

ODREĐIVANJE GEOMETRIJSKIH PARAMETARA ZA OPTIMALNO ISKORIŠĆENJE PRIJEMNIKA SUNČEVE ENERGIJE

MILOŠ MATEJIĆ, MILORAD BOJIĆ, NENAD KOSTIĆ,
NENAD MARJANOVIĆ, MIRKO BLAGOJEVIĆ, Fakultet
inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu,
Sestre Janjić 36, 34000 Kragujevac

U ovom radu izvršeno je određivanje geometrijskih parametara prijemnika sunčeve energije optimizacionim metodama. Razvijen je matematički model za određivanje povoljnih geometrijskih karakteristika prijemnika sunčeve energije u cilju maksimizacije njihovog iskorišćenja. Optimalno rešenje kreirano je za geometrijske karakteristike prijemnika sunčeve energije sa cevima kružnog poprečnog preseka i prijemnika sunčeve energije sa cevima pravougaonog poprečnog preseka. Izvršena je uporedna analiza iskorišćenja oba tipa prijemnika sunčeve energije. Rezultatima ovog istraživanja predstavljen je značaj primene optimizacije i parametarskog modeliranja u projektovanju prijemnika sunčeve energije. Ova rešenja mogu se jednostavno primeniti u praksi. Na kraju rada su razmotreni rezultati i smernice za dalja istraživanja.

KLJUČNE REČI: prijemnici sunčeve energije; faktor iskorišćenja; optimizacija; parametarsko modeliranje

DETERMINATION OF GEOMETRIC PARAMETERS FOR THE OPTIMAL UTILIZATION OF SOLAR COLLECTORS

This paper deals with the determination of geometric parameters of solar collectors by using optimization methods. A mathematical model has been developed to determine favourable geometric characteristics of solar collectors with a goal to maximize their utilization. The optimal solution was created for geometric characteristics of a collector with circular pipes and a collector with rectangular pipes. A comparative utilization analysis was performed for both types of collectors. The results of this research present the importance of using optimization and parametric modelling in designing collectors. These solutions can be simply used in practice. The paper concludes with a discussion on the results and the directions for possible further research.

KEY WORDS: solar collectors; utilization factor; optimization; parametric modelling

1. Uvod

Direktna energija sunčevog zračenja može se koristiti u praksi njenom transformacijom u toplotnu, električnu ili hemijsku energiju. Jedan od najrasprostranjenijih vidova iskorišćenja energije sunčevog zračenja su prijemnici sunčeve energije za grejanje vode. To su uređaji koji upijanjem sunčevih zraka, energiju zračenja pretvaraju u toplotnu energiju fluida koji struji kroz prijemnik sunčeve energije. Najčešći fluidi koji se koriste za prijemnike sunčevog zračenja za pretvaranje energije sunčevog zračenja u toplotnu energiju jesu vazduh i voda. Prema konstrukcionim karakteristikama, prijemnici sunčeve energije se dele na ravne i fokusirajuće. Ravni prijemnici sunčeve energije upijaju sunčevo zračenje i mogu da ga pretvore u toplotu od preko 100 °C, dok fokusirajući prijemnici sunčeve energije pomoću optičkih sistema mogu da postignu temperature i do

3000 °C. Optimizacija prijemnika sunčeve energije predstavlja veoma atraktivnu istraživačku temu. Razvoj konstrukcije i tehnologije ravnih prijemnika sunčeve energije je urađena u cilju povećanja njihovog korisnog dejstva, smanjenja cene njihove izrade i ostalih neželjenih efekata.

