

Milan B. ŠEKULARAC<sup>1</sup>, Esad M. TOMBAREVIĆ<sup>2</sup>

## ANALIZA GEOTERMALNOG RAZMJENJIVAČA TOPLOTE ZEMLJA-VAZDUH U KLIMATSKIM USLOVIMA PODGORICE

**Sažetak:** Ovim radom analiziran je sezonski učinak geotermalnog razmjenjivača topline zemlja-vazduh (engl. air-ground heat exchanger) za grejni i rashladni režim rada, u klimatskim uslovima Podgorice. Izvršena je CFD analiza problema za period jedne grejne sezone i posebno za period jedne sezone hlađenja, u toku kojih razmjenjivač radi bez prekida. Obrađeni podaci su prezentovani u formi promjena karakterističnih temperatura u toku sezone i efikasnosti sistema (COP). Izložena je i eksergetska analiza rada sistema.

**Gljučne riječi:** *geotermalna energija, geotermalne toplotne pumpe, razmjenjivač topline zemlja – vazduh, COP, air-to-ground heat exchanger, pasivne kuće*

### 1. UVOD

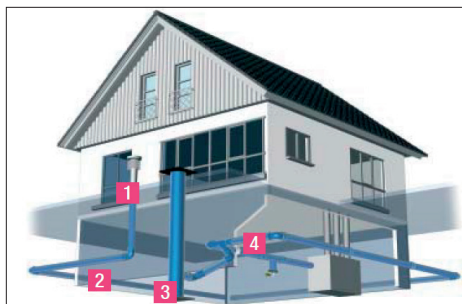
U literaturi [2,4] se može naći sljedeća podjela sistema grijanja na bazi obnovljive energije, u primjeni za stambene objekte i objekte druge namjene (npr. poljoprivreda), podijeljenih u tri grupe: (i) solarno-termalni sistemi grijanja, (ii) geotermalni sistemi (koncept pasivnog geotermalnog grijanja) i (iii) kombinovani sistemi grijanja solarnom energijom i toplotnom pumpom (npr. staklene bašte). Koncept (ii) datira iz 3000 god. p. n. e. kada su iranski arhitekta osmislili zgradu koja će se hladiti samo prirodnim putem

Toplotna energija koja se akumulira u tlu se može iskoristiti pomoću zemlja-vazduh geotermalnog razmjenjivača topline (podzemni vazdušni tunel). Strujanje vazduha kroz tunel obezbjeđuje se ventilatorom ili solarnim dimnjakom. Osnovna povoljnost za razmatranje ovog rješenja leži u povoljnoj temperaturi tla za grijanje u zimskom i hlađenje u ljetnjem periodu te u termičkoj inerciji tla na dnevna gibanja temperature vazduha. Temperatura tla zavisi od dubine mjerene od površine tla

---

<sup>1</sup> Mr Milan Šekularac, dipl. ing. maš., Mašinski fakultet, Podgorica, milans@ac.me

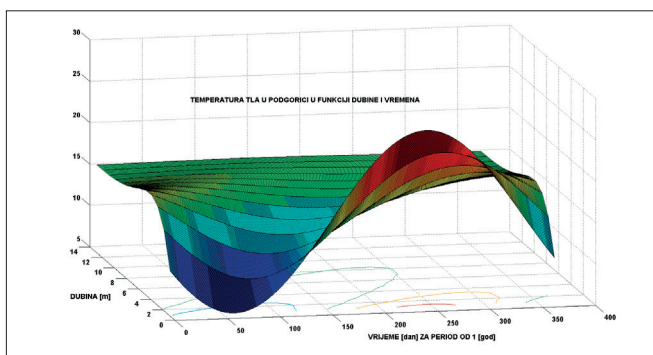
<sup>2</sup> Mr Esad Tombarević, dipl. ing. maš., Mašinski fakultet, Podgorica, esadt@ac.me



