

UPOTREBA SOLARNE ENERGIJE ZA RAD KOMPRESORSKIH TOPLOTNIH PUMPI

SOLAR ENERGY USE FOR COMPRESSION HEAT PUMP OPERATION

M. BOJIĆ i N. NIKOLIĆ,
Mašinski fakultet, Kragujevac

Oko 50% energije u Srbiji potroši se u sektoru zgradarstva, od čega najveći deo za grejanje stambenih i poslovnih objekata. Ograničenja u pogledu emisija gasova staklene bašte definisana Protokolom iz Kjota nameću našoj zemlji obavezu da smanji emisije ovih gasova, a jedno od rešenja je što veća primena obnovljivih izvora energije. S tim u vezi u ovom radu je izvršena simulacija rada sistema grejanja, upotrebom softvera EnergyPlus, koji obuhvata toplotnu pumpu tipa voda-voda, podzemni razmenjivač toplote, sistem podnog grejanja i solarne fotonaponske ćelije koje posredstvom solarne energije proizvode električnu energiju upotrebljenu za pogon kompresorske toplotne pumpe. Analizom je ukazano na energetska potrošnja i uštedu ovog sistema grejanja kao i njihov uticaj na životnu sredinu.

Approximately 50% of energy in Serbia is consumed in the building sector, whereof the major part accounts for heating residential and non-residential buildings. Restrictions regarding the greenhouse gas emissions defined by the Kyoto Protocol obligate our country to reduce the emission of these gases, and one of the solutions lies in the increasing use of renewable energy sources. This paper deals with a simulation of the heating system by using EnergyPlus software, including a water-water heat pump, underground heat exchanger, floor heating system and solar photovoltaic cells which use solar energy for generation of electricity for driving the compression heat pump. The analysis has pointed out energy consumption and saving of this heating system as well as its effects on the environment.

Ključne reči: toplotna pumpa; fotonaponski sistem; potrošnja energije

Key words: heat pump; photovoltaic system; energy consumption

1. Uvod

Srbija je 24. septembra 2007. godine prihvatila Protokol iz Kjota kojim se reguliše smanjenje ispuštanja gasova koji izazivaju efekat staklene bašte. Najveći deo

električne energije (oko 72% [1]) u Srbiji dobija se sagorevanjem fosilnih goriva, uglja, prirodnog gasa ili nafte, dok se preostali deo proizvodi u hidroelektranama. Taj podatak ukazuje na to koliki negativan uticaj po životnu sredinu imaju postrojenja u kojima sagorevaju fosilna goriva u cilju dobijanja električne energije. U sektoru zgradarstva u Srbiji potroši se više od 50% energije od ukupno utrošene energije. Prema podacima iz energetskeg bilansa Republike Srbije za 2008. godinu, učešće domaćinstava u ukupnoj potrošnji električne energije iznosi 56% [1].

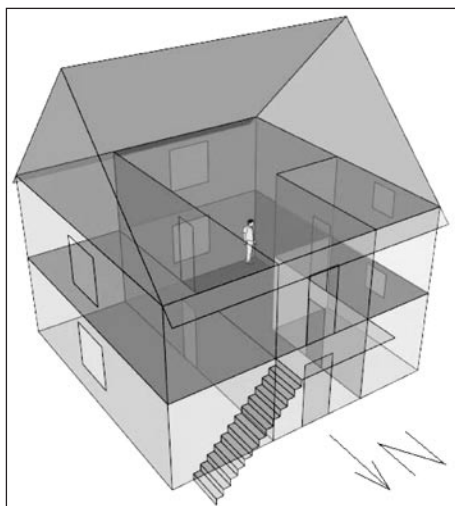
S druge strane, namera naše zemlje da postane članica Evropske unije nameće nam i obavezu ispunjavanja zahteva koji se, između ostalog, odnose na efikasniju energetske potrošnju i njenu redukciju za 20% do 2020. godine kao i na to da do 2020. godine 20% ukupne energije u EU treba da potiče od obnovljivih izvora energije [2].

