

TERMIČKA EFIKASNOST DVOSTRUKO OZRAČENOG I KLASIČNOG RAVNOG VODENOG PRIJEMNIKA SUNČEVE ENERGIJE - EKSPERIMENTALNI REZULTATI

THERMAL EFFICIENCY OF A DOUBLE EXPOSURE AND CONVENTIONAL FLAT-PLATE WATER SOLAR COLLECTORS - EXPERIMENTAL RESULTS

Novak NIKOLIĆ,
lepinole@yahoo.com

Nebojša LUKIĆ,
lukic@kg.ac.rs

Dragan TARANOVIĆ

Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Kragujevac,
tara@kg.ac.rs

U okviru ovog rada prikazani su rezultati eksperimentalnog ispitivanja dvostruko ozračenog i klasičnog, ravnog vodenog prijemnika sunčeve energije. Dvostruko ozračen prijemnik (DOP) je prijemnik koji može apsorbovati solarno zračenje gornjom kao i donjom površinom apsorbera. Apsorpcija donjom površinom apsorbera omogućena je upotrebom ravnog reflektora. Reflektor je postavljen ispod i paralelno sa prijemnikom. Eksperimentalna ispitivanja su bila sprovedena tokom meseca avgusta, septembra i oktobra 2012. godine. U okviru ovog rada prikazani su eksperimentalni rezultati za datume kada je bila najmanja (08. avgust) i najveća (04. oktobar) postignuta dnevna ozračenost donje površine apsorbera DOP-a. Rezultati su pokazali da je toplotna snaga DOP-a bila za 41,79-66,44% veća od toplotne snage klasičnog prijemnika sunčeve energije (KP). Termička efikasnost DOP-a približno je ista onoj za KP. Srednja dnevna termička efikasnost za DOP i KP tokom 08. avgusta iznosila je 0,575 i 0,576, a tokom 04. oktobra 0,521 i 0,508, respektivno.

Ključne reči: prijemnik sunčeve energije; reflektor; eksperiment;

In this paper the results of the experimental testing of the double exposure flat-plate and the conventional flat-plate water solar collectors are presented. The double exposure flat-plate solar collector (DEFPC) is a solar collector which can absorb solar radiation by upper as well as lower absorber surface. Absorption from lower absorber surface is enabled by application of a flat-plate reflector. The reflector is placed in parallel below the collector. The experiments were performed in the months of August, September and October in 2012. In this paper the experimental results for the dates when the achieved daily irradiation of the lower absorber surface of the DEFPC was the lowest (8th of August) and the highest (4th of October) are presented. The results showed that the thermal power of the DEFPC was 41,79% to 66,44% higher than the thermal power of the conventional solar collector (FPC). The thermal efficiency of the DEFPC is the similar to that of the FPC. The daily average thermal efficiency of the DEFPC and the FPC during the 8th of August was 0,575 and 0,576, while during the 4th October 0,521 and 0,508, respectively.

Key words: solar collector; reflector; experiment;

I. Uvod

Dvostruko ozračen, ravan prijemnik sunčeve energije (DOP) predstavlja solarni prijemnik koji istovremeno i svojom gornjom i donjom površinom apsorbera (DPA) može apsorbovati solarno zračenje. Prijem solarnog zračenja DPA ostvaruje se primenom ravne reflektujuće površine (reflektora) postavljene paralelno

