

Милош Ј. Бањац

Машински факултет, Универзитет у Београду, Београд, Србија

Експериментално одређивање топлотних својстава земљишта као извора топлоте за геотермалне топлотне пумпе

Оригинални научни рад
UDC: 502.171:662.997:550.836

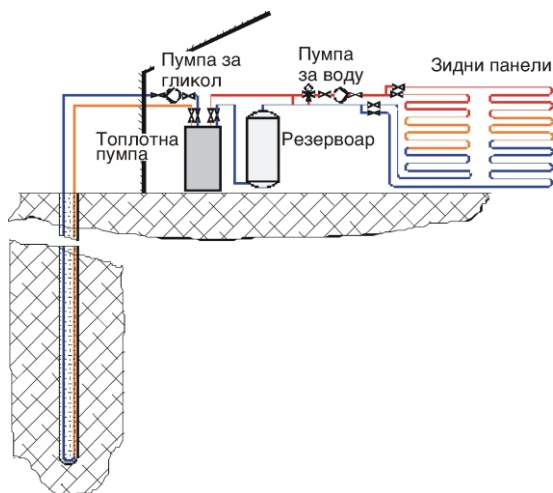
Приликом пројектовања система грејања са геотермалном топлотно-енергетском енергијом земља-вода, подаци о топлотно-енергетској проводљивости земљишта и њеној температури су кључни параметри при димензионисању спољашњег дела система – вертикално уграђених измењивача топлоте. У овом раду описана је једна од метода за експериментално одређивање ових параметара, изв. топлотно-енергетског одзива. У прилогу описане експерименталне процедуре и инсталације, приказивањем експерименталних података, у раду је дајна и теоријска основа методе као и главни ограничавајући фактори за њену примену.

Кључне речи: *топлотно-енергетско одзива, топлотна проводљивост земљишта, геотермалне топлотне пумпе*

Увод

Са првом нафтном кризом, почетком 70-тих година прошлог века, када су започети бројни програми за развој и коришћење обновљивих извора енергије, долази и до првог значајнијег развоја тзв. система грејања с геотермалним топлотним пумпама. Ови системи централног грејања, који се састоје од хоризонтално или вертикално, у земљу укопаног измењивача топлоте, топлотне пумпе, и система за унутрашњу дистрибуцију топлоте (сл. 1), због своје изузетне енергетске ефикасности, али и једноставности и трајности постројења, као и услед рада у складу са концептом обновљивости, одрживости и децентрализованости енергетског извора, налазе све

Електронска адреса аутора; mbanjac@mas.bg.ac.rs



Слика 1. Шематски приказ система грејања геотермалном топлотној пумпом и вертикалним у земљу укопаним размењивачем топлоте

У оба случаја било за хоризонтално или вертикално укопане размењиваче, спровођењем низа теоријско–експерименталних поступака, релативно брзо се дошло до употребљивих методологија за њихово димензионисање [2, 3]. У случају вертикално укопаних размењивача, због велике непоузданости или чак недостатка података о топлотним својствима земљишта на већим дубинама, показало се да тако добијени резултати нису баш поуздани. Стога се, а да би се избегло прецизионисање размењивача, чиме би се беспотребно повећавали инвестициони трошкови, односно да би се избегло њихово потдимензионисање, чиме би се директно нарушила функционалност и стабилност рада читавог грејног система, приступило се тражењу одговарајуће експерименталне методе којом би се могло, релативно брзо и довољно тачно, да одреде потребна топлотна својства земљишта.

