

DOI: [10.46793/CIGRE37.C6.04](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.C6.04)**C6.04****FOTONAPONSKI SISTEMI ZA PRAĆENJE SUNCA SA OPTIMIZACIJOM POLOŽAJA
NA OSNOVU UKUPNE KOMPONENTE IRADIJACIJE****PHOTOVOLTAIC SYSTEMS FOR SOLAR TRACKING WITH POSITION
OPTIMIZATION BASED ON THE TOTAL IRRADIATION COMPONENT****Nikola Lapčević, Jovana Obradović, Teodora Milovanović, Đorđe Lazović***

Kratak sadržaj: Klimatske promene i energetska tranzicija doprinele su ubrzanom razvoju obnovljivih izvora energije, pri čemu fotonaponski sistemi imaju ključnu ulogu u tom procesu. Tokom poslednjih decenija, tehnološki napredak u oblasti fotonaponskih ćelija bio je usmeren na povećanje njihove efikasnosti, poboljšanje eksploatacionih karakteristika, smanjenje stepena degradacije i produženje životnog veka. Danas se može reći da je u pogledu efikasnosti ćelija dostignut visok nivo, te je dalji napredak u bitnoj meri usmeren ka optimizaciji rada fotonaponskih elektrana. Jedan od načina za poboljšanje njihovih performansi je povećanje dozračene insolacije na aktivnu površinu modula. Ovo se može postići upotrebom sistema za praćenje položaja Sunca, koji omogućavaju prilagođavanje nagibnog i/ili azimutnog ugla modula u odnosu na trenutni položaj Sunca. Ovakvi sistemi, za razliku od fiksnih postavki, koriste mehaničke konstrukcije koje omogućavaju kontinuiranu optimizaciju položaja modula, čime se povećava količina apsorbovane solarne energije, a samim tim i proizvodnja električne energije. U ovom radu dat je pregled osnovnih vrsta sistema za praćenje Sunca po jednoj i dve ose. Za svaki od analiziranih sistema teorijski je opisana metodologija za praćenje Sunca koja se najčešće primenjuje u praksi, a koja se zasniva na optimizaciji položaja modula u cilju maksimizacije direktne komponente iradijacije. Pored toga, razvijen je novi teorijski model za praćenje položaja Sunca, koji ima za cilj optimizaciju ukupnog zračenja na fotonaponski modul. Za evaluaciju ovog modela koriste se podaci o direktnoj i difuznoj horizontalnoj komponenti iradijacije, koje je moguće meriti pomoću pirheliometra i piranometra sa obručem. Performanse razvijenog modela za odabranu lokaciju u Srbiji upoređene su sa konvencionalnim modelom. Poseban osvrt dat je na ostvarene benefite u proizvodnji električne energije tokom oblačnih i vedrih dana.

Ključne reči: obnovljivi izvori energije, fotonaponski sistemi, praćenje Sunca, optimizacija, efikasnost

* Nikola Lapčević, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, ln210133d@student.etf.bg.ac.rs
Jovana Obradović, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, oj210225d@student.etf.bg.ac.rs
Teodora Milovanović, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, mt210498d@student.etf.bg.ac.rs
Đorđe Lazović, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, lazovic@etf.rs

Abstract: Climate change and the energy transition have contributed to the accelerated development of renewable energy sources, with photovoltaic (PV) systems playing a key role in this process. Over the past decades, technological advancements in the field of photovoltaic cells have focused on increasing their efficiency, improving operational characteristics, reducing degradation rates, and extending their lifespan. Today, it can be said that a high level of cell efficiency has been achieved, and further progress is mainly directed toward optimizing the operation of photovoltaic power plants. One way to improve their performance is by increasing the incident solar radiation on the active surface of the modules. This can be achieved using solar tracking systems, which allow adjustment of the tilt and/or azimuth angle of the modules relative to the current position of the sun. Unlike fixed constructions, such systems utilize mechanical structures that enable continuous optimization of the module position, thereby increasing the amount of absorbed solar energy, and, consequently the electricity generation. This paper provides an overview of the basic types of single-axis and dual-axis solar tracking photovoltaic systems. For each analyzed system, the theoretical methodology most commonly applied in practice for solar tracking is described, based on optimizing the module's position to maximize the direct component of irradiation. In addition, a new theoretical model for solar tracking has been developed, aimed at optimizing the total radiation received by the photovoltaic module. The evaluation of this model relies on data regarding the direct and diffuse horizontal components of irradiation, which can be measured using a pyrheliometer and a shadow ring pyranometer. The performance of the developed model for a selected location in Serbia has been compared with the conventional model of solar tracking, with a particular emphasis on the achieved benefits in electricity generation during cloudy and clear days.

Key words: *renewable energy sources, photovoltaic systems, solar tracking, optimization, efficiency*

1 UVOD

Rastuća globalna potražnja za električnom energijom, u kombinaciji sa izazovima globalnog zagrevanja i klimatskih promena, dovela je do potiskivanja konvencionalnih elektrana zasnovanih na ograničenim fosilnim gorivima i podstakla je energetske tranziciju ka obnovljivim izvorima energije. U ovom kontekstu, fotonaponski (PV) sistemi se ističu kao veoma važan element, s obzirom da se oslanjanju na čistu i neiscrpu energiju solarnog zračenja, ključnu za održivo snabdevanje [1].

Istorijski gledano, visoki investicioni troškovi, niska efikasnost konverzije energije i velika površina potrebna za instalaciju PV modula predstavljali su glavne prepreke ka njihovoj širokoj upotrebi [2]. Tokom godina, proizvođači, istraživački centri i naučnici širom sveta intenzivno su radili na prevazilaženju ovih ograničenja i unapređenju performansi PV ćelija. Poboljšanja su ostvarena na nivou materijala, kroz povećanje efikasnosti konverzije, poboljšanje eksploatacionih karakteristika, smanjenje stepena degradacije, produženje životnog veka i smanjenja troškova proizvodnje [3].

Paralelno sa razvojem same PV ćelije, razvijane su brojne tehnike za optimizaciju rada fotonaponskih sistema. Jedan od pristupa podrazumeva povećanje dozačene insolacije na aktivnu površinu modula, što se postiže primenom sistema za praćenje Sunca (solarni trakeri) [4]. Ovi sistemi koriste motore i zupčaste mehanizme koji omogućavaju PV modulima da dinamički prilagođavaju svoj nagibni i/ili azimutni ugao u skladu sa položajem Sunca. Rotacija mehaničkih konstrukcija može biti po jednoj (jednoosni sistemi) ili dve ose (dvoosni sistemi).

