

Optimalna orijentacija solarnih panela u cilju maksimizacije prihoda na temelju tržišnih cijena

Emilija Mrđen, Predrag Mršić, Čedomir Zeljković

Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet, Banja Luka, Republika Srpska
emilija.mrdjen@etf.unibl.org, predrag.mrsic@etf.unibl.org, cedimir.zeljkovic@etf.unibl.org

Sažetak—U radu je analizirana optimalna orijentacija solarnih panela za grad Banjaluku, u cilju maksimizacije godišnjeg prihoda od prodaje proizvedene električne energije. Geometrijske i energetske karakteristike fotonaponskog sistema su predstavljene odgovarajućim matematičkim modelima. Procjena godišnje proizvodnje je izvršena na osnovu podataka za tipičnu meteorološku godinu, dok su tržišne cijene električne energije preuzete sa sajta mađarske berze. Pomoću računarske simulacije, određeni su ukupni godišnji prihodi od prodaje električne energije za sve smislene kombinacije nagibnog i azimutalnog ugla panela, kako bi se pronašle one vrijednosti uglova, koje karakteriše maksimalan prihod. Navedeni proračun je izvršen za period od unazad deset godina, kako bi se analizirao i uticaj varijacije cijena električne energije na tržištu.

Gljučne riječi—ugao nagiba; azimutalni ugao; cijena električne energije.

I. UVOD

S obzirom na ekološke probleme koje izazivaju fosilna goriva, obnovljivi izvori energije svakim danom uzimaju sve više maha u proizvodnji električne energije. Među tehnologijama zasnovanim na obnovljivim izvorima, najintenzivniji razvoj ima tehnologija fotonaponskih sistema, kako u kombinaciji sa drugim distribuiranim izvorima energije, tako i u sklopu samostalne instalacije za domaćinstva, te stambene i poslovne zgrade. Zbog pogodnog geografskog položaja sa velikim brojem sunčanih dana tokom godine, dobijanje električne energije konverzijom sunčeve energije je već uveliko zastupljeno i u zemljama Balkana. Pored toga, tehnološki napredak u proizvodnji solarnih panela doveo je do značajnog smanjenja njihovih cijena, a troškovi ugradnje i održavanja samog sistema su veoma mali.

Sa druge strane, upotreba fotonaponskih sistema za proizvodnju električne energije je sve veća i radi lične zarade investitora. Konstantno povećanje cijene električne energije dovodi do brzog povrata kapitala, ali i uštede na troškovima energije, ako se radi o industrijskim objektima, tokom relativno dugog životnog vijeka sistema. Na taj način, investitor može ostvariti dobit čak i prije nego što su svi troškovi početne investicije u potpunosti pokriveni.

Na globalnom nivou, postoji mnogo berzi električne energije. One omogućavaju kupovinu i prodaju energije, bilo da se radi o kratkoročnim ugovorima, za dan unaprijed (eng. *day-ahead market*) ili unutar samog dana (eng. *intraday market*), bilo da su u pitanju dugoročni ugovori za buduće isporuke (eng. *futures market*). U ovom radu, za proračun su korišćene cijene definisane na mađarskoj berzi HUPX (eng.

Hungarian Power Exchange) [1], jer Bosna i Hercegovina ne raspolaže vlastitom berzom električne energije, dok se dio transakcija domaćih proizvođača upravo realizuje na mađarskom tržištu. Ovdje se mogu pronaći podaci kao što su trenutne cijene i količine proizvedene i prodane električne energije u realnom vremenu, dnevni, nedjeljni i mjesečni izvještaji, itd. Takođe, u istorijskim podacima se može doći do časovnih cijena, zatim do prosječnih dnevnih, sedmičnih, mjesečnih i godišnjih cijena za period unazad petnaest godina. Cijene se formiraju kroz proces aukcije zasnovan na ponudi i potražnji električne energije.