ispod prijemnika. S druge strane, apsorpcija zračenja gornjom površinom apsorbera identična je onoj kod klasičnog ravnog prijemnika sunčeve energije (KP). Da bi se omogućio prijem zračenja DPA osim upotrebe reflektora neophodno je i da prethodno izolacija smeštena u donjem delu kutije prijemnika bude uklonjena, a donja strana kutije prijemnika zamenjena zastakljenjem. Prijemno-reflektujući sistem (PRS) analiziran u ovom radu je u odnosu na prethodno istraživane sisteme [1-4], različit iz više razloga. Prvi razlog je paralelnost prijemnika i reflektora. Na taj način, omogućeno je da upadni ugao solarnog zraka, koji pada na gornju površinu apsorbera, bude identičan upadnom uglu solarnog zraka koji nakon refleksije od reflektora pada na DPA. Drugi razlog se odnosi na to da je kod ovog sistema kao reflektujuća površina upotrebljeno pleksiglas ogledalo. Kod ogledalo površine refleksija je spekularna, odnosno upadni i odbojni uglovi solarnog zraka su isti. Reflektor je pokretan u sva tri moguća ortogonalna pravca, pravcu sever-jug, pravcu istog-zapad i pravcu normalnom na njegovu površinu. Dimenzije reflektora približno su iste dimenzijama prijemnika. Kako bi se prethodno definisao optimalni položaj reflektora u odnosu na prijemnik, sprovedena su teorijska istraživanja i verifikacija matematičkog modela određivanja površine ozračenosti DPA DOP-a [5]. Istovremeno sa ispitivanjem DOP-a, ispitivan je i KP sa jednostrukim zastakljenjem i identičnih karakteristika apsorbera, kako bi se definisale razlike u performansama. Paralelno sa eksperimentalnim ispitivanjima DOP-a, formiran je i verifikovan matematički model njegovog termičkog ponašanja. U okviru ovog rada prikazani su eksperimentalni rezultati ispitivanja dvostruko ozračenog i klasičnog prijemnika sunčeve energije. Rezultati se odnose na njihovu termičku efikasnost.

II. Termička efikasnost

Pored parametra korisna toplotna snaga KP-a (DOP-a) $Q_{k,e}$ ($Q_{d,e}$), za ocenu termičkog ponašanja prijemnika koristi se i parametar, stepen efikasnosti prijemnika $\eta_{k,e}$ ($\eta_{d,e}$). Uopšteno posmatrano stepen efikasnosti nekog energetskog sistema definiše se kao odnos dobijene (korisne) i uložene (dovedene ili maksimalno raspoložive) energije. Kod solarnih prijemnika korisna energija predstavlja energiju predatu radnom fluidu dok uložena energija predstavlja ukupno dozračenu energiju na površinu zastakljenja tih prijemnika. Jednačine koje se koriste za izračunavanje eksperimentalnih vrednosti efikasnosti prijemnika $\eta_{k,e}$ i $\eta_{d,e}$ date su kao:

$$\eta_{k,e} = \frac{Q_{k,e}}{H'_{kG} \cdot A_k} = \frac{\dot{m}_k \cdot c_{p,k} \cdot (T_{k,i} - T_{k,u})}{H'_{kG} \cdot A_k} \quad (1)$$

$$\eta_{d,e} = \frac{Q_{d,e}}{H'_{dG} \cdot A_d} = \frac{\dot{m}_d \cdot c_{p,d} \cdot (T_{d,i} - T_{d,u})}{H'_{dG} \cdot A_d} \quad (2)$$

gde su: H'_{kG} (W/m^2) ukupno solarno zračenje dozračeno na jediničnu površinu zastakljenja KP-a, A_k (m^2) površina apsorbera KP-a, \dot{m}_k (kg/s) maseni protok radnog fluida KP-a, $c_{p,k}$ (J/kgK) specifična toplota pri konstantnom pritisku radnog fluida KP-a, $T_{k,i}$ (K) izlazna temperatura radnog fluida KP-a, $T_{k,u}$ (K) ulazna temperatura radnog fluida KP-a, H'_{dG} (W/m^2) ukupno solarno zračenje dozračeno na jediničnu površinu zastakljenja DOP-a, A_d (m^2) površina apsorbera DOP-a, \dot{m}_d (kg/s) maseni protok radnog fluida DOP-a, $c_{p,d}$ (J/kgK) specifična toplota pri konstantnom pritisku radnog fluida DOP-a, $T_{d,i}$ (K) izlazna temperatura radnog fluida DOP-a, $T_{d,u}$ (K) ulazna temperatura radnog fluida DOP-a. Jednačine koje se koriste za izračunavanje parametara H'_{kG} i H'_{dG} su prikazane ispod:

$$H'_{kG} = H'_{dir} \cdot \frac{\cos(i)}{\sin(\beta)} + H'_{dif} \cdot \frac{1 + \cos(G)}{2} \quad (3)$$