Farhat i ostali [1] optimizovali su prijemnike sunčeve energije prema uticaju parametara da bi poboljšali njihove karakteristike. U istraživanje prijemnika uključeni su mnogi parametri, kao što su: površina apsorbera, gabaritne dimenzije prijemnika sunčeve energije, prečnici cevi okruglih poprečnih preseka, ulazne i izlazne temperature, gubici toplote i mnogi drugi. Autori u radu [2] optimizovali su termičke karakteristike prijemnika sunčeve energije prema uticajnim parametrima i eksperimentalnim rezultatima. Oni su zaključili kako izabrati optimalne karakteristike da bi se povećalo korisno dejstvo prijemnika sunčeve energije. U radu [3] Vargas

i ostali su maksimizovali karakteristike prijemnika sunčeve energije prema njihovoj primeni u realnom vremenu. Autori u radu [4] su optimizovali prijemnike sunčeve energije sa aspekta termoeкологије. To istraživanje ne uzima u obzir parametre unutrašnje instalacije. Optimizaciju tipova prijemnika prema klimatskim uslovima izvršili su autori rada [5], dok su autori u radu [6] istraživali optimalna svojstva prijemnika sa stanovišta unutrašnjih elemenata prijemnika sunčeve energije sa kvadratnim ćelijama postavljenim u formaciji sača. Multidisciplinarna optimizacija sa eksperimentalnim i numeričkim rezultatima je predstavljena u [7]. Kalogirou [8] je primenio veštačku inteligenciju i genetski algoritam za optimizaciju u ovom polju istraživanja. U radu [9], autori su razvili matematički model za dobijanje optimalnih karakteristika prijemnika sunčeve energije pokrivenih jednim ili dva staklima sa vazдушnim prostorom unutar prijemnika. Kundu [10] je optimizacijom povećao karakteristike apsorberske ploče. Autori rada [11] su koristili metodu multidisciplinarnog optimalnog dizajna za optimizaciju cevi prijemnika sunčeve energije. U radu [12] autor je objasnio većinu faktora i njihov uticaj na efikasnost prijemnika sunčeve energije, a autori rada [13] su kreirali softver koji određuje uticaje gubitaka toplote na efikasnost prijemnika sunčeve energije. Ong [14] je koristio metodu konačnih razlika za procenu termičkih karakteristika prijemnika sunčeve energije. Prethodno rađene optimizacije nisu rezultovale automatizacijom konstruisanja prijemnika sunčeve energije.

Ovaj rad predstavlja istraživanje optimizovanja i automatizovanja konstruisanja prijemnika sunčeve energije optimizovanjem apsorbera sa cevima. Da bi se to postiglo, matematički model je kreiran za proračun optimalnih dimenzija ploča apsorbera sa cevima. Posle toga, izvršena je komparativna analiza kružnih i pravougaonih poprečnih preseka cevi prijemnika sunčeve energije. Dijagrami svih solucija su dati i razmotreni. Rad se završava parametarskim CAD modelom optimizovanog prijemnika sunčeve energije radi automatizacije konstruisanja prijemnika sunčeve energije.

2. Formulacija problema

Da bi se izvršio odabir optimalnih geometrijskih parametara, bilo je neophodno pripremiti odgovarajući matematički model i za slučaj prijemnika sunčeve energije sa cevima okruglog poprečnog preseka i za slučaj prijemnika sunčeve energije sa cevima pravougaonog poprečnog preseka. Za oba slučaja kao funkcija cilja uzet je faktor efikasnosti ravnog prijemnika sunčeve energije F' . Radi upoređenja korišćenja prijemnika sunčeve energije sa cevima okruglog poprečnog preseka i onih sa cevima pravougaonog poprečnog preseka, usvojene su sledeće pretpostavke: 1) površina unutrašnjosti poprečnog preseka kroz koji struji fluid mora da bude jednaka i za cevi sa okruglim poprečnim presekom i za cevi sa pravougaonim poprečnim presekom; 2) ukupan koeficijent gubitaka toplote U_L mora da bude jednak za oba slučaja; 3) debljina ploče apsorbera δ mora da bude jednaka za oba slučaja; 4) debljina zida cevi t mora da bude jednaka za oba slučaja; 5) rastojanje između cevi prijemnika sunčeve energije W_f mora da bude jednako za oba slučaja.