Odgovarajuća orijentacija panela može značajno povećati ukupnu godišnju proizvodnju energije. S obzirom na to da se cijena električne energije na tržištu može povećati tokom određenih perioda (npr. tokom zimskih mjeseci kada je potražnja veća), veća proizvodnja energije omogućava njenu prodaju po višim cijenama. Ako su solarni paneli postavljeni tako da omogućavaju veću proizvodnju u periodima kada je cijena energije visoka, to može značajno doprinijeti većim prihodima od prodaje. Drugim riječima, da bi ukupan godišnji prihod od prodane električne energije bio maksimalan, ključno je da se solarni paneli orijentišu i postave na način koji omogućava optimalnu proizvodnju u skladu s tržišnim uslovima.

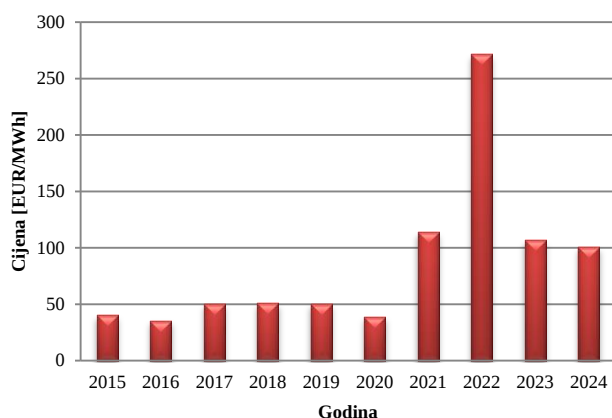
Metodologija za određivanje optimalne orijentacije solarnih panela s ciljem maksimizacije proizvodnje je dobro poznata, međutim, postoji mogućnost prilagodbe orijentacije ako je cilj optimizacije maksimizacija profita. U ovom radu su određeni nagibni i azimutalni uglovi solarnih panela koji rezultuju maksimalnim ukupnim godišnjim prihodom od prodaje proizvedene električne energije za period od 2015. do 2024. godine. Ova analiza uzima u obzir velike fluktuacije u cijenama električne energije koje su se desile tokom proteklih deset godina, kao i promjene u tržišnim uslovima koje su uticale na tržište električne energije.

II. DIJAGRAMI CIJENA ELEKTRIČNE ENERGIJE

U ovom poglavlju, predstavljene su određene vremenske zavisnosti cijena električne energije, pronađene na stranici HUPX-a [1].

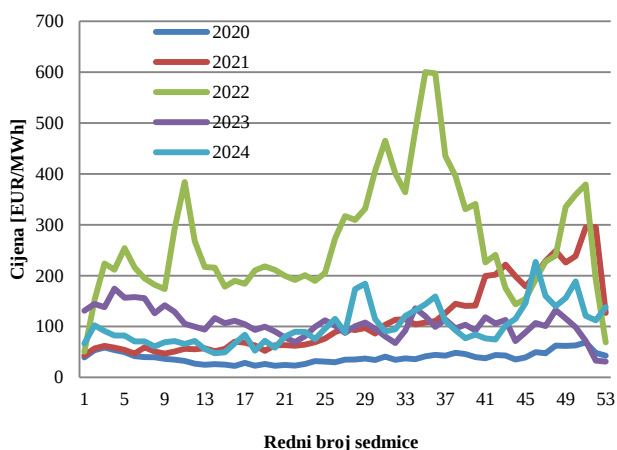
Na Sl. 1, prikazan je dijagram prosječnih godišnjih cijena električne energije, za period od 2015. do 2024. godine. Može se uočiti da postoje svega dvije vrijednosti cijena električne energije u datom periodu. Od 2015. do 2020. godine, sve do pojave pandemije, prosječna cijena se kretala u opsegu od oko 40 do 50 EUR/MWh. Već naredne godine nastupa drugi tip

cijene, koja iznosi oko 100 EUR/MWh. Izuzetak se javlja u 2022. godini, kada je cijena energije iznosila preko 250 EUR/MWh. Naglo poskupljenje električne energije od 2021. godine, najviše je posljedica lošeg geopolitičkog stanja u Evropi, povećane potražnje nakon pandemije, ali i ekonomskih oporavaka.



