

TOPLOTNI DOBICI RAVNOG SOLARNOG KOLEKTORA SA POKRETNIM PANELOM U ODNOSU NA FIKSNI

HEAT GAIN OF A FLAT-PLATE SOLAR COLLECTOR WITH MOBILE PANEL COMPARED WITH A FIXED PANEL ONE

NEBOJŠA LUKIĆ,

Mašinski fakultet, Kragujevac

Korišćenjem formiranog matematičkog modela sunčevog zračenja na nagnutu površinu i odgovarajućeg softvera, ispituju se mogućnosti povećanja efikasnosti ravnog vodenog solarnog kolektora, korišćenjem pokretnog panela. Položaj fiksne ploče ravnog solarnog kolektora određuje se prema preporukama, koje zavise od geografske širine mesta i godišnjeg doba, radi ostvarivanja što manjeg ugla između upadnog zraka i normale na površinu koja prima zračenje.

Ukoliko bi solarni kolektor imao uređaj za zakretanje panela u skladu sa dnevnim i godišnjim prividnim kretanjem sunca, svakako bi došlo do povećanja efikasnosti ovog uređaja. O kakvim se pozitivnim efektima radi, pokušava da odgovori ovaj rad.

Using the realized mathematical model of solar radiation on an inclined area and following software, the increasing possibilities of efficiency of solar collector with mobile front-panel are investigated. The position of fixed front panel is defined according to the recommendations. This position depends on latitude and time of year in order to reach a good angle between sun's ray and the normal of panel area, as close as possible to zero angle. If solar collector certainly has possibility of rotation its front-panel in accordance with annual and daily moving of sun, such collector will achieve better efficiency than a fixed panel one. Which improvement can be obtained? In this paper the defined question is considered.

Ključne reči: solarni kolektor; pokretni panel; toplotni dobici
Key words: solar collector; mobile front-panel; heat gains

Uvod

Pretvaranje sunčeve energije zračenja u toplotnu energiju korišćenjem, pre svega ravnih solarnih kolektora, jedan je od osnovnih vidova korišćenja obnovljivih izvora energije (OIE) i njegov razvoj je definisan u Belog knjizi Evropske unije vezanoj za OIE. Zvanični podaci EU za 2004. godinu govore da Nemačka poseduje najveću površinu solarnih kolektora instaliranih u EU, od 6 199 000 m², Grčka 2 826 700 m², Austrija 2 399 791 m² i tako dalje. Intenzivno povećanje instaliranih solarnih panela realizuje se prema usvojenoj strategiji EU o ukupnoj proizvodnji energije 2010. godine, u kojoj OIE treba da učestvuju sa 12%. Paralelno sa ovim aktivnostima usavršavaju se ravni solarni kolektori (sa pokrivnom pločom i bez nje, vakuumski), donose se novi i poboljšavaju stari standardi (EN i ISO).

Matematički modeli sunčevog zračenja na nagnutu površinu baziraju se na jednačinama prividnog sunčevog kretanja u odnosu na zemlju (dnevnog i godišnjeg), solarnoj konstanti (1353 W/m²) i jednačinama baziranim na dugoročnim meteorolo-

škim merenjima insolacije, koje uzimaju u obzir propustljivost atmosfere, oblačnost, nadmorsku visinu. Matematički modeli sunčevog zračenja su najčešće delovi znatno obimnijih softvera za simulaciju termičkog ponašanja objekata, kakvi su DOE-2 [1], BLAST [2], TRNSYS [3], BUNYIP [4], ESP [5], kao i najnovijeg EnergyPlus [6]. Kako stvarni podaci o insolaciji zavise od lokalnog stanja atmosfere (lebdeće čestice, troatomni i višeatomni gasovi), korišćenjem matematičkih modela dolazi se do više ili manje približnih podataka.