Било је покушаја да се до такве методе дође на основу аналитичких израза, који представљају решење проблема провођења количине топлоте у бесконачном цилиндру великог пречника са линијским топлотним извором смештеним унутар њега. Ипак, због компликованости аналитичких израза и захтевности у процедури, од таквог приступа се одустало. Као једина, довољно прецизна, а истовремено лака за спровођење, издвојила се тзв. метода теста топлотног одзива земљишта (*termal response test*). Ову методу, која се заснива на коришћењу аналитичког израза за решење проблема с линијским топлотним извором у бесконачном масиву, те на аналогији с изразом који даје везу између хидропотенцијала земљишта и хидро-издашности бунара (*Thiem test*), први је предложио Моргенсен [4] и истовремено експериментално потврдио употребљивост методе. Засновану на истим теоријским основама, године 1995. Елкеф и др. [5] праве прву мобилну апаратуру, која им омогућава, да на бушотинама обављају одређивање средње температуре и тзв. ефективне топлотне

ширу примену при коришћењу обновљивих извора енергије у свету, са годишњим растом од преко 10% [1].

Велика популарност ових система повукла је за собом и повећано интересовање за њихову оптимизацију, тј. проналажење метода који ће омогућити њихово оптимално димензионисање. При томе, будући да су стандардима већ биле дефинисане методе димензионисања унутрашњих инсталација подних или зидних панела, односно нискотемпературног радијаторског система, као једини прорачун, који недостаје, преостао је прорачун за димензионисање у земљу укопаних размењивача топлоте.

проводности земљишта¹. Од тада је овај метод у више наврата унапређиван и провераван, како експериментално [6, 7], тако и нумерички [8].

Због све шире примене система грејања с геотермалним топлотним пумпама и у нашој земљи, и потребе за што прецизнијим познавањем топлотних својстава земљишта, у раду је описана теоријска заснованост ове методе, предочена њена ограничења, а кроз приказ спроведеног експерименталног поступка и обраде добијених експерименталних података и показана њена практична примена.

Теоријске основе методе линијска теорија

До аналитичког решења проблема с линијским топлотним извором у хомогеном и изотропном бесконачном масиву може се доћи полагањем од партикуларног решења опште једначине за неустаљено провођење количине топлоте:

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} \quad (1)$$

за случај да се у тачки (x', y', z') налази тренутни, тачкасти топлотни извор² [9], тј.:

$$\vartheta - \vartheta_0 = \vartheta(x, y, z, t) - \vartheta_0 = \frac{Q_0}{8\sqrt{(\pi\lambda t)^3}} e^{-\frac{[(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2]}{4at}} \quad (2)$$

Узимањем да линијски топлотни извор може да буде представљен као збир у линију поређаних тачкастих извора, а за случај да је такав извор паралелан са осом z , и да пролази кроз тачку (x', y') , сумирањем партикуларних решења (1) по оси z' :

$$\vartheta - \vartheta_0 = \frac{Q_0}{8\sqrt{(\pi\lambda t)^3}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{[(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2]}{4at}} dz' \quad (3)$$

може се добити:

$$\vartheta - \vartheta_0 = \frac{Q_0}{4\pi\lambda t} e^{-\frac{[(x-x')^2 + (y-y')^2]}{4at}} = \frac{Q_0}{4\pi\lambda t} e^{-r^2/4at} \quad (4)$$

На сличан начин, интеграљењем претходног израза (4) по времену, могуће је обухватити и временски аспект рада топлотног извора. У општем случају, када је издашност извора промењива у времену, решење се добија интеграљењем:

$$\vartheta - \vartheta_0 = \frac{1}{4\pi\lambda} \int_0^t Q(t') e^{-\frac{r^2}{4a(t-t')}} dt' \quad (5)$$

¹ Средња интегрална вредност топлотне проводности свих слојева земље који се налазе у додиру с укопаним размењивачем топлоте

² Наведено решење важи за случај да полазна температура бесконачног масива износи $\vartheta - \vartheta_0$ и да је издашност тачкастог топлотног извора $Q = Q_0$ за $t = 0$, односно $Q = 0$ за $t > 0$

односно, у облику:

$$\vartheta - \vartheta_0 = \frac{\varphi_l}{4\pi\lambda} \int_0^t \frac{e^{-\frac{r^2}{4a(t-t')}}}{t-t'} dt \quad (6)$$

