Eksperimentalno i teorijsko istraživanje geotermalne dizalice topline

Boban, Luka

Doctoral thesis / Disertacija

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:463892

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb





Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

Luka Boban

EKSPERIMENTALNO I TEORIJSKO ISTRAŽIVANJE GEOTERMALNE DIZALICE TOPLINE

DOKTORSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

Zagreb, 2019.



University of Zagreb

Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture

Luka Boban

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL RESEARCH OF GEOTHERMAL HEAT PUMP

DOCTORAL THESIS

Supervisor:

Prof. Vladimir Soldo, PhD.

Zagreb, 2019.

Podaci za bibliografsku karticu UDK:

Ključne riječi:	plitka geotermalna energija dizalica topline bušotinski izmjenjivač topline toplinska svojstva tla
Znanstveno područje:	Tehničke znanosti
Znanstveno polje:	Strojarstvo
Institucija:	Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje
Mentor:	prof. dr. sc. Vladimir Soldo
Broj stranica:	128
Broj slika:	79
Broj tablica:	18
Broj korištenih bibliografskih jedinica:	136
Datum obrane:	30. travnja 2019.
Članovi Povjerenstva za ocjenu i obranu doktorskog rada:	prof. dr. sc. Antun Galović – predsjednik izv. prof. dr. sc. Marino Grozdek – član izv. prof. dr. sc. Tomislav Kurevija – vanjski član
Institucija u kojoj je rad pohranjen:	Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje

IZJAVA

Izvedeni bušotinski izmjenjivač topline i geotermalna dizalica topline korišteni u sklopu ovoga rada, kao i uređaj za provođenje mjerenja toplinskog odziva tla te oprema za distributivno mjerenje temperature osigurani su u sklopu projekta *Istraživanje i promocija plitkih geotermalnih potencijala u Republici Hrvatskoj*. Nositelj je projekta Fakultet strojarstva i brodogradnje, a financiran je sredstvima Europske unije pod brojem ugovora *IPA2007/HR/16IPO/001-040506.*

ZAHVALA

Provedba doktorskog istraživanja i izrada ovog rada bio je dugotrajan proces koji ne bi bio ni započet bez dr. sc. Vladimira Solde, prof. Ovim mu putem iskreno zahvaljujem na svim savjetima, kritikama i komentarima koji su doprinijeli završetku doktorskog rada te na ukazanom povjerenju i podršci ne samo kod izrade ovog rada, već i kod svih profesionalnih, društvenih i životnih obveza koje su pratile moj dosadašnji rad.

Srdačno zahvaljujem članovima *Povjerenstva za ocjenu i obranu doktorskog rada* prof. dr. sc. Antunu Galoviću, izv. prof. dr. sc. Marinu Grozdeku i izv. prof. dr. sc. Tomislavu Kureviji, na uloženom trudu i vremenu te kvalitetnim komentarima koji su unaprijedili rad.

Svim svojim kolegama sa Zavoda za termodinamiku, toplinsku i procesnu tehniku hvala na podršci, svakom iskazanom interesu o napretku mog istraživanja, izdvojenom vremenu za raspravu, a ponajviše za rasterećenje od obaveza kako se rok izrade približavao kraju.

Hvala kolegama sa Hrvatskog geološkog instituta za susretljivost te dijeljenju znanja i iskustva u području geologije nephodnom za tematiku istraživanja.

Veliko hvala ide prijatelju i kolegi Anti Marušiću koji je uz sve svoje obveze pronašao dovoljno vremena za razmišljanje, razgovore i savjete oko unaprjeđenja modela te svojom upornošću uštedio nebrojene sate ukazujući na mjesta potencijalnih pogrešaka kada bi meni samome ponestalo ideja kako dalje.

Tijekom izrade istraživanja bilo je lijepih i uzbudljivih trenutaka, ali i vremena zabrinutosti, sumnje i manjka samopouzdanja. Veliko hvala obitelji i svim prijateljima na podršci i razumijevanju u trenucima sreće i brige.

Najveće hvala na bezuvjetnoj ljubavi, strpljenju i podršci supruzi Ivoni i sinu Bartulu, vlastitim nepresušnim izvorima sreće i najvećim motivatorima, koji su žrtvovali svoje vrijeme, planove i želje kako bi mi omogućili uvjete za rad i napredak.

Posvećeno Ivoni i Bartulu,
kojima ću konačno nadoknaditi sve
propuštene zajedničke trenutke.

SAŽETAK

Razvoj svijesti o utjecaju čovjeka na okoliš doveo je do niza mjera s ciljem povećanja energetske učinkovitosti, smanjenja emisija CO_2 i povećanja udjela energije iz obnovljivih izvora. Učinkovito rješenje za zadovoljavanje potreba za grijanjem i hlađenjem jesu dizalice topline povezane s tlom koje iskorištavaju plitku geotermalnu energiju. Iskorištavanje tog niskotemperaturnog izvora moguće je zbog postojanja toplinskog toka iz središta Zemlje uslijed zaostale topline formiranja jezgre i radioaktivnog raspada minerala. Potonji proces je kontinuiran te se stoga geotermalna energija ubraja u obnovljive izvore. Iako postoje različiti oblici povezivanja dizalice topline s tlom, u ovom radu obrađuje se indirektni sustav s vertikalnim bušotinskim izmjenjivačem u tlu.

Složene termogeološke uvjete u tlu u literaturi, kao i u stručnoj praksi, uvriježeno je opisivati s temperaturom toplinski neporemećenog tla, efektivnom toplinskom provodnosti i efektivnim toplinskim otporom bušotine. Sva tri parametra određuju se ispitivanjem toplinskog odziva tla na izvedenoj bušotini pri čemu se tlo zagrijava ili hladi poznatim toplinskim tokom kako bi se dobile temperaturne krivulje medija na ulazu i izlazu iz bušotine. Za obradu toplinskog odziva tla najčešće se koristi analitički model beskonačnog linijskog izvora, dok se za složenije procese koriste modeli s konačnim izvorom te numerički ili hibridni numeričko-analitički modeli.

U odnosu na konvencionalno ispitivanje odziva tla u kojem se mjere samo temperature polaza i povrata iz bušotine, više podataka moguće je prikupiti distribuiranim mjerenjem temperature po dubini bušotine. Upotrebom većeg broja temperaturnih osjetnika ili jednog kabela s optičkim vlaknom, moguće je odrediti temperaturni profil neporemećenog tla te praćenjem odziva pojedinih slojeva odrediti vertikalnu razdiobu svojstava.

Za istu aritmetičku sredinu toplinskih provodnosti nehomogenog tla, redoslijed slojeva utječe na izlaznu temperaturu medija iz bušotine te u konačnici na efektivna svojstva dobivena iz ispitivanja toplinskog odziva. Različite konfiguracije heterogenog tla utječu i na razdiobu toplinskog toka po dubini bušotine za razliku od idealiziranog homogenog tla koje karakterizira linearna razdioba kao posljedica smanjenja razlike srednje temperature medija i tla s porastom dubine bušotine. Na temelju pregleda dostupne literature uočen je nedostatak istraživanja o utjecaju heterogenosti tla na dugoročni rad sustava dizalice topline povezane s tlom te je u tu svrhu na lokaciji Fakulteta strojarstva i brodogradnje izvedena istražna bušotina opremljena kabelom s optičkim vlaknom. Na samoj bušotini provedeno je prošireno distribuirano ispitivanje toplinskog odziva tla s dugotrajnim praćenjem oporavka tla nakon faze grijanja.

Određena je vertikalna razdioba svojstava tla iz faze grijanja i faze oporavka te je izmjeren temperaturni profil toplinski neporemećenog tla s primjetnim negativnim gradijentom kao posljedicom utjecaja zgrade fakulteta na okolno tlo. Numeričkim modelom simuliran je dugogodišnji utjecaj zgrade Fakulteta i uspješno je repliciran negativni temperaturnim gradijent. Dodatno je razvijen i model za proširivanje spoznaja o toplinskom otporu izmjenjivača u izvedbi s dvostrukom U cijevi zbog nedostatka analitičkih izraza u literaturi pri čemu je analiza provedena za slučajeve kada cijevi unutar bušotinskog izmjenjivača topline nisu simetrično postavljene.

Za potrebe simuliranja utjecaja heterogenog tla na rad dizalice topline odabran je otporničko-kapacitivni pristup modeliranju izmjenjivača topline u tlu. U navedenom modelu domena tla podijeljena je na *n* koncentričnih cilindara i *m* vertikalnih slojeva tla. Svaka ćelija tla u toplinskom je dodiru sa susjednim ćelijama iznad, ispod te ispred i iza nje. Izuzev ćelija u zadnjem radijalnom segmentu tla koje su u dodiru s toplinski neporemećenim tlom te u prvom segmentu gdje je definirana veza tla i bušotinskog izmjenjivača preko temperature zida bušotine. Unutar bušotine ispuna je podijeljena u dva dijela, središnji i vanjski, a svaka cijev i fluid u pojedinom presjeku modelirani su zasebno. Ulazni parametar u model bušotine i tla su protok i temperatura medija kroz izmjenjivač topline, a izlazni temperaturno polje u promatranom trenutku, odnosno izlazna temperatura iz bušotine. Validacija modela tla provedena je s beskonačnim linijskim izvorom za dugoročni odziv tla, a model bušotine i tla s dostupnim rezultatima numeričke simulacije za kratkoročni odziv tla. Model uspješno replicira izlaznu temperaturu medija iz bušotine izmjerenu tijekom ispitivanja toplinskog odziva tla, a u sezonskoj simulaciji ta je temperatura ulazni podatak za model dizalice topline. Model dizalice topline rekonstruiran je na temelju provedenih višednevnih mjerenja sustava u radu te je uspješno primijenjen za analizu nehomogene razdiobe svojstava tla na sezonsku učinkovitost sustava u sezoni grijanja i hlađenja za različite temperaturne profile toplinski neporemećenog tla.

Ključne riječi:

plitka geotermalna energija

dizalica topline

bušotinski izmjenjivač topline

toplinska svojstva tla

EXTENDED ABSTRACT

Increased awareness about the anthropogenic impact on the environment is the basis of efforts made to increase energy efficiency and environmental conservation in different aspects of human activity. This applies in particular to the building sector in the European Union, which is an important contributor in the final indicators such as CO_2 emissions and final energy consumption. The European Energy and Climate Strategy 2030, besides emissions reduction, places emphasis on the production of energy from renewable sources. One of the most efficient solutions for meeting the needs for heating and cooling are ground coupled heat pumps that are classified into renewable energy sources.

Heat pumps do not need high temperature sources as they exploit shallow geothermal energy resulting from the existence of a heat flux from the center of the Earth due to the residual heat of core formation and radioactive decomposition of minerals. The latter process is continuous, therefore geothermal energy is considered to be renewable source. Although different types of connection of the heat pump to the ground exist, in this thesis vertical borehole heat exchanger with double U pipe is investigated. The main obstacle to the wider application of this technology is high investment costs. In order to exploit the shallow geothermal energy for heating and cooling in efficient and financially competitive way, it is necessary to know the thermal properties of the ground and to properly size the system of the heat pump coupled to the ground. Complex thermogeology conditions in the underground and undisturbed ground temperature usually cannot be modeled directly using analogy for differing geographical locations. It is common in literature to represent borehole conditions by means of undisturbed ground temperature, effective thermal conductivity and effective borehole thermal resistance.

The latter being influenced by flow regime, geometrical and physical properties of used materials. All three parameters are obtained by application of thermal response test (TRT) on borehole heat exchanger, during which the ground is heated or cooled by prescribed heat flux while fluid inlet and outlet temperatures from the borehole are monitored. Application of suitable model results in thermal properties needed for sizing procedure. Commonly, infinite line source model is used to evaluate the thermal response test data, as long as the test is carried out in accordance with simplifications introduced by the model. More complex phenomenon’s are modeled using finite line modifications or by application of numerical models.

Compared to the conventional TRT, which measures only borehole inlet and outlet temperatures, more data can be collected by distributed temperature measurement along the

borehole depth. Using a larger number of temperature sensors or one fiber optic cable, it is possible to determine the temperature profile of the undisturbed ground and to determine the vertical distribution of underground properties by monitoring the response of the individual layers.

The temperature profile in the upper layers up to a depth of 10-20 m is influenced by atmospheric conditions and artificial heat flows from the soil surface. At a depth at which the atmospheric effect disappears, a static temperature constant in time exists and with increasing depth temperature changes depending on the present geothermal gradient.

It has been shown that the order of the layers of heterogeneous ground profile, having same arithmetic mean thermal conductivity, influences the leaving temperature of the fluid from the borehole and consequently effective properties obtained from the thermal response test. The results of numerical simulations for different ground configurations indicate that the distribution of properties affects the distribution of the heat flow along the depth of the borehole, as opposed to the idealized homogeneous ground characterized by linear distribution resulting from a decrease in the temperature difference between the fluid and the surrounding ground.

Based on a review of the available literature, a lack of research into the impact of ground heterogeneity on the long-term operation of the ground-coupled heat pump system is found. For this purpose on the premises of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, an exploratory double U pipe borehole heat exchanger equipped with an optical fiber cable is coupled to a heat pump used for the heating and cooling of two classrooms. Borehole heat exchanger was subjected to 480 h long distributed thermal response test (DTRT) with heating and recovery phase observed. Vertical distribution of ground thermal properties is obtained for both phases and conducted measurements were used for the comparison of different fluid temperature averaging procedures.

Undisturbed ground temperature profile show evidence of negative gradient characteristic to urban environment with artificial heat flows from the surface. Numerical 2D model was used to simulate long term effect of faculty building on surrounding ground and temperature profile was successfully replicated enabling the evaluation of the size of the temperature zone affected by heat transferred from building to the ground.

The numerical model has also been developed to expand the knowledge about the thermal resistance of the exchanger in a double U pipe configuration due to the lack of analytical expressions in the literature that are applicable to a wide range of configurations. Analysis is extended to cases where the tubes within the borehole are not symmetrically positioned.

For the purposes of influence evaluation of the heterogeneous ground on the operation of the

heat pump system, a resistance-capacity model approach is used for the description of heat exchanger and ground. In this model, the ground domain is divided into *n* concentric cylinders and *m* vertical layers. The temperature distribution around the periphery of the concentric cylinders is neglected, so that each cylinder is described with one vertex and a corresponding thermal capacity. Each cell of the ground is in thermal contact with adjacent cells above, below and before and behind it. Except for the cells in the last cylinder that are in contact with the undisturbed ground and in the first cylinder where the connection between the ground and the borehole is defined with temperature of the borehole wall. Inside the borehole, grouting is divided in two parts, one inner between pipes and other outer between pipes and borehole wall. Each tube and fluid inside it is modeled separately, where the heat capacity of the pipe is added to the grouting and the vertical heat transfer is modelled for the grouting part, but not for the pipes. Temperature distribution of the fluid in pipe cross section is disregarded as the fluid flow is modelled as 1D phenomenon and convective resistance is employed as coupling between fluid and pipe surface. The input parameter for borehole model is mass flow and inlet temperature whereas model calculates resulting temperature field for observed time step and outlet temperature. The ground model validation was performed quantitatively with the infinite line source for ground long-term response and borehole model is validated with available numerical simulation results for the short-term response. Comparison of the DTRT results model showed that the model successfully replicates the output temperature from the borehole, which is the used as input data for the heat pump model. The latter is based on long term measurements of system in operation and is successfully used to analyze how the system seasonal efficiency is influenced by different parameters with emphasizes on heterogeneous ground.

Objective and hypothesis of the research

The application of distributive temperature measurements during the thermal response test of the ground enables the determination of the vertical distribution of thermal properties and the actual temperature profile of undisturbed ground. The heterogeneity of the underground has a visible impact on the distribution of the heat flow along the depth of the well and influences the exit temperature of the fluid from the borehole heat exchanger. However, the long-term impact of the heterogeneous ground in relation to the idealized homogeneous ground on the operation of heat pump system has not been investigated in the available literature. Therefore, objective of the research is the experimental investigation of the geothermal heat pump system in operation, as well as the detailed simulation of the interaction of the heat exchanger and the

surrounding ground.

Hypothesis of the research are:

- the development of the numerical model of the borehole heat exchanger in ground allows estimating the influence of individual factors on the efficiency of the exchanger, the analysis of non-stationary changes, and validation with the measurements of the temperature distribution in the borehole
- system simulation and comparison with measured results allows quantifying the effect of ground heterogeneity on the seasonal efficiency of the geothermal heat pump and evaluation of the heat exchange between the conditioned area and the underground as a heat sink or source
- developed model enables better understanding of ground changes during system operation

Scientific contribution

The scientific contribution of the research includes the modeling of interaction between the heat pump and the heat exchanger in heterogeneous ground, and the analysis of the influence of the vertical distribution of thermal properties on the performance of the heat exchanger and the resulting temperature fields during the operation of the system.

Expanding the knowledge of the heat resistance of the borehole heat exchanger in a double U pipe configuration for which there are no analytical expressions applicable to a wide range of layouts as for the configuration of a single U pipe. By modeling the segment of the borehole, a possible range of thermal resistance in the case of asymmetric position of the tube inside the borehole is shown.

Analysis of the temperature profile of the thermal undisturbed ground with the aim of simplifying the determination of underground temperature based on limited available data and analyzing the temporal and spatial zone of the impact of the building on the temperature field in the underground.

Conclusion

The vertical distribution of thermal conductivity and thermal resistance was determined on the basis of the heating and the recovery phase, where it was observed that the prolongation of the recovery phase results in higher effective values of thermal conductivity and thermal resistance. Comparing the results from different stages of the DTRT, the effective properties determined at the earlier recovery stage best replicate the temperature curve for the overall measurement, and in relation to the heating phase, the specified conductivity is greater by 5 % and the resistance by 13 %. Comparison of different methods of averaging of fluid temperature showed that the arithmetic mean of the input and output results in higher effective properties than the actual profile, but without the distributed temperature measurement, the actual temperature

profile cannot be accurately determined.

The temperature profile of the thermal undisturbed ground showed a deviation from the geothermal gradient in the higher layers of ground, which is the result of years of interaction between the faculty building and the surrounding ground. The local minimum temperature was recorded about 42 meters below which the effects from the soil surface disappear and the temperature profile with depth changes according to the measured geothermal gradient of 0,037 ºC/m. The extrapolation of the geothermal gradient to the surface results in a temperature similar to the mean annual air temperature, while the development of the temperature profile with the analytical model replicates the temperature profile only if the ground temperatures are known. Along with the assumed heat flow of 2.35 W m^{-2}, the temperature field in the ground around the faculty building was simulated, and the underground temperature profile was replicated for a simulation duration of 40 to 50 years. Although the thermal disturbance does not spread in space at significant distances, in case of interference of the two parts of the building a local temperature increase of about 3 ºC is found.

The developed model was used to analyze the effect of underground heterogeneity on the efficiency of the system and showed that in addition to the sequence of ground layers, the effect on efficiency also has existing ground temperature profile which, depending on the depth of the borehole and the geothermal gradient. Different ground profiles have an impact on the efficiency of the system, but not to the extent that optimizing the field of the boreholes based on ground layers will achieve noticeable difference in seasonal efficiency.

Keywords:

shallow geothermal energy

heat pump

borehole heat exchanger

ground thermal properties

SADRŽAJ

IZJAVA I

Zahvala II

Sažetak IV

Extended abstract VI

Sadržaj XI

Popis slika XIII

Popis tablica XVIII

Popis oznaka XIX

1. Uvod 1

1.1. Geotermalna energija 1

1.2. Dizalica topline 5

1.3. Tlo kao toplinski spremnik 7

2. Pregled literature 11

2.1. Temperatura toplinski neporemećenog tla 13

2.2. Toplinska provodnost tla i toplinski otpor bušotine 16

2.3. Mjerenje toplinskog odziva tla 22

2.4. Beskonačni linijski model 25

3. Hipoteza i struktura rada 30

3.1. Cilj i hipoteza istraživanja 30

3.2. Znanstveni doprinos 30

3.3. Struktura rada 30

4. Opis sustava geotermalne dizalice topline 32

4.1. Lokacija 32

4.2. Geotermalna dizalica topline 33

4.3. Shema sustava i opis rada 34

4.4. Mjerno-akvizicijski sustav 35

5. Određivanje toplinskih svojstava tla 37

5.1. Temperatura toplinski neporemećenog tla 37

5.2. Provedba mjerenja 45

5.3. Srednja temperatura fluida i toplinski odziv tla 48

5.4. Vertikalna razdioba toplinskih svojstava tla 50

6. Modeliranje interakcije tla, bušotinskog izmjenjivača topline i dizalice topline 55

6.1. Kratki uvod o modelu 55

6.2. Model tla 55

6.3. Model bušotinskog izmjenjivača topline 57

6.4. Model fluida 59

6.5. Sustav jednadžbi 61

6.6. Validacija modela 61

6.7. Model dizalice topline 68

6.8. Sezonska interakcija dizalice topline i bušotinskog izmjenjivača topline 72

7. Sezonski rad dizalice topline u grijanju i hlađenju 75

7.1. Ulazni podaci – svojstva tla 75

7.2. Toplinski otpori unutar BIT-a 76

7.3. Satna simulacija rada sustava 80

7.4. Analiza utjecaja slojeva tla na rad sustava dizalice topline 82

8. Zaključak 90

Popis literature 93

Životopis 101

PRILOG A: Matlab kod modela tla i dizalice topline 103

PRILOG B: Radni parametri dizalice topline u režimu grijanja 125

PRILOG C: Radni parametri dizalice topline u režimu hlađenja 127

POPIS SLIKA

Slika 1-1 Prikaz strukture Zemlje te razdioba temperatura (u Kelvinima) po dubini, modificirano prema [8] 2
Slika 1-2 Primjer horizontalnog (*slinky* izvedba) i vertikalnog izmjenjivača topline u tlu (jednostruka i dvostruka U cijev te koaksijalna izvedba), izvor: *An introduction to ground-source heat pump technology* [17] 4
Slika 1-3 Shema dizalice topline (lijevo) i prikaz ciklusa u log *p-h* dijagramu (desno) 5
Slika 1-4 Granice sustava za izračunavanja SPF-a prema [18] 7
Slika 1-5 Usporedba temperature zraka (mjereni podaci) te temperature tla po mjesecima za različite dubine (modelirano prema Kasudi) 8
Slika 2-1 Usporedba mjerenih temperatura tla na dubini do 1 m (1990.-2005. godina) [54] i temperature zraka za meteorološku postaju Maksimir [20] 13
Slika 2-2 Otpornička Δ mreža za jednostruku U cijev 20
Slika 2-3 Prikaz vremena $t=5 \cdot Fo$ za tipične dimenzije bušotine i određene vrste tla 25
Slika 4-1 Prikaz lokacije bušotine (crveno) i kondicioniranih učionica (plavo) u sklopu Fakulteta strojarstva i brodogradnje 32
Slika 4-2 Poprečni presjek bušotinskog izmjenjivača topline (lijevo) i prikaz izmjenjivača s odstojnikom prilikom ugradnje (desno) 33
Slika 4-3 Dizalica topline s integriranim hidrauličkim modulom (lijevo) te akvizicijski sustav i elektro-regulacijski ormar u Tehničkoj sobi (desno) 34
Slika 4-4 Pojednostavljena shema sustava geotermalne dizalice topline (T-osjetnik temperature, REG-regulacijski sustav, PUx-cirkulacijska pumpa, CMx-mjerilo toplinske energije, AS-akumulacijski spremnik, HX-međuizmjenjivač, DT-dizalica topline, BIT-bušotinski izmjenjivač topline) 35
Slika 5-1 Očitanje temperature kabelom s optičkim vlaknom na različitim pozicijama te standardna devijacija očitanja za različite segmente bušotinskog izmjenjivača topline 37
Slika 5-2 Prikaz očitanja temperatura za nasumično odabrane slojeve tla 37
Slika 5-3 Profil temperature toplinski neporemećenog tla 38
Slika 5-4 Razvoj temperature tla Kasudinim modelom za plitke i duboke slojeve tla 39
Slika 5-5 Prosječna temperature tla na različitim dubinama za tri različita mjeseca 40
Slika 5-6 Razvoj profila temperature toplinski neporemećenog tla (lijevo) za 3. mjesec, prosječne vrijednosti temperature tla u ovisnosti o dubini od 0. metra (gore desno) te prosječne vrijednosti temperature tla u ovisnosti o dubini od 20. metra (dolje desno) 41

Slika 5-7 Prikaz modelirane domene te oznake razmatranih pozicija u odnosu na zgradu fakulteta 42
Slika 5-8 Razdioba temperatura u toplinski neporemećenom tlu (lijevo) te nakon 10 (sredina) i 50 godina (desno) konstantnog toplinskog toka u iznosu 2,35 W m^{-2} 43
Slika 5-9 Vertikalna (lijevo) i horizontalna (desno) razdioba temperatura u tlu na dubini 10 m 43
Slika 5-10 Temperaturni profili u ovisnosti o udaljenosti od toplinskog izvora u (t=50 godina) (lijevo) i utjecaj interferencije dvaju toplinskih izvora na lokalnu temperaturu (desno) (t=30 god) 44
Slika 5-11 Horizontalna razdioba temperatura na dubini 10 m za različite iznose gustoće toplinskog toka na površini 44
Slika 5-12 Lokalno povećanje prosječne temperature tla u ovisnosti o vremenu i udaljenosti od toplinskog izvora za bušotinu od 50 m (lijevo) i bušotinu od 100 m (desno) 45
Slika 5-13 Isporučeni toplinski tok tijekom DTRT-a te odstupanja toka u odnosu na prosječnu vrijednost 46
Slika 5-14 Temperaturni profili zraka i vode na ulazu i izlazu iz BIT-a tijekom DTRT-a (mjereno optičkim kabelom) 46
Slika 5-15 Srednja temperaturna očitanja s tri različita optička kabela na pozicijama u cijevi, na cijevi i u ispuni bušotine za vrijeme grijanja i oporavka tla 47
Slika 5-16 Analiza intervala za određivanje svojstava tla: osjetljivost s obzirom na promjenjivi početak i kraj intervala 48
Slika 5-17 Profil temperature izmjerene kabelom s optičkim vlaknom (crna linija) te aproksimacije aritmetičkom sredinom te p-linearnom metodom (lijevo 10. sat, sredina 50. sat, desno 100. sat) 49
Slika 5-18 Vremenska promjenjivost parametra p za razvoj profila temperature medija u BIT-u 49
Slika 5-19 Srednja temperatura fluida u cijevi za različite metode osrednjivanja u funkciji vremena te prirodnog logaritma vremena za izravno određivanje toplinskih svojstava tla (desno) 50
Slika 5-20 Rezultati TRT-a koristeći različite oblike osrednjavanja temperature fluida u BIT-u 50
Slika 5-21 Temperaturni profili za različite segmente (po 10 m) 51
Slika 5-22 Vertikalni profili temperature unutar cijevi tijekom perioda oporavaka 51
Slika 5-23 Isporučeni toplinski tok (W m^{-1}) po slojevima bušotine 52