Sl. 1. Rješenje firme „Rehau”

u smjeru ka tlu, i od vremena (u godini). Dnevne oscilacije temperature površine tla posljedica su kombinovanog uticaja solarnog zračenja i promjene temperature atmosferskog vazduha. Temperatura se sa dubinom mijenja na način da amplituda biva prigušena i prisutan je fazni pomjeraj oscilacije po vremenu. Od dubine od oko  $\sim 15$  [m] temperatura tla u toku godine je praktično konstantna, i jednaka srednjoj godišnjoj temperaturi atmosferskog vazduha, koja za klimatske uslove Podgorice iznosi  $\sim 15.6$  [°C]. Koristeći podatke o srednjim mjesečnim temperaturama vazduha u toku godine, termofizičke osobine tla (gustina, specifična toplota i toplotna provodljivost) [6], može se formirati model promjene temperature u tlu u funkciji dubine  $z$  [m] i vremena  $t$  [s], po poznatoj relaciji Kusude [1]. Na slici sl. 2. dat je grafički prikaz temperature u tlu u Podgorici u funkciji dubine i vremena. Na sl. 3. dat je prikaz presjeka površi temperature sa ravnima  $z = \text{const.}$ . Različite krive predstavljaju promjenu temperature na dubinama 0, 1, 2, ..., 5 [m] u funkciji vremena.

Rehau rješenje sistema zemlja-vazduh za kuće se sastoji od (sl. 1): 1. filtera na usisu svježeg vazduha, 2. cjevovoda u vidu slova  $\Pi$ , položenog u tlu oko kuće na dubini od 1.5 – 2.5 [m], 3. odvoda kondenzata i 4. termo-tehničke instalacije (rekuperator, grijač, idr). Vazduh prolazi kroz filter na usisu u cjevovod i cjevovod, a zatim ulazi u podrum ili prizemlje kuće u mašinsku instalaciju. Vazduh se zimi mora dogrijati nekim sistemom prije ubacivanja u objekat. Kod pasivnih kuća, važnost se daje dobroj zaptivenosti i termičkoj izolaciji objekta, te iz tog razloga se koristi mehanička ventilacija sa vazдушnim grijanjem i efikasan rekuperator toplote, za rekuperaciju energije otpadnog vazduha. Osnovna pitanja od interesa u projek-



Sl. 2. Temperatura u tlu u Podgorici

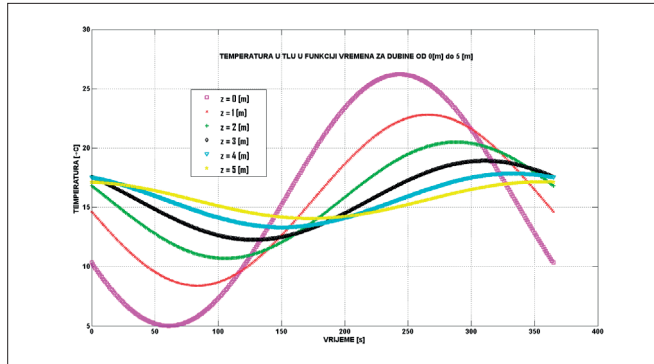
tovanju ovog sistema analizirana su u ovom radu i ona se mogu formulisati kao sljedeća:

1. Kolika je temperatura vazduha koja se može dobiti iz geotermalnog razmjenjivača za uslove Podgorice, te koliki je grejni kapacitet i efikasnost razmjenjivača?

2. Definirati karakteristične temperature tj. nestacionarnost veličina u toku grejne i rashladne sezone, grejni kapacitet i upotrebljivost sistema?

Analiza je sprovedena za klimatske uslove Podgorice. Usvojen je najnepovoljniji slučaj (sa aspekta pitanja br. 2) kada vazduh struji kroz cjevovod neprekidno u toku trajanja sezone, kao kod pasivnih kuća.