S tim u vezi je u ovom radu izvršena analiza korišćenja električne energije dobijene iz sunčeve energije posredstvom fotonaponskih modula za pogon toplotne pumpe (TP) kao glavne komponente izabranog sistema vodenog grejanja jedne stambene kuće sa dva nivoa u Kragujevcu. Sistem grejanja obuhvata i vertikalni podzemni razmenjivač toplote kao i podna grejna tela. Ovim radom smo hteli da ukažemo na ekonomsku opravdanost upotrebe fotonaponskog sistema za grejanje stambene kuće.

2. Softver EnergyPlus

Da bi se simuliralo korišćenje energije u stambenom objektu, upotrebljen je softver EnergyPlus, verzija 3.0. To je veoma koristan alat za modeliranje energetske-ekološkog ponašanja zgrada. Njime je moguće približiti realne uslove korišćenja zgrade od strane ljudi i realne uslove termičkog opterećenja zgrade, definisanjem kompleksnih rasporeda grejanja i hlađenja, korišćenja osvetljenja, unutrašnjih uređaja ili sistema, kao i prisutnosti ljudi u zgradi. Uticaj sunčevog zračenja, osenčenja od strane

okolnih objekata ili infiltracije takođe je moguće, posredstvom ovog softvera, uzeti u obzir [3]. Korišćenjem softvera EnergyPlus moguće je sprovesti simulaciju energetskeg ponašanja zgrade za određeni i željeni vremenski period. Simulacija je sprovedena za grejnu sezonu u periodu od 15.10. do 15.4. Rezultati simulacije su dobijani i prikazivani svakih 15 minuta.



Slika 1. Izometrijski izgled analizirane kuće sa prostorijama (zidovi kuće su predstavljeni prozirno da bi se sagledao raspored prostorija unutar kuće)

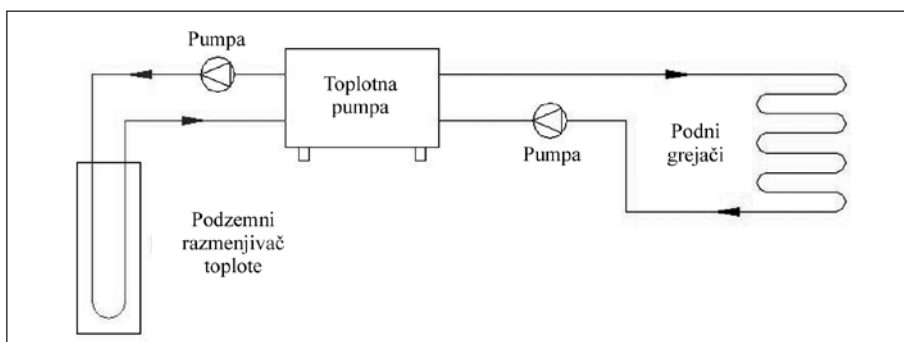
3. Termički opis kuće

Analizirana stambena kuća ukupne površine 130,6 m², prikazana na sl. 1, ima dva identična nivoa za stanovanje. Oba nivoa imaju po tri prostorije, i to jednu dnevnu sobu, spavaću sobu i kupatilo. Pretpostavljeno je da su oba nivoa zauzeti od strane jedne četvoročlane porodice. Vrednosti površina podova navedenih prostorija prikazane su u tabeli 1. Is-

pitivana stambena kuća je izgrađena na mestu gde u blizini nema drugih objekata. Vrsta korišćenog materijala i njihove karakteristike u okviru samih slojeva površina kuće (zida, plafona, poda, vrata, prozora) data je u [3a]. Raspored prisustva ljudi, unutrašnjih toplotnih dobitaka i osvetljenja naveden je u tabelama 1–3. Tabela 1 sadrži i vrednosti infiltracije.

Tabela 1. Površine prostorija, raspored prisustva ljudi na prvom i drugom nivou analizirane kuće i pretpostavljene vrednosti infiltracije

Prostorije	m ²	7–9 h	9–16 h	16–22 h	22–7 h	Infiltracija, ach ⁻¹
Dnevna soba	32,48	2	0	4	0	1,25
Spavaća soba	24	0	0	0	4	0,75
Kupatilo	8,8	2	0	0	0	0,75



Slika 2. Izučavani sistem grejanja

Tabela 2. Raspored rada električnih uređaja male snage u W na prvom i drugom nivou analizirane kuće