Izraz za faktor efikasnosti prijemnika sunčeve energije F' kod prijemnika sunčeve energije sa cevima okruglog poprečnog preseka je preuzet iz literature [15] i glasi:

$$F' = \frac{1}{U_L} \left[\frac{1}{W_f \left[\frac{1}{U_L [(W_f - D_o) F + D_o]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i H_{fi}} \right]} \right] \quad (1)$$

gde su:

C_b – provodnost veze između kružne cevi i apsorbera [W/m K],
 D_i – unutrašnji prečnik kružne cevi [m],
 D_o – spoljašnji prečnik kružne cevi [m],
 F – standardna efikasnost rebra [-],
 F' – faktor efikasnosti prijemnika sunčeve energije [-],
 H_{fi} – koeficijent provodnosti toplote u rebrima [W/m² K],
 U_L – koeficijent ukupnih gubitaka toplote [W/m² K] i
 W_f – širina rebra [m].

Izraz za faktor efikasnosti rebra prijemnika sunčeve energije F kod prijemnika sunčeve energije sa cevima okruglog poprečnog preseka preuzet je iz literature [15] i glasi:

$$F = \frac{\tanh \left[\frac{M (W_f - D_o)}{2} \right]}{M \frac{W_f - D_o}{2}} \quad (2)$$

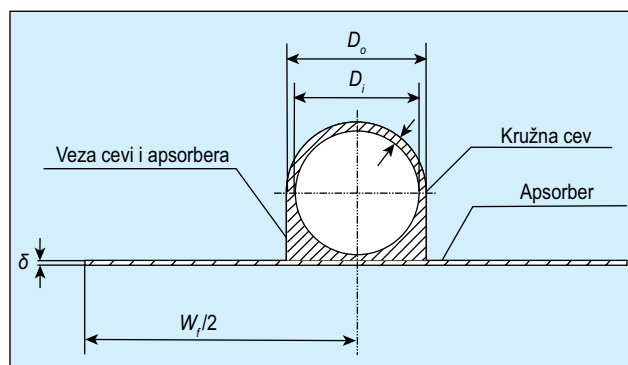
U izrazu (2) je upotrebljena veličina M koja se definiše izrazom:

$$M = \sqrt{\frac{U_L}{k\delta}} \quad (3)$$

gde su:

k – provodljivost toplote apsorberske ploče [W/m K] i
 δ – debljina apsorberske ploče [m].

Izgled poprečnog preseka rebra prijemnika sunčeve energije sa cevima okruglog poprečnog preseka prikazan je na slici 1.



Slika 1. Poprečni presek rebra sa kružnim cevima

Sličan izraz figuriše i za određivanje faktora efikasnosti prijemnika sunčeve energije sa cevima pravougaonog poprečnog preseka:

$$F' = \frac{1}{U_L} \left[\frac{1}{W_f \left[\frac{1}{U_L [(W_f - W_o) F + W_o]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{2(W_i + H_i)H_{fi}} \right]} \right] \quad (4)$$

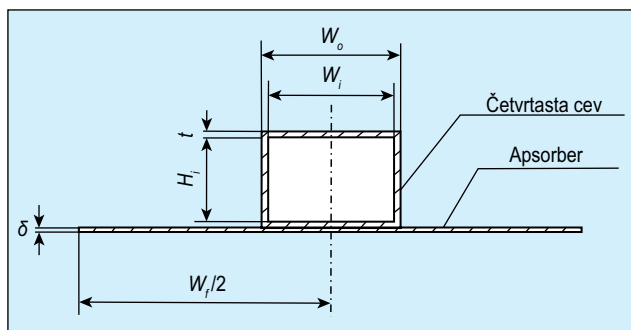
gde su:

W_i – unutrašnja širina pravougaone cevi [m] i
 W_o – spoljašnja širina pravougaone cevi [m].

Izraz za faktor efikasnosti rebra prijemnika sunčeve energije F kod prijemnika sunčeve energije sa cevima pravougaonog poprečnog preseka je preuzet iz literature [16] i glasi:

$$F = \frac{\tanh \left[\frac{M (W_f - W_o)}{2} \right]}{M \frac{W_f - W_o}{2}} \quad (5)$$

Veličina M za prijemnik sunčeve energije sa cevima pravougaonog poprečnog preseka se takođe računa po izrazu (3). Na slici 2 je izgled poprečnog preseka rebra prijemnika sunčeve energije sa cevima pravougaonog porečnog preseka.



