Broj rada: R4-13
DOI:10.46793/CIRED2026.R4-13_134

OPTIMALNA ORIJENTACIJA FOTONAPONSKIH PANELA U USLOVIMA NESIMETRIČNE RASPODELE SOLARNE IRADIJANSE U TOKU DANA

OPTIMAL ORIENTATION OF PHOTOVOLTAIC PANELS IN THE PRESENCE OF ASYMMETRIC DISTRIBUTION OF SOLAR IRRADIANCE DURING THE DAY

Nikola KRSTIĆ, Elektronski fakultet u Nišu, Srbija*
Dragan TASIĆ, Elektronski fakultet u Nišu, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

U radu je razmatran uticaj nesimetrične raspodele solarne iradijanse u toku dana na optimalnu orijentaciju fotonaponskih (PV) panela sa aspekata maksimizacije solarne iradijanse na njihovoj površini i proizvodnje električne energije. Nesimetrična raspodela solarne iradijanse u toku dana podrazumeva nejednake vrednosti solarne iradijanse u prepodnevnim i popodnevnim časovima, jednako udaljenih u odnosu na podne, dok je optimalna orijentacija određena optimalnim nagibnim i optimalnim azimutnim uglom PV panela. Uticaj temperature na snagu PV panela je uvažen prilikom određivanja optimalne orijentacije PV panela u cilju maksimizacije proizvedene električne energije. Za proračun solarne iradijanse korišćen je model koji uvažava realne uslove oblačnosti, pri čemu su difuzna i reflektovana komponenta solarne iradijanse na površini PV panela određene korišćenjem izotropnog cilindričnog modela. Optimalne vrednosti nagibnog i azimutnog ugla PV panela određene su pomoću metaheurističke optimizacione metode divljih konja (WHO). Za generisanje rezultata korišćeni su različiti nesimetrični dijagrami solarne iradijanse, kao i podaci o solarnoj iradijansi preuzeti iz baze podataka PVGIS-SARAH3.

Ključne reči: azimutni ugao PV panela, metaheuristička optimizaciona metoda divljih konja (WHO), model realnih uslova oblačnosti, nagibni ugao PV panela, solarna iradijansa

ABSTRACT

The paper considers the influence of the asymmetric distribution of solar irradiance during the day on the optimal orientation of photovoltaic (PV) panels from the aspects of maximizing solar irradiance on their surface and electricity production. The asymmetric distribution of solar irradiance during the day implies unequal values of solar irradiance in the morning and afternoon hours, equidistant from noon, while the optimal orientation is determined by the optimal tilt and optimal azimuth angle of the PV panel. The influence of temperature on the power of the PV panels is considered when determining the optimal orientation of the PV panels in order to maximize the produced electricity. For the calculation of solar irradiance, a real cloudy conditions model is used, whereby the diffuse and reflected components of solar irradiance on the surface of the PV panel are determined using an isotropic cylindrical model.

* Nikola Krstić nikola.krstic@elfak.ni.ac.rs; Dragan Tasić dragan.tasic@elfak.ni.ac.rs

The optimal values of tilt and azimuth angle of the PV panels are determined using the meta-heuristic wild horse optimization method (WHO). Different asymmetric solar irradiance diagrams and data taken from the PVGIS-SARAH3 database are used to generate the results.

Keywords: Azimuth angle of PV panels, Meta-heuristic wild horse optimization method (WHO), Real cloudy conditions model, Solar irradiance, Tilt angle of PV panels

UVOD

Sunčevo zračenje kao najveći izvor energije na zemlji, predstavlja neizostavan element u energetskoj tranziciji zemene konvencionalnih izvora na bazi fosilnih goriva obnovljivim izvorima energije. Pored toga što je ekološki čista, raspoloživa i globalno prisutna, prednost energije sunčevog zračenja je i u tome što se može direktno pretvoriti u električnu energiju korišćenjem fotonaponskih (PV) panela. Princip rada PV panela se zasniva na fotoelektričnom efektu, pa količina proizvedene električne energije panela dominantno zavisi i proporcionalna je energiji sunčevog zračenja koje padne na panel [1]. Sa druge strane, strujno-naponska karakteristika a time i snaga koju može generisati PV panel u određenoj meri zavisi i od njegove temperature, pri čemu porast temperature ima negativni efekat na proizvodnju. S tim u vezi, preduslov za maksimizaciju proizvodnje električne energije PV panela jeste maksimizacija solarne insolacije na površini panela uz minimizaciju temperature panela [2]. Ovo se postiže optimalnom orijentacijom PV panela koja podrazumeva optimalne vrednosti nagibnog i azimutnog ugla panela [3].

Pored samog intenziteta optimalna orijentacija PV panela zavisi i od alitudnog i azimutnog ugla pod kojim sunčevo zračenje pada na površinu zemlje u toku dana. U najvećem broju radova koji se bave optimalnom orijentacijom PV panela usvojena je južna orijentacija panela sa nultim aziutnim uglom [4-5], s obzirom na izraženu simetriju između solarnih iradijansi u prepodnevni i poslepodnevnim časovima. Imajući ovo u vidu, osnovna ideja u radu je sagledati uticaj nesimetričnih raspodela solarne iradijanse u toku dana na optimalnu orijentaciju PV panela [6-7], gde bi kao glavni doprinos rada bilo određivanje zavisnosti optimalnog nagibnog i azimutnog ugla panela od nivoa i tipa nesimetrije. Potrebno je naglasiti da se u radu pod nesimetričnom raspodelom solarne iradijanse podrazumevaju nejednake vrednosti solarnih iradijansi koje dospevaju na površinu zemlje u prepodnevnim i poslepodnevnim časovima jednako udaljenih od podneva, kao posledica neravnomerne oblačnosti u toku dana. Za kvantifikaciju nesimetrije raspodele solarne iradijanse u toku dana je korišćen faktor nesimetrije solarne iradijanse.

Određivanje optimalnih vrednosti nagibnog i azimutnog ugla PV panela u radu je ostvareno korišćenjem metaheurističke optimizacione metode divljih konja (WHO) [8-9], imajući u vidu efikasnost i široku primenu metaheurističkih optimizacionih metoda u rešavanju različitih optimizacionih problema. Konkretno, WHO je izabran kao novija optimizaciona metoda koja kombinuje principe optimizacionih metoda roja čestica i genetskog algoritma, kao osnovnih metaheuristika [10]. Nalaženje rešenja optimizacionog problema optimalne orijentacije PV panela WHO ostvaruje maksimizacijom kriterijumske funkcije definisane preko solarne insolacije na površini PV panela u posmatranom periodu uz uvažavanje uticaja temperature [11].

Solarna iradijansa na površini PV panela je određena korišćenjem modela realnih uslova oblačnosti na osnovu podataka o ukupnoj solarnoj iradijansi na horizontalnoj površini [1].

Pomenuti model je izabran jer uvažava uticaj oblačnosti na vrednost solarne iradijanse, koji je ujedno i osnovni uzrok nastanka nesimetrične raspodele solarne iradijanse u toku dana. U okviru pomenutog modela difuzna komponenta solarne iradijanse na horizontalnoj površini je određena na osnovu poznate *Liu-Jordan-ove* relacije, dok su difuzna i reflektovana komponenta solarne iradijanse na površini PV panela određene korišćenjem cilindričnog izotropnog modela [12]. Prilikom određivanja solarne iradijanse na površini PV panela zanemaren je uticaj delimičnog zasenčenja i usvojena je pretpostavka o uniformnoj raspodeli solarne iradijanse. Uticaj temperature je uvažen preko temperaturnog koeficijenta za promenu snage PV panela, dok je sama temperatura PV panela određena na osnovu ambijentalne temperature i solarne iradijanse na površini panela [13].

Na kraju rada su prikazani rezultati dobijeni korišćenjem dnevnih dijagrama solarne iradijanse za svaki mesec u godini uvažavajući različite faktore nesimetrije. Podaci o ukupnoj solarnoj iradijansi na horizontalnoj površini i ambijentalnoj temperaturi, neophodni za proračun, su preuzeti iz PVGIS-SARAH3 baze podataka za teritoriju grada Niša. Kako bi se kvantifikovalo povećanje proizvedene električne energije PV panela, upoređeni su rezultati generisani u slučaju optimalne orijentacije PV panela sa rezultatima koji se dobijaju u slučaju južne orijentacije panela sa optimalnim nagibnim uglom.