Klimatski uslovi određuju polje temperature u neporemećenom tlu. Sproveden je CFD numerički proračun koristeći ANSYS FLUENT [9]. 3D geometrija je iscrtana pomoću 3D CAD alata, numerička mreža generisana pomoću ANSYS Mesh alata. Grafička obrada rezultata vršena je pomoću ANSYS CFD Post alata softvera.

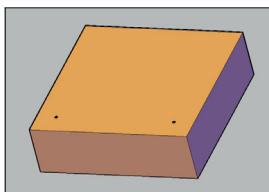


Sl. 3. Temperature u tlu za različitu dubinu z: 0–5 [m]

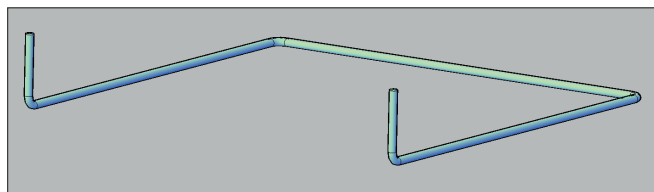
## 2. OPIS ANALIZIRANOG SISTEMA

### 2. 1. GEOMETRIJA

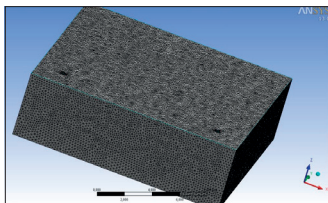
Analizirana geometrija prikazana je na slici sl.4. a)-d). Geometrija se sastoji iz dva dijela: tla i cjevovoda. Tlo je u formi kvadra dimenzija 16[m] x 16[m] u vo-



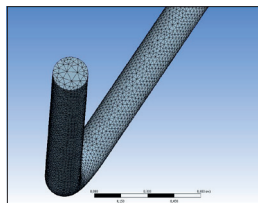
a) 3D model sistema



b) 3D model cjevovoda



c) 3D CFD numerička mreža – cjelina



d) 3D CFD numerička mreža-cjevovod.

Sl. 4. a)-d) 3D CAD geometrija analiziranog sistema zemlja – vazduh

doravnoj ravni nivoa tla (Oxy), i dubine 5[m] (po vertikalnoj z osi). Cjevovod u formi slova  $\Pi$  položen je u tlu na dubini od 2[m], tj. sastoji se iz tri dijela dužine po 12 [m] i dvije vertikalne dionice od po 2[m]. Unutrašnji prečnik cijevi je 0.20 [m] a radijus krivine koljena je 0.3 [m]. Debljina zida cijevi je zanemarena. Cjevovod je u odnosu na analizirani komad tla udaljen od njegovih biočnih zidova za po 2[m], od nivoa tla ka atmosferi 2[m] i od donje vodoravne stranice za 3[m].

## 2. 2. GRANIČNI USLOVI

U desni otvor cjevovoda ulazi atmosferski vazduh neprekidno u toku trajanja grejne / rashladne sezone. Analizira se period vazdušnog grijanja od 1. novembra do 1. aprila, odn. hlađenja od 1.maja do 1.oktobra, u Podgorici. Temperatura atmosferskog vazduha smatra se približno jednakom temperaturi tla na površini tla ( $z=0$ [m]) te je u ovom radu korištena ista jednačina Kasude, za opis temperature atmosferskog vazduha, kao za površinu tla.

Na ovaj način usvojena zavisnost temperature atmosferskog vazduha u ovom radu predstavlja *osrednjenu dnevnu temperaturu vazduha u funkciji vremena* i ne uzima u obzir dnevna gibanja temperature. U analizi datoj u ovom radu vazduh neprekidno struji kroz geotermalni razmjenjivač 24 [h/dan]. U tabeli T. 1. date su srednje mjesečne temperature vazduha u Podgorici za period od jedne godine, iz [6] korištene za definisanje jednačine (1). Na sl. 2. dat je grafički prikaz jednačine (1).

Tabela T.1. Neki klimatski podaci za Podgoricu (I klimatska zona).