Slika 5-24 Toplinska provodnost tla (lijevo) i toplinski otpor bušotine (desno) određeni u različitim fazama DTRT-a 53
Slika 5-25 Korijen srednjeg kvadratnog odstupanja za modelirane odzive tla za različita toplinska svojstva tla 53
Slika 6-1 Diskretizacija tla oko BIT-a 56
Slika 6-2 Opis mreže za proizvoljni segment tla 56
Slika 6-3 Prikaz otporničko-kapacitivne mreže za heterogeno tlo i veza s zidom bušotine 57
Slika 6-4 Presjek BIT-a s pripadnim toplinskim otporima i toplinskim kapacitetima ispune 58
Slika 6-5 Vertikalni segment bušotinskog izmjenjivača topline 60
Slika 6-6 Usporedba temperaturnih profila tla razvijenog modela i numeričkog 3-D modela (Fluent) 62
Slika 6-7 Usporedba profila temperatura tla s beskonačnim kontinuiranim linijskim izvorom 62
Slika 6-8 Usporedba temperaturnih profila za različita vremena otporničko-kapacitivnog modela s 3D modelom razvijenim u ANSYS Fluentu [133] 63
Slika 6-9 Temperaturne krivulje dobivene repliciranjem podataka iz literature [133] 63
Slika 6-10 Temperaturni profili za različite vremenske korake i trenutke simulacije (legenda se odnosi na sve dijagram) 64
Slika 6-11 Temperaturni profili za vremenski korak simulacije od 10 min 64
Slika 6-12 Usporedba modela s mjerenjima DTRT-a – crnim crtkanim linijama prikazane su krivulje temperatura dobivene otporničko-kapacitivnim modelom 65
Slika 6-13 Vertikalni profili za 120. sat DTRT-a 65
Slika 6-14 Vertikalni profili za 24. sat oporavka nakon DTRT-a 66
Slika 6-15 Usporedba temperaturnog profila zida bušotine homogenog i nehomogenog tla 66
Slika 6-16 Razdioba toplinskog toka po dubini bušotine za homogeno i nehomogeno tlo 67
Slika 6-17 Usporedba temperaturnih profila fluida s mjerenim rezultatima 67
Slika 6-18 Prikaz ljevokretnog procesa s ugrađenim međuizmjenjivačem topline 68
Slika 6-19 Učestalost pojavljivanja pojedine vrijednosti efikasnosti isparivača i kondenzatora u promatranom razdoblju grijanja 70
Slika 6-20 Korekcijska krivulja izentropske i volumetrijske efikasnosti za kompresor za različite kompresijske omjere 71
Slika 6-21 Usporedba mjerenih podataka i generirane mape dizalice topline za temperaturu kondenzacije 45 °C 72
Slika 6-22 Dijagram toka sezonske simulacije modela 74

Slika 7-1 Preddefinirani profili toplinske provodnosti, W m^{-1} K^{-1}, za analizu utjecaja vertikalne razdiobe svojstava na rad geotermalne dizalice topline 75
Slika 7-2 Usporedba unutarnjeg R_a, lokalnog R_b i efektivnog toplinskog otpora $R_{b,ef}$ za toplinsku provodnost tla od 1 (lijevo) i 3 W m^{-1} K^{-1} (desno) za različite provodnosti ispune i razmak između cijevi 77
Slika 7-3 Usporedba toplinskih otpora izračunatih višepolnom ekspanzijom u EED-u i numeričkom simulacijom za različite toplinske provodnosti ispune i razmak cijevi unutar BIT-a 78
Slika 7-4 Razdioba temperatura po obodu bušotine za različit razmak između cijevi (toplinska provodnost ispune 2 W m^{-1} K^{-1}) 78
Slika 7-5 Prikaz različitog položaja cijevi i oznaka promatranog slučaja 79
Slika 7-6 Usporedba mjerenih učina komponenti i onih dobivenih simuliranjem rada sustava 80
Slika 7-7 Usporedba temperatura isparavanja i temperaturnog režima na strani bušotinskog izmjenjivača topline (lijevo su mjereni, desno simulirani rezultati) 80
Slika 7-8 Relativno odstupanje modeliranih učina od mjerenih 81
Slika 7-9 Usporedba potrebne i isporučene energije potrošaču 81
Slika 7-10 Modelirane temperature na zidu bušotine u vremenu rada sustava i vremenu oporavka tla 82
Slika 7-11 Korigirano satno opterećenje prostora 82
Slika 7-12 Usporedba potrebne i isporučene toplinske energije za dio sezone grijanja (lijevo) i dio sezone hlađenja (desno) 83
Slika 7-13 Karakteristične temperature za profil tla B 83
Slika 7-14 Modelirani učini komponenti dizalice topline za profil tla B 84
Slika 7-15 Usporedba temperature isparavanja za 1. i 5. godinu simulacije 84
Slika 7-16 Temperaturni odziv tla na različitim udaljenostima od izmjenjivača topline 85
Slika 7-17 Faktori grijanja i hlađenja za profile tla A, B i C 85
Slika 7-18 Razlika izlaznih temperatura glikolne smjese za profile A, C i D u odnosu na profil B 86
Slika 7-19 Razlika ulaznih temperatura glikolne smjese za profile A, C i D u odnosu na profil B 87
Slika 7-20 Izoterme tla za 8760. sat u godini tijekom rada dizalice topline (stvarni profil temperature toplinski neporemećenog tla) 88
Slika 7-21 Izoterme tla za 8760. sat u godini tijekom rada dizalice topline (uniformna

temperatura toplinski neporemećenog tla od 14,1 °C) 89

POPIS TABLICA

Tablica 1-1 Toplinska svojstva karakterističnih materijala prema [12] 9
Tablica 2-1 Usporedba različitih metoda određivanja temperature tla [59] 15
Tablica 2-2 Pretpostavke uvedene kod provođenja TRT-a za različite analitičke modele: ILS-a, FLS-a i ICS-a 23
Tablica 2-3 Vremenski okvir relativnog odstupanja ILS modela u odnosu na FLS [110] 24
Tablica 4-1 Karakteristike bušotinskog izmjenjivača topline 33
Tablica 4-2 Specifikacija komponenti mjernog sustava 36
Tablica 5-1 Usporedba temperatura tla za različite dubine 41
Tablica 5-2 Efektivna svojstva tla iskazana kao prosječna vrijednost segmenata 53
Tablica 6-1 Opis rubnih uvjeta domene 56
Tablica 6-2 Ulazni podaci za opisani model 61
Tablica 6-3 Ulazni podaci za validaciju modela 61
Tablica 6-4 Popis ulaznih veličina za model dizalice topline 69
Tablica 6-5 Popis izlaznih veličina iz prve faze modela dizalice topline 69
Tablica 6-6 Popis ulaznih i izlaznih veličina iz druge faze modela dizalice topline 71
Tablica 7-1 Efektivna toplinska svojstva određena modelom linijskog izvora 76
Tablica 7-2 Toplinski otpori bušotine za različite položaje cijevi (m K W^{-1}) 79
Tablica 7-3 Faktori grijanja i hlađenja na razini godine za različite profile tla za temperaturni profil tla na lokaciji bušotine u Zagrebu 86
Tablica 7-4 Faktori grijanja i hlađenja na razini godine za različite profile svojstava tla i temperaturu tla bez geotermalnog temperaturnog gradijenata 88

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
a	$m^2\ s^{-1}$	Temperaturna provodnost
A	-	Matrica sustava jednadžbi
c	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$	Specifični toplinski kapacitet
C	-	Slobodni vektor sustava jednadžbi
D	m	Vanjski promjer
d	m	Unutarnji promjer
E	J	Energija
E_I	-	Eksponencijalni integral
f	-	Težinski faktor
G		Oznaka G funkcije
H	m	Visina, dubina bušotine
h	$J\ kg^{-1}$	Specifična entalpija
k	-	Koeficijent proporcionalnosti, nagib pravca, korekcijski polinom za izentropski stupanj djelovanja
L	m	Duljina
l	-	Odsječak pravca
N	-	Broj cijevi
n	-	Broj radijalnih podjela domene tla
Nu	-	Nusseltov broj
P	W	Snaga
p	-	Linearni koeficijent
Pr	-	Prandtlov broj
Q	J	Toplinska energija
q	$W\ m^{-2}$	Gustoća toplinskog toka
R	$m\ K\ W^{-1}$	Toplinski otpor po metru duljine
r	m	Polumjer
Re	-	Reynoldsov broj
s	m	Razmak između cijevi
T	K	Termodinamička temperatura
t	s	Vrijeme
z	m	Visina segmenta
α	$W\ m^{-2}\ K^{-1}$	Koeficijent prijelaza topline
β	-	Bezdimenzijska veličina za izračun toplinskog otpora
γ	-	Eulerova konstanta
δ	m	Debljina
ζ	-	Faktor trenja
ε	-	Faktor grijanja/hlađenja
η	-	Efikasnost
θ	-	Bezdimenzijska veličina za izračun toplinskog otpora
ϑ	°C	Celzijeva temperatura
λ	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$	Toplinska provodnost
v	$m^3\ kg^{-1}$	specifični volumen
ρ	$kg\ m^{-3}$	Gustoća
σ	-	Pomoćna vrijednost za izračun toplinskog otpora
Φ	W	Toplinski tok
Φ_L	$W\ m^{-1}$	Toplinski tok po metru duljine
Φ_V	$W\ m^{-3}$	Izdašnost toplinskog izvora

Indeksi	Opis
a, A	Unutarnji otpor bušotine
ampl	Amplituda
b	Bušotina, rub bušotine
C	Hladni spremnik
c	Cijev
DT, dt	Dizalica topline
ef	Efektivno
el	Električni
f	Fluid
gr	Grijanje, grijač
H	Topli spremnik
hl	Hlađenje
i	Isparavanje
is	Izentropski
isp	Isparivač, isparavanje
k	Šupljina, nagib pravca, kondenzacija
komp	Kompresor
kon	Kondenzator, kondenzacija
konv	Konvekcija
m	Maseni
min	Minimalno
nom	Nominalan
pol	Polaz
pov	Povrat
pump	Pumpa
r	Svojstva u radijalnom smjeru
RT	Radna tvar ljevokretnog procesa
sek	Sekundarni fluid
sr	Osrednjena vrijednost
u	Unutrašnji
uk	Ukupni
v	Vanjski, volumni
vol	Volumetrijski
z	Svojstva u vertikalnom smjeru

Skraćenice	Opis
BIT	Bušotinski izmjenjivač topline
COP	Faktor grijanja / hlađenja (engl. *coefficient of performance*)
DTRT	Distributivno ispitivanje toplinskog odziva tla (engl. *Distributed thermal response test*)
FLS	Model konačnog linijskog izvora (engl. F*inite line source*)
ICS	Model beskonačnog cilindričnog izvora (engl. *Infinite cylindrical source*)
ILS	Model beskonačnog linijskog izvora (engl. *Infinite line source*)
SPF	Faktor sezonske učinkovitosti sustava (engl. *seasonal performance factor*)
TRT	Ispitivanje toplinskog odziva tla (engl. *Thermal response test*)

1. UVOD

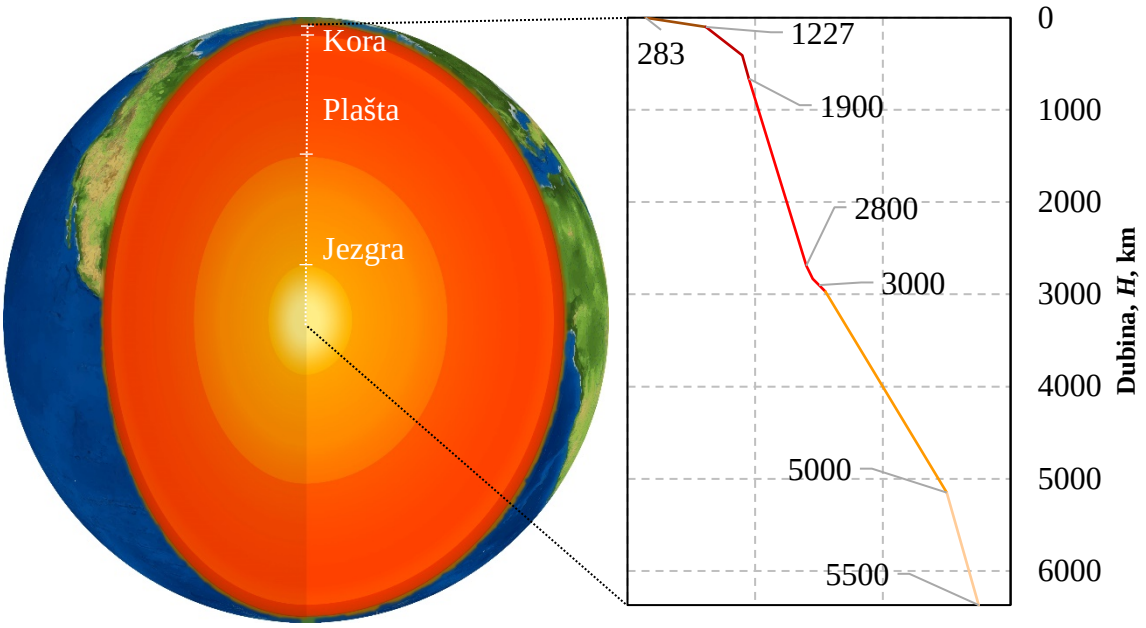
U Europskoj uniji sektor zgradarstva odgovoran je za 40 % potrošnje finalne energije te za 36 % emisija CO_2 [1]. Na grijanje, hlađenje i pripremu potrošne tople otpada oko 70 % potrošnje u zgradama u EU, a s obzirom na to da je udio neobnovljivih izvora u proizvodnji toplinske energije oko 80 % (prema podacima EUROSTAT-a za 2016. godinu) predstavljaju i značajan izvor emisija CO_2. U skladu s ciljevima europske energetske i klimatske Strategije 2030, a to su smanjenje emisija stakleničkih plinova za 40 % u usporedbi s razinama izmjerenim 1990. te 27 % energije generirano iz obnovljivih izvora, promovira se upotreba energetski učinkovitih rješenja. Jedno od takvih rješenja je iskorištavanje plitke geotermalne energije povezivanjem dizalica topline s tlom, koje direktiva Europske komisije 2009/28/EZ svrstava u obnovljive izvore energije [2]. Visoka učinkovitost pretvorbe energije i korištenje obnovljive energije iz okoliša omogućuje energijske uštede zbog smanjenja emisija CO_2 u odnosu na sustave s fosilnim gorivima u ovisnosti o strukturi elektroenergetskog sustava kao izvora energije za pogon [3]. U svojoj su studiji Bayer *et al.* [4] procijenili da je postojećim dizalicama topline povezanim s tlom u Europi u stambenom sektoru za potrebe grijanja ostvarena ušteda u emisiji CO_2 od 3,8 Mt, a da su moguće uštede i do 30 % u slučaju zamjene postojećih izvora topline s učinkovitim dizalicama topline. Ako se u razmatranje uzme i sezona hlađenja te priprema PTV-a, analiza usmjerena na primarnu energiju pokazala je da se primjenom dizalica topline potrošnja iste može smanjiti za 60 %, a pritom povećati udio obnovljive energije za 5,6 % u konačnoj potrošnji u EU-u [5]. Potencijal upotrebe geotermalnih dizalica topline prepoznat je u najrazvijenijim zemljama te ukupni ugrađeni toplinski učinak u svijetu iznosi 50 000 MW_t, uz kontinuirani prirast od oko 7 % godišnje [6]. Osnovna prepreka široj primjeni ove tehnologije na novim tržištima jesu visoki investicijski troškovi te nepovjerenje korisnika izazvano loše izvedenim sustavima. Kako bi iskorištavanje plitke geotermalne energije za grijanje i hlađenje bilo učinkovito te financijski konkurentno, nužno je poznavanje termogeoloških svojstava tla te pravilno dimenzioniran sustav dizalice topline povezane s tlom.

1.1. Geotermalna energija

Geotermalna energija oblik je energije sadržan u Zemlji, a rezultat je različitih toplinskih, mehaničkih i kemijskih procesa koji uključuju procese kristalizacije jezgre, skrućivanja magme, zaostalu topline zbog formiranja i postanka Zemljine jezgre te radioaktivni raspad minerala [7]. Kako je potonje kontinuiran proces, a uz zaostalu toplinu formiranja jezgre čini najveći izvor topline, geotermalna energije ubraja se u obnovljive izvore energije.

Strukturu Zemlje moguće je zamisliti kao niz koncentričnih kugli. Osnovni slojevi prikazani su

na Slika 1-1 (lijevo), kao i predviđena razdioba temperatura po slojevima Zemlje.



Slika 1-1 Prikaz strukture Zemlje te razdioba temperatura (u Kelvinima) po dubini, modificirano prema [8]

Zemljina jezgra nalazi se na dubini između 2900 km i 6370 km. Temperatura same jezgre procjenjuje se, ovisno o izvoru, u rasponu od 5000 do 6000 K. Unutarnja je jezgra kruta, dok je vanjska kapljevita, a sastoji se najvećim dijelom od željeza i nikla s primjesama lakših elemenata. Iznad jezgre nalazi se plašt, koji se također sastoji od više podslojeva, a na oko 700 km dubine nalazi se granica gornjeg i donjeg plašta. Temperatura tla se u ovom sloju, ovisno o debljini gornjeg plašta, smanjuje do temperature od oko 1000 K. Iznad plašta nalazi se Zemljina kora složene geološke strukture. Debljina ovog površinskog sloja varira od 5 do 8 km na oceanskom dnu te od 10 do 70 km u kontinentalnom dijelu, a na samoj površini temperatura tla rezultat je izmjene topline sa Zemljinom unutrašnjosti i atmosferom.

Rezultat postojanja razlike temperature po dubini Zemlje jest postojanje geotermalnog temperaturnog gradijenta, koji uzrokuje kontinuirani toplinski tok iz unutrašnjosti Zemlje prema njenoj površini. Prosječni iznos gustoća toplinskog toka po metru dubine iz unutrašnjosti zemlje iznosi 0,087 W m^{-2}, odnosno 44 TW toplinskog toka odvodi se s površine zemlje [9]. Veći dio tog toka odvodi se na oceanskom dnu gdje je debljina kore manja u odnosu na kontinentalni dio.

U literaturi se navode podjele geotermalne energije prema:

- namjeni – proizvodnja električne energije, industrija, grijanje procesa i prostora i sl.
- iskorištavanju – izravno i neizravno

- dubini – niska (do 400 m) i duboka (više od 400 m)
- temperaturi – niskotemperaturnu (do 90 °C), srednjetemperaturnu (90-150 °C), visokotemperaturnu (više od 150 °C) [10]

Podjela na plitku i duboku geotermalnu energiju često se koristi u literaturi, ali definiranje dubine kao granice ne govori ništa o mogućnostima iskorištavanja ni temperaturnoj razini iste. Mjesta specifične geološke građe omogućuju već pri manjim dubinama izravno iskorištavanje visokotemperaturnih izvora geotermalne energije ili primjenu istih za proizvodnju električne energije.

Za iskorištavanje tla kao spremnika toplinske energije njemačka norma VDI 4640 [11–14] razlikuje tri načina: podzemni sustavi akumulacije energije, izravno iskorištavanje i sustavi dizalica topline.

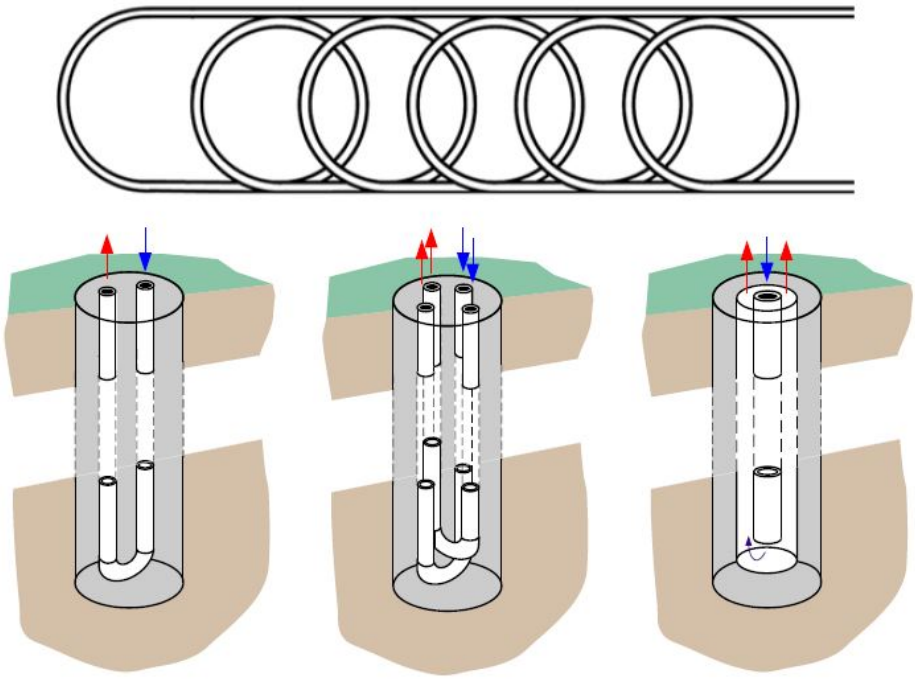
Podzemni sustav akumulacije energije koristi tlo kao spremnik za sezonsko skladištenje toplinske energije. Najčešće se skladišti sunčeva energija ili otpadna toplina iz industrijskih i energetskih procesa. Skladištenje energije moguće je korištenjem postojećih vodonosnika s niskim hidrauličkim gradijentom ili izvedbom bušotinskih izmjenjivača topline (skraćeno BIT). Iako je tlo toplinski spremnik, dominantan dio energije koji se koristi ovakvim sustavom nije izvorno geotermalna energija.

Izravna primjena geotermalne energije ovisi o temperaturnoj razini na kojoj se nalazi. Vruća voda iz tla primjenjuje se za potrebe grijanja staklenika, procese sušenja, zagrijavanje bazena i toplica, u sustavima daljinskog grijanja, za otapanje leda na prometnicama i slično [6]. Osim za grijanje, podzemna voda upotrebljava se i u pasivnim sustavima hlađenja, dok se kroz godinu povoljnija temperatura tla od temperature vanjskog zraka koristi za pretpripremu zraka u sustavima ventilacije [15].

Dizalice topline omogućuju neizravno iskorištavanje tla za potrebe grijanja i hlađenja kada temperatura tla nije dovoljna za izravnu primjenu. Sustavi s dizalicama topline dijele se na otvorene i zatvorene. Otvoreni sustav preko proizvodnog i utisnog zdenca izmjenjuje vodu s tlom te istu distribuira izravno ili preko međuizmjenjivača na isparivač dizalice topline. Međuizmjenjivač rezultira nižom polaznom temperaturom, ali osigurava jednostavnije održavanje sustava. Na lokaciji mora biti utvrđena izdašnost vodonosnika te ispitan kemijski sastav vode. Prilikom izvedbe sustava, a zbog izravnog iskorištavanja podzemne vode, nužno

je poštivati zakonske odredbe vezane uz količinu zahvaćene vode i primjenu dopuštenih materijala. Otvorene sustave karakterizira visoka učinkovitost rada zbog dobrih svojstava prijelaza topline na strani vode te izravnog dodira zahvaćene vode s tlom.

Kod zatvorenog sustava, bilo da je riječ o horizontalnoj ili vertikalnoj izvedbi, posredni prijenosnik energije struji kroz izmjenjivač topline u tlu. Osnovna prednost zatvorenog sustava u odnosu na otvoreni jest činjenica da korištenje sustava ne ovisi o postojanju i količini podzemnih voda. Horizontalni izmjenjivači topline zahtijevaju veliku površinu za ugradnju i relativno lako se ugrađuju. Dubina ugradnje obuhvaća slojeve pri samoj površini tla (na dubini 1-2 metra) i podložniji su utjecaju izmjene topline tla s atmosferom zbog dominantnog utjecaja izmjene topline zračenja na regeneraciju tla [16]. Horizontalni izmjenjivači mogu se ugraditi u različitim oblicima petlje, u paralelnom ili serijskom spoju, kako bi se smanjila potrebna površina tla za ugradnju. Razmak između cijevi (0,4-0,8 m) trebao bi biti takav da u što većoj mjeri smanji toplinsku interakciju različitih petlji, a duljina pojedine petlje ne smije biti takva da uzrokuje preveliki pad tlaka i povećanje utroška energije za pumpu (najčešće do 100 m). Kako bi se osigurao dobar prijenos topline, izmjenjivač se polaže i prekriva s pješčanim slojem prije zatrpavanja. Gustoća toplinskog toka ostvariva upotrebom ovakvih izmjenjivača varira od 8 do 40 W m^{-2} [12].



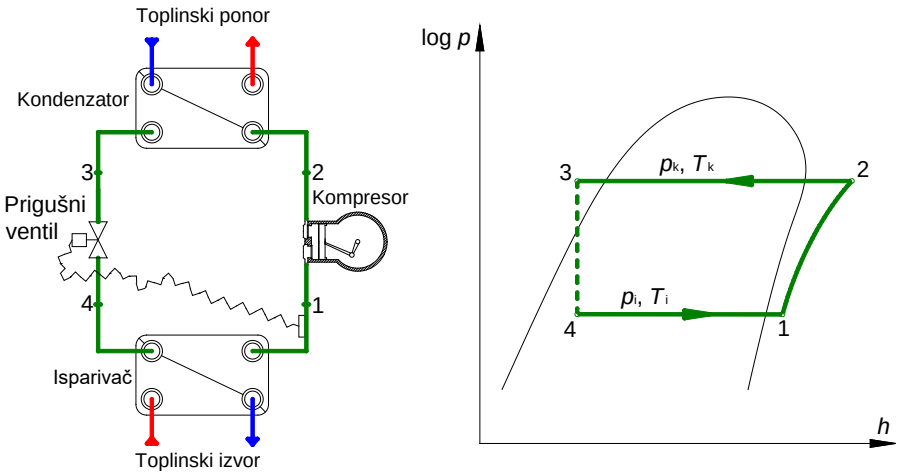
Slika 1-2 Primjer horizontalnog (*slinky* izvedba) i vertikalnog izmjenjivača topline u tlu (jednostruka i dvostruka U cijev te koaksijalna izvedba), izvor: *An introduction to ground-source heat pump technology* [17]

Vertikalni izmjenjivači topline zahtijevaju manju površinu za ugradnju, ali ih karakteriziraju visoki investicijski troškovi zbog složenih radova bušenja. Najbrojnije izvedbe sustava s

dizalicama topline koriste upravo bušotinske izmjenjivače topline. Dubine na koje se ugrađuju izmjenjivači iznose od nekoliko desetaka pa do 400 m. Zbog velike dubine ugradnje utjecaj atmosfere na izmjenu topline je zanemariv. Izmjenjivač izrađen od polietilena ili polipropilena ugrađuje se u bušotinu te se potom bušotina zapunjava ispunom visoke toplinske provodnosti. Ispuna osigurava dobar dodir izmjenjivača s tlom te osigurava bušotinu od urušavanja. Bušotinski izmjenjivači najčešće su u obliku jednostrukih i dvostrukih U cijevi ili formi cijev u cijevi (koaksijalni). Učinak vertikalnih izmjenjivača po dubini bušotine varira od 20 do 80 W m^{-1} [12].

1.2. Dizalica topline

Dizalica topline uređaj je koji korištenjem ljevokretnog procesa omogućuje prijenos topline iz spremnika niže u spremnik više temperature. Iako postoje različite izvedbe dizalica topline, za iskorištavanje geotermalne energije koriste se kompresijski uređaji. Radna tvar promjenom agregatnog stanja omogućuje izmjenu topline između toplinskih spremnika različite temperature. Osnovne komponente takvog procesa su isparivač, kompresor, kondenzator i prigušni ventil te radna tvar kao prijenosnik energije.