2 ODREĐIVANJE SOLARNE IRADIJANSE NA POVRŠINI PV PANELA

Solarna iradijansa na površini PV panela je određena korišćenjem modela koji uvažava realne uslove oblačnosti. Nivo oblačnosti je u modelu opisan indeksom vedrine K_T, koji se određuje kao odnos solarne iradijanse na horizontalnoj površini zemlje I_H i ekstraterestričke solarne iradijanse na horizontalnoj površini:

$$K_T = \frac{I_H}{I_{0H}}. \tag{1}$$

Solarna iradijansa na horizontalnoj površini zemlje zavisi od stepena oblačnosti i dobija se na osnovu odgovarajućih merenja. Uzimajući u obzir da oblačnost ima stohastički karakter, u cilju povećanja relevantnosti i tačnosti dobijenih rezultata solarna iradijansa na horizontalnoj površini je najčešće predstavljena preko svojih srednjih dnevnih ili srednjih jednočasovnih vrednosti usrednjenih na mesečnom nivou. Konkretno, u ovom radu su korišćene srednje jednočasovne vrednosti na mesečnom nivou preuzete iz PVGIS-SARAH3 baze podataka. Za razliku od solarne iradijanse na horizontalnoj površini zemlje, za izračunavanje ekstraterestričke solarne iradijanse na horizontalnoj površini nisu potrebna merenja već se njena srednja vrednost u h −tom satu može odrediti kao:

$$I_{0H}(h) = \frac{12}{\pi} I_0 [\cos L \cos\delta \left(\sin((h-12)\frac{\pi}{12}) - \sin((h-13)\frac{\pi}{12})\right) + \frac{\pi}{12} \sin L \sin\delta], \tag{2}$$

gde je L geografska širina posmatrane lokacije, I_0 ekstraterestrička iradijansa, a δ solarna deklinacija. Potrebno je nagasiti da su uglovi u (2) izraženi u radijanima i da su od značaja samo sati u kojima izraz (2) ima pozitivnu vrednost, jer je tada solarna iradijansa na horizontalnoj površini zemlje različita od nule. Ekstraterestrička solarna iradijansa se može odrediti na osnovu solarne konstante ($I_{SC} = 1367\ W/m^2$) i rednog broja dana u godini n, koristeći izraz:

$$I_0 = I_{SC}(1 + 0{,}034 \cdot \cos\frac{360° \cdot n}{365}), \tag{3}$$

Solarna deklinacija takođe zavisi od rednog broja dana u godini i može se izračunati kao:

$$\delta = 23{,}45° \cdot \sin\left(\frac{360°}{365}(n - 81)\right) \tag{4}$$

Potrebno je istaći da su u proračunu solarne iradijanse pa time i u (2) korišćene srednje mesečne vrednosti ekstraterestričke solarne iradijanse i solarne deklinacije.

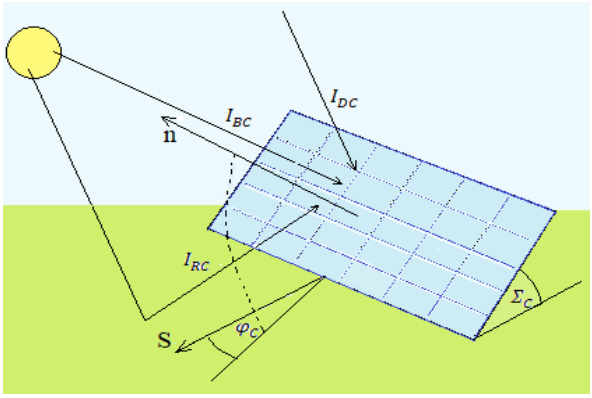
Sada, na osnovu dobijenih vrednosti za indeks vedrine, korišćenjem *Liu-Jordan-ove* relacije može se odrediti odnos difuzne komponente I_{DH} i ukupne solarne iradijanse na horizontalnoj površini I_H kao:

$$\frac{I_{DH}}{I_H} = 1{,}39 - 4{,}027K_T + 5{,}53K_T^2 - 3{,}108K_T^3, \tag{5}$$

Imajući u vidu da reflektovana komponenta ne postoji na horizontalnoj površini, direktna komponenta solarne iradijanse na horizontalnoj površini I_{BH} se može jednostavno odrediti kao:

$$I_{BH} = I_H - I_{DH} \tag{6}$$

Kada su poznate direktna i difuzna komponenta solarne iradijanse na horizontalnoj površini moguće je odrediti i solarnu iradijansu na površini PV panela postavljenog pod nagibnim uglaom Σ_C i azimutnim uglom φ_C kao na slici 1.



Slika 1 – PV panel postavljen pod nagibnim uglom Σ_C i azimutnim uglom φ_C

Solarna iradijansa na površini PV panela I_C se sastoji od direktne I_{BC}, difuzne I_{DC} i reflektovane komponente I_{RC}, što je predstavljeno izrazom:

$$I_C = I_{BC} + I_{DC} + I_{RC} \tag{7}$$

Uvažavajući orijentaciju PV panela direktna komponenta solarne iradijanse na njegovoj površini se na osnovu faktora nagiba te površine R_B može odrediti pomoću izraza:

$$I_{BC} = R_B I_{BH} \tag{8}$$

Faktor nagiba se na osnovu upadnog ugla sunčevog zračenja na površinu PV panela θ i altitudnog ugla sunca β definiše kao:

$$R_B = \frac{\cos\theta}{\sin\beta} \tag{9}$$

Upadni ugao sunčevog zračenja na površinu PV panela se dobija na osnovu izraza:

$$\cos\theta = \cos\beta\cos(\varphi_S - \varphi_C)\sin\Sigma_C + \sin\beta\cos\Sigma_C \tag{10}$$

Azimutni φ_S i altitudni ugao sunca β se na osnovu geografske širine L, solarne deklinacije δ i časovnog ugla sunca H mogu odrediti pomoću relacija:

$$\sin\beta = \cos L\cos\delta\cos H + \sin L\sin\delta, \tag{11}$$

$$\sin\varphi_S = \frac{\cos\delta\sin H}{\cos\beta}, \tag{12}$$

$$\cos\varphi_S = \frac{\sin L\cos\delta\cos H - \cos L\sin\delta}{\cos\beta}, \tag{13}$$

Altitudni ugao je po definiciji između -90° i 90°, tako da je dovoljno poznavati sinusnu funkciju ovog ugla kako bi se odredila njegova vrednost. Imajući u vidu da je potrebno naći srednje jednočasovne vrednosti za faktor nagiba, u izrazima (11), (12) i (13) korišćen je srednji časovni ugao sunca čija vrednost u h-tom satu je određena kao:

$$H(h) = (h - 12)\cdot 15° - 7{,}5°, \tag{14}$$

Kada je poznata direktna komponenta, potrebno je još odrediti difuznu i reflektovanu komponentu solarne iradijanse na površini PV panela. Ovo je ostvareno korišćenjem cilindričnog izotropnog modela u kome se pretpostavlja da difuzno i reflektovano zračenje dolaze podjednako iz svih pravaca u cilindričnom koordinatnom sistemu. Naravno, zbog prirode ovih zračenja podrazumeva se da su pomenuti pravci za difuzno zračenje oni koji idu od neba ka zemlji, dok su za reflektovano zračenje to svi pravci od zemlje ka nebu.

Difuzno zračenje na nekoj površini se smanjuje povećanjem njenog nagibnog ugla usled nemogućnosti da pomenuto zračenje dospe na posmatranu površinu iz određenih pravaca. Imajući u vidu navedeno, difuzna komponenta solarne iradijanse na površini PV panela postavljenog pod nagibnim uglom Σ_C se analitički može izraziti kao:

$$I_{DC} = \frac{1+\cos\Sigma_C}{2} I_{DH}, \tag{15}$$

gde difuzna komponenta solarne iradijanse na horizontalnoj površini I_{DH} ujedno predstavlja i maksimalnu vrednost difuznog zračenja.

Sa druge strane, reflektovano zračenje na nekoj površini se povećava sa njenim nagibnim uglom usled povećanja pravaca iz kojih ono može dospeti na posmatranu površinu. Pored nagibnog ugla, reflektovano zračenje na nekoj površini zavisi i od reflektivnih svojstva podloge na kojoj se posmatrana površina nalazi, opisanih koeficijentom refleksije ρ. Uzimajući u obzir navedeno, reflektovana komponenta solarne iradijanse na površini PV panela postavljenog pod nagibnim uglom Σ_C se može odrediti na osnovu izraza:

$$I_{RC} = \rho\frac{1-\cos\Sigma_C}{2} I_H, \tag{16}$$

Za razliku od difuzne komponente, maksimalna vrednost reflektovane komponente solarne iradijanse se dobija u slučaju postavljanja PV panela pod pravim uglom i ona kod jednostranih (monofacijalnih) PV panela iznosi polovinu ukupnog reflektovanog zračenja (16). Kako reflektovano zračenje ide od zemlje ka nebu, reflektovana komponenta solarne iradijanse na

površini horizontalno postavljenih panela je jednaka nuli, što se takođe može zaključiti na osnovu izraza (16).

3 ODREĐIVANJE PROIZVEDENE ELEKTRIČNE ENERGIJE PV PANELA

Proizvedena električna energija PV panela dominantno zavisi od solarne iradijanse na površini panela u posmatranom periodu. Kako bi se ova zavisnost pojednostavila i linearizovala u ovom radu je izvršena pretpostavka o ravnomernoj raspodeli solarne iradijanse na površini PV panela. Uz navedenu pretpostavku, u radu se podrazumeva da PV panel sve vreme radi u tački maksimalne snage. Uzimajući u obzir navedeno, ostvaruje se praktično linearna zavisnost između solarne iradijanse na površini PV panela I_C i snage koju taj panel generiše P_C:

$$P_C = cI_C, \tag{17}$$

gde c predstavlja koeficijent proporcionalnosti između solarne iradijanse i snage PV panela.