U ovom radu je iskorišćen matematički model sunčevog zračenja, kao deo softvera DZID [7]. Osnovna ideja sprovođenja serije simulacija sunčevog zračenja na nagnutu površinu, jeste utvrditi razliku insolacije na fiksnom panelu solarnog kolektora u odnosu na pokretni panel, koji bi pratio prividno kretanje sunca i zauzimao uvek optimalan položaj.

2. Matematički model

U opisu matematičkog modela sunčevog zračenja na nagnutu površinu, nalaze se ključne jednačine, dok se izračunavanje nekih osnovnih veličina vezanih za prividno kretanje sunca (deklinacija, svetsko vreme, vreme zalaska sunca, ugao solarne altitude) može naći u raspoloživoj literaturi [8, 9].

Prosečno dnevno zračenje na vrhu atmosfere (prosečno ekstraterestrijalno zračenje) H_o (W/m^2), (W. D. Sellers, Physical Climatology, 1965), može se izračunati kao:

$$H_o = \frac{I_o}{\pi} [1 + 0,033 \cos(0,0172142 \cdot brd)] \cdot (\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin t_z + t_z \sin \varphi \cdot \sin \delta), \quad (2.1)$$

gde su: $I_o = 1353$ (W/m^2) solarna konstanta, brd (-) redni broj dana u godini, φ ($^\circ$) geografska širina mesta, δ ($^\circ$) deklinacijski ugao, t_z ($^\circ$) ugao zalaska sunca (kada je t_z izvan funkcije sinus, zamenjuje se u radijanima).

Još je 1940. J. A. Prescott (Evaporation from Water Surface in Relation to Solar Radiation) predložio opšte prihvaćenu vezu između srednjeg dnevnog zračenja na vrhu atmosfere, H_o i na površini zemlje H (W/m^2), kao:

$$\frac{H}{H_o} = a + b \frac{S}{Z} \quad (2.2)$$

gde su: a , b (-) koeficijenti, S/Z (-) udeo jasnih sunčanih sati u toku obdanice (S – broj jasnih sunčanih sati, Z – obdanica). Koeficijenti a i b su usvojeni prema [10], kao:

$$a = -0,309 + 0,539 \cos \varphi - 0,0693h + 0,29 \frac{S}{Z} \quad (2.3)$$

$$b = 1,527 - 1,027 \cos \varphi - 0,0926h - 0,359 \frac{S}{Z} \quad (2.4)$$

gde je h (km) nadmorska visina mesta.

Odnos časovne (H'_o , H') i dnevne (H_o , H) insolacije je usvojen na osnovu jednačine koju su predložili M. Collares-Pereira i A. Rabl u The Average Distribution of Solar Radiation, 1979:

$$\frac{H'}{H} = (a1 + b1 \cdot \cos t) \frac{H'_o}{H_o} \quad (2.5)$$

gde su $a1$ i $b1$ (–) koeficijenti, koji se izračunavaju kao:

$$a1 = 0,409 + 0,5016 \sin\left(t_z - \frac{\pi}{3}\right) \quad (2.6)$$

$$b1 = 0,6609 - 0,4767 \sin\left(t_z - \frac{\pi}{3}\right) \quad (2.7)$$

Časovno (trenutno) zračenje na vrhu atmosfere (časovno ekstraterestrijalno zračenje) H'_o (W/m^2), može se izračunati kao [11]:

$$H'_o = I_o [1 + 0,033 \cos(0,0172142 \cdot brd)] \cdot (\sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos t) \quad (2.8)$$

gde je t ($^\circ$) svetsko vreme (časovni ugao sunca).

Izračunavanje odnosa dnevnog direktnog H_{dir} (W/m^2) i difuznog H_{dif} (W/m^2) zračenja se vrši 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:

$$\frac{H_{dif}}{H} = 0,974 + 0,693 \frac{H}{H_o} - 6,067 \left(\frac{H}{H_o}\right)^2 + 6,416 \left(\frac{H}{H_o}\right)^3 - 1,931 \left(\frac{H}{H_o}\right)^4 \quad (2.9)$$

$$H_{dir} = H - H_{dif} \quad (2.10)$$

Različiti autori koriste različite koeficijente u jednačini (2.9), u zavisnosti od lokalnih meteoroloških podataka. Jednačina (2.9) važi za srednje dnevno zračenje, ali se približno može koristiti za izračunavanje trenutnog (časovnog) zračenja (H'_o , H').