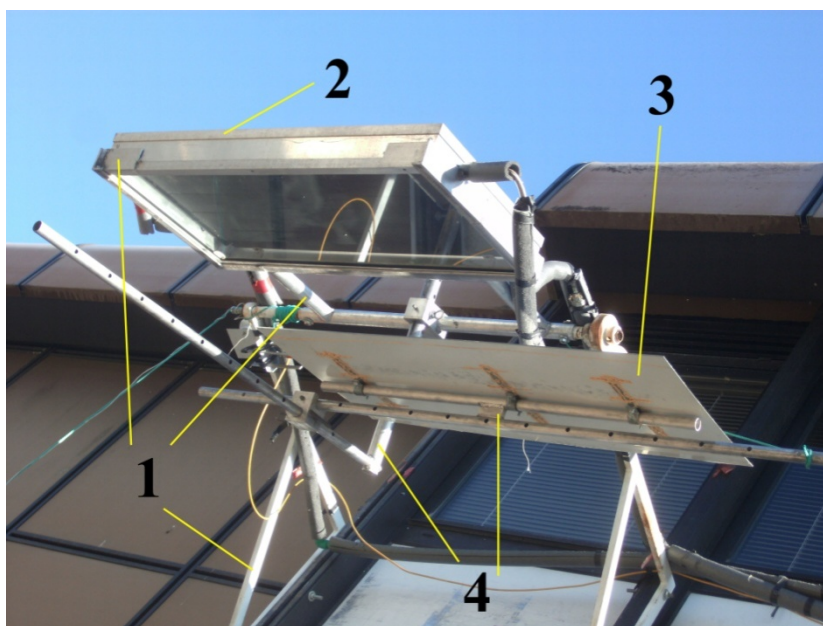
$$H'_{dG} = H'_{dir} \cdot \frac{\cos(i)}{\sin(\beta)} + H'_{dif} \cdot \frac{1 + \cos(G)}{2} + \rho \cdot \left(H'_{dir} \cdot \frac{\cos(i_r)}{\sin(\beta)} \cdot \frac{A_{ozr}}{A_{dd}} + H'_{dif} \cdot \frac{A_r \cdot F_{rc}}{A_{dd}} \right) \quad (4)$$

gde su: H'_{dir} (W/m^2) intenzitet dozračenog direktnog solarnog zračenja na horizontalnu površinu, i (rad) upadni ugao solarnog zraka, β (rad) solarna altituda, H'_{dif} (W/m^2) intenzitet dozračenog difuznog solarnog zračenja na horizontalnu površinu, G (rad) ugao nagiba solarnog prijemnika, ρ (-) koeficijent refleksije reflektora, i_r (rad) upadni ugao reflektovanog solarnog zraka, A_{ozr} (m^2) površina ozračenosti DPA DOP-a, $A_{dd} = A_{dg} = A_d$ (m^2) površina donje (gornje) površine apsorbera DOP-a, A_r (m^2) površina reflektora i F_{rc} (-) faktor oblika. Faktor oblika F_{rc} je izračunat prema Ehlert-ovom modelu [6], dok su vrednosti parametra A_{ozr} dobije-

ne upotrebom matematičkog modela detaljno opisanog u [5]. Pri određivanju površine ozračenosti DPA DOP-a uzet je u obzir i uticaj bočnih strana DOP-a na njen oblik i veličinu [7].

III. Eksperiment

Eksperimentalna instalacija ispitivanih solarnih prijemnika nalazi se u okviru Laboratorije za Termodinamiku i termotehniku, Fakulteta inženjerskih nauka u Kragujevcu. Instalacija obuhvata prijemno-reflektujući sistem, klasičan prijemnik sunčeve energije, hidrauličnu i mernu instalaciju. Prijemno-reflektujući sistem (slika 1) sastoji se od noseće konstrukcije (pozicija 1), DOP-a (pozicija 2), reflektora (pozicija 3) i konstrukcije za pomeranje reflektora (pozicija 4).



Slika 1 Prijemno - reflektujući sistem: 1 - noseća konstrukcija, 2 - DOP, 3 - reflektor i 4 - konstrukcija za pomeranje reflektora

Takođe za potrebe poređenja termičkog ponašanja DOP-a izrađen je klasičan, jednostruko ozračen ravan prijemnik sunčeve energije istih dimenzija i karakteristika apsorbera kao DOP, prikazan na slici 2.



Slika 2 Klasičan ravan prijemnik sunčeve energije

Tehničke karakteristike DOP-a i KP-a su date u tabeli 1.