Iako su složeniji i skuplji od fiksnih sistema, solarni trakeri mogu obezbediti značajno povećanje u specifičnoj proizvodnji električne energije [5].

U ovom radu biće izložen teorijski pregled osnovnih sistema za praćenje položaja Sunca koji vrše optimalno pozicioniranje na osnovu direktne komponente iradijacije. Kao ključni doprinos ovog rada, za svaki razmatrani sistem praćenja, biće izvedeni unapređeni modeli koji se zasnivaju na optimizaciji ukupnog zračenja. Ovakvi sistemi omogućavaju dodatno povećanje proizvodnje u odnosu na standardne algoritme, naročito tokom oblačnih dana, uz minimalna ulaganja u dodatnu opremu.

Struktura rada je sledeća: Poglavlje 2 daje potrebnu stručnu terminologiju iz oblasti solarne energetike. U Poglavlju 3 dat je teorijski pregled konvencionalnih modela solarnih trakera, dok su u Poglavlju 4 opisani razvijeni algoritmi za praćenje Sunca. Glavni rezultati istraživanja predstavljani su u Poglavlju 5, dok su u Poglavlju 6 data zaključna razmatranja.

2 OSNOVNI ELEMENTI ZA PRORAČUN POTENCIJALA SOLARNOG ZRAČENJA

2.1 PROSTORNI POLOŽAJ PV MODULA I SUNCA U RAVNI HORIZONTA

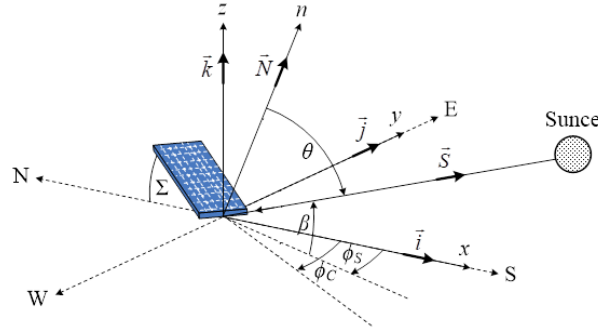
Za proračun potencijala solarnog zračenja relevantno je nekoliko uglova. Ovi uglovi prevashodno određuju prostorni položaj PV modula i Sunca u ravni horizonta (Slika 1), kao i položaj Sunca u odnosu na Zemlju [6].

- *Ugao deklinacije Sunca* (δ): predstavlja ugao između ravni ekvatora i prave koja spaja centre Sunca i Zemlje. Ovaj ugao varira u rasponu od -23.45° do 23.45° tokom godine i računa se prema sledećoj formuli:

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (n - 81) \right], \quad (1)$$

gde n predstavlja redni broj dana u godini.

- *Altitudni ugao Sunca* (β): predstavlja ugao kojim se definiše visina Sunca koju posmatrač vidi na površini Zemlje, odnosno ugao između direktnih sunčevih zraka i ravni horizonta. Kada je solarno podne, altitudni ugao je najveći.
- *Azimutni ugao Sunca* (ϕ_s): predstavlja ugao između pravca sever-jug i projekcije direktnih sunčevih zraka na ravan horizonta. Prema konvenciji, ovaj ugao je negativan pre podne, odnosno pozitivan posle podne na severnoj hemisferi.
- *Azimutni ugao PV modula* (ϕ_c): predstavlja ugao između horizontalne projekcije normale na ravan modula i pravca sever - jug. Ista konvencija se usvaja kao i za azimutni ugao Sunca.
- *Nagibni ugao PV modula* (Σ): predstavlja ugao koji ravan PV modula zaklapa sa horizontom.
- *Incidentni ugao* (θ): ugao između upadnih direktnih sunčevih zraka i normale na ravan PV modula.
- *Latitudni ugao* (L): ugao između ravni ekvatora i prave koja spaja centre Zemlje i objekta na njenoj površini (geografska širina).
- *Satni ugao Sunca* (H): pokazuje koliko stepeni Zemlja treba da dodatno zarotira da bi na ciljnoj lokaciji nastupilo solarno podne.



Slika 1: Uglovi koji definišu položaj PV modula i Sunca u ravni horizonta

Altitudni i azimutni ugao Sunca zavise od geografske širine, dana u godini i solarnog vremena:

$$\sin \beta = \cos L \cos \delta \cos H + \sin L \sin \delta \quad (2)$$

$$\sin \phi_s = \frac{\cos \delta \sin H}{\cos \beta} \quad (3)$$

Incidentni ugao dobija se kombinacijom svih prethodno navedenih relevantnih uglova:

$$\cos \theta = \cos \beta \cos(\phi_s - \phi_c) \sin \Sigma + \sin \beta \cos \Sigma \quad (4)$$

2.2 KOMPONENTE SOLARNE IRADIJACIJE

Direktno solarno zračenje (I_B) predstavlja zračenje koje putuje direktno od Sunca do površine Zemlje, bez rasipanja i apsorpcije u atmosferi. Komponenta direktnog solarnog zračenja koja pod pravim uglom pada na ravan PV modula (I_{BC}) može se odrediti prema:

$$I_{BC} = I_B \cos \theta \quad (5)$$

Difuzno zračenje predstavlja zračenje koje je raspršeno i rasuto na putu do površine Zemlje usled postojanja čestica i molekula u njenoj atmosferi. Zbog složenosti modelovanja, često se uvodi pretpostavka da ovo zračenje dolazi ravnomerno iz svih pravaca. Komponenta ukupne iradijacije na PV panel koja potiče od ovog zračenja, difuzna komponenta iradijacije na ravan PV modula (I_{DC}), jednaka je:

$$I_{DC} = I_{DH} \frac{1 + \cos \Sigma}{2}, \quad (6)$$

gde je I_{DH} difuzna iradijacija na PV panel kada je postavljen u horizontalnoj ravni.

Reflektovano zračenje predstavlja zračenje koje do objekta dospeva nakon odbijanja od okolnih objekata ili Zemljinog tla. Reflektovana komponenta iradijacije na ravan PV modula (I_{RC}) se može sračunati prema:

$$I_{RC} = \rho(I_{BH} + I_{DH}) \frac{1 - \cos \Sigma}{2}, \quad (7)$$

gde je ρ koeficijent refleksije okolnog tla.