Slika 1-3 Shema dizalice topline (lijevo) i prikaz ciklusa u log *p*-*h* dijagramu (desno)

Slika 1-3 prikazuje shemu dizalice topline te pripadni proces u log *p*-*h* dijagramu. U procesu s dizalicom topline radna tvar isparava preuzimajući toplinu iz ogrjevnog spremnika pri čemu iz isparivača izlazi pregrijana radna tvar. Kompresorom se para radne tvari s tlaka isparavanja podiže na tlak kondenzacije. Nakon kondenzatora pothlađena kapljevina radne tvari se u prigušnom elementu prigušuje na tlak isparavanja i ponovno ulazi u isparivač. Time se, uz pomoć privedene električne energije za pokretanje kompresora, zatvara ciklus dizalice topline i prijenos toplinske energije unutar grijanog prostora. Toplina koja se predaje rashladnom spremniku jednaka je toplini preuzetoj na isparivaču uvećanoj za energiju kompresije.

Razlog za primjenu dizalice topline leži u činjenici da je potrebno manja rada uložiti da bi se topline izmijenila između dva toplinska spremnika nego da se toplinska energija dobije pretvorbom iz primarne energije [17]. Osim toga, upotreba ljevokretnog procesa omogućuje da ukupno izmijenjena toplina, osim manjeg dijela uložene energije, sadrži i veći dio obnovljive energije iz okoliša. Koliki će biti dio obnovljive energije, ovisi o učinkovitosti procesa.

Učinkovitost ljevokretnog procesa teorijski je ograničena s apsolutnim temperaturama toplinskih spremnika (Carnotova učinkovitost) pri čemu su indeksi H i C pridruženi toplijem i hladnijem toplinskom spremniku:

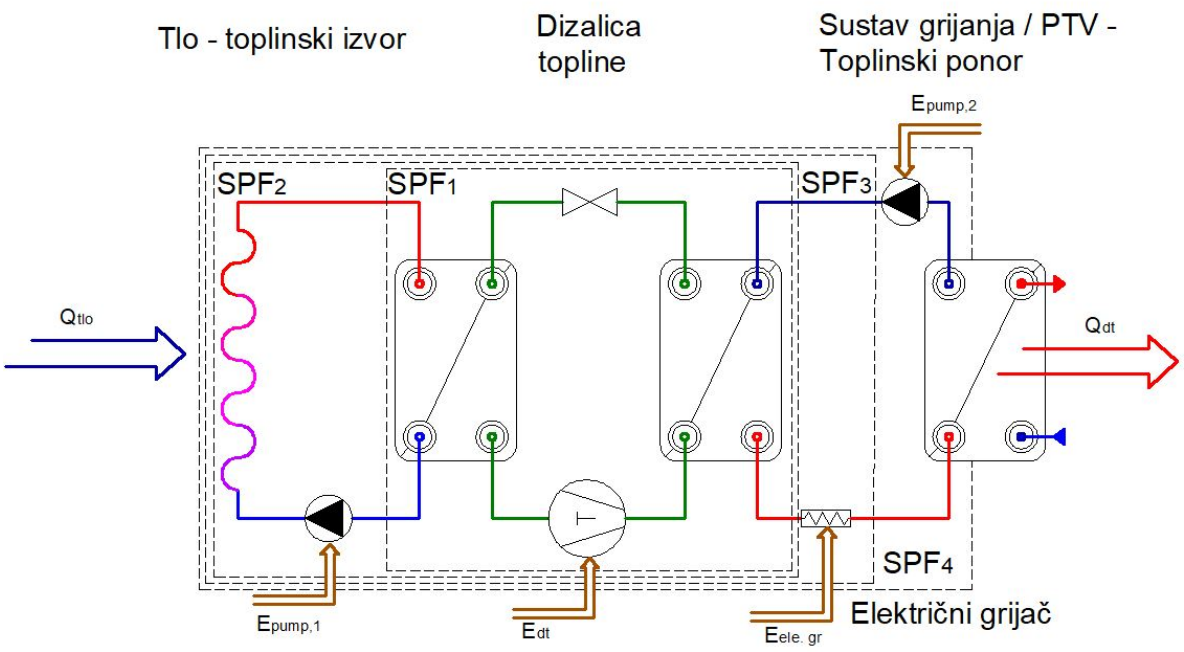
$$\varepsilon_{\text{carnot}} = \frac{T_{\text{H}}}{T_{\text{H}} - T_{\text{C}}} \tag{1}$$

Faktor grijanja (engl. *Coefficient of performance* – COP), odnosno faktor hlađenja, iskazani su kao omjer toplinskog toka isporučenog toplijem spremniku i snage kompresora, odnosno toplinskog toka preuzetog iz hladnijeg spremnika i snage kompresora te su vezani uz standardne radne točke i stacionarni rad uređaja:

$$\varepsilon_{\text{DT,gr}} = \frac{\phi_{\text{gr}}}{P_{\text{komp,el}}} \tag{2}$$

$$\varepsilon_{\text{DT,hl}} = \frac{\phi_{\text{hl}}}{P_{\text{komp,el}}} \tag{3}$$

Navedene veličine omogućuju usporedbu uređaja pri definiranim radnim uvjetima, ali nisu dovoljne za opisivanje rada dizalice topline u sustavu proizvodnje toplinske i rashladne energije pri promjenjivim uvjetima rada. U tu svrhu definiran je faktor sezonske učinkovitosti sustava (engl. *seasonal performance factor* – SPF), koji se računa kao omjer isporučene korisne energije te uložene energije. Metodologija i definicija SPF-a razlikuje više energijskih tokova koji mogu biti obuhvaćeni pri iskazivanju vrijednosti iste, ovisno o izvedbi sustava u kojem se nalazi dizalica topline te definiciji granice sustava. Definicija SPF-a prema SEPEMO projektu [18], kasnije usvojena kao dopuna Direktive 2009/28/EZ Europskog parlamenta [19], razlikuje četiri granice sustava (Slika 1-4).



Slika 1-4 Granice sustava za izračunavanja SPF-a prema [18]

Isporučena toplinska energija uključuje i energiju za pripremu PTV-a, dok se u slučaju drukčije izvedbe sustava umjesto energija za pogon cirkulacijskih pumpi može pojaviti energija za pogon ventilatora. SPF_1 obuhvaća samo toplinsku energiju isporučenu dizalicom topline te utrošenu energiju za pogon iste (uključujući kompresor i upravljanje). Uzimanjem o obzir i energije pomoćnog grijača te energije za pogon pomoćnih komponenti na strani toplinskog izvora i ponora, moguće je iskazati sezonsku učinkovitost cijelog podsustava proizvodnje toplinske energije (SPF_4).

$$SPF_1 = \frac{Q_{dt}}{E_{dt}} \tag{4}$$

$$SPF_2 = \frac{Q_{dt}}{E_{dt} + E_{pumpa1}} \tag{5}$$

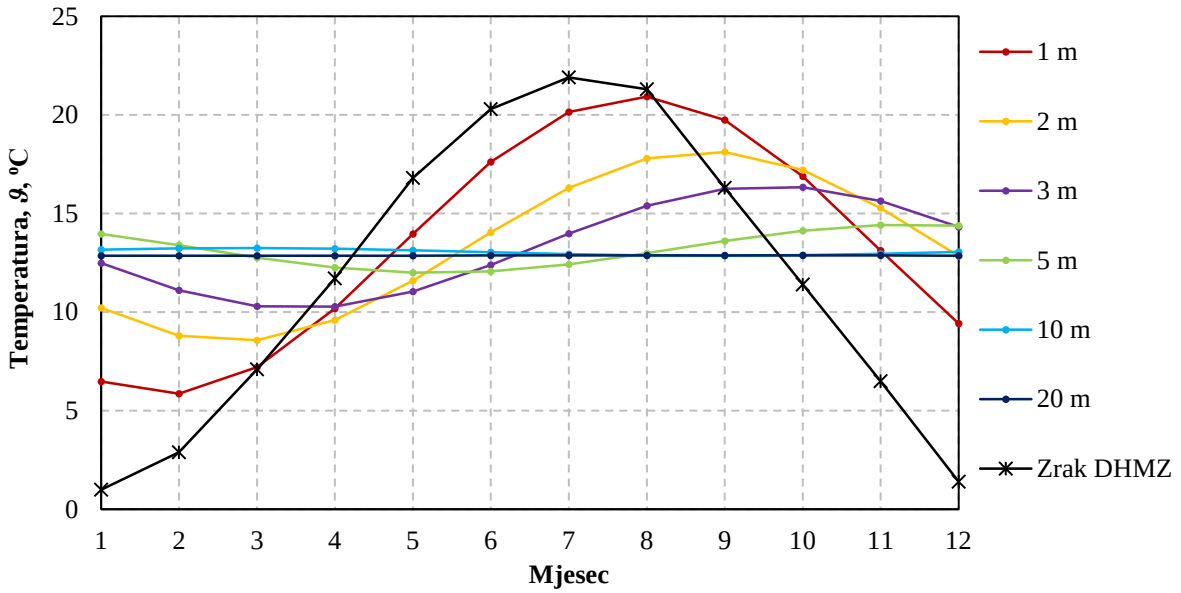
$$SPF_3 = \frac{Q_{dt} + Q_{ele.gr}}{E_{dt} + E_{pump1} + E_{ele.gr}} \tag{6}$$

$$SPF_4 = \frac{Q_{dt} + Q_{ele.gr}}{E_{dt} + E_{pumpa1} + E_{ele.gr} + E_{pumpa2}} \tag{7}$$

1.3. Tlo kao toplinski spremnik

Učinkovitost dizalice topline izravno je povezana sa svojstvima toplinskih spremnika. Kod uspoređivanja različitih izvora i ponora topline u obzir je potrebno uzeti raspoloživost toplinskog spremnika i način prijelaza topline te temperaturu istoga. Što je veća razlika između

temperature kondenzacije i temperature isparavanja radne tvari, to će učinkovitost ljevokretnog procesa biti manja, kao što će biti manji i ogrjevni, odnosno rashladni učin. Ako je na raspolaganju dovoljno izdašan izvor, podzemna voda odličan je toplinski spremnik. Ima stabilnu temperaturu kroz godinu te malu temperaturnu razliku na izmjenjivaču topline zbog dobrog prijenosa topline. Najveća mana je ograničena dostupnost toplinskog spremnika. Zrak je univerzalno dostupan, a osnovni nedostatci zraka kao toplinskog spremnika, koji izravno utječu na manju učinkovitost dizalice topline, su nepovoljna promjenjivost temperature zraka kroz godinu, potreba za odleđivanjem u zimskom razdoblju te loš prijenos topline na strani zraka.



Slika 1-5 Usporedba temperature zraka (mjereni podaci) te temperature tla po mjesecima za različite dubine (modelirano prema Kasudi)

Univerzalna dostupnost te stabilnost temperature kroz godinu, dvije najveće prednosti zraka i vode kao toplinskih spremnika, objedinjeni su u tlu kao toplinskom spremniku. Slika 1-5 prikazuje usporedbu temperature zraka [20] te modelirane razdiobe temperature tla po dubini za Zagreb. Jednadžba (8) primijenjena je za modeliranje temperature tla po dubini i u vremenu [21].

$$\vartheta_{\mathrm{tlo}}(z,t) = \vartheta_{\mathrm{tlo}} - \vartheta_{\mathrm{tlo,ampl}} \cdot \exp\left[-z\sqrt{\frac{\pi}{365 a_{\mathrm{tlo}}}}\right] \cos\left(\frac{2\pi}{365}\left[t - t_{\vartheta\min} - \frac{z}{2}\sqrt{\frac{365}{\pi a_{\mathrm{tlo}}}}\right]\right) \tag{8}$$

Iz slike je vidljivo da se porastom dubine smanjuje amplituda temperature te vremenski odmak pojave vršnih vrijednosti temperature za različite dubine, a što je izravna posljedica toplinske inercije tla. Dubina pri kojoj iščezava amplituda temperature naziva se dubinom prigušivanja, a izravno je povezana s toplinskim svojstvima tla te rasponom temperatura zraka, odnosno

površine tla, u godini.

U površinskim slojevima tla, do dubine 10-20 m, temperatura tla uvjetovana je atmosferskim prilikama te antropogenim djelovanjima. Dozračena sunčeva energija, padaline, temperatura zraka, vrsta pokrova i tla te postojanje umjetnih toplinskih izvora ili ponora rezultiraju promjenom temperature u vremenu i po dubini [22]. Povećanjem dubine, utjecaj površinskih pojava iščezava te se temperatura, vremenski ustaljena, linearno povećava sukladno prisutnom geotermalnom temperaturnom gradijentu (1-6 °C/(100 m) [23]). Iako je geotermalni temperaturni gradijent, ovisno o sastavu pojedinog sloja zemljine kore, promjenjiv po dubini, u području eksploatacije geotermalne energije (do dubine nekoliko stotina metara) njegov se iznos može smatrati konstantnim.

Samo tlo predstavlja porozni trofazni sustav nehomogene strukture čija toplinska svojstva ovise o udjelima pojedine faze, mineralnom sastavu krute faze te vodi ili zraku koji mogu ispunjavati međuprostor. Geološka i hidrološka svojstva tla uvjetuju prijenos topline u tlu, odnosno utječu na uravnoteženje tla u blizini bušotine s toplinski neporemećenim tlom zbog unošenja toplinskog poremećaja. Samim time i rad dizalice topline usko je povezan s toplinskim svojstvima tla, prije svega toplinskom provodnosti, toplinskim kapacitetom te gustoćom tla. Svojstva za pojedine vrste materijala prikazana su u Tablica 1-1 pri čemu vrijednost u zagradama predstavlja karakterističnu vrijednost unutar raspona.

Tablica 1-1 Toplinska svojstva karakterističnih materijala prema [12]

Materijal	**Gustoća** ρ **10^{-3} kg m^{-1}**	**Toplinska provodnost** λ **W m^{-1} K^{-1}**	**Volumenski toplinski kapacitet** $\rho \cdot c_p$ **MJ m^{-3} K^{-1}**
Bazalt	2,6-3,2	1,3-2,3 (1,7)	2,3-3,6
Granit	2,4-3,0	2,1-4,1 (3,4)	2,1-3,0
Gnajs	2,4-2,7	1,9-4,0 (2,9)	1,8-2,4
Mramor	2,5-2,8	1,3-3,1 (2,1)	2,0
Vapnenac	2,6-2,7	2,5-4,0 (2,8)	2,1-2,4
Pješčenjak	2,2-2,7	1,3-5,1 (2,3)	1,6-2,8
Šljunak (suhi)	2,7-2,8	0,4-0,5 (0,4)	1,4-1,6
Šljunak (zasićeni)	2,7	1,8	2,4
Pijesak (suhi)	2,6-2,7	0,3-0,8 (0,4)	1,3-1,6
Pijesak (zasićeni)	2,6-2,7	1,7-5,0 (2,4)	2,2-2,9
Glina (suhi)	-	0,4-1,0 (0,5)	1,5-1,6
Glina (zasićena)	-	0,9-2,3 (1,7)	1,6-3,4
Bentonit	-	0,5-0,8 (0,6)	3,9
Cementit	2,0	0,9-2,0 (1,6)	1,8
Zrak	0,0012	0,02	0,0012
Voda	0,999	0,59	4,15

Sva tri navedena svojstva tla međusobno su povezana veličinom temperaturne provodnosti tla, $m^2\,s^{-1}$, koja opisuje vremensku promjenu temperature tijela:

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \tag{9}$$

Tlo s velikom temperaturnom provodnosti brže će reagirati na temperaturne promjene u svom okolišu, dok će tlo s malom temperaturnom provodnosti trebati više vremena da postigne stanje toplinske ravnoteže s okolišem.

Promatrajući podatke iz prethodne tablice vidljiv je utjecaj sadržaja vlage u tlu na rezultirajuća svojstva tla. Iznad razine vode tlo je trofazne strukture pri čemu su udjeli zraka i vode promjenjivi zbog oborina, ishlapljivanja i prijenosa vlage što rezultira ujedno i promjenjivim svojstvima tla [24]. Ispod razine podzemne vode tlo je dominantno dvofazni sustav krutog materijala i vode. Što je veća poroznost tla, veća brzina vodonosnika te viša razina podzemne vode, bit će i intenzivniji prijenos topline u tlu što izravno utječe na rad dizalice topline, ali i na temperaturno polje u tlu prilikom mjerenja toplinskog odziva tla [25,26].

Kod izvedbe dizalice topline povezane s tlom, upravo se metoda mjerenja toplinskog odziva tla koristi za određivanje temperature toplinski neporemećenog tla i efektivne toplinske provodnosti tla, koji su rezultat hidrogeološke strukture na promatranoj lokaciji, te toplinskog otpora bušotine koji je uvjetovan izvedbom samog bušotinskog izmjenjivača topline. Navedeni parametri nužni su kao ulazni podaci pri postupku dimenzioniranja bušotinskog izmjenjivača topline za potrebe projektiranja sustava dizalice topline povezane s tlom.

2. PREGLED LITERATURE

Temperatura tla kao toplinskog spremnika dugoročno je uvjetovana toplinskim poremećajem koji svojim radom dizalica topline unosi u tlo zbog čega je proces dimenzioniranja sustava s bušotinskim izmjenjivačima topline složeniji od konvencionalnih sustava grijanja i hlađenja. Primjena tabličnih podataka o prinosima BIT-a po metru dubine primjenjiva je za manje sustave i izvedbe izmjenjivača specificirane u normi [12]. Precizniji i složeniji pristup jest modeliranje dugoročnog utjecaja sustava na tlo, kako bi se doveli u vezu izmijenjena toplina s tlom te promjenjiva temperatura tla. Komercijalni računalni alati, kao što su *EED* [27] i *GLHEPRO* [28] temelje se na numerički određenim g-funkcijama kojima je opisan temperaturni odziv tla za različiti broj i raspored bušotina [29]. Pojednostavljena *ASHRAE*-ova metoda omogućuje primjenu tabličnog kalkulatora dijeljenjem toplinskog poremećaja unesenog u tlo na tri superponirana pulsa: godišnji, mjesečni i satni [30,31]. Neovisno o metodi, potrebno je poznavati toplinsko opterećenje objekta, mjesečno ili satno, učinkovitost dizalice topline, temperaturu i sastav tla te toplinski otpor bušotinskog izmjenjivača topline [32]. Posljednje tri navedene veličine vezane su isključivo uz tlo kao toplinski spremnik te je njihovo poznavanje preduvjet za određivanje ukupne potrebne duljine bušotinskog izmjenjivača u tlu. Kao kriterij usporedbe različitih parametara bušotinskog izmjenjivača topline najčešće se koristi toplinski prinos po jedinici dubine bušotine ili izlazna temperatura fluida iz BIT-a.

Eksperimentalna usporedba različitih izmjenjivača topline u tlu istog sastava pokazala je da je toplinski otpor dvostruke U cijevi gotovo upola manja od izmjenjivača istog promjera s jednostrukom U cijevi te značajno niži od različitih konfiguracija koaksijalne izvedbe [33]. Zbog veće površine za izmjenu topline izmjenjivač u obliku dvostruke U cijevi bit će manje dubine nego izvedba jednostruke U cijevi jednake dimenzije za isti potreban toplinski učin [34]. Povećanje promjera bušotine ima pozitivan utjecaj na iznos izmijenjene topline, čak i kada je korištena ispuna manje toplinske provodnosti od okolnog tla, a razlike u prinosu smanjuju se produljenjem rada sustava [35]. Ispuna toplinske provodnosti od 1-2 W m^{-1} K^{-1} čini otprilike 45-65 % ukupnog toplinskog otpora BIT-a pa je poboljšanje svojstava BIT-a moguće povećanjem toplinske provodnosti ispune do hipotetske vrijednosti 5-7 W m^{-1} K^{-1}, nakon čega se postiže zanemariv pozitivan utjecaj [36]. Usporedba četiriju različitih ispuna provođenjem TRT-a (ispitivanje topliskog odziva tla, engl. *Thermal response test*) pokazala je da osim toplinskih svojstava na toplinski otpor važan utjecaj imaju i mehanička svojstva koja su rezultat miješanja, injektiranja i sušenja ispune te udio vlage [37]. Negativna posljedica povećanja toplinske provodnosti ispune jest smanjenje unutarnjeg toplinskog otpora zbog poboljšanog

prijenosa topline između fluida u silaznoj i uzlaznoj struji, a što djeluje nepovoljno na učin BIT-a [38]. Umanjenje učinka kratkog spoja moguće je izolacijom silazne cijevi BIT-a [39] ili približavanjem cijevi samom rubu bušotine [40,41]. Brzina fluida ima zanemariv utjecaj na ukupni toplinski otpor BIT-a, ali njeno povećanje pozitivno djeluje na izmijenjeni toplinski tok te se smanjuje udio toplinskog toka izmijenjenog između cijevi u odnosu na okolno tlo [42]. Povećanje toplinskog toka s porastom brzine asimptotski se približava stacionarnoj vrijednosti te se optimalna brzina strujanja fluida može definirati prema dubini izmjenjivača [43]. Iskazujući ukupnu učinkovitost BIT-a bezdimenzijskom značajkom koja obuhvaća prijelaz topline i pad tlaka pokazano je, za laminarni režim strujanja, da je pad tlaka zanemariv pri usporedbi ukupne učinkovitosti BIT-a prilikom povećanja protoka [44]. Specifični toplinski kapacitet tla ima zanemariv utjecaj na učin BIT-a, dok je utjecaj toplinskog kapaciteta ispune primjetan kod nestacionarnog rada karakterističnog za intermitentni rad dizalice topline [43]. Unatoč tome, mali raspon vrijednosti toplinskog kapaciteta u ispunama u standardnoj primjeni umanjuje utjecaj tog parametra [45]. Dugoročni rad izmjenjivača topline uzrokuje širenje toplinskog poremećaja u tlu uzrokujući porast ukupnog toplinskog otpora između fluida i toplinski neporemećenog tla. Upotreba numeričkih modela osigurava razvoj temperaturnih profila unutar bušotine i u okolnom tlu te analizu kratkoročnih i dugoročnih pojava u blizini BIT-a [46], dok povezivanje modela izmjenjivača topline i dizalice topline pruža uvid u promjenu učinkovitosti sustava pri radu [47].

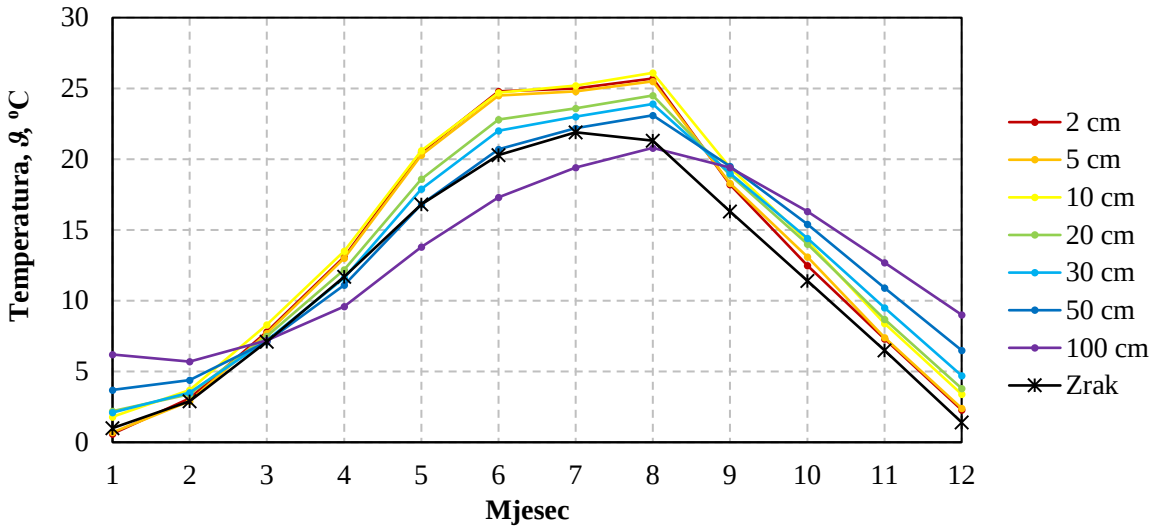
Promatrajući način rada sustava, intermitentni rad dizalice topline u odnosu na kontinuirani omogućuje oporavak tla te rezultira radom s većim vrijednostima faktora grijanja [43]. Usporedba omjera vremena rada i oporavka tla od 0,7 do 3 pokazuje pozitivan utjecaj povećanja duljine oporavka [48]. Prema analizi temperaturnih profila tla na određenoj udaljenosti od BIT-a lokalno smanjenje temperature u vremenu prilikom oporavka tla vidljivo je u profilu temperature tla na radijusu do 0,5 m neovisno o omjeru intermitencije, dok se za veće radijuse temperatura tla linearno povećava u vremenu u ovisnosti o isporučenom toplinskom toku. U svim navedenim istraživanjima, vrijeme intermitencije je proizvoljno zadano, dok se u realnom slučaju sustav dizalice topline uključuje shodno potrebama za grijanjem i hlađenjem te postavljenim temperaturama polaza grijanja ili hlađenja [49].

Dugoročni razvoj temperature u tlu uvjetovan je ukupnom toplinskom bilancom izmijenjene topline s tlom. Neuravnotežena izmjena topline s tlom na razini godine dovodi do trajnog zagrijavanja ili pothlađenja tla, a što je moguće kompenzirati povećanjem ukupne duljine ugrađenog izmjenjivača topline u tlu [47]. Višegodišnja simulacija dvaju sustava pokazuje da su sustavi s neuravnotežena izmjenom topline osjetljiviji na geometrijski raspored BIT-ova te

da zanemarivanje izmjene topline na dnu bušotine i promjenjive temperature na površini tla može rezultirati s loše dimenzioniranim sustavom [50]. Uzimanje u obzir promjenjivog rubnog uvjeta na površini tla preporučljivo je za plitke bušotine, gdje je pokazano potencijalno predimenzioniranje duljine od 11 % do 6 % za BIT dubine od 30 do 50 m [51]. S obzirom na toplinsku inerciju tla, srednje mjesečne vrijednosti temperature na površini su dovoljne za opis utjecaja istih na temperaturu fluida iz BIT-a [52]. Detaljne analize i usporedbe utjecajnih faktora na učinkovitost geotermalne dizalice topline pokazale su da toplinska provodnost tla utječe samo na potrebnu dubina BIT-a, a ne i na učinkovitost sustava, pod uvjetom da je stvarna toplinska provodnost tla jednaka onoj uzetoj pri dimenzioniranju sustava [45,52]. Navedene analize provedene su podrazumijevajući izmjenjivače u obliku jednostruke U cijevi te homogeno tlo po cijelom volumenu. Precizno određivanje toplinskih svojstava tla, te potreba za grijanjem i hlađenjem, nužan su preduvjet za optimalno određivanje ukupne duljine BIT-a kao najutjecajnijeg parametra na investicijske i pogonske troškove sustava [45,52].

2.1. Temperatura toplinski neporemećenog tla

Temperatura toplinski neporemećenog tla važan je parametar za dimenzioniranje bušotinskih izmjenjivača topline, ali i drugih procesa u kojima postoji izmjena topline s tlom. U nedostatku mjerenih podataka najčešće se aproksimira srednjom godišnjom temperaturom zraka. U određenim primjenama ta aproksimacija jest dovoljno dobra (npr. toplinski gubitci kroz pod), međutim, zbog toplinske inercije tla i postojanja geotermalnog temperaturnog gradijenta, povećanjem dubine dolazi do većeg odstupanja stvarne temperature tla od srednje godišnje temperature zraka [53].



