

Modeli za proračun difuznog zračenja na solarne kolektore

Jovan Mikulović, Željko Đurišić

Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Beograd, Srbija

mikulovic@etf.rs, djurisic@etf.rs

Sažetak—U radu su razmatrani najpoznatiji izotropski i anizotropski modeli za proračun difuzne komponente iradijance na solarne kolektore. Dati su osnovni izrazi i istaknute su karakteristike pojedinih modela. Na osnovu mernih podataka o horizontalnoj iradijansi ispitane su mogućnosti primene pojedinih modela za proračun difuzne komponente iradijance na solarne kolektore locirane na području Beograda.

Ključne riječi—difuzna komponenta iradijance; izotropski model; anizotropski model; solarni kolektor;

I. UVOD

Za proračun električne energije koju proizvode fotonaponski kolektori ili za proračun toplotne energije koja se dobija iz solarnih termalnih kolektora, neophodno je izvršiti procenu solarnog zračenja na kolektore. Ukupno zračenje koje dospeva na solarni kolektor koji je nagnut u odnosu na horizontalnu površinu sastoji se iz direktnog, difuznog i reflektovanog zračenja. Direktno zračenje predstavlja zračenje koje od sunca do solarnog kolektora dospeva pravolinijski. Difuzno zračenje na solarni kolektor dolazi iz raznih pravaca kao posledica rasejanja sunčevog zračenja zbog prisustva oblaka, molekula vazduha i aerosoli u atmosferi. Višestruke refleksije zračenja između tla i oblaka takođe utiču na povećanje difuznog zračenja na solarni kolektor. Reflektovano zračenje na solarni kolektor se javlja kao posledica odbijanja direktnog i difuznog zračenja od okolnih objekata ili podloge na kojoj se nalazi kolektor.

Za merenje intenziteta solarnog zračenja najčešće se koriste piranometri koji mere ukupnu solarnu iradijaciju na horizontalnu površinu. Međutim, za optimalno projektovanje i eksploataciju solarnih energetske sistema neophodne su informacije o odnosu direktne i difuzne komponente solarnog zračenja. Obe komponente zavise od stanja oblačnosti neba u toku godine. Tokom oblačnih dana difuzna komponenta zračenja može da ima vrednosti koje premašuju direktnu komponentu zračenja. Tokom vedrih dana dominira direktno zračenje, ali je neophodno i tada uvažiti prisustvo difuzne komponente. Difuzno zračenje je teže odrediti nego direktno zračenje, s obzirom na brojne faktore koji na njega utiču.

Za procenu difuznog zračenja razvijeni su izotropski modeli koji pretpostavljaju ravnomernu raspodelu difuznog zračenja sa nebeske polufere i anizotropski modeli koji

pretpostavljaju da na nebeskoj polusferi postoje oblasti sa normalnim i oblasti povećanim intenzitetom difuznog zračenja.

Ovaj rad se bavi uporednom analizom različitih modela za procenu difuzne komponente zračenja na solarne kolektore. U radu je ispitana mogućnost primene pojedinih modela za procenu difuznog zračenja na solarne panele locirane na području Beograda.

II. MODELI ZA PRORAČUN DIFUZNOG ZRAČENJA

A. Izotropski modeli

Najjednostavniji modeli za procenu difuznog zračenja su izotropski modeli koji pretpostavljaju ravnomernu raspodelu difuznog zračenja. Ovi modeli polaze od vrednosti difuznog zračenja koje pada na horizontalnu površinu i izračunavaju difuznu komponentu zračenja na solarni kolektor. U slučaju vedrog vremena bez oblačnosti, difuzna komponenta iradijance I_{DH} koja pada na horizontalnu površinu srazmerna je iradijansi direktnog zračenja I_B , bez obzira na položaj sunca na nebu:

$$I_{DH} = C \cdot I_B, \quad (1)$$

gde je C difuzna konstanta.

Difuzna konstanta C se može odrediti na osnovu sledećeg empirijskog izraza koji je predložen u ASHRAE modelu [1]:

$$C = 0,095 + 0,04 \sin\left(\frac{360}{365}(n-100)\right), \quad (2)$$

gde je n redni broj dana u godini.

