



ZBORNIK RADOVA

PROCEEDINGS

UNIVERZITET U BANJALUCI
MAŠINSKI FAKULTET

BANJALUKA, 25. - 26. MAJ 2007.

**NAUČNI ODBOR:
PROGRAMME COMMITTEE:**

Prof. dr Aleksa Blagojević, Mašinski fakultet Banjaluka
Prof. dr Drago Blagojević, Mašinski fakultet Banjaluka
Prof. dr Pavao Bojanić, Mašinski fakultet Beograd
Prof. dr Miodrag Bulatović, Mašinski fakultet Podgorica
Prof. dr Ilija Ćosić, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad
Prof. dr Pantelija Dakić, Elektroprivreda Republike Srpske
Prof. dr Čedomir Duboka, Mašinski fakultet Beograd
Prof. dr Milan Đudurović, Mašinski fakultet Banjaluka
Prof. dr Veljko Đuričković, Mašinski fakultet Banjaluka
Prof. dr Milisav Georgijević, FTN Novi Sad
Prof. dr Vasilj G.Gerasimčuk, Nacionalni tehnički univerzitet Ukrajine "KPI"
Prof. dr Dušan Gruden, Stuttgart
Prof. dr Vid Jovišević, Mašinski fakultet Banjaluka
Prof. dr Milisav Kalajdžić, Mašinski fakultet Beograd
Prof. dr Đorđe Kozić, Mašinski fakultet Beograd
Prof. dr Vidosav Majstorović, Mašinski fakultet Beograd
Prof. dr Ostoja Miletić, Mašinski fakultet Banjaluka
Prof. dr Dragomir Miličić, Mašinski fakultet Banjaluka
Prof. dr Dragan Milutinović, Mašinski fakultet Beograd
Prof. dr Dragica Noe, Fakultet za strojništvo Ljubljana
Prof. dr Radivoje Pešić, Mašinski fakultet Kragujevac
Prof. dr Miroslav Plančak, FTN Novi Sad
Prof. dr Milan Radovanović, Mašinski fakultet Beograd
Prof. dr Dobroslav Ružić, Mašinski fakultet Beograd
Prof. dr Vladimir Savić, FTN Novi Sad
Prof. dr Milentije Stefanović, Mašinski fakultet Kragujevac
Prof. dr Milenko Stegić, FSB Zagreb
Prof. dr Mirko Soković, Fakultet za strojništvo Ljubljana
Prof. dr Milan Šljivić, Mašinski fakultet Banjaluka
Prof. dr Velimir Todić, FTN Novi Sad
Prof. dr Đemo Tufekčić, Mašinski fakultet Tuzla
Prof. dr Stevan Veinović, Mašinski fakultet Kragujevac
Prof. dr Vojo Višekruna, Mašinski fakultet Mostar
Prof. dr Ranko Zrilić, Mašinski fakultet Banjaluka



PREDNOSTI I NEDOSTACI RAVNOG SOLARNOG KOLEKTORA SA POKRETNIM PANELOM U ODNOSU NA FIKSNI

Nebojša Lukić¹

Rezime: 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 se određuje 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. Pri proračunu gubitaka solarnog kolektora koristi se promenjiva optička efikasnost, zavisno od upadnog ugla zračenja. Ukoliko bi solarni kolektor posedovao uređaj za zaokretanje 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. Bez obzira na svoje prednosti, pokretni panel zahteva posebne uslove funkcionisanja, što stvara probleme pre svega sa mestom ugradnje.

Ključne riječi: solarni kolektor, pokretni panel, prednosti

ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF A FLAT-PLATE SOLAR COLLECTOR WITH MOBILE PANEL COMPARED WITH A FIXED PANEL ONE

Abstract: 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 recommendation. This position depends on latitude and time of year in order to reach a good angle between sun-ray and the normal of panel area, as close as possible to zero angle. If solar collector has possibility of rotation its front-panel in accordance with annual and daily moving of sun, certainly such collector will achieve better efficiency than a fixed panel one. Which improvement can be obtained? In this paper the defined question is considered.

Keywords: solar collector, mobile front-panel, advantages

1. 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 vezano za OIE.

¹ Vanredni profesor, Nebojša Lukić, Kragujevac, Srbija, Mašinski fakultet, (lukic@kg.ac.yu)

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/m^2) i jednačinama baziranim na dugoročnim meteorološkim 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, BLAST, TRNSYS [1], BUNYIP, ESP, kao i najnovijeg EnergyPlus [2]. Kako stvarni podaci o insolaciji zavise od lokalnog stanja atmosfere (lebdeće čestice, troatomni i višeatomni gasovi) korišćenjem matematičkih modela se dolazi više ili manje približnih podataka.

