

OPTIMIZACIJA PARAMETARA SOLARNOG KOLEKTORA ZA PODRUJE GRADA KRUŠEVCA

PARAMETER OPTIMIZATION OF THE SOLAR COLLECTOR FOR THE REGION OF TOWN KRUŠEVAC

Dr Sanja Markovi

Visoka poslovna škola strukovnih studija „Prof. dr Radomir Bojković “ Kruševac
e-mail: teodorasanja@gmail.com

Sažetak

U radu je prikazan primer odreivanja optimalnog ugla nagiba kolektora na podruju grada Kruševca (geografske širine $43,57^\circ$ i geografske dužine $21,35^\circ$) izra unat na osnovu podataka o vrednosti udela sun evih sati u toku meseca za etvorogodišnji period (od januara 2005.g do decembra 2008.g). Razmatraju se tri komponente Sun evog zra enja, tj. direktna, difuzna i reflektovana komponenta zra enja. Prikazane su varijacije direktne i difuzne komponente Sun evog zra enja tokom letnjih i zimskih meseci.

Abstract

The paper presents an example of determining the optimal angle of inclination of collector area of the town of Kruševac (lat. 43.57° , long. 21.35°) calculated on the basis of data on value share of sunshine hours during the month for a four-year period (from January 2005 to December 2008). The paper discusses three components of solar radiation, i.e. direct, diffuse and reflected radiation component. It describes the variation of direct and

diffuse components of solar radiation during summer and winter months.

Ključne reči: *solarna energija, sun evog zra enje, deklinacija, optimalan ugao nagiba*

Keywords: *solar energy, solar radiation, declination, optimal tilt angle*

1. Uvod

Cilj rad je analiza intenziteta i komponenti Sun evog zra enja za grad Kruševac, kao i odreivanje optimalnog ugla nagiba solarnog kolektora, na osnovu podataka o udelu jasnih sun evih sati u toku poslednje etiri godine (januar 2005. - decembar 2008.god.). Kruševac je grad koji se nalazi u centralnom delu Republike Srbije (na geografskoj širini $43,57^\circ$, geografskoj dužini $21,35^\circ$ i na nadmorskoj visini od 166m). Prose ne vrednosti udela jasnih Sun evih sati u toku dana na godišnjem i mese nom nivou za i period od januara 2005. do decembra 2008.god za Kruševac, su date u tabeli br.1.

Tabela 1 - Prose na vrednost udela jasnih Sun evih sati u toku dana [5]

Mesec	Prose na vrednost udela sun evih jasnih sati u toku dana S [h]				Prose mes.
	2005	2006	2007	2008	
Januar	1,87	2,39	3,81	3,01	2,50
Februar	1,25	1,59	3,49	4,48	2,68
Mart	4,14	3,72	4,90	5,16	4,36
April	4,61	4,40	9,67	4,30	5,46
Maj	5,49	8,20	7,32	8,61	6,97
Jun	7,21	8,04	10,57	9,40	8,27
Jul	8,26	10,24	12,38	9,15	9,59
Avgust	5,81	8,01	9,02	11,15	8,45
Septembar	4,96	7,07	5,98	4,81	5,79
Oktobar	4,50	6,34	2,95	6,51	5,04
Novembar	3,04	3,98	2,38	2,88	2,94
Decembar	1,16	2,18	1,02	1,54	1,41
Prose no godišnje	4,37	5,54	6,12	5,94	
Ukupno godišnje	1597,7	2023,5	2231,9	2171,2	1648,24

Jul je mesec sa najvećim brojem jasnih sun evih sati u toku godine, dok zimski meseci imaju relativno mali broj sun evih sati. Varijacije u broju jasnih Sun evih sati tokom meseca su evidentne čak i u ovako kratkom periodu (npr. april 2007. i 2008.god ili jul 2005. i 2007.god.)

2. Ekstraterestijalno zračenje

Deklinacija predstavlja ugao u ravni deklinacijskog (asovnog) kruga Sunca (veliki krug nebeske sfere koji sadrži nebesku osovinu i Sunce), koji se meri od ravni nebeskog ekvatora do pravca koji spaja posmatrača i Sunce. [2] Deklinacija se može izraziti pomoću aproksimativne jednačine [3]:

$$u = 23,45 \cdot \sin\left(\frac{360}{365}(284 + n)\right)$$

gde je: n- redni broj dana u godini (po ev od 01.01.)

Promena ugla deklinacije Sunca u toku jednog dana iznosi najviše $0,5^\circ$, usled čega se uglavnom zanemaruje. Pozitivne vrednosti deklinacijskog ugla su karakteristične za leto na severnoj

hemisferi, (odnosno za zimu na južnoj hemisferi) sa maksimalnom vrednosti $=23,4^\circ$ (letnja dugodnevica na severnoj hemisferi). Za vreme ravnodnevnica $=0$.