Slika 2. Poprečni presek rebra sa pravougaonim cevima

Odnos unutrašnje širine pravougaone cevi W_i i unutrašnje visine H_i je 1,5 : 1. Ovaj odnos je čest kod poprečnih preseka pravougaonih cevi koje se koriste kod prijemnika sunčeve energije.

3. Metode rešavanja problema i razmatranje rezultata

Da bi se pronašla optimalna rešenja za oba slučaja, potrebno je da se utvrde ograničenja funkcije cilja. Kao funkcije cilja uzeti su izrazi (1) za prijemnik sunčeve energije sa cevima sa okruglim poprečnim presekom i (4) za prijemnik sunčeve energije sa cevima sa pravougaonim poprečnim presekom. Ograničenja za vrednosti koje figurišu u funkciji cilja preuzeta su po preporukama iz literatura [2–6, 15, 16] i iznesena su u tabeli 1.

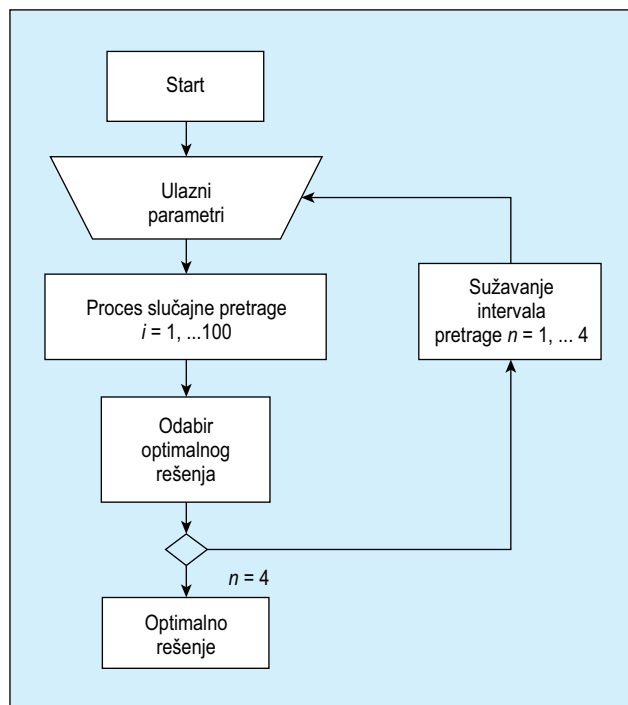
Tabela 1. Ulazni parametri

Ulazni parametri – Ograničenja promenljivih							
Pravougaone cevi				Kružne cevi			
Parametri rebara							
Oznaka	Ras-pon	Vred-nost	Jedi-nica	Oznaka	Ras-pon	Vred-nost	Jedi-nica
W_i	Gornji	0,250	[m]	W_i	Gornji	0,250	[m]
	Donji	0,120			Donji	0,120	
Dimenzije pravougaone cevi				Dimenzije kružne cevi			
W_i	Gornji	0,030	[m]	D_i	Gornji	0,0276	[m]
	Donji	0,005					
H_i	Gornji	0,020	[m]				
	Donji	0,0033					
Ulazni parametri – Ograničenja							
t	0,0015	[mm]	t	0,0015	[mm]		
δ	0,001	[mm]	δ	0,001	[mm]		
U_L	4	[W/m ² K]	U_L	4	[W/m ² K]		
H_{fi}	300	[W/m ² K]	H_{fi}	300	[W/m ² K]		
k	400	[W/mK]	k	400	[W/mK]		
Apsorber							
L	1.200	[m]	L	1.200	[m]		

Vrednosti označene žutom bojom su zavisne od zadavanja vrednosti W_i . Veličina unutrašnje visine pravougaone cevi, H_i , računa se iz prethodno pomenutog odnosa, dok se unutrašnji prečnik okrugle cevi računa izjednačavanjem njene površine sa površinom poprečnog preseka pravougaone cevi. Koeficijent toplotne provodnosti k zavisi od izbora materijala apsorbera i cevi. Dužina prijemnika sunčeve energije

se zadaje prema standardnim vrednostima za dužinu prijemnika sunčeve energije. Razvijeni metod slučajne pretrage bi mogao da radi i za bilo koje druge veličine unete u tabelu 1. Rešavanje je izvršeno u softverskom paketu MS Excel.