U ovom radu je iskorišćen matematički model Sunčevog zračenja, kao deo softvera DZID [3]. Osnovna ideja sprovođenja serije simulacija, Sunčevog zračenja na nagnutu površinu, je 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, date su samo ključne dve jednačine, dok se kompletan model može naći u [4].

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

$$\cos i = [\cos G \sin \varphi - \sin G \cos \varphi \cos(\pi - \alpha)] \sin \delta + [\cos G \cos \varphi + \sin G \sin \varphi \cos(\pi - \alpha)] \cos \delta \cos t + \sin G \sin(\pi - \alpha) \cos \delta \sin t \quad (2.1)$$

gde su: φ ($^\circ$) geografska širina mesta, δ ($^\circ$) deklinacijski ugao, t ($^\circ$) svetsko vreme (časovni ugao Sunca), G ($^\circ$) nagib nagnute površine u odnosu na horizontalu, 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) se izračunava kao [5]:

$$I_p = H'_{dir} \frac{\cos i}{\sin \beta} + \frac{H'_{dif}(1 + \cos G)}{2} + \frac{g_r \cdot H'(1 - \cos G)}{2} \quad (2.2)$$

gde su: H' , H'_{dir} , H'_{dif} (W/m^2) ukupno, direktno i difuzno časovno zračenje, respektivno, β ($^\circ$) ugao solarne altitute, g_r (-) zemljin albedo (u konkretnom matematičkom modelu usvojeno je $g_r \approx 0$).

3. SIMULACIJE I REZULTATI

3.1 Konstantne i promenjive veličine sprovedenih simulacija

Sprovedene simulacije su podrazumevale tip klasičnog ravnog solarnog kolektora, sa jednostrukim staklom. Efikasnost kolektora, η_k (-) je izračunavana 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, a (-) koeficijent apsorpcije apsorbera solarnog kolektora, K_u (W/m^2K) ukupni koeficijent prolaza toplote solarnog kolektora (kondukcija, konvekcija, zračenje), za kolektor sa jednostrukim staklom usvojeno, $K_u=7 W/m^2K$, $\Delta t=t_k - t_o$ (K) temperaturna razlika radne temperature kolektora (vode), t_k i temperature okoline t_o . Radna temperatura kolektora je nepromenjiva $t_k=50^\circ C$. Proizvod $d \cdot a$ predstavlja optičku efikasnost solarnog kolektora.

U [4] se propustljivost staklene ploče solarnog kolektora posmatra kao konstantna veličina ($a=0,85$), kao i koeficijent apsorpcije apsorbera ($a=0,9$). Međutim, to realno nije slučaj jer se recimo, put zraka kroz stakleni pokrivač kolektora razlikuje u zavisnosti od upadnog ugla zraka. U tabeli 3.1 date su uobičajene vrednosti za veličine d i a u zavisnosti od ugla pod kojim zrak pada na površinu ravnog solarnog kolektora.

Tabela 3.1 Optička efikasnost solarnog kolektora u zavisnosti od upadnog ugla zraka

Upadni ugao zračenja i ($^\circ$)	0	60	70	80	90
Propustljivost stakla d (-)	0,9	0,8	0,65	0,35	0
Koef.apsorpcije apsorbera a (-)	0,92	0,85	0,75	0,60	0
Optička Efikasnost $\eta_k=d \cdot a$ (-)	0,83	0,68	0,49	0,21	0

Ukoliko se usvoji promenljiva optička efikasnost solarnog kolektora, jednačina (3.1) može da se napiše na sledeći način:

$$\eta_k = \frac{\left[\gamma \cdot H'_{dir} \frac{\cos i}{\sin \beta} + \gamma_m \frac{H'_{dif}(1 + \cos G)}{2} \right]}{I_p} - K_u \frac{\Delta t}{I_p} \quad (3.2)$$

gde su $H'_{dir} \frac{\cos i}{\sin \beta}$ (W/m^2) komponenta direktnog Sunčevog zračenja na nagnutu

površinu, $\frac{H'_{dif}(1 + \cos G)}{2}$ (W/m^2) komponenta difuznog Sunčevog zračenja na

nagnutu površinu, γ_m (-) srednja dnevna optička efikasnost, u radu usvojena kao 0,7 (preporučena vrednost).

Simulirano je Sunčevo zračenje i ponašanje solarnih kolektora za tri datuma: 01.07., 01.10. i 01.02. Promene spoljne temperature za ove datume su usvojene prema tabeli 3.2.