Tabela 1 Tehničke karakteristike DOP-a i KP-a

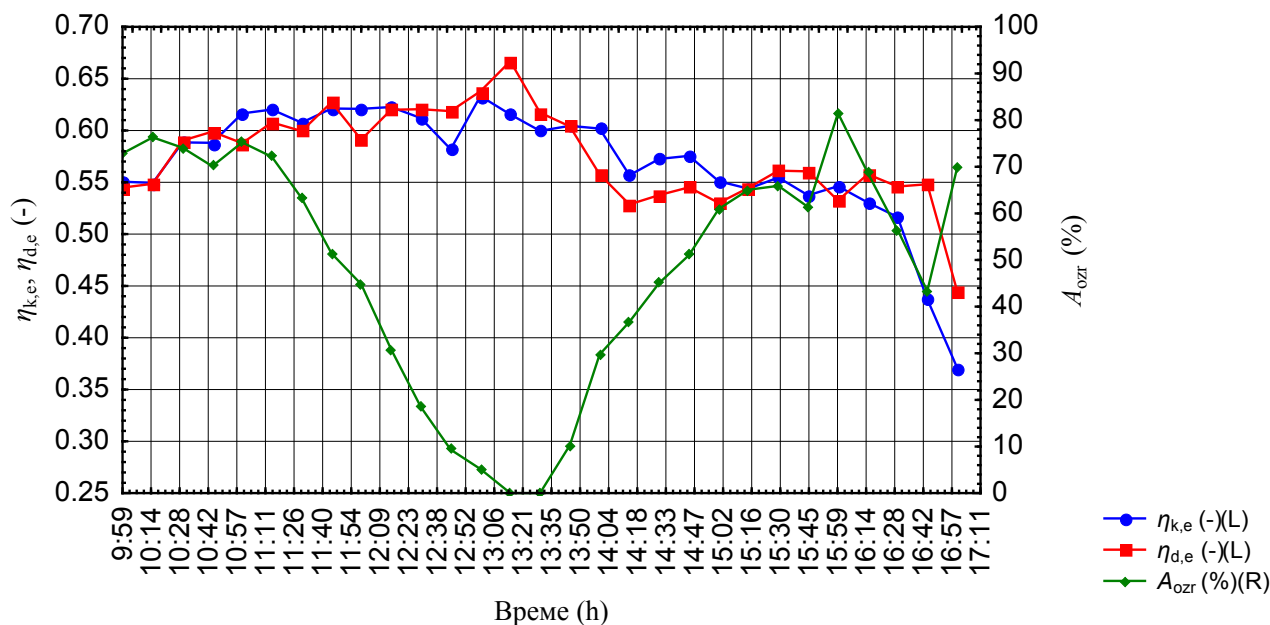
Dužina reflektora (m)	1
Sirina reflektora (m)	0,5
ρ (-) (Pleksiglas ogledalo)	0,9
Dužina apsorbera prijemnika (m)	0,840
Sirina apsorbera prijemnika (m)	0,460
Debljina apsorbera prijemnika (m)	0,002
Koeficijent emisije apsorbera prijemnika (-) (Aluminijum)	0,9
Koeficijent apsorpcije apsorbera prijemnika (-) (Aluminijum)	0,9
Debljina izolacije (m) (Tvrdo presovana mineralna vuna)	0,032
Rastojanje između apsorberskih cevi (m)	0,092
Unutrašnji prečnik apsorberskih cevi (m) (Bakar)	0,015

Eksperimentalna ispitivanja DOP-a i KP-a vršena su za različite vrednosti zapreminskih protoka vode i različite vrednosti ulaznih temperatura vode, u periodu od 05. avgusta do 19. oktobra 2012. godine. S obzirom da je eksperimentalna instalacija otvorenog tipa i da se kao radni fluid koristila voda solarni prijemnici su ispitivani samo u uslovima kada su najniže spoljašnje temperature bile iznad nule. Merenja termičkih karakteristika solarnih prijemnika započinjala su u 10:00 h a završavala se u 17:00 h. Tokom perioda merenja koji je obuhvatao kraj septembra i početak oktobra merenja bi se prekidala i pre 17:00 h zbog prisustva senke susednih objekata na PRS-u.