Ukupna solarna iradijacija (I_C) koja dospeva do PV modula računa se kao zbir ove tri komponente:

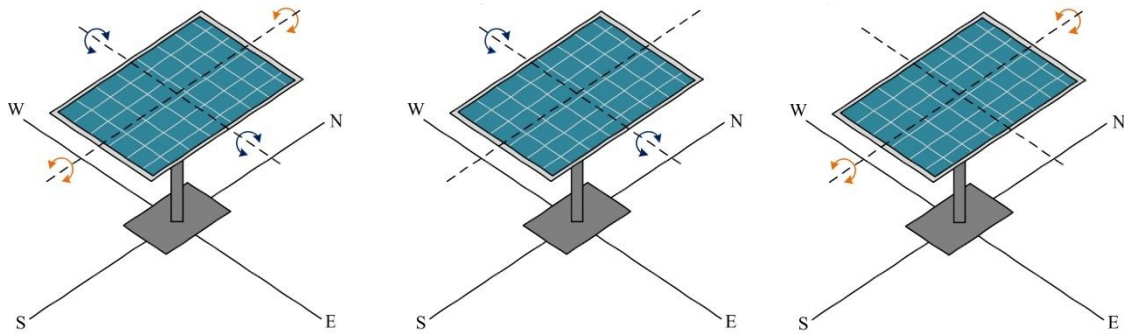
$$I_C = I_{BC} + I_{DC} + I_{RC} \quad (8)$$

3 KONVENCIONALNI MODELI ZA PRAĆENJE POLOŽAJA SUNCA

Usled dnevne promene položaja Sunca, količina zračenja koja pada na fiksno postavljene modul nije optimalna u svakom trenutku. Stoga, u određenim uslovima, pogodno je instalirati PV sisteme sa mehaničkim konstrukcijama za praćenje položaja Sunca (solarni trakeri). Prema [7], ovi sistemi obično koriste algoritme za praćenje koji obezbeđuju da upadno direktno zračenje na ravan modula bude maksimalno u svakom trenutku. Praktična implementacija ovih algoritama je relativno jednostavna, budući da se optimizacija vrši promenom prostornog položaja modula koja zavisi od položaja Sunca i određuje se numeričkim putem, bez potrebe za dodatnim mernim uređajima.

Postoji više vrsta solarnih trakera, od kojih će u ovom radu biti sagledani (Slika 2):

- Fotonaponski sistemi za praćenje po dve ose,
- Fotonaponski sistemi za rotaciju oko horizontalne ose u pravcu istok-zapad (E-W),
- Fotonaponski sistem za rotaciju oko horizontalne ose u pravcu sever-jug (N-S).



Slika 2: Analizirani fotonaponski sistemi za praćenje položaja Sunca

3.1. FOTONAPONSKI SISTEMI ZA PRAĆENJE POLOŽAJA SUNCA PO DVE OSE

Sistem za dvoosno praćenje položaja Sunca je najkompleksniji od tri prethodno navedena sistema jer istovremeno podešava i azimutni i nagibni ugao PV modula. Promena azimutnog i nagibnog ugla vrši se tako da je iskorišćenje direktnog zračenja maksimalno, odnosno tako da u svakom trenutku direktna komponenta pada normalno na ravan PV modula ($\theta = 0^\circ$). Da bi se to postiglo, ova dva ugla treba u svakom trenutku da ispunjavaju sledeće uslove:

$$\Sigma^{opt} = 90^\circ - \beta \quad (9)$$

$$\phi_c^{opt} = \phi_s \quad (10)$$

Smenom izraza (9) i (10) u relacije (5)-(7), dobijaju se sve 3 komponente zračenja od interesa:

$$I_{BC} = I_B \cos \theta = I_B \quad (11)$$

$$I_{DC} = I_{DH} \frac{1 + \cos(90^\circ - \beta)}{2} \quad (12)$$

$$I_{RC} = \rho \cdot (I_B \sin \beta + I_{DH}) \frac{1 - \cos(90^\circ - \beta)}{2} \quad (13)$$

3.2. FOTONAPONSKI SISTEM ZA ROTACIJU OKO HORIZONTALNE OSE U PRAVCU ISTOK-ZAPAD (E-W)

Sistem za rotaciju oko horizontalne ose u pravcu istok-zapad se realizuje tako što se azimutni ugao fiksira duž horizontalne ose sever-jug, dok se nagibni ugao modula dinamički menja tako da se maksimizuje direktna komponenta iradijacije. Optimalna vrednost azimutnog ugla modula data je sa:

$$\phi_c^{opt} = \begin{cases} 0^\circ; |\phi_s| \leq 90^\circ \\ 180^\circ; |\phi_s| > 90^\circ \end{cases} \quad (14)$$

Optimalan nagibni ugao PV modula određuje se izjednačavanjem prvog izvoda kosinusa incidentnog ugla po nagibnom uglu sa nulom:

$$\frac{d(\cos \theta)}{d\Sigma} = 0 \rightarrow \Sigma^{opt} = \arctg(ctg\beta \cdot |\cos \phi_s|) \quad (15)$$

Smenom izraza (14) i (15) u relacije (5)-(7) dobijaju se sve tri komponente zračenja za ovaj sistem:

$$I_{BC} = I_B \cdot \cos \theta \quad (16)$$

$$I_{DC} = I_{DH} \cdot \frac{1 + \cos[\arctg(ctg\beta \cdot |\cos \phi_s|)]}{2} \quad (17)$$

$$I_{RC} = \rho \cdot (I_B \sin \beta + I_{DH}) \cdot \frac{1 - \cos[\arctg(ctg\beta \cdot |\cos \phi_s|)]}{2} \quad (18)$$

3.3. FOTONAPONSKI SISTEMI ZA ROTACIJU OKO HORIZONTALNE OSE U PRAVCU SEVER-JUG (N-S)

Sistem za rotaciju oko horizontalne ose u pravcu sever-jug se realizuje tako što se azimutni ugao menja prateći položaj Sunca na nebu, tako da je pre podne orijentisan ka istoku, a po podne ka zapadu, čime se nagibni ugao kontinualno menja. Vrednost azimutnog ugla definisana je jednačinom:

$$\phi_c^{opt} = \begin{cases} -90^\circ; \phi_s < 0^\circ \\ 90^\circ; \phi_s \geq 0^\circ \end{cases} \quad (19)$$

