

Određivanje optimalnih nagibnih uglova fotonaponskih panela uz uvažavanje smanjenja direktne komponente iradijacije usled efekata senki u fotonaponskim sistemima

Determining the Optimal Tilt Angles of Photovoltaic Panels Considering the Reduction of Direct Component of Irradiation Due to Shading Effect in Photovoltaic Systems

Nikola Krstić*, Dardan Klimenta**, Dragan Tasić*, Dragana Radosavljević**

* Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet u Nišu

** Univerzitet u Prištini, Fakultet tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici

Rezime - U ovom radu se razmatra uticaj nagibnog ugla fotonaponskih (PV) panela na ukupnu količinu insolacije na površini panela na mesečnom i godišnjem nivou, sa i bez uticaja senki. Na osnovu dobijenih rezultata određeni su optimalni nagibni uglovi PV panela u cilju ostvarivanja maksimalne insolacije, kao i optimalni nagibni uglovi za generisanje maksimalne električne energije, uzimajući u obzir temperaturu panela. Posebna pažnja u radu je posvećena efektu senki koje stvaraju redovi panela unutar PV sistema i njegovo odražavanje na smanjenje direktne komponente iradijacije i optimalne nagibne uglove PV panela, za različita rastojanja između redova panela. U radu su razmatrana i detaljno opisana dva modela za izračunavanje insolacije PV panela, model vedrog dana i model realnih uslova oblačnosti. Za dobijanje srednje dnevne sunčeve iradijacije na površinu pod nekim nagibnim uglom, pored odgovarajućih ekstrasferističkih iradijacija korišćena su i raspoloživa merenja iradijacije na horizontalnu površinu u toku jedne godine.

Ključne reči - fotonaponski panel (PV panel), nagibni ugao, efekat senki, insolacija, iradijacija

Abstract – This paper considers the influence of the tilt angle of photovoltaic (PV) panels on the total amount of insolation on the surface of these panels on a monthly and annual basis, with and without consideration of shading effect. Based on the obtained results, optimal tilt angles of the PV panels in order to achieve maximum insolation, are determined, as well as the optimal tilt angles for achieving maximum generated electrical energy, taking into account the temperature of the panel. Special attention in the paper is paid to the shading effect created by the panel rows within the PV system and its influence on the reduction of direct component of irradiation and optimal tilt angles for different distances between PV panel rows. In the paper two different models for solar insolation calculation were considered and described in detail, clear day model and real cloud condition model. In order to obtain the average daily solar irradiation on the inclined surface, in addition to appropriate

extraterrestrial irradiations, available measurements of the irradiation on the horizontal surface during one year period were used.

Index terms - photovoltaic panel (PV panel), tilt angle, shading effect, insolation, irradiation

I UVOD

³ Najveća prednost obnovljivih izvora energije, pored toga što su praktično neiscrpni, je u tome što emituju znatno manju količinu štetnih gasova, čime značajno manje ugrožavaju životnu sredinu u odnosu na konvencionalne izvore energije. Energija Sunca predstavlja najveći i najznačajniji obnovljivi izvor energije na zemlji i u osnovi je mnogih drugih obnovljivih izvora (hidroenergija, energija vetra, biomasa) [1]. Upravo iz ovog razloga solarna energetika dobija sve veću pažnju, što rezultira vidnim razvojem i povećanom upotrebom fotonaponskih (PV) sistema poslednjih godina. Količina električne energije koju jedan PV sistem proizvede, srazmerna je količini solarne insolacije koju je primio, što govori o važnosti pravilnog postavljanja PV panela.

Konkretno, u ovom radu je razmatrana količina insolacije koju PV panel primi na mesečnom i godišnjem nivou u zavisnosti od njegovog nagibnog ugla u slučaju vedrog dana [2] i u realnim uslovima oblačnosti. Određivanje optimalnog azimutnog ugla panela u ovom radu nije razmatrano jer se njegove vrednosti obično kreću u uskim granicama oko nule [2]-[3], u skladu sa čime je usvojena orijentacija PV panela prema jugu, odnosno sa nultim azimutnim uglom. Kao i u radovima [4]-[7] i ovde je za određivanje ukupne insolacije PV panela, u realnim uslovima oblačnosti, korišćena srednja dnevna insolacija dobijena na osnovu raspoloživih merenja iradijacije na horizontalnu površinu i odgovarajućih ekstrasferističkih iradijacija. U cilju nalaženja optimalnog nagibnog ugla za generisanje električne energije od strane PV panela uvažavajući temperaturu ćelije, određena je i efektivna insolacija PV panela [2]. Posebna pažnja u radu je posvećena razmatranju efekta senki između redova PV panela na

smanjenje direktne komponente iradijacije, a time i količinu insolacije koju prime PV paneli [8]-[9]. U radu nije obuhvaćen uticaj blizine redova PV panela na difuznu i reflektovanu komponentu iradijacije, čije vrednosti su određene kao za slučaj usamljenog panela. Osenčana površina PV panela je određena na osnovu vrednosti altitudnog i azimutnog ugla sunca u toku dana i geometrije PV sistema. Takođe, i kod uvažavanja efekta senki posebno su analizirani slučajevi ostvarene insolacije pri vedrom danu i u uslovima realne oblačnosti. Na osnovu dobijenih rezultata za solarnu insolaciju određeni su optimalni nagibni uglovi PV panela na mesečnom i godišnjem nivou [10]-[11], za usamljeni panel i pri uvažavanju efekta senki za različita rastojanja između redova PV panela u PV sistemu.

II ODREĐIVANJE DNEVNE INSOLACIJE PV PANELA POSTAVLJENOG POD ODREĐENIM NAGIBNIM UGLOM

Dnevna insolacija PV panela predstavlja energiju koju po jedinici površine panel primi u toku dana od strane sunčevog zračenja. Analitički se određuje kao integral površinske gustine snage sunčevog zračenja (solarne iradijacije) od trenutka izlaska do trenutka zalaska sunca na površinu PV panela. Ukupna solarna iradijacija koja pada na površinu PV panela se sastoji od tri komponente, a to su direktna, difuzna i reflektovana komponenta iradijacije:

$$I_C = I_{BC} + I_{DC} + I_{RC} \quad (1)$$

gde su:

I_C – ukupna iradijacija na površinu PV panela,

I_{BC} – direktna komponenta iradijacije na PV panel,

I_{DC} – difuzna komponenta iradijacije na PV panel,

I_{RC} – reflektovana komponenta iradijacije na PV panel.