Ugao između zraka i normale nagnute površine (napadni ugao), i ($^\circ$) se izračunava kao:

$$\begin{aligned} \cos i = & [\cos G \sin \varphi - \sin G \cos \varphi \cos(\pi - \alpha)] \sin \delta + \\ & + [\cos G \cos \varphi + \sin G \sin \varphi \cos(\pi - \alpha)] \cos \delta \cos t + \\ & + \sin G \sin(\pi - \alpha) \cos \delta \sin t \end{aligned} \quad (2.11)$$

gde su: G ($^\circ$) nagib nagnute površine u odnosu na horizontalu, a α ($^\circ$) orijentacija nagnute površine koja predstavlja ugao između smera severa i projekcije normale površine na horizontalnu ravan, mereno od smera severa suprotno od kretanja kazaljki časovnika.

Ukupno sunčevo zračenje na nagnutu površinu, I_p (W/m^2) izračunava se kao [12]:

$$I_p = H'_{dir} \frac{\cos i}{\sin \beta} + \frac{H'_{dif}(1 + \cos G)}{2} + \frac{g_r \cdot H'(1 - \cos G)}{2} \quad (2.12)$$

gde su: β ($^\circ$) ugao solarne altitude, a g_r (–) zemljin albedo (u konkretnom matematičkom modelu usvojeno je $g_r \approx 0$).

3. Simulacije i rezultati

3.1. Konstantne i promenljive veličine sprovedenih simulacija

Sprovedene simulacije su podrazumevale dva tipa ravnih solarnih kolektora, sa jednostrukim i dvostrukim staklom. Efikasnost kolektora, η_k (–) izračunavana je prema jednačini:

$$\eta_k = d \cdot a + K_u \frac{\Delta t}{I_p} \quad (3.1)$$

gde su: d (–) propustljivost staklene ploče (koeficijent dijatermije), za kolektor sa jednostrukim staklom, $d = 0,85$, za kolektor sa dvostrukim staklom, $d = 0,85 \cdot 0,85 = 0,7225$, a (–) koeficijent apsorpcije apsorbera solarnog kolektora (za oba tipa kolektora usvojeno, $a = 0,9$), K_u ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) ukupni koeficijent prolaza toplote solarnog kolektora (kondukcija, konvekcija, zračenje), za kolektor sa jednostrukim staklom usvojeno, $K_u = 7 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$, a sa dvostrukim, $K_u = 3 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$, $\Delta t = t_k - t_o$ (K) temperaturna razlika radne temperature kolektora (vode), t_k i temperature okoline t_o . Radna temperatura kolektora je nepromenljiva $t_k = 50^\circ\text{C}$.

Simulirano je sunčevo zračenje i ponašanje solarnih kolektora za tri datuma: 1.7, 1.10. i 1.2. Promene spoljne temperature za ove datume usvojene su prema tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Promene temperature okoline u zavisnosti od vremena i datuma

Vreme (h)	5	6	7	8	9	10	11	12
t_k ($^\circ\text{C}$) 1.7.	24	24,4	25,3	26,6	28,2	29,7	30,8	31,9
t_k ($^\circ\text{C}$) 1.10.	–	5	8,7	12,3	15,6	18,4	20,8	22,5
t_k ($^\circ\text{C}$) 1.2.	–	–3	–1,6	–0,3	0,8	1,9	2,8	3,4
Vreme (h)	13	14	15	16	17	18	19	20
t_k ($^\circ\text{C}$) 1.7.	32,5	32,9	33,2	32,8	32,1	31	29,8	28,7
t_k ($^\circ\text{C}$) 1.10.	23,6	24	23,6	22,6	20,7	18,4	15,6	12,3
t_k ($^\circ\text{C}$) 1.2.	3,8	4	3,8	3,4	2,8	1,9	0,8	–0,3