Po istom principu kao i za prethodni sistem rotacije, može se dobiti optimalna vrednost nagibnog ugla tako da se maksimizuje direktno zračenje na modul:

$$\frac{d(\cos \theta)}{d\Sigma} = 0 \rightarrow \Sigma^{opt} = \arctg(ctg\beta \cdot |\sin \phi_s|) \quad (20)$$

Uvrštavanjem izraza (19) i (20) u (5)-(7), dobijaju se komponente zračenja za ovaj sistem:

$$I_{BC} = I_B \cdot \cos \theta \quad (21)$$

$$I_{DC} = I_{DH} \cdot \frac{1 + \cos[\arctg(ctg\beta \cdot |\sin \phi_s|)]}{2} \quad (22)$$

$$I_{RC} = \rho \cdot (I_B \sin \beta + I_{DH}) \cdot \frac{1 - \cos[\arctg(ctg\beta \cdot |\sin \phi_s|)]}{2} \quad (23)$$

4 UNAPREĐENI MODELI ZA PRAĆENJE POLOŽAJA SUNCA

U ovom radu razvijeni su unapređeni modeli za praćenje položaja Sunca koji, za razliku od konvencionalnih modela, položaj modula određuju maksimizujući ukupnu iradijaciju. Osnovna ideja je da se nagibni ugao modula optimizuje na osnovu estimiranih vrednosti sve tri komponente zračenja, čime se u određenoj meri može dodatno povećati upadno zračenje na modul. Za praktičnu realizaciju ovog modela, na lokaciji elektrane, neophodno je instalirati dva dodatna merna instrumenta: piranometra sa obručem, koji meri horizontalnu difuznu komponentu, i pirheliometra, koji meri direktnu komponentu zračenja. Izmerene veličine ovih uređaja predstavljaju ulazne parametre algoritma koji računa optimalan položaj nagibnog ugla modula. Vrednost azimutnog ugla modula ostaje ista kao kod konvencionalnih modela. U nastavku će biti izvedene matematičke relacije za sve tri vrste analiziranih solarnih trakera.

4.1 FOTONAPONSKI SISTEMI ZA PRAĆENJE POLOŽAJA SUNCA PO DVE OSE

Kao što je već pomenuto, azimutni ugao PV modula ostaje nepromenjen i ima istu vrednost kao kod prethodno analiziranog konvencionalnog modela:

$$\phi_c^{opt} = \phi_s \quad (24)$$

Sa druge strane, nagibni ugao se menja tako da se maksimizuje vrednost ukupne komponente iradijacije na ravan modula. Izjednačavanjem prvog izvoda ukupne iradijacije po promenljivoj nagibnog ugla sa nulom, dobija se optimalna vrednost nagibnog ugla PV modula:

$$\frac{d(I_c)}{d\Sigma} = \frac{d(I_{BC} + I_{DC} + I_{RC})}{d\Sigma} = 0 \quad (25)$$

$$\rightarrow \Sigma^{opt} = \arctg \frac{I_B \cos \beta}{I_B \sin \beta + \frac{1}{2} I_{DH} - \frac{1}{2} \rho (I_B \sin \beta + I_{DH})} \quad (26)$$

4.2 FOTONAPONSKI SISTEMI ZA ROTACIJU OKO HORIZONTALNE OSE U PRAVCU ISTOK-ZAPAD (E-W)

Unapređeni sistem za rotaciju oko horizontalne ose u pravcu istok-zapad se takođe realizuje tako što se azimutni ugao fiksira duž normalne ose sever-jug (N-S):

$$\phi_c^{opt} = \begin{cases} 0^\circ; & |\phi_s| \leq 90^\circ \\ 180^\circ; & |\phi_s| > 90^\circ \end{cases} \quad (27)$$

Po istom principu, nagibni ugao PV panela dobija se diferenciranjem ukupne iradijacije po nagibnom uglu:

$$\frac{d(I_C)}{d\Sigma} = \frac{d(I_{BC} + I_{DC} + I_{RC})}{d\Sigma} = 0 \quad (28)$$

$$\rightarrow \Sigma^{opt} = \arctg \frac{I_B \cos \beta \cos(\phi_S - \phi_C)}{I_B \sin \beta + \frac{1}{2} I_{DH} - \frac{1}{2} \rho (I_B \sin \beta + I_{DH})} \quad (29)$$

4.3 FOTONAPONSKI SISTEMI ZA ROTACIJU OKO HORIZONTALNE OSE U PRAVCU SEVER-JUG (N-S)

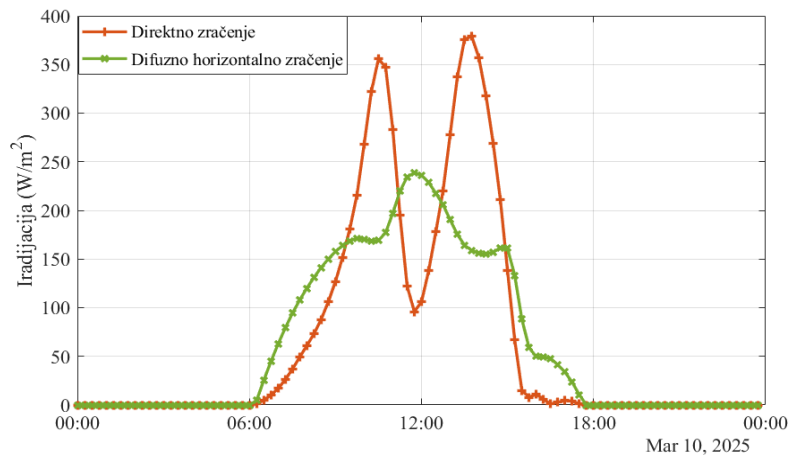
Unapređeni sistem za rotaciju oko horizontalne ose u pravcu sever-jug realizuje se, po istom principu, tako što se azimutni ugao PV panela menja prateći pomeranje Sunca tako da je panel pre podne orijentisan ka istoku, a po podne ka zapadu:

$$\phi_C^{opt} = \begin{cases} -90^\circ; \phi_S < 0^\circ \\ 90^\circ; \phi_S \geq 0^\circ \end{cases} \quad (30)$$