Optimalna rešenja za oba slučaja su određena metodom slučajne pretrage [17, 18] kroz 400 iteracija, da bi se pokrili svi mogući slučajevi promene promenljivih. Interval slučajne pretrage je sužen četiri puta kako bi se postigla najveća moguća preciznost rezultata. Sužavanje intervala slučajne pretrage izvršeno je posle svakih 100 iteracija. Blok-dijagram algoritma slučajne pretrage korišćen u ovom slučaju prikazan je na slici 3.



Slika 3. Blok-dijagram algoritma slučajne pretrage

Početni interval je dat ograničenjima promenljive u tabeli 1. Parametar W_i je pretražen između 120 mm i 250 mm. Parametar H_i je pretražen između 5 mm i 30 mm. Parametar D_i je simultano izračunat za sve iteracije iz površine poprečnog preseka pravougaone cevi pomoću jednačine:

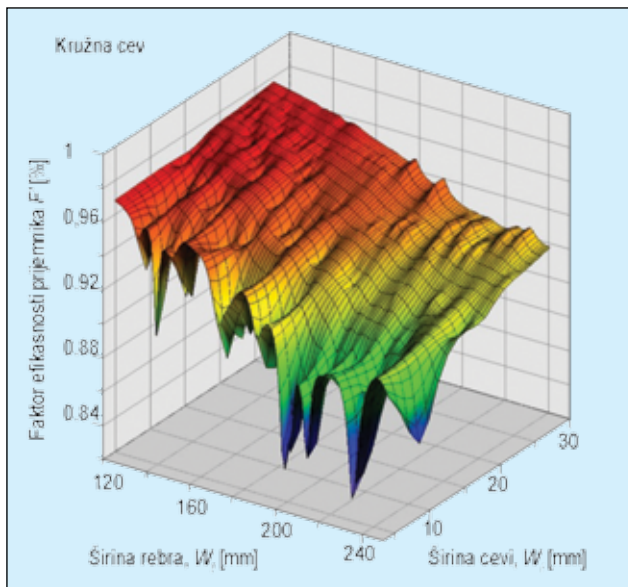
$$D_i = \sqrt{\frac{4W_iH_i}{\pi}} \quad (6)$$

Ostali parametri u funkciji cilja (3) i (5) postavljeni su kao konstante. Površina faktora efikasnosti je dobijena metodom slučajne pretrage za prijemnik sunčeve energije sa kružnim poprečnim presekom, prikazan na slici 4.

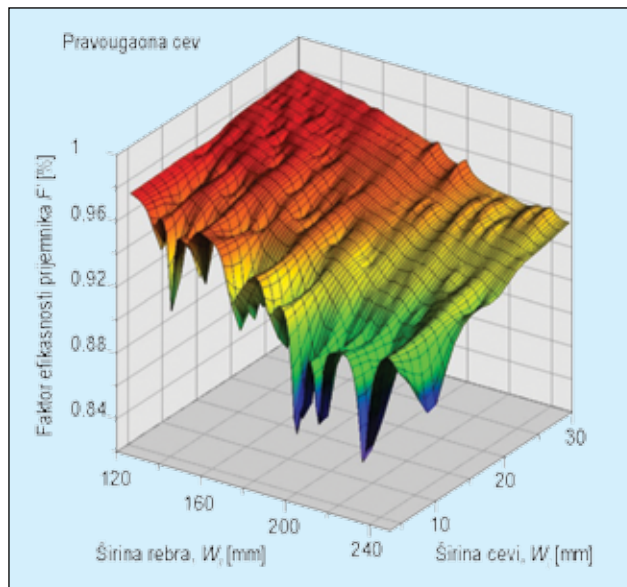
Na slici 4 se može uočiti da su prijemnici sunčeve energije sa kružnim poprečnim presekom imali optimalna rešenja gde je W_i imalo najmanju vrednost a D_i najveću. Faktor efikasnosti F' za optimalno rešenje je bio 0,977.