Uticaj temperature PV panela na njegovu snagu proizvodnje je uvažen preko temperaturnog koeficijenta promene snage PV panela k_P. Imajući ovo u vidu, a uvažavajući (17), snaga PV panela na temperaturi θ_C i solarnoj iradijansi I_C se može odrediti na osnovu izraza:

$$P_C(I_C, \theta_C) = cI_C(1 + k_P(25 - \theta_C)), \tag{18}$$

U (18) temperatura PV panela θ_C je izražena u ℃. Temperatura PV panela dominantno zavisi od ambijentalne temperature θ_a i solarne iradijanse na površini panela, što je dato izrazom:

$$\theta_C = \theta_a + \frac{NOCT-20}{800} I_C, \tag{19}$$

gde je $NOCT$ normalna radna temperatura ćelije PV panela izražena u ℃ (temperatura PV ćelije u slučaju ambijentalne temperature od 20℃ i solarne iradijanse od 800 W/m^2), dok je solarna iradijansa PV panela izražena u W/m^2.

Električna energija koju PV panel proizvode W_C se može odrediti kao zbir srednjih jednočasovnih snaga PV panela u razmatranom vremenskom periodu, što je predstavljeno izrazom:

$$W_C = \sum_{h=1}^{N_h} cI_{Ch}(1 + k_P(25 - \theta_{Ch})), \tag{20}$$

gde su I_{Ch} i θ_{Ch} srednje jednočasovne vrednosti solarne iradijanse i temperature PV panela u h-tom satu, respektivno, dok je N_h ukupan broj sati u razmatranom vremenskom periodu.

Interesantno je videti do koje vrednosti solarne iradijanse proizvodnja PV panela raste, imajući u vidu da rast solarne radijanse takođe povećava temperaturu (19) koja negativno utiče na proizvodnju PV panela (18). Uvažavanjem (19) u (18) može se dobiti zavisnost snage PV panela od solarne iradijanse na njegovoj površini:

$$P_C(I_C) = c\big(1 + k_P(25 - \theta_a)\big)I_C - ck_P \frac{NOCT-20}{800} I_C^2, \tag{21}$$

Izjednačavanjem prvog izvoda snage PV panela iz (21) po solarnoj iradijansi, dobija se teorijska vrednost solarne iradijanse $\hat{I}_C$ pri kojoj panel proizvodi maksimalnu snagu:

$$\hat{I}_C = \frac{1+k_P(25-\theta_a)}{k_P(NOCT-20)} \cdot 400, \tag{22}$$

Povećanjem solarne iradijanse iznad vrednosti iz (22) dovodi do smanjenja proizvodnje PV panela, jer tada negativan uticaj temperature postaje dominantan.

4 ODREĐIVANJE OPTIMALNE ORIJENTACIJE PV PANELA

Određivanje orijentacije PV panela podrazumeva određivanje nagibnog i azimutnog ugla PV panela od kojih orijentacija panela zavisi. Izuzetno je važno odrediti pravilnu orijentaciju PV panela jer od nje zavisi solarna iradijansa na površini panela, a time i energija koju panel generiše (20). Za određivanje optimalne orijentacije PV panela u cilju maksimizacije proizvedene električne energije u ovom radu je korišćena metaheuristička optimizaciona metoda WHO.

4.1 Optimizaciona metoda divljih konja

WHO predstavlja populacionu metaheurističku optimizacionu metodu inspirisanu načinom života divljih konja u prirodi. Uzimajući ovo u obzir, četiri osnovna koraka u WHO su zasnovana na četiri karakteristična ponašanja divljih konja u prirodi, uključujući ispašu, parenje, vođenje grupe i odabir pastuva koji će biti vođa grupe. Pre ovih četiri koraka koji se sukcesivno ponavljaju kroz iteracije, postoji inicijalni korak stvaranja grupa. Naime, na početku optimizacione metode celokupna populacija divljih konja se deli na grupe sa jednakim brojem jedinki i jednim pastuvom, vođom grupe. Pastuv iliti vođa grupe predstavlja jedinku sa najboljom vrednošću kriterijumske funkcije u toj grupi.

Prvi korak u svakoj iteraciji WHO analitički opisuje kretanje divljih konja tokom ispaše. Ovo kretanje se odvija u okviru kruga u čijem se centru nalazi pastuv i dato je izrazom:

$$\vec{H}'_{i,j} = A\cos(r\pi)\left(\vec{S}_j - \vec{H}_{i,j}\right) + \vec{S}_j, \tag{23}$$

gde su $\vec{H}_{i,j}$ i $\vec{H}'_{i,j}$ vektori upravljačkih veličina i-te jedinke u j-toj grupi, pre i nakon ispaše, $\vec{S}_j$ je vektor upravljačkih veličina pastuva j-te grupe, r predstavlja nasumičan broj iz intervala $[0,1]$, dok je A poluprečnik kruga u kojem se odvija kretanje, čija se vrednost u k-toj iteraciji $A(k)$ može odrediti na osnovu izraza:

$$A(k) = A_{max} - \frac{k-1}{N_k-1}(A_{max} - A_{min}), \tag{24}$$

pri čemu su A_{max} i A_{min} maksimalna i minimalna vrednost poluprečnika kruga koje je imaju na početku i kraju optimizacione metode, respektivno, dok je N_k ukupan broj iteracija.

Drugi korak WHO opisuje proces parenja divljih konja, gde dolazi do ukrštanja njihovih gena i stvaranja nove jedinke. U procesu parenja učestvuje pastuv i jedinka iz različitih grupa divljih konja kako bi se očuvala raznolikost genetskog materijala celokupne populacije. Imajući ovo u vidu, kao i činjenicu da je u ovom radu korišćeno aritmetičko ukrštanje, vektor upravljačkih veličina novonastale jedinke u i-toj grupi $\vec{H}_i^*$ se može odrediti kao:

$$\vec{H}_i^* = \frac{\vec{H}_i + \vec{S}_j}{2}, \qquad i \neq j \tag{25}$$

gde je $\vec{H}_i$ jedinka iz i-te grupe, a $\vec{S}_j$ pastuv iz j-te grupe koji učestvuju u procesu parenja. Potrebno je naglasiti da se proces parenja dešava sa određenom verovatnoćom, tako da ne obuhvata sve jedinke u populaciji. Takođe, postoji i verovatnoća da novonastala jedinka napusti majčinu i pridružiti se nekoj drugoj grupi.

U trećem koraku optimizacione metode opisan je proces vođenja grupe od strane pastuva do obližnjeg pojila, u kome se pastuv takmiči sa pastuvima iz ostalih grupa za što bolje mesto na pojilu. Kretanje pastuva u ovom koraku WHO se analitički može predstaviti sledećim izrazom:

$$\vec{S}_i' = A\cos(r\pi)\left(\overrightarrow{WH} - \vec{S}_i\right) + \overrightarrow{WH} \tag{26}$$

U izrazu (26) $\vec{S}_i$ i $\vec{S}_i'$ su vektori upravljačkih veličina pastuva u i-toj grupi, pre i nakon vođenja grupe do pojila koje je predstavljeno vektorom upravljačkih veličina $\overrightarrow{WH}$. Potrebno je naglasiti da pojilo predstavlja lokaciju na najboljom vrednošću kriterijumske funkcije koju je populacija divljih konja pronašla do tada.

Četvrti i poslednji korak u WHO je odabir vođa svake od grupa divljih konja u populaciji. Naime, promena pozicije pastuva i jedinki u grupi, kao i stvaranje novonastalih jediniki u okviru prethodnih koraka optimizacione metode dovodi do situacije u kojoj je potrebno ponovo odrediti vođu grupe. Ovo je izvršeno upoređivanjem vrednosti kriterijumskih funkcija jedinki u grupi, pri čemu se za vođu, odnosno pastuva grupe bira ona jedinka koja ima najbolju vrednost kriterijumske funkcije.

4.2 Definisanje i rešavanje optimizacionog problema

Optimizacioni problem određivanja optimalne orijentacije PV panela u cilju maksimizacije njegove proizvodnje predstavlja nelinearni optimizacioni problem sa ograničenjima. Nelinearnost proizilazi iz nelinearne zavisnosti proizvedene energije od nagibnog i azimutnog ugla PV panela, dok ograničenja predstavljaju granične vrednosti pomenutih uglova. Kako orijentacija PV panela zavisi od njegovog nagibnog Σ_C i azimutnog ugla φ_C, ovi uglovi su ujedno i upravljačke veličine u optimizacionom problemu, čija su ograničenja data izrazima:

$$0° \leq \Sigma_C \leq 90°, \tag{27}$$

$$-90° \leq \varphi_C \leq 90°, \tag{28}$$

Ograničenje za nagibni ugao (27) je određeno imajući u vidu mogući opseg u kome se mogu kretati vrednosti ovog ugla, dok je ograničenje za azimutni ugao (28) definisano uzimajući u obzir da je lokacija PV panela na severnoj hemisferi. Takođe, negativne vrednosti azimutnog ugla odgovaraju okretanju PV panel ka istoku, pozitivne vrednosti se odnose na okretanje ka zapadu, dok je nulta vrednost azimutnog ugla u slučaju južne orijentacije panela.