Svaka od ove tri komponente iradijacije se može odrediti na osnovu odgovarajućih komponenti iradijacije na horizontalnu površinu na zemlji, pomoću relacija (2), (3) i (4):

$$I_{BC} = \frac{I_{BH}}{\sin\beta} \cos\theta \quad (2)$$

$$I_{DC} = I_{DH} \frac{1+\cos\Sigma}{2} \quad (3)$$

$$I_{RC} = \rho(I_{DH} + I_{BH}) \frac{1-\cos\Sigma}{2} \quad (4)$$

gde su:

I_{BH} – direktna komponenta iradijacije na horizontalnu površinu,

I_{DH} – difuzna komponenta iradijacije na horizontalnu površinu,

Σ – nagibni ugao PV panela,

θ – incidentni (upadni) ugao sunčevog zračenja na površinu PV panela,

β – altitudni ugao sunca,

ρ – koeficijent refleksije tla, za koji će u radu biti uzeta vrednost 0,25.

Iz relacije (4) lako se pokazuje da reflektovana komponenta zračenja ne postoji za horizontalno postavljeni PV panel ($\Sigma = 0$) i da se u tom slučaju ukupna iradijacija sastoji iz direktne i difuzne komponente. Za razliku od reflektovane komponente koja se povećava sa povećanjem vrednosti nagibnog ugla, difuzna komponenta se smanjuje (3). Ovo često dovodi do smanjenja optimalnog nagibnog ugla PV panela u odnosu na

ugao koji bi se dobio uvažavanjem samo direktne komponente iradijacije, odnosno geografske širine na kojoj se panel nalazi.

U cilju određivanja iradijacije na površinu zemlje, bilo da se radi o vedrom danu ili se uvažava prisutnost oblačnosti, potrebno je odrediti ekstraterestričku, odnosno iradijaciju na ulazu u Zemljinu atmosferu. Kako se udaljenost Zemlje od Sunca tokom godine blago menja, jer se Zemlja kreće po eliptičnoj putanji, tako se menja i ekstraterestrička iradijacija, prema formuli:

$$I_0 = G_{SC}(1 + 0,034 \cdot \cos(\frac{360^\circ \cdot n}{365})) \quad (5)$$

gde su:

I_0 – ekstraterestrička iradijacija na površinu normalnu na pravac zračenja,

G_{SC} – solarna konstanta koja iznosi 1367 W/m²,

n – redni broj dana u godini.

A Model vedrog dana

Za slučaj da se radi o vedrom danu, direktna i difuzna komponenta iradijacije na horizontalnu površinu se mogu odrediti samo na osnovu ekstraterestričke iradijacije. Naime, tada nije potreban podatak o ukupnoj iradijaciji na horizontalnu površinu zemlje kojim se obuhvata stepen oblačnosti, koji u vedrom danu nije prisutan. Direktna komponenta iradijacije koja dospe na zemljinu površinu je manja od ekstraterestričke iradijacije date relacijom (5) usled refleksije, rasejanja i apsorpcije dela zračenja u zemljinoj atmosferi i može se odrediti prema Bouguer-Lambertovom zakonu kao:

$$I_B = A e^{-km} \quad (6)$$

gde su:

I_B – direktna komponenta iradijacije na površini zemlje normalnoj na pravac zračenja,

A – fluks ekstraterestričkog zračenja koji uđe u atmosferu,

k – koeficijent atenuacije zračenja u Zemljinoj atmosferi (optička dubina),

m – optička vazдушna masa.

Fluks ekstraterestričkog zračenja i koeficijent atenuacije zavise od rednog broja dana u godini prema sledećim formulama:

$$A = 1160 + 75 \cdot \sin(\frac{360^\circ}{365} \cdot (n - 275)) \quad (7)$$

$$k = 0,174 + 0,035 \cdot \sin(\frac{360^\circ}{365} \cdot (n - 100)) \quad (8)$$

pri čemu optička vazдушna masa menja svoju vrednost u zavisnosti od visine sunca na horizontu, odnosno od altitudnog ugla sunca, prema formuli:

$$m = \frac{1}{\sin\beta} \quad (9)$$

Kada je poznata direktna komponenta iradijacije na površini zemlje normalnoj na pravac zračenja (I_B), moguće je odrediti direktnu i difuznu komponentu iradijacije na horizontalnu površinu zemlje na osnovu izraza (10) i (11):

$$I_{BH} = I_B \cdot \sin\beta \quad (10)$$

$$I_{DH} = I_B \cdot C \quad (11)$$

gde je C difuzna konstanta koja se na osnovu rednog broja dana u godini određuje kao:

$$C = 0,095 + 0,04 \cdot \sin\left(\frac{360^\circ}{365} \cdot (n - 100)\right) \quad (12)$$

Kada su određene direktna i difuzna komponenta iradijacije na horizontalnu površinu zemlje, primenom izraza (1)-(4) se može odrediti ukupna iradijacija PV panela postavljenog pod nekim nagibnim uglom. Integracijom ukupne iradijacije na nivou jednog dana dobija se dnevna insolacija PV panela:

$$I = \frac{24h}{360^\circ} \int_{-\omega_c}^{+\omega_c} I_C(\omega) d\omega \quad (13)$$

gde su:

I – dnevna insolacija PV panela,

ω – časovni ugao sunca u stepenima,

ω_c – časovni ugao zalaska sunca na površinu PV panela.

B Realni uslovi oblačnosti

U realnim uslovima oblačnosti difuzna komponenta iradijacije na horizontalnu površinu zavisi od koeficijenta vedrosti, kojim se uvažava stepen oblačnosti, odnosno propustljivosti atmosfere za sunčevo zračenje. Ovaj koeficijent se određuje kao odnos srednje dnevne iradijacije na horizontalnu površinu zemlje i srednje dnevne ekstraterestričke iradijacije na horizontalnu površinu.

$$K_T = \frac{\bar{I}_H}{\bar{I}_{0H}} \quad (14)$$

gde su:

K_T – koeficijent vedrosti,

\bar{I}_H – srednja dnevna iradijacija na horizontalnu površinu zemlje,
 \bar{I}_{0H} – srednja dnevna ekstraterestrička iradijacija na horizontalnu površinu.

Na osnovu koeficijenta vedrosti, difuzna komponenta na horizontalnu površinu, za geografsku širinu na kojoj se postavljaju paneli u ovom radu, može se odrediti kao [4]:

$$\bar{I}_{DH} = \bar{I}_H [0,95 - 0,16K_T + 4,3K_T^2 - 16,6K_T^3 + 12,3K_T^4] \quad (15)$$

