

# Optimizacija geometrijskih veličina toplotnih prijemnika sunčeve energije heurističkim optimizacionim metodama

## Optimization of solar collector geometric parameters using heuristic optimization methods

Nenad KOSTIĆ, Miloš MATEJIĆ\*, Nenad PETROVIĆ, Mirko BLAGOJEVIĆ i Nenad MARJANOVIĆ,  
Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Kragujevac

Ključne reči:  
prijemnici sunčeve energije (PSE);  
efikasnost; metoda slučajne pretrage;  
teaching-learning based optimization

Ovaj rad predstavlja nastavak istraživanja grupe autora u oblasti optimizacije efikasnosti toplotnih prijemnika sunčeve energije (u daljem tekstu: PSE). Dosadašnji rad se zasnivao na metodi optimizacije poznatoj kao metoda slučajne pretrage, kao jedne od najstarijih heurističkih optimizacionih metoda. U radu su rezultati prethodnih istraživanja upoređeni sa rezultatima dobijenim novom metodom optimizacije koja se naziva teaching-learning based optimization – TLBO. Predstavljen je način funkcionisanja ove metode, kao njena primena na optimizaciju toplotnih PSE-a. Za potrebe ovog rada unapređen je dosadašnji matematički model, kako bi u optimizaciju bio uključen što veći broj promenljivih koje imaju uticaja kako na proizvodnju tako i na cenu PSE-a. U obzir su uzeti prijemnici sa cevima kvadratnog poprečnog preseka, kao i prijemnici sa cevima okruglog poprečnog preseka. Izvedeni su zaključci i data je uporedna analiza rezultata dobijenih metodom slučajne pretrage i metodom TLBO.

Key words:  
solar collectors; utilization factor;  
random search optimization method;  
teaching-learning based optimization

This paper is a continuation of the research conducted by the group of authors in the field of solar collector efficiency optimization. The present paper is based on a method known as the random search optimization, which is one of the oldest heuristic optimization methods. In this paper, the results of the previous research are compared to the results of a new optimization method called Teaching-Learning based optimization (TLBO). The functioning of this method and its application on solar collector optimization are presented. For the TLBO method, an extended mathematical model is used in order to include as many variables as possible that affect both the production and costs of solar collectors. This research takes into consideration the collectors with square cross section pipes and the collectors with round cross section pipes. Conclusions and a comparative analysis of the results obtained by the random search method and TLBO are given.

## 1. Uvod

Veoma zastupljenu oblast istraživanja u poslednje vreme čini efikasnost korišćenja sunčeve energije. Korišćenje energije sunčevog zračenja moguće je njenim pretvaranjem u toplotnu, električnu ili hemijsku energiju. Zbog isplativosti eksploatacije sunčevog zračenja, najmasovnija je primena PSE-a za grejanje vode. PSE-i su uređaji koji apsorpcijom sunčevog zračenja, energiju zračenja pretvaraju u toplotnu energiju fluida koji struji kroz apsorber prijemnika.

U zavisnosti od željene temperature radnog fluida u primeni su ravni PSE-i, koji mogu da postignu temperaturu preko 100 °C, ili prijemnici sa koncentracijom sunčevog zračenja, koji mogu da postignu veoma visoke temperature, čak i preko 3000 °C.

Razvoj konstrukcija i tehnologija izrade ravnih PSE-a, izvodi se u cilju povećanja njihove efikasnosti i smanjenja cene njihove proizvodnje predstavlja veoma atraktivnu istraživačku temu. Pozitivne efekte u razvoju ravnih PSE-a moguće je postići optimizacijom njihovih geometrijskih veličina na šta je i orijentisano ovo istraživanje.

Farhat i ostali [1] vršili su optimizaciju PSE-a kako bi poboljšali njihove karakteristike. Njihovim istraživanjem obuhvaćen je veliki broj parametara: površina apsorbera, gabaritne dimenzije prijemnika, prečnici cevi okruglih poprečnih preseka, ulazne i izlazne temperature, gubici toplote i mnogi drugi. Autori u radu [2] su zaključili kako da izaberu optimalne karakteristike da bi povećali korisno dejstvo PSE-a. U radu [3] Vargas i ostali su izveli maksimizaciju performansi PSE-a prema njihovoj primeni u realnom vremenu. Autori u radu [4] su optimizovali PSE sa aspekta termoeкологије. Optimizaciju tipova prijemnika prema klimatskim uslovima uradili su autori rada [5]. U radu [6] autori su istraživali optimalne karakteristike PSE-a sa stanovišta unutrašnjih elemenata prijemnika sa kvadratnim ćelijama postavljenim u formaciji saća. Ovo istraživanje uključuje analogiju sa prirodnim rešenjima kao alternativu razvoja PSE-a.