Prostorije	Dnevna soba	Spavaća soba	Kupatilo
08.00–09.00 h	150	0	0
09.00–14.00 h	75	0	0
14.00–18.00 h	0	0	0
18.00–19.00 h	150	0	0
19.00–22.00 h	0	0	0
22.00–23.00 h	150	100	0
23.00–24.00 h	0	100	0
24.00–08.00 h	0	0	300

3. Sistem grejanja

Izučavani sistem koji obezbeđuje grejanje prostorija opisane kuće sastoji se od kompresorske TP tipa voda–voda kao glavne komponente sistema, vertikalnih pod-

zemnih razmenjivača toplote u vidu U-cevi, podnih grejača kao i pumpi promenljivog protoka za transport vode sa kondenzatorske i isparivačke strane grejanja (sl. 2). Fotonaponski sistem je takođe sastavni deo ovog sistema grejanja jer je povezan sa kompresorom TP. Princip funkcionisanja ovog sistema grejanja bi se sastojao u tome što bi grejni fluid, u ovom slučaju voda, nakon predaje toplote prostorijama koje se greju posredstvom podnih grejača, bio usmeren ka kondenzatorskom delu toplotne pumpe gde bi se ponovo zagrevao na potrebnu temperaturu i ponovo bio poslat ka podnim grejačima. S druge strane, isparivački deo TP bi bio „pogonjen“ razmenom toplote sa vodom koja cirkuliše između isparivačkog dela toplotne pumpe i vertikalnih podzemnih razmenjivača toplote. Sistem grejanja bi radio tokom grejne sezone (od 15.10. do 15.4) svakog dana od 6 h do 22 h.

Tabela 3. Raspored rada osvetljenja u W na prvom i drugom nivou analizirane kuće

Prostorije	0 h–18 h	18 h–19 h	19 h–22 h	22 h–23 h	23 h–24 h
Dnevna soba	0	200	200	200	0
Spavaća soba	0	0	0	120	120
Kupatilo	0	100	0	0	0

Tabela 4. Vrednosti parametara izabrane toplotne pumpe (TP) tipa voda–voda [4]

Parametri		Parametri	
Nominalni koeficijent učinka TP	3,5	Nominalni kapacitet grejanja TP, W	50000
Koeficijent prenosa toplote sa isparivačke strane grejanja, W/K*	3998	Prebrisana zapremina cilindra od strane klipa kompresora, m ³ /s	0,0125
Minimalni odnos trenutnog opterećenja i kapaciteta grejanja	0	Kompresorski faktor prebrisavanja zapremine	0,055
Maksimalni odnos trenutnog opterećenja i kapaciteta grejanja	1	Pad pritiska prilikom usisavanja i istiskivanja u kompresoru, Pa	92156,2
Optimalni odnos trenutnog opterećenja i kapaciteta grejanja	1	Parametar pregrevanja na izlazu iz isparivača, °C	4.891
Protok vode na kondenzatorskoj strani grejanja, m ³ /s	0,0033	Parametar mehaničkih i električnih gubitaka u kompresoru, W	2803,9
Zapreminski protok vode na isparivačkoj strani grejanja, m ³ /s	0,0033	Parametar faktora elektromehaničkih gubitaka	0,699
Koeficijent prenosa toplote sa kondenzatorske strane grejanja, W/K*	7761	Vreme trajanja radnog ciklusa kompresora, h	15

3.1. Toplotna pumpa tipa voda–voda

Srcce izabranog sistema grejanja je kompresorska toplotna pumpa sa radnim medijumom freonom R22. U okviru softvera EnergyPlus izabran je model toplotne pumpe koji koristi fizičke parametre iz kataloga toplotnih pumpi [4]. Njene karakteristične vrednosti su prikazane u tabeli 4.

3.2. Vertikalni podzemni razmenjivač toplote

Isparivački deo sistema grejanja predstavlja isparivač TP i vertikalni podzemni razmenjivač toplote. Zagrejana voda u pomenutom razmenjivaču toplote bi cirkulisala posredstvom pumpe promenljivog protoka do isparivača TP gde bi se po predaji toplote ponovo vratila u podzemni razmenjivač.