Slika 2-1 Usporedba mjerenih temperatura tla na dubini do 1 m (1990.-2005. godina) [54] **i temperature zraka za meteorološku postaju Maksimir** [20]

Analiza utjecaja geotermalnog temperaturnog gradijenta i rezultirajuće temperature tla na

potrebnu dubinu BIT-ova pokazala je da zanemarivanje komponente geotermalnog gradijenta rezultira predimenzioniranjem polja bušotina u rasponu od 4,3 do 7,1 %, ovisno o odabranom geometrijskom rasporedu [53]. Slično istraživanje, primjenom numeričkog alata *FEFLOW*-a, pokazalo je da se nakon 25 godina korištenja sustava prinos bušotinskog izmjenjivača topline kreće od 45 do 72 W m^{-1} za promatrani raspon (7,5-12,5 °C) temperature neporemećenog tla istog sastava [55]. Profil temperature tla često se aproksimira s jednadžbom (8) koja, uz temperaturnu provodnost tla, zahtjeva tri ulazna parametra: srednju godišnju temperaturu, godišnju amplitudu temperature te fazni pomak pojave najniže temperature u godini. Srednja godišnja temperatura i amplituda odnose se na površinu tla. Slika 2-1 prikazuje razliku, ali i korelaciju mjerenih podataka temperature zraka i tla za meteorološku postaju Maksimir. Slična usporedba prikazana je i u radu Ozgener *et al.*, u kojem je Kasudin model primijenjen za definiranje korelacije temperature zraka i tla, a koji rezultira odstupanjima od 10 do 15 % u odnosu na mjerene temperature tla do dubine od 3 m [56]. Složniji modeli temperature tla polaze od činjenice da je površinska temperatura tla rezultat izmjene topline koji se odvija na granici tla i atmosfere. Toplinski tok koji se odvodi ili dovodi tlu jednak je sumi toplinskih tokova zbog: kratkovalne dozračene sunčeve energije, dugovalnog emitiranog zračenjem s tla, izmjene topline konvekcijom sa zrakom te ishlapljivanja vode iz tla:

$$\Phi_{\text{ukupni}} = \Phi_{\text{dozračeno}} - \Phi_{\text{odzračeno}} \pm \left|\Phi_{\text{konvektivno}}\right| \pm \left|\Phi_{\text{latentno}}\right| \tag{10}$$

Zanemarujući komponentu prijenosa vlage u tlu i na temelju podataka za 17 izmjerenih temperatura toplinski neporemećenog tla, Ouzzane *et al.* istražili su utjecaj pojedinog člana toplinske bilance na predikciju temperature tla. Analiza je pokazala da dominantan utjecaj na temperaturu tla ima temperatura zraka, dok je zanemariv utjecaj brzine vjetra i dozračene sunčeve energije [57]. Razlog tome je što temperatura zraka u sebi već sadrži utjecaj vjetra i dozračene sunčeve energije te je izvedena pojednostavljena korelacija temperature tla temeljena samo na temperaturi zraka koja rezultira s odstupanjem temperature od 0,2 do 2 °C [57]. Predloženi model korelacije unaprjeđen je komponentom prijenosa vlage i promjenjivom temperaturom neba za udio dugovalnog zračenja te je uspješno uspoređen s mjerenim podacima za tri različite meteorološke postaje [22]. Detaljniji model prijenosa vlage te četiri različite korelacije, primjenjive za područja s temperaturom tla višom od 15 °C, prikazani su u radu Gwadere et al., pri čemu najveće odstupanje od izmjerenih temperatura tla iznosi 1,6 °C [58].

Mjerenjem je temperaturu toplinski neporemećenog tla moguće odrediti na više načina. Ugradnjom temperaturnih osjetnika u tlo ili u sami bušotinski izmjenjivač topline, spuštanjem temperaturnog osjetnika u cijev ili cirkulacijom fluida kroz cijev izmjenjivača topline [59].

Neovisno o metodi, prije samog određivanja temperature tla, nužno je postizanje toplinske ravnoteže u tlu narušene procesom bušenja, stvrdnjavanja ispune ili ispiranjem izmjenjivača. Prva metoda podrazumijeva trajnu ugradnju osjetnika te je primjenjiva samo u znanstvene svrhe [60]. Metoda spuštanja temperaturnog osjetnika (vidi [61]) zahtjeva slobodan pristup cijevi izmjenjivača. Potrebno je precizno i polagano spuštati osjetnik kroz cijev kako bi se mjerenje temperature stacioniralo sa svakom novom dubinom te umanjilo miješanja fluida u cijevi. Što je manji odabrani interval, mjerenje je vremenski dulje, ali je i profil temperature tla detaljnije očitan. Razvoj bežičnih osjetnika temperature olakšava određivanje profila temperature, ali je primjena ograničena na izmjenjivače u obliku U cijevi [62]. Češće primijenjena procedura, kao prva faza mjerenja toplinskog odziva tla, uključuje cirkulaciju medija kroz bušotinu te mjerenja izlazne temperature fluida iz tla.

Uz samu točnost mjerne opreme, na rezultat značajan utjecaj može imati i prijenos topline mjernog uređaja s okolišem, toplinski dobitci zbog trenja i cirkulacijske pumpe te vrijeme zadržavanja fluida u cijevi. Usporedba ovih metoda prikazana je u radu Gehlina i Nordella [59]. Na bušotini s jednostrukom U cijevi određen je profil temperatura s intervalima od 1 i 2 metra te je naknadno fluid cirkularan 77 minuta kroz bušotinu. Prvih 10 minuta cirkulacije korištena je akvizicija očitanja svakih 10 sekundi te je na temelju vremena očitanja rekonstruiran profil temperatura za dva različita vremenska trenutka. Za kasnija očitanja rekonstrukcija profila nije moguća zbog progrijanosti fluida pa je rezultat tog mjerenja prosječna temperatura medija, odnosno tla. U radu nije naveden vremenski korak mjerenja iskorištenih za rekonstrukciju profila temperature tla iz cirkulacije fluida, ali je uočen utjecaj niske okolišne temperature na smanjenje srednje temperature u kasnijoj rekonstrukciji profila. Isto tako, vidljivo je da povećanjem vremena cirkulacije raste temperatura medija u bušotini zbog toplinskih dobitaka od pumpe.

Tablica 2-1 Usporedba različitih metoda određivanja temperature tla [59]

Metoda	**Prosječna temperatura**
Spuštanje osjetnika temperature	11,8 ºC
Cirkulacija fluida – rana rekonstrukcija profila	11,7 ºC
Cirkulacija fluida – kasna rekonstrukcija profila	10,3 ºC
Cirkulacija fluida – nakon 20 minuta	11,8 ºC
Cirkulacija fluida – nakon 30 minuta	12,2 ºC

Na temelju rezultata preporučeno je određivanje temperature toplinski neporemećenog tla iz temperature medija prilikom cirkuliranja, ali uzimajući o obzir očitanje u trenutku kada iščeznu

fluktuacije temperature u vremenu [59].

U svrhu unaprjeđenja mjerenja temperature tijekom praćenja toplinskog odziva tla, predložena ja upotreba optičkih kabela [14]. S jednim kabelom, položenim u cijev ili u ispunu bušotine, moguće je odrediti profil temperature toplinski poremećenog i neporemećenog tla. Metoda distributivnog mjerenja temperature s optičkim kabelom uspoređena je s cirkuliranjem medija kroz bušotinu s rezultirajućom razlikom temperature tla od 0,09 °C zbog utjecaja pumpe [65]. Profili temperatura izmjereni optičkim kabelima na 8 različitih lokacija u Hrvatskoj dani su u radu Soldo *et al.* pri čemu su na temelju profila temperature određeni geotermalni temperaturni gradijenti na promatranim lokacijama [66]. Na dijelu temperaturnih profila vidljiv je negativni geotermalni gradijent u višim slojevima bušotine. Pojava negativnog temperaturnog gradijenta karakteristična je za urbane sredine i mjesta izraženog antropogenog djelovanja [67]. Analiza temperatura tla za šest gradova u Njemačkoj pokazala je da postoji razlika temperatura između urbanih i ruralnih sredina u rasponu od 3 do 7 °C [68]. Temperaturni profili tla u rasponu od 7 godina prikupljeni za lokaciju u Winnipegu u Kanadi, pokazuju porast temperature u bušotini 3 m udaljenoj od stambene zgrade te smanjenje temperature u drugoj bušotini nakon uklanjanja zgrada na promatranoj lokaciji [69]. Slični rezultati prikazani su i za tvornicu cigli (radila od 1935.-2001. godine), gdje je zabilježen lokalni porast temperature tla od 12 °C u odnosu na temperaturu neporemećenog tla te postepeno smanjenje iste razlike s vremenskim odmakom od završetka rada tvornice. Osim antropoloških djelovanja, na temperaturni profil toplinski neporemećenog tla utjecaj ima i porast srednje godišnje temperature zraka. Odstupanje profila temperature na 20 m dubine u Meilenu (Švicarska) od onog opisanog geotermalnim temperaturnim gradijentom je 2,2 °C pri čemu je 0,9 °C pripisano globalnom zatopljenju, a ostatak urbanizaciji [70]. Porast temperature tla od oko 1 °C u posljednja 3 desetljeća zabilježen je na većini meteoroloških postaja u Hrvatskoj [71]. Utjecaj lokalnog povišenja temperature tla nije zanemariv te je procijenjeni tehnički potencijal iskorištavanja geotermalne energije u gradovima i do 40 % veći nego u ruralnim sredinama, a što izravno utječe na dimenzije bušotinskog izmjenjivača topline [72]. Neovisno o primijenjenoj metodologiji određivanja temperature toplinski neporemećenog tla, njena se vrijednost za potrebe dimenzioniranja bušotinskog izmjenjivača topline, iskazuje kao osrednjena vrijednost, uzimajući u obzir dubinu ugradnje na promatranoj lokaciji [67].

2.2. Toplinska provodnost tla i toplinski otpor bušotine

Toplinska provodnost tla izravno utječe na toplinski prinos bušotinskog izmjenjivača topline te opravak tla zbog toplinskog poremećaja. Vrijednosti toplinske provodnosti za različite

materijale dani su u prethodnom poglavlju (Tablica 1-1). Udio vode, tekstura, mineralni sastav, veličina čestica i drugi parametri utječu na toplinsku provodnost tla te su razlog raspona vrijednosti za pojedini materijal [73,74]. Pregled metoda određivanja toplinske provodnosti, kao i drugih hidro-geoloških istraživanja prikazan je u radu [75]. Usporedba terenske metode mjerenja toplinskog odziva tla i laboratorijske analize uzoraka tla pokazala je da prva metoda rezultira s višom vrijednosti toplinske provodnosti tla [76]. Više je razloga odstupanja: tlo je toplinski i strukturno poremećeno izradom bušotine, uzorak ne može sadržavati utjecaj gibanja podzemnih voda, sadržaj vlage u uzorku ne mora biti jednak onome u tlu, veličina uzorka ne mora obuhvatiti geološke pojave u blizini bušotine itd. Slični rezultati i zaključci prijavljeni su u različitim istraživanjima i zbirno prikazani u [67].

Toplinski otpor bušotinskog izmjenjivača topline predstavlja otpor između fluida koji struji kroz cijev izmjenjivača i okolišnjeg tla. Niža vrijednost toplinskog otpora omogućuje bolji prijenos topline s tlom, a time i manju duljinu BIT-a. Iako je prijenos topline s tlom tranzijentne naravi, za stacionarno stanje toplinski otpor definiran je na sljedeći način:

$$R_{\mathrm{b,2D}} = \frac{\vartheta_{\mathrm{f}} - \vartheta_{\mathrm{b}}}{\phi_{\mathrm{L}}} \tag{11}$$

Temperature ϑ_{f} i ϑ_{b} su srednja temperatura fluida u cijevi i na rubu bušotine, na radiusu r_{b}, a q je toplinski tok po jednici duljine BIT-a izmijenjen s tlom. Temperature i toplinski tok iskazani su za jedan presjek BIT-a te se u literaturi ovakav toplinski otpor naziva lokalnim [77], a može se izračunati, poznavajući termo-fizikalna svojstva korištenih materijala te dimenzije BIT-a, korištenjem analitičkih izraza dostupnih u literaturi ili 2D numeričkim modeliranjem [78].
Uzimajući u obzir trodimenzionalnost te utjecaj dubine bušotinskog izmjenjivača topline na otpor, Hellstrom je definirao efektivni toplinski otpor [79]:

$$R_{\mathrm{b,ef}} = \frac{\vartheta_{\mathrm{f,sr}} - \vartheta_{\mathrm{b,sr}}}{\phi_{\mathrm{L}}} \tag{12}$$

Temperatura fluida aproksimirana je kao aritmetička sredina ulazne i izlazne temperature fluida iz BIT-a:

$$\vartheta_{\mathrm{f,sr}} = \frac{\vartheta_{\mathrm{ulaz}} + \vartheta_{\mathrm{izlaz}}}{2} \tag{13}$$

Mjerenje toplinskog odziva tla i primjena jednadžbe (12) omogućuje određivanje efektivnog toplinskog otpora tla koji je vrijedi samo za izvedenu bušotinu i korišteni maseni protok fluida [78]. Alternativa je izračun toplinskog otpora pri čemu treba imati na umu činjenicu da izvedena bušotina ne mora odgovarati projektnim parametrima.

Ukupni toplinski otpor R_b sastoji se od sljedećih komponenti pri čemu N označava broj cijevi (npr. N=4 za dvostruku U cijev):

$$R_b = \frac{R_{fluid} + R_{cijev}}{N} + R_{ispuna} \tag{14}$$

Fluid predstavlja konvektivni toplinski otpor, a materijal cijevi otpor provođenju i njihove iznose jednostavno je odrediti koristeći poznate izraze iz literature o prijenos topline [12]. Konvektivni toplinski otpor fluida na unutarnjoj stijenci cijevi jest:

$$R_{fluid} = \frac{1}{2\pi r_{c,u} \alpha_{kon}} \tag{15}$$

Otpor provođenju kroz cijev:

$$R_{cijev} = \frac{1}{2\pi\lambda_{cijev}} ln\left(\frac{r_{c,v}}{r_{c,u}}\right) \tag{16}$$

Kao dodatni član u jednadžbi (14) ponekad se navodi i dodirni toplinski otpor koji je se javlja onda kada nije ostvaren izravan dodir ispune i zida bušotine, a iskazan je u funkciji efektivne debljine šupljine δ_k:

$$R_{dodir} = \frac{1}{2\pi\lambda_{tlo}} ln\left(\frac{\delta_k}{r_b}\right) \tag{17}$$

Toplinski otpor ispune, zbog složene geometrije izmjenjivača nije moguće jednostavno odrediti kao preostale toplinske otpore. U literaturi je moguće pronaći različite izraze koji se koriste za računanje otpora ispune (npr. [79–82]). Ovisno o metodologiji izrade korelacija, izvedeni izrazi primjenjivi su samo za određene parametre BIT-a. Svi analitički izrazi odnose se na jednostruku U cijev, a njihova usporedba, dana u radu Javeda i Spitlera, pokazala je da se preporuča primjena metoda višepolne ekspanzije [77,83]. Metoda višepolne ekspanzije omogućuje analizu provođenja topline unutar BIT-a za proizvoljan broj cijevi pri čemu se toplinski otpor računa razvojem u red kombinacije linijskih toplinskih izvora. Točnost ovisi o redu višepolne metode pri čemu svaki viši red rezultira s novim i složenijim korekcijskim faktorom. Višepolna metoda višeg reda koristi se u računalnim programima za dimenzioniranje BIT-ova: *EED* [27] i *GLHEPRO* [28], dok jednadžba (18) predstavlja konačni izraz ekspanzije 1. reda (zadnji član u jednadžbi je dodan u odnosu na ekspanziju nižeg, 0. reda). Izvedena jednadžba u sebi sadrži i otpor fluida i cijevi te za analiziranih 216 različitih konfiguracija BIT-a odstupa od ekspanzije 10. reda manje od 1 %, izuzev za bušotine s visokom toplinskom provodnošću ispune i cijevima uz rub bušotine [77].

$$R_b = \frac{1}{4\pi\lambda_{is}}\left[\beta + ln\left(\frac{\theta_2}{2\theta_1(1-\theta_1^4)}\right) - \frac{\theta_3^2\left(1-\frac{4\sigma\theta_1^4}{1-\theta_1^4}\right)^2}{\frac{1+\beta}{1-\beta}+\theta_3^2\left(1+\frac{16\sigma\theta_1^4}{\left(1-\theta_1^4\right)^2}\right)}\right] \tag{18}$$

$$\theta_1 = \frac{s}{2r_b} \quad \theta_2 = \frac{r_b}{r_{cv}} \quad \theta_3 = \frac{r_{c,v}}{s} \quad \sigma = \frac{\lambda_{ispuna}-\lambda_{tlo}}{\lambda_{ispuna}+\lambda_{tlo}} \quad \beta = 2\pi\lambda_{ispuna}R_{cijev} \tag{19}$$

Razlog odstupanja lokalnog toplinskog otpora od efektivnog nalazi se u činjenica da se prilikom strujanja fluida kroz cijev BIT-a, toplina izmjenjuje s tlom, ali i između silazne i uzlazne cijevi izmjenjivača. Zbog razlike temperatura silazne i uzlazne cijevi dolazi do pojave toplinskog kratkog spoja te odstupanja profila temperature od linearne razdiobe po duljini cijevi izmjenjivača.

Hellstrom je razvio dva izraza koji povezuju $R_{b,ef}$ i R_b uz pretpostavku jednolike razdiobe toplinskog toka (jednadžba (20)) te pretpostavku jednolike razdiobe temperature po radijusu bušotine (jednadžba (21)) [79]. Oba slučaja su pojednostavljenje koje ne opisuje točno stvarni prijenos topline pa se preporuča uzimanje srednje vrijednosti rezultata oba izraza [78].

$$R_{b,ef} = R_b + \frac{1}{3}\frac{1}{R_{12}}\left(\frac{H}{\rho_f c_f q_v}\right)^2 + \frac{1}{12}\frac{1}{R_b}\left(\frac{H}{\rho_f c_f q_v}\right)^2 \tag{20}$$

$$R_{b,ef} = R_b + \frac{1}{3}\frac{1}{R_a}\left(\frac{H}{\rho_f c_f q_v}\right)^2 \tag{21}$$

U oba izraza javljaju se novi članovi toplinskog otpora R_a i R_{12}. Njihova definicija proizlazi iz prikaza toplinskih otpora u mrežnom obliku (Slika 2-2). Unutarnji toplinski otpor je označen s R_a te je prema analogiji s strujnim krugovima opisan izrazom:

$$R_a = \frac{R_{12}\left(R_1+R_2\right)}{R_{12}+R_1+R_2} \tag{22}$$

Uz pretpostavku da za geometrijski i toplinski simetrične bušotine vrijedi R_1=R_2, lokalni toplinski otpor je:

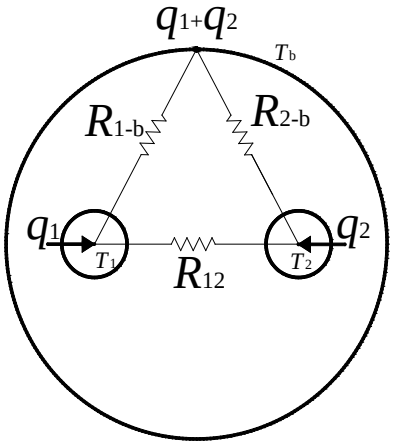
$$R_b = \frac{R_1R_2}{R_1+R_2} = \frac{R_1}{2} = \frac{R_2}{2} \tag{23}$$

Član R_{12} nema fizikalno značenje već je rezultat prikaza otpora navedenim krugom, a može se izračunati iz izraza za R_a:

$$R_{12} = \frac{2R_aR_1}{2R_1-R_a} \tag{24}$$

Vrijednost R_a nije moguće izmjeriti već samo izračunati. Analitički izrazi izvedeni su samo za geometriju jednostruke U cijevi, a za više detalja pogledati u [77]. Alternativni pristup, primjenjiv i za složenije geometrije, moguć je numeričkim modeliranjem pri čemu je unutarnji toplinski otpor iskazan sljedećom jednadžbom [78]:

$$R_{\mathrm{a}} = \frac{2(\vartheta_1 - \vartheta_2)}{q_2 - q_1} \tag{25}$$



Slika 2-2 Otpornička *Δ* mreža za jednostruku U cijev

Iz navedenih izraza vidljivo je da na odstupanje efektivnog od lokalnog otpora utjecaj imaju dubina bušotine H te volumenski protok fluida q_{v}. Veći volumenski protok i manja dubina rezultiraju smanjenjem toplinskog kratkog spoja te se samim time i smanjuje razlika efektivnog i lokalnog toplinskog otpora. Numerička analiza toplinskog kratkog spoja pokazala je da povećanje brzine strujanja pozitivno utječe na smanjenje toplinskog kratkog spoja, ali tako da se gubitak na učinu i specifični učin BIT-a asimptotski približavaju konačnim vrijednostima za pripadni BIT. Za tlo toplinske provodnosti 2 W m^{-1} K^{-1}, povećanje provodnosti ispune povećava izmijenjeni toplinski tok s tlom te toplinski tok između cijevi pri čemu se vrijednosti stacioniraju za oko 3 W m^{-1} K^{-1} te daljnje povećanje nema utjecaja na prinos BIT-a [38].

Postojanje toplinskog kratkog spoja neminovno utječe na razvoj profila temperature u BIT-u te je kao unaprjeđenje aritmetički srednje temperature predložena je p-linearna aproksimacija temperaturnog profila [84]:

$$\vartheta_{\mathrm{f}} = \vartheta_{\mathrm{tlo}} + \frac{p\left(\left|\Delta\vartheta_{\mathrm{ulaz}}\right|^{p+1} - \left|\Delta\vartheta_{\mathrm{izlaz}}\right|^{p+1}\right)}{(1+p)\left(\left|\Delta\vartheta_{\mathrm{ulaz}}\right|^{p} - \left|\Delta\vartheta_{\mathrm{izlaz}}\right|^{p}\right)} \tag{26}$$

Usporedbom profila temperature s numeričkim modelom najbolje poklapanje je ostvareno kada iznos p teži vrijednosti -1 te je pokazano da metoda aritmetičke sredine temperature fluida nepotrebno predimenzionira toplinski otpor bušotine. Kod obe metode povećanje volumenskog

protoka omogućava točnije određivanje srednje temperature fluida [84]. Za raspon parametara bušotinskih izmjenjivača koji se uobičajeno koriste odstupanje *p*-linearne metode manje je od 3 %, dok je kod aritmetički osrednjene temperature za odstupanje manje od 5 % nužno osigurati dovoljan volumenski protok koji zadovoljava uvjet da je $q_v c_{fluid} H^{-1} > 11$ W m^{-1} K^{-1} [85]. Usporedba *p*-linearne metode s mjerenim podacima pokazala je da optimalna vrijednost *p* nije univerzalna, dok je za točno određivanje vrijednosti *p* nužno poznavati temperaturu na dnu bušotine [86]. U prethodno navedenim istraživanjima *p* je izražen kao vremenski konstantan. Razvoj profila temperature u vremenu tijekom TRT-a na temelju Zeng-ova modela [87] omogućio je određivanje *p*-a u funkciji vremena te je utvrđena linearna veza *p*-a i prirodnog logaritma vremena [88]. Alternativni pristup za računanje srednje temperature iz temperaturnog profila predložili su Beier i Spitler. Oni su stvarnu srednju temperaturu iskazali preko težinskog faktora *f* te ulazne i izlazne temperature fluida iz BIT-a:

$$\vartheta_f = f\,\vartheta_{ulaz} + (1-f)\,\vartheta_{izlaz} \tag{27}$$

Faktor *f* vremenski je promjenjiv te je u radu prikazana procedura određivanja *f* za tri različita vremenska trenutka od unošenja toplinskog poremećaja u tlo [89]. Izrazi su izvedeni samo za geometriju jednostruke U cijevi i koaksijalne cijevi, ali je model uspješno primijenjen i na eksperimentalne rezultate za dvostruku U cijev.

Poznavanje temperaturnog profila fluida u BIT-u, odnosno stvarne srednje temperature fluida, omogućuje određivanje stvarnog trodimenzijskog toplinskog otpora BIT-a.

$$R_{b,3D} = \frac{\vartheta_{f,profil} - \vartheta_{b,sr}}{\phi_L} \tag{28}$$

Trodimenzijski toplinski otpor nije jednoznačan s efektivnim i u slučaju da se koriste modeli koji definiraju toplinski otpor kao efektivni, nužno je poštivati definiciju temperature fluida kao aritmetičke sredine ulazne i izlazne [89].

U svome radu Zanchini i Jahabin izveli su teorem koji pokazuje da za dvostruku U cijev vrijedi relacija $R_{b,2D}=R_{b,3D}$. Navedena jednakost vrijedi samo onda kada lokalni toplinski otpor nije promjenjiv po dubini te ako se zanemari aksijalna komponenta kondukcijskog prijenosa topline s tlom na dnu bušotine [90]. Prva pretpostavka vrijedi za homogeno tlo, a druga pretpostavka nije održiva za plitke bušotine. Provedene numeričke simulacije pokazale su za promatrani slučaj da je razlika manja od točnosti koja se može postići primijenjenim modelom.

U istom radu analiziran je i jedini izvedeni analitički izraz za lokalni toplinski otpor dvostruke U cijevi, izveden prema metodologiji danoj u [87], koji daje odstupanje od 0,6 do 4 % u odnosu na numeričke rezultate [90]:

$$R_{b,2D} = \frac{1}{8\pi\lambda_{ispuna}}\left[ln\left(\frac{r_b}{r_{cv}}\right) + 2ln\left(\frac{r_b}{\sqrt{2}s}\right) + ln\left(\frac{r_b}{2s}\right) - \sigma ln\left(\frac{r_b^8 - r_c^8}{r_b^8}\right)\right] + \frac{R_{cijev}}{4} \quad (29)$$

Izrazi za unutarnji toplinski otpor ili efektivni toplinski otpor dvostruke U cijevi ne postoje u literaturi te ih je moguće odrediti numeričkim modeliranjem ili višepolnom ekspanzijom [83]. Višepolna ekspanzija ugrađena u računalne pakete, kao što je *EED*, brža je metoda, ali s obzirom na to da se temelji na pojednostavljenom prikazu otpora kod BIT-a (Slika 2-2), rezultati otpora ovise i o toplinskoj provodnosti tla. Razlog tome je zanemarivanje prijenosa topline između cijevi i preko tla koje okružuje BIT te nehomogena razdioba temperatura po obodu bušotine, a što je posebno izraženo kod BIT-ova s cijevima postavljenim uz rub bušotine [77].

Kod primjene numeričkih metoda određivanja otpora nužno je uključiti u domenu i tlo koje okružuje BIT te pravilno opisati rubne uvjete čiji je utjecaj prikazan u [90].