Asovni ugao zalaska Sunca \tilde{S}_s je solarni asovni ugao koji odgovara vremenu zalaska Sunca, pa je:

$$\cos \tilde{S}_s = -\operatorname{tg} u \cdot \operatorname{tg} \delta$$

Na osnovu asovnog ugla može se izraziti vremensko trajanje obdanice N, obzirom da se asovni ugao menja za 15° svakog sata.

$$N = \frac{2}{15^\circ} \arccos(-\operatorname{tg} u \cdot \operatorname{tg} \delta)$$

Sunčeva zračenja na vrhu atmosfere se naziva ekstraterestijalnim zračenjem. Za dati broj dana n prosečno dnevno ekstraterestijalno zračenje H_0 se može izraziti na osnovu aproksimativne formule (Duffie i Beckmann, 1980) (sa greškom $<0,3\%$) [3],

$$H_0 = G_{sc} \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = G_{sc} \left(1 + 0,033 \left(\frac{360n}{365}\right)\right)$$

gde je: G_{sc} - srednji toplotni fluks Sunčevog zračenja na površini Zemljine atmosfere

Srednji toplotni fluks Sunčevog zračenja na površini Zemljine atmosfere (ekstraterestijalno zračenje), koji se još i naziva solarnom konstantom G_{sc} , može se izraziti kao odnos između ukupne količine energije koju izlazi Sunce u svim pravcima, na svim talasnim dužinama - luminoznosti Sunca MA_s i emisije po jedinici sferne površine A_{SE} , koja je formirana na osnovu radijusa rastojanja Zemlja - Sunce. Prosečno rastojanje između Zemlje i Sunca $r_o = 1,496 \cdot 10^{11}$ se naziva astronomskom jedinicom (AJ)

$$G_{sc} = M \frac{A_s}{A_{SE}} = M \left(\frac{r_s}{r_o}\right)^2 = 63,11 \left(\frac{6,9598 \cdot 10^8}{1,496 \cdot 10^{11}}\right)^2 = 1367 \frac{W}{m^2}$$

Promena rastojanja između Zemlje i Sunca dovodi do fluktuacija ekstraterestrijalnog zračenja na normalnu površinu H_0 od 1321 W/m² do 1412 W/m² aproksimativno za ±3%.

Zbog prisustva troatomnih gasova u atmosferi, aerosoli, kao i efekata rasipanja svetlosti, dolazi do smanjenja intenziteta energije Sunčevog zračenja i nedostatka pojedinih talasnih dužina. J.A. Prescott je predložio vezu između srednjeg dnevnog ekstraterestrijalnog zračenja, H_0 i srednjeg dnevnog terestrijalnog zračenja (na površini zemlje), H [W/m²] kao indeks jasnih

Sunanih sati $K_T = \frac{H}{H_0}$ odnosno [2]:

$$\frac{H}{H_0} = a + b \cdot \frac{S}{Z}$$

gde je: $\frac{S}{Z}$ [-] - udeo jasnih Sunanih sati u toku obdаницe.

a, b [-] - bezdimenzioni koeficijenti

$$a = -0,309 + 0,539 \cdot \cos\{-0,0693 \cdot h + 0,29 \cdot \frac{S}{Z}\},$$

$$b = 1,527 - 1,027 \cdot \cos\{-0,0926 \cdot h - 0,359 \cdot \frac{S}{Z}\},$$

gde je: h [km] - nadmorska visina mesta

Tabela 2 - Odnos između srednjeg dnevnog ekstraterestrijalnog zračenja, H_0 i srednjeg dnevnog terestrijalnog zračenja (na površini zemlje), H [W/m²]

Mesec	H_0 [MJ/m ²]	$\frac{H}{H_0}$			
		2005	2006	2007	2008
Januar	12,98	0,27	0,32	0,45	0,38
Februar	18,41	0,19	0,22	0,38	0,45
Mart	25,76	0,39	0,36	0,43	0,45
April	33,52	0,38	0,37	0,56	0,35
Maj	39,32	0,42	0,55	0,51	0,56
Jun	41,72	0,49	0,52	0,62	0,58
Jul	40,26	0,55	0,63	0,70	0,59
Avgust	35,72	0,45	0,57	0,61	0,69
Septem.	28,47	0,44	0,56	0,51	0,43
Oktobar	20,58	0,45	0,57	0,33	0,58
Novemb.	14,23	0,37	0,45	0,31	0,36
Decemb.	11,59	0,20	0,31	0,18	0,24
Prose no	26,88	0,38	0,45	0,47	0,47

Indeks jasnih Sunanih sati zavisi od lokacije i vremenskog doba godine.