Prethodni izraz je izveden na osnovu *Liu-Jordan*-ove korelacije između direktnog i difuznog zračenja uspostavljene na osnovu merenja sunčevog zračenja na 98 lokacija u Sjedinjenim Američkim Državama i Kanadi [2]. Da bi se omogućila šira primena prethodnog modela za difuzno zračenje, *Machler* i *Iqbal* su predložili sledeći izraz za izračunavanje difuzne konstante [3]:

$$C = 0,1180 + 0,0175 \sin\left(\frac{360}{365}(n-100)\right). \quad (3)$$

U cilju utvrđivanja mogućnosti primene prethodnih izraza za proračun potencijala solarnog zračenja na području Srbije, izvršena su desetominutna merenja horizontalne iradijance za područje Beograda u periodu od godinu dana. Minimizacijom sume kvadrata odstupanja difuzne komponente iradijance od odgovarajuće komponente koja je dobijena na osnovu merenja iradijance izveden je sledeći korigovan izraz za difuznu konstantu C za područje Beograda [4]:

$$C = 0,2018 + 0,0143 \sin\left(\frac{360}{365}(n-100)\right). \quad (4)$$

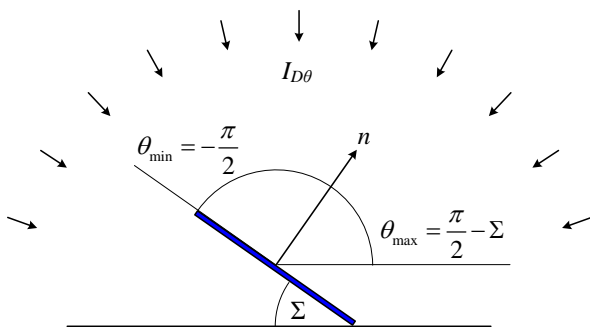
Prethodni izrazi za procenu difuzne komponente horizontalnog zračenja imaju ograničenu tačnost i mogu se koristiti samo za slučaj vedrih dana. U slučaju kada se raspolaže merenjima iradijance na horizontalnu površinu, pogodnije je koristiti empirijske relacije za procenu difuzne komponente horizontalne iradijance. Najpoznatija i najviše korišćena empirijska relacija za procenu difuzne komponente horizontalnog zračenja je *Liu-Jordan*-ova relacija iz 1960. godine [1]. Ova relacija izražava udeo difuzne komponente u ukupnoj horizontalnoj insolaciji u funkciji indeksa vedrine u obliku sledećeg polinoma:

$$\frac{\bar{I}_{DH}}{\bar{I}_H} = 1,39 - 4,027K_T + 5,531K_T^2 - 3,108K_T^3, \quad (5)$$

gde K_T predstavlja indeks vedrine koji se definiše kao kao odnos srednje dnevne insolacije na horizontalnoj površini na Zemlji \bar{I}_H i srednje dnevne ekstraterestričke insolacije na horizontalnoj površini Zemljine atmosfere \bar{I}_{0H} , na geografskoj širini i dužini koja odgovara mernom mestu na Zemlji:

$$K_T = \frac{\bar{I}_H}{\bar{I}_{0H}}. \quad (6)$$

Za određivanje difuzne komponente iradijance na solarni kolektor koji je nagnut pod određenim uglom u odnosu na horizontalnu površinu, najčešće se koristi jednostavan model za koji pretpostavlja ravnomernu raspodelu difuznog zračenja u cilindričnom koordinatnom sistemu [1], [5]. Pri tome, korišćeni model se svodi na ravan, kao što je prikazano na Sl. 1.



Slika 1. Cilindrični model za izračunavanje difuznog zračenja na kolektor

U cilju određivanja difuzne komponente iradijance na kolektor, uvodi se veličina $I_{D\theta} = dI_D/d\theta$ koja daje raspodelu ukupne difuzne iradijance I_D po incidentnom uglu θ . Za solarni kolektor postavljen horizontalno, difuzna komponenta iradijance na kolektor će biti:

$$I_{DH} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} I_{D\theta} \cos \theta d\theta = 2I_{D0}. \quad (7)$$

Za proizvoljan nagibni ugao Σ kolektora u odnosu na horizontalnu površinu, difuzna komponenta iradijance na površinu kolektora prema ovom modelu je:

$$I_{DC} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2-\Sigma} I_{D\theta} \cos \theta d\theta = I_{D0}(1 + \cos \Sigma) = I_{DH} \frac{1 + \cos \Sigma}{2}. \quad (8)$$

Prethodni izraz daje vrednost $I_{DC} = I_{DH}$ u slučaju horizontalno postavljenog kolektora ($\Sigma = 0$) i vrednost $I_{DC} = I_{DH}/2$ u slučaju vertikalno postavljenog kolektora ($\Sigma = \pi/2$).