Tabela 3.2 Promene temperature okoline u zavisnosti od vremena i datuma

Vreme (h)	5	6	7	8	9	10	11	12
t_k ($^\circ C$) 01.07.	24	24.4	25.3	26.6	28.2	29.7	30.8	31.9
t_k ($^\circ C$) 01.10.	-	5	8.7	12.3	15.6	18.4	20.8	22.5
t_k ($^\circ C$) 01.02.	-	-3	-1.6	-0.3	0.8	1.9	2.8	3.4

Vreme (h)	13	14	15	16	17	18	19	20
$t_k(^{\circ}\text{C})$ 01.07.	32,5	32,9	33,2	32,8	32,1	31	29,8	28,7
$t_k(^{\circ}\text{C})$ 01.10.	23,6	24	23,6	22,6	20,7	18,4	15,6	12,3
$t_k(^{\circ}\text{C})$ 01.02.	3,8	4	3,8	3,4	2,8	1,9	0,8	-0,3

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

U prvom slučaju solarni kolektor je postavljen fiksno i to u letnjem i jesenjem periodu (01.07. i 01.10.), $\alpha=180^{\circ}$ (smer juga) i $G=\varphi-10^{\circ}=30^{\circ}$, a u zimskom periodu (01.02.), $\alpha=180^{\circ}$ i $G=\varphi+10^{\circ}=50^{\circ}$.

U drugom slučaju softver bira optimalni položaj solarnog kolektora (orijentaciju i nagib), za identične simulacione uslove, α_{opt} , G_{opt} (uslov $I_p=I_{p\text{max}}$). Optimalni položaj solarnog kolektora znači da upadni ugao zraka bude uvek približno 0° (u slučajevima velike oblačnosti, kada difuzna komponenta ima veliki uticaj, ovaj optimalni ugao može da se razlikuje od 0° , a prema usvojenoj jednačini (2.2)).

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 3.3.

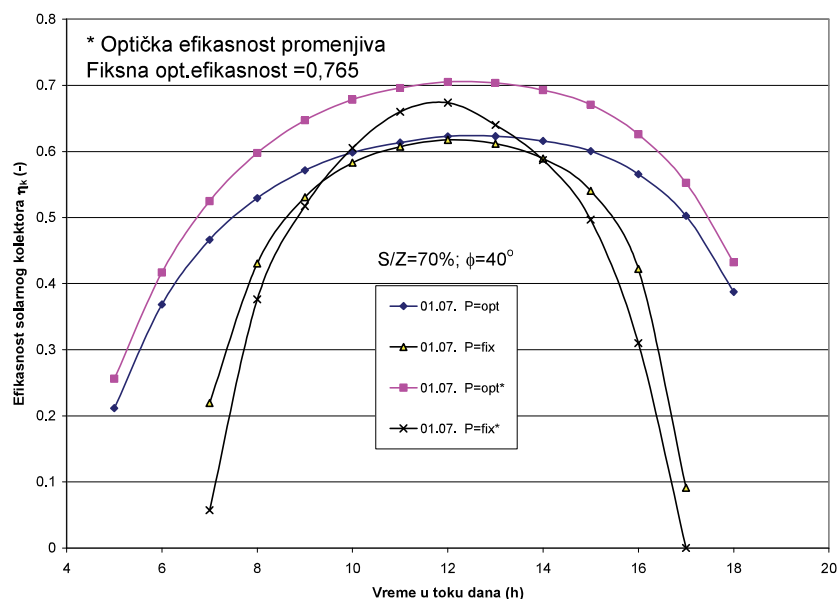
Tabela 3.3 Srednja ukupna dnevna insolacija za pojedine mesece u (kWh/m^2 dan)

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 diskusija

Korišćenjem usvojenih podataka, sproveden je niz simulacija kako bi se utvrdili toplotni dobici solarnog kolektora sa pokretnim panelom u odnosu na onaj fiksni ali i razlike između matematičkog modela konstantne [4] i promenjive optičke efikasnosti solarnog kolektora.