Model ovog razmenjivača toplote, preuzet iz datoteke softvera EnergyPlus, simulira njegovo funkcionisanje pod različitim toplotnim opterećenjima, što je određeno uvođenjem tzv. funkcije G sa vrednostima datim u [4]. To je funkcija bezdimenzijskog vremena koje predstavlja prirodan logaritam odnosa trenutnog vremena i vremena stacionarnog stanja ($\ln(T/T_s)$). Vrednosti ove funkcije zavise od tipa podzemnog razmenjivača koji je određen brojem podzemnih rupa (bušotina). Vertikalni podzemni razmenjivač toplote je U-cev postavljena u bušotinu, ispunjenu materijom velike toplotne provodljivosti (sa strane cevi), koju okružuje sloj zemlje ili kamena. Vrednosti parametara i veličina neophodnih za simulaciju izabranog vertikalnog razmenjivača toplote prikazani su u tabeli 5.

Tabela 5. Vrednosti parametara izabranog podzemnog razmenjivača toplote [4]

Veličine			
Maksimalni protok vode, m ³ /s	0,0033	k za U-cev, W/mK	0,391
Broj bušotina	120	Dinamička viskoznost vode, Pa · s	0,000988
Dubina (dužina) bušotina, m	76,2	Toplotna provodljivost vode, W/mK	0,603
Poluprečnik bušotina, m	0,064	Gustina vode, kg/m ³	998,2
Toplotna provodljivost (k) zemlje, W/mK	0,693	k materije u koju je uronjena U-cev, W/mK	0,693
Toplotni kapacitet zemlje, J/m ³ K	2347000	Spoljašnji prečnik U-cevi, m	0,0267
Specifična toplota vode, J/kgK	4182,11	Rastojanje cevi koje čine U-cev, m	0,0254
Temperatura zemlje, °C	13,375	Debljina U-cevi, m	0,00241
Projektovani protok vode, m ³ /s	0,0033		

3.3. Podna grejna tela (grejači)

Neophodno je definisati nakon kog su sloja materijala poda postavljene cevi ovih grejnih tela. U prizemlju su one postavljene nakon 7. sloja materijala (gipsane ploče), a na spratu nakon 4. sloja materijala takođe u vidu gipsane ploče gledajući spolja ka unutrašnjosti prostorije. Ostali karakteristični parametri primenjenog podnog grejanja su dati u tabeli 6.

Tabela 6. Vrednosti parametara podnih grejnih tela (jednaki su za prvi i drugi nivo)

Prostorije koje se greju	Medusobno rastojanje cevi (m)	Unutrašnji prečnik cevi (m)	Dužina cevi (m)	Maksimalni protok vode (m ³ /s)
Dnevna soba	0,1524	0,012	220	0,000045
Kupatilo	0,1524	0,012	60	0,00003
Spavaća soba	0,1524	0,012	165	0,00004

Regulisanje rada podnih grejnih tela sprovodi se u zavisnosti od temperature vazduha u prostoriji i vrednosti opsega regulisanja temperature (tabela 7), regulisanjem protoka grejnog fluida pumpom promenljivog protoka. Ukoliko je na primer temperatura regulacije 19°C, a temperaturski opseg regulacije 2°C, onda će za vrednosti temperature vazduha od 20°C i iznad protoka grejnog fluida biti nula. U suprotnom, ukoliko je temperatura vazduha niža od 18°C, onda će protok grejnog fluida biti maksimalan. Između vrednosti temperatura od 18°C i 20°C protok grejnog fluida linearno varira između njegove maksimalne vrednosti i nule [5].

Tabela 7. Vrednosti temperature regulacije i opsega regulisanja temperature u °C tokom grejne sezone

Vreme	Temperatura regulacije	Temperaturski opseg regulacije
06.00–22.00 h	19 (23*)	2
22.00–06.00 h	–	–

* Temperatura regulacije za kupatila u prizemlju i na spratu.

3.4. Pumpe promenljivog protoka

Odnos snage pumpe i njene nominalne snage (y) izračunava se iz jednačine $y = C_2 PLR$, gde je PLR odnos stvarnog i nominalnog protoka vode. Vrednosti koeficijenta C_2 i ostalih nominalnih veličina ovih pumpi su date u tabeli 8.

3.5. Fotonaponski sistem

Prilikom rada sistema grejanja troši se električna energija za pumpe i kompresor toplotne pumpe. Cilj istraživanja je bio analiza uvođenja fotonaponskog sistema. On bi proizvodio električnu energiju koju troši kompresor. Izabrani fotonaponski moduli su od monokristalnog i od polikristalnog silicijuma, tipa shell S115, sa karakteristikama datim u tabeli 9.