Pri čemu se mora napomenuti da u literaturi postoje i drugi oblici formule date izrazom (15), čijim korišćenjem se dobijaju nešto drugačije vrednosti za optimalni nagibni ugao PV panela. Koristeći difuznu komponentu iradijacije, može se odrediti i srednja dnevna direktna komponenta iradijacije na horizontalnu površinu, kao:

$$\bar{I}_{BH} = \bar{I}_H - \bar{I}_{DH} \quad (16)$$

Kao što se može videti iz relacija (14), (15) i (16) za određivanje difuzne i direktne komponente iradijacije na horizontalnu površinu u uslovima oblačnosti potrebno je poznavati ukupnu iradijaciju na horizontalnu površinu. Ovaj podatak često je dostupan u obliku srednje dnevne iradijacije na horizontalnu površinu za reprezentativni dan u mesecu. U skladu sa time u izrazima (14)-(16), kao i u izrazima (1)-(4) je potrebno koristiti srednje dnevne iradijacije. Takođe, usrednjenje altitudnog i incidentnog ugla u relaciji (2) u toku dana, izvršeno je na takav način da odnos srednje dnevne direktne komponente iradijacije na površinu pod nekim nagibnim uglom i horizontalnoj površini

bude jednak odnosu ekvivalentnih srednjih dnevnih ekstraterestričkih iradijacija [4],[5]. Ovaj odnos je poznat kao faktor kosine:

$$\bar{R}_b = \frac{\bar{I}_{0C}}{\bar{I}_{0H}} = \frac{\frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_c}^{+\omega_c} I_0 \cos\theta d\omega}{\frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_c}^{+\omega_c} I_0 \sin\beta d\omega} \quad (17)$$

gde je:

\bar{R}_b – srednji dnevni faktor kosine,

\bar{I}_{0C} – srednja dnevna ekstraterestrička iradijacija na površinu pod nagibnim uglom,

\bar{I}_{0H} – srednja dnevna ekstraterestrička iradijacija na horizontalnu površinu.

Časovni uglovi zalaska sunca na horizontalnu površinu (ω_0) i površinu pod nagibnim uglom Σ (ω_c), se određuju kao:

$$\omega_0 = \cos^{-1}(-\tan\varphi \cdot \tan\delta) \quad (18)$$

$$\omega_c = \cos^{-1}(-\tan(\varphi - \Sigma) \cdot \tan\delta) \quad (19)$$

Zamenom incidentnog i altitudnog ugla u funkciji časovnog ugla sunca ω i rešavanjem integrala iz relacije (17), za srednji dnevni faktor kosine se dobija:

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\varphi - \Sigma) \cos\delta \sin\omega_c + \omega_c \sin(\varphi - \Sigma) \sin\delta}{\cos\varphi \cos\delta \sin\omega_0 + \omega_0 \sin\varphi \sin\delta} \quad (20)$$

Ugao deklinacije sunca se menja u toku godine i za njegovo izračunavanje u zavisnosti od rednog broja dana u godini n , je korišćen izraz:

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin\left[\frac{360^\circ}{365} (n - 81)\right] \quad (21)$$

Uvažavanjem do sada navedenog i koristeći relacije (1)-(4) za srednju dnevnu iradijaciju PV panela postavljenog pod nagibnim uglom Σ , se dobija:

$$\bar{I}_C = (\bar{I}_H - \bar{I}_{DH}) \bar{R}_b + \bar{I}_{DH} \frac{1 + \cos\Sigma}{2} + \rho \bar{I}_H \frac{1 - \cos\Sigma}{2} \quad (22)$$

Korišćenjem srednje dnevne iradijacije, dnevna insolacija PV panela se jednostavno određuje na osnovu izraza:

$$I = \bar{I}_C \cdot 24h \quad (23)$$

III UTICAJ TEMPERATURE I EFEKTIVNA IRADIJACIJA

U ovom radu je pored određivanja optimalnog nagibnog ugla za dobijanje maksimalne dnevne insolacije, određen i optimalni nagibni ugao za generisanje maksimalne električne energije od strane PV panela u toku dana, uvažavajući temperaturu ćelije panela. Ovo je urađeno iz razloga što postoji mogućnost da ova dva ugla ne budu ista, s obzirom na to da se povećanjem insolacije PV panela povećava i njegova temperatura koja negativno utiče na izlaznu snagu panela. Temperatura ćelije panela se može odrediti na osnovu temperature panela pri normalnim radnim uslovima (temperatura ambijenta 20 °C, brzina vetra 1 m/s i ukupna iradijacija 800 W/m²), ukupne iradijacije PV panela i temperature ambijenta, na osnovu sledeće relacije:

$$T_{PV} = T_{amb} + \left(\frac{T_{NOCT} - 20}{800}\right) \cdot I_C \quad (24)$$

gde su:

T_{PV} – temperatura PV panela,
 T_{amb} – temperatura ambijenta,
 I_C – ukupna iradijacija PV panela,
 T_{NOCT} – temperatura panela pri normalni radnim uslovima (ovu temperaturu definiše proizvođač PV panela i u radu biće korišćena vrednost od 48 °C).

Povećanje temperature PV panela iznad temperature od 25 °C dovodi do linearnog smanjenja snage PV panela, na osnovu relacije:

$$P_{PV} = P_{PV,25^{\circ}\text{C}} \cdot (1 - \alpha_P(T_{PV} - 25^{\circ}\text{C})) \quad (25)$$

gde su:

P_{PV} – snaga PV panela na temperaturi T_{PV} ,
 $P_{PV,25^{\circ}\text{C}}$ – snaga PV panela na temperaturi od 25°C,
 α_P – koeficijent promene izlazne snage panela sa temperaturom, za koji je u radu usvojena vrednost $\alpha_P = 0,004$.

Kao što je snaga PV panela na 25°C proporcionalna ukupnoj iradijaciji, tako je snaga PV panela na nekoj temperaturi T_{PV} proporcionalna efektivnoj iradijaciji. Shodno tome, relacija (25) se može zapisati preko odgovarajućih iradijacija:

$$I_{Cef} = I_C \cdot (1 - 0,004 \cdot (T_{PV} - 25^{\circ}\text{C})) \quad (26)$$

gde je:

I_{Cef} – efektivna iradijacija PV panela,
 I_C – ukupna stvarna iradijacija PV panela.

Uvažavajući korelaciju između snage PV panela i iradijacije na njegovoj površini, može se zaključiti da je problem nalaženja optimalnog ugla za proizvodnju maksimalne električne energije od strane PV panela, identičan problemu nalaženja optimalnog ugla za dobijanje maksimalne efektivne insolacije.

Efektivna insolacija PV panela se dobija vremenskim integraljenjem efektivne iradijacije date izrazom (26).

IV ODREĐIVANJE UTICAJA SENKI NA DNEVNU INSOLACIJU PV PANELA

Dosadašnje razmatranje se odnosilo na usamljeni PV panel na čiju površinu sunčevi zraci nesmetano padaju. Kod fotonaponskih sistema koji sadrže veći broj redova PV panela neizostavno će doći do zasenčavanja jednog dela površine PV panela od strane drugih PV panela u redu ispred. Uticaj tog zasenčavanja, odnosno efekta senki između redova PV panela, na smanjenje direktne komponente iradijacije, a time i insolacije PV panela je razmatran u ovom radu. Ovo je urađeno na način da zasenčana površina PV panela ne dobija direktnu komponentu iradijacije. Uticaj blizine redova PV panela u PV sistemu na njihovu difuznu i reflektovanu komponentu iradijacije u ovom radu nije obuhvaćen, već su one određene kao za slučaj usamljenog panela. Što znači da se u ovom radu izgubljena iradijacija PV panela usled senki može odrediti kao proizvod direktne komponente iradijacije i relativnog udela zasenčane površine u ukupnoj površini PV panela:

$$\Delta I_C = \Delta I_{BC} = I_{BC} \cdot \frac{S_s}{S_0} \quad (27)$$

gde je:

ΔI_C – izgubljena iradijacija PV panela usled senke,

ΔI_{BC} – izgubljena direktna komponenta iradijacije PV panela usled senke,

I_{BC} – direktna komponenta iradijacije PV panela,
 S_s – površina PV panela pokrivena senkom,
 S_0 – ukupna površina PV panela.