2.3. Mjerenje toplinskog odziva tla

Mjerenje toplinskog odziva tla (engl. *thermal response test* – TRT) uobičajena je metoda za određivanje toplinskih svojstava tla za potrebe iskorištavanja niskotemperaturne geotermalne energije. Rezultat mjerenja toplinskog odziva tla, odnosno TRT-a, su temperatura toplinski neporemećenog tla, efektivna toplinska provodnost i efektivni toplinski otpor bušotine [75]. Metodologija se sastoji od mjerenja promjene temperature medija bušotinskog izmjenjivača topline zbog u tlo unesenog poznatog toplinskog poremećaja. Detaljni povijesni pregled razvoja metodologije i modela za analizu rezultata prikazan je u radu Spitlera i Gehlina [91]. Osnovni uređaj za provođenje TRT-a podrazumijeva sljedeće osnovne komponente: cirkulacijsku pumpu, elektrootporni grijač, protokomjer, osjetnike temperature i akvizicijski sustav. Mjerenje se provodi u dvije faze na bušotini u toplinskoj ravnoteži s okolnim tlom. Prvo se cirkulira medij kroz cijev izmjenjivača, kako bi se odredila temperatura toplinski neporemećenog tla, a potom se uključuje električni grijač koji predaje konstantan toplinski tok mediju koji cirkulira kroz izmjenjivač u tlu. Nakon faze grijanja, moguće je pratiti i promjenu temperatura tijekom oporavka tla od unesenog toplinskog poremećaja. Tijekom cijelog procesa mjere se temperature na ulazu i izlazu iz bušotine i protok medija, te se na temelju dobivenih temperaturnih krivulja, određuju efektivna toplinska svojstva tla, primjenom analitičkih ili numeričkih modela [92]. Opisana metodologija odgovara standardnoj provedbi TRT-a, dok postoje i različite modifikacije: toplinski poremećaj u obliku hlađenja tla [93], promjenjivi toplinski tok za utvrđivanje konvektivnog prijelaza topline u bušotini u vodonosnicima [94] ili konstantna temperatura medija na ulazu u BIT umjesto konstantnog toplinskog toka, što omogućuje

skraćivanje vremena TRT-a, ali zahtjeva složeniju izvedbu uređaja [95,96]. Preporučena duljina trajanja TRT-a razlikuju se od autora do autora, ali kako bi se ostvarila kvazi-stacionarna izmjena topline s tlom, odnosno izbjegao utjecaj toplinskog kapaciteta fluida, cijevi i ispune, najčešće se provodi 48 sati i dulje. Minimalna duljina TRT-a nije univerzalna veličina, već ovisi o parametrima ispitivanog BIT-a, pri čemu značajan utjecaj ima omjer toplinske provodnosti ispune i tla [97]. Prema iskustvenoj preporuci dovoljno trajanje TRT-a je ono u kojem toplinski poremećaj propagira u radiusu od 0,5 do 1,5 m oko bušotine [98]. Na numerički generiranom TRT-u, Signorelli *et al.*, analizirali su utjecaj početka i kraja intervala za određivanje toplinskih svojstava na točnost određivanja istih. Pokazano je da raniji interval podataka uzetih za analizu zahtjeva dulje trajanje TRT-a, ali i da je manje osjetljiv na perturbacije očitane temperature, nakon što je numerički profil temperature podvrgnut nasumičnom odstupanju temperature u rasponu od 0,1 ºC [99]. Sintetički TRT podaci obrađeni su korištenjem analitičkog modela beskonačnog linijskog izvora (engl. *Infinite line source* – ILS) [100]. Riječ je o najjednostavnijem i najčešćem modelu koji se koristi pri obradi rezultata, a njegova primjena podrazumijeva određena ograničenja (Tablica 2-2).

Tablica 2-2 Pretpostavke uvedene kod provođenja TRT-a za različite analitičke modele: ILS-a, FLS-a i ICS-a

Pretpostavka	**ILS**	**FLS**	**ICS**
Prijenso topline u tlu se odvija isključivo provođenjem	x	x	x
Toplinska provodnost tla je izotropna te konstanta u vremenu i prostoru	x	x	x
Zanemaruju se aksijalno provođenje topline	x	x	x
Zanemaruje se toplinski kapacitet BIT-a	x	x	
Zanemaruje se duljina BIT-a	x		x
Nakon početnog vremena, toplinski otpor je stacionaran	x	x	x
Toplinski tok je konstantan	x	x	x

Pretpostavka o konstantom toplinskom toku podrazumijeva standardnu devijaciju ±1,5 % u odnosu na prosječnu vrijednost te najveća odstupanja od ±10 % [67]. U slučaju većih odstupanja predanog toplinskog toka nužna je obrada podataka složenijim modelima ili upotreba principa superpozicije, gdje se varijabilni toplinski tok prikazuje kao niz konstantnih [98].

Promjenjivi uvjeti okoliša u kojoj su smješteni TRT uređaj i BIT mogu utjecati na rezultirajuća svojstva tla. Na temelju modeliranja utjecaja klimatskih uvjeta, razvijen je izraz za korekciju utjecaja okoliša na srednju temperaturu fluida u bušotini [101] te preporučena upotreba izolacije koja smanjuje prijenos topline s okolišem konvekcijom i zračenjem [102]. Analiza provedena

na 36 numeričkih TRT rezultata pod utjecajem različitih vremenskih prilika rezultirala je preporukom trajanja TRT-a od barem 60 sati, kako bi se modelom ILS dobila svojstva unutar ±5 % od točne toplinske provodnosti tla [103].

Vodonosnici koji uzrokuju izraženi konvektivni prijenos topline u podzemlju onemogućuju primjenu ILS modela. U tom slučaju nije moguće stacioniranje toplinske provodnosti produljenjem mjerenja što može dovesti do nerealno visokih vrijednosti toplinske provodnosti tla [104]. Utjecaj vodonosnika na primjenjivost ILS modela moguće je provjeriti sekvencijalnom analizom mjerenja, kako bi se prikazala promjena efektivne toplinske provodnosti tla s vremenom mjerenja [105,106].

Aproksimacija BIT-a linijskim izvorom proširena je uvođenjem beskonačnog cilindričnog modela (engl. *Infinite cylindrical source* – ICS), u kojem se geometrija izmjenjivača u tlu iskazuje cilindrom ekvivalentnog promjera [100]. Toplinski odziv tla iskazan je u obliku *G* funkcije koja ovisi samo o Fourierovom broju i bezdimenzijskom radijusu koji za rub bušotine iznosi 1 (jednadžba (30)). Aproksimacija bušotine cilindrom omogućuje točniju primjenu *ICS* modela u odnosu na ILS model za raniji vremenski interval te je pogodniji za bušotine većeg promjera.

$$\vartheta(r,t)-\vartheta_{\mathrm{tlo}}=\frac{\phi_L}{\lambda}G(\frac{at}{r^2_{\mathrm{b}}},\frac{r}{r_{\mathrm{b}}}) \tag{30}$$

Pri dugoročnom toplinskom odzivu tla aksijalna komponenta izmjene topline prestaje biti zanemariva te aproksimacija beskonačnim izvorima unosi s povećanjem vremena sve veću pogrešku. Stoga je razvijen opis konačnog linijskog izvora (engl. *Finite line source* – FLS) [29,107]. Model je unaprijeđen kako bi obuhvatio i geotermalni temperaturni gradijent te varijaciju temperatura na površini [108,109]. Međusobna usporedba triju modela za bušotinu radijusa 0,05 m pokazuje je da je razlika ILS i ICS 10 % nakon 10 sati te 1 % nakon 26 dana, dok konačna dimenzija bušotine postaje primjetna tek nakon vremenskog odmaka reda veličine godine i više [110]. Lamarche je proširio usporedbu ICS i ILS uspoređujući ih s numeričkim modelom razvijenim u programskom paketu COMSOL. U odnosu na slična istraživanja, pokazano je da je model ICS točniji u prvom vremenskom periodu odziva tla samo onda ako se primjenjuje koncept ekvivalentnog promjera, a ako se model primjenjuju na radijus bušotine, onda je ILS točniji [111].

Tablica 2-3 Vremenski okvir relativnog odstupanja ILS modela u odnosu na FLS [110]

Odstupanje ILS modela u odnosu na FLS	**Vremenski interval**
2 %	34 sata do 1,6 godina

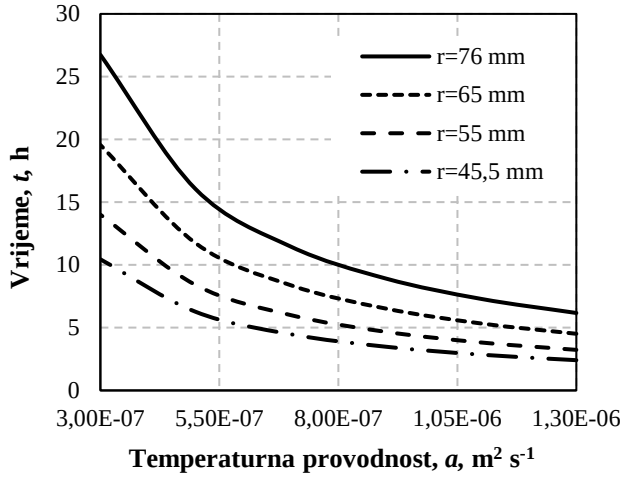
5 %	13 sati do 18 godina
10 %	6 sati do 86 godina

Iako usporedba ILS-a i FLS-a, u slučaju da se koriste za dimenzioniranje BIT-a, upućuje na to da uporaba ILS modela dovodi do nepotrebnog predimenzioniranja BIT-a zbog zanemarivanja aksijalne komponente prijenosa topline [112], odstupanja ILS modela (Tablica 2-3) pokazuju da je isti primjenjiv pri obradi rezultata TRT-a.

Provođenje TRT-a podložno je različitim čimbenicima koji mogu utjecati na kvalitetu određivanja svojstava uključujući karakteristike mjerne opreme, kvalitetu izvedbe bušotine, stanje okoliša u kojem se nalazi bušotine i mjerna oprema te ograničenja primijenjenoga modela za obradu podataka. Detaljna analiza utjecajnih parametara na točnost određivanja svojstva TRT-om pokazala je da je mjerna nesigurnost određivanja toplinske provodnosti ±5-10 %, a otpora bušotine ±10-15 % [98,113].

2.4. Beskonačni linijski model

Zbog prijelaznih pojava pri pokretanju TRT-a, te matematičke formulacije ILS-a, model nije primjenjiv za prve sate od početka mjerenja. Za Fourierov broj 5, odstupanje ILS-a je 10 %, a za Fourierov broj 20, odstupanje je 2,5 %. Vrijeme za koje je Fourierov broj manji od 5 za tipične bušotine kreće se u rasponu od 5 do 20 sati.



Materijal	Temperaturna provodnost a 10^6 m^2 s^{-1}
Granit	1,33
Vapnenac	1,24
Pijesak (zasićeni)	0,96
Šljunak (zasićeni)	0,75
Glina (zasićena)	0,68
Glina (suha)	0,32

Slika 2-3 Prikaz vremena t=5·Fo za tipične dimenzije bušotine i određene vrste tla

Prijenos topline provođenjem u općem obliku opisan je sljedećom jednadžbom u kartezijevim koordinatama:

$$\rho c_{\mathrm{p}} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right) + \phi_{\mathrm{v}} \tag{31}$$

Uz pretpostavke da nema toplinskog izvora Φ_{v}, da je provođenje jednodimenzijsko u

radijalnom smjeru te da je tlo izotropan medij jednolike temperature, rješenje jednadžbe (31) primjenom beskonačnog kontinuiranog linijskog toplinskog izvora daje izraz za promjenu temperature u trenutku *t* i na radijusu *r* zbog konstantnog toplinskog toka Φ_L [114]:

$$\vartheta(r,t)-\vartheta_{tlo}=\frac{\phi_L}{4\lambda\pi}\int_{\frac{r^2}{4at}}^{\infty}\frac{e^{-u}}{u}du=\frac{q}{4\lambda\pi}E_I\left(\frac{r^2}{4at}\right) \tag{32}$$

Carslaw i Jager su u rješenje uveli aproksimaciju eksponencijalnog integrala razvojem istog u Taylorov reda pri čemu se za dovoljno veliku vrijednost parametra $(4at)/r^2$ eksponencijalni integral može aproksimirati s prva dva člana reda [114]:

$$E_I\left(\frac{r^2}{4at}\right)=-\gamma-\ln\left(\frac{r^2}{4at}\right)-\sum_1^{\infty}(-1)^n\frac{\left(\frac{r^2}{4at}\right)^n}{n\,n!} \tag{33}$$

Uvrštavanje jednadžbe (33) u (32) uz pretpostavku da je temperatura toplinski neporemećenog tla ϑ_{tlo} konačan izraz ILS modela je:

$$\vartheta(r,t)-\vartheta_{tlo}=\frac{\phi_L}{4\lambda\pi}\left[ln(t)+ln\left(\frac{4a}{r^2}\right)-\gamma\right] \tag{34}$$

Tijekom TRT-a mjeri se temperatura fluida na ulazu i na izlazu iz izmjenjivača. Nakon stacioniranja izmjene topline s tlom, razlika temperature fluida i zida bušotine proporcionalna je toplinskom otporu bušotinskog izmjenjivača topline:

$$\vartheta_{fluid}(t)-\vartheta_b(t)=\phi_L\,R_b \tag{35}$$

Ako se jednadžba iskaže za zid bušotine na radijusu r_b dobiva se konačni oblik izraza za obradu TRT-a prema ILS modelu:

$$\vartheta_{fluid}(t)=\frac{\phi_L}{4\lambda\pi}\left[ln(t)+ln\left(\frac{4a}{r_b^{\,2}}\right)-\gamma\right]+\phi_L\,R_b+\vartheta_{tlo} \tag{36}$$

Za konstantan toplinski tok, temperatura fluida linearno se mijenja u funkciji prirodnog logaritma vremena pa je prethodni izraz zapisan u linearnom obliku:

$$\vartheta_{fluid}(t)=k\,ln(t)+c=\frac{\phi_L}{4\lambda\pi}ln(t)+\frac{\phi_L}{4\lambda\pi}\left[ln\left(\frac{4a}{r_b^{\,2}}\right)-\gamma\right]+q\,R_b+\vartheta_{tlo} \tag{37}$$

Određivanjem koeficijenta proporcionalnosti, odnosno koeficijenta nagiba pravca *k*, moguće je odrediti efektivnu toplinsku provodnost λ_{ef} te naknadno i efektivni toplinski otpor bušotinskog izmjenjivača topline $R_{b,ef}$:

$$\lambda_{ef}=\frac{\phi_L}{4\pi k}\qquad R_{b,ef}=\frac{\vartheta_{fluid}-\vartheta_{tlo}}{\phi_L}-\frac{1}{4\pi\lambda}\left[ln(t)+ln\left(\frac{4a}{r_b^{\,2}}\right)-\gamma\right] \tag{38}$$

Određena svojstva označavaju se kao efektivna, jer predstavljaju srednju vrijednost koja se odnosi na cjelokupnu bušotinu neovisno o kvaliteti izvedbe, sastavu tla ili različitih pojavnih oblika u samom tlu.

Toplinski tok određuje se toplinskom bilancom fluida, a temperatura fluida se računa kao aritmetička sredina ulazne i izlazne temperature medija iz bušotine. U slučaju da je poznat profil temperatura onda je moguće iskazati i stvarnu srednju temperaturu medija u BIT-u osrednjavanjem *n* očitanja (40).

$$\phi_{\mathrm{L}} = \frac{q_{\mathrm{m}} c_{\mathrm{fluid}} \left(\vartheta_{\mathrm{ulaz}} - \vartheta_{\mathrm{izlaz}} \right)}{H} \qquad \vartheta_{\mathrm{f}} = \frac{\vartheta_{\mathrm{ulaz}} + \vartheta_{\mathrm{izlaz}}}{2} \tag{39}$$

$$\vartheta_{\mathrm{f}} = \frac{\sum_i^n \vartheta_i}{n} \tag{40}$$

S obzirom na to da se dvije veličine određuju samo iz jedne jednadžbe, dobivena toplinska provodnost i otpor nisu neovisni [115]. Kako bi se povećala točnost određivanje stvarnog para parametara koji opisuju bušotinski izmjenjivač topline, predloženo je praćenje oporavka tla nakon unesenog poremećaja [98]. Oporavak tla omogućuje neovisno određivanje toplinske provodnosti tla o toplinskom otporu bušotine te naknadnom računanju toplinskog otpora bušotine iz faze grijanja. Ta procedura neminovno produžuje trajanje TRT-a te se najčešće u praski ne provodi. Analiza oporavka provodi se primjenom principa superpozicije u kojem se promjenjivi toplinski tok iskazuje kao niz više različitih pulsova [98]:

$$\phi_{\mathrm{L}}(t) = \begin{cases} \phi_{\mathrm{L}1}, & 0 < t < t_1 \\ \phi_{\mathrm{L}2}, & t_1 < t < t_2 \\ \phi_{\mathrm{L}n}, & t_2 < t < t_n \end{cases} \tag{41}$$

$$\vartheta_{\mathrm{fluid}}(t) = \sum_i^n \left(\phi_{\mathrm{L}i} - \phi_{\mathrm{L}i-1} \right) \frac{E_I\left(\dfrac{r^2}{4at - t_{i-1}} \right)}{4\lambda_{\mathrm{tlo}}\pi} + \phi_{\mathrm{L}i} R_{\mathrm{b}} + \vartheta_{\mathrm{tlo}} \tag{42}$$

Prethodno opisana metoda određivanja svojstava preko nagiba pravca naziva se grafička ili izravna metoda koja rezultira s jednim parom rješenja.

Alternativni pristup obradi podataka jest estimacija parametara u kojem je cilj variranjem toplinske provodnosti i toplinskog otpora bušotine minimizirati objektnu funkciju [92]. Objektna funkcija najčešće uključuje razliku mjerene i modelirane temperature fluida koristeći korijen srednje kvadratne pogreške (*engl.* root mean squarred error – RMSE) [115].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n \left(\vartheta_{\mathrm{izmjereno}} - \vartheta_{\mathrm{modelirano}} \right)^2} \tag{43}$$

Pregled iterativnih algoritama korištenih za analizu rezultata TRT-a dan je u [92]. Osnovna prednost estimacije parametara je mogućnost utvrđivanja korelacije rješenja toplinske provodnosti i otpora, odnosno prepoznavanje niza parova rješenja koji zadovoljavaju kriterij postavljen kod objektne funkcije. Dodatno, estimacija parametara se može koristiti s prikazanim ILS modelom, kao i sa složenijim modelima [67]. Usporedba dviju metoda na 6 provedenih TRT-a, ali s objektnom funkcijom u obliku minimalne razlike kvadrata, pokazala je da metoda estimacije parametara rezultira nižim vrijednostima toplinske provodnosti (oko 0,1 W m^{-1} K^{-1}) i toplinskog otpora (oko 0,06 m K W^{-1}) te nižom relativnom greškom u odnosu na mjerene podatke [116]. Kako bi se ubrzalo vrijeme estimacije iterativnim algoritmom preporuka je koristiti inicijalne vrijednosti izračunate izravnom metodom [117].

Neovisno o primijenjenoj metodi odabir intervala mjerenih podataka za obradu mora biti u skladu s ograničenjima modela, npr. Fourierov broj veći od 5 za ILS, te takav da se izdvoje eventualni poremećaji u mjerenju koji mogu utjecati na rezultate. Na primjeru provedenog TRT-a u trajanju od 38 sati pokazano je da različiti intervali odabrani za obradu rezultiraju rasponom efektivne toplinske provodnosti od 1,397 do 1,493 W m^{-1} K^{-1}. Kao kriterij za odabir konačnog rješenja uzet je interval s najvećim koeficijentom determinacije linearne regresije [118]. Složeniji pristup dan je u [119] gdje je interval za obradu određen korištenjem Bland-Altmanove analize [120].

Efektivna toplinska provodnost i efektivni toplinski otpor, određeni kao rezultat konvencionalnog TRT-a, veličine su koje vrijede za cjelokupnu dubinu bušotine ne uzimajući u obzir heterogenost tla. Usporedba redoslijeda slojeva tla pokazala je da veću izlaznu temperaturu fluida iz bušotine ima tlo u kojem se s dubinom smanjuje toplinska provodnost nego ono u kojem se povećava [121]. U simulaciji je tlo podijeljeno na 4 dijela po 25 m te je analiziran utjecaj redoslijeda pojavljivanja slojeva u tlu na izmjenu topline s tlom. Autori su iskazali aritmetičku prosječnu toplinsku provodnost tla, ali nisu na temelju dobivenih temperaturnih krivulja izračunali efektivna toplinska svojstva tla dobivena TRT-om, a koja ne moraju biti jednaka prosječnoj vrijednosti [99]. Numerička simulacija TRT-a u heterogenom tlu potvrdila je da toplinski tok nije jednoliko raspoređen ni po dubini bušotine ni tijekom trajanja toplinskog poremećaja [122]. Kod homogenog tla, distribucija toplinskog toka po dubini bušotine linearne je prirode i rezultat je smanjenja razlike temperature medija i tla s porastom dubine bušotine. Kod nehomogenog tla svojstva tla uvjetuju izmijenjeni toplinski tok te poznavanje vertikalne razdiobe svojstava tla omogućuje optimiranje dubine BIT-a [123]. Unaprjeđenje metodologije određivanja svojstava tla moguće je mjerenjem temperature uzduž BIT-a tijekom unošenja toplinskog poremećaja u tlu. Upotrebu kabela s optičkim vlaknom za

distributivno mjerenje temperature predložio je Fujii *et al.* što omogućuje provođenje distributivnog mjerenja toplinskog odziva tla (DTRT) [63]. Istu metodologiju mjerenja temperature na različitim izvedbama bušotinskih izmjenjivača topline primijenili su različiti autori [66,124,125]. Rezultat DTRT-a jest razdioba toplinskih svojstava tla po dubini bušotine te mogućnost utvrđivanja profila temperature neporemećenog te toplinski poremećenog tla u fazi grijanja i fazi oporavka. Analiza rezultata DTRT moguća je sličnom metodologijom kao i TRT-a pri čemu je nužno za svaki promatrani segment bušotine izračunati srednju temperaturu medija, temperaturnu razliku medija unutar segmenta i ostvareni toplinski tok (jednadžbe (44) , (45), (46)). Kabel s optičkim vlaknom također omogućuje određivanje stvarne srednje temperature medija u izmjenjivaču.

$$\vartheta_{\mathrm{sr,segment}} = \frac{\vartheta_{\mathrm{ulaz1}} + \vartheta_{\mathrm{izlaz1}} + \vartheta_{\mathrm{ulaz2}} + \vartheta_{\mathrm{izlaz2}}}{4} \tag{44}$$

$$\Delta\vartheta_{\mathrm{segment}} = \vartheta_{\mathrm{ulaz,1}} - \vartheta_{\mathrm{izlaz,1}} + \vartheta_{\mathrm{ulaz,2}} - \vartheta_{\mathrm{izlaz,2}} \tag{45}$$

$$\phi_{\mathrm{L}} = \frac{q_{\mathrm{m}} c_{\mathrm{fluid}} \Delta\vartheta_{\mathrm{segment}}}{z_{\mathrm{segment}}} \tag{46}$$

3. HIPOTEZA I STRUKTURA RADA

3.1. Cilj i hipoteza istraživanja

Primjena distributivnog mjerenja temperature prilikom ispitivanja toplinskog odziva tla omogućuje određivanje vertikalne razdiobe svojstava tla te stvarnog profila temperature toplinski neporemećenog tla. Ispitivanje odziva tla pokazuje da heterogenost tla ima vidljiv utjecaj na razdiobu toplinskog toka po dubini bušotine i na izlaznu temperaturu fluida iz bušotinskog izmjenjivača topline. Ipak, dugoročni utjecaj heterogenog tla u odnosu na idealizirano homogeno tlo na rad sustava u literaturi nije istražen te je stoga kao cilj rada definirano eksperimentalno istraživanje sustava geotermalne dizalice topline u radu te detaljna simulacija interakcije izmjenjivača u tlu i same dizalice. Postavljene hipoteze istraživanja su:

- razvoj numeričkog modela izmjenjivača u tlu omogućuje ocjenu utjecaja pojedinih čimbenika na učinkovitost izmjenjivača, analizu nestacionarnih promjena te validaciju s mjerenjima razdiobe temperatura u bušotini,
- simulacija rada sustava i usporedba s mjerenim rezultatima omogućuje kvantificiranje utjecaja promjena u tlu na cjelogodišnju učinkovitost geotermalne dizalice topline te bilanciranje izmjene topline između potrošača i tla kao toplinskog spremnika,
- razvijeni model omogućuje bolje razumijevanje promjena u tlu zbog rada sustava.

3.2. Znanstveni doprinos

Znanstveni doprinos istraživanja uključuje razvoj modela interakcije dizalice topline i bušotinskog izmjenjivača topline u heterogenom tlu te analiza utjecaja vertikalne razdiobe toplinskih svojstava tla na rad geotermalne dizalice topline i rezultirajuća temperaturna polja u tlu prilikom rada sustava.

Proširenje spoznaja o toplinskom otporu bušotinskog izmjenjivača topline u konfiguraciji dvostruke U cijevi, za koju ne postoje analitički izrazi primjenjivi za širok raspon izvedbi iste kao za konfiguraciju jednostruke U cijevi. Modeliranjem segmenta bušotine prikazan je mogući raspon toplinskog otpora u slučaju asimetričnog položaja cijevi unutar bušotine.

Analiza temperaturnog profila toplinski neporemećenog tla s ciljem pojednostavljenja određivanja temperature tla na osnovu ograničenih dostupnih podataka te analiziranje vremenske i prostorne zone utjecaja građevine na temperaturno polje u tlu.

3.3. Struktura rada

Rad je podijeljen u osam zavisnih poglavlja.

Uvod:

Opis motivacije i potencijala primjene dizalica topline povezanih s tlom, objašnjenje strukture

Zemljine kore i procesa koji uzrokuju prijenos topline iz Zemljine jezgre do površine. Definicija plitke, odnosno niskotemperaturne geotermalne energije, te podjela sustava za iskorištavanje iste. Prikaz osnova dizalice topline te prednosti i nedostatci tla kao toplinskog spremnika.

Pregled literature:

Pregled obuhvaća niz istraživanja uključujući temeljna djela iz područja primjene geotermalne energije te nova istraživanja s naglaskom na utjecajne parametre na rad izmjenjivača topline i učinkovitost dizalice topline. Pregled je strukturiran tako da pojedinačno obrađuje istraživanja vezana uz određivanje i utjecaj temperature tla, opis toplinskih otpora BIT-a, modela za obradu mjerenja toplinskog odziva tla te na kraju unaprjeđenje ispitne metode primjenom distributivnog mjerenja temperature.

Hipoteza i struktura rada:

Hipoteza i ciljevi rada prikazani su u skladu s pregledom literature, a znanstveni doprinos u skladu s diskusijom rezultata i zaključkom istraživanja.

Opis sustava geotermalne dizalice topline:

Poglavlje sadrži opis lokacije izmjenjivača, osnovne parametre izvedene bušotine i izvedbu dizalice topline. Prikazana je shema sustava i opisana mjerna oprema korištena pri određivanju toplinskih svojstava tla te praćenju rada dizalice topline.

Određivanje toplinskih svojstava tla:

U poglavlju je sadržana metodologija provođenja mjerenja, obrade rezultata te sami rezultati DTRT-a. Temperaturni profil tla uspoređen je s analitičkim modelom te je numerički modeliran višegodišnji utjecaj zgrade na temperaturno polje u okolišnjem tlu. Efektivna svojstva tla iskazana su za segmente po 10 metara, a svojstva su odvojeno određena za fazu grijanja i za fazu oporavka te su uspoređeni različiti pristupi osrednjavanja temperature fluida u BIT-u.

Modeliranje interakcije tla, bušotinskog izmjenjivača topline i dizalice topline:

Opis primijenjenog modela za tlo, bušotinski izmjenjivač i dizalicu topline. Povezivanje modela dizalice topline i izmjenjivača pomoću masenog protoka i temperature fluida. Analiza vremenskog koraka modela i validacija s podacima iz literature i mjerenjima.

