi, F.N. Janeiro, „The Impact of Dust Deposition on PV Panels' Efficiency and Mitigation Solutions: Review Article“, *Energies*, 16, (2023) pp. 2-19.
- [12] S. Gallardo-Saavedra, B. Karlson, „Simulation, validation and analysis of shading effects on a PV system“, *Solar Energy*, (2018), pp. 828-839
- [13] R. Conceicao, J. Gonzalez - Aguilari, A.A. Merrouni, M. Romero, „Soiling effect in solar energy conversion systems: A review“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162, (2022)
- [14] R. Korab, M. Polomski, T. Naczynski, T. Kandzia, „A dynamic thermal model for a photovoltaic module under varying atmospheric conditions“, *Energy Conversion and Management*, 280, (2023)
- [15] R. Shadid, Y. Khawaja, A. Bani-Andullah, M. Akho- Zahieh, A. Allaham, „Investigation of weather conditions on the output power of various photovoltaic systems“, *Renewable Energy*, 217, (2023)
- [16] M. Zouine, et al., „Mathematical Models Calculating PV Module Temperature Using Weather Data: Experimental Study“, in *Proceedings of the 1st International Conference on Electronic Engineering and Renewable Energy. ICEERE 2018. Lecture Notes in Electrical Engineering*, Singapore, (2019)
- [17] D.L. King, W.E. Boyson, J.A. Kratochvill, „Photovoltaic Array Performance Model“, Sandia National Laboratories, (2004)

ABSTRACT

Solar energy is one of the leading renewable energy sources due to its great potential, affordable prices for individual systems, zero emissions and no noise emissions. The solar radiation that reaches the surface of the photovoltaic (PV) module is partially transformed into electrical energy, while most of the radiation is transformed into heat. As a consequence, the temperature of the photovoltaic module increases, which causes a decrease in its electrical efficiency, especially at temperatures above 25 °C. This study presents an overview of the measured temperatures of PV modules as a function of the measured climate parameters. The experimental installation for research was designed, constructed and built in such a way as to enable the measurement of all relevant parameters in real time. The results show that meteorological parameters such as air temperature, solar radiation and wind speed define and have a significant impact on the temperature of the PV module, and thus on the production of electricity.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF CLIMATOLOGICAL PARAMETERS ON THE PV MODULE TEMPERATURE

Danijela Kardaš Ančić, Mirko Komatina, Petar Gvero, Bojan Knežević, Milan Pupčević