Postoji veliki broj heurističkih metoda optimizacije koje se danas koriste za rešavanje inženjerskih problema. Dominantne su Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), Ant Colony Optimization (ACO), Teaching Learning Based Optimization (TLBO) i mnoge druge. TLBO predstavlja savremenu heurističku metodu prvenstveno razvijenu za rešavanje inženjerskih problema. Algoritam je razvijen 2011. godine [7] i sadrži dve osnovne faze, teacher phase i learner

\* E-mail: mmatejic@kg.ac.rs

phase. Algoritam je testiran na mnogobrojnim problemima [8, 9], veoma zahtevnim za optimizaciju, čime je i verifikovan rad ove metode. U ovom radu su prikazane prednosti korišćenja metode TLBO nad metodom slučajne pretrage.

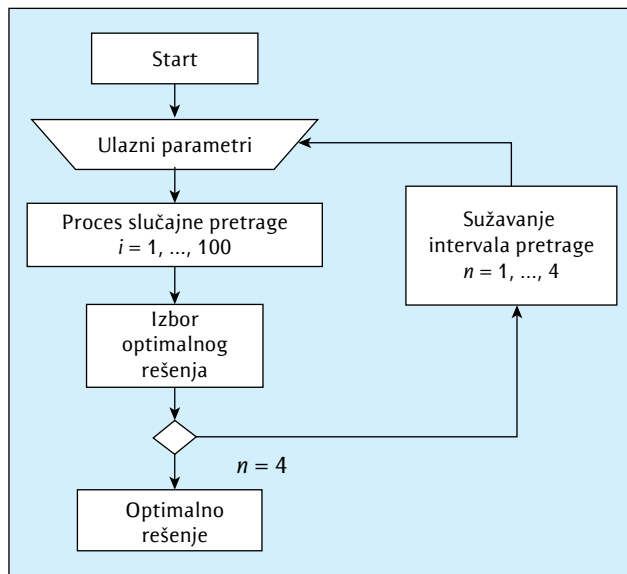
## 2. Heurističke metode optimizacije

### 2.1. Metoda slučajne pretrage

Metod slučajne pretrage spada u najstarije heurističke metode optimizacije. Metoda se zasniva na sužavanju zadatog intervala kada funkcija cilja dostigne ekstremnu vrednost. U sledećoj petlji se traži ekstremna vrednost u suženom intervalu pretrage. Petlja se ponavlja dok se ne dobije zadovoljavajuće rešenje.

Ova metoda može teorijski da radi sa neograničenim brojem promenljivih i sa neograničenim brojem ograničenja. Takođe, metoda slučajne pretrage može da traži i minimume i maksimume funkcije.

Za potrebe istraživanja razvijen je algoritam koji može da radi i za bilo koje zadate veličine intervala [10]. Rešavanje je izvedeno u softverskom paketu MS Excel. Blok-dijagram rada algoritma slučajne pretrage dat je na slici 1.