Na osnovu relacije (27), a u skladu sa relacijom (13), moguće je odrediti izgubljenu dnevnu insolaciju pomoću izraza:

$$\Delta I = \frac{24h}{360^{\circ}} \int_{-\omega_c}^{+\omega_c} \Delta I_{BC}(\omega) d\omega \quad (28)$$

U slučaju vedrog dana moguće je izraziti direktnu komponentu iradijacije za bilo koji vremenski trenutak, odnosno časovni ugao sunca u toku dana, pri čemu relacija (28) postaje:

$$\Delta I = \frac{24h}{360^{\circ}} \int_{-\omega_c}^{+\omega_c} I_{BC}(\omega) \frac{S_s(\omega)}{S_0} d\omega \quad (29)$$

Za razliku od modela vedrog dana, kod modela realnih uslova oblačnosti potrebno je poznavati ukupnu iradijaciju na horizontalnu površinu u čiju određivanja direktne komponente iradijacije PV panela. Kako je najčešće poznata samo srednja dnevna iradijacija na horizontalnu površinu, moguće je odrediti samo srednju dnevnu direktnu komponentu iradijacije, pa izraz (28) postaje:

$$\Delta I = \frac{24h}{2\omega_c} \bar{I}_{BC} \int_{-\omega_c}^{+\omega_c} \frac{S_s(\omega)}{S_0} d\omega \quad (30)$$

U cilju određivanja funkcionalne zavisnosti direktne komponente iradijacije od časovnog ugla sunca potrebno je izraziti altitudni i incidentni ugao Sunca u funkciji časovnog ugla sunca. Ove zavisnosti su date sledećim relacijama:

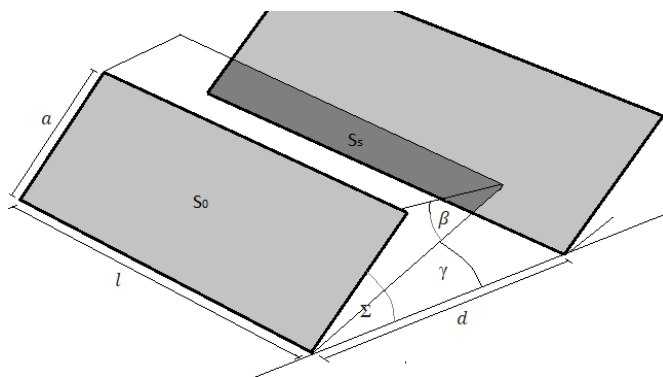
$$\sin\beta = \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega + \sin\varphi \cdot \sin\delta \quad (31)$$

$$\cos\theta = \cos(\varphi - \Sigma) \cos\delta \cdot \cos\omega + \sin(\varphi - \Sigma) \sin\delta \quad (32)$$

Za određivanje površine PV panela pod senkom, pored altitudnog, potrebno je poznavati i zavisnost azimutnog ugla sunca (γ) u funkciji časovnog ugla sunca, koja je data relacijom:

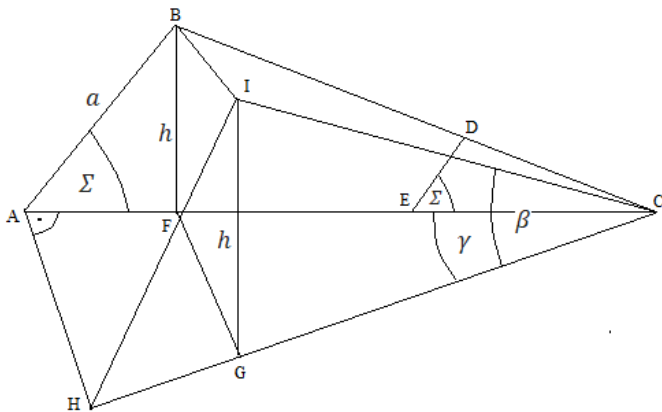
$$\cos\gamma = \frac{\sin\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega - \cos\varphi \cdot \sin\delta}{\cos\beta} \quad (33)$$

Na slici 1 je dat šematski prikaz dela PV sistema sa označenim svim potrebnim veličinama (rastojanjima i uglovima) za određivanje površine PV panela pod senkom.



Slika 1. Šematski prikaz dela PV sistema za određivanje površine PV panela pod senkom

Na slici 1 se mogu uočiti četiri karakteristična trougla na osnovu kojih se određuju rastojanja potrebna za izračunavanje površine PV panela pod senkom, a koji su jasnije prikazani na slici 2 (trouglovi ABC, EDC, GIC i FGC).



Slika 2. Geometrijska reprezentacija dela PV sistema korišćena za izračunavanje površine PV panela pod senkom

Dužina ED predstavlja širinu osenčane površine panela i određuje se na osnovu sličnosti trougla ABC i trougla EDC, uzimajući u obzir da je rastojanje AE jednako rastojanju između dva susedna reda PV panela (d). Rastojanje AC, koje je potrebno da se odredi dužina ED, se na osnovu slike 2, korišćenjem trigonometrijskih funkcija dobija kao:

$$AC = a \cdot \cos\Sigma + a \cdot \frac{\sin\Sigma \cdot \cos\gamma}{\tan\beta} \quad (34)$$

na osnovu čega se dužina ED određuje kao:

$$ED = a \cdot \frac{AC-d}{AC} \quad (35)$$

Potrebno je naglasiti da dužine u izrazima (34) i (35) moraju biti pozitivne veličine.

Sada se površina PV panela pod senkom može odrediti kao:

$$S_s = ED \cdot \left(l - \frac{AC+d}{2} \cdot |\tan\gamma| \right) \quad (36)$$

Izraz (36) uzima u obzir da senka, za azimutni ugao Sunca različit od nule, ne kreće od početka PV panela, kao i da njena površina ima oblik trapeza. U slučaju da osenčana površina PV panela ima oblik trougla, a to će se desiti u slučaju da je $AC \cdot |\tan\gamma| > l$, osenčana površina se računa kao:

$$S_s = \frac{1}{2} \cdot ED \cdot \frac{l}{AC \cdot |\tan\gamma|} \cdot (l - d \cdot |\tan\gamma|) \quad (37)$$

Naravno, izraz (37) ima smisla samo kada je $l > d \cdot |\tan\gamma|$. Takođe, u izrazu (34) funkcije $\cos\gamma$ i $\tan\beta$ imaju pozitivnu vrednosti jer zasenčenu površinu ima smisla računati samo u slučaju kada je azimutni ugao između -90° i 90° , dok je altitudni ugao uvek u prvom kvadrantu.