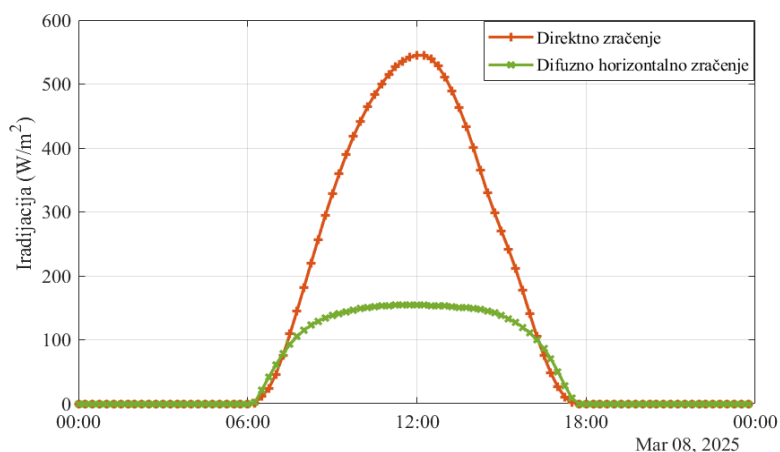
S obzirom na to da je postupak za određivanje optimalnog nagibnog ugla identičan za sva tri sistema za praćenje, kao i da azimutni uglovi uzimaju diskretne vrednosti u oba sistema za rotaciju oko horizontalne ose, zaključujemo da će izraz za optimalni nagibni ugao kod sistema za rotaciju oko N-S ose biti identičan kao kod sistema za rotaciju oko E-W ose. Stoga, izraz (29) važi i u ovom slučaju.

5 POREĐENJE KONVENCIONALNOG I UNAPREĐENOG MODELA ZA PRAĆENJE POLOŽAJA SUNCA

Sa ciljem da se izvrši međusobno poređenje analiziranih solarnih trakera i modela za praćenje položaja Sunca, razvijeni su algoritmi u softverskom alatu MATLAB, zasnovani na matematičkim modelima izloženim u prethodnim poglavljima rada. Kao ciljna lokacija odabrana je okolina Beograda, koju karakteriše godišnja horizontalna insolacija od 1292kWh/m². Podaci o direktnoj i difuznoj horizontalnoj iradijaciji preuzeti su iz meteorološke baze Open-Meteo [8], sa vremenskom rezolucijom od 15 min. U realnim uslovima eksploatacije PV elektrane, ove veličine bile bi određene pomoću mernih uređaja. Analiza je sprovedena za dva scenarija: oblačan dan (10.3.2025) i vedar dan (8.3.2025). Komponente zračenja od interesa prikazane su na Slici 3 i Slici 4, respektivno. Može se zaključiti da je udeo difuzne horizontalne iradijacije u ukupnom zračenju znatno veći pri oblačnim uslovima, zbog čega će ovaj scenario biti detaljnije razmotren u nastavku rada.



Slika 3: Komponente solarnog zračenja pri oblačnom danu

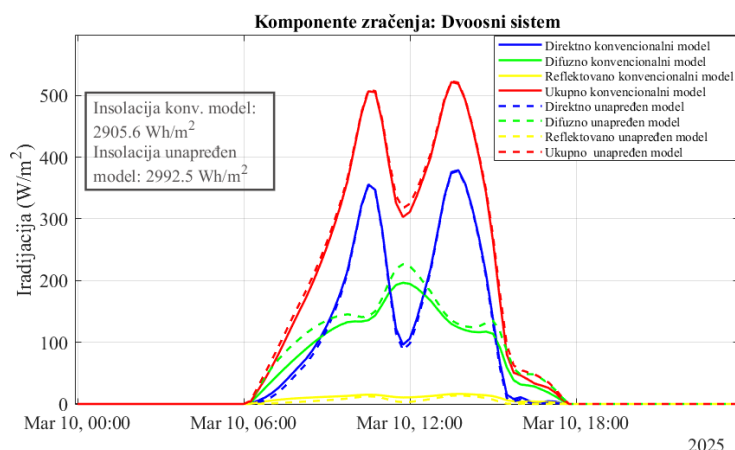


Slika 4: Komponente solarnog zračenja pri vedrom danu

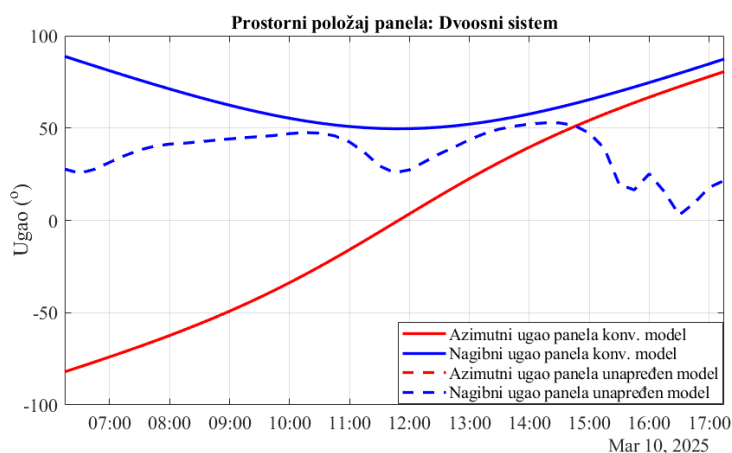
Komponente zračenja koje dospevaju na ravan modula za dvoosni sistem prikazane su na Slici 5. Ukupna iradijacija je veća je kod unapređenog modela i to zahvaljujući većoj vrednosti difuzne komponente. Najveće razlike iradijacije između konvencionalnog i unapređenog modela javljaju se u ranim jutarnjim i predvečernjim satima, kao i tokom perioda sa izraženom oblačnošću. Prisustvo oblačnosti može se lako uočiti na osnovu smanjenja direktne komponente iradijacije, pri čemu dolazi do povećanja udela difuzne komponente. S obzirom na to da se vrednost optimalnog ugla PV modula kod unapređenog algoritma prilagođava ukupnoj iradijaciji, direktna komponenta iradijacije je nešto manja u odnosu na konvencionalni model, dok je istovremeno, difuzna komponenta značajno veća. Vrednosti reflektovane komponente su niže kod unapređenog modela. Ovo je posledica činjenice da difuzna komponenta iradijacije, čiji je doprinos u povećanju ukupne iradijacije najveći, dovodi do smanjenja nagibnog ugla modula. Kao rezultat toga, količina reflektovanog zračenja koja pada na ravan modula se takođe smanjuje. Međutim, s obzirom na to da reflektovana komponenta iradijacije generalno uzima niske vrednosti, njen uticaj na ukupnu iradijaciju ostaje zanemarljiv.