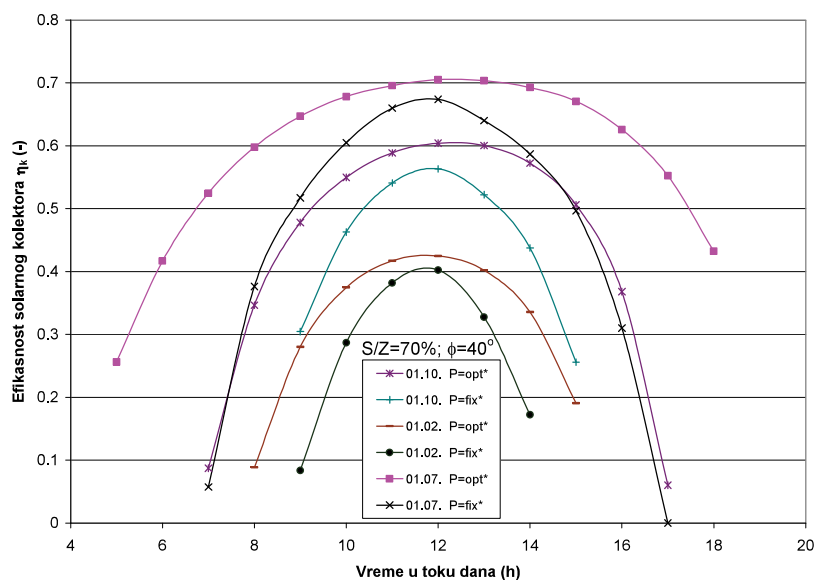
Na slici 3.1 prikazana je efikasnost solarnog kolektora u zavisnosti, pokretnosti panela i primenjene jednačine (konstantna optička efikasnost-jednačina (3.1), promenjiva efikasnost-jednačina (3.2) i tabela 3.1), tokom obdanice. Sa korišćenjem pokretnog panela dobijaju se veće efikasnosti kolektora i to naročito u početnim i krajnjim satima obdanice. Konstantna vrednost optičke efikasnosti daje niže vrednosti efikasnosti solarnog kolektora za sate maksimalne insolacije, a promenjiva u uslovima kada ugao upadnog zraka na fiksni panel solarnog kolektora je daleko od vrednosti 0° . Primetno manja razlika efikasnosti solarnog kolektora se primećuje za fiksni panel, dok u slučaju pokretnog panela zapaža se značajno odstupanje. Drugim rečima, približavanje realnim uslovima funkcionisanja solarnog kolektora, usvajanjem promenjive optičke efikasnosti ima mnogo više smisla u slučaju optimalno pokretnog panela.



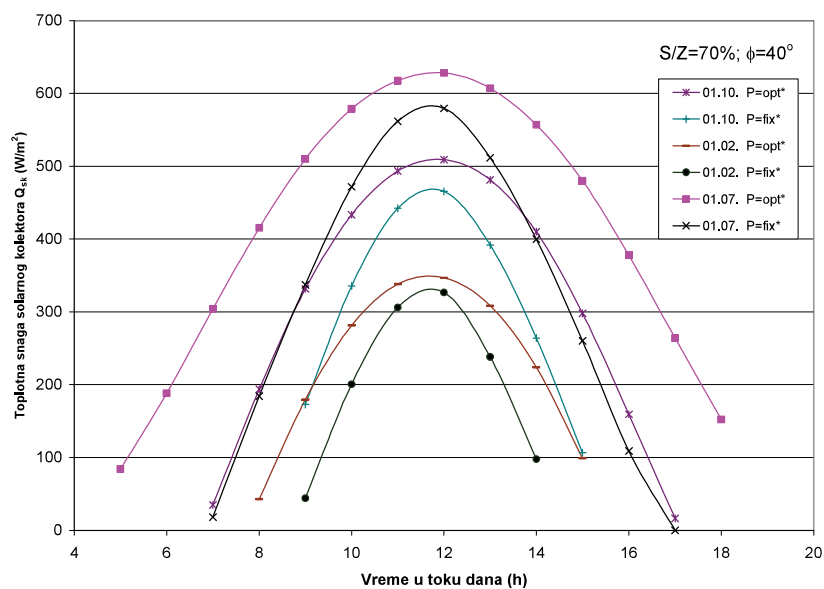
Slika 3.1 Zavisnost efikasnosti solarnog kolektora od pokretnosti panela i primenjenog simulacionog modela, tokom obdanice

Na slici 3.2 prikazana je efikasnost solarnog kolektora (promenljiva optička efikasnost, P^*) u zavisnosti od datuma, i pokretnosti panela, tokom obdanice. Saglasno dijagramu prikazanom na slici 3.1 primetne su razlike efikasnosti solarnog kolektora sa fiksnim i pokretnim panelom i to znatno izraženije nego za iste simulacione slučajeve za prethodno korišćeni matematički model u [4]. Ipak najveća razlika se uočava na krivama fiksni-pokretni panel za datum 01.10., što govori da izabrani nagib fiksnog panela ($G=30^\circ$) nije baš najidealniji. U svakom slučaju manje odgovarajući nego za leto ($G=30^\circ$) i zimu ($G=50^\circ$).