Usvojeni nepromenljivi geografski parametri su: geografska dužina mesta, $\lambda = 21^\circ$ i nadmorska visina, $h = 0,1$ km. Promenljivi parametri su: severna geografska širina mesta, $\varphi = 30^\circ, 40^\circ$ i 50° , udeo jasnih sunčanih sati, $S/Z = 100\%, 70\%$ i 40% .

U prvom slučaju solarni kolektor je postavljen fiksno i to u letnjem i jesenjem periodu (1.7. i 1.10), $\alpha = 180^\circ$ (smer juga) i $G = \varphi - 10^\circ$, a u zimskom periodu (1. 2), $\alpha = 180^\circ$ i $G = \varphi + 10^\circ$.

U drugom slučaju softver bira optimalni položaj solarnog kolektora (orijentaciju i nagib), za identične simulacione uslove, $\alpha_{opt} G_{opt}$ (uslov $I_p = I_{pmax}$).

Za geografske parametre Beograda i Kragujevca, za udeo jasnih sunčanih sati, $S/Z = 70\%$, usvojeni matematički model sunčevog zračenja daje podatke bliske merenim podacima (Savezni hidrometeorološki zavod do 1986), što je prikazano u tabeli 3.2.

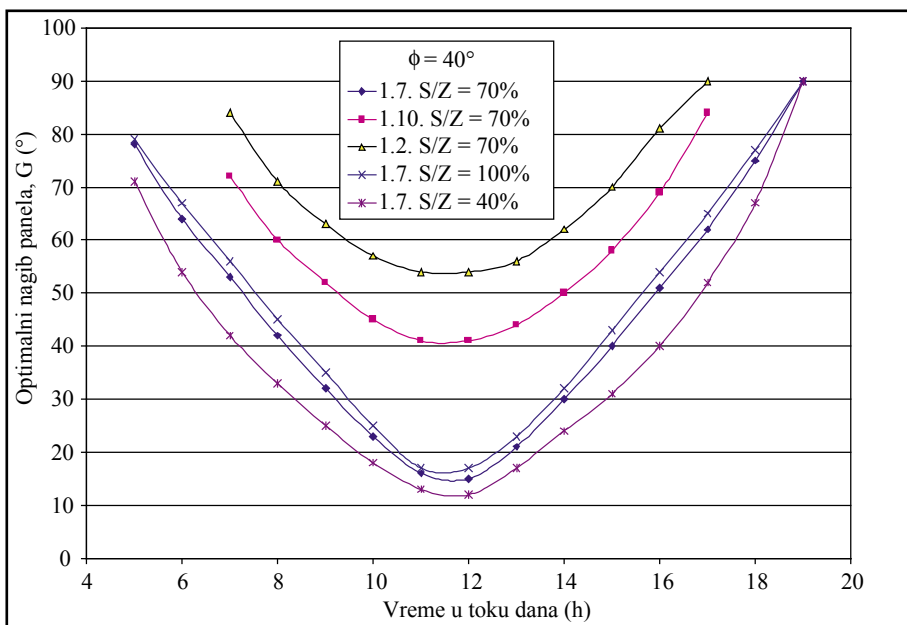
Tabela 3.2. Srednja ukupna dnevna insolacija za pojedine mesece u (kWh/m^2 dan)

Izvor podataka	Jul	Januar	April
Kragujevac (prema SHMZ)	6,45	1,5	4,8
Beograd (prema SHMZ)	6,75	1,4	4,85
Rezultati simulacije ($S/Z = 70\%$, $\varphi = 40^\circ$)	6,7	1,8	5,2

3.2. Rezultati simulacija i razmatranje

Korišćenjem usvojenih podataka, sproveden je niz simulacija kako bi se utvrdili toplotni dobici solarnog kolektora sa pokretnim panelom u odnosu na onaj fiksni.