S obzirom da je cilj optimizacije maksimizacija proizvedene električne energije PV panela, korišćena je jednoparametarska kriterijumska funkcija CF jednaka negativnoj vrednosti proizvedene energije panela:

$$CF = -W_C, \tag{29}$$

Negativan predznak ispred energije u (29) je uvažen kako bi se minimizacijom kriterijumske funkcije našlo rešenje optimizacionog problema.

Rešavanje optimizacionog problema je ostvareno korišćenjem populacione metaheurističke optimizacione metode WHO, pri čemu svaka jedinka u populaciji predstavlja vektor upravljačkih veličina i potencijalno rešenje optimizacionog problema. S obzirom na broj upravljačkih veličina pomenuti vektor ima dve koordinate čije su početne vrednosti nasumično određene i za i-tu jedinku iznose:

$$CV_i(1) = \Sigma_{Cmin} + r(\Sigma_{Cmax} - \Sigma_{Cmin}), \quad i = 1,2, \dots N_j \tag{30}$$

$$CV_i(2) = \varphi_{Cmin} + r(\varphi_{Cmax} - \varphi_{Cmin}), \quad i = 1,2, \dots N_j \tag{31}$$

gde su $CV_i(1)$ i $CV_i(2)$ prva i druga koordinata vektora upravljačkih veličina i-te jedinke, N_j ukupan broj jedinki u populaciji, r nasumičan realan broj iz intervala $[0,1]$, dok su Σ_{Cmin}, Σ_{Cmax}, φ_{Cmin} i φ_{Cmax} pretpostavljene minimalne i maksimalne vrednosti nagibnog i azimutnog ugla PV panela u okviru opsega određenih ograničenjima (27) i (28). Nakon inicijalizacije sprovedeni su pomenuti koraci u okviru WHO kojima se menja vrednost koordinata jedinki u populaciji tako da se minimizuju vrednosti kriterijumskih funkcija jedinki. Nakon izvršenja pomenutog postupka u dovoljnom broju iteracija, jedinka sa minimalnom vrednošću kriterijumske funkcije predstavlja rešenje optimizacionog problema. Dovoljan broj iteracija je onaj broj iteracija posle koga se promena kriterijumske funkcije najbolje jedinke može zanemariti.

5 PRIKAZ I ANALIZA REZULTATA

Imajući u vidu da je cilj ovog rada određivanje uticaja nesimetričnih dijagrama solarne iradijanse na optimalnu orijentaciju PV panela, prilikom generisanja rezultata razmatrani su različiti slučaji nesimetrija solarne iradijanse u toku dana. Za kvantifikaciju nesimetrije dijagrama solarne iradijanse korišćen je faktor nesimetrije solarne iradijanse ε_{I_H} koji uvažava razliku solarne insolacije u prepodnevnim i popodnevnim časovima i određuje se na osnovu izraza:

$$\varepsilon_{I_H}(\%) = \frac{\sum_{h=1}^{12} I_H(h) - \sum_{h=13}^{24} I_H(h)}{\sum_{h=1}^{24} I_H(h)} \cdot 100\%, \tag{32}$$

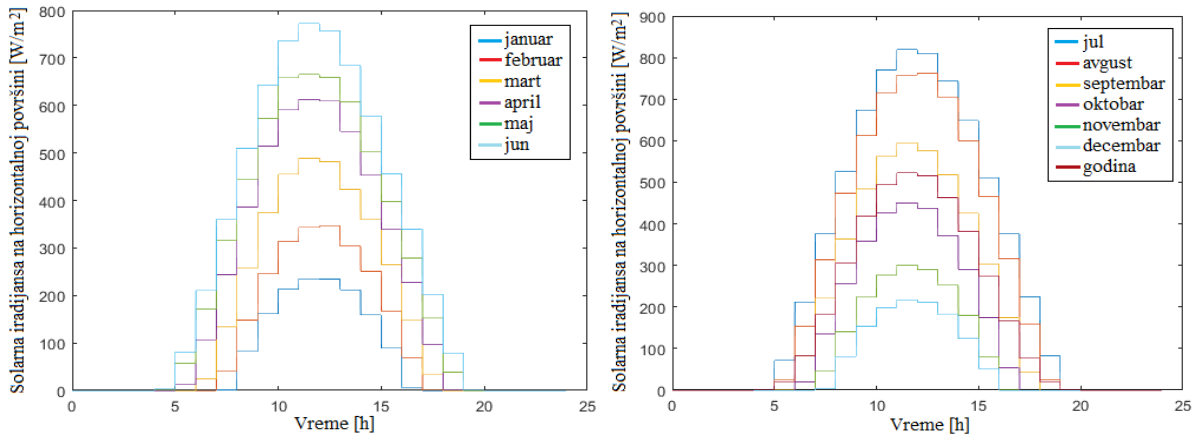
Na osnovu (32) jasno je da pozitivne vrednosti faktora nesimetrije odgovaraju većoj solarnoj iradijansi u prepodnevnim časovima, dok se negativne vrednosti dobijaju za slučaj veće iradijanse u popodnevnim časovima. Nesimetrična raspodela solarne iradijanse u toku dana korišćena pri generisanju rezultata je dobijena primenom različitih vrednosti faktora nesimetrije na dijagram solarne iradijanse na horizontalnoj površini za teritoriju grada Niša ($L = 43{,}327°$ N i $\lambda = 21{,}858°$ E) preuzetih iz PVGIS-SARAH3 baze podataka. Ovo je urađeno tako što su preuzete srednje jednočasovne vrednosti solarne iradiajanse na horizontalnoj površini pomnožene odgovarajućim koeficijentima skaliranja, koji se za periode veće i manje solarne iradijanse mogu dobiti pomoću izraza (33) i (34), respektivno:

$$k_1' = \frac{(\varepsilon_{I_H}+1)\sum_{h=1}^{24} I_H(h)}{2\sum_{h=1}^{12} I_H(h)}, \quad k_1'' = \frac{(|\varepsilon_{I_H}|+1)\sum_{h=1}^{24} I_H(h)}{2\sum_{h=13}^{24} I_H(h)}, \tag{33}$$

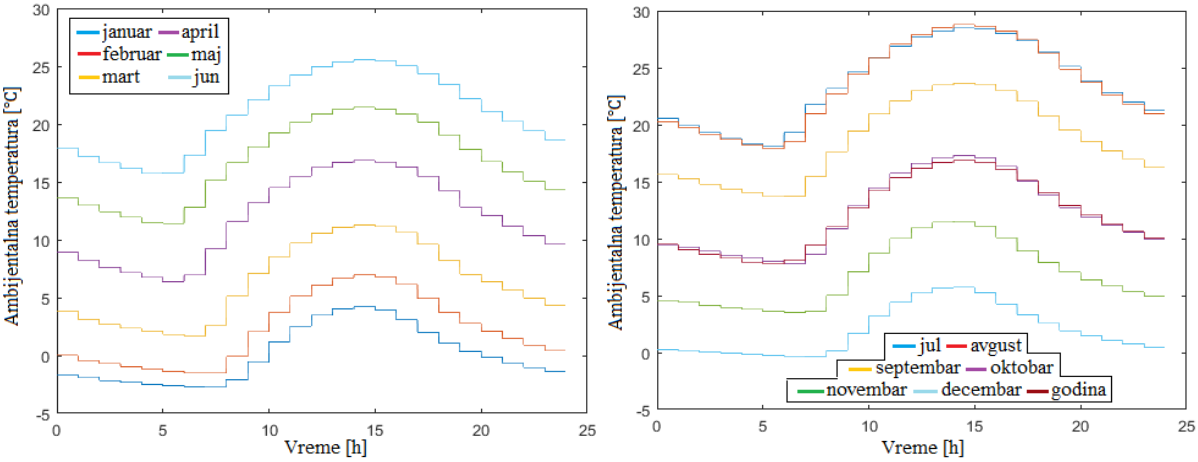
$$k_2' = \frac{(1-\varepsilon_{I_H})\sum_{h=1}^{24} I_H(h)}{2\sum_{h=13}^{24} I_H(h)}, \quad k_2'' = \frac{(1-|\varepsilon_{I_H}|)\sum_{h=1}^{24} I_H(h)}{2\sum_{h=1}^{12} I_H(h)}, \tag{34}$$

Potrebno je naglasiti da se koeficijenti k_1' i k_2' odnose na slučaj kada je solarna iradijansa veća u prepodnevnim časovima, dok se koeficijenti k_1'' i k_2'' odnose na slučaj u kome je veća solarna iradijansa u popodnevnim časovima. Izrazi (33) i (34) su dobijeni uvažavanjem izraza za faktor nesimetrije (32), kao i uslova o nepromenjivosti ukupne solarne insolacije na horizontalnoj površini u toku dana. Takođe, imajući u vidu nepromenljivost dnevne solarne insolacije prilikom generisanja nesimetričnih dijagrama solarne iradijanse, važno je usvojiti opseg vrednosti faktora nesimetrije za koji dobijeni nesimetrični dijagrami solarne iradijanse imaju fizičkog smisla. Drugim rečima moguće je koristiti samo one vrednosti faktora nesimetrije za koje indeks vedrine ima realne vrednosti, odnosno vrednosti pri kojima je odnos u Liu-Jordano-ovoj relaciji između 0 i 1 za svaki sat u godini. Imajući ovo u vidu, prilikom generisanja rezultata korišćene su vrednosti od -33% do 33% za faktor nesimetrije, čime je omogućeno generisanje izrazito nesimetričnog dijagrama solarne iradijanse kod koga se u jednoj polovini dana ostvaruje duplo veća vrednost solarne insolacije u odnosu na drugu polovinu.