Sl. 1. Dijagram prosječnih godišnjih cijena električne energije

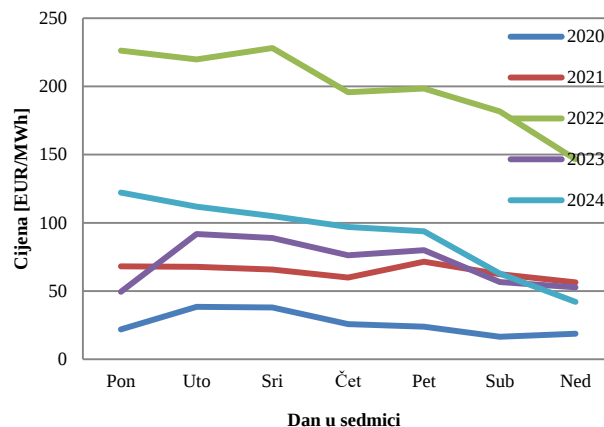
U cilju analize sezonskih promjena cijena električne energije na sedmičnom nivou, na Sl. 2 su prikazani grafici koji obuhvataju period od 2020. do 2024. godine. Iz prikazanih podataka jasno se uočava da su cijene električne energije najviše u zimskim i ljetnim mjesecima, odnosno početkom, sredinom i krajem godine. Ove oscilacije, prvenstveno su rezultat povećane potrošnje u tim periodima, zimi zbog potrebe za grijanjem, a ljeti zbog upotrebe rashladnih uređaja. Promjene u temperaturi i vremenskim uslovima značajno utiču na potražnju, a samim tim i na formiranje cijene električne energije.



Sl. 2. Grafik prosječnih sedmičnih cijena električne energije u periodu od 2020. do 2024. godine

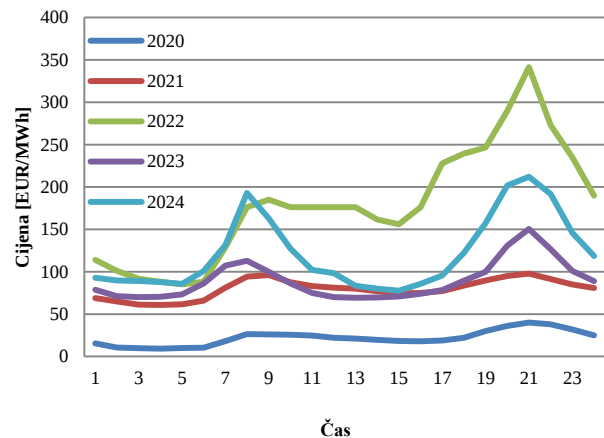
Na Sl. 3 prikazane su zavisnosti prosječnih dnevnih cijena električne energije unutar jedne sedmice, za isti vremenski period, pri čemu je odabrana prva sedmica mjeseca juna. Iz grafika se mogu uočiti karakteristične promjene cijena, tj.

činjenica da one uglavnom rastu početkom, dostižu vrhunac sredinom sedmice, a zatim postepeno opadaju prema vikendu. Najniže vrijednosti bilježe se tokom subote i nedjelje, kada je potrošnja električne energije smanjena, posebno u industrijskom i poslovnim sektoru.



Sl. 3. Grafik prosječnih dnevnih cijena električne energije u toku prve sedmice juna, u periodu od 2020. do 2024. godine

Časovna promjena cijene električne energije u toku jednog radnog dana, data je graphicima na Sl. 4, a kao primjer je odabran prvi ponedjeljak u mjesecu junu. Maksimalne vrijednosti cijena se javljaju u ranijim jutarnjim časovima i naveče, kada je potrošnja u domaćinstvima najveća, dok minimalne vrijednosti cijena nastupaju noću i sredinom dana.