Cilindrični model za izračunavanje izotropnog difuznog zračenja na solarni kolektor je pogodan za primenu kod fotonaponskih elektrana kada su fotonaponski moduli postavljeni u redove. Zbog svoje jednostavnosti, ovaj model je najčešće korišćeni model za izračunavanje difuznog zračenja u inženjerskim proračunima.

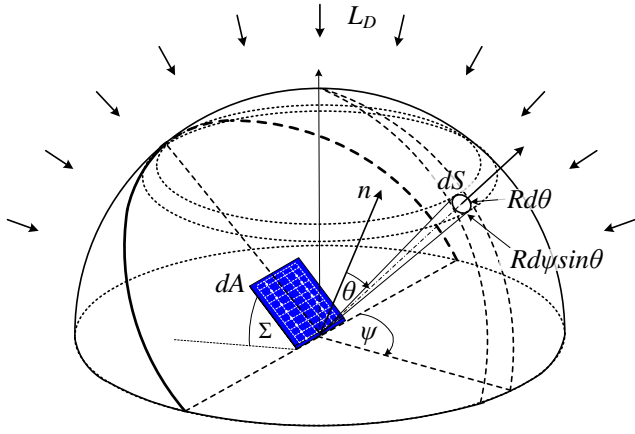
Prethodni model difuznog zračenja na kolektor je naziva i dvodimenzionalnim modelom jer je pravac iz koga dolazi zračenje na kolektor okarakterisan samo jednim uglom. Model koji više odgovara realnosti je trodimenzionalni model kod koga se pravac iz koga dolazi zračenje na kolektor definiše na osnovu dva ugla: zenitnog i azimutnog ugla [6], [7].

Za određivanje trodimenzionalnog difuznog zračenja na proizvoljno orijentisani kolektor potrebno je koristiti veličinu koja definiše raspodelu zračenja po nebeskoj polusferi. U tu svrhu se koristi radijansa L_D koja se u slučaju difuznog zračenja može definisati kao iradijansa difuznog zračenja dI_D iz određenog pravca po jedinici prostornog ugla $d\Omega$, koja je normalna na osu prostornog ugla [8]:

$$L_D = \frac{dI_D}{d\Omega \cos \theta}, \quad (9)$$

gde je θ ugao između normale na površinu kolektora i ose prostornog ugla $d\Omega$. Prostorni ugao se izražava u steradianima (sr), radijansa u $W/(m^2 \text{ sr})$.

Trodimenzionalni izotropski model pretpostavlja da difuzno zračenje na solarni kolektor dolazi jednakim intenzitetom iz svih pravaca. Međutim, efektivno zračenje na solarni kolektor zavisi od incidentnog ugla zračenja θ u odnosu na normalu na kolektor. Na Sl. 2 je prikazan model nebeske polusfere sa odgovarajućim uglovima za određivanje difuzne komponente zračenje na kolektor površine dA .



Slika 2. Sferni model za izračunavanje difuznog zračenja na kolektor

Elementarni prostorni ugao $d\Omega$ koji odgovara površini dS na nebeskoj polusferi sa koje dolazi difuzno zračenje je:

$$d\Omega = \frac{dS}{R^2} = \frac{Rd\theta Rd\psi \sin\theta}{R^2} = \sin\theta d\theta d\psi. \quad (10)$$

gde su uglovi θ i ψ označeni na Sl. 2.