Vrednosti indeksa se kreću u intervalu od 0,3 (za kontinentalna područja) i 0,8 (za podneblja sa velikim brojem sunanih sati).

Tabela 3 - Vrednosti deklinacijskog ugla, trajanja obdаницe i udeo jasnih Sunanih sati za izabran prose dan u mesecu za grad Kruševac

Mes.	Za prose dan u mesecu					
	datum	n	U [°]	\tilde{S}_s [°]	Trajanje obdаницe N [h]	Udeo jasnih sunanih sati $\frac{S}{Z}$
Jan.	17	17	-20,9	68,70	9h10min	0,273
Feb	16	47	-13,0	77,31	10h18min	0,260
Mar	16	75	-2,4	87,71	11h41min	0,373
Apr.	15	105	9,4	99,06	13h12min	0,414
Maj	15	135	18,8	108,90	14h31min	0,480
Jun	11	162	23,1	113,94	15h11min	0,459
Jul	17	198	21,2	11,65	14h52min	0,556
Avg	16	228	13,5	103,20	13h45min	0,614
Sep.	15	258	2,2	92,09	12h17min	0,471
Okt.	15	288	-9,6	80,74	10h46min	0,468
Nov	14	318	-18,9	70,99	9h28min	0,310
Dec	10	344	-23,0	66,18	8h49min	0,160

Izrađivanje odnosa dnevnog direktnog H_{dir} (W/m²) i difuznog H_{dif} (W/m²) zračenja, može se vršiti prema jednačini koju su predložili B. Y. H. Lui i R. C. Jordan u The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Radiation, 1960:

$$\frac{H_{dif}}{H} = 0,974 + 0,693 \cdot \frac{H}{H_0} - 6,067 \left(\frac{H}{H_0}\right)^2 + 6,416 \left(\frac{H}{H_0}\right)^3 - 1,931 \left(\frac{H}{H_0}\right)^4$$

primenjuje se:

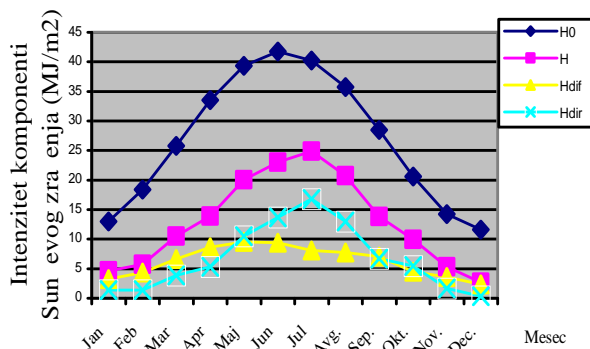
$$H_{dir} = H - H_{dif}$$

Tabela 2 - Odnos između difuznog H_{dif} (W/m²) i srednjeg dnevnog terestrijalnog zračenja (na površini zemlje), H (W/m²)

Mesec	H_0 [MJ/m ²]	$\frac{H_{dif}}{H}$			
		2005	2006	2007	2008
Januar	12,98	0,84	0,77	0,55	0,67
Februar	18,41	0,92	0,90	0,67	0,55
Mart	25,76	0,66	0,71	0,60	0,55
April	33,52	0,67	0,69	0,40	0,72
Maj	39,32	0,61	0,42	0,47	0,40
Jun	41,72	0,49	0,45	0,32	0,37
Jul	40,26	0,42	0,30	0,22	0,36

Avgust	35,72	0,55	0,38	0,33	0,23
Septem.	28,47	0,58	0,40	0,47	0,60
Oktobar	20,58	0,55	0,38	0,75	0,37
Novemb.	14,23	0,69	0,55	0,78	0,71
Decemb.	11,59	0,92	0,78	0,94	0,87
Prose no	26,88	0,66	0,56	0,54	0,53

Na slici br.1 su prikazane prose ne vrednosti srednjeg dnevnog ekstraterestrijalnog zračenja, $H_0 [MJ/m^2]$, srednjeg dnevnog terestrijalnog zračenja (na površini zemlje), $H [MJ/m^2]$, dnevnog difuznog zračenja $H_{dif} [MJ/m^2]$, kao i vrednosti dnevne direktne komponente zračenja $H_{dir} [MJ/m^2]$ za navedeni četvorogodišnji period.