Sl. 4. Grafik časovnih cijena električne energije za prvi ponedjeljak u junu, u periodu od 2020. do 2024. godine

III. METODOLOGIJA PRORAČUNA I ULAZNI PODACI

Proračun optimalnog nagibnog (Σ) i azimutalnog (ϕ_c) ugla je izvršen prema algoritmu prikazanom na Sl. 5.

Na početku simulacije, učitavaju se odgovarajući ulazni podaci. Vektor direktne komponente zračenja na normalnu podlogu, difuzne komponente na horizontalnu podlogu, te ambijentalne temperature, učitani su iz kalkulatora PVWatts američke Nacionalne laboratorije za obnovljivu energiju (eng. *National Renewable Energy Laboratory*) [2], i zasnivaju se na

podacima o tipičnoj meteorološkoj godini – TMY (eng. *Typical Meteorological Year*). Vektor jediničnih cijena električne energije (EUR/MWh) za datu godinu je preuzet sa stranice HUPX-a [1]. Pored toga, potrebno je unijeti i neophodne podatke fotonaponskog sistema, koji su prikazani u Tabeli 1.

TABELA 1. ULAZNI PODACI SIMULACIJE

Koeficijent refleksije zemljišta	0,2
Indeks prelamanja stakla panela	1,526
Nominalna radna temperatura ćelije (NOCT)	45°C
Temperaturni koeficijent snage panela	-0,348 %/°C
Nominalna AC snaga invertora	50 kW

U simulaciji se računa ukupan godišnji prihod od prodaje električne energije (C_{god}) na časovnom nivou, za svaku kombinaciju nagibnog i azimutalnog ugla. Pri tome, nagibni ugao se mijenja u opsegu od 0° do 90° (što odgovara horizontalnoj i vertikalnoj postavci panela), a azimutalni ugao u opsegu od -90° do 90° (što odgovara orijentaciji panela prema zapadu i istoku, respektivno).

Proračun časovne DC snage sistema vrši se prema izrazu [3], [4]:

$$P_{DC} = \frac{G_c}{1000} P_{DCn} (1 + \gamma (T_c - 25)), \quad (1)$$

gdje je G_c iradijansa na solarni panel, P_{DCn} nominalna DC snaga sistema, γ temperaturni koeficijent snage panela, a T_c temperatura ćelije, koja se računa kao u [5]. AC snaga na izlazu invertora, dobija se kao:

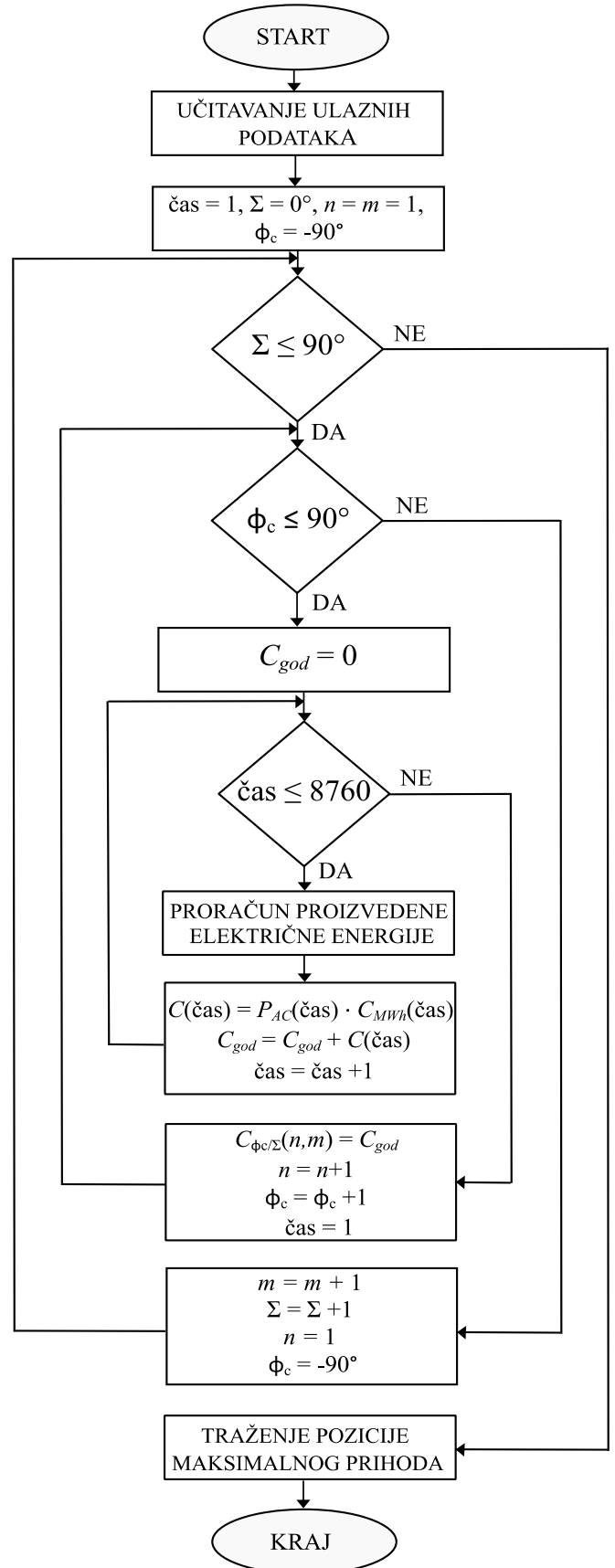
$$P_{AC} = \begin{cases} \eta P_{DC}, & 0 < P_{DC} < P_{DCn} \\ P_{DCn}, & P_{DC} > P_{DCn} \\ 0, & P_{DC} = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