U slučaju horizontalno postavljenog kolektora, na kolektor pada celokupno difuzno zračenje sa nebeske polusfere. Na osnovu (9) i (10), difuzna komponenta iradijance na solarni kolektor koji je postavljen horizontalno je:

$$I_{DH} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L \sin\theta \cos\theta d\theta d\psi = \pi L. \quad (11)$$

Difuzna komponenta zračenja na kolektor koji je postavljen pod nagibnim uglom Σ se dobija ako se pri integraljenju radijance L po nebeskoj polusferi izostavi difuzno zračenje sa isečka koji je određen nagibnim uglom Σ :

$$I_{DC} = \int_0^{\pi} \int_0^{\pi/2} L \sin\theta \cos\theta d\theta d\psi + \int_{\pi}^{2\pi} \int_0^{\pi/2-\Sigma} L \sin\theta \cos\theta d\theta d\psi. \quad (12)$$

Rešavanjem prethodnog integrala dobija se izraz za difuznu komponentu iradijance na solarni kolektor koji je postavljen pod nagibnim uglom Σ :

$$I_{DC} = \pi L \frac{3 + \cos 2\Sigma}{4} = I_{DH} \frac{3 + \cos 2\Sigma}{4}. \quad (13)$$

Kada je solarni kolektor postavljen u horizontalnoj ravni ($\Sigma=0$), prethodni izraz daje maksimalnu vrednost za difuznu komponentu iradijance na kolektor koja iznosi I_{DH} . Ako je kolektor postavljen vertikalno ($\Sigma=\pi/2$), onda je difuzna komponenta iradijance na kolektor $I_{DH}/2$.

Izotropski modeli difuznog zračenja često daju rezultate koji odstupaju od stvarnih meteoroloških podataka. Pokazalo se

da izotropski modeli daju dobre rezultate pod uslovom da je nebo potpuno prekriveno oblacima. Pri delimičnoj prekrivenosti neba oblacima izotropski modeli daju rezultate sa većom greškom.

B. Anizotropski modeli

Anizotropski modeli za procenu difuznog zračenja uvažavaju činjenicu da na nebeskoj polusferi postoje oblasti sa normalnim i oblasti sa povećanim intenzitetom difuznog zračenja [9]. Povećani intenzitet sunčevog zračenja se javlja u okolini sunčevog diska (cirkumsolarno zračenje) i blizu linije horizonta.

Jednostavnu modifikaciju izotropskog modela za kolektore orijentisane prema jugu izvršio je Koronakis uvodeći pretpostavku da vertikalna ravan orijentisana prema jugu zahvata $2/3$ ukupnog difuznog zračenja [10]:

$$I_{DC} = I_{DH} \frac{2 + \cos \Sigma}{3}. \quad (14)$$

Cirkumsolarni anizotropski model pretpostavlja da ukupno difuzno zračenje dolazi iz oblasti gde se nalazi sunčev disk u datom trenutku [8],[11]. Ovakav model difuzno zračenje tretira kao direktno zračenje:

$$I_{DC} = I_{DH} \frac{\cos \theta}{\cos \theta_Z}, \quad (15)$$

gde su $R_B = \cos\theta / \cos\theta_Z$ faktor nagiba i θ_Z zenitni ugao.

Temps i *Coulson* su takođe modifikovali izotropski model uvodeći član koji modeluje difuzno zračenje koje dolazi iz blizine sunčevog diska i član koji modeluje difuzno zračenje iz oblasti blizu horizonta [12]:

$$I_{DC} = I_{DH} \frac{1 + \cos \Sigma}{2} \left(1 + \cos^2 \theta \sin^3 \theta_Z\right) \left(1 + \sin^3 \left(\frac{\Sigma}{2}\right)\right), \quad (16)$$

gde je θ incidentni ugao direktnog zračenja na kolektor.

Klucher-ov model predstavlja nadogradnju prethodnog modela tako što se uvodi funkcija F koja definiše stepen prekrivenosti neba oblacima [13]:

$$I_{DC} = I_{DH} \frac{1 + \cos \Sigma}{2} \left(1 + F \cos^2 \theta \sin^3 \theta_Z\right) \left(1 + F \sin^3 \left(\frac{\Sigma}{2}\right)\right), \quad (17)$$

gde je:

$$F = 1 - \left(\frac{I_{DH}}{I_{BH} + I_{DH}}\right)^2. \quad (18)$$

Anizotropski model koji su predložili *Hay* i *Davies* pretpostavlja da difuzno zračenje potiče od sunčevog diska i od ostatka neba sa izotropskim zračenjem [11]:

$$I_{DC} = I_{DH} \left(\frac{I_{BH}}{I_{OH}} R_B + \frac{1 + \cos \Sigma}{2} \left(1 - \frac{I_{BH}}{I_{OH}} \right) \right), \quad (19)$$

gde je I_{BH} direktna iradijansa na horizontalnu površinu, a I_{OH} ekstraterestrička iradijansa na horizontalnu površinu.