Promena prostornog položaja modula za dvoosni sistem prikazana je na Slici 6. Kod konvencionalnog modela, koji optimizuje direktnu komponentu zračenja, nagibni ugao dostiže visoke vrednosti, čak i do 90° (vertikalni položaj modula). Nasuprot tome, kod unapređenog modela nagibni ugao se više prilagođava difuznoj komponenti i uzima vrednosti manje od 50° . Jasna razlika u nagibnim uglovima je uočljiva u periodima povećane oblačnosti, kada je udeo direktne komponente smanjen. S druge strane, najmanje razlike u nagibnom uglu javljaju se u trenucima kada je direktna komponenta iradijacije dominantna. Azimutni ugao PV modula isti je kod oba modela za praćenje po dve ose i jednak je azimutnom uglu Sunca. Negativnu vrednost uzima u prepodnevničkim časovima kada je modul okrenut prema istoku, u solarno podne se izjednačava sa nulom, a potom nastavlja da raste.

Doprinos unapređenog modela može se sagledati kroz izmerenu vrednost dnevne insolacije na ravan modula. U slučaju konvencionalnog modela ona iznosi 2905.6 Wh/m^2 , a unapređenog 2992.5 Wh/m^2 . Ovo predstavlja porast od približno 3%, što može predstavljati značajan faktor, naročito kod elektrana veće instalisane snage.



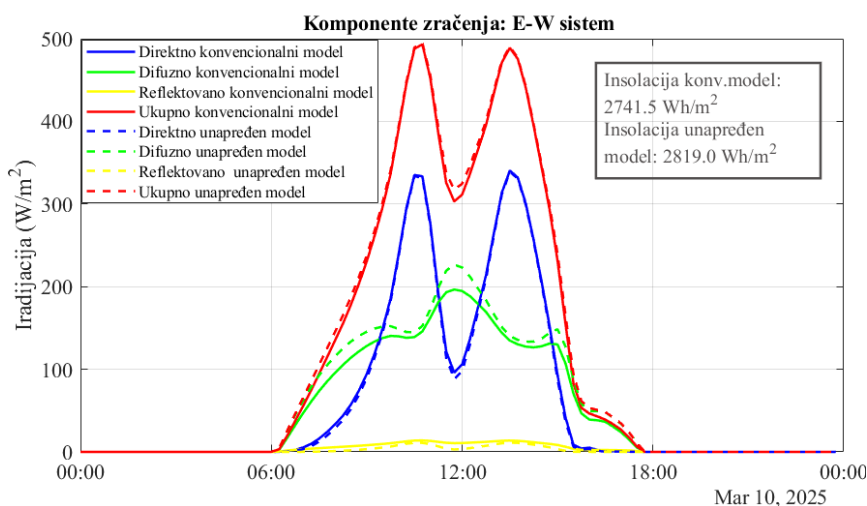
Slika 5: Komponente solarnog zračenja na ravan modula za dvoosni sistem pri oblačnom danu



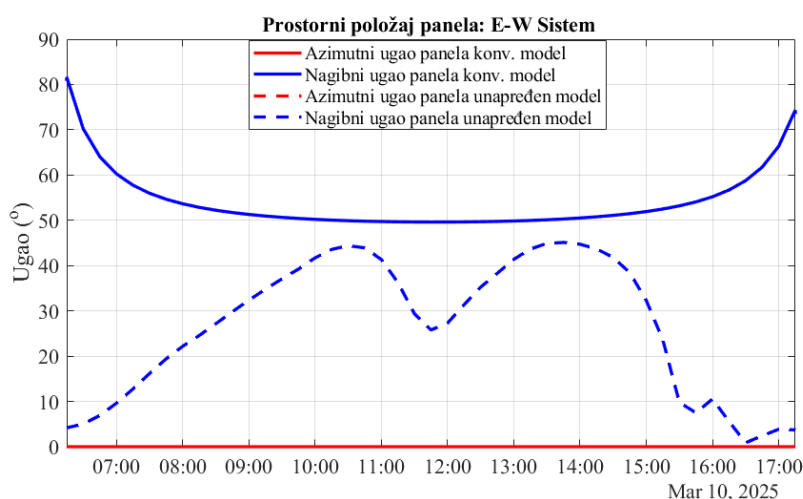
Slika 6: Promena prostornog položaja modula za dvoosni sistem pri oblačnom danu

Analizirajmo sada sistem za praćenje po horizontalnoj osi E-W, prikazan na Slici 7. Ponovo se uočava da je ukupna iradijacija veća kod unapređenog modela zahvaljujući difuznoj komponenti. Na osnovu Slike 8, može se zaključiti da se vrednost nagibnog ugla modula menja slično kao i kod dvoosnog sistema. U ranim jutarnjim i predvečernjim časovima, kao i oblačnom delu dana, vrednosti nagibnih uglova vidno se razlikuju kod konvencionalnog i unapređenog modela. Najmanja razlika u nagibnim uglovima između dva modela primećuje se u periodima kada je direktna komponenta iradijacije znatno veća od difuzne. Iako je reflektovana komponenta iradijacije gotovo zanemarljiva, zanimljivo je primetiti da je njena vrednost kod unapređenog modela niža onda kada je vrednost difuzne komponente veća (manji nagibni ugao znači i manju količinu reflektovanog zračenja koje dospeva na površinu PV modula). Azimutni ugao kod oba algoritma jednak je nuli (modul je orijentisan ka jugu).

Vrednost insolacije kod unapređenog modela veća je za 77.5 Wh/m², što predstavlja porast od približno 2.83%. Na osnovu toga možemo zaključiti da unapređeni sistem sa horizontalnim E-W praćenjem daje nešto slabije rezultate u poređenju sa unapređenim modelom za dvoosno praćenje Sunca.