pri čemu se stepen iskorištenja invertora η računa kao u [6].

Proračuni ukupnih godišnjih prihoda se upisuju u matricu $C_{\phi_c/\Sigma}$. Sa n i m su označeni pomoćni indeksi, koji predstavljaju broj vrsta i kolona konačne matrice prihoda:

$$C_{\phi_c/\Sigma}(n, m) = \begin{bmatrix} C_{-90^\circ/0^\circ} & \cdots & C_{-90^\circ/-90^\circ} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{90^\circ/0^\circ} & \cdots & C_{90^\circ/90^\circ} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

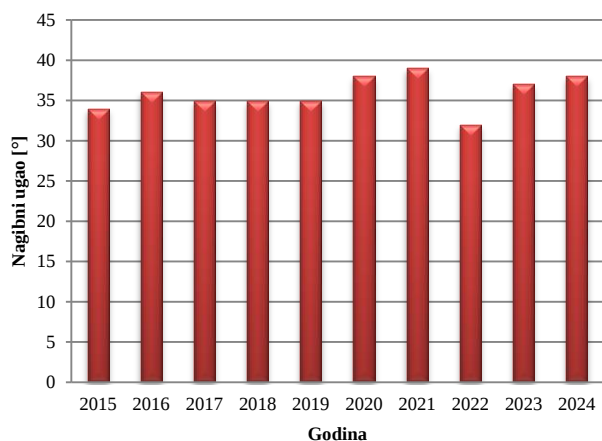
Prva vrsta matrice (3) odgovara prihodima za vrijednosti azimutalnog ugla od -90°, druga od -89°, itd. Slično, prva kolona matrice odgovara onim prihodima od prodaje električne energije koje se dobiju za nagib panela od 0°, itd. Prema tome, data matrica ima 181 vrstu i 91 kolonu. Program pronalazi najveću vrijednost matrice (3), te ispisuje njegovu poziciju (indekse n i m), na osnovu koje se lako mogu odrediti odgovarajući nagibni i azimutalni ugao panela, koji kao rezultat imaju maksimalan godišnji prihod.