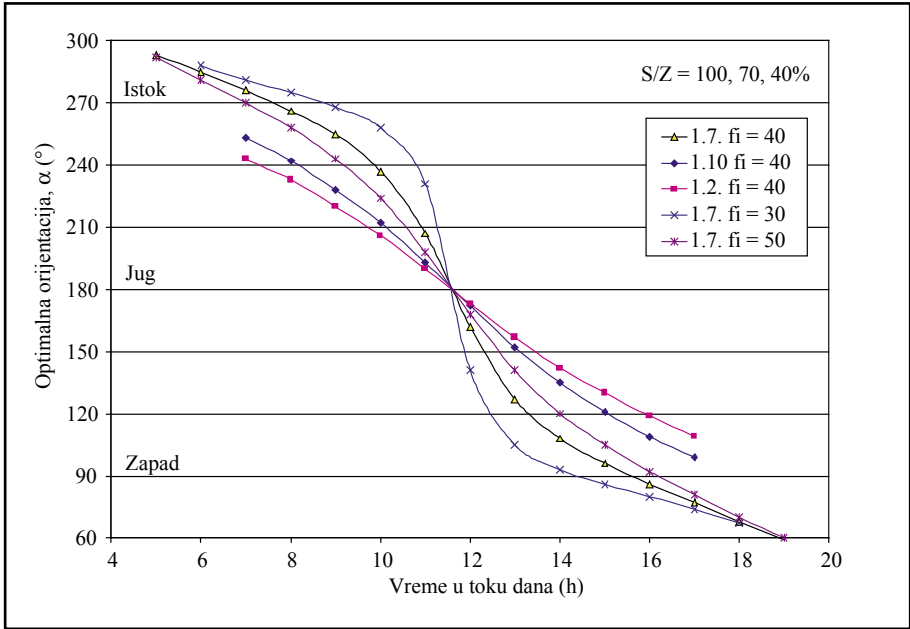
Na slici 3.1 prikazana je zavisnost optimalnog nagiba, G ($^\circ$) solarnog kolektora (panela) od datuma i udela jasnih sunčanih sati (oblačnosti), tokom obdanice. Da bi solarni panel primio maksimalnu, moguću količinu zračenja za zadate uslove, potrebno je da značajno menja svoj nagib, naročito u letnjim mesecima (od 12° pa sve do 90°). Razumljivo, najviši uglovi solarnog panela zahtevani su u jutarnjim i kasnim popodnevним časovima. U zimskom periodu, raspon dnevnih optimalnih nagiba je nešto uži i iznosi od 54° do 90° . Povećana oblačnost ($S/Z = 40\%$) zahteva nešto niže nagibe panela, što je uslovljeno uvećanom komponentom difuznog zračenja.



Slika 3.1. Zavisnost optimalnog nagiba solarnog panela od datuma i oblačnosti, tokom obdanice

Na slici 3.2 prikazana je zavisnost optimalne orijentacije, α ($^\circ$) solarnog panela od datuma i geografske širine, tokom obdanice. Može se primetiti da jasni sunčani sati nemaju uticaja na optimalnu orijentaciju panela. U slučaju zimskih i jesenjih meseci ova promena je približno pravolinijska, dok u letnjim mesecima, vremenu sa

najdužom obdanicom, ova promena je u obliku sinusoide oko prave linije kojoj teži ova promena u zimskom periodu. Sa smanjenjem severne geografske širine u letnjem periodu povećava se amplituda opisane sinusoide.