Sezonski rad dizalice topline u grijanju i hlađenju:

Primjena razvijenog modela u prethodnom poglavlju za analizu utjecaja vertikalne razdiobe svojstava tla. Prikaz sezonskog rada sustava u režimu grijanja i hlađenja te rezultirajuća temperaturna polja i učinkovitost sustava za različite temperaturne profile toplinski neporemećenog tla.

Zaključak:

Pregled rada i rezime rezultata istraživanja.

4. OPIS SUSTAVA GEOTERMALNE DIZALICE TOPLINE

Geotermalna dizalica topline uređaj je koji iskorištava tlo kao obnovljivi toplinski spremnik topline za potrebe grijanja i hlađenja. U praksi postoje različiti načini iskorištavanja topline tla, a predmet ovog istraživanja jest izvedba dizalice topline povezane s vertikalnim bušotinskim izmjenjivačem topline. Sustav dizalice topline koristi se za cjelogodišnje grijanje i hlađenje dviju računalnih učionica.

4.1. Lokacija

Sustav dizalice topline povezane s vertikalnim bušotinskim izmjenjivačem topline je izveden na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu (zgrada izgrađena u periodu 1961.-1968. godine). Bušotinski izmjenjivač topline nalazi se ispod travnate površine s istočne strane južne zgrade Fakulteta, a dizalica topline postavljena je u vanjskom okolišu u skladu sa sigurnosnim zahtjevima radne tvari R290 (propan). Sustav upravljanja, napajanja te akvizicije mjerenih podataka nalazi se u Tehničkoj sobi u uz računalne učionice, S7 i S8, koje se griju i hlade navedenim sustavom. Dvije učionice su zrcalno simetrične te svaka ima 74,12 m^2 korisne površine. Nalaze su u prizemlju, a iznad njih je grijani prostor. Po duljoj stranici dvije učionice dijele zajednički unutarnji zid, dok su vanjski zidovi opremljeni staklenim prozorima i orijentirani su na jug (S7) i sjever (S8). Po kraćoj stranici, unutarnji zidovi učionica su povezani s hodnikom, a vanjski zid na istočnoj strani ne sadrži nikakve otvore. Učionice su opremljene računalima i koriste se u nastavne svrhe većeg broja različitih kolegija.



Slika 4-1 Prikaz lokacije bušotine (crveno) i kondicioniranih učionica (plavo) u sklopu Fakulteta strojarstva i brodogradnje

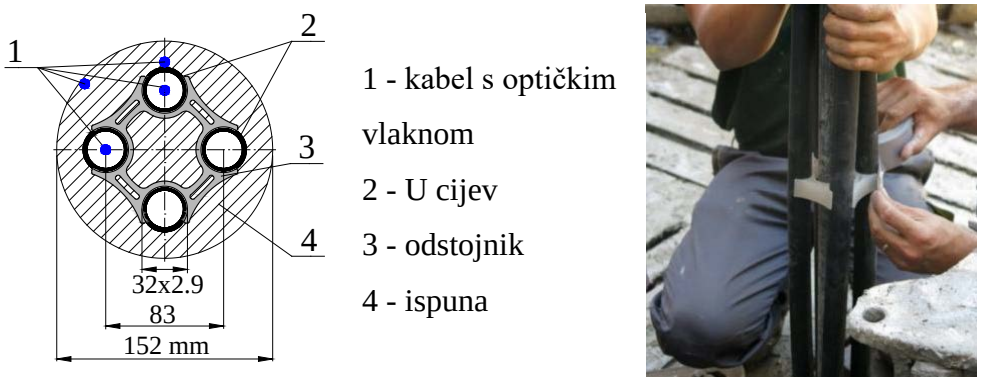
4.2. Geotermalna dizalica topline

Sustav dizalice topline moguće je razdvojiti na tri dijela: bušotinski izmjenjivač topline, dizalicu topline i sustav razvoda s ventilokonvektorima.

Bušotinski izmjenjivač topline izveden je u obliku dvostruke U cijevi od polietilena (PEHD 100). Razmak između osi cijevi od 83 mm održava se upotrebom *odstojnika* koji su postavljeni svaka 2 m. Promjer bušotine iznosi 152 mm, a dubina je 130 m. Nakon polaganja cijevi bušotina je zapunjena tvorničkom ispunom *Fischer GeoSolid 235*. Svrha ispune jest cementacije bušotine kako ne bi došlo do urušavanja iste te osiguranje toplinskog dodira cijevi i tla koje okružuje bušotinu. Prilikom određivanja svojstava tla kao radni medij u izmjenjivaču korištena je voda. Pri radu sustava kroz bušotinski izmjenjivač topline struji glikolna smjesa kako bi se spriječilo zamrzavanje fluida u isparivaču i površinskom razvodu do dizalice topline.

Tablica 4-1 Karakteristike bušotinskog izmjenjivača topline

Dubina bušotine:	**130 m**
Promjer:	152 mm
Bušotinski izmjenjivač topline:	Dvostruka U cijev, PEHD 100
Dimenzije cijevi:	32x2,9 mm
Materijal ispune :	Fisher GeoSolid 235
Toplinska provodnost materijala ispune:	2,35 W m^{-1} K^{-1}
Gustoća materijala ispune:	1800 kg m^{-3}
Medij u izmjenjivaču:	glikolna smjesa (27 %)



Slika 4-2 Poprečni presjek bušotinskog izmjenjivača topline (lijevo) i prikaz izmjenjivača s odstojnikom prilikom ugradnje (desno)

Dizalica topline proizvod je tvrtke *Frigo Plus.* Radna tvar je propan (R290) koja spada u zapaljive radne tvari pa je iz tog razloga dizalica topline ugrađena u vanjski okoliš opremljena sustavom ventilacije i detekcije propana. Propan je prirodna radna tvar. Zbog dobrih termofizikalnih i ekoloških svojstva sve češće istražuje njegova primjena u skladu s europskom Uredbom 517/2014 o fluoriranim stakleničkim plinovima koja ograničava upotrebu radnih tvari s velikim utjecajem na globalno zatopljenje.



Slika 4-3 Dizalica topline s integriranim hidrauličkim modulom (lijevo) te akvizicijski sustav i elektro-regulacijski ormar u Tehničkoj sobi (desno)

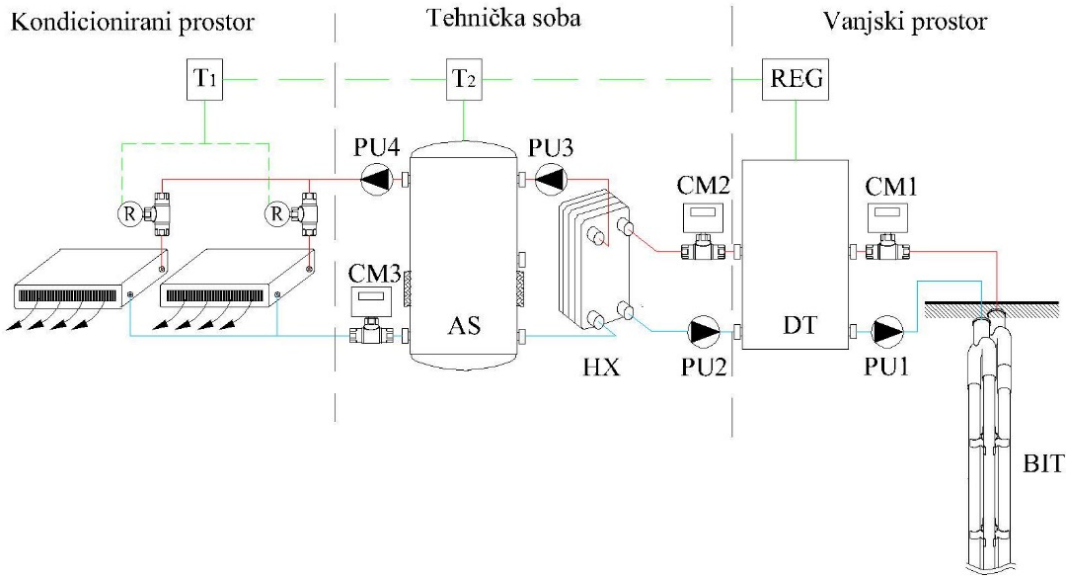
Dizalica topline sastoji se od poluhermetičkog stapnog kompresora, kompaktnih pločastih isparivača i kondenzatora te elektroničnog ekspanzijskog ventila koji osigurava pregrijanja radne tvari na izlazu iz isparivača. Dodatno, ugrađen je i pločasti međuizmjenjivač koji osigurava dodatno pothlađenje radne tvari na izlazu iz kondenzatora te pregrijanje radne tvari na ulazu u kompresor. S obzirom na zapaljivost propana i nedostupnost prekretnog ventila u *ATEX* izvedbi, prekretanje procesa iz grijanja u hlađenje i obrnuto odvija se na *vodenoj* strani. Odnosno, u režimu grijanja isparivač je povezan s bušotinskim izmjenjivačem topline, a kondenzator sa sustavom razvoda grijanja, dok je u sezoni hlađenja kondenzator povezan s izmjenjivačem u tlu, a isparivač s razvodom hlađenja.

Razvod grijanja i hlađenja sastoji se od pločastog međuizmjenjivača koji razdvaja krug vode i krug glikolne smjese, akumulacijskog spremnika, ukupno četiri ventilokonvektora u učionicama te pripadne armature za siguran i nesmetan rad sustava. Ventilokonvektori su izvedeni u stropnoj izvedbi te se u svakoj prostoriji nalazi termostat za podešavanje željene temperature u kondicioniranom prostoru.

4.3. Shema sustava i opis rada

Ovisno o postavkama željene temperature grijanja i hlađenja u svakoj od učionica te potrebama za grijanjem i hlađenjem regulacija sustava se odvija na sljedeći način. U sezoni grijanja, ako je temperatura u prostoru manja od postavljene na sobnom termostatu (T_1), pumpa potrošača (PU4), koja se nalazi između ventilokonvektora i akumulacijskog spremnika, cirkulira vodu kroz ventilokonvektore koji zagrijavaju zrak u prostoru. Kada se prilikom potrošnje toplinske energije u akumulacijskom spremniku (AS) temperatura vode spusti ispod postavljene

temperature (npr. 45 ºC) (T_2), regulacija uključuje cirkulacijske pumpe (PU2 i PU3) između dizalice topline i spremnika topline, pumpu prema bušotini (PU1) te se pokreće i sama dizalicu topline (DT). Dizalica topline radi u ON/OFF načinu rada, odnosno uređaj se uključuje i isključuje ovisno o postavljenoj temperaturi u spremniku i diferenciji temperature prilikom pražnjenja spremnika.



Slika 4-4 Pojednostavljena shema sustava geotermalne dizalice topline (T-osjetnik temperature, REG-regulacijski sustav, PUx-cirkulacijska pumpa, CMx-mjerilo toplinske energije, AS-akumulacijski spremnik, HX-međuizmjenjivač, DT-dizalica topline, BIT-bušotinski izmjenjivač topline)

4.4. Mjerno-akvizicijski sustav

U svrhu određivanja učinkovitosti sustava geotermalne dizalice topline te praćenja izmjene topline s tlom ugrađeno je više različitih mjernih osjetnika. Mjereni parametri uključuju:

- temperature u vodenom krugu grijanja/hlađenja
- temperature glikolne smjese u bušotinskom izmjenjivaču topline
- temperature radne tvari (R290) u dizalici topline
- tlak na usisnom i tlačnom vodu kompresora dizalice topline
- volumni protok kroz izmjenjivač topline, prema akumulacijskom spremniku topline i prema potrošaču
- isporučena toplinska energija na strani tla i sustava potrošača
- električnu potrošnju dizalice topline, zasebno kompresora i upravljanja dizalice topline te svih pumpi u sustavu

Akvizicija podataka provodi se na računalu, temperature i tlakovi se prikupljaju kao analogni signali preko akvizicijskog uređaja Agilent, dok se podaci s mjerila toplinske i električne energije prikupljaju preko Mod bus protokula i *Scada* programskog paketa tvrtke *Schneider*.

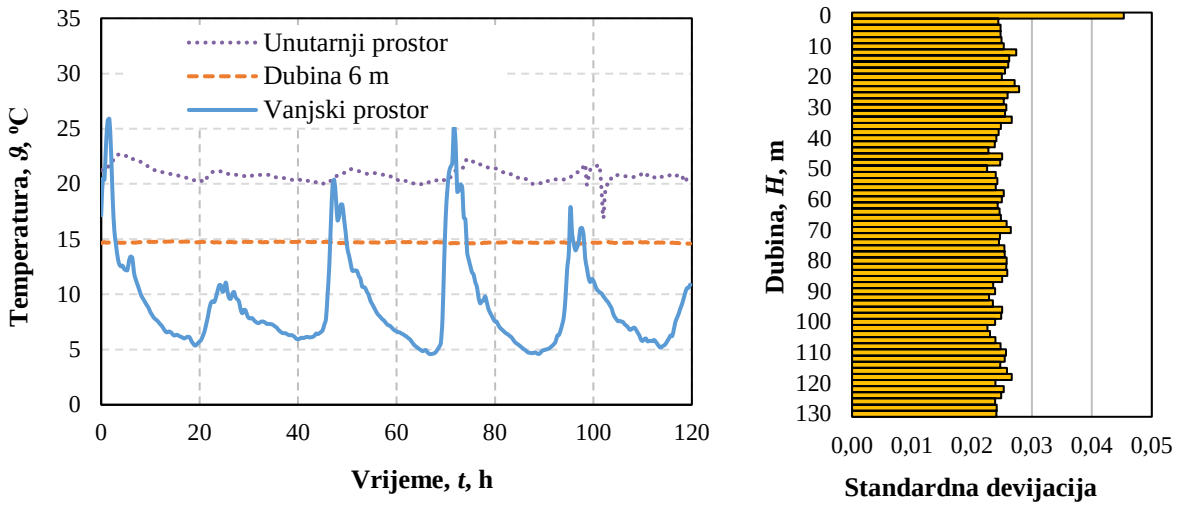
Tablica 4-2 Specifikacija komponenti mjernog sustava

Mjereni parametri	Komponenta	Specifikacija opreme
Temperatura: - zrak u prostoru i vani - polaz/povrat prema bušotini, međuizmjenjivaču, spremniku, potrošačima - radna tvara u karakterističnim točkama procesa	Termopar K tip	Klasa I prema IEC 60584:2013 ±1,5 ºC (-40 – 1000 ºC)
Temperatura glikolne smjese u bušotinskom izmjenjivaču	Optičko vlakno	AP Sensing S2005A-001 optički kabel 2x50/125 μm multimode vlakna Mjerna nesigurnost (certifikat proizvođača): ±0.2973 ºC u ±2σ intervalu Linear Pro Series N4386B uređaj za akviziciju
Tlak: - usisni vod kompresora - tlačni vod kompresora	Pretvarači tlaka	Carel tip D SPKT0011D0 / SPKT0031D0 Napajanje:0-36 Vdc Mjerni raspon (MR): 0-10 bar/0-30 bar Izlazni signal: 4-20 mA Temperaturni raspon: -40 do 135 ºC Točnost: ±1 %MR (10-40 ºC), ±2%MR(0-80 ºC), ±4 %MR (-10-135 ºC)
Volumni protok: - bušotinski izmjenjivač - prema aku. spremniku - prema potrošaču	Protokomjer / Mjerilo toplinske energije	Landis Gyr+ UH50 190 mm PN16 G1“B Ultrazvučno mjerilo protoka s Pt500 sondama za mjerenje temperature Nazivni protok: 2,5 m^3/h / 1,5 m^3/h Raspon mjerenja temperature: 5-130 ºC Mjerno područje protoka 0,025-5 m^3/h / 0,015-3 m^3/h Točnost: klasa 3 prema EN 1434 M-bus komunikacija
Električna potrošnja/snaga: - dizalica topline - kompresor - regulacija dizalice topline - pumpe u sustavu dizalice topline	Mjerilo električne energije	Schneider PM5350 / iEM3150 Mjerne veličine: napon, jakost struje, snaga, električna energija Točnost: klasa 0,5 prema IEC 61557-12/ klasa 1 prema IEC 61557-12 MOD-bus komunikacija

5. ODREĐIVANJE TOPLINSKIH SVOJSTAVA TLA

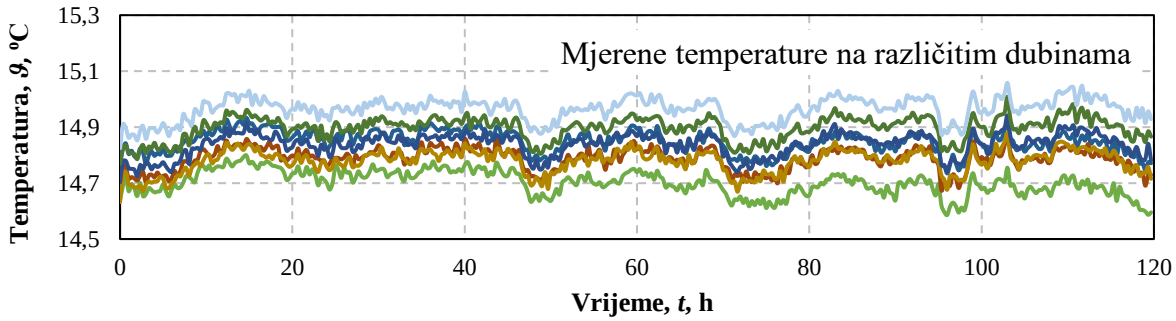
5.1. Temperatura toplinski neporemećenog tla

Temperaturni profil tla određen je distributivnim mjerenjem temperature kabelom s optičkim vlaknom. Mjerenje je provedeno u periodu od 3. do 8. travnja 2015. godine. Postavke mjerenja podrazumijevaju integracijsko vrijeme od 20 minuta i prostornu razlučivost od 2 metra te je u periodu od 120 sati očitano ukupno 47520 temperaturnih signala. Slika 5-1 prikazuje očitanja temperature za tri različite pozicije: unutar prostora Fakulteta gdje se nalazila akvizicija, na dubini 6 m u tlu te u dijelu kabela koji je bio izložen vanjskom okolišu. Standardna devijacija očitanja temperature u vremenu uzeta je kao kriterij za identifikaciju dijela kabela koji se nalazi ugrađen u bušotinski izmjenjivač topline.



Slika 5-1 Očitanje temperature kabelom s optičkim vlaknom na različitim pozicijama te standardna devijacija očitanja za različite segmente bušotinskog izmjenjivača topline

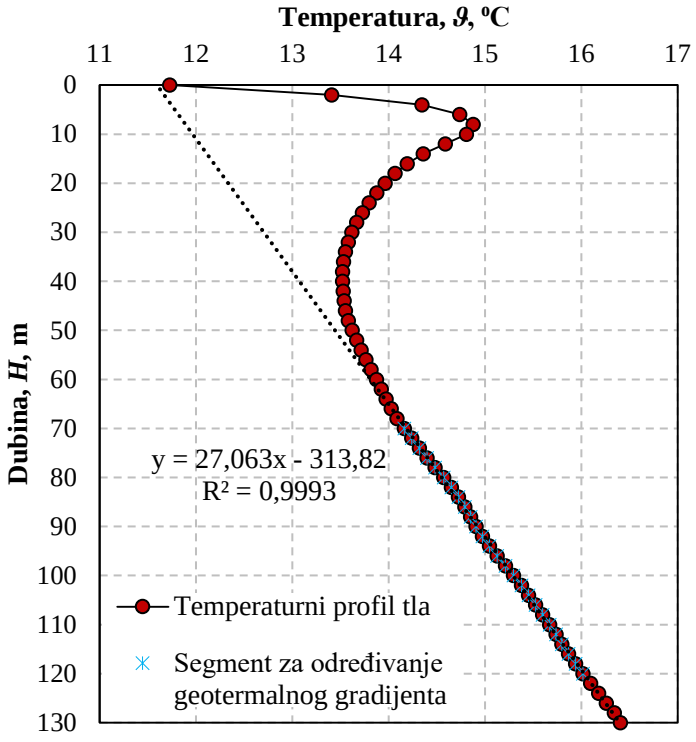
Akvizicijski uređaj smješten je Tehničkoj sobi u kojoj se temperatura kretala u rasponu od 2 °C kako bi se smanjio utjecaj promjenjive temperature okoliša na rezultate mjerenja. Slika 5-2 prikazuje mjerenja temperature u vremenu za nasumično odabrane slojeve tla.



Slika 5-2 Prikaz očitanja temperatura za nasumično odabrane slojeve tla

Na slici je moguće vidjeti porast temperature u prvih 15 sati što se pripisuje progrijavanju svježe

vode koja je korištena za ispiranje bušotinskog izmjenjivača topline prije spajanja mjerne opreme. Mjerenja temperature optičkim vlaknima nisu u potpunosti neosjetljiva na lokalne promjene temperatura mjerenog medija te je izraženija odstupanja temperature na prethodnoj slici moguće korelirati s vršnim vrijednostima temperature vanjskog okoliša koja se kretala u raspon temperatura od 4,5 do 25,9 °C. Analiza očitanih temperatura po različitim slojevima pokazuje da je, unutar svih 120 sati mjerenja, srednja razlika maksimalnih i minimalnih temperatura po sloju 0,23 °C. Za određivanje temperaturnog profila toplinski neporemećenog tla uzet je vremenski period od 17. do 43. sata kao najdulji period s minimalnom varijacijom temperature u vremenu po slojevima tla. Unutar tog perioda srednja razlika maksimalnih i minimalnih temperatura po slojevima iznosi 0,12 °C, dok se standardna devijacija očitanja po svim dubinama većim od 2 m kretala od 0,023 do 0,028 °C.

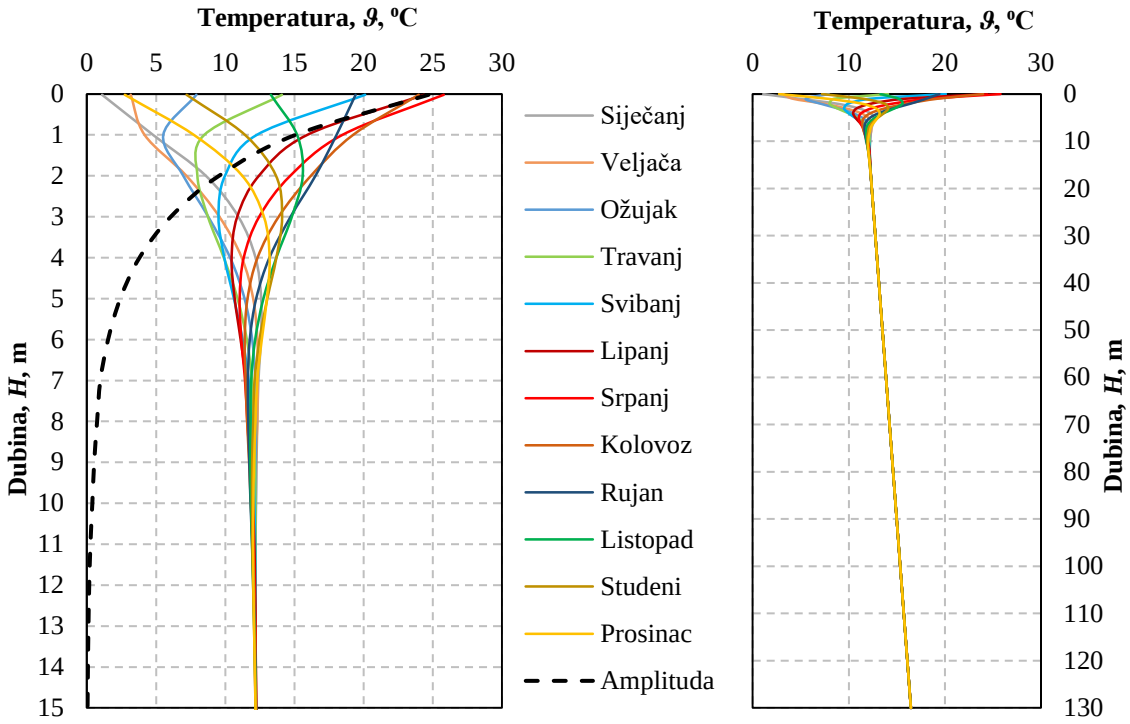


Slika 5-3 Profil temperature toplinski neporemećenog tla

Slika 5-3 prikazuje profil temperature toplinski neporemećenog tla (prikazan crvenim kružićima) na kojem je dodatno istaknut segment od 70. do 120. metra odabran za određivanje geotermalnog temperaturnog gradijenta. Smanjenje temperature tla porastom dubine vidljivo je u gornjem segmentu tla, u dijelu gdje je prisutna godišnja varijabilnost temperature tla u ovisnosti o uvjetima na površini. Na dubini od oko 10 m dolazi do pojave negativnog temperaturnog gradijenta, pripisanog toplinskom toku s površine tla karakterističnom za urbane sredine, odnosno smanjenja temperature s dubinom do 42. metra gdje je zabilježen lokalni

minimum od 13,52 °C. Navedena dubina vrlo je bliska vrijednosti od 43,18 m dobivenoj aproksimacijom izmjerenih amplituda temperature po dubini tla eksponencijalnom funkcijom za lokaciju u Zagrebu, koja je ujedno i identificirana kao dubina na kojoj se postiže ravnotežno stanje između toplinskih pojava na površini i geotermalnog temperaturnog gradijenta [54]. Ispod 42. metra dubine iščezava toplinski utjecaj pojava u blizini površine tla te se pod utjecajem geotermalnog gradijenta temperatura tla linearno povećava s porastom dubine pri čemu je izračunata vrijednost temperaturnog gradijenta 0,037 °C m^{-1}. Ekstrapolacija geotermalnog gradijenta do dubine 0 m rezultira s temperaturom 11,6 °C što odgovara srednjoj godišnjoj temperaturi zraka za lokaciju mjerne postaje Maksimir u Zagrebu [20]. Na dubini od 100 m zabilježena je temperatura 15,3 °C, što je u skladu s mjerenjima provedenim na starijoj bušotini na lokaciji Fakulteta strojarstva i brodogradnje, gdje je na istoj dubini otporničkim termoparom izmjerena temperatura 15,26 °C [126].

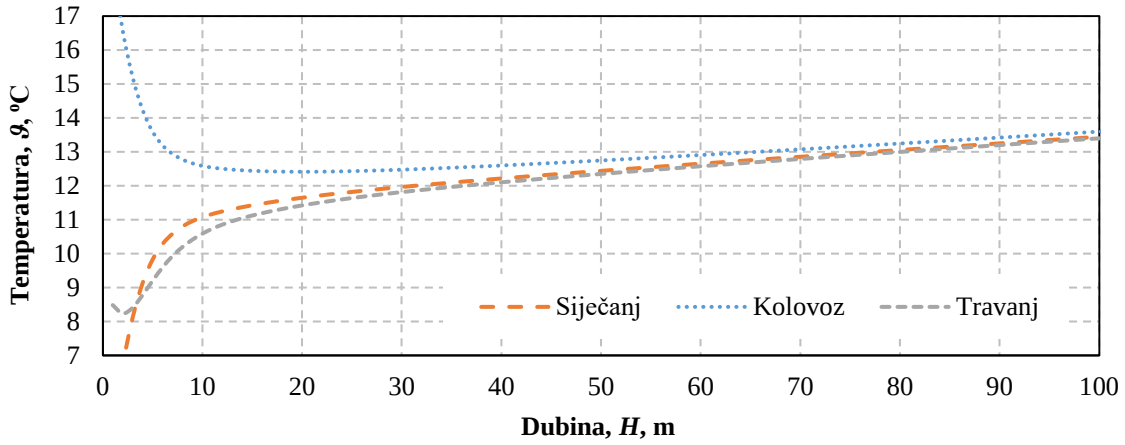
Temperaturni profil tla rekonstruiran je Kasudinim modelom u koji je uključen geotermalni temperaturni gradijent tla. Srednja godišnja temperatura i amplituda temperature uzeti su prema mjerenim podacima dostupnima za tlo dubine do 1 m za meteorološku postaju Maksimir, toplinska svojstva tla određena su usporedbom mjerenih profila temperature i analitički izračunatih za plitke slojeve tla, a za dublje slojeve korišteni su podaci dobiveni analizom uzoraka tla [66].