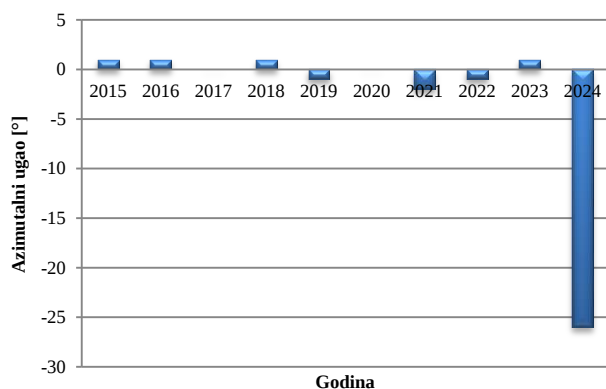
Sl. 5. Algoritam programa

IV. REZULTATI SIMULACIJE

Vrijednosti nagibnog i azimutalnog ugla solarnih panela za period od unazad deset godina, koji kao rezultat daju maksimalni godišnji prihod od prodaje proizvedene električne energije za grad Banjaluku, prikazani su na Sl. 6 i 7. Poznato je da se za ovaj grad dobija maksimalna godišnja proizvodnja energije pri nagibnom uglu od 34° i orijentaciji panela prema jugu, odnosno pri nultom azimutalnom uglu [7]. Prema Sl. 6, ugao nagiba panela se nalazi u opsegu od 32° do 39° , što je blisko nagibnom uglu pri maksimalnoj proizvodnji. Azimutalni ugao se, prema Sl. 7, kreće u opsegu od -2° do 1° , sa izuzetkom u 2024. godini, gdje dati ugao iznosi -26° . Ako se ova vrijednost odbaci, solarni paneli i pri maksimizaciji godišnjeg prihoda, treba da budu orijentisani prema jugu.

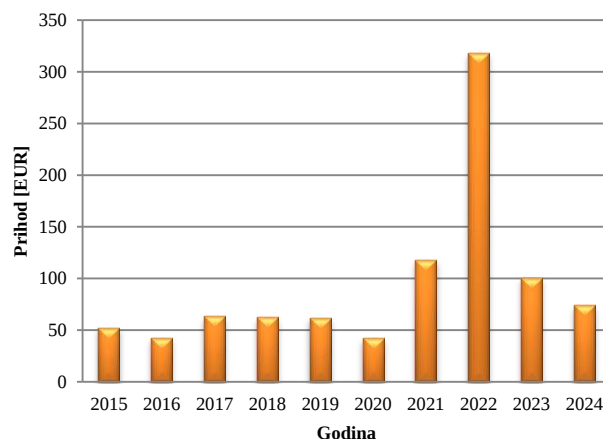


Sl. 6. Optimalni nagibni uglovi panela za postizanje maksimalnog godišnjeg prihoda od prodaje električne energije



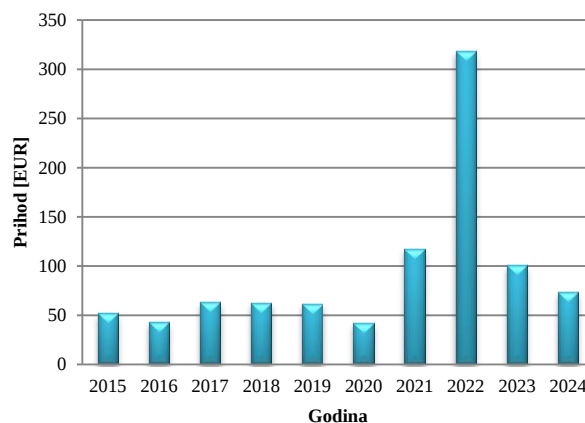
Sl. 7. Optimalni azimutalni uglovi panela za postizanje maksimalnog godišnjeg prihoda od prodaje električne energije

Ukupni godišnji prihodi od fotonaponskog sistema sa ulaznim podacima iz trećeg poglavlja, sa optimalnim uglovima panela sa Sl. 6 i 7, dati su na dijagramu na Sl. 8, pri čemu su prihodi dati po kWp instalisane snage. S obzirom na to da su vektori iradijansi za svaku godinu isti, a samim tim i proizvedena snaga sistema na časovnom nivou, očekivano je da će zavisnost godišnjeg prihoda biti ista kao i zavisnost cijena na Sl. 1.