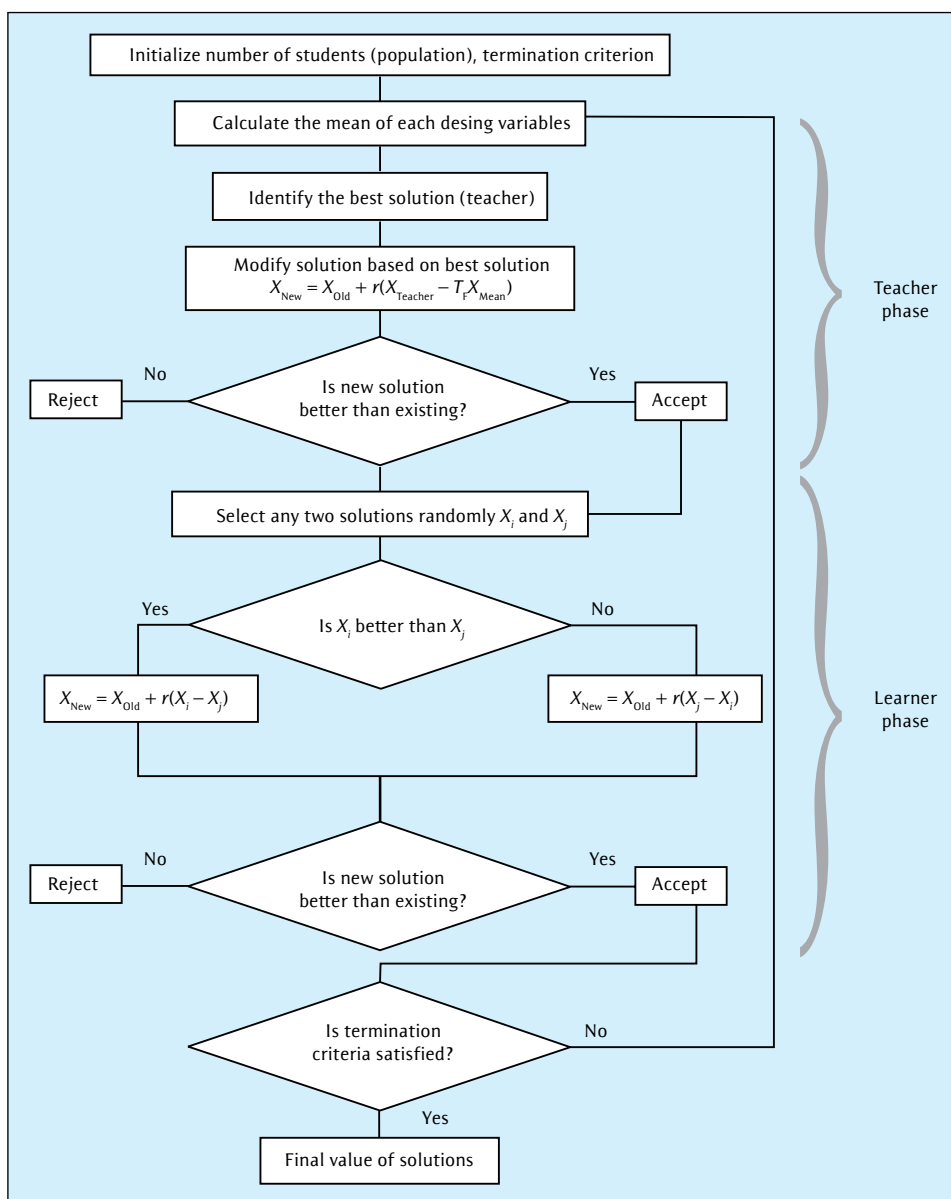
Slika 1. Blok-dijagram algoritma slučajne pretrage

Početak rada algoritma se sastoji od odnosa promenljivih i uvođenja ograničenja. Sa uvođenjem promenljivih zadaje se i interval pretrage. Posle toga se procesira metoda, pa se vrši odabir optimalnog rešenja u tom interval, da bi se na kraju petlje suzio interval. Sužavanje interval se odvija u četiri iteracije da bi se dobila zadovoljavajuća preciznost rešenja.

### 2.2. Metoda teaching-learning based optimization

Algoritam čine dve ključne faze: teacher i learner faze. Na početku rada algoritma definiše se broj studenata, što predstavlja ukupan broj potencijalnih rešenja. Iz ove grupe moguće je izdvojiti najbolju vrednost koja će postati učitelj. Najbolje rešenje u iteraciji predstavlja učitelja za tu iteraciju. Učitelja je moguće označiti kao  $X_{Teacher}$  i ova vrednost je važna za učiteljsku fazu. Pored toga potrebno je odrediti srednju vrednost  $X_{Mean}$  za ukupno rešenje. Srednja vrednost predstavlja novi skup promenljivih, gde svaka promenljiva ima srednju vrednost u odnosu na ukupan broj studenata. Struktura algoritma predstavljena je na slici 2.

**Teacher faza.** Prva faza algoritma je teacher faza koja direktno utiče na konvergenciju. Svaki učitelj teži da svojim uticajem poveća kvalitet učenja studenata. Novu iteracionu vrednost moguće je odrediti prema sledećem izrazu.



Slika 2. Struktura teaching-learning-based optimizacije [7]

$$X_{\text{New}} = X_{\text{Old}} + r_i(X_{\text{Teacher}} - T_F X_{\text{Mean}}) \quad (1)$$

Nova vrednost u ovoj fazi  $X_{\text{New}}$  biće prihvaćena isključivo ako je bolja od prethodne  $X_{\text{Old}}$  i ako zadovoljava sva ograničenja. Slučajna vrednost (random)  $r$  može imati kvantitativnu vrednost u intervalu od 0 do 1. Slučajna vrednost  $T_F$  može biti samo ili 1 ili 2, zavisno od iteracije. U svakoj iteraciji ponavlja se ova faza algoritma i na taj način rešenje konvergira optimumu. Pored toga za konvergenciju je važna i learner faza algoritma.