Mjesec	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Avg	Sep	Okt	Nov	Dec
TSR[°C]	5.5	6.5	10.0	13.8	19.8	24.5	26.7	26.5	20.7	16.0	10.8	6.5
$\Delta T_d$ [°C]	5.8	7.6	7.5	5.6	6.8	4.4	4.8	7.9	7.2	6	6.4	4.3

Granični uslov za temperaturu na granicama geometrije je Dirihleovog tipa – definisan jednačinom Kusude [1]:

$$T(z, t) = T_a + A_0 e^{(-z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{a \cdot god}})} \cdot \sin\left(\frac{2\pi(t - t_0 + \Delta t_{START})}{365} - z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{a \cdot god}} - \frac{\pi}{2}\right) \quad (1)$$

gdje su:

- $T_a = 15.6$  [°C] srednja godišnja temperatura vazduha u Podgorici,
- $A_0 = 10.6$  [°C] godišnja amplituda temperature vazduha u Podgorici,
- $a = 6.7 \cdot 10^{-7}$  [ $m^2/s$ ] usvojena toplotna difuzivnost tla, za:  $\lambda = 1.75$  [ $W/mK$ ],  $\rho = 2860$  [ $kg/m^3$ ],  $c = 910$  [ $J/kgK$ ],
- $god = 365 \times 24 \times 3600$  [ $\frac{s}{god}$ ] vremenski interval od 1 godine u [s],
- t vremenska koordinata u [dan] od 1. januara,

–  $t_0$  vremensko kašnjenje u [dan] od početnog trenutka (1. Jan) do trenutka kada se javlja minimalna temperatura vazduha; Usvojeno  $t_0 = 0$  jer je  $\min(T) = T_{JAN} = 5.5$  [°C],

–  $\Delta t_{START}$ , vremensko kašnjenje trenutka uključenja instalacije u [dan] u odnosu na početni trenutak na vremenskoj osi (1. Jan), npr. za režim grijanja to je 304 dana.

Profil temperature u funkciji dubine  $z$ [m] i vremena  $t$ [s] u tlu je zadat po jednačini Kusude (1), tj. daleko od centra problema. Na isti način zadata je promjena ulazne temperature vazduha koji ulazi iz atmosfere u geotermalni izmjenjivač, koristeći jednačinu Kasude za  $z = 0$ [m]. Zadati su algoritam, Power Law shema i  $k$ - $\epsilon$  model turbulencije za rješavanje sistema Reynoldsovih jednačina turbulentnog strujanja kroz cijev; Vremenska diskretizacija diferencijalnih jednačina je implicitna. Inicijalizacija polja temperature za početni trenutak je po formuli Kusude za neporemećeno stanje tla. Riješeno je 3D strujanje sa prenosom toplote u vazduhu i tlu u funkciji vremena.

### 3. ANALIZA REZULTATA

#### 3. 1. ENERGETSKA ANALIZA

Na osnovu polja brzine i temperature na izlaznom presjeku cjevovoda, sračunata je srednja temperatura vazduha na izlazu iz geotermalnog razmjenjivača u funkciji vremena. Na sl.5. prikazane su promjene sljedećih veličina za period od 1.novembra do 1. aprila (ukupno 151 dan):