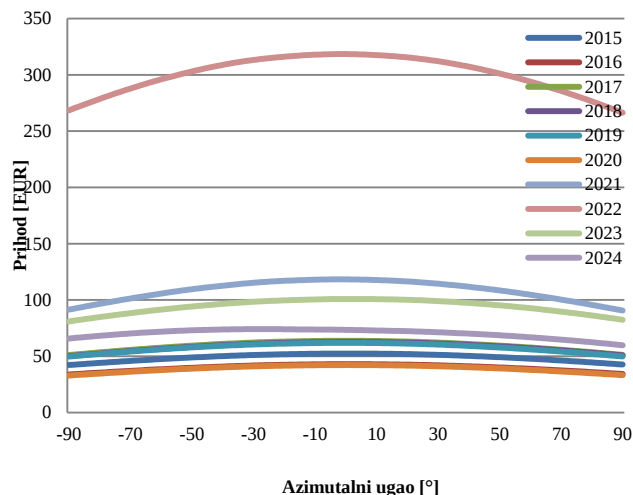


Sl. 8. Dijagram maksimalnih godišnjih prihoda po kWp instalisane snage fotonaponskog sistema

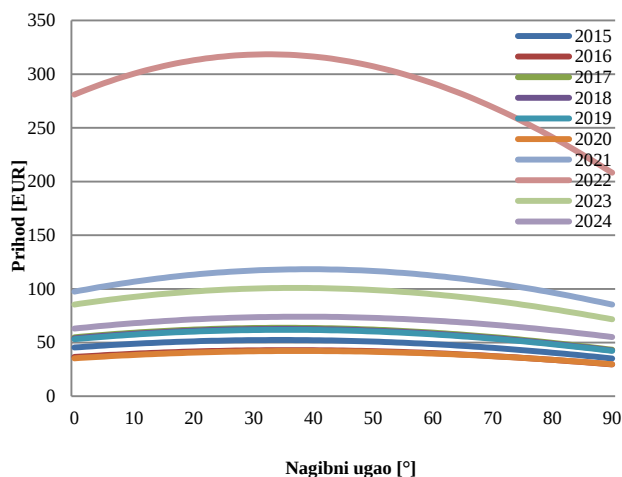
Pri nagibnom i azimutalnom uglu panela od 34° i 0° respektivno, godišnji prihodi su gotovo isti kao i pri orijentaciji panela u cilju maksimizacije prihoda (Sl. 6 i 7), što se može vidjeti na dijagramu na Sl. 9. Drugim riječima, proračun je pokazao da orijentacija panela koja ostvaruje najveću proizvodnju energije donosi neznatno manji godišnji prihod u odnosu na orijentacije koje omogućavaju najveću zaradu.

Sl. 9. Dijagram godišnjih prihoda po kWp instalisane snage fotonaponskog sistema, za $\Sigma = 34^\circ$ i $\phi_c = 0^\circ$

Iako vrijednost azimutalnog ugla na Sl. 7 u 2024. godini mnogo odstupa od preostalih devet, razlika u vrijednosti prihoda pri datom azimutalnom uglu, i azimutalnom uglu koji omogućava maksimalnu proizvodnju je gotovo neprimjetna. Naime, pokazuje se da je godišnji prihod približno konstantan u opsegu azimutalnog ugla od oko -30° do 30° , što je prikazano graficima na Sl. 10, pri konstantnim nagibnim uglovima kao na Sl. 6. Sa druge strane, pri konstantnim azimutalnim uglovima sa Sl. 7, promjena vrijednosti prihoda je vrlo mala, u opsegu nagibnog ugla od oko 30° do 40° (Sl. 11).