Reindl-ov model predstavlja nadogradnju prethodnog modela tako što uvodi član za difuzno zračenje koje dolazi iz oblasti blizu horizonta [14]:

$$I_{DC} = I_{DH} \left(\frac{I_{BH}}{I_{OH}} R_B + \frac{1 + \cos \Sigma}{2} \left(1 - \frac{I_{BH}}{I_{OH}} \right) \left(1 + \sqrt{\frac{I_{BH}}{I_{BH} + I_{DH}}} \sin^3 \frac{\Sigma}{2} \right) \right). \quad (20)$$

Perez-ov model je najsloženiji anizotropski model [5], [9], [11], [15]. Model usvaja tri oblasti na nebu sa različitim intenzitetom difuznog zračenja: cirkumsolarna oblast, oblast blizu horizonta i preostali deo neba sa izotropskim difuznim zračenjem. Jednačina za difuznu iradijansu na površinu solarnog kolektora koji je postavljen pod uglom Σ je:

$$I_{DC} = I_{DH} \left((1 - F_1) \frac{1 + \cos \Sigma}{2} + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \sin \Sigma \right), \quad (21)$$

gde F_1 i F_2 predstavljaju koeficijente sjajnosti neba za modelovanje cirkumsolarne oblasti i oblasti iznad horizonta, a koeficijenti a i b uzimaju u obzir odgovarajuće incidentne uglove cirkumsolarnog zračenja na nagnutu i horizontalnu površinu. Koeficijenti a i b se određuju na osnovu solarne geometrije:

$$a = \max(0, \cos \theta), \quad (22)$$

$$b = \max(\cos 85^\circ, \cos \theta_z). \quad (23)$$

Za određivanje koeficijenata F_1 i F_2 izračunava se stepen vedrine neba ε :

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + 5,535 \cdot 10^{-6} \theta_z^3} \left(\frac{I_{DH} + I_B}{I_{DH}} + 5,535 \cdot 10^{-6} \theta_z^3 \right), \quad (24)$$

a zatim se vrši njegova kategorizacija kojom mu se dodeljuje celobrojna vrednost ε_b prema tabeli I. Na osnovu kategorije vedrine ε_b određuju se vrednosti Perez-ovih koeficijenata F_{11} , F_{12} , F_{13} , F_{21} , F_{22} i F_{23} prema tabeli II.

TABELA I. KATEGORIZACIJA IDEKSA VEDRINE NEBA

ε_b	Donja granica	Gornja granica
1	1	1,065
2	1,065	1,230
3	1,230	1,500
4	1,500	1,950
5	1,950	2,800
6	2,800	4,500
7	4,500	6,200
8	6,200	-

TABELA II. VREDNOSTI PEREZ-OVIH KOEFICIJENATA

ε_b	F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{21}	F_{22}	F_{23}
1	-0,008	0,588	-0,062	-0,060	0,072	-0,022
2	0,130	0,683	-0,151	-0,019	0,066	-0,029
3	0,330	0,487	-0,221	0,055	-0,064	-0,026
4	0,568	0,187	-0,295	0,109	-0,152	-0,014
5	0,873	-0,392	-0,362	0,226	-0,462	0,001
6	1,132	-1,237	-0,412	0,288	-0,823	0,056
7	1,060	-1,600	-0,359	0,264	-1,127	0,131
8	0,678	-0,327	-0,250	0,156	-1,377	0,251

Koeficijenti F_1 i F_2 se izračunavaju prema izrazima:

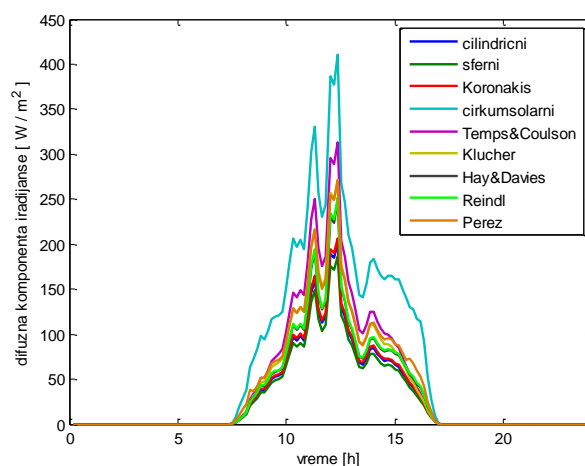
$$F_1 = \max \left(0, \left(F_{11} + F_{12} \frac{I_{DH}}{I_0} m + \frac{\pi \theta_z}{180^\circ} F_{13} \right) \right), \quad (25)$$

$$F_2 = F_{21} + F_{22} \frac{I_{DH}}{I_0} m + \frac{\pi \theta_z}{180^\circ} F_{23}, \quad (26)$$

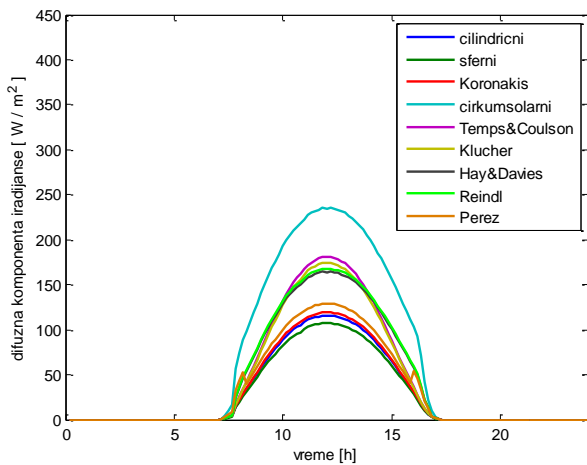
gde su I_{DH} difuzna iradijansa na horizontalnu površinu, I_0 ekstraterestrička iradijansa na površinu koja je normalna na pravac zračenja i m koeficijent vazdušne mase.

III. REZULTATI PRORAČUNA DIFUZNE KOMPONENTE IRADIJANSE NA SOLARNE KOLEKTORE

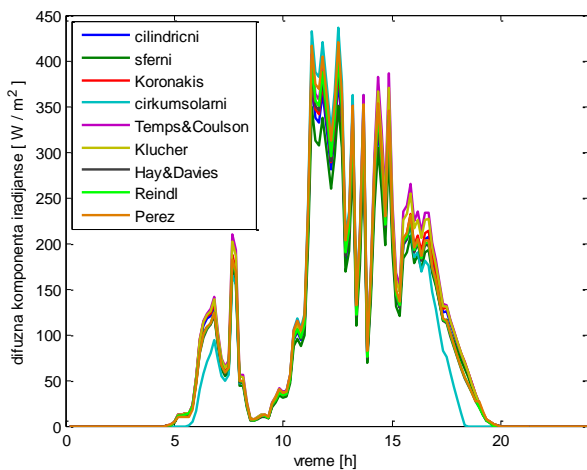
U cilju utvrđivanja mogućnosti primene različitih modela za izračunavanje difuzne komponente iradijanse na solarne kolektora locirane na području Beograda, korišćeni su desetominutni merni podaci o horizontalnoj iradijansi [W/m^2] u toku 2014. godine za Beograd. Primenom Liu-Jordan-ove relacije (5) proračunate su desetominutne vrednosti difuzne komponente horizontalne iradijanse, a zatim su primenom različitih modela izvršeni proračuni difuzne komponente iradijanse na solarni kolektor koji je postavljen pod optimalnim nagibnim uglom $\Sigma=34^\circ$. Izračunate desetominutne vrednosti difuzne iradijanse na solarni kolektor za oblačan zimski dan, za vedar zimski dan, za oblačan letnji dan i za vedar letnji dan su prikazane na Sl. 3, Sl. 4, Sl.5 i Sl.6.