у случају да је издашност топлотног извора стална. Увођењем смене:

$$u = \frac{r^2}{4a(t-t')} \quad (7)$$

једн. (6) се може написати у облику:

$$\vartheta - \vartheta_0 = \frac{\varphi_l}{4\pi\lambda} \int_{\frac{r^2}{4at}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (8)$$

Интегрални чинилац у једн. (8) представља тзв. експоненцијални интеграл³. Приближно решење једн. (8), за $t \gg 5a/r^2$, са грешком мањом од 2% [5], може бити приказано у облику:

$$\vartheta - \vartheta_0 = \frac{\varphi_l}{4\pi\lambda} \ln \frac{4at}{r^2} - \gamma \quad (9)$$

Свођењем једн. (9) на облик:

$$\vartheta - \vartheta_0 = \frac{\varphi_l}{4\pi\lambda} \ln t - \frac{\varphi_l}{4\pi\lambda} \ln \frac{4a}{r^2} - \frac{\varphi_l}{4\pi\lambda} \gamma \quad (10)$$

може се уочити, да је у случају линијског топлотног извора сталне издашности φ_l , након неког временског периода $t \gg 5a/r^2$, промена температуре бесконачног масива на неком радијалном удаљењу од тог извора, нпр. на полупречнику $r = r_b$, функција само времена. Отуда, уколико се са k означи константа:

$$k = \frac{\varphi_l}{4\pi\lambda} \quad (11)$$

а са $C_1(r_b)$ константа:

$$C_1(r_b) = \frac{\varphi_l}{4\pi\lambda} \ln \frac{4a}{r_b^2} - \frac{\varphi_l}{4\pi\lambda} \gamma - \vartheta_0 \quad (12)$$

³ Аналитичко решење експоненцијалног интеграла представља суму бесконачног реда $E_1(x) = \int_x^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = -\gamma - \ln x + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{x^k}{k \cdot k!}$ где је са γ означена Ојлер-Машеронијева (Euler-Mascheroni) константа, $\gamma = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} - \ln n \right)$, чија приближна нумеричка вредност износи $\gamma = 0,577\ 215\ 664\ 9\dots$

једн. (10) може да се напише и као:

$$\vartheta(r_b) = k \ln t + C_1(r_b) \quad (13)$$

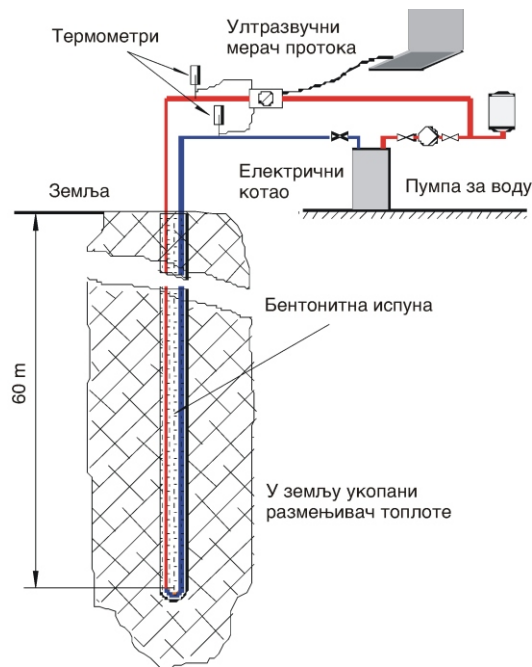
Употребом горе наведених услова, може се закључити да би топлотну проводност хомогеног и изотропног материјала бесконачног масива, познате почетне температуре ϑ , са линијским топлотним извором сталне и познате издашности φ_l , било могуће одредити само праћењем промене температуре тог масива на некој фиксној цилиндричној површи ϑr_b .