Površina faktora efikasnosti za prijemnike sunčeve energije sa pravougaonim cevima prikazana je na slici 5. Ta površina je slična površini za prijemnik sunčeve energije sa kružnim cevima, jer su oba poprečna preseka povezana izrazom (6). Optimalni rezultati prijemnika sunčeve energije sa pravougaonim cevima su malo veći od vrednosti za prijemnike sunčeve energije sa kružnim cevima. Faktor efikasnosti F' za optimalno rešenje u tom slučaju je 0,980.

Na slici 6 je uporedni dijagram funkcija cilja (3) i (5). Taj dijagram je za svih 400 iteracija.



Slika 4. Površina faktora efikasnosti za kružnu cev



Slika 5. Površina faktora efikasnosti za pravougaonu cev

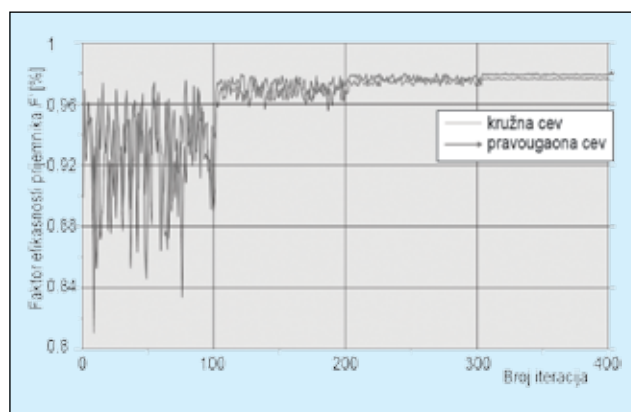
4. Konstrukcija prijemnika sunčeve energije na osnovu rezultata optimizacije

4.1. Optimalne dimenzije

Optimalne dimenzije za oba prijemnika sunčeve energije su pronađene. U svakoj iteraciji, faktor efikasnosti F je za cevi sa pravougaonim poprečnim presekom bio malo veći nego za cevi sa kružnim poprečnim presekom. Postoji mala prednost kod prijemnika sunčeve energije sa pravougaonim cevima u odnosu na prijemnik sunčeve energije sa kružnim cevima u pogledu faktora efikasnosti.

Po izračunavanju optimalnih dimenzija za oba slučaja, izvršeno je konstruisanje. Konstrukcija oba rešenja je rađena u softverskom paketu Autodesk Inventor. Postignuti rezultati optimizacije prijemnika sunčeve energije su direktno povezani sa konstrukcijom ploče apsorbera sa cevima. Optimalni geometrijski parametri su navedeni u tabeli 2.

Optimalno rešenje za ovaj problem je nađeno na početku intervala širine rebra W_f i na kraju intervala dimenzije cevi prijemnika sunčeve energije D_i i W_i za oba prijemnika sunčeve energije. Optimalni geometrijski parametri su dati u tabeli 2. U svakoj iteraciji, faktor efikasnosti F je bio malo veći za cevi sa pravougaonim poprečnim presekom nego za cevi kružnog poprečnog preseka.



Slika 6. Usporedni dijagram funkcija cilja

4.2. Automatizacija konstruisanja prijemnika sunčeve energije

Da bi se automatizovao proces konstruisanja prijemnika sunčeve energije, potrebno je prvo odrediti optimalan model prijemnika sunčeve energije, a potom definisati parametre CAD modela zasnovanog na dobijenim dimenzijama prijemnika sunčeve energije.

U praksi, prvo se generiše CAD konstrukcija za neoptimizovane dimenzije prijemnika sunčeve energije (date u tabeli 2), koja se potom automatski menja prema optimalnim vrednostima parametara.

Sa svakom promenom ulaznih parametara dobijaju se optimalne karakteristike, koje su direktno povezane sa CAD modelom i konačnom konstrukcijom.

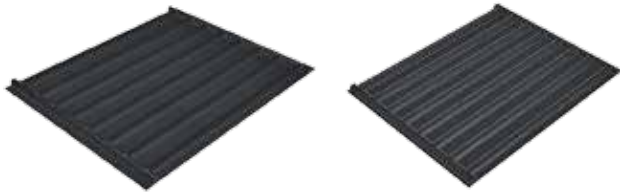
Po postizanju optimalnog rešenja za oba slučaja, izvedeno je njihovo konstruisanje. Konstrukcije oba rešenja su rađene u softverskom paketu Autodesk Inventor.