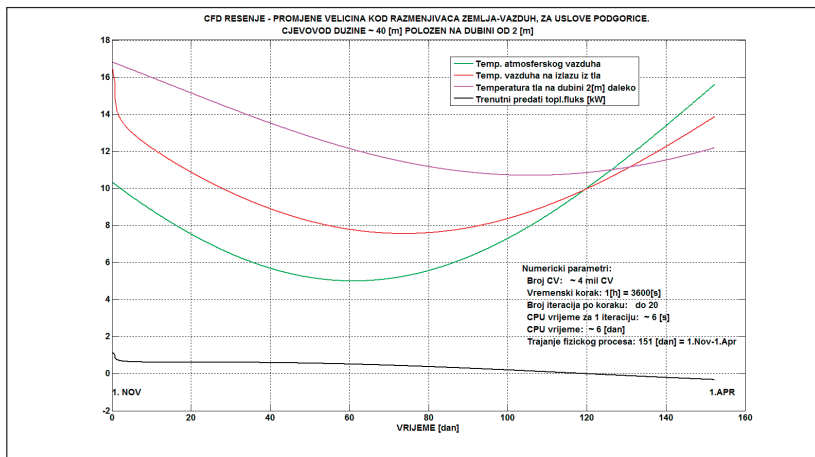
- Temperatura atmosferskog vazduha u [°C]:  $T_{OK} = f(t)$
- Temperatura vazduha u [°C] na izlazu iz razmjenjivača:  $T_{IZV} = f(t)$  ;
- Temperatura tla u [°C] daleko od razmjenjivača na dubini od:  $-2$  [m]:  $T_{2m} = f(t)$ ;
- Grejni kapacitet razmjenjivača [kW]:  $\dot{Q} = f(t)$ .

Izlazna temperatura vazduha sračunata je numerički iz podataka na izlaznom poprečnom presjeku, koristeći izraz:

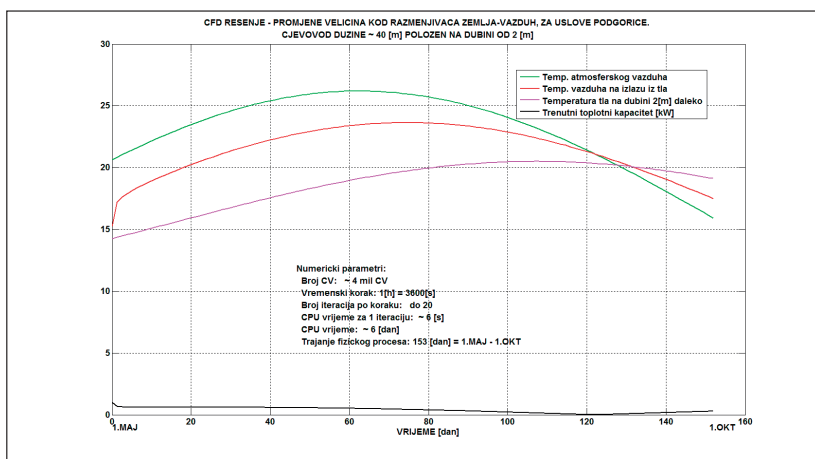
$$\bar{T}_{IZ,v} = \frac{\iint \rho c_{Pv} v T dA}{\dot{m}_v c_{Pv}} = \frac{\iint v T dA}{\dot{V}_v} \quad (1)$$

Vrijednost srednje temperature na izlazu je sračunata naknadno numerički obradom podataka o temperaturi, brzini i numeričkoj mreži na izlaznom presjeku. Na sl. 5. prikazana je efikasnost  $\epsilon$  [%] razmjenjivača toplote, dobijena iz sljedeće definicije:

$$\epsilon = \frac{T_{V,IZ} - T_{V,UL}}{T_Z - T_{V,UL}} \quad (2)$$



a) Grijanje

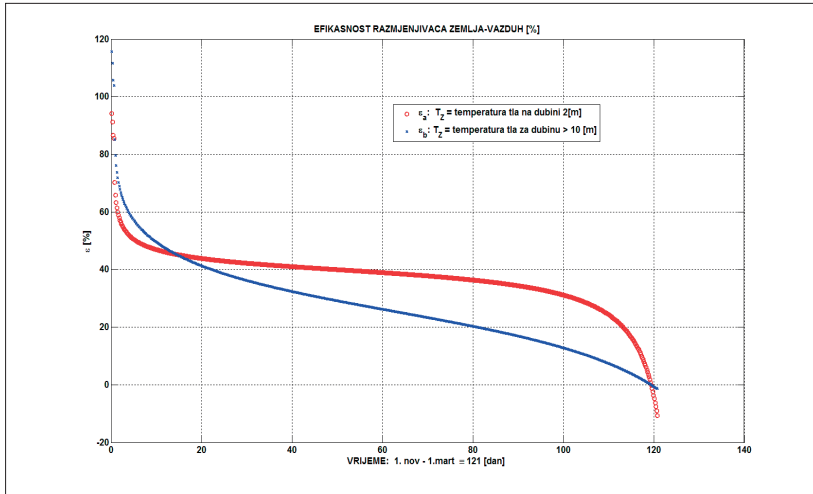


b) Hlađenje

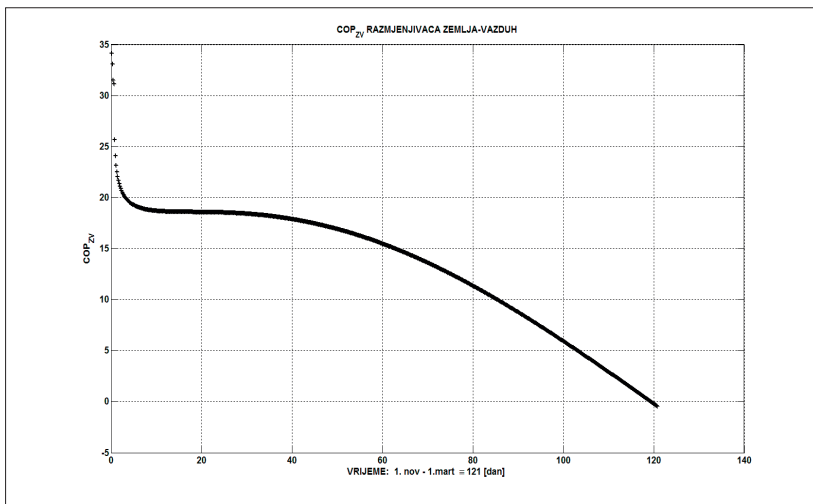
Sl. 5. Sračunate veličine na osnovu numeričkog rješenja:

$$T_{V,IZ}, \varepsilon, Q, i T_{UL}$$

gdje su:  $T_{V,IZ}$  – srednja temperatura vazduha na izlazu iz razmjenjivača,  $T_{V,UL}$  ulazna temperatura (atmosferski vazduh),  $T_Z$  – temperatura tla (izvora toplote). Zavisno od konvencije pri definisanju, za temperaturu izvora toplote u izrazu (2) može se uzeti: a) temperatura neporemećenog tla na dubini od - 2 [m] na kojoj leži II-dio cjevovoda, b) temperatura tla na dubini pri kojoj su amplitude temperature jednake nuli (srednja atmosferska temperatura u toku godine) tj. 15.6 [°C]. Na sl. 6. su ove vrijednosti prikazane kao  $\varepsilon_a$  i  $\varepsilon_b$ , respektivno.



Sl.6. Efikasnost razmjenjivača u [%]: i – grijanje.



Sl. 10. COP – grijanje

Zavisno od definicije  $\varepsilon_a$  ili  $\varepsilon_b$ , dobija se srednja efikasnost u vremenskom periodu u kom razmjenjivač ima grejnu funkciju (do 1. marta) od: a) **40** [%], b) **30.5** [%]. COP geotermalnog razmjenjivača se može definisati kao odnos dobijene količine toplote (fluksa) i snage koja se troši za pogon ventilatora:

$$COP_{ZV} = \frac{\dot{Q}}{P_V} = \frac{\dot{Q}}{\frac{\Delta p_{vaz} \cdot \dot{V}}{\eta_V}} \quad (3)$$

gdje su:  $COP_{ZV}$  grejni faktor razmjenjivača zemlja-vazduh („ZV“) [1], slika 10.;  $\dot{Q}$  – grejni kapacitet razmjenjivača [W];  $P_V \approx 24$  – snaga za pogon ventilatora [W];  $\eta_V \approx 0.5$  – ukupni stepen korisnosti ventilatora [1]. Srednja vrijednost  $COP_{ZV}$  u toku vremenskog perioda grijanja iznosi:  $\overline{COP}_{ZV} = 13.2$ , dok je ekvivalentna srednja vrijednost  $\sim 11$  i približno je jednaka u oba režima.

