

Numerička analiza toplotnih performansi geotermalne toplotne pumpe za potrebe grejanja i hlađenja stambene zgrade

Numerical Analysis of the Ground Source Heat Pump Thermal Performances for Heating and Cooling of the Residential Building

Aleksa Savić, Vanja Šušteršič, Mladen Josijević, Aleksandar Nešović, Nebojša Jurišević, Vladimir Vukašinić

Fakultet inženjerskih nauka, Univerzitet u Kragujevcu

Rezime - U ovom radu izvršena je numerička analiza (uz korišćenje softvera EnergyPlus) primene geotermalne toplotne pumpe za grejanje i hlađenje trospratne stambene zgrade locirane u Kragujevcu. Geotermalna toplotna pumpa je na primarnoj strani povezana sa geotermalnim vertikalnim sondama, dok je na sekundarnoj strani povezana sa podnim panelnim grejačima. Rezultati simulacija pokazali su da je potrošnja električne energije za grejanje 6122,7 kWh/god, dok se za hlađenje utroši 1842,41 kWh/god. U radu su prikazane mesečne vrednosti faktora grejanja i hlađenja, kao i ekološki indikatori koji su na strani ovakvih termo-tehničkih sistema. Za zemlje u razvoju, poput Srbije, korišćenje geotermalne energije je od još većeg nacionalnog značaja, jer je energetska tranzicija u toku.

Ključne reči - geotermalna energija, toplotna pumpa, vertikalna sonda, podni panelni grejač, simulacija, EnergyPlus.

Abstract - In this paper, a numerical analysis (using EnergyPlus software) of the ground source heat pump for heating and cooling in a three-story residential building located in Kragujevac was performed. The ground source heat pump is connected to geothermal vertical probes on the primary side, while on the secondary side, it is connected to floor panel heaters. The simulation results showed that the electricity consumption for heating is 6122.7 kWh/a, while 1842.41 kWh/a is used for cooling. The paper presents monthly values of heating and cooling factors, as well as ecological indicators that are on the side of such thermos-technical systems. For developing countries, such as Serbia, geothermal energy use is of even greater national importance, because the ongoing energy transition.

Index Terms - Geothermal energy, Heat pump, Vertical probe, Floor panel heater, Simulation, EnergyPlus.

I UVOD

Ograničenost zaliha fosilnih goriva za ispunjavanje energetske potrebe dovela je do sve veće potrebe za primenom obnovljivih izvora energije (OIE). Za zemlje koje su energetski zavisne, implementacija OIE može povećati njihovu nezavisnost od stranih uticaja [1]. U Evropskoj Uniji građevinski sektor je odgovoran za 40% potrošnje ukupne finalne energije u stambenim i poslovnim zgradama [2], od koje se veliki deo troši

za zagrevanje i hlađenje domaćinstava i objekata [3]. Zadatak energetskog sektora Srbije u budućnosti jeste povećanje održivosti kroz veće učešće obnovljivih izvora u proizvodnji energije, kao i putem poboljšanja energetske efikasnosti, što bi uticalo na povećanje energetske sigurnosti zemlje i unapređenje održivosti ovog sektora, a time i cele privrede [4]. Procenjeno je da, ukoliko Republika Srbija ne započne sa unapređenjem energetske efikasnosti u svim sektorima privrede i društva, za 50 do 60 godina bi se mogla suočiti sa energetskim i ekološkim kolapsom, uz ubrzano trošenje postojećih obnovljivih energenata, kao i masovno korišćenje energetski neefikasnih tehnologija [5].

Geotermalne toplotne pumpe (GTP), teorijski i praktično, nude mnoge pogodnosti, u odnosu na druge tehnologije, kada je u pitanju grejanje i hlađenje zgrada raznih namena [6]. Pored toga, GTP su široko prihvaćene kao tehnologija koja može smanjiti emisiju CO₂ pri zagrevanju stambenih zgrada, pogotovo u kombinaciji sa fotonaponskim (FN) panelima [7]. Agencija za zaštitu životne sredine [8] je GTP ocenila kao najefikasniju i ekološki najpogodniju tehnologiju za grejanje i hlađenje.