Iz pomenute baze podataka pored solarne iradijanse su preuzeti i podaci o ambijentalnoj temperaturi za teritoriju grada Niša. Ovi podaci predstavljaju srednje jednočasovne vrednosti na mesečnom i godišnjem nivou i prikazani su na slikama 2 i 3, za solarnu iradijansu i temperaturu, respektivno.



Slika 2 – Srednje jednočasovne vrednosti solarnih iradijansi na horizontalnoj površini za prvih šest meseci (levo) i drugih šest meseci i godinu u celini (desno)



Slika 3 – Srednje jednočasovne vrednosti ambijentalne temperature za prvih šest meseci (levo) i drugih šest meseci i godinu u celini (desno)

U tabeli I su prikazane srednje mesečne i godišnje vrednosti solarne iradijanse na horizontalnoj površini kao i vrednosti ambijentalne temperature, dobijene na osnovu podataka iz pomenute baze podataka.

Tabela I – Srednje mesečne i godišnje vrednosti solarne iradijanse na horizontalnoj površini i ambijentalne temperature za teritoriju grada Niša.

	januar	februar	mart	april	maj	jun	jul
$\bar{I}_H$[W/m^2]	57,986	92,812	143,431	197,512	230,142	267,239	285,117
$\bar{\theta}_a$[°C]	0,064	2,177	6,312	11,857	16,704	20,932	23,595
	avgust	septembar	oktobar	novembar	decembar	godina	
$\bar{I}_H$[W/m^2]	253,599	181,301	123,870	74,698	50,861	163,607	
$\bar{\theta}_a$[°C]	23,475	18,555	12,197	6,833	1,945	12,108	

Koeficijent refleksije tla na kome se postavlja PV panel iznosi $\rho = 0{,}2$, dok je za koeficijent proporcionalnosti između solarne iradijanse i snage PV panela usvojena vrednost $c = 0{,}001 \frac{r.j.}{W/m^2}$. Korišćena vrednost za normalnu radnu temperaturu PV ćelije iznosi $NOCT = 45$℃, dok je za temperaturni koeficijent promene snage PV panela usvojena tipična vrednost $k_P = 0{,}004 \frac{1}{℃}$.

U svim razmatranim slučajevima metaheuristička optimizaciona metoda WHO je realizovana na populaciji od 100 jedinki podeljenih u 10 grupa, pri čemu je optimalno rešenje dobijeno nakon 50 iteracija. Minimalna i maksimalna vrednost koeficijenta A u WHO iznose $A_{min} = 0{,}6$ i $A_{max} = 1{,}2$, dok je verovatnoća da jedinka stupi u proces parenja 20%.

U tabeli II su prikazane vrednosti koeficijenta nesimetrije solarne iradijanse na horizontalnoj površini dobije na osnovu preuzetih podataka o solarnoj iradijansi.

Tabela II – Faktor nesimetrije solarne iradijanse na horizontalnoj površini za teritoriju grada Niša.

	januar	februar	mart	april	maj	jun	jul
ε_{I_H}(%)	-0,509	-2,024	0,695	4,059	4,525	3,423	0,831
	avgust	septembar	oktobar	novembar	decembar	godina	
ε_{I_H}(%)	0,349	6,150	10,675	10,460	7,063	3,512	

Na osnovu predloženog postupka napravljen je model za određivanje solarne iradijanse na površini PV panela i sračunata energija koju PV panel postavljen pod određenim nagibnim i azimutnim uglom generiše. Korišćenjem WHO određene su optimalne vrednosti nagibnog i azimutnog ugla PV panela za različite nesimetrične dijagrame solarne iradijanse.

Tabela III prikazuje optimalne vrednosti nagibnog i azimutnog ugla PV panela, kao i srednje dnevne vrednosti solarne iradijanse i energije koju PV panel generiše u slučaju optimalne i južne orijentacije panela na mesečnom i godišnjem nivou. U pomenutoj tabeli su prikazani rezultati dva različita slučaja, pri čemu se prvi odnosi na osnovni dijagram, a drugi na dijagram solarne iradijanse sa faktorom nesimetrije od 20%. Potrebno je još jednom naglasiti da se pod optimalnom orijentacijom PV panela podrazumeva postavljanje panela pod optimalnim nagibnim i azimutnim uglom ($\Sigma_C = \Sigma_{Cop},\ \varphi_C = \varphi_{Cop}$), dok južna orijentacija podrazumeva postavljanje panela pod optimalnim nagibnim i nultim azimutnim uglom ($\Sigma_C = \Sigma_{Cop},\ \varphi_C =$

0°). U tabeli III i narednim tabelama, vrednosti van zagrade se odnose na optimalnu, a vrednosti u zagradi na južnu orijentaciju PV panela.

Tabela III – Optimalne vrednosti nagibnog i azimutnog ugla i vrednosti solarne iradijanse i energije PV panela za optimalnu i južnu orijentaciju panela u slučaju osnovnog i dijagrama solarne iradijanse sa 20% nesimetrije

	januar	februar	mart	april	maj	jun	jul
$\varphi_{Cop}[°]$	2,37 (0)	6,39 (0)	-22,20 (0)	-34,12 (0)	-26,49 (0)	-18,59 (0)	0,29 (0)
$\Sigma_{Cop}[°]$	63,18 (63,16)	56,70 (56,55)	42,29 (42,81)	30,10 (27,01)	15,35 (13,37)	8,39 (7,96)	10,28 (10,28)
$\bar{I}_C[\frac{W}{m^2}]$	104,20 (104,13)	144,87 (144,30)	178,44 (178,79)	217,11 (215,05)	236,17 (235,28)	269,81 (269,63)	289,43 (289,43)
$W_C[r.j.]$	2,627 (2,626)	3,583 (3,570)	4,307 (4,304)	5,093 (5,026)	5,413 (5,390)	6,029 (6,025)	6,346 (6,346)
$\varphi_{Cop,20}[°]$ 20%	-9,53 (0)	-9,72 (0)	-34,81 (0)	-53,74 (0)	-54,93 (0)	-60,31 (0)	-53,69 (0)
$\Sigma_{Cop}[°]$ 20%	63,41 (63,10)	56,85 (56,48)	46,54 (42,96)	38,76 (27,13)	23,70 (13,24)	17,38 (8,06)	19,03 (10,65)
$\bar{I}_{C,20}[\frac{W}{m^2}]$ 20%	105,31 (104,29)	145,67 (144,38)	185,68 (179,57)	230,71 (215,34)	243,16 (235,28)	276,54 (269,75)	298,04 (289,91)
$W_C[r.j.]$ 20%	2,648 (2,625)	3,592 (3,565)	4,455 (4,312)	5,396 (5,024)	5,554 (5,382)	6,152 (6,015)	6,496 (6,339)

	avgust	septembar	oktobar	novembar	decembar	godina
$\varphi_{Cop}[°]$	-1,33 (0)	-19,88 (0)	-16,01 (0)	-8,21 (0)	-7,40 (0)	-13,04 (0)
$\Sigma_{Cop}[°]$	22,98 (22,97)	40,11 (38,39)	54,92 (53,90)	62,59 (62,36)	65,49 (65,32)	34,42 (34,63)
$\bar{I}_C[\frac{W}{m^2}]$	270,24 (270,25)	221,32 (218,30)	189,98 (185,84)	139,33 (138,42)	97,73 (97,17)	187,51 (187,27)
$W_C[r.j.]$	5,919 (5,919)	5,025 (4,949)	4,450 (4,358)	3,385 (3,364)	2,451 (2,437)	4,342 (4,335)
$\varphi_{Cop}[°]$ 20%	-47,64 (0)	-36,30 (0)	-21,82 (0)	-10,74 (0)	-13,74 (0)	-32,08 (0)
$\Sigma_{Cop}[°]$ 20%	31,53 (23,35)	44,66 (38,59)	56,03 (54,15)	61,91 (61,94)	66,14 (65,55)	38,79 (34,79)
$\bar{I}_C[\frac{W}{m^2}]$ 20%	285,01 (271,33)	231,32 (219,18)	195,60 (187,12)	134,85 (132,59)	100,28 (98,20)	194,91 (187,77)
$W_C[r.j.]$ 20%	6,216 (5,924)	5,224 (4,960)	4,547 (4,363)	3,261 (3,212)	2,507 (2,459)	4,493 (4,338)

Na osnovu rezultata u tabeli III se može videti da kod osnovnog dijagrama i u slučaju dijagrama sa 20% nesimetrije najveće vrednosti solarne iradijanse na površini PV panela i proizvedene energije su u letnjim mesecima, kada je i najmanja vrednost optimalnog nagibnog ugla. Manje vrednosti proizvedene energije i veći optimalni nagibni ugao u zimskim mesecima je posledica nižih solarnih iradijansi na horizontalnoj površini i manjih altitudnih uglova sunca u tom periodu.