Експериментални поступак и резултати мерења

За разлику од претходно теоријски изведених једначина, које представљају аналитичко решење проблема с линијским топлотним извором сталне издашности у бесконачном масиву, самим експерименталним поступком симулира се дејство линијског топлотног извора, такође сталне издашности, али смештеног у полубесконачни масив. При томе, овим поступком се не узима у обзир ни промена температуре по дубини земље, нити дневна промена температуре површинских слојева земље. Ипак, будући да се ради о веома дугачком линијском извору, као и да је промена температуре по дубини земље релативно мала, односно да дневна колебања температуре земље захватају веома малу дубину, сматра се да они немају битан утицај на тачност добијених резултата.

Опис експерименталне инсталације

Експериментална инсталација, којом је обављено контролисано загревање земље, и праћење њеног термичког „одзива”, ради одређивања ефективне топлотне проводности земљишта, приказана је на сл. 2. Вер-



Слика 2. Шематски приказ експерименталне инсталације за одређивање ефективне топлотне проводности земљишта тестом његовог топлотног одзива

тикални, у земљу укопани размењивач топлоте, дужине 60 m, налазио се дворишту Машинског факултета Универзитета у Београду, а сама експериментална инсталација била је смештена непосредно поред њега у Лабораторији за термодинамку факултета.

Ради прецизности и поузданости мерења, као радни флуид била је употребљена вода. Она је, протичући кроз укопани размењивач топлоте, предавала земљи топлотну енергију, примљену у електричном котлу. Струјање воде било је обезбеђено радом Grundfos UPBasic 25-4 пумпе за воду, а за загревање воде употребљен је електрични топлотни катао ЕТК(Е)9 фирме „Термомонт”, грејне снаге 4,5 kW.

Као једина мерна опрема, у инсталацију је био уграђен ултразвучни мерач протока топлотне енергије SONOMETER™1000 фирме „Danfoss”. Будући да се у склопу овог ултразвучног мерача протока запремине воде налазе и два термо-пара РТ100, то су они били употребљени за мерење температуре воде на улазу у бушотину, односно на излазу из ње. Осим тога, SONOMETER™1000 је снабдевен микропроцесором, као и тзв. EPROM меморијом, тако да је, током трајања свих експеримената, помоћу њих, на свака 2 минута, обављано дискретно меморисање свих измерених величина. Ради приступа меморисаним подацима, преко тзв. М-BUS модула, извршено је повезивање SONOMETER™ 1000 са персоналним рачунаром.

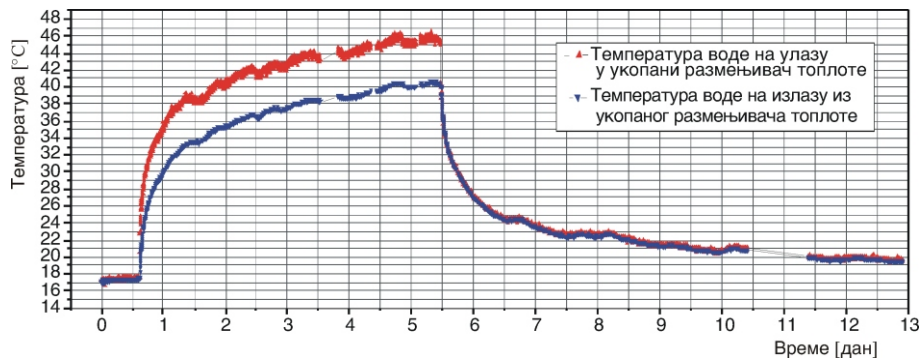
Процедура мерења

Као што је већ наведено, за одређивање ефективне топлотне проводности земљишта тестом његовог топлотног одзива, потребно је познавати температуру земљишта ϑ_0 , „ненарушеног” топлотним дејством, затим вредност издашности топлотног извора φ_l , и пратити промену температуре масива на некој фиксној цилиндричној површи $\vartheta(r_b)$.