**Learner faza.** Osnovni princip rada ove faze zasnovan je na interakciji među studentima. U slučaju kada je  $X_i > X_j$  gde su ovo vrednosti dva slučajno odabrana studenta algoritam koristi sledeću jednačinu.

$$X_{\text{New}} = X_{\text{Old}} + r(X_i - X_j) \quad (2)$$

Drugi slučaj je kada je  $X_i < X_j$  i tada algoritam koristi sledeći izraz:

$$X_{\text{New}} = X_{\text{Old}} + r(X_j - X_i) \quad (3)$$

Slučajna vrednost,  $r$ , je u intervalu od 0 do 1, a nova vrednost se usvaja isključivo ako ima bolju vrednost od prethodne.

Prednost algoritma TLBO je u tome što su tvorci ovog algoritma prepoznali savremene tendencije da se smanji broj parametara za rad algoritma i da je njime lako upravljati. Pored toga ima izuzetne konvergencione karakteristike i veliku brzinu rada, zbog čega je pogodan za rešavanje veoma kompleksnih inženjerskih problema.

### 3. Uporedni rezultati metode slučajne pretrage i metode TLBO

Za potrebe ovog rada grupa autora je koristila matematički model, intervale parametara, promenljive i konstante iz svojih dosadašnjih istraživanja [10]. Sprovedena je optimizacija stepena korisnog dejstva metodom TLBO na modelima ravnih solarnih prijemnika sa cevima kružnog poprečnog preseka, i sa cevima pravougaonog poprečnog preseka. Za razliku od prethodnih istraživanja ove grupe autora, iz analize je izopšten model ravnog PSE-a sa cevima kvadratnog poprečnog preseka. Izopštavanje ovog tipa prijemnika iz istraživanja je opravdano time što je on davao najlošije rezultate stepena korisnog dejstva.

Za optimizaciju PSE-a sa cevima pravougaonog poprečnog preseka, korišćena je funkcija cilja:

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

gde su  $C_b$  – provodnost veze između kružne cevi i apsorbera [W/mK],  $W_i$  – unutrašnja širina cevi [m],  $W_o$  – spoljašnja širina cevi [m],  $H_i$  – unutrašnja visina cevi [m],  $F$  – standardna efikasnost rebra [-],  $F'$  – faktor efikasnosti PSE-a [-],  $H_{fi}$  – koeficijent provodnosti toplote u rebrima [W/m<sup>2</sup>K],  $U_L$  – koeficijent ukupnih gubitaka toplote [W/m<sup>2</sup>K] i  $W_f$  – širina rebra [m].

Za optimizaciju PSE-a sa cevima kružnog poprečnog preseka, korišćena je funkcija cilja:

$$F' = \frac{1}{U_L} \frac{1}{W_f \left[ \frac{1}{U_L[(W_f - D_o)F + D_o]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i H_{fi}} \right]} \quad (5)$$

gde su  $D_i$  i  $D_o$  unutrašnji odnosno spoljašnji prečnik cevi [m].