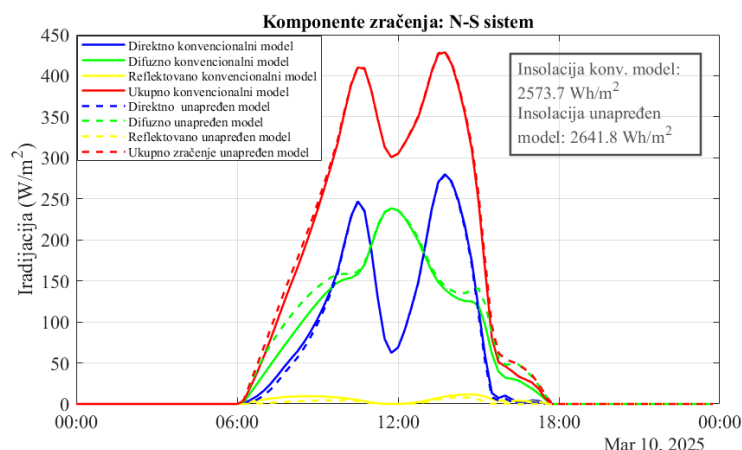
Slika 7: Komponente solarnog zračenja na ravan modula za jednoosni E-W sistem pri oblačnom danu



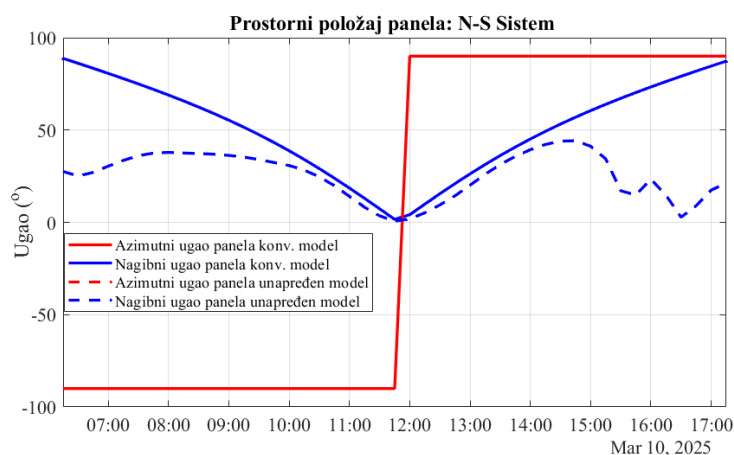
Slika 8: Promena prostornog položaja modula za jednoosni E-W sistem pri oblačnom danu

Analizom sistema za praćenje po horizontalnoj osi N-S (Slika 9), može se primetiti da je ukupna incidentna iradijacija za unapređen sistem veća jedino u ranim jutarnjim i predvečernjim satima zahvaljujući većoj vrednosti difuzne komponente iradijacije. Oko podneva, doprinos difuzne komponente je manje izražen, bez obzira na prisutnu oblačnost. Razlog tome leži u činjenici da je u proračunima za optimalan nagibni ugao u periodu oko solarnog podneva, kako kod konvencionalnog, tako i unapređenog modela, dobijena vrednost približna nuli. Istovremeno, azimutni uglovi su međusobno jednaki (prepodne uzimaju vrednost od -90°, a posle solarnog podneva 90°). Ovo praktično znači da su u ovom periodu dana, prema oba algoritma za praćenje, nagibni uglovi PV modula gotovo jednaki, te su sve tri komponente zračenja na ravan modula jednake za oba algoritma. Varijacije reflektovane komponente iradijacije obrnuto su srazmerne promenama difuzne komponente, što je bio slučaj i za prethodna dva analizirana sistema.

Vrednost insolacije kod unapređenog modela veća je za 68.1 Wh/m², što predstavlja povećanje od 2.64%. Za razmatrani dan, ovaj sistem pokazuje najmanje poboljšanje u smislu povećanja ukupne insolacije na ravan modula.



Slika 9: Komponente solarnog zračenja na ravan modula za jednoosni N-S sistem pri oblačnom danu



Slika 10: Promena prostornog položaja modula za jednoosni N-S sistem pri oblačnom danu

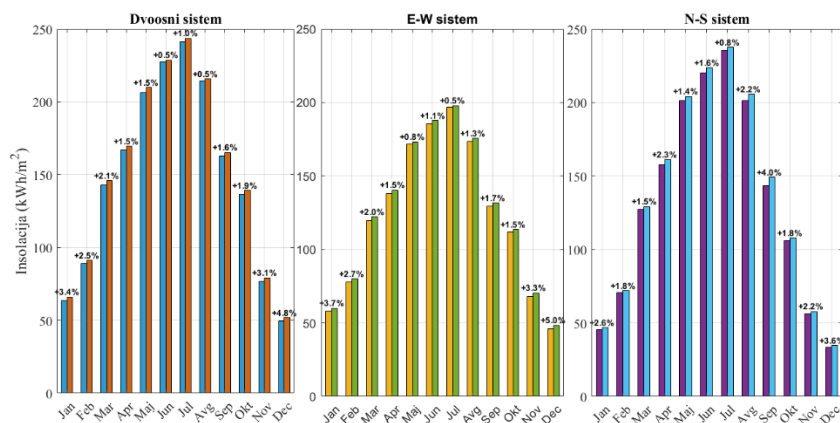
U uslovima vedrog dana, direktna komponenta zračenja je dominantna, stoga konvencionalni modeli za praćenje Sunca daju rešenja koja su vrlo blizu optimalnog. Drugim rečima, doprinos koji se ostvaruje optimizacijom ukupne komponente zračenja je manje izražen kada je oblačnost niska. Kao rezultat primene unapređenih algoritama dobijaju se nešto manji nagibni uglovi u poređenju sa konvencionalnim algoritmima. Tabela 1. ilustruje povećanje ukupne iradijacije na ravan modula pri primeni naprednih modela za praćenja Sunca tokom vedrog dana. Doprinos je najveći u ranim jutarnjim, odnosno predvečernjim satima, kada je Sunce nisko u odnosu na ravan horizonta, kao i kada je udeo difuznog zračenja najveći. Na dnevnom nivou, kumulativno povećanje insolacije na ravan modula za razmatrane tipove solarnih trakera iznosi od 28 do 36 Wh/m², što odgovara procentualnom povećanju od oko 0.6% do 0.7%.

Efikasnost algoritama za praćenje položaja Sunca sagledana je i na godišnjem nivou, uzimajući u obzir karakterističnu godinu sa aspekta solarnog potencijala, za koju horizontalna godišnja insolacija iznosi 1273 kWh/m². Na Slici 11 prikazane su mesečne vrednosti insolacije za tri analizirana sistema za praćenja Sunca. Očekivano, dvoosni sistem za praćenje Sunca daje najbolje rezultate, sa godišnjom insolacijom na ravan modula od 1866 kWh/m² (što predstavlja povećanje od 46.5% u odnosu na fiksni, horizontalno postavljeni modul). U slučaju sistema sa rotacijom oko horizontalne ose u pravcu istok-zapad (E-W), incidentna insolacija iznosi 1551 kWh/m² (povećanje od 21.8%), dok za sistem sa rotacijom oko horizontalne ose u pravcu sever-jug (N-S), godišnja insolacija iznosi 1678 kWh/m² (povećanje od 31.9 %).