Takođe, iz tabele III se primećuje da se vrednosti optimalnih nagibnih i azimutnih uglova PV panela u slučaju optimalne i južne orijentacije manje razlikuju ukoliko je faktor nesimetrije solarne iradijanse niži, pri čemu je optimalna vrednost azimutnog ugla mnogo osetljivija na promene faktora nesimetrije u odnosu na optimalnu vrednost nagibnog ugla. Rezultati u tabeli III pokazuju da su optimalni azimutni uglovi PV panela veći po svojoj apsolutnoj vrednosti u letnjim mesecima (kada azimutni uglovi sunca zahvataju veći opseg) i da rastu sa povećanjem faktora nesimtrije, pri čemu imaju negativnu vrednost kada je solarna iradijansa veća u prepodnevnim časovima (faktor nesimetrije pozitivan), a pozitivnu kada je solarna iradijansa veća u poslepodnevnim časovima (faktor nesimetrije negativan). Potrebno je naglasiti da pomenuti zaključak o predznaku optimalnog azimutnog ugla ne važi uvek za male faktore nesimetrije, zbog različitog rasporeda solarne iradijanse u prepodnevnim i popodnevnim časovima (mesec jul u tabeli III). Sa druge strane, tabela III pokazuje da optimalni nagibni ugao PV panela u slučaju optimalne orijentacije raste sa povećanjem faktora nesimetrije usled većih vrednosti solarne iradijanse koje na površinu PV panela padaju pod nižim altitudnim uglom, što je posebno izraženo u letnjim mesecima.

Pored navedenog, iz tabele III se može videti da solarna iradijansa na površini PV panela i njegova proizvedena energija pri optimalnoj i južnoj orijentaciji imaju praktično iste vrednosti za osnovni dijagram solarne iradijanse, dok njihove razlike u slučaju faktora nesimetrije od 20% idu od 1% do 5% u zavisnosti od meseca u godini.

Korišćenjem usvojenih vrednosti za normalnu radnu temperaturu PV ćelije i temperaturni koeficijent promene snage PV panela, na osnovu (22) se može odrediti optimalna vrednost solarne iradijanse na površini PV panela u cilju maksimizacije njegove proizvodnje i ona iznosi $\hat{I}_C = 4398{,}98\ W/m^2$ za mesec januar i $\hat{I}_C = 4022{,}48\ W/m^2$ za mesec jul. Pomenute vrednosti su veće od realno ostvarivih srednjih jednočasovnih vrednosti solarne iradijanse na površini PV panela u toku godine, tako da se maksimizacijom solarne iradijanse vrši ujedno i maksimizacija proizvodnje PV panela, a optimalne vrednosti nagibnog i azimutnog ugla iz tabele III su iste za obe veličine.

U tabeli IV su prikazane optimalne vrednosti nagibnog i azimutnog ugla, kao i srednje dnevne vrednosti solarne iradijanse i proizvedene energije PV panela u slučaju optimalne i južne orijentacije panela, generisane na godišnjem nivou za različite faktore nesimetrije.

Tabela IV – Optimalne vrednosti nagibnog i azimutnog ugla i srednje dnevne vrednosti solarne iradijanse i energije PV panela za optimalnu i južnu orijentaciju panela, na godišnjem nivou, za različite faktore nesimetrije

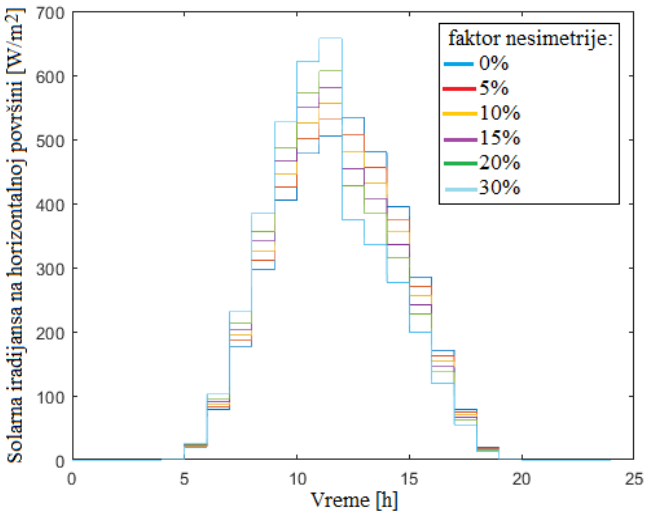
$\varepsilon_{I_H}(\%)$	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15
$\varphi_{Cop}[°]$	-2,64 (0)	-5,45 (0)	-15,04 (0)	-20,85 (0)	-23,24 (0)	-25,55 (0)	-27,79 (0)
$\Sigma_{Cop}[°]$	34,62 (34,59)	34,71 (34,58)	34,63 (34,60)	36,15 (34,62)	36,59 (34,64)	37,08 (34,69)	37,61 (34,70)
$\bar{I}_C[\mathrm{W/m^2}]$	187,06 (187,04)	187,23 (187,06)	187,69 (187,11)	188,45 (187,17)	189,48 (187,26)	190,64 (187,36)	191,93 (187,47)
$W_C[r.j.]$	4,329 (4,328)	4,334 (4,329)	4,346 (4,331)	4,364 (4,332)	4,385 (4,333)	4,409 (4,335)	4,435 (4,336)
$\varepsilon_{I_H}(\%)$	17,5	20	22,5	25	27,5	30	32,5
$\varphi_{Cop}[°]$	-29,94 (0)	-32,08 (0)	-34,74 (0)	-37,20 (0)	-39,61 (0)	-41,98 555	-43,32 (0)

$\Sigma_{Cop}[°]$	38,18 (34,74)	38,79 (34,79)	39,51 (34,84)	40,10 (34,90)	41,08 (34,97)	42,48 (35,05)	43,13 (35,13)
$\bar{I}_C[\mathrm{W/m^2}]$	193,35 (187,61)	194,91 (187,77)	196,63 (187,96)	198,51 (188,18)	200,52 (188,42)	202,71 (188,70)	205,02 (189,01)
$W_C[r.j.]$	4,463 (4,337)	4,493 (4,338)	4,526 (4,339)	4,562 (4,340)	4,600 (4,341)	4,641 (4,343)	4,684 (4,345)

Na osnovu rezultata iz Tabele IV se još jednom može videti da optimalni azimutni ugao PV panela raste po svojoj apsolutnoj vrednosti, dok se optimalni nagibni ugao blago povećava sa porastom faktora nesimetrije u slučaju optimalne orijentacije panela. Takođe, interesantno je da za nultu vrednost faktora nesimetrije postoji određeni optimalni azimutni ugao PV panela različit od nule kao posledica različitog rasporeda solarnih iradijansi u prepodnevnim i popodnevnim časovima. Za južnu orijentaciju optimalni nagibni ugao PV panela je prilično konstantan sa veoma blagim rastom kako se povećava faktor nesimterije. Blago povećanje generisane energije i optimalnog nagibnog ugla PV panela sa povećanjem faktora nesimetrije u slučaju južne orijentacije je posledica nešto većeg udela direktne komponente u ukupnoj solarnoj iradijansi za veće faktore nesimetrije.