V PRIKAZ I ANALIZA REZULTATA

Na osnovu postupka i formula iznetih u prethodnim poglavljima, napravljene su funkcije u programskom paketu

Matlab za izračunavanje srednje dnevne insolacije PV panela na mesečnom i godišnjem nivou, kao i funkcije za određivanje optimalnog nagibnog ugla. Optimalni nagibni ugao PV panela za bilo koji razmatrani slučaj je određen kao nagibni ugao za koji se dobija najveća vrednost insolacije PV panela, pri čemu je posmatran opseg nagibnih uglova od 0 do 90° sa korakom od $0,1^\circ$. Potrebno je naglasiti da su svi rezultati dobijeni za geografsku širinu grada Niša, odnosno 43.32° severno, a da je kod razmatranja efekta senki za dužinu reda PV panela uzeta vrednost od 10m , a za širinu 1m . Kako bi dobijeni rezultati imali veću praktičnu vrednost i značaj razmatrana su različita rastojanja između redova PV panela prilikom određivanja optimalnih nagibnih uglova uz uvažavanje efekta senki.

U tabeli 1 su date prosečne temperature vazduha za sve mesece u godini na teritoriji grada Niša. Ove temperature su iskorišćene kao ambijentalne temperature prilikom određivanja efektivne insolacije i optimalnog nagibnog ugla PV panela uz uvažavanje temperature panela, za oba modela.

Tabela 1. Prosečna mesečna temperatura vazduha za grad Niš

mesec	1.	2.	3.	4.	5.	6.
Srednja temper. ($^\circ\text{C}$)	-0,2	2,5	6,7	11,9	16,6	19,5
mesec	7.	8.	9.	10.	11.	12.
Srednja temper. ($^\circ\text{C}$)	21,3	21,1	17,2	11,9	6,4	1,7

Tabela 2 sadrži merne podatke o srednjoj dnevnoj iradijaciji na horizontalnu površinu na mesečnom nivou, za grad Niš.

Tabela 2. Srednja dnevna iradijacija na horizontalnu površinu za područje grada Niša

mesec	1.	2.	3.	4.	5.	6.
$I_{Hsr} \left(\frac{\text{Wh}}{\text{m}^2} \right)$	72,9	108,3	143,7	208,3	254,1	264,6
mesec	7.	8.	9.	10.	11.	12.
$I_{Hsr} \left(\frac{\text{Wh}}{\text{m}^2} \right)$	279,2	256,3	222,9	143,7	77,1	62,5

Tabele 3 i 4, sadrže optimalne nagibne uglove PV panela na mesečnom i godišnjem nivou i odgovarajuće maksimalne srednje dnevne insolacije, za model vedrog dana i model realnih uslova oblačnosti, respektivno. Ovo je urađeno uz uvažavanje temperature PV panela (5 i 6 kolona) i bez uvažavanja temperature PV panela (3 i 4 kolona). U drugoj koloni ove tabele, u cilju upoređivanja rezultata, data je srednja dnevna insolacija horizontalno postavljenog PV panela.

Tabela 3. Optimalni nagibni uglovi i odgovarajuće maksimalne srednje dnevne insolacije za model vedrog dana

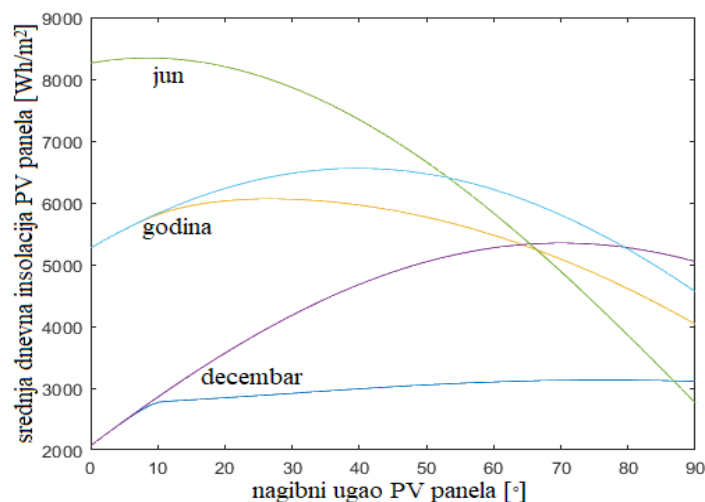
mesec u god.	$I_{sr} \left(\frac{\text{Wh}}{\text{m}^2} \right), \Sigma=0^\circ$	Optimal. ugao ($^\circ$)	$I_{sr} \left(\frac{\text{Wh}}{\text{m}^2} \right), \Sigma = \Sigma_{op}$	Optimal. ugao ($^\circ$)	$I_{sre} \left(\frac{\text{Wh}}{\text{m}^2} \right), \Sigma = \Sigma_{op}$
1.	2404	68,1	5745	68,1	6131
2.	3515	60,5	6536	60,5	6875
3.	5122	47,5	7168	47,5	7393
4.	6743	30,4	7638	30,4	7697

5.	7846	15,4	8093	15,4	7983
6.	8262	8,6	8343	8,6	8120
7.	7988	11,7	8133	11,7	7867
8.	7049	24,2	7608	24,2	7389
9.	5585	41,0	7071	41,0	6999
10.	3932	56,0	6461	56,0	6555
11.	2625	65,9	5737	65,9	5971
12.	2071	70,0	5348	70,0	5680
$\bar{\Sigma}$	5270	39,7	6557	40,5	6632

Tabela 4. Optimalni nagibni uglovi i odgovarajuće srednje dnevne insolacije u realnim uslovima oblačnosti

Mesec u god.	$I_{sr} \left(\frac{Wh}{m^2} \right), \Sigma=0^\circ$	Optimal. ugao ($^\circ$)	$I_{sr} \left(\frac{Wh}{m^2} \right), \Sigma = \Sigma_{op}$	Optimal. ugao ($^\circ$)	$I_{sre} \left(\frac{Wh}{m^2} \right), \Sigma = \Sigma_{op}$
1.	1750	57,4	2591	57,4	2813
2.	2600	51,8	3562	51,8	3806
3.	3450	33,8	3846	33,8	4041
4.	5000	21,6	5226	21,6	5340
5.	6100	8,7	6137	8,7	6123
6.	6350	0,7	6351	0,7	6255
7.	6700	5,3	6716	5,3	6552
8.	6150	20,0	6414	20,0	6274
9.	5350	40,3	6628	40,2	6576
10.	3450	54,6	5208	54,5	5317
11.	1850	53,9	2561	53,9	2713
12.	1500	57,6	2203	57,6	2380
$\bar{\Sigma}$	4195	30,8	4602	31,2	4665

Na slikama 3 i 4 su prikazane srednje dnevne insolacije PV panela sa i bez uvažavanja efekta senki, za period visoke iradijacije (jun), niske iradijacije (decembar) i na nivou godine, u zavisnosti od nagibnog ugla PV panela, za model vedrog dana i u realnim uslovima oblačnosti, respektivno. Pri čemu je ovom prilikom kod uvažavanja senki za rastojanje između redova PV panela korišćena vrednost od 1,4 m.