### 3.2. EKSERGETSKA ANALIZA SISTEMA

Eksergetska analiza sistema je urađena analizirajući fizičku eksergiju i zanemarujući ostale vrste eksergije (hemijska, kinetička, idr.) [7]. Eksergetska efikasnost ventilatora definiše se izrazom:

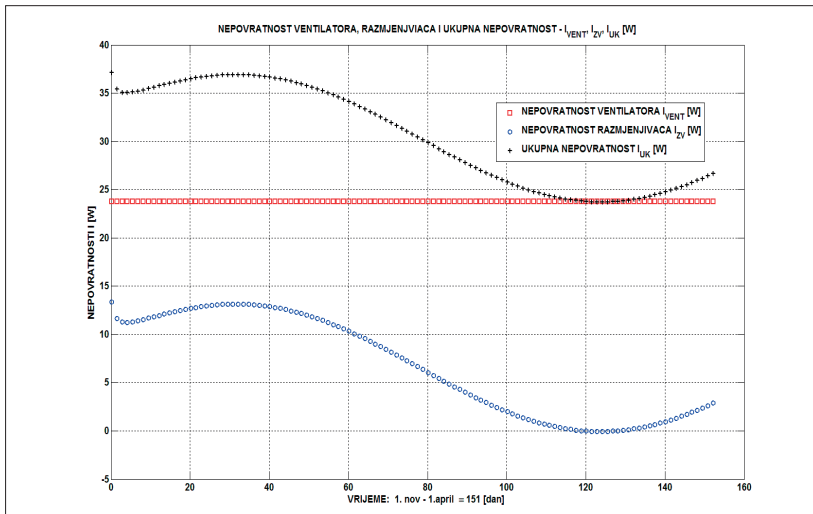
$$\varepsilon_V = \frac{\dot{E}_{X,IZ} - \dot{E}_{X,UL}}{\dot{W}_V} \quad (4)$$

Sračunata je eksergija koja se uništava za svaki dio sistema. Nepovratnost (uništena eksergija) u ventilatoru je:

$$\dot{I} = \dot{W}_V - \dot{m}_v(\psi_{v,IZ} - \psi_{v,UL}) \quad (5)$$

Nepovratnost u razmjenjivaču zemlja-vazduh je:

$$\dot{I} = \dot{m}_v(\psi_{v,UL} - \psi_{v,IZ}) - \sum \dot{Q} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (6)$$



Sl.7. Nepovratnosti u sistemu



Suma u posljednjem članu izraza (12) ima jedan sabirak – toplotni fluks koji iz tla ulazi u vazduh. Zamišljena kontrolna granica komponente razmjenjivača postavljena je na distanci od cijevi gdje je temperatura izvora toplote (tla)  $T$  – neporemećena temperatura tla na toj dubini. Srednja vrijednost ove temperature izvora toplote osrednjeno po cijeloj površini, približno je jednaka temperaturi tla na dubini na kojoj leži  $\Pi$ -dio cjevovoda ( $z=-2$  [m]). Za temperaturu okoline usvojen je atmosferska temperatura  $T_0$ . Količina toplote predata vazduhu računa se po izrazu:

$$\dot{Q} = \dot{m}_v c_{pv} (\bar{T}_{Iz,v} - T_0), \quad (7)$$

Eksergetski bilans sistema u analiziranom vremenskom periodu dat je na slici sl. 7. u formi prikaza nepovratnosti: ventilatora  $I_{VENT}$ , razmjenjivača zemlja-vazduh  $I_{ZV}$  i ukupne nepovratnost  $I_{UK}$ , u [W].