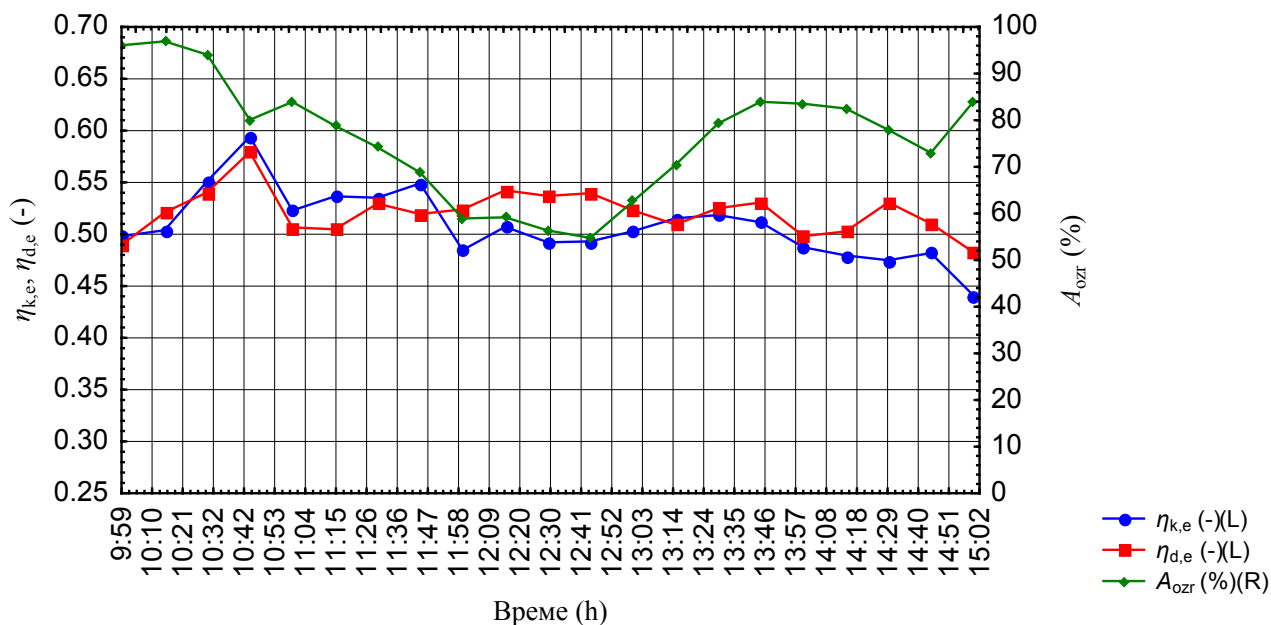
Oba solarna sistema su u navedenom vremenu ispitivanja bila postavljena pod uglom nagiba od $G = 36^\circ$ i orijentacijom od $\alpha = 147^\circ$, koja je delom bila definisana položajem objekta za koji je PRS bio vezan. U svakom slučaju osnovni zahtev merenja je podrazumevao identične uslove za KP i DOP. Reflektor PRS-a se pomerao manuelno i to na svakih sat vremena tokom perioda ispitivanja, a u odnosu na njegov optimalan položaj u sredini jednočasovnog mernog perioda. Vrednost za A_{ozr} je izračunavana pomoću matematičkih modela datih u [5, 7]. Svakim danom ispitivanja istovremeno su se prikupljali podaci o trenutnom dozračenom zračenju na horizontalnu površinu, ulaznim i izlaznim temperaturama vode, masenim protocima vode, temperaturi okoline i brzini vetra.

IV. Rezultati

Na slikama 3 i 4 prikazani su dijagrami eksperimentalnih vrednosti termičke efikasnosti KP-a ($\eta_{k,e}$), DOP-a ($\eta_{d,e}$) kao i vrednosti površine ozračnosti DPA DOP-a A_{ozr} (%), u zavisnosti od vremena.



Slika 3 Eksperimentalni dijagrami termičkih efikasnosti $\eta_{k,e}$, $\eta_{d,e}$ i površine A_{ozr} u funkciji vremena za 08. avgust 2012.



Slika 4 Eksperimentalni dijagrami termičkih efikasnosti $\eta_{k,e}$, $\eta_{d,e}$ i površine A_{ozr} u funkciji vremena za 04. oktobar 2012.