Sa druge strane, primena GTP u stambenom sektoru Srbije još uvek nije dovoljna, bez obzira što sama tehnologija nije nova [9]. Prema proceni, trenutno se u Srbiji koristi oko 1.005 GTP instalisanih snaga u opsegu 10-40 kW. Na godišnjem nivou, njihovo prosečno angažovanje je oko 2860 sati pri punom kapacitetu [10].

Osnovni prioriteti prilikom izbora načina grejanja predstavlja investicija u sistem i troškovi energenta [11], dok su ekološki faktor i svest o potrebi energetske tranzicije relativno slabo izraženi. Ekonomski aspekt nabavke modernih sistema je identifikovan i kao najveća prepreka za zamenu postojećih sistema, a oko polovine domaćinstava u Srbiji ima pozitivan stav prema potencijalnom subvencionisanju troškova za zamenu postojećih sistema novim i efikasnijim [12]. Kombinacija zagrevanja i hlađenja upotrebom toplotne pumpe je efikasnija od upotrebe tradicionalnih sistema ukoliko je u pitanju ugradnja u novi objekat. U slučaju zamene postojećeg sistema, isplativost toplotne pumpe zavisi od različitih faktora na individualnom slučaju [13].

Upotreba GTP svakako ima rastući trend u Srbiji, jer se nalazi u umereno kontinentalnom pojasu. Tokom grejne sezone, GTP

treba da obezbedi toplotnu energiju [14] za grejanje prostora i pripremu tople potrošne vode, a tokom sezone hlađenja javljaju se potrebe za rashladnom energijom.

Zbog svega navedenog, u ovom radu analizirana je potencijalna implementacija GTP unutar trospratne stambene zgrade koja se nalazi na području grada Kragujevca - studija slučaja. Praćenjem glavnih toplotnih parametara GTP (potrošnja finalne, tj. električne energije, faktor grejanja, faktor hlađenja, emisija CO₂) tokom cele godine, cilj rada je skretanje pažnje stručnoj javnosti na značaj korišćenja geotermalne energije, posebno u nacionalnom stambenom sektoru.

II METODOLOGIJA

Prilikom proračuna potrebne energije za grejanje i hlađenje, pažnja je fokusirana na sve energetske tokove u analiziranoj zgradi (Sl. 1). Poznato je da parametri, poput unutrašnje projektne temperature, toplotnih dobitaka (unutrašnji: ljudi, uređaji, rasveta, ventilacija, itd.), kao i spoljašnji: solarno zračenje [15] i spoljašnji vremenski uslovi (spoljašnja projektna temperatura) utiču na krajnji rezultat [16].

Prema Direktivi EU [17] o energetskej efikasnosti zgrada, potrebna količina toplotne energije određuje se prema jednačini (1), dok se energija potrebna za hlađenje određuje prema jednačini (2):

$$E_H = \sum_{Z=1}^n E_{Z,H} = \sum_{Z=1}^n (E_T + E_V - E_{SUN} - E_{INT}) \quad (1)$$

$$E_C = \sum_{Z=1}^n E_{Z,C} = \sum_{Z=1}^n (E_T + E_V + E_{SUN} + E_{INT}) \quad (2)$$

gde su:

E_H [kWh/god] - ukupna količina energije potrebna za grejanje zgrade tokom godine,

E_C [kWh/god] - ukupna količina energije potrebna za hlađenje zgrade tokom godine,

$E_{Z,H}$ [kWh/god] - ukupna količina energije potrebna za grejanje jedne zone unutar zgrade tokom godine,

$E_{Z,C}$ [kWh/god] - ukupna količina energije potrebna za hlađenje jedne zone unutar zgrade tokom godine,

E_T [kWh/god] - količina toplotne energije koja se transmissionim putem odvodi (grejanje) ili dovodi (hlađenje) zgradi tokom godine,

E_V [kWh/god] - količina toplotne energije koja se ventilacionim (prirodna ili veštačka) putem odvodi (grejanje) ili dovodi (hlađenje) zgradi tokom godine,

E_{SUN} [kWh/god] - količina toplotne energije koja se tokom godine dovodi zgradi putem solarnog zračenja,

E_{INT} [kWh/god] - količina toplotne energije koja se oslobađa u zgradi tokom godine zbog prisustva ljudi, rada uređaja i rasvete.