Postignuti rezultati za optimizaciju prijemnika sunčeve energije su direktno povezani sa modelom apsorberske ploče sa cevima. Slike 7a i 7b prikazuju optimalne CAD modele za ulazne dimenzije iz tabele 2.

Slika 7a prikazuje CAD model za slučaj kružnih cevi, dok slika 7b prikazuje model sa pravougaonim cevima.

Tabela 2. Optimalni geometrijski parametri

Prijemnik sunčeve energije sa kružnim cevima			Prijemnik sunčeve energije sa četvrtastim cevima		
Oznaka	Vrednost	Jedinica	Oznaka	Vrednost	Jedinica
W_f	0,120	m	W_f	0,120	m
D_i	0,0276	m	W_i	0,030	m
t	0,0015	m	H_i	0,020	m
δ	0,001	m	t	0,0015	m
N_f	8	–	δ	0,001	m
L	1,200	m	N_f	8	–
B	0,960	m	L	1,200	m
			B	0,960	m



Slika 7; a) apsorber sa kružnim cevima; b) apsorber sa pravougaonim cevima

5. Zaključak

U ovom radu su istraživane i optimizovane promene faktora efikasnosti kao funkcije geometrije cevi i širina rebra ravnog prijemnika sunčeve energije korišćenjem metode slučajne pretrage. Sve kombinacije promenljivih cevi sa kružnim i pravougaonim poprečnim presecima uzete su u obzir.

Najbolja solucija je postignuta kada je širina rebra prijemnika sunčeve energije W_f najmanja, sa najvećom unutrašnjom merom D_i i W_i . Prijemnik sunčeve energije sa pravougaonim cevima je imao faktor efikasnosti veći za 0,3% od prijemnika sunčeve energije sa kružnim poprečnim presekom. Posle ovoga je parametarski model primenjen u konstruisanju prijemnika sunčeve energije.

Dalje istraživanje ovog problema bi zahtevalo uzimanje u obzir gubitaka toplote kao i promene debljine zidova cevi i debljine ploča apsorbera. Potrebno je uzeti u obzir sve tipove materijala korišćene u konstruisanju prijemnika sunčeve energije. Da bi se dobila optimalna solucija ovog problema, potrebno je koristiti višekriterijumsku optimizaciju, uz eksperimentalnu verifikaciju rezultata.

Nomenklatura

C_b – provodnost veze između cevi i apsorbera [W/m K],
 D_i – unutrašnji prečnik kružne cevi [m],
 D_o – spoljašnji prečnik kružne cevi [m],
 F – standardna efikasnost rebra [-],
 F' – efikasnost prijemnika sunčeve energije [-],
 H_{fi} – koeficijent prenosa toplote u cevima [W/m² K],
 H_i – unutrašnja visina četvrtaste cevi [m],
 k – termička provodnost apsorbera [W/m K],
 M – vrednost definisana u jednačini (3),
 t – debljina zida cevi [m],
 U_L – koeficijent ukupnih gubitaka [W/m² K],
 W_f – širina rebra [m],
 W_i – unutrašnja širina četvrtaste cevi [m],
 W_o – spoljašnja širina četvrtaste cevi [m],
 δ – debljina apsorbera [m].

Zahvalnost

Ovaj rad je rezultat dva projekta: (1) Projekta TR33015 Ministarstva prosvete nauke i tehnološkog razvoja, i (2) Projekta III 42006 – Integralna i Interdisciplinarna istraživanja Republike Srbije. Naziv prvog projekta je: "Istraživanje i razvoj srpske neto-nulte energetske kuće", a drugog: "Istraživanje i razvoj energetske i ekološke visokofrekventnih sistema poligeneracije zasnovanih na obnovljivim izvorima energije". Zahvaljujemo se Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja na finansijskoj podršci tokom ovih istraživanja.