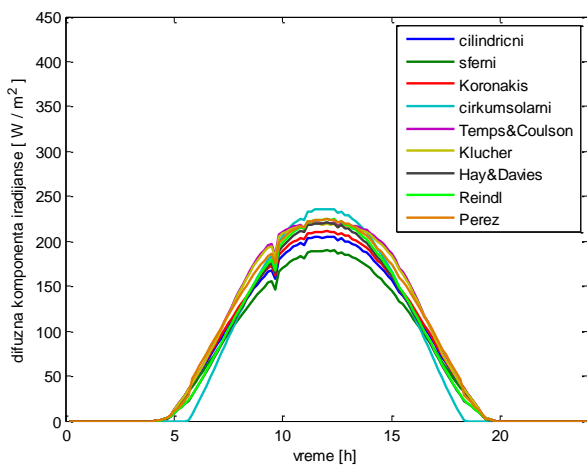
Slika 3. SIDifuzna komponenta iradijanse na solarni kolektor za oblačan zimski dan (2. februar 2014. godine), prema različitim modelima



Slika 4. Difuzna komponenta iradijance na solarni kolektor za vedar zimski dan (3. februar 2014. godine), prema različitim modelima



Slika 5. Difuzna komponenta iradijance na solarni kolektor za oblačan letnji dan (3. jul 2014. godine), prema različitim modelima



Slika 6. Difuzna komponenta iradijance na solarni kolektor za vedar letnji dan (4. jul 2014. godine), prema različitim modelima

Na osnovu prikazanih rezultata proračuna difuzne komponente iradijance na solarni kolektor za karakteristične zimske i letnje dane (na prethodnim slikama), može se uočiti da se difuzna komponenta iradijance jako menja pri oblačnim danima, pri čemu dostiže relativno velike i relativno male vrednosti. Ovo se može oblasniti različitim stepenom oblačnosti: pri maloj (umerenoj) oblačnosti dolazi do velikog rasejanja sunčevog zračenja, a pri velikoj oblačnosti direktno sunčevo zračenje teško prolazi kroz oblake, tako da je malo i rasejanje zračenja. U uslovima velike oblačnosti manje su razlike u vrednostima difuzne komponente iradijance na kolektor koje daju različiti modeli (izotropski i anizotropski).

Takođe se može uočiti da se rezultati proračuna difuzne komponente iradijance na solarni kolektor prema različitim modelima značajno razlikuju u zimskim danima. Izotropski modeli daju manje vrednosti difuzne iradijance na solarni kolektor u odnosu na anizotropne modele. Pri tome, cilindrični izotropski model daje veće vrednosti difuzne iradijance od sfernog izotropskog modela. Zbog toga su vrednosti koje daje cilindrični izotropski model bliže vrednostima koje daju anizotropski modeli. Iako naizgled manje realističan, cilindrični model difuznog zračenja primenjen na južno orijentisane solarne kolektora delimično favorizuje difuzno zračenje koje dolazi iz pravca juga, a koje je u velikoj meri cirkumsolarno zračenje (s obzirom da se sunce kreće od istoka prema jugu i zalazi na zapadu). Za razliku od cilindričnog izotropskog modela, cirkumsolarno anizotropski model tretira ukupno difuzno zračenje kao cirkumsolarno, što za posledicu ima to da se dobijaju veće vrednosti difuzne komponente iradijance na kolektor nego u slučaju bilo kog drugog modela (osim u jutarnjim i večernjim satima).

Perez-ov anizotropski model se navodi kao najsloženiji [9], a često i kao naprecizniji model difuznog zračenja [11]. Na osnovu prikazanih rezultata proračuna difuzne komponente iradijance na solarni kolektor (na prethodnim slikama), može se uočiti da *Perez*-ov anizotropski model daje vrednosti za difuznu iradijansu koje su neznatno veće od odgovarajućih vrednosti koje daju izotropski modeli, ali najčešće manje od odgovarajućih vrednosti koje daju drugi anizotropski modeli. Na Sl.4 i Sl.6 se može uočiti i jedan nedostatak *Perez*-ovog modela: usled korišćenja diskretnih vrednosti za stepen vedrine neba ϵ , kao i diskretnih vrednosti za koeficijente F_{11} , F_{12} , F_{13} , F_{21} , F_{22} i F_{23} , izračunata difuzna komponenta iradijance ima skokovite promene u jutarnjim i večernjim satima (kada dolazi do većih promena stepena vedrine).