III MATERIJAL

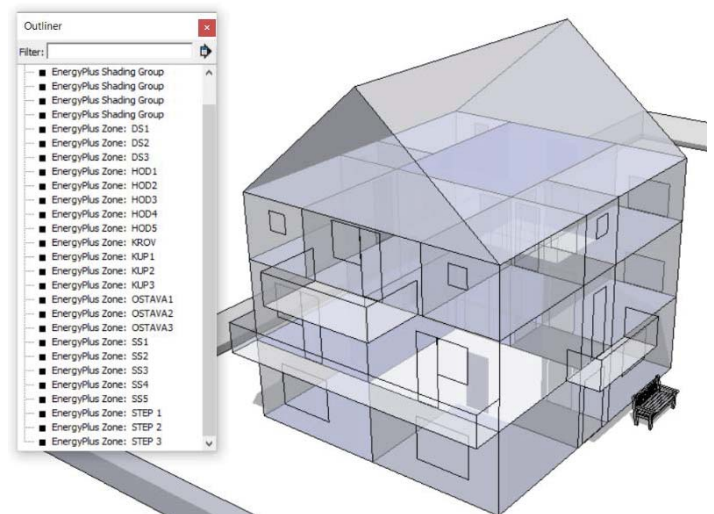
Analiziranju energetskih tokova u zgradi prethodi njeno modeliranje u softveru Google SketchUp (Slika 1.). Ovaj program omogućava relativno jednostavan način za kreiranje svih građevinskih elemenata (transparentnih i netransparentnih)

zgrade, odnosno zona (prostorija) od kojih se zgrada sastoji. Značaj ovog softvera je u preglednom vizuelnom prikazu, kao i mogućnost predstavljanja dvodimenzionalnog plana zgrade. Takođe, veoma bitna činjenica na strani softvera je čuvanje modela zgrade u formatu koji se može koristiti u okviru drugih programa [18]. Svi podaci u okviru izrađenog modela zgrade predstavljaju ulazne podatke za softver EnergyPlus [19] koji je u ovom slučaju korišćen za simuliranje pomenutih energetskih tokova.

Nakon izrade modela zgrade u softveru Google SketchUp, u okviru programa EnergyPlus, pre samog proračuna, neophodno je definisati materijale i sastav svih građevinskih elemenata. Sem toga, treba definisati i rasporede prisustva ljudi, rasporede korišćenja uređaja i rasvete, kao i rasporede korišćenja drugih termo-tehničkih sistema (ukoliko postoje u zgradi). Uz odgovarajuću vremensku datoteku, EnergyPlus će odrediti potrošnju energije, za bilo koju namenu (grejanje, hlađenje, ventilacija, uređaji, rasveta, itd.), za bilo koji vremenski period tokom godine (cela godina, sezona, mesec, dan, sat, minut).

IV STUDIJA SLUČAJA

U okviru ovog rada, a na osnovu opisane metodologije, proračunata je potrebna količina toplotne energije, kao i energija neophodna za hlađenje postojeće stambene zgrade (Slika 1) koja se nalazi na teritoriji grada Kragujevca.



Slika 1. Izometrijski prikaz analizirane zgrade

Zgrada je namenjena stalnom boravku osmočlane porodice. Sastoji se od 22 zona (prostorija) na tri etaže, sa karakteristikama prikazanim u Tabeli 1. Ukupna neto površina analizirane zgrade $A_Z=364,2 \text{ m}^2$, od čega se u termičkom smislu tretira (greje i hladi) $193,5 \text{ m}^2$. Ostatak ($170,7 \text{ m}^2$) predstavlja negrejani prostor.