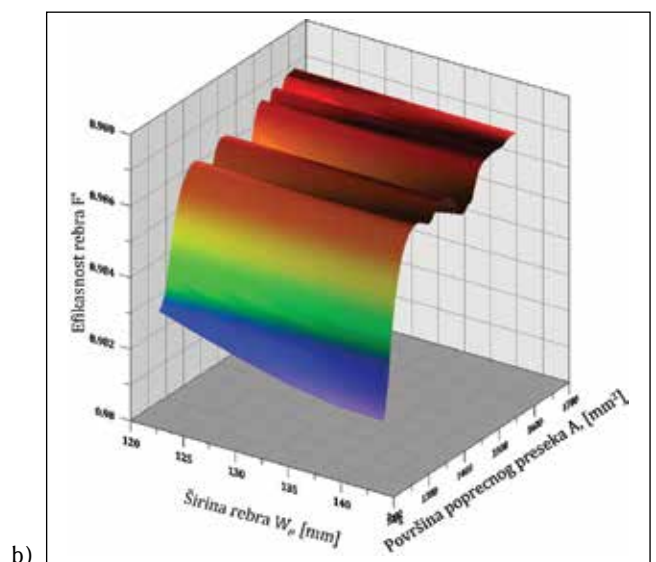
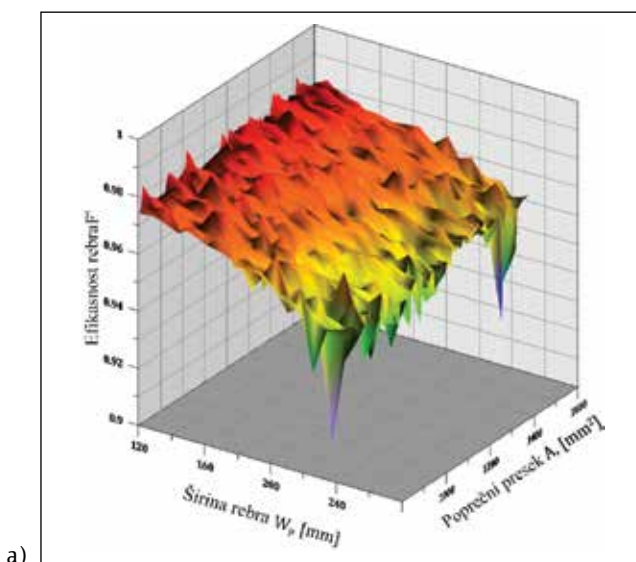
Početni interval je dat ograničenjima promenljivih prema preporukama [2–6]. Parametar  $W_f$  je pretražen između 120 i 250 mm. Parametar  $W_i$  je pretražen između 30 i 50 mm. Parametar  $D_i$  je simultano izračunat za sve iteracije iz površine poprečnog preseka pravougaone cevi jednačinom:

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

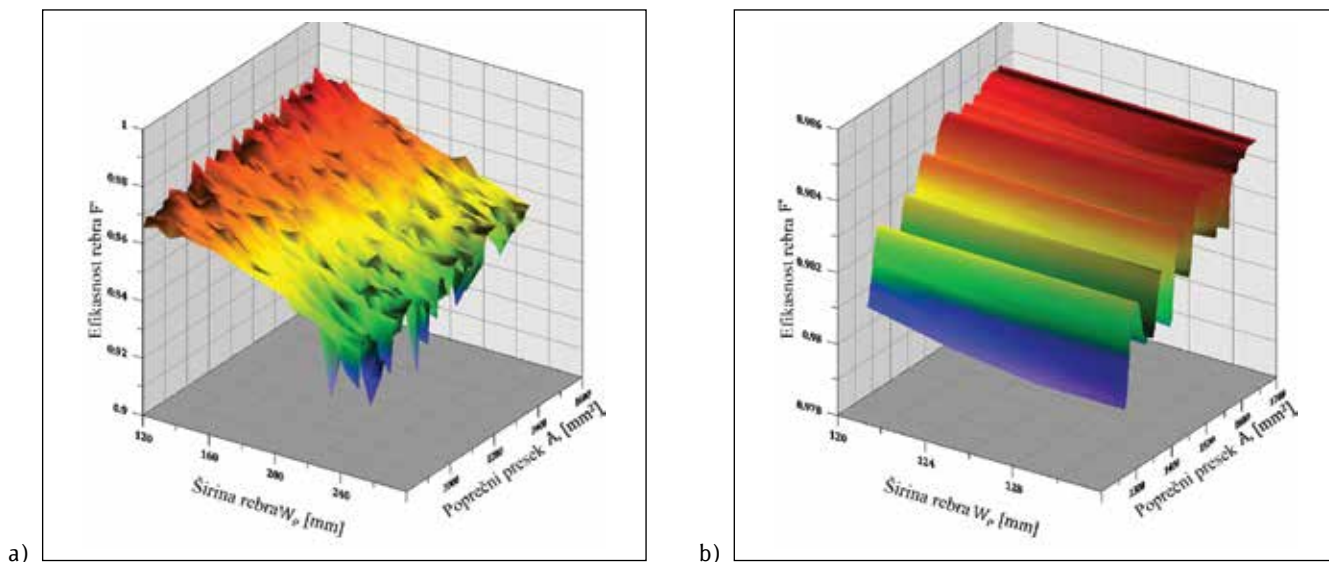
Ostali parametri u funkciji cilja (5) i (6), postavljeni su kao konstante. Dobijeni uporedni rezultati optimizacije metodom slučajne pretrage i metodom TLBO za cev pravougaonog poprečnog preseka predstavljeni su na slici 3.