Model fotonaponskog modula predstavlja model ekvivalentnog strujnog kola, sastavljenog od izvora jednosmerne struje, poluprovodničke diode i jednog ili dva otpornika, koji opisan preko empirijskih matematičkih jednačina, simulira rad foto-

naponskog modula u realnim uslovima [5]. Metod izračunavanja temperature fotonaponskog modula bio je „decoupled“ [6].

Tabela 8. Vrednosti parametara izabranih pumpi promenljivog protoka (TP = toplotna pumpa)

Pumpa na	C_2	Nominalna efikasnost motora	Nominalni pad pritiska	Nominalna snaga pumpe	Nominalni protok vode
isparivačkoj strani TP	1	0,9	5000 Pa	25 W	0,0033 m ³ /s
kondenzatorskoj strani TP	1	0,9	40000 Pa	200 W	0,0033 m ³ /s

Osim fotonaponskih modula, fotonaponski sistem obuhvata i inverter. Izabran je inverter sa maksimalnim stepenom efikasnosti. Fotonaponski sistem je raspoloživ tokom čitave godine.

Model fotonaponskog sistema razvijen je pod pretpostavkom da funkcioniše pri svojoj maksimalnoj snazi tokom simulacije. To nije slučaj prilikom njegovog rada u realnim uslovima [4].

Tabela 9. Vrednosti parametara izabranog fotonaponskog modula tipa shell S115 [4]

Karakteristike modula	Vrednost	Karakteristike modula	Vrednost
Struja kratkog spoja, A	4,7	Napon otvorenog kola, V	32,8
Struja pri maksimalnoj snazi, A	4,2	Broj solarnih ćelija u nizu	54
Napon pri maksimalnoj snazi, V	26,8	Površina modula, m ²	1,037
Temperaturski koeficijent napona otvorenog kola, V/K	-0,115	Toplotni kapacitet modula, J/m ² K	50000
Temperaturski koeficijent struje kratkog spoja, A/K	0,002	Koeficijent toplotnih gubitaka modula, W/m ² K	30

4. Ekonomija primene

Ekonomija primene fotonaponskog sistema se ocenjuje pomoću roka povraćaja investicionih troškova:

$$PB = I_o / B \quad (1)$$

gde je I_o (€) vrednost investicije i postavljanja fotonaponskog sistema, a B (€) godišnja neto ušteda (profit) upotrebom tog sistema. Investicioni troškovi fotonaponskog modula su:

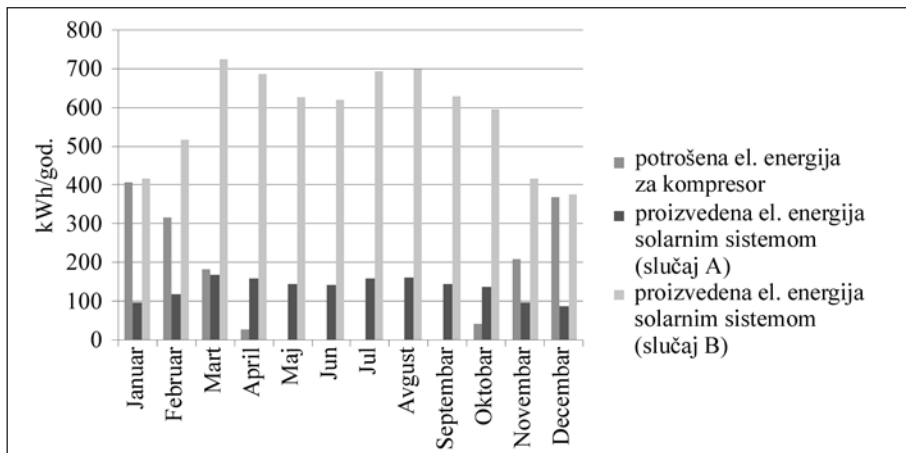
$$I_{modula} = A_{modula} \cdot S_{modula} \cdot C_{modula} \quad (2)$$