#### 4. ZAKLJUČAK

Sprovedena analiza je pokazala da se ovom instalacijom u klimatskim uslovima Podgorice može postići zagrijavanje atmosferskog vazduha uz efikasnost razmjenjivača od oko 40% i srednji sezonski COP geotermalnog razmjenjivača zemlja-vazduh od  $\sim 13$ . Ekvivalentni sezonski COP, uzimajući u obzir relativni intenzitet toplotnog opterećenja u toku sezone, iznosi oko 11 u oba režima. Potrošnja energije za pogon sistema je samo od napora ventilatora potrebnog za savlađivanje otpora cjevovoda. Analiziran je najnepovoljniji slučaj kada vazduh struji neprekidno (kao u slučaju pasivne kuće). Konstatuje se da analizirani razmjenjivač gubi svoju grejnu funkciju oko 1. marta zbog trenda porasta temperature atmosferskog vazduha, odn. nakon 4 mjeseca neprekidnog rada. Analogna pojava registruje se u rashladnom režimu rada oko 1.sept (neprekidni rad od 1.maja – 1.oktobra).

Srednji grejno/rashladni kapacitet razmjenjivača iz ove analize je rel. mali (1 kW, za 40m cjevovod) jer je promjena temperature vazduha u prosjeku  $\sim 3$  [°C]. Međutim, važna osobina ovog sistema je činjenica da tlo kao akumulator termičke energije (inercije) djeluje kao prigušivač-integrator dnevnih oscilacija temperature, pa će se kuća (ili termotehnička instalacija, toplotna pumpa) napajati ujednačenom (povoljnijom) temperaturom vazduha i u intervalima dana sa povećanim toplotnim opterećenjem (usljed solarnog zračenja). Zbog termičke inercije tla, promjena temperature vazduha u ovim periodima će biti veća od gore navedene srednje temperaturske razlike. Za razliku od toga, klasična rješenja sa vazdušno hlađenom toplotnom pumpom nemaju ovu osobinu već toplotna pumpa mora da trpi dnevne promjene temperature atmosferskog vazduha sa kojim radi, u pu-

nom intenzitetu. Ova osobina analiziranog sistema je korisna i sa aspekta energetske efikasnosti sistema i sa aspekta ujednačenog rada kompresora pri manjim pritiscima.

U režimu hlađenja, zbog povoljne temperaturske razlike između vazduha i tla, moguće je i direktno hlađenje bez uključivanja toplotne pumpe.

## LITERATURA

- [1] G. Florides, S. Kalogirou. Measurement of ground temperature measurements at various depths. Higher Technical Institute, Nicosia, Cyprus.
- [2] O. Ozgener, L. Ozgener. Determining the optimal design of a closed loop earth to air heat exchanger for greenhouse heating by using exergoeconomics. *Energy and Buildings* 43 (2011) 960–965.
- [3] A. Yildiz, O. Ozgener. Exergetic performance assessment of a solar photovoltaic cell (PV) assisted earth to air heat exchanger (EAHE) system for solar greenhouse heating. *Energy and Buildings* 43 (2011) 3154–3160.
- [4] O. Ozgener, L. Ozgener. Exergoeconomic analysis of an underground air tunnel system for greenhouse cooling system. *International Journal of Refrigeration* 33 (2010) 995–1005.
- [5] R. Wagner, S. Beisel, A. Spieler, K. Vajen. Measurement, modeling and simulation of an earth-to-air heat exchanger in Marburg (Germany). 4. ISES Europe Solar Congress, Kopenhagen, Danemark, 2000.
- [6] Priručnik: Energetska efikasnost zgrada. Univerzitet Crne Gore – Mašinski i Arhitektonski fakultet. Podgorica 2011.
- [7] T. J. Kotas. *The Plant Exergy Method of Thermal Plant Analysis*, textbook. Anchor Bendon Ltd. GBR.
- [8] Waldsee BioHaus: <http://waldseebiohaus.typepad.com/>
- [9] Passivhaus Institut, Darmstad: <http://www.passiv.de/>
- [10] REHAU: <http://www.rehau.com/>