Rezultati za ova dva datuma su odabrani s obzirom da je najmanja i najveća postignuta dnevna ozračenost DPA DOP-a bila tokom 08. avgusta (48,63%) i 04. oktobra (76,17%), respektivno. Najveći uticaj na vrednost ukupno apsorbovanog zračenja I_d , toplotne snage $Q_{d,e}$ i efikasnosti $\eta_{d,e}$ DOP-a ima vrednost površine ozračenosti A_{ozr} . Dijagrami toplotne snage $Q_{d,e}$ i relativne procentualne razlike toplotnih snaga DOP-a i KP-a ΔQ dobro korespondiraju sa dijagramom površine A_{ozr} [8]. Gledano za sve ispitivane datume, najmanja razlika ΔQ , tokom dana, bila je oko podneva kada je ozračenost DPA DOP-a bila najmanja. Najveća procentualna razlika između $Q_{d,e}$ i $Q_{k,e}$ bila je u kasnim prepodnevima i ranim poslepodnevnim satima, kada je ozračenost DPA bila najveća. To su periodi 10:00-11:30 h i 15:00-17:00 h (13:00-15:00 h za 04.10.). Za ove vremenske intervale srednja vrednost razlike ΔQ kretala se u opsegu od 48,35-63,34% i 62,38-78,63%, respektivno. Ozračenost DPA tokom ovih perioda iznosila je 72,01-86,31% i 63,69-77,48%, respektivno. Srednja dnevna vrednost ozračenosti i srednja dnevna relativna razlika snaga, za ispitivane datume, imale su vrednosti u okviru granica 48,63-76,17% i 41,79-66,44% [9].

Dijagrami sa slika 3 i 4 ukazuju na to da je termička efikasnost DOP-a približno jednaka ili veća od termičke efikasnosti KP-a. Za vremenske intervale kada je bila najveća ozračenost DPA u toku dana, efikasnost DOP-a bila je nešto manja odnosno veća od efikasnosti KP-a, respektivno. Objašnjenje se vezuje za veću procentualnu relativnu razliku toplotnih snaga u poslepodnevnim satima kao posledica veće procentualne relativne razlike ukupno apsorbovanog zračenja i uticaja prelaznog efekta. Uzroci pojave prelaznog efekta su viša temperatura sistema DOP-a i njegov nešto veći toplotni kapacitet, u odnosu na sistem KP-a.

Takođe, i u periodu oko podneva, kada je ozračenost DPA bila najmanja tokom dana, efikasnost DOP-a bila je veća od efikasnosti KP-a. Razlog je uticaj reflektovanog zračenja sa apsorbera i stakla, reflektovanih toplotnih gubitaka sa apsorbera i prelaznog efekta. Naročito je zanimljiv efekat dvostruko reflektovanog zračenja sa reflektora PRS-a, sa donje staklene ploče i DPA, koji je bio manje ili više izražen u zavisnosti od datuma i časa merenja. Naime, u pojedinim trenucima merenja međusobni položaj DOP-a i reflektora je omogućavao delu zračenja da pri spekularnom odbijanju od donje staklene ploče (i apsorbera) i reflektora, ponovo dospe na apsorber DOP-a. Zbog složenosti ove pojave, faktor reflektovanog reflektovanog zračenja nije uzet u obzir u matematičkom modelu termičkog ponašanja DOP-a. Razlika između efikasnosti DOP-a i KP-a bi, tokom ovog perioda, bila manja da nije zanemaren uticaj pomenutih faktora refleksije.

Srednja termička efikasnost za DOP i KP tokom 08. avgusta iznosila je 0,575 i 0,576, a tokom 04. oktobra 0,521 i 0,508, respektivno. Vrednost efikasnosti je, između ostalog, bila manja u oktobru zbog niže spoljne temperature vazduha i manjeg iznosa dozračenog solarnog zračenja. Prikazane vrednosti efikasnosti DOP-a i KP-a praktično su identične. To govori da je relativna razlika njihovih toplotnih snaga ΔQ približno ista relativnoj razlici njihovog ukupno dozračenog zračenja na površini zastakljenja. Treba istaći da na

razliku termičkih efikasnosti DOP-a i KP-a utiče razlika između razlike ΔQ i razlike njihovog ukupno apsorbovanog zračenja ΔI . Kada je veća razlika između ΔQ i ΔI veća je i razlika između njihovih efikasnosti.