Slika 5-4 Razvoj temperature tla Kasudinim modelom za plitke i duboke slojeve tla

Slika 5-4 prikazuje razvijene profile temperature tla za plitke (lijevo) i duboke slojeve tla (desno). Lijevi dijagram dodatno prikazuje i smanjenje amplitude temperature tla s porastom dubine: manja je od 1 °C na dubini od 18 m, 0,1 °C na dubini od 23 m, dok u potpunosti izostaje na dubini od 48 metara, što je dublje od mjesta lokalnog temperaturnog minimuma. Prigušenje amplitude temperature određeno je analitičkim izrazom pri čemu dominantan utjecaj ima temperaturna provodnost tla, a rezultirajuće promjene amplitude na dubinama većim od 20-ak metara manje su od točnosti mjerne opreme.

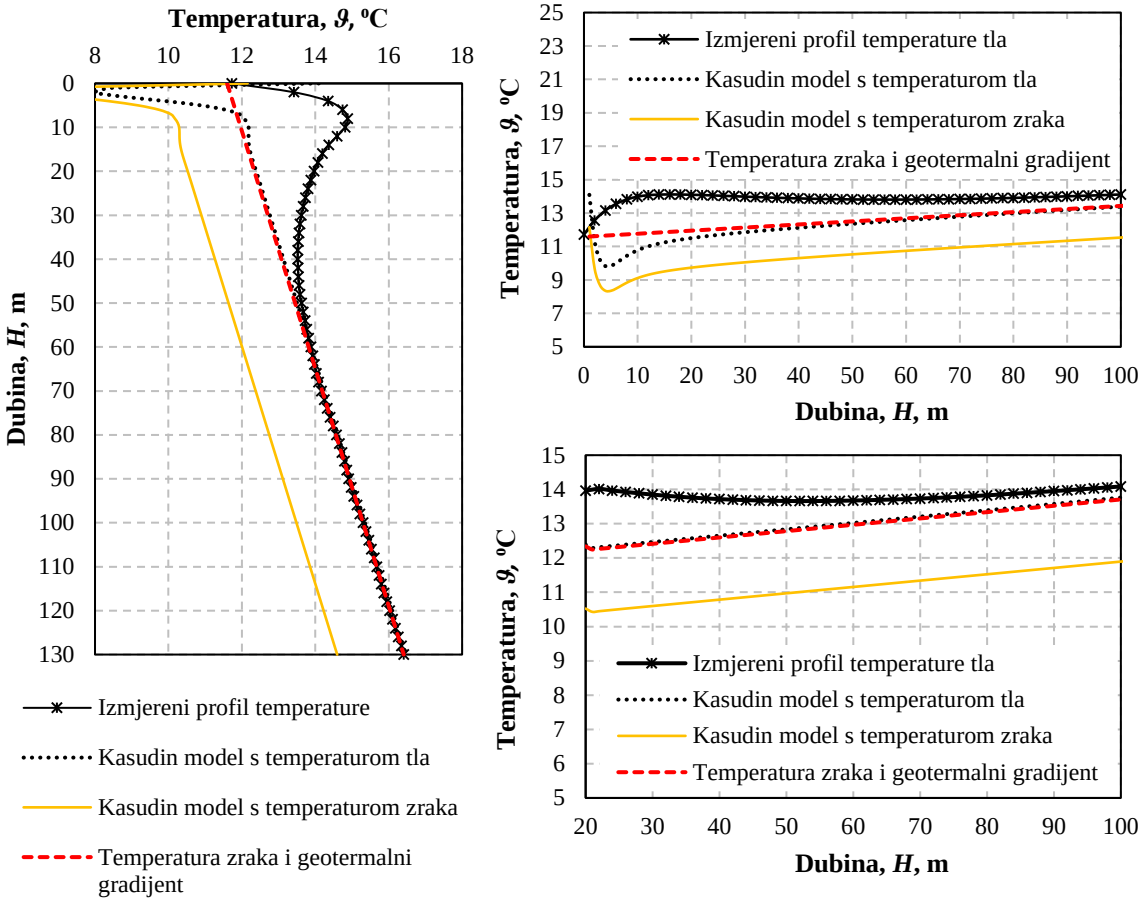
Utjecaj doba godine na određivanje temperature toplinski neporemećenog tla, usporedbom prosječne temperature tla u ovisnosti o dubini tla (Slika 5-5), pokazuje razliku između najtoplijeg i najhladnije mjeseca veću od 1 °C do 15 metara dubine. Kod eksploatacije plitke geotermalne energije na većim dubinama, doba godine nema značajnog utjecaja na prosječnu temperaturu tla.



Slika 5-5 Prosječna temperature tla na različitim dubinama za tri različita mjeseca

Kako bi se analizirale mogućnosti repliciranja profila temperature tla analitičkim putem provedena je usporedba Kasudinog modela s temperaturom tla (crna točkasta linija) i s temperaturom zraka (žuta puna linija) te razvojem geotermalnog temperaturnog gradijenta iz srednje temperature zraka (crvena crtkana linija) (Slika 5-6). Razvijeni profili prikazani su lijevo na te je vidljivo da primjena podataka za zrak u Kasudinom modelu značajno odstupa od stvarne temperature, dok preostala dva modela na većoj dubini dobro repliciraju izmjereni temperaturni profil. Kako se za dimenzioniranje BIT-ova koristi prosječna temperatura tla, međusobni odnos istih za različite dubine iskazan je na desnim dijagramima iste slike. Ako se prosječne vrijednosti određuju od same površine, vidljivo je odstupanje analitičkih profila od izmjerenog, najvećim dijelom zbog negativnog gradijenta zbog toplinskih tokova s površine tla. Također primjetan je i utjecaj sezonske promjenjivosti temperature na prosječne vrijednosti određene za plitke dijelove tla. Za dubine veće od 20 metara, razlika je zanemariva između

Kasudinog modela, koji zahtjeva veći broj ulaznih podataka vezanih uz geologiju i temperaturu površinskih slojeva tla, i jednostavnog razvoja geotermalnog temperaturnog gradijenta iz srednje godišnje temperature.



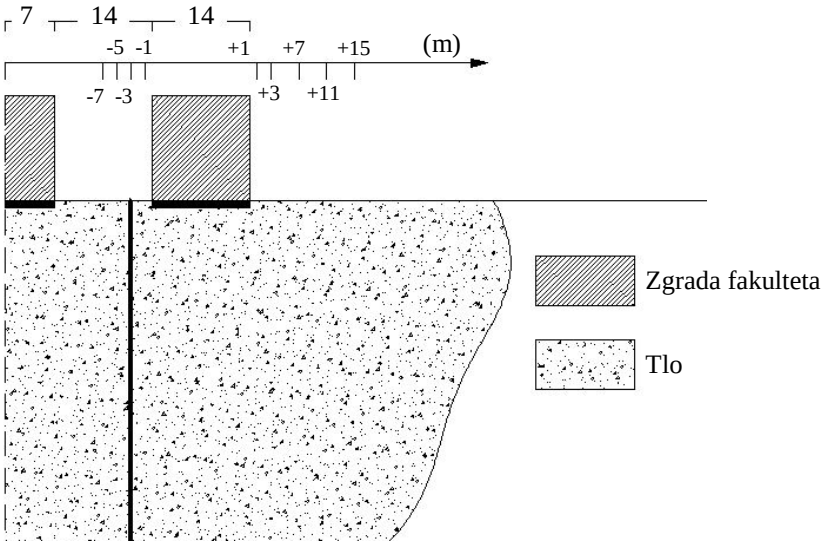
Slika 5-6 Razvoj profila temperature toplinski neporemećenog tla (lijevo) za 3. mjesec, prosječne vrijednosti temperature tla u ovisnosti o dubini od 0. metra (gore desno) te prosječne vrijednosti temperature tla u ovisnosti o dubini od 20. metra (dolje desno)

U odnosu na mjerene podatke, odstupanje temperatura manje je od 1 ºC za veće dubine tla, ali nedostatak ove metodu je nužno poznavanje vrijednosti geotermalnog temperaturnog gradijenta na promatranoj lokaciji, što za razliku od srednje godišnje temperature zraka, nije uvijek dostupan podatak. Dodatno, važno je istaknuti da nije nužno poklapanje srednje godišnje temperature zraka i vrijednosti dobivene ekstrapolacijom geotermalnog gradijenta na površinu tla što bi uzrokovalo pomicanje profila po osi temperature.

Tablica 5-1 Usporedba temperatura tla za različite dubine

Dubina	**Lokalna temperatura / Prosječna temperatura od površine**			
	Izmjereno	Kasuda (tlo)	Kasuda (zrak)	Zrak i geotermalni temp. gradijent
50 m	13,6 ºC / 13,8 ºC	13,5 ºC / 12,4 ºC	11,6 ºC / 10,6 ºC	13,5 ºC / 12,5 ºC
100 m	15,3 ºC / 14,1 ºC	15,4 ºC / 13,4 ºC	13,5 ºC / 11,6 ºC	15,3 ºC / 13,5 ºC
130 m	16,4 ºC / 14,5 ºC	16,5 ºC / 13,9 ºC	14,6 ºC / 12,1 ºC	16,4 ºC / 14,0 ºC

Prisutni negativni gradijent zbog toplinskih izvora na površini razlog je odstupanja izračunatog i stvarnog profila temperatura u višim dijelovima bušotine. Kako bi se istražio utjecaj toplinskog poremećaja koji se unosi u tlo, te udaljenost bušotine od toplinskog izvora, razvijen je numerički 2D model tla u programskom paketu *Fluent* [127]. Za interakciju zgrade fakulteta i tla domenom su obuhvaćena dva segmenta zgrade koji okružuju travnatu površinu na kojoj se nalazi bušotinski izmjenjivač topline (Slika 5-7). Modelirana domena uključuje tlo dubine 200 i širine 400 metara pri čemu su korišteni četverokutni mrežni elementi dimenzije 0,5x0,5 m. Na površini tla postavljen je rubni uvjet konstantne temperature, jednake srednjoj godišnjoj temperaturi zraka od 11,6 °C. Ispod zgrade fakulteta definiran je rubni uvjet konstantne gustoće toplinskog toka (q=2,35 W m^{-2}). Iznos gustoće toplinskog toka izračunat je uz pretpostavku koeficijenta prolaza topline za slojeve poda od 2 W m^{-1} K^{-1}. Lijevi bok domene definiran je kao os simetrije, kako bi se eliminirao utjecaj dijela fakulteta i tla izvan domene na dobivene profile temperatura. Na desnom boku i dnu domene te na samom tlu postavljena je razdioba temperature i gustoća toplinskog toka u skladu s izmjerenim geotermalnim temperaturnim gradijentom (Slika 5-3). Toplinski kapacitet i gustoća tla postavljeni su prema vrijednostima koje su izmjerene na lokaciji u Zagrebu uzorcima tla na do dubine 5 m [54], a toplinska provodnost tla prema rezultatima DTRT-a za prvih 14 m na izvedenoj bušotini (1,5 W m^{-2} K^{-}). S obzirom na činjenicu da je tlo nehomogene strukture, te da se utjecaj negativnog temperaturnog gradijenta manifestira u gornjim dijelovima tla, toplinska svojstva nisu jednaka prosječnim vrijednostima za cijelu bušotinu.

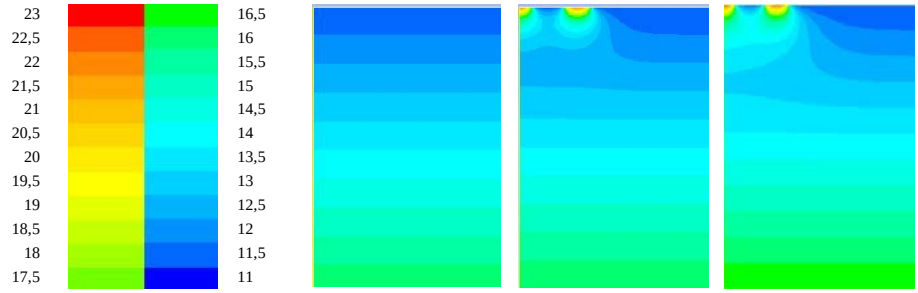


Slika 5-7 Prikaz modelirane domene te oznake razmatranih pozicija u odnosu na zgradu fakulteta

Slika 5-7 prikazuje razmatranu i modeliranu domenu za analizu višegodišnjeg utjecaja zgrade Fakulteta na temperaturne profile tla. Lijeva crtkana linija označava plohu s rubnim uvjetom

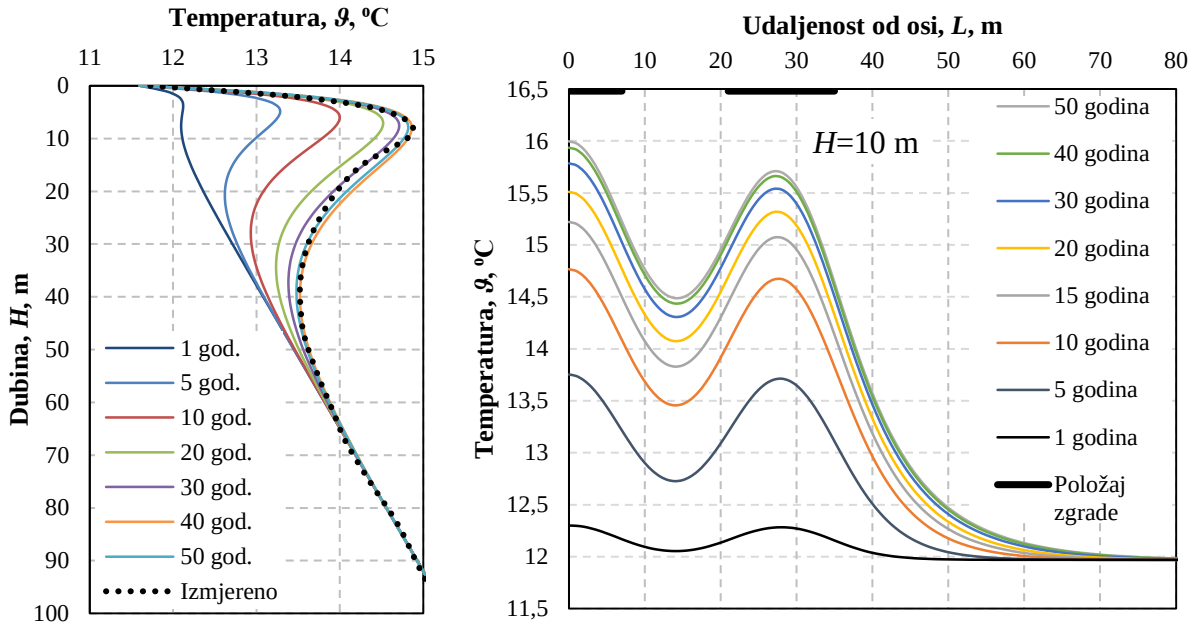
simetrije, debelom crtanom oznakom prikazan je položaj izvedene bušotine na promatranoj lokaciji, a kotama i oznakama +/- označene su relativne udaljenosti hipotetskih bušotina u odnosu na zgradu fakulteta.

Kvalitativna usporedba razdiobe temperature u tlu za toplinski neporemećeno tlo te zbog konstantne gustoće toplinskog toka u iznosu od 2,35 W m^{-2} (Slika 5-8) prikazuje pojavu lokalnog negativnog temperaturnog gradijenta.



Slika 5-8 Razdioba temperatura u toplinski neporemećenom tlu (lijevo) te nakon 10 (sredina) i 50 godina (desno) konstantnog toplinskog toka u iznosu 2,35 W m^{-2}

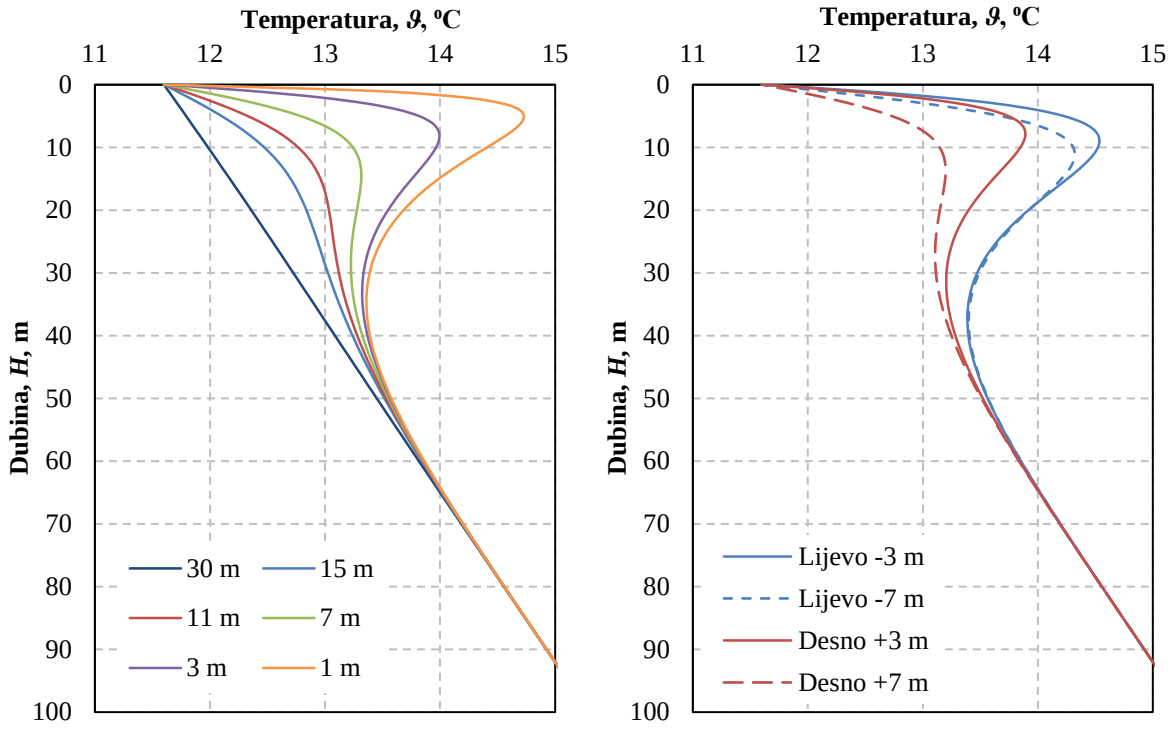
Razvoj vertikalne razdiobe temperatura pokazuje da modelirani profili ne prate u potpunosti tijek krivulje što se pripisuje nehomogenost tla te pojednostavljenjima uvedenim u korišteni model, ali je za postavljene početne i rubne uvjete postignuto preklapanje profila temperatura za trajanje toplinskog izvora od 40 od 50 godina s izmjerenim profilom (Slika 5-9 lijevo).



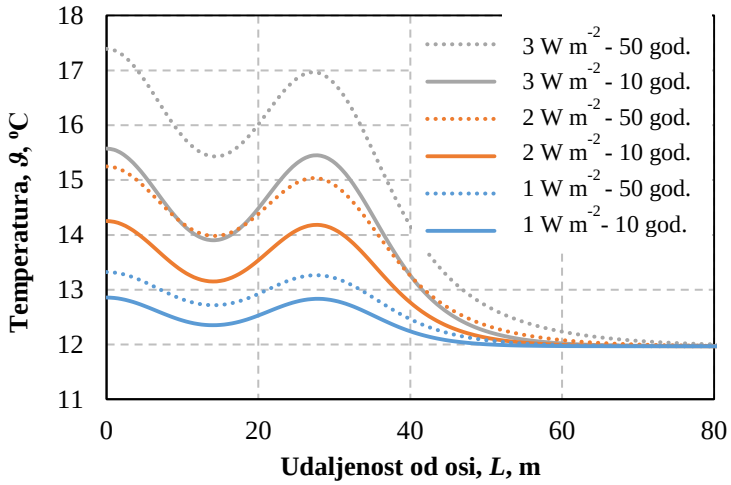
Slika 5-9 Vertikalna (lijevo) i horizontalna (desno) razdioba temperatura u tlu na dubini 10 m

Na istoj slici prikazana je i horizontalna razdioba temperatura na dubini od 10 pri čemu je položaj zgrade naglašen debelom crnom linijom. Uočljivo je asimptotsko povećanje temperature u blizini same zgrade u vremenu te zanemarivi temperaturni prirast nakon 30

godina. Udaljavanjem od samog toplinskog izvora smanjuje se utjecaj istoga, ali toplinska interferencija više različitih izvora može utjecati na izgled krivulja temperature. Slika 5-10 (desno) prikazuje profile temperature na istoj udaljenosti od desnog dijela zgrade, crvenom bojom označeni su profili u okolišnjem tlu (desno od zgrade), a plavom bojom profili kod kojih je vidljiva viša temperatura tla zbog toplinske interakcije dvaju dijelova zgrade.



Slika 5-10 Temperaturni profili u ovisnosti o udaljenosti od toplinskog izvora u (*t*=50 godina) (lijevo) i utjecaj interferencije dvaju toplinskih izvora na lokalnu temperaturu (desno) (*t*=30 god)

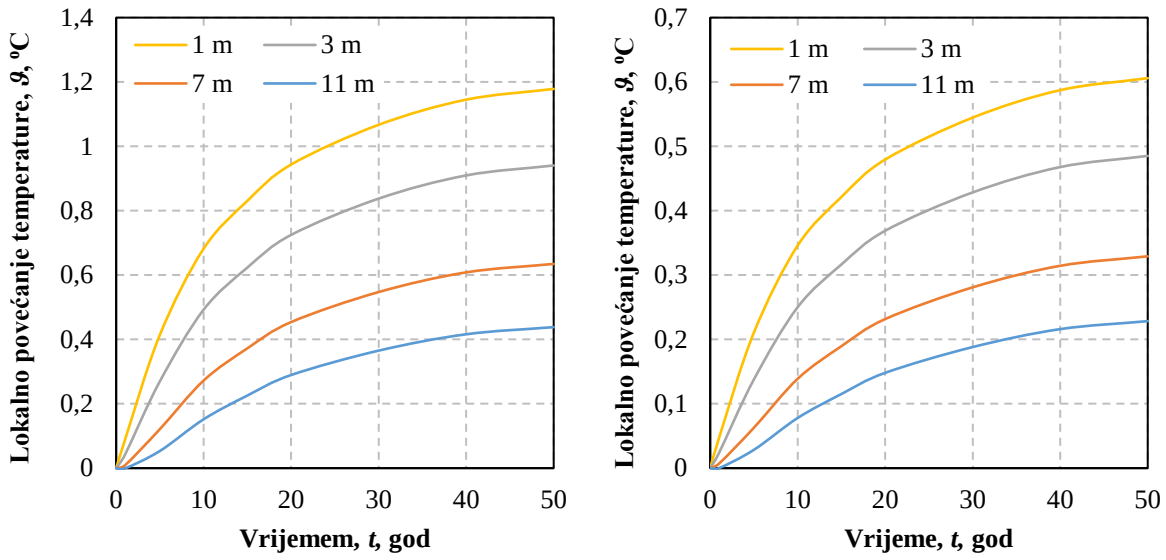


Slika 5-11 Horizontalna razdioba temperatura na dubini 10 m za različite iznose gustoće toplinskog toka na površini

Veća gustoća toplinskog toka rezultira većim apsolutnim povećanjem temperature u tlu, ali i većim relativnim povećanjem temperatura u vremenu (Slika 5-11). Na temelju dobivenih

rezultata analiziran je utjecaj negativnog geotermalnog temperaturnog gradijenta na prosječnu temperaturu tla u blizini toplinskog izvora. Očekivano je povećanje razlike temperature sa smanjenjem udaljenosti od izvora te produljenjem trajanja izvora. Slika 5-12 lijevo odnosi se na dubinu bušotine 50 m, a desno na dubinu bušotine 100 m. Lokalno povećanje temperature definirano je kao razlika prosječne temperature s toplinskim izvorom i temperaturnog profila toplinski neporemećenog tla.

Plitke bušotine osjetljivije su na lokalnu promjenu temperature. U slučaju bušotina smještenih u blizini manjoj od 3 m od postojećeg izvora topline poželjno je odrediti profil temperature u tlu ako se rezultati TRT-a provedenih na toj bušotini koriste kao ulazni podatak u proračunu potrebnog broja bušotina. Kod bušotine od 100 m na udaljenostima većim od 3 metra odstupanje je manje od 0,5 °C i u trajanju izvora od 50 godina. U radu Dehkordia i Schincariola [55] utvrđena je jednakost između postotnog smanjenja temperature tla i dugoročnog prinosa bušotinskog izmjenjivača topline pa se može uzeti da odstupanje temperature tla od 1 °C od toplinski neporemećenog tla rezultira s razlikom od otprilike 7 % u prinosu za temperaturu tla u Zagrebu. Prikazani rezultati odnose se na specifičnu lokaciju pa se ne mogu preslikati na drukčije profile toplinskog poremećaja ili drukčija toplinska svojstva tla.