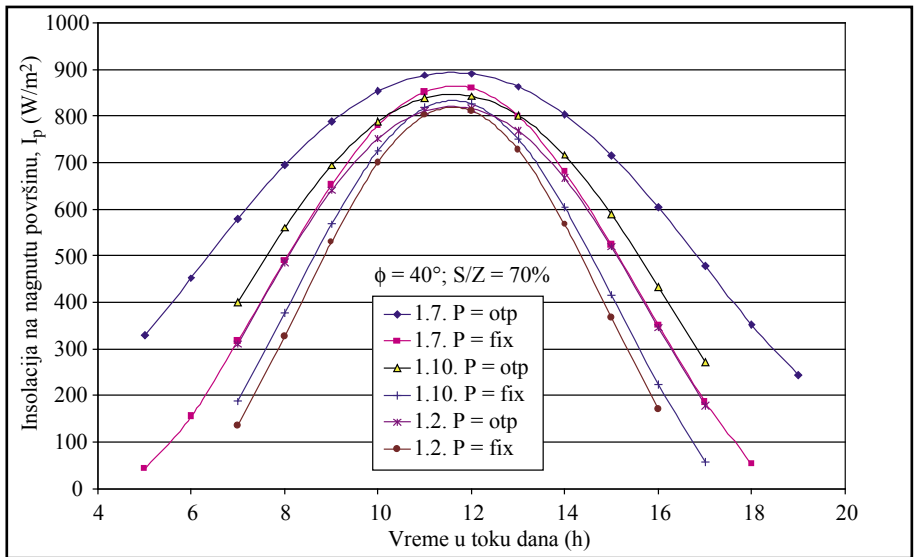


Slika 3.2. Zavisnost optimalne orijentacije solarnog panela od datuma i geografske širine, tokom obdanice

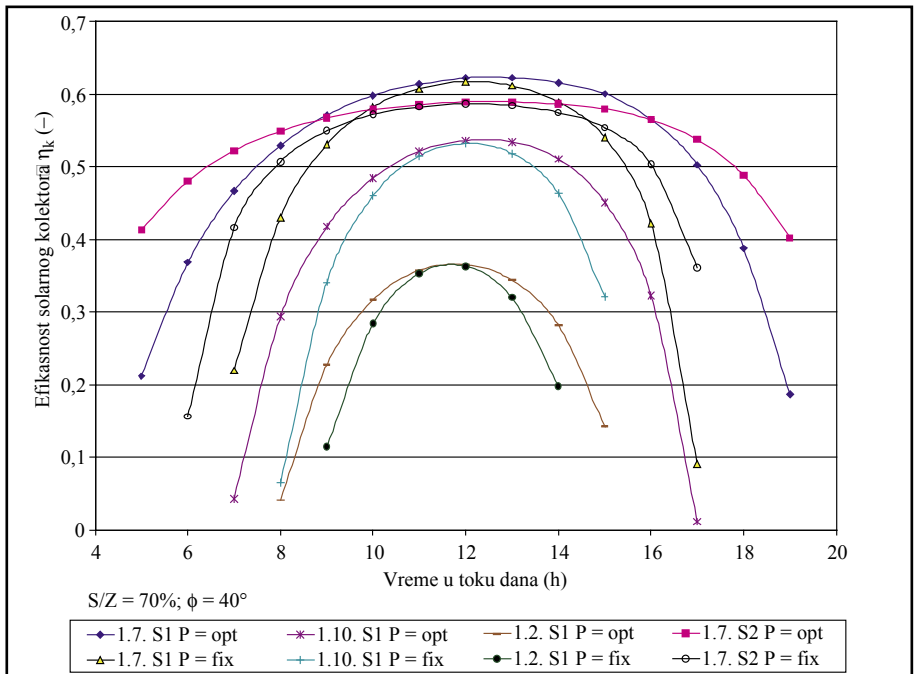
Na slici 3.3 prikazana je zavisnost insolacije solarnog panela, I_p od datuma i njegove pokretnosti, tokom obdanice. Dakle, uporedno su prikazane vrednosti insolacije fiksnog ($P = \text{fix}$) i optimalno pokretnog panela ($P = \text{opt}$). Zapaža se značajno veća insolacija pokretnog panela, naročito u letnjem periodu i početnim i krajnjim časovima obdanice. Osnovna vrednost oblačnosti koja se koristi na svim dijagramima je $S/Z = 70\%$, što odgovara eksperimentalnim podacima sunčevog zračenja u Srbiji.