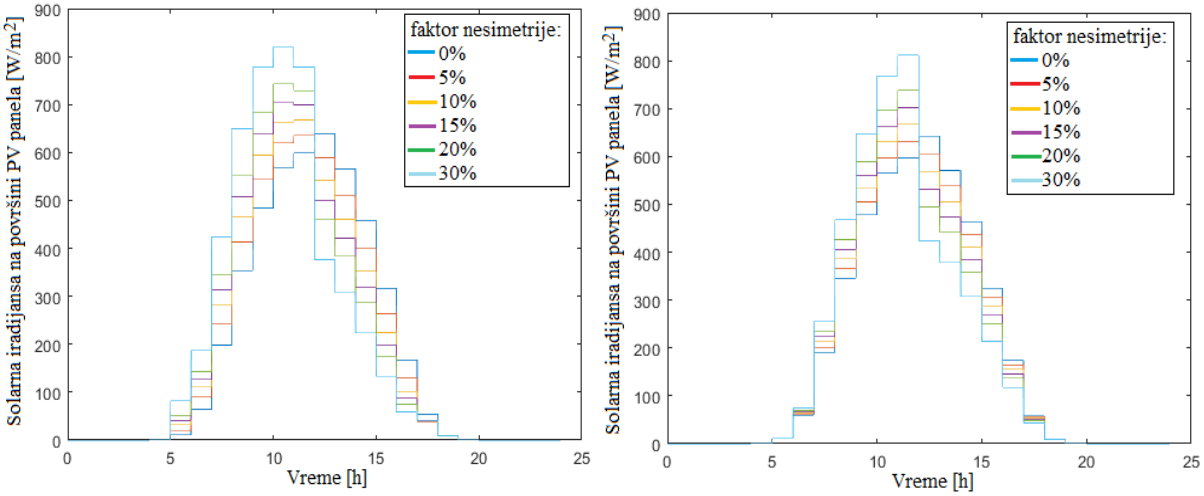
Vrednosti iz Tabele IV pokazuju da solarna iradijansa na površini PV panela i njegova proizvedena energija rastu u slučaju optimalne orijentacije panela, dok je u slučaju južne orijentacije taj rast veoma mali sa povećanjem faktora nesimetrije. Ovo je direktna posledica boljih upadnih uglova sunčevog zračenja na površinu panela u slučaju optimalne orijentacije. Razlike između pomenutih vrednosti za optimalnu i južnu orijentaciju idu do maksimalnih 7,8% za proizvedenu energiju i 8,4% za solarnu iradijansu u slučaju faktora nesimetrije od 32,5%.

Na slici 4 su prikazane srednje jednočasovne vrednosti solarne iradijanse na horizontalnoj površini, dok su na slici 5 prikazane srednje jednočasovne vrednosti solarne iradijanse na površini PV panela u slučaju optimalne i južne orijentacije panela. Solarne iradijanse na ovim slikama su generisane za različite vrednosti faktora nesimetrije na godišnjem nivou.



Slika 4 – Srednje jednočasovne vrednosti solarne iradijanse na horizontalnoj površini za različite vrednosti faktora nesimetrije na godišnjem nivou

Slika 4 prikazuje da nejednakost između solarnih iradijansi u prepodnevnim i popodnevnim časovima raste kako se povećava faktor nesimetrije, pri čemu je usled pozitivnih vrednosti faktora nesimetrije vrednost solarne iradijanse u prepodnevnim časovima veća.



Slika 5 – Srednje jednočasovne vrednosti solarne iradijanse na površini PV panela za različite vrednosti faktora nesimetrije na godišnjem nivou u slučaju optimalne (levo) i južne orijentacije (desno)

Upoređivanjem slika 4 i 5 može se videti da je dijagram solarne iradijanse na površini PV panela u slučaju južne orijentacije zadržao oblik dijagrama solarne iradijanse na horizontalnoj površini, dok se kod optimalne orijentacije on delimično promenio povećanjem uticaja solarnih iradijansi iz prepodnevnih, a smanjenjem uticaja solarnih iradijansi iz popodnevnih časova.

U Tabeli V su prikazane optimalne vrednosti nagibnog i azimutnog ugla, kao i srednje dnevne vrednosti solarne iradijanse i proizvedene energije PV panela u slučaju optimalne i južne orijentacije panela, generisane na godišnjem nivou za različite periode nesimetrije u slučaju faktor nesimetrije od 10%.

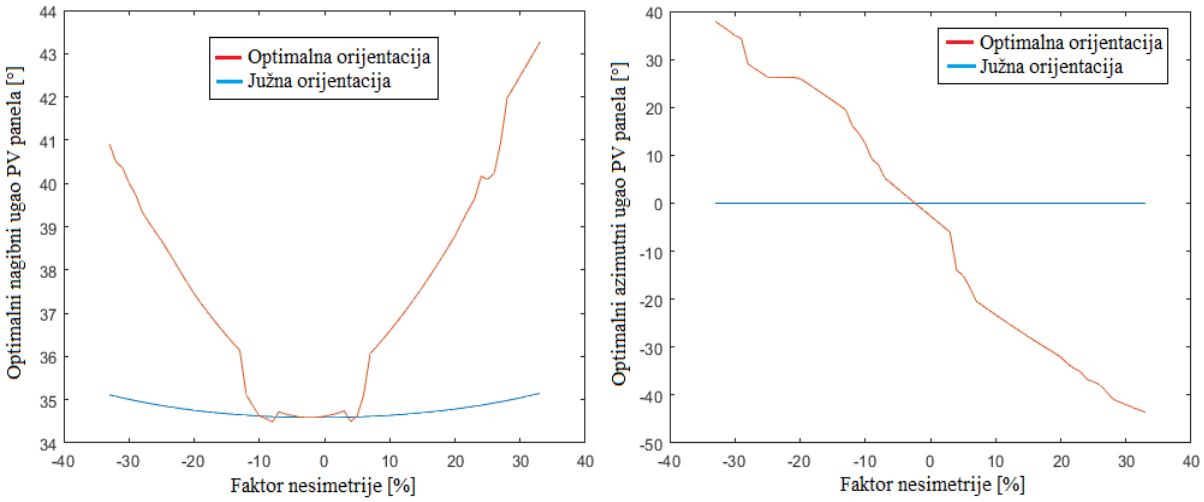
Tabela V – Optimalne vrednosti nagibnog i azimutnog ugla i srednje dnevne vrednosti solarne iradijanse i energije PV panela za optimalnu i južnu orijentaciju panela, na godišnjem nivou, za različite periode nesimetrije

period nesimetrije	12 - 13 h	11 - 14 h	10 - 15 h	9 - 16 h	1 - 24 h
$\varphi_{Cop}[°]$	-15,00 (0)	-19,91 (0)	-21,04 (0)	-22,00 (0)	-23,24 (0)
$\Sigma_{Cop}[°]$	34,87 (34,84)	36,19 (34,74)	36,35 (34,71)	36,52 (34,69)	36,59 (34,64)
$\bar{I}_C[\mathrm{W/m^2}]$	188,61 (187,97)	188,61 (187,58)	188,85 (187,43)	189,09 (187,35)	189,48 (187,26)
$W_C[r.j.]$	4,345 (4,330)	4,356 (4,333)	4,366 (4,334)	4,374 (4,334)	4,385 (4,333)

Kao što se može videti iz Tabele V smanjenjem perioda nesimetrije na manji broj časova oko podneva smanjuje se i apsolutna vrednost optimalnog azimutnog ugla PV panela. Ovo je očekivano sobzirom da smanjenje perioda nesimetrije smanjuje i opseg azumutnog ugla sunca u kome postoji nesimetrija solarne iradijanse (ekvivalentno sunčevo zračenje ima manju apsolutnu vrednost azimutnog ugla), što se takođe moglo videti i na primeru manjih optimalnih azimutnih uglova zimskih u odnosu na letnje mesece pri istom faktoru nesimtrije. Takođe, vrednost optimalnog nagibnog ugla PV panela se blago smanjuje sa smanjenjem perioda nesimetrije, kao rezultat nešto većeg altitudnog ugla ekvivalentnog sunčevog zračenja. Kod južne orijentacije smanjenje perioda nesimetrije ima neznatan uticaj na optimalni nagibni ugao PV panela, čija se vrednost tada veoma blago povećava usled povećanja udela direktne komponente u ukupnoj solarnoj iradijansi na površini panela.

Pored navedenog, tabela V pokazuje da u slučaju optimalne orijentacije PV panela smanjenje perioda nesimetrije u neznatnoj meri smanjuje solarnu iradijansu i proizvedenu energiju PV panela. U slučaju južne orijentacije i pored blagog povećanja solarne iradijanse na površini PV panela, proizvedena energija panela opada sa smanjenjem perioda nesimetrije zbog pojačanog negativnog uticaja temperature u tim slučajevima. Takođe, iz tabele V se može primetiti da se razlika u proizvedenoj energiji PV panela u slučaju optimalne i južne orijentacije povećava kako raste period nesimetrije.

Na slici 6 su prikazane optimalne vrednosti nagibnog i azimutnog ugla PV panela za različite vrednosti faktora nesimetrije na godišnjem nivou, pri optimalnoj i južnoj orijentaciji panela.