Температура земљишта ϑ_0 , „ненарушеног” топлотним дејством, одређена је у тзв. припремној фази мерења, пуштањем у рад само пумпе за воду и мерењем промене температуре воде на улазу у бушотину, односно на излазу из ње. Иако је ова фаза трајала дуже од 12 часова, примећено је да се, већ након 20-ак минута, вредност температуре у оба водена тока изједначила и усталила на $\vartheta_0 = 17,3$ °C. На основу тога је закључено да средња температура земљишта, „ненарушеног” топлотним дејством, има управо ову вредност.

Издашност топлотног извора одређена је у фази „загревања” земље. Ова фаза, започела је укључивањем електричног котла и уследила је непосредно након припремне фазе, а трајала је 5 дана. При томе, од укупно 6 електричних грејача, била су укључена само 3, чиме је било обезбеђено да се води предаје око $3 \cdot 1,5 = 4,5$ kW топлотне снаге. Истовремено, стварна вредност оствареног топлотног протока ка земљи издашност топлотног извора φ_l мерена и бележена помоћу ултразвучног мерача протока топлотне енергије, имала је нешто мању осредњену вредност која је износила 4,489 kW.

Ради добијања података о промени температуре масива у некој фиксној цилиндричној површи $\vartheta(r_b)$, током фазе загревања земље, мерене су и бележене температуре воде на улазу у бушотину, односно на излазу из ње. Измерене вредности температура приказане су на сл. 4. На истој слици приказане су и вредности темпера-



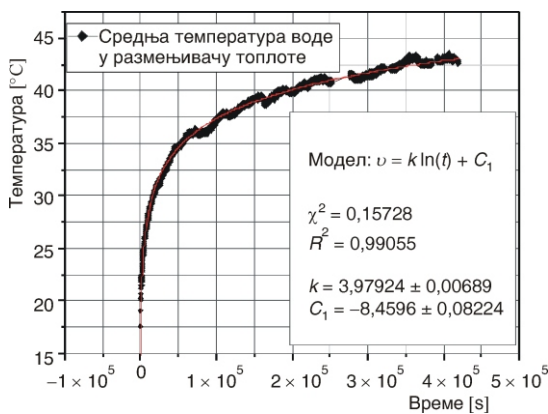
Слика 3. Промена температуре воде на улазу у укопани размењивач топлоте и на излазу из њега током „припремне” фазе, затим фазе „загревања” земљишта и фазе њеног повратка у полазно стање

тура које су измерене по завршетку фазе загревања искључења котла, у тзв. фази повратка у полазно стање.

Посиуиак обраде експерименталних података

Да би прикупљени експериментални подаци могли да се подведу под описану теорију, и тако послуже за одређивање ефективне топлотне проводности земљишта, најпре су издвојени само они подаци о промени температуре воде на улазу у бушотину, односно излазу из ње, који су прикупљени током периода загревања. Затим је, као аритметичка средина претходно издвојених температура, одређена промена средње температуре воде која струји кроз укопани размењивач, (сл. 4). Коначно, помоћу комерцијалног програма OriginPro 6.1, тестирана је хипотеза да промене ових резултата могу бити описане логаритамском функцијом, идентичној једн. (13).

Услов прихватљивости хипотезе био је, да претпостављена функција довољно добро описује експерименталне податке, ако се покаже да је њена поузданост већа од 98%. Поузданост је тестирана Пирсоновим (Pirson) „ χ^2 ” тестом. Одређивање константи k и C_1 урађено је итеративним поступком. Итерације су обављене у правцу смањивања вредности „ χ^2 ”. Итеративни поступак је обустав-



Слика 4. Промена средње температуре воде у размењивачу током фазе „загревања” и њена апроксимација функцијом $\theta = k \ln t + C_1$

љан када су вредности константи биле тако одређене да даљим итерацијама вредност „ χ^2 ” није могла да се смањи за више од 10^{-5} .

Са сл. 4, где су приказани резултати овог поступка, види се да, при вредностима константи $C_1 = 8,4596$ и $k = 3,97924$, ови експериментални подаци могу да се опишу с наведеном логаритамском функцијом с поузданошћу већом од 99%.