Ovde su A_{modula} (m^2) površina modula, $S_{modula} = 113 \text{ W}_p/m^2$ maksimalna snaga modula po jedinici površine i $C_{modula} = 4,44 \text{ €/W}_p$ srednja cena modula [7]. Investicioni troškovi invertera [9] su:

$$I_{invertera} = I, I \cdot A_{modula} \cdot S_{modula} \cdot C_{invertera} \quad (3)$$

gde je $C_{invertera} = 0,512 \text{ €/W}_p$ – srednja prodajna cena invertera [8]. Troškovi postavljanja fotonaponskog sistema su 10% investicionih troškova fotonaponskog sistema. Dakle,

$$I_o = I, I \cdot (A_{modula} \cdot S_{modula} \cdot C_{modula} + I, I \cdot A_{modula} \cdot S_{modula} \cdot C_{invertera}) \quad (4)$$



Slika 3. Vrednosti potrošene električne energije za kompresor i proizvedene električne energije fotonaponskim modulima (slučaj A i B)

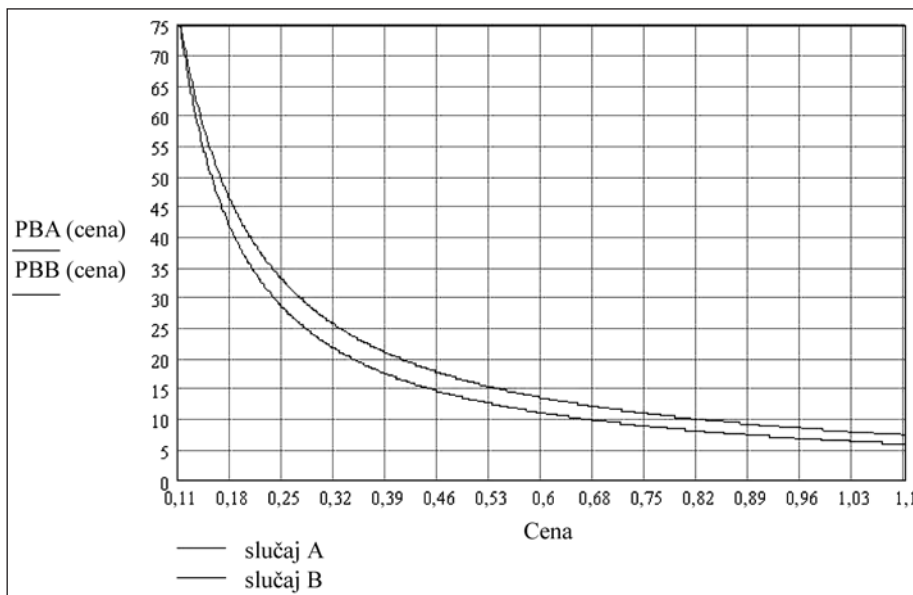
Godišnja neto ušteda fotonaponskog sistema je:

$$B = (T_{el.bezPV} - T_{el.saPV}) + P_{el} - T_o \quad (5)$$

gde su $T_{el.bezPV}$ (€) godišnji troškovi za električnu energiju uzetu iz elektrodistributivne mreže za potrebe kompresora TP bez upotrebe fotonaponskog sistema, $T_{el.saPV}$ (€) godišnji troškovi za električnu energiju uzetu iz elektrodistributivne mreže za potrebe kompresora TP sa upotrebom fotonaponskog sistema, P_{el} (€) godišnji prihodi od prodaje neiskorišćene proizvedene električne energije elektrodistribuciji, T_o (€) godišnji operativni troškovi i troškovi održavanja fotonaponskog sistema. Godišnje operativne troškove i troškove održavanja ovog sistema pretpostavili smo da iznose 1% od I_o . Takođe cena utrošene električne energije je 0,11 €/kWh.

5. Rezultati i razmatranje

Ekonomska analiza se bavi određivanjem površine fotonaponskih modula koji na godišnjem nivou proizvode električnu energiju ekvivalentnu električnoj energiji utrošenoj toplotnom pumpom za grejanje analizirane kuće (slučaj A), kao i na određivanje površine modula koji će uvek tokom grejne sezone obezbeđivati zahtevanu



Slika 4. Zavisnost roka povraćaja ukupnih investicionih troškova fotonaponskih sistema u funkciji cene proizvedene električne energije

količinu električne energije (slučaj B). Proizvedena električna energija ovim sistemima se tokom sezone grejanja koristi za pogon kompresora TP, a električna energija proizvedena van sezone grejanja prodaje se elektrodistribuciji. Višak iste energije se tokom sezone grejanja u slučaju B takođe prodaje elektrodistribuciji. U oba slučaja, izračunata je i minimalna cena proizvedene električne energije, kada je radni vek ovih sistema od 30 godina jednak roku povraćaja ukupnih investicija.