Tabela 1. Zonske geometrijske karakteristike

Zona	A_Z [m ²]	H_Z [m]	Z_Z [m ³]	Termički tretman
DS1	27,65	2,67	73,83	DA
STEP1	10,56	2,67	28,20	NE
KUP1	4,07	2,67	10,87	DA
HOD1	4,39	2,67	11,72	DA

Zona	A_z [m ²]	H_z [m]	Z_z [m ³]	Termički tretman
HOD2	7,42	2,67	19,81	DA
SS1	18,54	2,67	49,50	DA
SS2	18,42	2,67	49,18	NE
DS2	27,65	2,67	73,83	DA
STEP2	10,56	2,67	28,20	NE
KUP2	4,07	2,67	10,87	DA
HOD3	4,39	2,67	11,72	DA
HOD4	7,42	2,67	19,81	DA
SS3	18,54	2,67	49,50	DA
SS4	18,42	2,67	49,18	DA
OST1	9,80	2,10	20,58	NE
OST2	9,48	2,10	19,91	NE
OST3	10,22	2,10	21,46	NE
DS3	25,27	2,10	53,07	DA
HOD5	4,39	2,10	9,22	DA
SS5	17,26	2,10	36,25	DA
STEP3	10,56	2,10	22,18	NE
KUP3	4,07	2,10	8,55	DA
KR	91,05	-	-	NE
Σ	364,20	-	677,41	-

Legenda: DS - dnevna soba, STEP - stepenište, KUP - kupatilo, HOD - hodnik, SS - spavaća soba, OST - ostava, KR - krov.

U Tabeli 2 dat je prikaz instaliranih snaga električnih uređaja $Q_{Z,U}$ [W/m²] i svetiljki, tj. rasvete $Q_{Z,R}$ [W/m²] po zonama u analiziranoj zgradi (Sl. 1).

Tabela 2. Zonska instalirana snaga uređaja i svetiljki

Zona	$Q_{Z,U}$ [W/m ²]	$Q_{Z,R}$ [W/m ²]
SS1	16,18	4,05
KUP1	638,82	24,57
DS1	72,33	4,34
SS3	16,18	4,05
SS4	16,29	4,07
KUP2	638,82	24,57
DS2	72,33	4,34
KUP3	638,82	24,57
DS3	79,15	4,75
SS5	17,38	4,35

U Tab. 3 prikazane su fizičke karakteristike (debljina, toplotna provodljivost, gustina i specifična toplota) svih materijala korištenih za geometrijsko definisanje analizirane zgrade (Sl. 1).

Tabela 3. Fizičke karakteristike korištenih materijala

Materijal	δ [m]	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kgK]
Krečni malter	0,025	0,81	1600	1050
Cementna košuljica	0,04	1,4	2100	1050
PVC folija	0,002	0,19	1100	1460
Staklena vuna	0,1	0,03	50	840
Ekstrud. polistiren	0,1	0,03	33	1260
Fasadni malter	0,012	0,7	1700	1050
Eksp. polistiren	0,1	0,03	33	1260
Keramičke pločice	0,015	0,87	1700	920
Parket	0,02	0,21	700	1670
Crep	0,01	0,99	1900	880
Gipsane ploče	0,12	0,19	800	1090
Giter blok	0,25	0,52	1200	920

Materijal	δ [m]	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kgK]
Nearmirani beton	0,15	0,93	1800	960
Armirani beton 1	0,04	2,04	2400	960
Armirani beton 2	0,25	2,04	2400	960
Šljunak	0,2	0,81	1700	840
Heraklit	0,012	0,052	700	1500
Monta	0,16	0,6	1200	920
Borovina	0,07	0,14	550	2090

Sezona grejanja u Republici Srbiji traje od 15. oktobra do 15. aprila. Sa druge strane, usvojeno je da sezona hlađenja bude u periodu od 15. aprila do 15. oktobra. Unutrašnja projektna temperatura za sezonu grejanja iznosi 20°C, dok za sezonu hlađenja iznosi 24°C.

V REZULTATI I DISKUSIJA

Zonska izmena vazduha putem prirodne ventilacije, tj. zonsko provetravanje n_z [h⁻¹], zonska instalirana snaga sistema grejanja $Q_{Z,H}$ [W], zonska instalirana snaga sistema hlađenja $Q_{Z,C}$ [W], kao i zonska dužina cevni zmiya u konstrukciji podnih panelnih grejača L_z [m], u analiziranoj zgradi (Slika 1), prikazane su u Tabeli 4. Broj izmena vazduha po zonama, određen je prema Pravilniku o energetskej efikasnosti zgrada [20]. GTP tipa HOTERM EARTH EVI 19 [21], nominalne snage 18,7 kW, usvojena je prethodnim sumiranjem vrednosti $Q_H = \Sigma Q_{Z,H}$ i $Q_C = \Sigma Q_{Z,C}$.