Tabela 1. Povećanje ukupne iradijacije na ravan modula pri primeni unapređenih modela praćenja Sunca za scenario vedrog dana

Vremenski interval	6:00-7:00	7:00-8:00	8:00-9:00	9:00-10:00	10:00-11:00	11:00-12:00	12:00-13:00	13:00-14:00	14:00-15:00	15:00-16:00	16:00-17:00	17:00-18:00	Ukupno
Dvoosni sistem (Wh/m ²)	1.92	4.85	2.97	1.44	0.72	0.44	0.42	0.75	1.83	3.53	6.00	3.32	28.2
Jednoosni E-W sistem (Wh/m ²)	3.08	6.55	3.31	1.44	0.70	0.44	0.41	0.74	1.83	3.97	8.22	5.11	35.8
Jednoosni N-S sistem (Wh/m ²)	1.95	5.07	3.17	1.41	0.44	0.05	0.06	0.50	1.82	3.76	6.24	3.84	28.3

Upotrebom unapređenih algoritama za praćenje položaja Sunca ostvaruje se dodatno povećanje incidentne insolacije što doprinosi većoj efikasnosti fotonaponskih sistema. Na mesečnom nivou, povećanje insolacije varira od 0,5% u letnjim mesecima, do 5% u decembru, kada je Sunce nisko na horizontu i kada je difuzna komponenta zračenja izraženija. U zimskim mesecima, tokom izrazito oblačnih dana, povećanje dnevne insolacije na ravan modula može dostići vrednost i do 25%. Jedan od ključnih nedostataka fotonaponskih sistema pri globalnoj integraciji u elektroenergetski sistem jeste velika sezonska varijabilnost u proizvodnji, kao i značajne oscilacije snage usled naglih promena oblačnosti, te upotreba unapređenih algoritama može u određenoj meri kompenzovati ove nedostatke. Na godišnjem nivou razvijeni algoritmi obezbeđuju povećanje insolacije od 1.56 % za dvoosni sistem, 1.59% za jednoosni E-W sistem i 1.92% za jednoosni N-S sistem. Drugim rečima, integracijom dodatnih mernih uređaja i promenom načina upravljanja nagibnog ugla mehaničkih konstrukcija, može se ostvariti povećanje proizvodnje električne energije fotonaponskih elektrana sa solarnim trakerima od najmanje 1.5%.



Slika 11: Mesečne vrednosti insolacije za tri analizirana sistema za praćenje Sunca (levi stubići predstavljaju konvencionalni model, a desni unapređeni model).

6 ZAKLJUČAK

U cilju što efikasnijeg iskorišćenja sunčeve energije, u ovom radu su analizirana tri fotonaponska sistema za praćenje položaja Sunca: dvoosni sistem, jednoosni sistem za rotaciju oko horizontalne ose u pravcu E-W i jednoosni sistem za rotaciju oko horizontalne ose u pravcu N-S.

Svaki od pomenuta tri sistema sagledan je kroz konvencionalni i unapređeni algoritam za praćenje položaja Sunca. Konvencionalni model, koji se najčešće koristi u praksi i koji je dominantno implementiran u vodećim softverskim alatima za projektovanje solarnih elektrana, podrazumeva optimizaciju nagibnog ugla PV modula na osnovu direktne komponente iradijacije. U ovom radu razvijen je unapređeni model, koji podrazumeva maksimizaciju ukupne iradijacije. Za praktičnu realizaciju ovog rešenja, na postojeći sistem potrebno je dodati dva nova merna uređaja: pirheliometar i piranometar sa obručem.

Upoređujući rezultate dobijene upotrebom ova dva modela, uočeno je da unapređeni model može u određenoj meri doprineti povećanju incidentnog zračenja na ravan modula u odnosu na konvencionalan model. Ova razlika je naročito izražena u ranim jutarnjim i predvečernjim časovima, kao i tokom oblačnih delova dana, kada je udeo difuzne komponente iradijacije veći. Analizirajući rezultate za posmatrani oblačni dan, dobijeno je da povećanje incidentne insolacije kod unapređenog modela praćenja po dve ose, kao i po E-W i N-S osi, iznosi 3%, 2.83% i 2.64%, respektivno. Na godišnjem nivou razvijeni algoritmi obezbeđuju povećanje insolacije od 1.56 % za dvoosni sistem, 1.59% za jednoosni E-W sistem i 1.92% za jednoosni N-S sistem. Ulaganje u ovakve sisteme je ekonomski opravdano za solarne elektrane veće instalisane snage, a naročito za područja sa većim brojem oblačnih dana tokom godine. Na kraju, važno je istaći da su ostvareni doprinosi u proizvodnji najveći u periodima dana kada je proizvodnja iz solarnih elektrana niska, što posledično znači i bolju korelisanost sa dijagramom cene električne energije na slobodnom tržištu.

7 LITERATURA

- [1] Asmelash, Elisa, et al. "Role of IRENA for global transition to 100% renewable energy." *Accelerating the transition to a 100% renewable energy era*. Cham: Springer International Publishing, 2020. 51-71.
- [2] Green, Martin A. "Commercial progress and challenges for photovoltaics." *Nature Energy* 1.1 (2016): 1-4.
- [3] El Hammoumi, Aboubakr, et al. "Solar PV energy: From material to use, and the most commonly used techniques to maximize the power output of PV systems: A focus on solar trackers and floating solar panels." *Energy Reports* 8 (2022): 11992-12010.
- [4] Sumathi, Vijayan, et al. "Solar tracking methods to maximize PV system output—A review of the methods adopted in recent decade." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 74 (2017): 130-138.
- [5] Awasthi, Anshul, et al. "Review on sun tracking technology in solar PV system." *Energy Reports* 6 (2020): 392-405.
- [6] Masters, Gilbert M. *Renewable and efficient electric power systems*. John Wiley & Sons, 2013.
- [7] J. Mikulović, Ž. Đurišić, *Solarna energetika*, Akademska misao, Beograd, 2019.
- [8] Open-Meteo. Free Weather API for Realtime and Historical Weather Data. Open-Meteo, 2025, <https://open-meteo.com/>. Pristupljeno: 20.03.2025.