Sl. 10. Godišnji prihodi po kWp instalisane snage fotonaponskog sistema u funkciji azimutalnog ugla, pri optimalnim nagibnim uglovima dobijenim u simulaciji



Sl. 11. Godišnji prihodi po kWp instalisane snage fotonaponskog sistema u funkciji nagibnog ugla, pri optimalnim azimutalnim uglovima dobijenim u simulaciji

V. ZAKLJUČAK

U radu je određena optimalna orijentacija solarnih panela za grad Banjaluku, sa ciljem ostvarenja maksimalnog godišnjeg profita na bazi tržišnih cijena električne energije.

Na osnovu podataka sa sajta mađarske berze HUPX, pokazano je da cijena električne energije varira u zavisnosti od više faktora: vremenskih uslova, geopolitičkog stanja, te ponude i potražnje u datom trenutku. Određivanjem optimalnog nagibnog i azimutalnog ugla za period od unazad deset godina, uzeta je u obzir i potencijalna osjetljivost njihovih vrijednosti na promjenu cijene u toku godine. Kao rezultat, dobijeno je da solarne panele treba orijentisati prema

jugu, pod nagibom u prosjeku od oko 35° u odnosu na zemlju. Drugim riječima, orijentacijom panela tako da se postigne približno maksimalna godišnja proizvodnja električne energije, ujedno se postiže i maksimalan profit od njene prodaje, s obzirom na trenutno stanje cijena energije na tržištu. Isto tako, orijentacijom panela tako da se ostvari maksimalna godišnja proizvodnja električne energije, ostvariće se približno i maksimalan godišnji prihod od prodaje energije. Pored toga, pokazano je da vrijednost godišnjeg prihoda biva približno konstantna, za azimutalne uglove vrijednosti u opsegu od oko -30° do 30° , te za nagibne uglove od oko 30° do 40° . Odnosno, promjenom ovih uglova, pad proizvodnje se kompenzuje cijenom električne energije. Na kraju, optimalni nagibni i azimutalni uglovi dobijeni u simulaciji, nalaze se u uskom opsegu vrijednosti, bez obzira na veliku promjenu stanja na berzi.

LITERATURA

- [1] HUPX - Hungarian Power Exchange, <https://hupx.hu/en/>, posjećeno: 1.2.2025.
- [2] NREL - National Renewable Energy Laboratory, PVWatts Calculator, <https://pvwatts.nrel.gov/>, posjećeno: 1.2.2025.
- [3] Č. Zeljković, P. Mršić, B. Erceg, "Metod za određivanje uticaja prepreka na godišnju proizvodnju fotonaponskih sistema", III naučno stručni simpozijum Energetska efikasnost - ENEF 2017, novembar, 2017.
- [4] A. P. Dobos, PVWatts Version 5 Manual, Technical Report, National Renewable Energy Laboratory, September 2014.
- [5] M. K. Fuentes, A Simplified Thermal Model for Flat-Plate Photovoltaic Array, SAND85-0330, Sandia National Laboratory, Albuquerque, 1987.
- [6] V. Kajtez, P. Mršić, Č. Zeljković, "Određivanje optimalnog odnosa instalisane snage fotonaponskih panela i instalisane snage invertora", V naučno stručni simpozijum Energetska efikasnost - ENEF 2023, april, 2023.
- [7] Č. Zeljković, "Obnovljivi izvori energije: solarna energetika", Elektrotehnički fakultet, Banja Luka, Akademska misao, Beograd, 2018.

ABSTRACT

The paper analyzes the optimal orientation of solar panels for the city of Banja Luka, with the aim of maximizing the annual income from the sale of generated electricity. The geometric and energy characteristics of the photovoltaic system are represented using appropriate mathematical models. The annual energy production was estimated based on typical meteorological year data, while market electricity prices were obtained from the Hungarian power exchange website. Using computer simulations, total annual income from electricity sales were calculated for all meaningful combinations of panel tilt and azimuth angles, in order to identify the angle values that yield the highest income. The calculation was performed for the past ten years to also analyze the impact of market price variations.

OPTIMAL ORIENTATION OF SOLAR PANELS FOR MAXIMIZING INCOME BASED ON MARKET PRICES

Emilija Mrđen, Predrag Mršić, Čedomir Zeljković