6. Literatura

- [1] Sarhaddi, Farahat, S., H. F. Ajam, *Exergetic optimization of flat-plate solar collectors*, Renewable Energy, (2009), Vol. 34, pp. 1169–1174.
- [2] Badache, Messaoud, Stéphane Hallé, Daniel Rousse, *A full 3^d factorial experimental design for efficiency*

optimization of an unglazed transpired solar collector prototype, Solar Energy, Volume 86, Issue 9, September 2012, Pages 2802–2810, ISSN 0038-092X.

- [3] Vargas, J. V. C., J. C. Ordonez, E. Dilay, J. A. R. Parise, *Modeling, simulation and optimization of a solar collector driven water heating and absorption cooling plant*, Solar Energy, Volume 83, Issue 8, August 2009, Pages 1232–1244, ISSN 0038-092X.
- [4] Szargut, J., W. Stanek, *Thermo-ecological optimization of a solar collector*, Energy, Volume 32, Issue 4, April 2007, Pages 584–590, ISSN 0360-5442.
- [5] Luminosu, I., L. Fara, *Determination of the optimal operation mode of a flat solar collector by exergetic analysis and numerical simulation*, Energy, Volume 30, Issue 5, April 2005, Pages 731–747, ISSN 0360-5442.
- [6] Ghoneim, A. A., *Performance optimization of solar collector equipped with different arrangements of square-celled honeycomb*, International Journal of Thermal Sciences, Volume 44, Issue 1, January 2005, Pages 95–105, ISSN 1290-0729.
- [7] Aghbalou, F., F. Badia, J. Illa, *Exergetic optimization of solar collector and thermal energy storage system*, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 49, Issues 7–8, April 2006, Pages 1255–1263, ISSN 0017-9310.
- [8] Kalogirou, Soteris A., *Optimization of solar systems using artificial neural-networks and genetic algorithms*, Applied Energy, Volume 77, Issue 4, April 2004, Pages 383–405, ISSN 0306-2619.
- [9] Subiantoro, Alison, Kim Tiow Ooi, *Analytical models for the computation and optimization of single and double glazing flat plate solar collectors with normal and small air gap spacing*, Applied Energy, Volume 104, April 2013, Pages 392–399, ISSN 0306-2619.
- [10] Kundu, B., *Analytic method for thermal performance and optimization of an absorber plate fin having variable thermal conductivity and overall loss coefficient*, Applied Energy, Volume 87, Issue 7, July 2010, Pages 2243–2255, ISSN 0306-2619.
- [11] Morawietz, Katharina, Michael Hermann, *Integrated Development and Modeling of Heat Pipe Solar Collectors*, Energy Procedia, Volume 48, 2014, Pages 157–162, ISSN 1876-6102.
- [12] Kalogirou, S. A., *Solar thermal collectors and applications*, Progress in Energy and Combustion Science, (2004), Vol. 30, pp. 231–295.
- [13] Iordanou, G., Apostolidou, E., *Development of a Mathematical Lumped Parameters Model for the Heat Transfer Performance of a Solar Collector*, Journal of Engineering Science and Technology Review, (2013), Vol. 6, No. 3, pp. 5–9.
- [14] Ong, K. S., *A Finite-Difference Method to Evaluate the Thermal Performance of a Solar Water Heater*, Solar Energy, Vol. 16, No. 3–4 (1974) pp. 137–147.
- [15] Kang, M. C., Y. H. Kang, S. H. Lim, W. Chun, *Numerical analysis on the thermal performance of a roof-integrated flat-plate solar collector assembly*, (2006), Heat and Mass Transfer, Vol. 33, pp. 976–984.
- [16] Ho, C. D., T. C. Chen, C. J. Tsai, *Experimental and theoretical studies of recyclic flat-plate solar water heaters equipped with rectangle conduits*, (2010), Renewable Energy, Vol. 35, pp. 2279–2287.
- [17] Zanakis, S. H., J. R. Evans, A. A. Vazacopoulos, *Heuristic methods and applications: Categorized survey*, European Journal of Operational Research, Vol. 43, pp. 88–110, 1989.
- [18] Rao, S. S., *Engineering optimization theory and practice*, John Wiley and sons, Hoboken, New Jersey pp. 309–314, 2009.