Mesečna potrošnja finalne (električne) u analiziranoj zgradi za potrebe grejanja (rad kompresora) tokom grejne sezone (E_{KOMP} [kWh]) prikazana je u Tabeli 5. Ova vrednost određuje se kao razlika toplotne energije koja se putem kondenzatora (E_{KOND} [kWh]) isporučuje termički tretiranim zonama (Tabela 1, Tabela 4) i toplotne energije koja se preko vertikalnih geotermalnih sondi dovodi isparivaču GTP (E_{ISP} [kWh]).

Može se primetiti da je potrošnja električne energije najveća u januaru (1589,94 kWh/mes), a potom u decembru (1434,68 kWh/mes), kada su spoljašnje temperature najniže. Ukupna potrošnja električne energije, tokom sezone grejanja, iznosila je 6122,7 kWh/god.

Tabela 4. Opis sistema grejanja i hlađenja u termički tretiranim zonama

Zona	n_z [h ⁻¹]	$Q_{Z,H}$ [W]	$Q_{Z,C}$ [W]	L_z [m]
DS1	1,5	3306,25	1071,68	184,32
KUP1	1,5	570,04	181,25	27,14
HOD1	0,5	469,26	50,02	29,26
HOD2	0,5	538,25	63,29	49,44
SS1	0,5	1257,99	298,71	123,60
DS2	1,5	3568,69	1233,76	184,32
KUP2	1,5	529,18	154,56	27,14
HOD3	0,5	450,87	53,90	29,26
HOD4	0,5	504,55	67,99	49,44
SS3	0,5	1328,99	291,34	123,60
SS4	0,5	1338,69	303,12	122,78
DS3	1,5	2663,40	895,47	168,44
HOD5	0,5	419,35	48,99	29,26
SS5	0,5	1097,52	264,44	115,09
KUP3	1,5	506,66	148,25	27,14
Σ	-	18549,69	5178,00	1290,23

Tabela 5. Mesečna potrošnja finalne (električne) energije u analiziranoj zgradi za potrebe grejanja tokom grejne sezone

Mesec	E_{KOND} [kWh]	E_{ISP} [kWh]	E_{KOMP} [kWh]
Oktobar	409,09	277,29	131,81
Novembar	2411,36	1609,33	802,03
Decembar	4121,36	2686,68	1434,68
Januar	4491,08	2901,15	1589,94
Februar	3576,69	2309,45	1267,24
Mart	2259,34	1469,73	789,61
April	311,9	204,51	107,39
Σ	17580,82	11458,13	6122,7

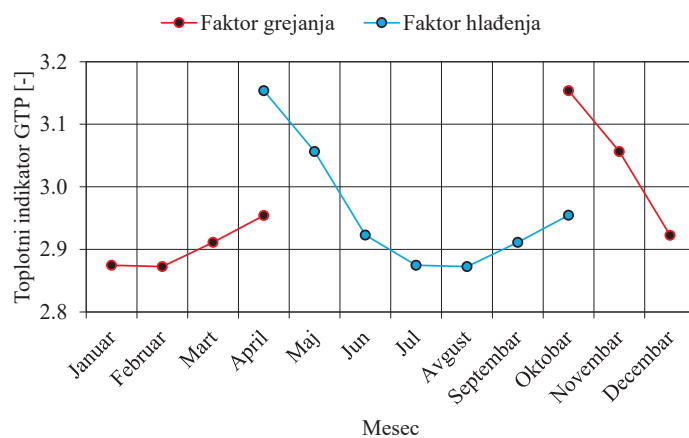
Mesečna potrošnja finalne (električne) energije u analiziranoj zgradi za potrebe hlađenja tokom sezone hlađenja prikazana je u Tabeli 6. Sada se potrošnja električne energije određuje kao razlika toplotne energije koja se putem kondenzatora (E_{KOND} [kWh]) predaje zemljištu i toplotne energije koja se iz prostorija odvodi preko podnih panelnih grejača, i dalje predaje isparivaču GTP (E_{ISP} [kWh]).