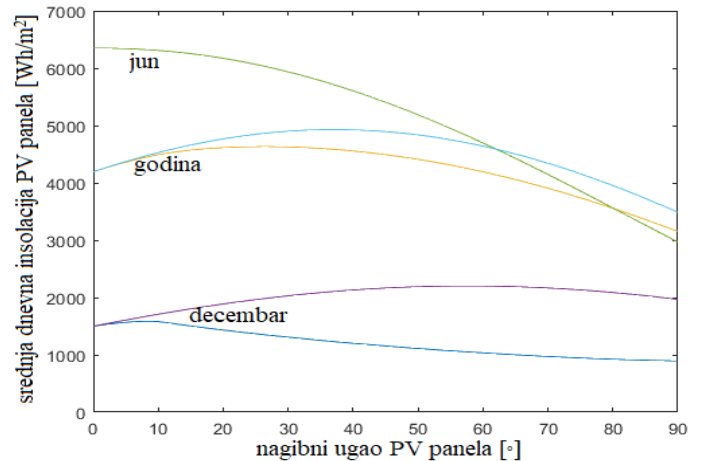


Slika 3. Srednje dnevne insolacije PV panela sa i bez uvažavanja efekta senki, za različite nagibne uglove - model vedrog dana

Na osnovu slika 3 i 4 se može zaključiti da je efekat senki

izraženiji u zimskom periodu, kada je sunce niže na nebu, a senka koju bacaju PV paneli veća, nego leti kada je sunce više.

Za uzeto rastojanje između redova panela od 1,4 m efekat senki praktično ne postoji za mesec jun, nezavisno od korišćenog modela.



Slika 4. Srednje dnevne insolacije PV panela sa i bez uvažavanja efekta senki, za različite nagibne uglove - realni uslovi oblačnosti

Tabela 5 sadrži vrednosti srednjih dnevnih insolacija uz uvažavanje efekta senki za model vedrog dana i za realne uslove oblačnosti, pri rastojanju između redova panela od 1,4 m.

Tabela 5. Srednje dnevne insolacije PV panela uz uvažavanje efekta senki za model vedrog dana i (realne uslove oblačnosti), d=1,4 m

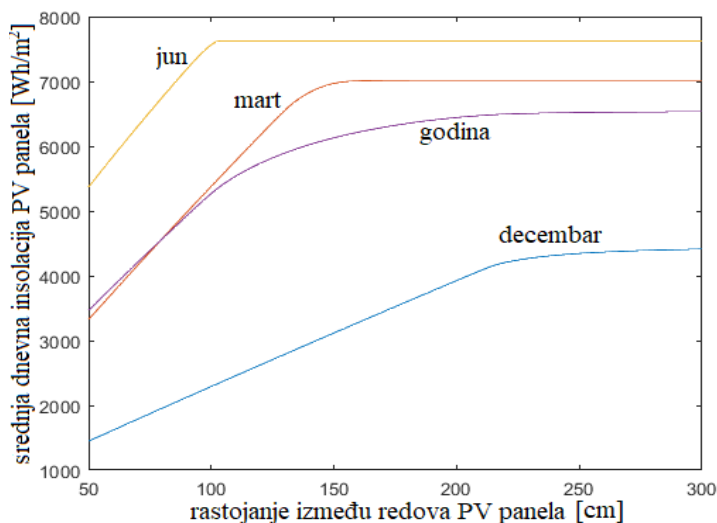
mesec u god.	$I_{sr} \left(\frac{Wh}{m^2} \right), \Sigma=15^\circ$	$I_{sr} \left(\frac{Wh}{m^2} \right), \Sigma=30^\circ$	$I_{sr} \left(\frac{Wh}{m^2} \right), \Sigma=45^\circ$
1.	3278 (1833)	3389 (1661)	3502 (1526)
2.	4672 (2917)	4881 (2823)	4991 (2723)
3.	6180 (3712)	6761 (3756)	6882 (3634)
4.	7405 (5205)	7637 (5191)	7428 (4958)
5.	8093 (6116)	7876 (5896)	7229 (5444)
6.	8298 (6255)	7865 (5937)	7021 (5407)
7.	8122 (6662)	7794 (6362)	7050 (5807)
8.	7527 (6397)	7576 (6347)	7197 (6000)
9.	6457 (6111)	6953 (6528)	7011 (6555)
10.	5025 (4137)	5344 (4275)	5425 (4294)
11.	4498 (1946)	4641 (1768)	4776 (1626)
12.	2811 (1505)	2918 (1309)	3023 (1156)
$\bar{\Sigma}$	5955 (4407)	6056 (4328)	5878 (4099)

Slike 5 i 6 prikazuju srednje dnevne insolacije PV panela u funkciji rastojanja između njihovih redova, za reprezentativne mesece u godini (jun, mart i decembar) i na godišnjem nivou, kod modela vedrog dana i realnim uslovima oblačnosti, respektivno.

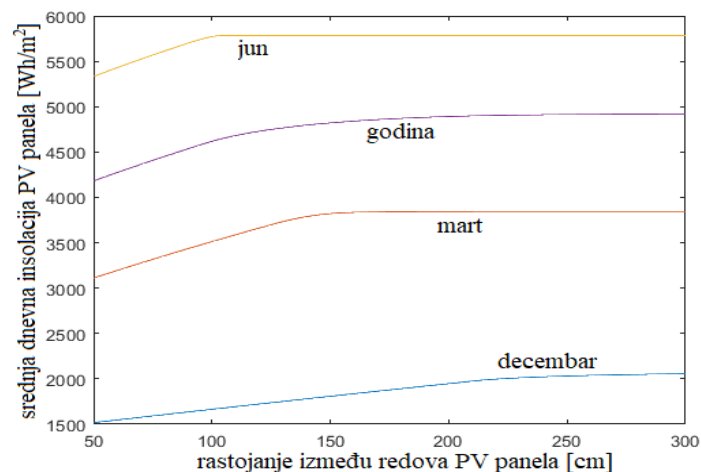
Na osnovu slika 5 i 6 može se zaključiti da se efekat senki između redova PV panela, odnosno da se smanjenje direktne komponente iradijacije usled senki može zanemariti ukoliko rastojanje između redova panela bude veće od 2,5m. Ovo

minimalno potrebno rastojanje je manje u letnjim, a veće u zimskim mesecima. Kako bi rezultati prilikom uvažavanja senki imali praktični značaj uzeta su rastojanja koja odgovaraju kolenu godišnje karakteristike (od 1,2m do 2,3m), i koja se mogu pojaviti u realnim fotonaponskim sistemima.