IV. ZAKLJUČAK

S obzirom na razlike u vrednostima koje daju različiti modeli za proračun difuzne komponente zračenja na solarni kolektor, pri analizi solarnog potencijala za potrebe planiranja i projektovanja solarnih elektrana treba imati u vidu nesigurnost u proračunu difuzne komponente iradijance. Na osnovu prikazanih rezultata proračuna difuzne komponente iradijance na solarni kolektor može se zaključiti da se korišćenjem izotropskog cilindričnog modela dobijaju vrednosti koje manje odstupaju od odgovarajućih vrednosti koje daju anizotropski modeli. S obzirom da i složeniji anizotropski modeli imaju određene nedostatke, za izračunavanje difuzne komponente iradijance preporučuje se jednostavan izraz koji je izveden na

osnovu cilindričnog izotropskog modela. Vrednosti za difuznu komponentu iradijance koje se dobijaju primenom ovog modela su neznatno manje od odgovarajućih vrednosti koje daje znatno složeniji Perez-ov anizotropski model.

ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju Ministarstvu za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije za finansijsku podršku ovom radu u okviru tehnoloških projekata III42009 i TR-33037.

LITERATURA

- [1] G. M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, 2nd ed., John Wiley & Sons, 2013.
- [2] B. Liu and R. Jordan, "The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation," *Solar Energy*, Vol. 4, No. 3, pp. 1-19, 1960.
- [3] S. A. M. Maleki, H. Hizam, and C. Gomes, "Estimation of Hourly, Daily and Monthly Global Solar Radiation on Inclined Surfaces: Models Re-Visited," *Energies*, vol 10(1), pp. 1-28, 2017. (Iqbal)
- [4] R. Kostić and J. Mikulović, "The empirical models for estimating solar insolation in Serbia by using meteorological data on cloudiness," *Renewable Energy*, Vol. 114, pp. 1281-1293, 2017.
- [5] Č. Zeljković, *Obnovljivi izvori energije – Solarna energetika*, Elektrotehnički fakultet u Banjoj Luci, 2018.
- [6] V. Badescu, "3D isotropic approximation for solar diffuse irradiance on tilted surfaces," *Renewable Energy*, Vol. 26, No. 2, pp. 221–233, 2002.
- [7] J. Mikulović, Ž. Đurišić, *Solarna energetika*, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, 2019.
- [8] M. Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*, Academic Press Canada, 1983.
- [9] T. Muneer and H. Kambezidis, *Solar Radiation and Daylight Models*, 2nd ed., Elsevier, 2004.

- [10] P. Koronakis, "On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectors in the Athens basin area," *Solar Energy*, Vol. 36, No. 3, pp. 217–225, 1986.
- [11] D. Włodarczyk and H. Nowak, "Statistical analysis of solar radiation models into inclined planes for climatic conditions of Lower Silesia in Poland," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. IX, No.2, pp. 127-144, 2009.
- [12] R. C. Temps and K. L. Coulson, "Solar radiation incident upon slopes of different orientations," *Solar Energy*, Vol. 2, pp. 179-184, 1977.
- [13] T. M. Klucher, "Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces," *Solar Energy*, Vol. 23, pp. 111-114, 1979.
- [14] D. T. Reindl, W. A. Beckman, and J. A. Duffie, "Evaluation of hourly tilted surface radiation models," *Solar Energy*, Vol. 45, No.1, pp. 9-17, 1990.
- [15] R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky, and R. Stewart, "Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance," *Solar Energy*, Vol. 44, No.5, pp. 271-289, 1990.

ABSTRACT

The best known isotropic and anisotropic models for the calculation of the diffuse radiation component on solar collectors are considered in the paper. Basic expressions are given and the characteristics of individual models are highlighted. On the basis of horizontal irradiance measurement data, the possibilities of applying individual models for the calculation of the diffuse irradiance component on solar collectors located in the Belgrade area were examined.

MODELS FOR CALCULATION OF DIFFUSE RADIATION ON SOLAR COLLECTORS

Jovan Mikulović, Željko Đurišić