Simulacijom sistema grejanja stambene kuće softverom EnergyPlus dobijeni su podaci o mesečnoj potrošnji električne energije kompresorom TP, vrednosti površina fotonaponskih modula za oba slučaja od 13 (slučaj A) i 56 m² (slučaj B) kao i mesečnoj proizvodnji električne energije u oba slučaja (sl. 3).

Izračunata minimalno potrebna prodajna cena električne energije proizvedene fotonaponskim sistemom za slučaj A i B, kada je rok povraćaja investicionih troškova jednak radnom veku fotonaponskog sistema od 30 godina, iznosi 0,27694 €/kWh za slučaj A i 0,2401 €/kWh za slučaj B. Zavisnost roka povraćaja ukupnih investicionih troškova fotonaponskih sistema u funkciji prodajne cene proizvedene električne energije je prikazana na sl. 4.

6. Zaključak

Sprovedena ekonomska analiza rezultata simulacije sistema grejanja i fotonaponskog sistema stambene kuće govori da primena fotonaponskog sistema za proizvodnju električne energije postaje ekonomski moguća za cenu električne energije od 0,277 €/kWh (za slučaj A) i 0,240 €/kWh (za slučaj B). U ovim slučajevima je rok povraćaja ukupnih investicija jednak životnom veku sistema od 30 godina. Te vredno-

sti su 2,52 odnosno 2,18 puta veće od sadašnje vrednosti električne energije od 0,11 €/kWh. S obzirom da bi se višak proizvedene električne energije fotonaponskim sistemom prodavalo državnom preduzeću za distribuciju električne energije, to bi značilo da bi pomenutu vrednost prodajne cene određivala sama država.

Podsticajni mehanizmi koji bi pozitivno uticali na ekonomsku opravdanost korišćenja ovih sistema, kao i na promociju proizvodnje električne energije posredstvom sunčeve energije, bazirali bi se na subvencijama po osnovu proizvedene električne energije, ili na subvencijama za investicije koje bi se odnosile na povlašćene proizvođače električne energije.

Literatura

- [1] *** Website - http://www.sllink.com/mre/cms/mesto_ZaUploadFajlove/Energetski_bilans_plan_za_2008.pdf, maj 18, 2009.
- [2] *** Website - http://www.biogasmax.eu/media/biogas_as_vehicle_fuel_in_the_stockholm_region__master_thesis__ellen_martensso__096426600_1216_24092007.pdf, jul 04, 2009.
- [3] **Crawley, D., L. Lawrie, F. Winkelmann, W. Buhl, Y. Joe Huang, C. Pederesen, R. Strand, R. Liesen, D. Fisher, M. Witte, J. Glazer**, 2001, *EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program*, Energy and Buildings.
- [3a] **Bojić, M., N. Nikolić**, *Upotreba solarne energije za rad kompresorskih toplotnih pumpi*, izveštaj Centra za grejanje, klimatizaciju i solarnu energiju, Mašinski fakultet, Kragujevac, 2009.
- [4] *** Lawrence Berkeley National Laboratory, 2001. *EnergyPlus Input Output Reference: The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output*.
- [5] *** Lawrence Berkeley National Laboratory, 2001. *EnergyPlus Engineering Document: The Reference to EnergyPlus Calculations*.
- [6] **Duffie, John A. and William A. Beckman**, 1991, *Solar Engineering of Thermal Processes*, New York: John Wiley & Sons, Inc.
- [7] *** Website <http://www.solarbuzz.com/ModulePrices.htm>, jul 22, 2009.
- [8] *** Website <http://www.solarbuzz.com/Inverterprices.htm>, jul 22, 2009.
- [9] **Arvind, Chel, G. N. Tiwari, Avinash Chandra**, *Simplified method of sizing and life cycle cost assessment of building integrated photovoltaic system*, Energy and Buildings.

kgg