Slika 1. Varijacija komponenti srednjeg dnevnog zračenja na horizontalnu površinu u Kruševcu

3. Sun evog zračenja na nagnutu površinu i optimalan ugao nagiba solarnog kolektora

Poznata je činjenica da bi efikasnost solarnog kolektora bila najveća ukoliko bi on stalno pratio položaj Sunca. Takvi uređaji su razvijeni, ali su veoma skupi, tako da su u upotrebi uglavnom solarni kolektori sa nepokretnim panelom. Za efikasnije korišćenje Sunčeve energije neophodno je odrediti optimalan položaj solarnog kolektora u odnosu na položaj Zemlje prema Suncu, odnosno u podne aktuelnog dana, sunčevi zraci treba da padaju ortogonalno na solarni kolektor. Cilj ovog rada je da se odredi optimalni ugao nagiba solarnog kolektora za Kruševac.

Usvajanjem izotropnog difuznog modela ukupno Sunčevog zračenja na proizvoljnu

orijentisanu i nagnutu površinu $H_N [MJ/m^2]$ se može izraziti na osnovu sledeće relacije [3]:

$$H_N = H_{dir} R_b + H_{dif} \frac{(1 + \cos S)}{2} + H g_r \frac{(1 - \cos S)}{2}$$

gde je: $g_r [-]$ - Zemljin albedo,

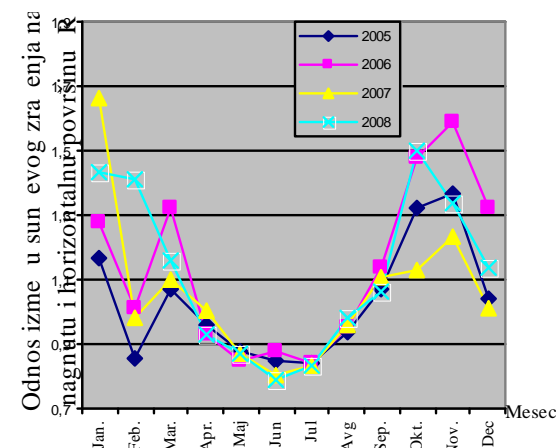
$S [^\circ]$ - nagib posmatrane površine u odnosu na horizontalu

Prvi član u navedenoj jednačini zavisi od direktne komponente zračenja, drugi član zavisi od difuzne komponente zračenja, a treći član od reflektovane komponente zračenja.

Odnos između Sunčevog zračenja na nagnutu površinu i Sunčevog zračenja na horizontalnu površinu se može izraziti relacijom:

$$R = \left(1 - \frac{H_{dir}}{H}\right) R_b + \frac{H_{dif}}{H} \cdot \frac{(1 + \cos S)}{2} + g_r \frac{(1 - \cos S)}{2}$$

Za površinu koja je okrenuta ka ekvatoru na severnoj hemisferi R_b je dato preko sledeće relacije [6]



Slika 2: Odnos između Sunčevog zračenja na nagnutu i horizontalnu površinu u toku meseca za različite godine (ugao nagiba nagnute površine je jednak geografskoj širini za grad Kruševac)

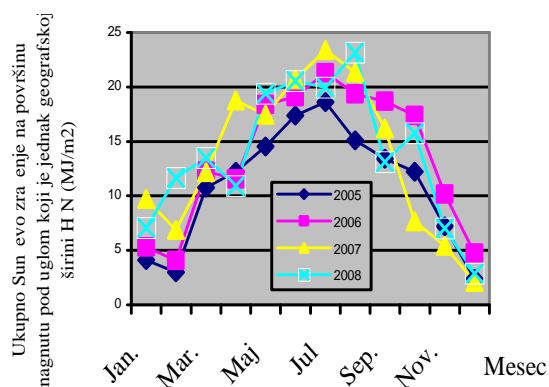
$$R_b = \frac{\cos \alpha_z \cdot \cos(\{\ -s) \cdot \cos u \cdot \cos \tilde{S}_s + \left(\frac{f}{180}\right) \cdot \tilde{S}_s \cdot \sin(\{\ -s) \cdot \sin u}{\cos \{ \cdot \cos u \cdot \cos \tilde{S}_s + \left(\frac{f}{180}\right) \cdot \tilde{S}_s \cdot \sin \{ \cdot \sin u}$$

gde je: α_z - solarna altituda

α - upadni ugao (ugao između zraka i normala površine)

Odnos između Suneve energije na nagnutu površinu i Suneve energije na horizontalnu površinu u toku meseca, a za period od 2005-2008. g. u Kruševcu, dat je na slici 2. U ovom slučaju ugao nagiba posmatrane površine bi bio jednak geografskoj širini Kruševca.