Najveća količina toplotne energije predaje se zemljištu tokom jula, kada se utroši 476,16 kWh električne energije. Na drugom mestu je avgust ($E_{KOMP}=444,36$ kWh). Ukupna količina električne energije, koja se za potrebe hlađenja, utroši tokom sezone hlađenja, iznosila je 1842,41 kWh/god.

Tabela 6. Mesečna potrošnja finalne (električne) energije u analiziranoj zgradi za potrebe hlađenja

Mesec	E_{KOND} [kWh]	E_{ISP} [kWh]	E_{KOMP} [kWh]
April	249,74	188,88	60,86
Maj	859,01	644,61	214,4
Jun	1421,04	1054,1	366,94
Jul	1821,15	1345	476,16
Avgust	1698,53	1254,17	444,36
Septembar	934,97	692,84	242,14
Oktobar	146,65	109,09	37,56
Σ	7131,1	5288,69	1842,41

Na narednom dijagramu (Sika. 2), prikazane su mesečne varijacije faktora grejanja ε_H [-] i faktora hlađenja ε_C [-].

**Slika 2.** Mesečne varijacije faktora grejanja i faktora hlađenja

Faktor grejanja ε_H tokom sezone grejanja kretao se u granicama od 2,82 (januar i februar) do 3,1 (oktobar). Sa druge strane,

faktor hlađenja bio je u istim granicama: od 2,82 (jul i avgust) do 3,1 (maj). Prosečna godišnja (sveobuhvatna) vrednost toplotnog indikatora GTP bila je 2,91.

Ako se usvoji da faktor emisije CO_2 iznosi 0,7662 kgCO_2/kWh (preporuka dostupna u [22]), godišnja emisija gasova staklene bašte u slučaju korišćenja GTP iznosila bi 6069,42 kgCO_2/god . Redukcija gasova staklene bašte odgovarala bi vrednostima faktora grejanja i faktora hlađenja. Drugim rečima, u slučaju korišćenja električnog kotla, godišnja emisija CO_2 , bila bi 17662 kgCO_2/god (2,91 puta veća u odnosu na GTP).

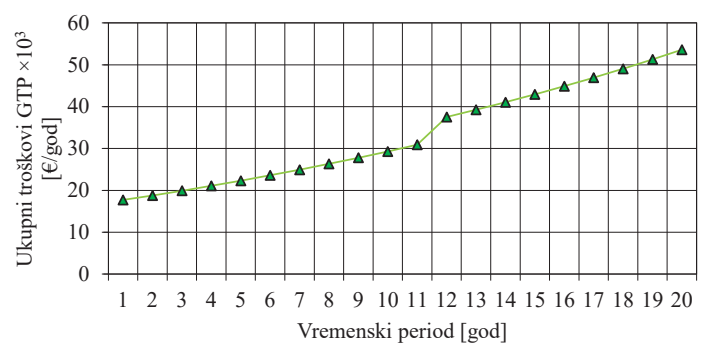
Tabela 7. Ekonomska analiza geotermalne toplotne pumpe u sistemu grejanja i hlađenja stambene zgrade [23]

Parametar	Cena [din]	Cena [€] (1 € = 117,6 din)
Geotermalna toplotna pumpa	959.500	8.159,01
Dodatna oprema	370.000	3.146,26
Ugradnja	100.000	850,34
Bušotine	531.000	4.515,31
Ukupni investicioni troškovi	1.960.500	16.670,92
Troškovi grejanja	95.185	809,40
Troškovi hlađenja	26.689	226,95
Ukupni eksploatacioni troškovi	121.874	1.036,34

U ekonomskom smislu, ukupni investicioni troškovi ovakvog termo-tehničkog sistema (GTP sa svim pratećim elementima) iznosili bi oko 2 miliona dinara (Tabela 7). U slučaju jednotarifnog brojila, troškovi grejanja tokom grejne sezone procenjeni su na 95.185 dinara, a troškovi hlađenja na 26.689 dinara [24].