Под претпоставком да цеви укопаног размењивача, заједно са испуном од бентонита, чине хомоген изотропан и бесконачан ваљак, полупречника r_b , у чијој се средишној оси налази линијски топлотни извор, као и да је температура на површи тог ваљка управо једнака средњој температури воде која струји кроз размењивач, претходно одређена константа истовремено представља и истоимену константу у функцији, описаној једн. (13). На основу тога, а помоћу једн. (10), могуће је одредити ефективну топлотну проводности земљишта, тј.:

$$\lambda_{zem} = \frac{\varphi_l}{4\pi k} = 1,496 \text{ W/mK} \quad (14)$$

Закључак

Све распрострањенија примена геотермалних топлотних пумпи и коришћења земље као топлотног извора, били су узрок тражења експерименталне методе која ће бити у стању да довољно прецизно одреди локална топлотна својства земљишта, односно његов локални топлотни потенцијал. Обављањем теста топлотног одзива земљишта на вертикалном, у земљу укопаном размењивачу топлоте, дужине 60 m, уз детаљан приказ методологије мерења и обраде прикупљених података, показано је да овај тест представља поуздан и једноставан метод, којим је на већ постојећим бушоти-нама, могуће извршити одређивање претходно наведеног својства земљишта.

Литература

- [1] Luketina, K., Report on the World Geothermal Congress 2005, April 24-29, 2005, Antalya, Turkey
- [2] Poppei, J., Schwarz, R., Mattsson, N., Laloui, L., Wagner, R., Rohner, E., Innovate Improvements of Thermal Response Test, Intermediate Report, Commissioned by Swiss Federal Office of Energy (BFE), 2006, Zürich, Swiss
- [3] Cane, R. L. D., Clemes, S. B., Morrison, A., Hughes, P. J., Heat Exchanger Sizing for Vertical Closed-Loop Ground-Source Heat Pumps, Report No. DE-AC05-84OR21400, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, 1995, Tenn., USA
- [4] Morgensen, P., Fluid to Duct Wall Heat Transfer in Duct System Heat Storage, *Proceedings, International Conference on Surface Heat Storage in Theory and Practice*, Stockholm, June 6-8, 1983, 652-657
- [5] Eklöf, C., Gehlin, S., TED – a Mobile Equipment for Thermal Response Tests, M. Sc. thesis, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, 1996
- [6] Austin, W. A., Yavuzturk, C., Spitler, J. D., Development of an in Situ System for Measuring Ground Thermal Properties, *ASHRAE Transactions*, 106 (2000), 1, 365-379

- [7] Gehlin, S., Thermal Response Test-Method Development and Evaluation, Ph. D. thesis, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, 2002
- [8] Signorelli, S., Bassetti, S., Pahud, D., Kohl, T., Numerical Evaluation of Thermal Response Tests, *Geothermics*, 36 (2007), 2, 141-166
- [9] Carslaw, H. S., Jaeger, J. C., Conduction of Heat in Solids, 2nd ed., Oxford University Press, Oxford, UK, 1959

Abstract

Experimental Determination of Thermophysical Characteristics of Soil as a Heat Source for Geothermal Heat Pumps

by

Miloš J. BANJAC

Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

When designing the geothermal heat pump heating system of the ground-water type, data on thermal conductivity of soil and its temperature are key parameters for dimensioning the outer part of the system – vertically buried heat exchangers. In this paper, one of the methods of experimental determination of these parameters, a so-called thermal response test, is presented. In addition to the description of the experimental procedure and installation, through the presentation of experimental data, the paper describes theoretical basis of the method, and presents its main limitations.

Key words: *thermal response test, thermal conductivity of soil, geothermal heat pumps*

Author's e-mail: mbanjac@mas.bg.ac.rs

Рад примљен: 20. фебруара 2010.
Рад прихваћен: 8. марта 2010.