Na slici 3.3 prikazana je toplotna snaga solarnog kolektora, $Q_{sk}=\eta_k \cdot I_p$, u zavisnosti od datuma i pokretnosti panela (promenljiva optička efikasnost, P^*), tokom obdanice. Efikasnost primene optimalno pokretnog panela solarnog kolektora naročito dolazi do izražaja u jutarnjim i popodnevnim satima, kada fiksni panel gubi na svojoj efikasnosti. Najveći efekti se postižu u letnjim mesecima korišćenja solarnog kolektora.



Slika 3.2 Zavisnost efikasnosti solarnog kolektora od datuma i pokretnosti panela (promenljiva optička efikasnost), tokom obdanice



Slika 3.3 Zavisnost toplotne snage solarnog kolektora od datuma i pokretnosti panela, tokom obdanice

U tabeli 3.4 je prikazano ukupno dnevno apsorbavano (iskorišćeno) zračenje solarnog kolektora pokretnog (Q_{kopt}) i fiksno panela (Q_{kfix}) (kWh/m^2 dan) u zavisnosti

od datuma i primenjenog matematičkog modela (fiksna P ili promenjiva P* optička efikasnost). Kao što je to primećeno na dijagramima, nema značajnog efekta pri primeni definisana dva matematička modela, u slučaju fiksnog panela solarnog kolektora. Međutim, u slučaju optimalno pokretnog panela, značajno bolji rezultati se dobijaju u slučaju promenjive optičke efikasnosti što je bliže i realnim parametrima funkcionisanja solarnog kolektora.

Tabela 3.4 Ukupno dnevno zračenje solarnog kolektora Q_{kopt}/Q_{kfix} (kWh/m²dan)

φ (°)	Datum	S/Z=70%	
		P	P*
40	01.07.	5,16/3,47	5,76/3,43
	01.10.	3,02/2,21	3,36/2,18
	01.02.	1,52/1,18	1,82/1,21

U tabeli 3.5 su prikazani procentualni toplotni dobiti pokretnog solarnog kolektora (tabela 3.4) u odnosu na fiksni, za oba korišćena matematička modela. Kako su fiksne vrednosti optičke efikasnosti usvajane prema srednjim dnevnim vrednostima, a optimalno pokretni panel ima uvek nulti upadni ugao zraka, razlike dva modela su najveće kod pokretnog panela.

Tabela 3.5 Dobici $(Q_{kopt}-Q_{kfix})/Q_{kfix}$ (%) pokretnog panela u odnosu na fiksni

φ (°)	Datum	S/Z=70%	
		P	P*
40	01.07.	48.70	67.93
	01.10.	36.65	54.13
	01.02.	28.81	50.41

Ostvareni toplotni dobiti solarnog kolektora sa pokretnim panelom u odnosu na fiksni su značajni, naročito u letnjem periodu i za naše podneblje se kreću preko 60%. 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 značajno niže.

4. ZAKLJUČAK

Dobijeni podaci ukazuju na značajne dobitke ovakvih panela u odnosu na fiksne (preko 60% u letnjem periodu).

I pored njihove očigledne prednosti u odnosu na fiksne, 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. Ugradnja više panela na jednoj nosećoj konstrukciji postaje praktično neizvodljiva. Postoje problemi sa mogućim senkama koje prave okolni objekti.

Preporučljivo je za simulacije funkcionisanja kolektora sa pokretnim panelom koristiti model sa promenjivom optičkom efikasnošću.

Osnovni problem sa OIE je njihova tržišna neisplativost i zavisnost od državnih subvencija. Ugradnja solarnih kolektora i sistema se u zemljama EU subvencionise 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/m^2 . Pilot postrojenje solarnog kolektora sa pokretnim panelom u Srbiji bi trebalo da potvrdi iznesene podatke i da proizvodnju toplotne energije na godišnjem nivou podigne na $950\text{-}1050 \text{ kWh/m}^2$ (prosečna godišnja insolacija u Srbiji iznosi 1400 kWh/m^2).

LITERATURA

- [1] ASHRAE handbook of fundamentals. Georgia, USA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc.; 1981.
- [2] Crawley, Drury B., Linda K. Lawrie, Frederick C. Winkelmann, and Curtis O. Pedersen. 2001. 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.
- [3] 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.
- [4] Lukić, N., Toplotni dobici ravnog solarnog kolektora sa pokretnim panelom u odnosu na fiksni, 37 kongres KGH, Zbornik radova, Beograd, 2006., st. 377-385.
- [5] Ladsaougikar, U.V., Parikh, P.P., Design and optimization of a flat plate collector for cooling application, SUN-Volume 2, International Solar Energy Society, 1979.