Termička efikasnost $\eta_{d,e}$, dobijena u ovom istraživanju, nije upoređena sa termičkom efikasnošću DOP-a, dobijenom u [3]. Razlog za to jeste nepravilno izračunavanje efikasnosti u [3]. Ona je računata preko odnosa dobijene korisne toplotne energije i ukupno apsorbovane energije, umesto preko odnosa dobijene korisne toplotne energije i ukupno dozračene energije na površinu zastakljenja prijemnika.

V. Zaključak

U ovom radu prikazani su eksperimentalni rezultati ispitivanja dvostruko-ozračenog, ravnog, vodenog, prijemnika sunčeve energije sa paralelnim reflektorom istih dimenzija smeštenim ispod kutije prijemnika. Osnovni cilj ovog istraživanja je bio uporediti performanse identičnog klasičnog prijemnika sunčeve energije sa dvostruko ozračenim. Rezultati su pokazali da za konstrukciju PRS i DOP umerenih gabarita (maksimalno rastojanje kutije prijemnika i reflektora od 0,6 m), za severne geografske širine od 44°, od 08.08.12. do 04.10.12. mogu se dobiti od 41,79% do 66,44% veće toplotne snage u odnosu na odgovarajuću konstrukciju KP-a, respektivno [9]. Najveća dobijena dnevna relativna razlika ΔQ je za 18,44% veća od maksimalno postignute razlike u prethodnom istraživanju DOP-a [1] od 48%. Termička efikasnost DOP-a približno je ista onoj za KP. Srednja dnevna termička efikasnost za DOP i KP tokom 08. avgusta iznosila je 0,575 i 0,576, a tokom 04. oktobra 0,521 i 0,508, respektivno. Glavne prednosti predloženog PRS-a, u odnosu na prethodno ispitivane, su: paralelnost reflektora i prijemnika, ogledalo reflektujuća površina i pokretljivost reflektora u sva tri moguća ortogonalna pravca.

ZAHVALNOST: Ovo istraživanje je deo projekta TR 33015 tehnološkog razvoja Republike Srbije i projekta III 42006 integralnih i interdisciplinarnih istraživanja Republike Srbije. Želimo da se zahvalimo Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije na njihovoj finansijskoj podršci tokom ovog istraživanja.

VI. Literatura

- [1] Souka, A. F., Double exposure flat-plate collector, *Solar Energy*, 1965, Vol. 9, pp. 117-118.
- [2] Souka, A. F., Safwat, H. H., Determination of the optimum orientation for the double exposure flat-plate collector and its reflectors, *Solar Energy*, 1966, Vol. 10, pp. 170-174.
- [3] Souka, A. F., Safwat, H. H., Theoretical evaluation of the performance of a double exposure flat-plate collector using a single reflector, *Solar Energy*, 1968, Vol. 12, pp. 347-352.
- [4] Larson, D. C., Mirror enclosures for double-exposure solar collectors, *Solar Energy*, 1979, Vol. 23, pp. 517-524.
- [5] Nikolić, N., Lukić, N., A mathematical model for determining the optimal reflector position of a double exposure flat-plate solar collector, *Renewable Energy*, 2013, Vol. 51, pp. 292-301.
- [6] Ehlert, J. R., Smith, T. F., View factors for perpendicular and parallel rectangular plates, *J. Thermophysics*, 1992, Vol. 7, No. 1, pp. 173-175.
- [7] Nikolić, N., Lukić, N., Bojić M., Impact of the lateral collector edges on the irradiated area of the lower absorber surface of the bifacial solar collector, *Proceedings of the 22nd International conference: Installations for buildings and ambiental comfort*, Faculty of Civil Engineering, POLITEHNICA University of Timisoara, Timisoara, Romania, 2013.
- [8] Nikolić, N., Lukić, N., Taranović, D., Skerlić, J., Thermal power of the double exposure and the conventional flat-plate water solar collectors - experimental results, *Proceedings of the 44th International congress on heating, refrigerating and air-conditioning*, SMEITS, Belgrade, Serbia, 2013.
- [9] Nikolić, N., *Istraživanje dvostruko-ozračenog, ravnog, solarnog prijemnika sa ravnom reflektujućom površinom*, doktorska teza, Univerzitet u Kragujevcu, Kragujevac, Srbija, 2014.