Na slici 3.4 prikazana je efikasnost solarnog kolektora (videti jednačinu 3.1) u zavisnosti od datuma, pokretnosti i zastakljenja (jednostruka staklena ploča – S1, dvostruka ploča – S2), tokom obdanice. Sa korišćenjem pokretnog panela dobijaju se veće efikasnosti kolektora i to naročito u početnim i krajnjim satima obdanice. Solarni kolektor S2 je bolje izolovan i efikasniji u slučajevima niske spoljne temperature, što predstavlja vreme kada pokretni panel daje najbolje efekte (jutarnji i kasni popodnevni časovi, velike dnevne varijacije temperature – jesen). Najslabiji efekti korišćenja pokretnog panela se pokazuju u zimskom periodu velike oblačnosti ($S/Z = 40\%$).

U tabeli 3.3 je prikazano ukupno dnevno apsorbavano (iskorišćeno) zračenje solarnog kolektora pokretnog (Q_{kopt}) i fiksnog panela (Q_{kfix}), u zavisnosti od datuma, severne geografske širine i zastakljenja.



Slika 3.3. Zavisnost insolacije solarog panela od datuma i njegove pokretnosti, tokom obdanice



Slika 3.4. Zavisnost efikasnosti solarog kolektora od datuma, pokretnosti i zastakljenja, tokom obdanice

U tabeli 3.4 su prikazani procentualni dobiti iz tabele 3.3 u odnosu na fiksni panel. Iskorišćena toplotna energija kolektora je proizvod insolacije (I_p) i njegove efikasnosti (η_k).

Tabela 3.3. Ukupno dnevno apsorbovano zračenje solarnog kolektora Q_{kopt}/Q_{kfix} (kWh/m²dan)

φ (°)	Datum	S/Z = 100%		S/Z = 70%		S/Z = 40%	
		S1	S2	S1	S2	S1	S2
40	1.7.	7,19/4,43	7,01/4,43	5,16/3,47	5,28/3,6	2,53/2	2,91/2,33
	1.10.	4,59/3,19	4,9/3,53	3,02/2,21	3,56/2,65	1,02/0,89	1,6/1,4
	1.02.	2,94/2,16	3,96/2,96	1,52/1,18	2,54/2	0,08/0,06	0,8/0,7
30	1.7.	5,92/4,05	5,79/4,09	4,62/3,35	4,69/3,49	2,63/2,17	2,96/2,45
50	1.7.	8,61/4,91	8,22/4,85	5,81/3,59	5,84/3,71	2,35/1,74	2,81/2,13

Tabela 3.4. Procentualni dobiti ($Q_{kopt} - Q_{kfix}$)/ Q_{kfix} (%) pokretnog panela u odnosu na fiksni

φ (°)	Datum	S/Z = 100%		S/Z = 70%		S/Z = 40%	
		S1	S2	S1	S2	S1	S2
40	1.7.	62,30	58,24	48,70	46,67	26,50	24,89
	1.10.	43,89	38,81	36,65	34,34	14,61	14,29
	1.2.	36,11	33,78	28,81	27,00	33,33	14,29
30	1.7.	46,17	41,56	37,91	34,38	21,20	20,82
50	1.7.	75,36	69,48	61,84	57,41	35,06	31,92

Ostvareni toplotni dobiti solarnog kolektora sa pokretnim panelom u odnosu na fiksni su značajni, naročito u letnjem periodu i za naše podneblje iznose preko 40%. Ovo su najpovoljniji uslovi za rad pokretnog panela, jer su spoljne (simulirane) temperature visoke. U zimskom periodu, korišćenje pokretnog panela daje takođe procentualno dobre efekte, ali su apsolutne veličine iskorišćene energije sunčevog zračenja jako male.