Dobijeni uporedni rezultati optimizacije metodom slučajne pretrage i metodom TLBO za cev kružnog poprečnog preseka predstavljeni su na slici 4.

Na slikama 3 i 4 može se primetiti da optimizaciona metoda TLBO ima daleko bržu konvergenciju od metode slučajne pretrage.



Slika 3. Rezultati optimizacije za cev pravougaonog poprečnog preseka; a) metodom slučajne pretrage; b) metodom TLBO



Slika 4. Rezultati optimizacije za cev kružnog poprečnog preseka; a) metodom slučajne pretrage; b) metodom TLBO

## 4. Zaključak

U istraživanju je izvedena optimizacija promene faktora efikasnosti kao funkcije geometrije cevi i širine rebara ravnog PSE-a. U odnosu na dosadašnja istraživanja ove grupe autora, iz optimizacije je izopšten tip PSE-a sa cevima kvadratnog poprečnog preseka. Izopštavanje ovog tipa prijemnika je izvedeno zbog toga što je u prethodnim istraživanjima dao lošije rezultate od prijemnika sa cevima pravougaonog i kružnog poprečnog preseka.

Optimizacija je izvedena metodom TLBO i upoređena sa prethodnom optimizacijom izvedenom metodom slučajne pretrage.

Najbolja solucija je postignuta kada širina rebara prijemnika  $W_f$  teži ka donjoj granici zadatog intervala sa najvećim unutrašnjim merama  $D_i$  i  $W_i$ . Kod optimizacije metodom slučajne pretrage, da se videti da prijemnik sa cevima pravougaonog poprečnog preseka ima veći faktor efikasnosti od prijemnika sa cevima kružnog poprečnog preseka.

Prilikom optimizacije metodom TLBO prijemnik sa cevima pravougaonog poprečnog preseka takođe ima veći faktor, ali je razlika znatno manja nego kod metode slučajne pretrage. Na priloženim slikama može se primetiti da metoda TLBO ima daleko bržu konvergenciju ka optimalnom rešenju.

Dalje istraživanje ovog problema bi zahtevalo uzimanje u obzir gubitaka toplote kao i promene debljine zidova cevi. Potrebno je uzeti u obzir sve tipove materijala korišćene u izradi PSE-a.

Da bi se postigla optimalna solucija ovog problema, potrebno je ovaj problem prilagoditi višekriterijskoj optimizaciji, uz eksperimentalnu verifikaciju rezultata.

## Zahvalnost

Ovaj rad je rezultat dva projekta: projekta TR33015 Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja, i projekta III 42006 Integralnih i interdisciplinarnih istraživanja Republike Srbije.

Prvi projekat se zove „Istraživanje i razvoj srpske neto nulte energetske kuće“, a drugi „Istraživanje i razvoj energetski i ekološki visokofrekventnih sistema poligeneracije zasnovanih na obnovljivim izvorima energije“.

Zahvaljujemo se Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja na finansijskoj podršci tokom ovih istraživanja.

## 5. Literatura

- [1] Farahat, S., F. Sarhaddi, H. Ajam, *Exergetic optimization of flat-plate solar collectors*, Renewable Energy, (2009), Vol. 34, pp. 1169–1174.
- [2] Badache, M., S. Hallé, D. Rousse, *A full  $3^4$  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] Rao, R. V., V. J. Savsani, D. P. Vakharia, *Teaching-learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems*, Computer-Aided Design, Volume 43, December 2010, Pages 303–315, ISSN 0010-4485.
- [8] Rao, R. V., V. Patel, *An improved teaching-learning-based optimization algorithm for solving unconstrained optimization problems*, Scientia Iranica, Volume 20, Issue 3, October 2012, Pages 710–720, ISSN 1026-3098.
- [9] Rao, R. V., V. J. Savsani, D. P. Vakharia, *Teaching-Learning-Based Optimization: An optimization method for continuous non-linear large scale problems*, Information Sciences, Volume 183, August 2011, Pages 1–15, ISSN 0020-0255.
- [10] Matejić, M., M. Bojić, N. Kostić, N. Petrović, N. Marjanović, M. Blagojević, *Određivanje geometrijskih parametara za optimalno iskorišćenje prijemnika sunčeve energije*, Klimatizacija, grejanje i hlađenje – KGH, Vol. 44, No. 3, Septembar 2015, str. 25–29, ISSN 0350-1426.