Tabele 6 i 7 sadrže maksimalne srednje dnevne insloacije PV panela uz uvažavanje efekta senki, pri različitim rastojanjima između redova panela, za model vedrog dana i u realnim uslovima oblačnosti, respektivno. Ove insolacije su dobijene za optimalne vrednosti nagibnog ugla.



Slika 5. Srednje dnevne insolacije PV panela uz uvažavanje efekta senki, za različita rastojanja između redova panela pri vedrom danu



Slika 6. Srednje dnevne insolacije PV panela uz uvažavanje efekta senki, za različita rastojanja između redova panela – realni uslovi oblačnosti

Na osnovu slika 5 i 6 može se zaključiti da se efekat senki između redova PV panela, odnosno da se smanjenje direktne komponente iradijacije usled senki može zanemariti ukoliko rastojanje između redova panela bude veće od 2,5 m. Ovo minimalno potrebno rastojanje je manje u letnjim, a veće u zimskim mesecima. Kako bi rezultati prilikom uvažavanja senki

imali praktični značaj uzeta su rastojanja koja odgovaraju kolenu godišnje karakteristike (od 1,2 m do 2,3 m), i koja se mogu pojaviti u realnim fotonaponskim sistemima.

Tabele 6 i 7 sadrže maksimalne srednje dnevne insolacije PV panela uz uvažavanje efekta senki, pri različitim rastojanjima između redova panela, za model vedrog dana i u realnim uslovima oblačnosti, respektivno. Ove insolacije su dobijene za optimalne vrednosti nagibnog ugla.

Tabela 6. Maksimalne srednje dnevne insolacije PV panela za različita rastojanja između njihovih redova za model vedrog dana

mesec u god.	$I_{sr} \left(\frac{Wh}{m^2} \right)$, d=1,2m	$I_{sr} \left(\frac{Wh}{m^2} \right)$, d=1,4m	$I_{sr} \left(\frac{Wh}{m^2} \right)$, d=1,6m	$I_{sr} \left(\frac{Wh}{m^2} \right)$, d=1,9m	$I_{sr} \left(\frac{Wh}{m^2} \right)$, d=2,3m
1.	3227	3615	4000	4569	5252
2.	4513	5074	5625	6235	6469
3.	6226	6882	7136	7166	7168
4.	7584	7638	7638	7638	7638
5.	8093	8093	8093	8093	8093
6.	8343	8343	8343	8343	8343
7.	8133	8133	8133	8133	8133
8.	7608	7608	7608	7608	7608
9.	6576	7032	7070	7071	7071
10.	4867	5463	5990	6367	6442
11.	3420	3830	4235	4835	5435
12.	2804	3133	3460	3945	4581
$\bar{\Sigma}$	5805	6064	6236	6404	6513

Tabela 7. Maksimalne srednje dnevne insolacije PV panela za različita rastojanja između njihovih redova – realni uslovi oblačnosti

mesec u god.	$I_{sr} \left(\frac{Wh}{m^2} \right)$, d=1,2m	$I_{sr} \left(\frac{Wh}{m^2} \right)$, d=1,4m	$I_{sr} \left(\frac{Wh}{m^2} \right)$, d=1,6m	$I_{sr} \left(\frac{Wh}{m^2} \right)$, d=1,9m	$I_{sr} \left(\frac{Wh}{m^2} \right)$, d=2,3m
1.	1800	1885	1978	2120	2293
2.	2739	2917	3095	3321	3460
3.	3633	3772	3827	3843	3846
4.	5223	5226	5226	5226	5226
5.	6137	6137	6137	6137	6137
6.	6351	6351	6351	6351	6351
7.	6716	6716	6716	6716	6716
8.	6414	6414	6414	6414	6414
9.	6226	6583	6627	6628	6628
10.	3882	4294	4678	5016	5139
11.	1901	1984	2073	2204	2350
12.	1528	1587	1652	1754	1885
$\bar{\Sigma}$	4315	4408	4472	4532	4566

Tabele 8 i 9 sadrže vrednosti optimalnih nagibnih uglova PV panela uz uvažavanje efekta senki, pri različitim rastojanjima između PV panela, za model vedrog dana i u realnim uslovima oblačnosti, respektivno.

Tabela 8. Optimalni nagibni uglovi PV panela, za različita rastojanja između njihovih redova za model vedrog dana

mesec u god.	Optimal. ugao(°) d=1,2m	Optimal. ugao(°) d=1,4m	Optimal. ugao(°) d=1,6m	Optimal. ugao(°) d=1,9m	Optimal. ugao(°) d=2,3m
1.	76,1	76,1	76,1	76,1	68,4
2.	71,1	71,1	67,4	59,4	59,9
3.	55,0	45,5	46,7	47,4	47,5
4.	27,8	30,4	30,4	30,4	30,4
5.	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4
6.	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6
7.	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7
8.	24,1	24,2	24,2	24,2	24,2
9.	39,5	39,6	41,0	41,0	41,0
10.	63,0	63,0	54,7	54,8	55,7
11.	72,6	72,6	72,6	71,4	64,8
12.	76,4	76,4	76,4	76,4	76,4
\bar{x}	22,4	26,8	29,9	33,3	37,6

Tabela 9. Optimalni nagibni uglovi PV panela, za različita rastojanja između njihovih redova – realni uslovi oblačnosti

mesec u god.	Optimal. ugao(°) d=1,2m	Optimal. ugao(°) d=1,4m	Optimal. ugao(°) d=1,6m	Optimal. ugao(°) d=1,9m	Optimal. ugao(°) d=2,3m
1.	4,6	10,1	15,9	25,6	40,2
2.	7,1	15,6	25,4	40,5	48,6
3.	12,1	24,3	31,8	33,4	33,8
4.	20,0	21,6	21,6	21,6	21,6
5.	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7
6.	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
7.	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3
8.	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
9.	36,4	38,5	40,2	40,3	40,3
10.	45,1	45,1	47,2	51,9	53,6
11.	4,9	10,7	17,0	27,3	41,1
12.	3,7	8,5	13,6	21,8	33,8
\bar{x}	10,7	16,5	20,4	25,2	28,5

Na osnovu dobijenih rezultata se može zaključiti da se optimalni nagibni ugao PV panela smanjuje kako se povećava ugao sunca nad horizontom u solarno podne, odnosno najveći je zimi, a najmanji leti. Ovo važi i za model vedrog dana i za realne uslove oblačnosti, pri čemu se kod uvažavanja oblačnosti povećava difuzna komponenta iradijacije, pa je u tim slučajevima optimalni nagibni ugao panela kako na mesečnom tako i na godišnjem nivou manji, nezavisno od toga da li je efekat senki uvažen ili ne. Takođe, prilikom smanjenja rastojanja između redova PV panela vrednost optimalnog nagibnog ugla za period niske iradijacije raste kod modela vedrog dana, dok u slučaju realnih uslova oblačnosti ona opada.