Odnos između Suneve energije na nagnutu i horizontalnu površinu u toku meseca pokazuje veoma male varijacije u periodu između aprila i avgusta. Tokom maja, juna i jula odnos između veće i navedenih veličina je manji od jedinice, što znači da horizontalna površina prima više suneve energije od one koja se nalazi pod uglom. U periodu od septembra do aprila, varijacije odnosa između Suneve energije na nagnutu i horizontalnu površinu su veće i razlikuju se po godinama. U ovom periodu godine površina koja se nalazi pod uglom $\alpha = 43,57^\circ$ prima više suneve energije od horizontalne površine (slika 3).



Slika 3: Vrednosti ukupnog Suneve energije na površinu nagnutu pod uglom $\alpha = 43,57^\circ$ na površinu nagnutu pod uglom koji je jednak geografskoj širini HN (MJ/m²)

Uprošćenjem, dobijen je sledeći izraz:

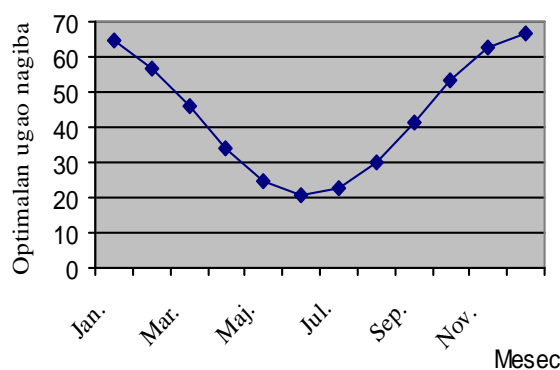
$$\cos \alpha = -\cos \{ \cdot \sin u + \sin \{ \cdot \cos u \cdot \cos \tilde{S}$$

Ukoliko je $\tilde{S} = 0^\circ$ (solarno podne), tada predhodna formula dobija sledeći oblik:

$$\alpha_{noon} = |\{ -u - s|$$

Optimalna orijentacija prijemne površine suneve energije koja se nalazi pod uglom u odnosu na horizontalnu ravan, za severnu hemisferu, je prema jugu. Tokom godine se menja i optimalan ugao nagiba solarnog kolektora, slika 4.

Vrednost optimalnog ugla nagiba za mesec mart i u periodu između septembra i oktobra su približno jednaki vrednosti geografske dužine ($\{ = 43,57^\circ$). Može se zapaziti da vrednosti optimalnog ugla nagiba S_{opt} raste krajem i početkom godine. Prema nekim autorima, ukoliko su sezonska podešavanja moguća, optimalan ugao za letnji period godine bi odgovarao uglu $s = \{ + 15^\circ$, odnosno u zimskom periodu $s = \{ - 15^\circ$. Za nepokretnu, južno orijentisanu površinu, optimalan ugao postavljanja prijemne površine bi bio $s = 0,9 \cdot \{ [1]$



Slika 4: Optimalna orijentacija prijemne površine suneve energije koja se nalazi pod uglom u odnosu na horizontalnu ravan (za severnu hemisferu je prema jugu)

4. Zaključak

Problem optimalnog ugla nagiba prijemnika Suneve energije je jedan od najstarijih problema primene energije Sunca. Efikasno korišćenje Suneve energije podrazumeva određivanje optimalnog položaja prijemnika Suneve energije u odnosu na položaj Zemlje prema Suncu, odnosno u podne aktuelnog dana, sunevi zraci bi trebalo da padaju ortogonalno na solarni kolektor. Vrednost optimalnog ugla nagiba za područje grada Kruševca iznosi $58,57^\circ$ tokom letnjih meseci, odnosno $25,7^\circ$ tokom zimskog perioda.

Bibliografija

1. Lambić, M., Stojićević, D., *Solarna Tehnika*, Srbija Solar, 2004.
2. Lukić, N., Babić, M., *Solarna Energija*, Mašinski fakultet u Kragujevcu, 2008.
3. Eicker, U., *Solar Technologies For Buildings*, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, West Sussex, 2003.
4. Twidell, J., Weir, T., *Renewable Energy Resources*, Taylor & Francis Group, London and New York, 2006.
5. *Meteorološki Godišnjak 1- Klimatološki podaci – Republički hidrometeorološki Zavod Republike Srbije*, 2004.-2008.
6. Ertekin, C., Evrendilek, F., Kulcu, R., *Modeling Spatio-Temporal Dynamics Of Optimum Tilt Angles For Solar Collectors In Turkey*, Sensors 8, 2008.

Istorija rada:

Rad primljen: 11.03.2014.

Prva revizija: 04.04.2014.

Prihvatanje: 08.04.2014.