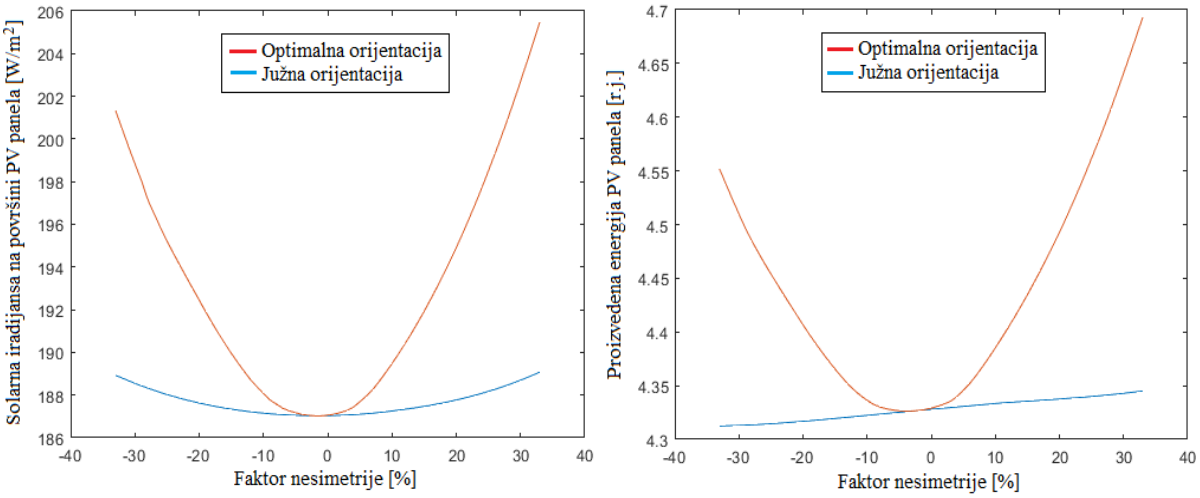
Slika 6 – Optimalne vrednosti nagibnog (levo) i azimutnog ugla PV panela (desno) za različite vrednosti faktora nesimetrije na godišnjem nivou, pri optimalnoj i južnoj orijentaciji panela

Na slici 6 se još jednom može videti da povećanje faktora nesimetrije sa -30 na 30% dovodi do smanjenja optimanog azimutnog ugla PV panela u slučaju optimalne orijentacije sa približno 40 na -40°, kao rezulatat smanjenja ekvivalentnog azimutnog ugla sunca. Takođe, na osnovu slike 6 da se primetiti da kod optimalne orijentacije PV panela povećanje faktora nesimetrije po apsolutnoj vrednosti dovodi do povećanja optimalnog nagibnog ugla panela u određenoj meri (oko 25%), usled smanjenja ekvivaletnog altitudnog ugla sunca. Za razliku od toga kod južne orijentacije promena faktora nesimetrije neznatno utiče na promenu nagibnog ugla PV panela, čija vrednost ostaje praktično konstantna.

Slika 7 prikazuje srednje dnevne vrednosti solarne iradijanse na površini PV panela i proizvedene energije PV panela za različite vrednosti faktora nesimetrije na godišnjem nivou, pri optimalnoj i južnoj orijentaciji panela.

Na slici 7 se jasno može videti značaj optimalne orijentacije PV panela imajući u vidu porast solarne iradijanse i proizvedene energije PV panela u odnosu na vrednosti dobijene južnom orijentacijom panela, posebno u slučajevima većih nesimetrija raspodele solarne iradijanse. Tako je pomenuti porast solarne iradijanse oko 6% za faktor nesimetrije od -30%, dok je za isti faktor nesimetrije porast proizvedene energije PV panela optimalne u odnosu na južnu orijentaciju oko 5 %. Takođe, sa slike 7 se za faktor nesimetrije od 30% može videti da je pomenuto povećanje solarne iradijanse oko 8%, a proizvedene energije PV panela 7%. Interesantno je primetiti da u slučaju južne orijentacije, iako solarna iradijansa PV panela blago raste sa povećanjem apsolutne vrednosti faktora nesimetrije, proizvedena energija PV panela je

nešto manja u slučaju negativnih vrednosti faktora nesimetrije. Ovo je posledica nešto većih ambijentalnih temperatura u popodnevnim časovima čiji negativni uticaj na proizvodnju PV panela je izraženiji kada su solarne iradijanse u popodnevnim časovima veće (negativan faktor nesimetrije).



Slika 7 – Srednje dnevne vrednosti solarne iradijanse na površini PV panela (levo) i proizvedene energije PV panela (desno) za različite vrednosti faktora nesimetrije na godišnjem nivou, pri optimalnoj i južnoj orijentaciji

Na slikama 6 i 7 može se uočiti određena nesimetrija vrednosti posmatranih veličina levo i desno u odnosu na nulti faktor nesimterije kao posledica različitog oblika osnovnog dijagrama solarnih iradijansi u prepodnevnim i popodnevnim časovima.

6 ZAKLJUČAK

U ovom radu je predstavljen postupak za određivanje optimalne orijentacije PV panela u uslovima nesimetričnih raspodela solarne iradijanse u toku dana sa aspekta maksimizacije proizvedene energije panela. U okviru predloženog postupka napravljen je model za određivanje solarne iradijanse na površini PV panela postavljenog pod odgovarajućim nagibnim i azimutnim uglom i izračunata vrednost proizvedene energije takvog panela uz uvažavanje uticaja temperature. Korišćenjem WHO izračunate su optimalne vrednosti nagibnog i azimutnog ugla PV panela za različite nesimetrične dijagrame solarne iradijanse, a dobijeni rezultati su upoređeni sa onima koji se imaju u slučaju južne orijentacije panela.

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da se optimalnom orijentacijom PV panela može dodatno povećati proizvedena energija panela u odnosu na slučaj panela sa standardnom južnom orijentacijom, posebno u uslovima većih nesimetrija u dijagramu solarne iradijanse. Konkretno postignuto je godišnje uvećanje proizvodnje PV panela za oko 7,8% za dijagram solarne iradijanse sa faktorom nesimetrije od 32,5%, dok je za faktore nesimetrije ispod 10% apsolutne vrednosti ovo povećanje zanemarljivo (manje od 1%). Takođe, rezultati pokazuju da vrednost optimalnog azimutnog ugla opada sa povećanjem vrednosti faktora nesimetrije, pri čemu na godišnjem nivou dostiže vrednosti od 40° do -40° za promenu faktora nesimetrije od -30% do 30%. Pored toga, na osnovu dobijenih rezultata može se primetiti da povećanje apsolutne vrednosti faktora nesimetrije u određenoj meri povećava i optimalni nagibni ugao PV panela, koji menja svoju vrednost na godišnjem nivou sa 34, 6° na 42,5° pri povećanju faktora nesimetrije od 0% na 30%.

LITERATURA

[1] Mikulović J. and Đurišić Ž, 2019, "Solarna energetika", "Akademska misao", Beograd.
[2] Melhem R, Shaker Y, Ali Mazen F. And Abou-Elnour A, 2025, "Investigation of the Optimum Solar Insolation for PV Systems Considering the Effect of Tilt Angle and Ambient Temperature", "Energies", "Vol. 18", pp. 5257.
[3] Prasetyo S, Trisnoaji Y, Munir M, Permatasari M, Mahadi A, Rizkita M. and Arifin Z, 2025, "Optimization of solar panel orientation and tracking systems for standalone PV applications", "International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)", "Vol. 16, No. 4", pp. 2721-2730.
[4] Mikulaović J, Đurišić Ž. and Kostić R, 2013, "Određivanje optimalnih nagibnih uglova fotonaponskih panela", "INFOTEH-JAHORINA", "Vol 12".
[5] Belsky A, Glukhanich D, Sutikno T. and Hatta Jopri M, 2023, "Estimation of hourly solar irradiation on tilted surfaces", "Bulletin of Electrical Engineering and Informatics", "Vol. 12, No. 6", pp. 3202-3214.
[6] Kamali Gh. A, Moradi I. and Khalili A, 2006, "Estimating solar radiation on tilted surfaces with various orientations: a study case in Karaj (Iran)", "Theoretical and Applied Climatology", "Vol. 84", pp. 235-241.
[7] Dhimish M. and Silvestre S, 2019, "Estimating the impact of azimuth-angle variations on photovoltaic annual energy production", "Clean Energy", "Vol. 3, No. 1", pp. 47-58.
[8] Zheng R, Hussien A Jia H, Abualigah L, Wang S. and Wu D, 2022, "An improved wild horse optimizer for solving optimization problems", "Mathematics", "Vol. 10, No. 8", pp. 1311.
[9] Ali M, Kamel S, Hassan M, Tostedo-Veliz M. and Zawbaa H, 2022, "An improved wild horse optimization algorithm for reliability based optimal DG planning of radial distribution networks", "Energy Reports, "Vol. 8", pp. 582-604.
[10] Radosavljević J, 2018, "Metaheuristic Optimization in Power Engineering", "Institution of Engineering and Technology (IET)", London.
[11] Bala A, Moshood Alao B, Olamide Oyedun A, Omotayo Alabi O. and Adamu M, 2024, "Performance evaluation of a solar photovoltaic (PV) module at different solar irradiance", "International Journal of Engineering & Applied Sciences (IJEAS)", "Vol. 16, No. 2", pp. 63-75.
[12] Calabro E, 2012, "The disagreement between anisotropic-isotropic diffuse solar radiation models as a function of solar declination: computing the optimum tilt angle of solar panels in the area of Southern-Italy", "Smart Grid and Renewable Energy", "Vol. 3", pp. 253-259.
[13] Klimenta D, Lekić J, Arsić S, Tasić D, Krstić N. and Radosavljević D, 2021, "A novel procedure for quick design of off-grid PV water pumping systems for irrigation", "Elektronika ir elektrotechnika", "Vol. 27, No. 2", pp. 55-68.