Analizom je dobijeno da bi ukupna dužina sondi bila 296 m. Ove uslove mogle bi da zadovolje 4 bušotine, pri čemu bi dubina svake bušotine iznosila 74 m. U svaku bušotinu bila bi položena po jedna U-sonda.

Ako se u obzir uzmu varijabilnost tržišne cene energenata, i varijabilnost potrošnje električne energije zbog narušavanja termičkih performansi GTP kroz vreme, može se napraviti predikcija ekonomskih troškova GTP za očekivani tehnički vek projekta od 20 godina (Slika 3).

**Slika 3.** Predikcija ukupnih godišnjih troškova GTP za period od 20 godina

Na dijagramu troškova (Slika 3) može se uočiti blagi ekonomski diskontinuitet koji nastaje nakon 10 godina eksploatacije, zbog dodatnih ulaganja (30% od vrednosti investicionih troškova) u skladu sa preporukama servisera ovakvih instalacija.

VI ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada, razmatrana je mogućnost primene GTP za potrebe grejanja i hlađenja postojeće trospratne zgrade u Kragujevcu. U okviru programa Google SketchUp, izrađen je model pomenute zgrade, koji je dalje simuliran u softverskom paketu EnergyPlus. U ovoj fazi, korišćen je i odgovarajući vremenski fajl, kako bi simulacioni rezultati bili što bliži realnim uslovima.

Rezultati simulacija pokazali su da bi potrošnja električne energije za grejanje tokom grejne sezone, bila 3,3 puta veća od električne energije za hlađenje.