4. Zaključak

Primena pokretnih solarnih panela zahteva dodatne investicione troškove. Tu su i problemi sa postavljanjem pokretnih sistema, koji bi zahtevali više prostora. Konstrukcija panela u krovnoj konstrukciji je isključena. Međutim, dobijeni podaci ukazuju na značajne dobitke ovakvih panela u odnosu na fiksne (preko 40% u letnjem periodu). Osnovni problem sa OIE je njihova tržišna neisplativost i zavisnost od državnih subvencija. Ugradnja solarnih kolektora i sistema u zemljama EU se subvencioniše sa 30% do 70%, u zavisnosti od lokalne insolacije, mogućnosti primene jednostavnih konstrukcija (Grčka, Kipar) i državne strategije.

Prema IEA-SHC (International Energy Agency – Solar Heating and Cooling), predloženi konverzioni faktor, kojim se množi instalirana površina solarnih kolektora (bez obzira na njegovu konstrukciju, tip i lokalnu insolaciju) da bi se dobila godišnja proizvodnja toplotne energije, je 700 kWh/m². Pilot-postrojenje solarnog kolektora sa pokretnim panelom u Srbiji trebalo bi da potvrdi iznesene podatke i da proi-

zvodnju toplotne energije na godišnjem nivou podigne na 850–1000 kWh/m² (prosečna godišnja insolacija u Srbiji iznosi 1400 kWh/m²).

Literatura

- [1] **Norford, L.K., R. H. Socolow, E. S. Hsieh, G. V. Spadaro**, *Two-to-one discrepancy between measured and predicted performance of a 'low-energy' office building: insights from a reconciliation based on the DOE-2 model*, Energy and Buildings 1994;21:121-31.
- [2] *** BLAST Support Office, *The building analysis and system thermodynamics program, version 3, users' manual*, Urbana Champaign, IL: University of Illinois; 1992.
- [3] *** ASHRAE Handbook of Fundamentals. Georgia, USA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc.; 1981.
- [4] **Moller, S.K., M. J. Wooldridge**, *User's Guide for the Computer program BUNYIP: Building Energy Investigation Package, Ver. 2.0*, Technical Report TR6. Victoria, Australia: Division of Energy Technology, CISRO; 1994.
- [5] **Clarke, J. A., P. A. Strachan**, *Simulation of conventional and renewable building energy systems*, Renewable Energy 1994;5:1178-89 Part II.
- [6] **Crawley, Drury B., Linda K. Lawrie, Frederick C. Winkelmann, and Curtis O. Pedersen**, *EnergyPlus: New capabilities in a whole-building energy simulation program*, Proceedings of Building Simulation 2001, pp. 51–58. Rio de Janeiro, Brazil, August 2001, IBPSA.
- [7] **Lukić, N.**, *The transient house heating condition – the daily changes of the building envelope response factor (BER)*, Renewable Energy, 30/4, 2005, pp. 537–549.
- [8] **Kreider, F.J., F. Kreith**, *Solar heating and cooling – engineering, practical design and economics*, Hemisphere Publishing Corporation, 1977.
- [9] **Sayigh, A. A. M.**, *Solar energy engineering*, Academic Press, New York, 1977.
- [10] **Gopinathan, K. K.**, *A general formula for computing the coefficients of the correlation connecting global solar radiation to sunshine duration*, Solar Energy, Volume 41, No 6, 1988.
- [11] **Suehrche, H., P. G. McCormick**, *The distribution of average instantaneous terrestrial solar radiation over the day*, Solar Energy, Volume 42, No 4, 1989.
- [12] **Ladsaougikar, U. V., P. P. Parikh**, *Design and optimization of a flat plate collector for cooling application*, SUN – Volume 2, International Solar Energy Society, 1979.

kgH