Tabele 3 i 4 pokazuju da se optimalni nagibni ugao PV panela zanemarljivo menja i u većini slučajeva ostaje isti pri uvažavanju temperature panela, kako za slučaj vedrog dana tako i u realnim uslovima oblačnosti.

Upoređivanjem rezultata dobijenih sa i bez uvažavanja efekta senki može se konstatovati, da je uticaj senki na smanjenje ukupne insolacije PV panela značajniji za slučaj vedrog dana,

nego u realnim uslovima oblačnosti, što je i očekivano s obzirom na značajno veću direktnu komponentu iradijacije u tom slučaju. Konkretno, za korišćene dimenzije PV panela i razmak između njihovih redova od 1,2 m (najmanje razmatrano rastojanje), usled zasenčenja delova površine PV panela dolazi do smanjenja maksimalne srednje dnevne insolacije na godišnjem nivou od 11,47% za slučaj vedrog dana i 6,24% za realne uslove oblačnosti. Efekat senki takođe ima uticaj i na smanjenje optimalnog nagibnog ugla PV panela na godišnjem nivou, pa tako za rastojanje od 1,2 m između redova panela, on sa 39,7° pada na 22,4° za slučaj vedrog dana, i sa 30,8° na 10,7° za realne uslove oblačnosti. Naravno, potrebno je naglasiti da efekat senki u velikoj meri zavisi od odnosa rastojanja između redova PV panela i njihovih dimenzija, kao i od posmatrane geografske širine.

VI ZAKLJUČAK

U ovom radu je predstavljen metod za određivanje srednje dnevne insolacije PV panela, u slučaju usamljenog panela i uz uvažavanje efekta senki u fotonaponskim sistemima, korišćenjem modela vedrog dana i modela realnih uslova oblačnosti. Dobijene vrednosti srednjih dnevnih insolacija PV panela su iskorišćene za određivanje optimalnih nagibnih uglova PV panela na mesečnom i godišnjem nivou, za slučaj vedrog dana i u realnim uslovima oblačnosti, sa i bez uvažavanja efekta senki. Analizom dobijenih rezultata zaključilo se da uticaj senki između redova PV panela ima veći značaj pri vedrom danu, kada za rastojanje između panela od 1,4m smanjuje ukupnu godišnju insolaciju PV panela za približno 11,5%, skoro duplo više nego u realnim uslovima oblačnosti. Pored smanjenja ukupne insolacije, efekat senki smanjuje i optimalni nagibni ugao PV panela na nivou godine. Ovo smanjenje optimalnog nagibnog ugla na godišnjem nivou iznosi 17,3°, za vedar dan i 20,1°, za realne uslove oblačnosti. Takođe, ustanovljeno je da se efekat senki, za korišćenu konfiguraciju PV sistema i zadatu geografsku širinu može zanemariti ukoliko je rastojanje između redova PV panela veće od 2,5 m.

LITERATURA

- [1] Mikulović, J., Đurišić, Ž. *Solarna energetika*, Beograd, Akademski misao, 2019.
- [2] Mikulović, J., Đurišić, Ž., Kostić, R. Određivanje optimalnih nagibnih uglova fotonaponskih panela, in Proc. *INFOTEH-JAHORINA*, Vol 12, 2013. <https://infoteh.etf.ues.rs.ba/zbornik/2013/radovi/ENS-3/ENS-3-7.pdf>
- [3] Stanić, M., Vasilić, Ž., Prodanović, D. Uticaj nagiba i orijentacije površine na proračun referentne evapotranspiracije primenom Penman-Monteith metode, *Vodoprivreda*, Vol. 43, No. 4-6, pp. 165-173, 2011.
- [4] Berisha, X., Zeqiri, A., Meha, D. Solar Radiation-the Estimation of the Optimum Tilt Angles for South-facing Surfaces in Pristina, 2017. <https://pdfs.semanticscholar.org/9914/3ef4c4d857de5b822092bbb965213fd47469.pdf>, DOI: 10.20944/preprints201708.0010v1
- [5] Rehman, N. Ur., Siddiqui, M. A. Development of simulation tool for finding optimum tilt angles for solar collectors, in Proc. *45th IEP Convention*, 2012. <http://iepkarachi.org.pk/pdf/Development%20of%20Simulation%20Tool%20for%20Finding%20Optimum%20Tilt%20Angles%20for%20Solar%20Collectors.pdf>
- [6] Handoyo, E., Ichani, D., Probobo. The Optimal Tilt Angle of a Sollar Collector, *Energy procedia*, Vol. 32, pp. 166-175, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.022>
- [7] Safdarian, F., Nazari, M.E. Optimal Tilt Angle and Orientation for Solar Collectors in Iran, in Proc. *IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, 2015. <https://doi.org/10.1109/demped.2015.7303735>

- [8] Malara, A., Marino, C., Nucara, A., Pietrafesa, M., Scopelliti, F., Strega, G. Energetic and Economic Analysis of Shading Effects on PV Panels Energy Production, *International Journal of Heat and Technology*, pp. 465-472, 2016. <https://doi.org/10.18280/ijht.340316>
- [9] Dorobantu, L., Popescu, M.O., Popescu, Cl., Craciunescu, A. Simulating shadow effect on PV panels, *Renewable Energy and Power Quality Journal*, pp. 1064-1068, 2012. <https://doi.org/10.24084/repqj10.588>
- [10] Pavlović, T., Milosavljević, D., Radivojević, A., Pavlović, M. Comparison and assessment of electricity generation capacity for different types of PV solar plants of 1MW in Soko Banja, Serbia, *Thermal Science*, Vol. 15, Issue 3, pp. 605-618, 2011. <https://doi.org/10.2298/TSCI110322065P>
- [11] Matić-Kekić, S. Optimalan ugao nagiba solarnog kolektora u odnosu na vertikalu, *Letopis naučnih radova*, Vol, 30, pp. 161-167, 2006.

AUTORI

Nikola Krstić - asistent, Elektronski fakultet u Nišu,
nikola.krstic@elfak.ni.ac.rs

dr Dardan Klimenta - redovni profesor, Fakultet tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici, dardan.klimenta@pr.ac.rs

dr Dragan Tasić – redovni profesor, Elektronski Fakultet u Nišu, dragan.tasic@elfak.ni.ac.rs

dr Dragana Radosavljević - docent, Fakultet tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici, dragana.radosavljevic@pr.ac.rs