Iako su početni investicioni troškovi GTP viši od početnih investicionih troškova drugih termo-tehničkih sistema za grejanje i hlađenje, primena GTP donosi ekonomske i ekološke benefite na duže vremenske staze.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Atam, E., Helsen, L. Ground-coupled heat pumps: Part 2 - Literature review and research challenges in optimal design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 54, pp. 1668-1684, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.009>
- [2] Menegazzo, D., Lombardo, G., Bobbo, S., De Carli, M., Fedele, L. State of the art, perspective and obstacles of ground-source heat pump technology in the european building sector: a review, *Energies*, Vol. 15, No. 7, pp. 2685, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15072685>
- [3] Cvetanović, L., Šušteršič, V. Proračun toplotnih gubitaka i analiza isplativosti sistema grejanja sa toplotnom pumpom tipa zemlja-voda u poređenju sa drugim sistemima grejanja na konkretnom slučaju, *Traktori i pogonske mašine*, Vol. 23, No. 3/4, pp. 81-89, 2018.
- [4] Kokeza, G. Doprinos energetskeg sektora ostvarenju održivog razvoja privrede, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 20, No. 1-2, pp. 54-59, 2018.
- [5] Babić, M. Istraživanje mogućih scenarija energetske budućnosti Republike Srbije uz pomoć backcasting methodology i softvera Energovizija MB, *Energija, ekonomija, ekologija*, No. 1-2, pp. 1-9, 2020. <https://doi.org/10.46793/EEE20-1-2.001B>
- [6] Rees, S.J. An introduction to ground-source heat pump technology, in: Rees S. (Ed.), *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*. Woodhead Publishing, pp. 1-25, 2016. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03840-3>
- [7] Rosenow, J., Gibb, D., Nowak, T., lowers, R. Heating up the global heat pump market, *Nature Energy*, Vol. 7, pp. 901-904, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41560-022-01104-8>
- [8] Geothermal Heating and Cooling Technologies (EPA), <https://www.epa.gov/rhc/geothermal-heating-and-cooling-technologies> [pristupljeno 04.04.2023]
- [9] Šušteršič V., Gordić D., Josijević M., Đonović K. Legislativa i mogućnost primene geotermalnih toplotnih pumpi u Srbiji i zemljama okruženja, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 18, No. 1-2, pp. 314-320, 2016.
- [10] Pešić, A.M., Brankov, J., Denda, S., Bjeljac, Ž., Micić, J. Geothermal energy in Serbia - Current state, utilization and perspectives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 162, 112442, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112442>
- [11] Damette, O., Delacote, P., Del Lo, G. Households energy consumption and transition toward cleaner energy sources, *Energy Policy*, Vol. 113, pp. 751-764, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.060>
- [12] Pavlović, B., Ivezić, D., Živković, M. Izazovi energetske tranzicije u sektoru individualnog grejanja, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 1, pp. 17-21, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-1.17P>
- [13] Sarbu, I., Sebarchievici, C. General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings, *Energy and buildings*, Vol. 70, pp. 441-454, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.068>
- [14] Gaur, A.S., Fitiwi, D.Z., Curtis, J. Heat pumps and our low-carbon future: A comprehensive review, *Energy Research & Social Science*, Vol. 71, 101764, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101764>
- [15] Ružić, S., Opačić, B. Metodologija za proračun korisne toplotne energije potrebne za intermitentno i parcijalno grejanje objekata, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 20, No. 1-2, pp. 222-235, 2018.
- [16] Dodoo, A., Tettey, U.Y.A., Gustavsson, L. On input parameters, methods and assumptions for energy balance and retrofit analyses for residential buildings, *Energy and buildings*, Vol. 137, pp. 76-89, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.033>
- [17] Directive 2010/31/EU. Directive 2010/31/EU of the European parliament and of the council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (Recast). <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:EN:PDF> [pristupljeno 06.04.2023]
- [18] Ellis, P.G., Torcellini, P.A., Crawley, D.B. Energy design plugin: an EnergyPlus plugin for SketchUp. in *Proc. IBPSA-USA SimBuild 2008 Conference*, Berkeley, California, pp. 238-245, 30 July - 1 August 2008.
- [19] EnergyPlus™ Version 22.2.0 Documentation: EnergyPlus Essentials. <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/22-2/essentials/index.html> [pristupljeno 04.04.2023]
- [20] "Službeni glasnik RS", br. 61/2011, Pravilnik o energetskej efikasnosti zgrada, https://www.paragraf.rs/propisi/pravilnik_o_energetskej_efikasnosti_zgrada.html [pristupljeno 02.12.2023. god.].
- [21] HOTTERM, <https://hotterm.pl/> [pristupljeno 15.05.2023]
- [22] Gordic, D., Nikolic, J., Vukasinovic, V., Josijevic, M., Aleksic, A.D. Offsetting carbon emissions from household electricity consumption in Europe, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 175, 113154, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113154>
- [23] Savić, A. *Tehno-ekonomska analiza sistema za grejanje i hlađenje u stambenom objektu koji koristi toplotnu pumpu zemlja-voda - master rad*, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac, 2022.
- [24] Elektroprivreda Srbije, Kalkulator potrošnje za domaćinstva, <http://kalkulator.eps-snabdevanje.rs/kalkulator> [pristupljeno 15.05.2023]

AUTORI/AUTHORS

msr Aleksa Savić - mas. inž. maš., Fakultet inženjerskih nauka, aleksa.savic.fjn@gmail.com, ORCID [0009-0008-7157-3996](https://orcid.org/0009-0008-7157-3996)

dr Vanja Šušteršič* - red. prof., Fakultet inženjerskih nauka, vanjas@kg.ac.rs, ORCID [0000-0001-7773-4991](https://orcid.org/0000-0001-7773-4991), *autor za korespondenciju

dr Mladen Josijević - docent, Fakultet inženjerskih nauka, mladenjosijevic@gmail.com, ORCID [0000-0001-9619-0897](https://orcid.org/0000-0001-9619-0897)

msr Aleksandar Nešović - istraživač saradnik, Fakultet inženjerskih nauka, aca.nesovic@gmail.com, ORCID [0000-0002-1690-2389](https://orcid.org/0000-0002-1690-2389)

dr Nebojša Jurišević - naučni saradnik, Fakultet inženjerskih nauka, jurisevic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0002-1609-6313](https://orcid.org/0000-0002-1609-6313)

dr Vladimir Vukašinović - vanr. prof., Fakultet inženjerskih nauka, vladimir.vukasinovic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0001-6489-2632](https://orcid.org/0000-0001-6489-2632)