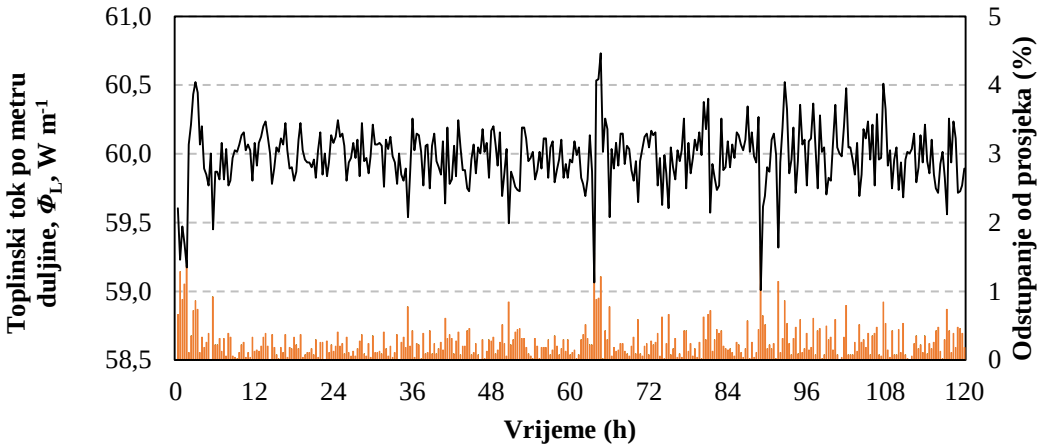


Slika 5-12 Lokalno povećanje prosječne temperature tla u ovisnosti o vremenu i udaljenosti od toplinskog izvora za bušotinu od 50 m (lijevo) i bušotinu od 100 m (desno)

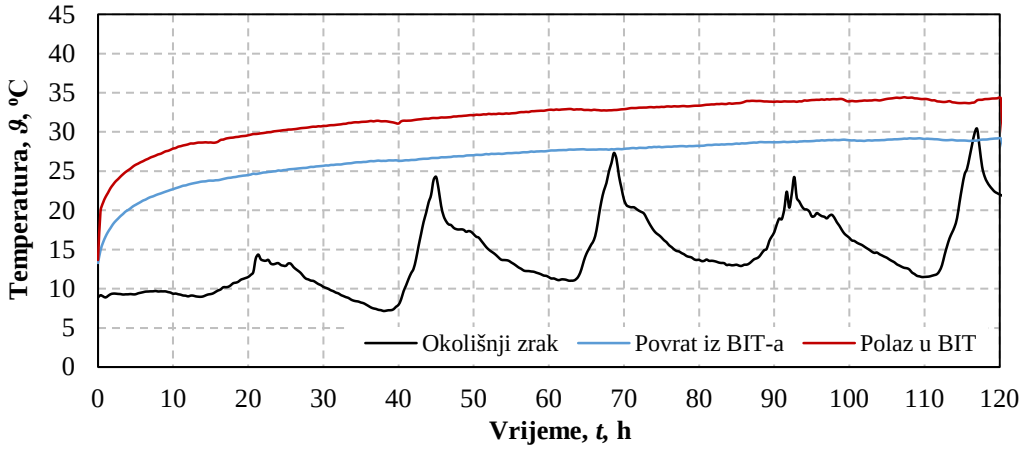
5.2. Provedba mjerenja

Provedeni DTRT sastoji se od dva dijela: faze grijanja i faze oporavka tla. Faza grijanja provedena je od 8. do 13. travnja 2015. godine u ukupnom trajanju od 120 sati. Oporavak tla praćen je do 29. travnja pri čemu postoji prekid u prikupljanju podataka od 46 sati između 18. i 20. travnja. Vremenski korak prikupljanja podataka je 20 minuta. Za provođenje ispitivanja

korišten je komercijalni TRT uređaj GeoGert 2.0 (proizvođač Geoenergija s.r.l.) koji je opremljen s dva električna grijača snage 3,5 kW te jednim grijačem promjenjive snage do 1,5 kW, PT sondama za mjerenje temperature, osjetnicima tlaka te elektromagnetskim protokomjerom koji rezultiraju s točnosti određivanja isporučenog toplinskog toka u rasponu od 1 do 3 %. Korišteni radni medij prilikom mjerenja je voda, a volumni protok vode kroz BIT je iznosio 1234 l/h. Prilikom grijanja toplinski tok električnog grijača izražen po metru bušotine varirao je od 55 do 62 W m^{-1} u odnosu na prosječni iznos od 60 W m^{-1} (Slika 5-13). Zabilježena odstupanja unutar su standardnih preporuka za provođenje TRT-a [30]. Spojne cijevi TRT uređaja i BIT-a toplinski su izolirane, a sam uređaj je bio zaštićen montažnom kućicom kako bi se smanjio utjecaj okoliša na mjerenja (Slika 5-14). Prikazani temperaturni profili na ulazu i izlazu iz BIT-a izmjereni su optičkim kabelom i odnose se na prosječnu vrijednost za prva i posljednja dva metra bušotinskog izmjenjivača topline.



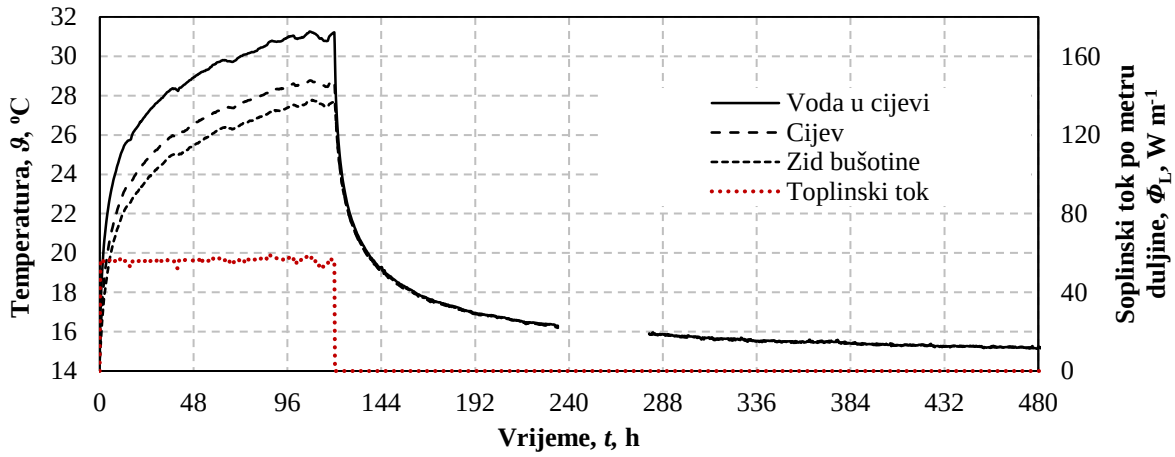
Slika 5-13 Isporučeni toplinski tok tijekom DTRT-a te odstupanja toka u odnosu na prosječnu vrijednost



Slika 5-14 Temperaturni profili zraka i vode na ulazu i izlazu iz BIT-a tijekom DTRT-a (mjereno optičkim kabelom)

Slika 5-15 prikazuje temperaturna očitanja prikupljena s različitim kabelima s optičkim vlaknima za dvije faze za određivanje efektivnih svojstava tla. Jedan kabel se nalazi u cijevi te

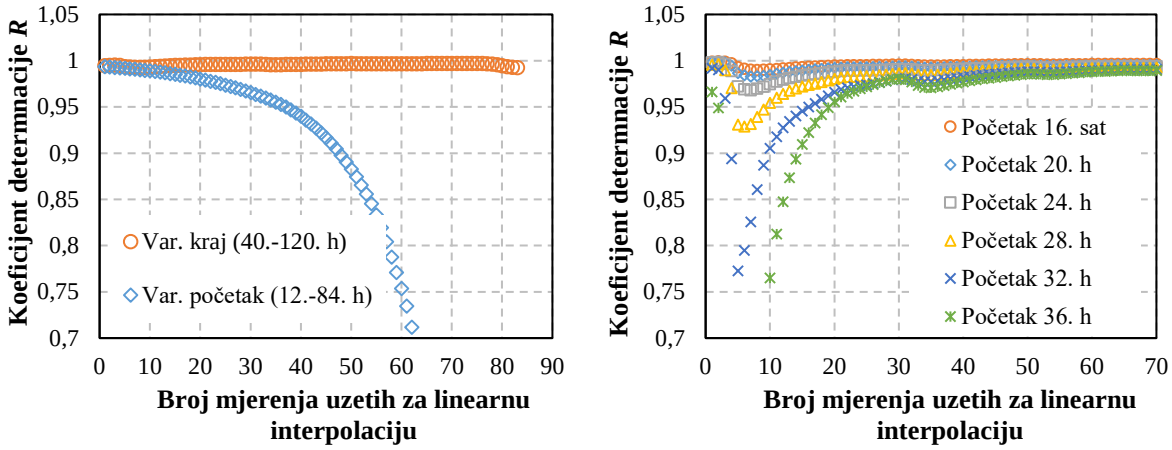
mjeri temperaturu vode, drugi kabel je prislonjen na vanjsku stjenku povratne cijevi iz BIT-a, a treći je postavljen u ispunu i blizini stjenke bušotine. Zbog postojanja toplinskih otpora prijelazu topline konvekcijom i provođenjem unutar samog BIT-a prisutna je razdioba temperatura po horizontalnom presjeku bušotinskog izmjenjivača topline u fazi grijanja. U fazi oporavka tla, kada nema cirkulacije medija i toplinskog izvora, temperature se po horizontalnom presjeku izjednačavaju te temperaturni profili u vremenu ovise isključivo o svojstvima tla u blizini bušotine, a ne o unutarnjem toplinskom otporu BIT-a.



Slika 5-15 Srednja temperaturna očitanja s tri različita optička kabela na pozicijama u cijevi, na cijevi i u ispuni bušotine za vrijeme grijanja i oporavka tla

Segment mjerenja uzet u analizu za određivanje toplinskih svojstava tla određen je prema metodologiji primijenjenoj u [118]. Prvih 12 sati mjerenja odbačeno je prema kriteriju koji se primjenjuje pri korištenju ILS modela za uzete vrijednosti temperaturne provodnosti $0{,}69 \cdot 10^{-6}$ $m^2\ s^{-1}$ i promjerna bušotine 0,152 m. Daljnja analiza sastoji se od variranja početka i kraja intervala mjerenih podataka, s korakom od 1 sata, kako bi se definirano segment s najvećim koeficijentom determinacije, kada se profil temperature prikazan u funkciji prirodnog logaritma vremena aproksimira pravcem.

Variranje kraja od 40. do 120. sata za početak od 12 sati pokazuje osjetljivost koeficijenta determinacije pri početnim i konačnim vrijednostima varijabilnog kraja (Slika 5-16). Niže vrijednosti koeficijenta determinacije pri početku mjerenja pripisane su kratkom periodu koji je obuhvaćen mjerenjem. Na samom kraju mjerenja vidljive su promjene temperature očitane optičkim kabelima, (Slika 5-15), čiji uzrok mogu biti promjene u naponu mreže na koju je priključen TRT uređaj i akvizicijski uređaja *Agilent*. Iz tog razloga posljednjih 14 sati faze grijanja nije uzeto u daljnje razmatranje. Varijabilni početak uz fiksni kraj pokazuje kontinuirano smanjenje koeficijenta determinacije te korekcije intervala nisu rađene (Slika 5-16 lijevo).

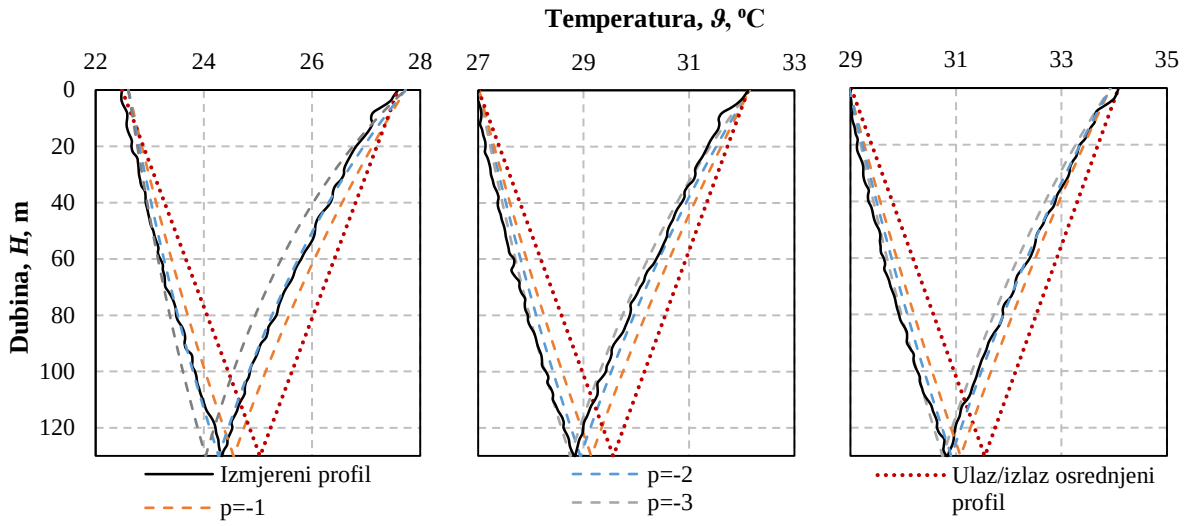


Slika 5-16 Analiza intervala za određivanje svojstava tla: osjetljivost s obzirom na promjenjivi početak i kraj intervala

Dodatno je analiziran i utjecaj istovremenog varijabilnog početka (s korakom od 4 sata) i kraja mjerenja (od 40. do 120. sata) pri čemu je utvrđeno da se pomicanjem početka otežava stabiliziranje koeficijenta determinacije za provedeno mjerenje (Slika 5-16 desno). Na temelju dobivenih podataka definirani interval za određivanje svojstava tla u fazi grijanja je od 12. do 106. sata.

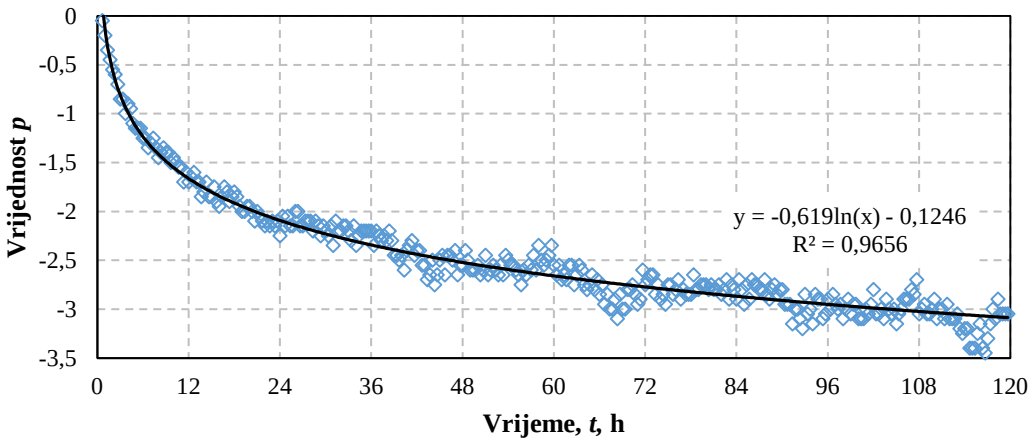
5.3. Srednja temperatura fluida i toplinski odziv tla

Zbog predavanja konstantnog toplinskog toka tlu formira se profil temperature medija u cirkulaciji. Izmjereni profil za 10., 50. i 100. sat TRT-a prikazani su zajedno s aproksimacijom srednje temperature fluida (Slika 5-17). Očito je da aritmetička sredina ulaza i izlaza rezultira s većom srednjom temperaturom fluida u BIT-u. Razlika iznosi oko 0,5 °C. Ako se detaljnije promotre profili za različite vrijednosti *p*-a (jednadžba (26)) vidljivo je da se produljenjem trajanja TRT-a smanjuje optimalna vrijednost istog pa je tako 48. satu *p* u iznosu -2,5 replicira stvarni profil, dok u kasnim satima TRT-a, iza 100. sata *p* poprima vrijednosti manje od -3.



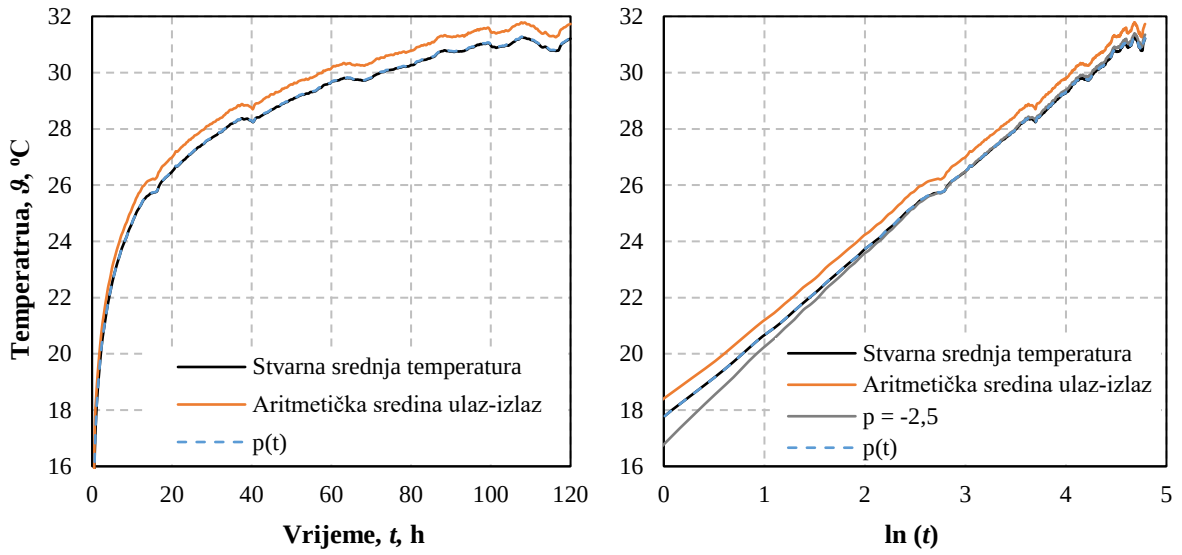
Slika 5-17 Profil temperature izmjerene kabelom s optičkim vlaknom (crna linija) te aproksimacije aritmetičkom sredinom te p-linearnom metodom (lijevo 10. sat, sredina 50. sat, desno 100. sat)

Poznavajući još barem jednu temperaturu po dubini bušotine, a idealno bi bilo na dnu bušotine, moguće je razviti profil parametra *p* u ovisnosti o vremenu te ga aproksimirati logaritamskom funkcijom [88] koja za provedeni TRT ima koeficijent determinacije 0,966 (Slika 5-18).



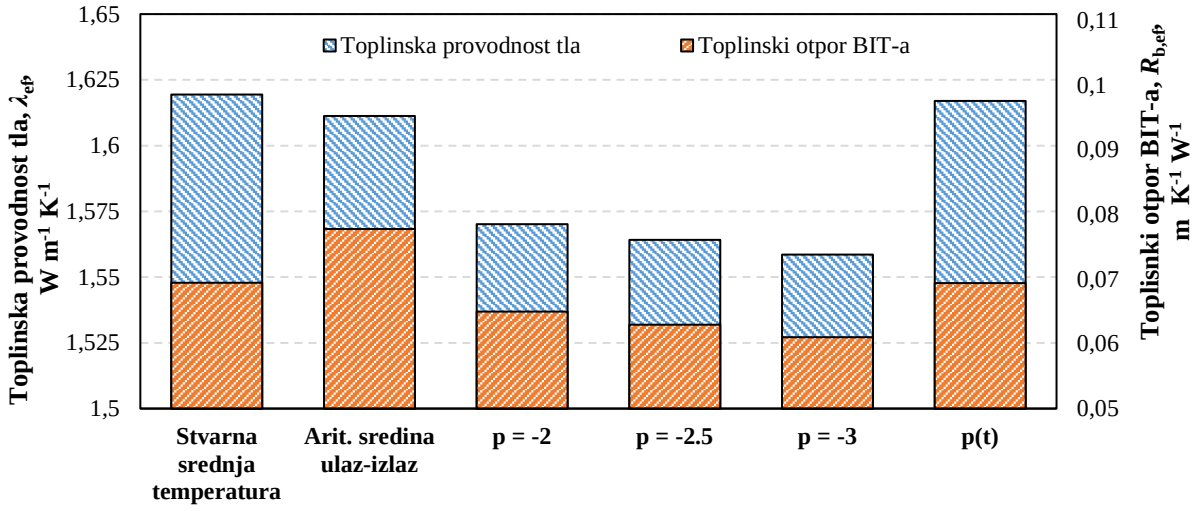
Slika 5-18 Vremenska promjenjivost parametra *p* za razvoj profila temperature medija u BIT-u

Profili dobiveni *p*-linearim modelom s konstantnim vrijednostima *p*-a točniji su od aritmetičke sredine ulazne i izlazne temperature fluida, ali zbog činjenice da je u stvarnosti *p* ovisan o vremenu, krivulje koje prikazuju promjenu temperature u ovisnosti o logaritmu vremena imaju drukčiji nagib (Slika 5-19).



Slika 5-19 Srednja temperatura fluida u cijevi za različite metode osrednjivanja u funkciji vremena te prirodnog logaritma vremena za izravno određivanje toplinskih svojstava tla (desno)

Slika 5-20 prikazuje rezultate primjene izravne metode ILS modela na različite profile srednje temperature fluida. Sva svojstva su izračunata koristeći podatke od 12. do 106. sata mjerenja. Uzimanje konstantne vrijednosti *p*-a rezultira nižim vrijednostima toplinske provodnosti (3-4 %) i toplinskog otpora (6-14 %). Aritmetička srednja temperatura ulaza i izlaza predimenzionira toplinski otpor za 12 %, ali tako definirani otpor se koristi u svim komercijalnim programskim paketima za dimenzioniranje polja BIT-ova. Očekivano, svojstva dobivena na temelju $p(t)$ srednje temperature su unutar 1 % od onih dobivenih sa stvarnim temperaturnim profilom.



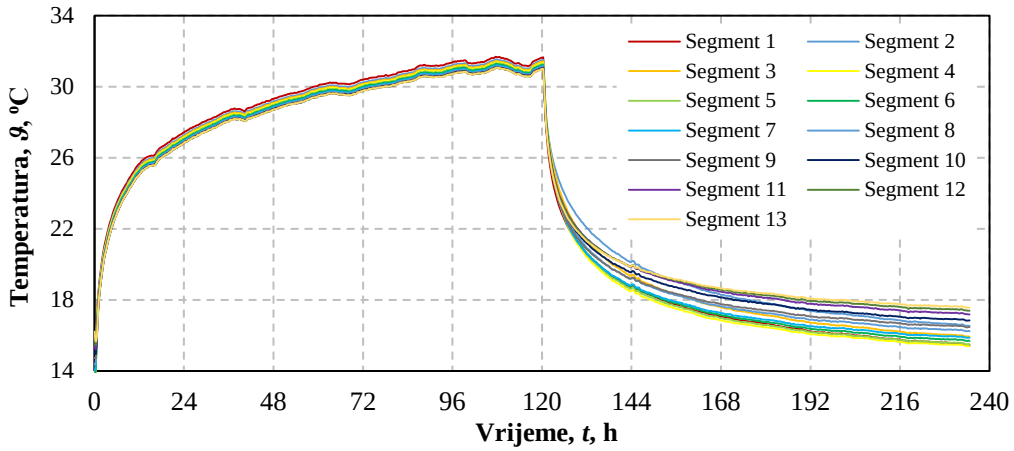
Slika 5-20 Rezultati TRT-a koristeći različite oblike osrednjavanja temperature fluida u BIT-u

5.4. Vertikalna razdioba toplinskih svojstava tla

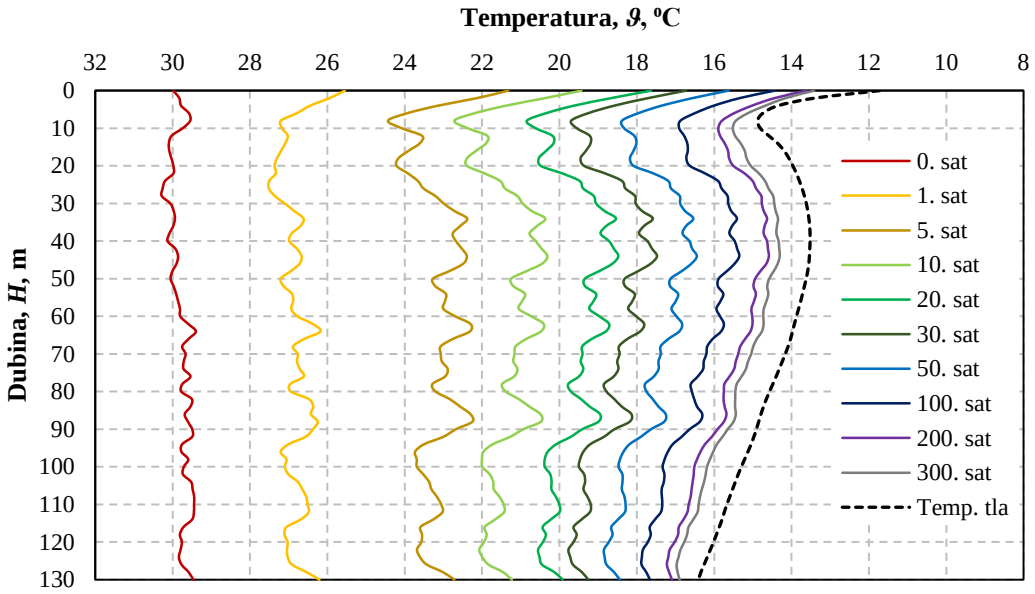
Promatrana bušotina i okolno tlo podijeljeno je u 13 jednakih segmenata debljine 10 m.

Slika 5-21 prikazuje srednje temperature za svaki pojedinačni segment dubine 10 m tijekom

faze grijanja i prvog dijela oporavka. Razlika u temperaturama pojedinih slojeva uočljivija je u fazi oporavka, gdje se temperature asimptotski približavaju profilu toplinski neporemećenog tla, nego u fazi grijanja. U 382. satu nakon završetka DTRT-a osrednjena temperatura medija u BIT-u iznosi 15,26 °C što je za 0,75 °C više od srednje temperature toplinski neporemećenog tla.



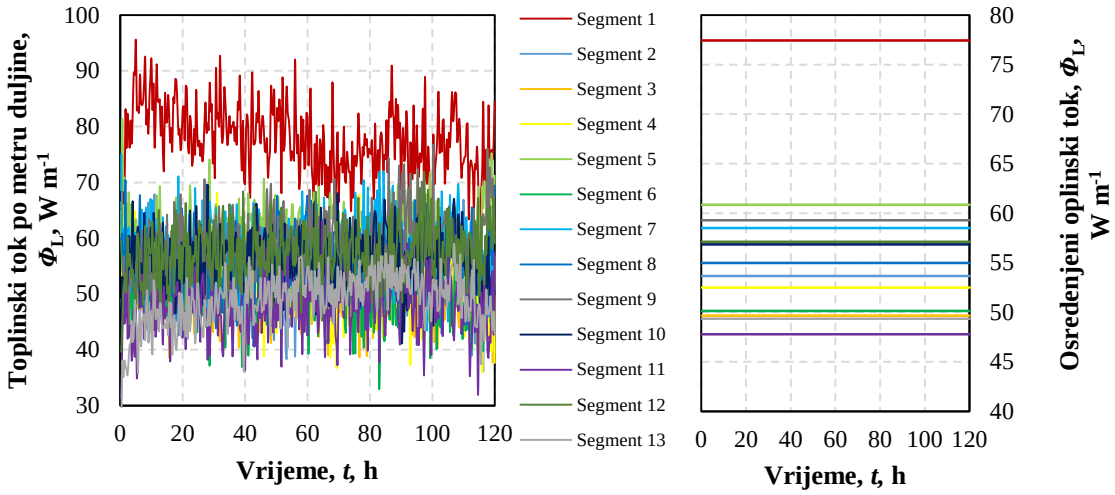
Slika 5-21 Temperaturni profili za različite segmente (po 10 m)



Slika 5-22 Vertikalni profili temperature unutar cijevi tijekom perioda oporavaka

Ukupni predani toplinski tok TRT uređajem nije jednoliko raspoređen po dubini bušotine, njegova razdioba ovisi o profilu temperatura unutar BIT-a, položaju cijevi u bušotini te karakteristikama prijelaza topline u bušotini i na strani tla. Vremenski profil i uprosječene vrijednosti toplinskog toka iskazanog po metru dubine bušotine ukazuju da se najveći toplinski tok izmjenjuje u prvom segmentu, oko 77 W m^{-1}, a potom u 5. i 9. segmentu (oko 60 W m^{-1}), dok je najmanji tok izmijenjen u 11. segmentu (47 W m^{-1}). Vidljivo odstupanje gornjeg

segmenta od ostatka tla pripisuje se činjenici da je taj segment u izravnoj interakciji s okolišom te da nije moguće precizno identificirati početak tla u odnosu na duljinu kabela s obzirom na prostornu razlučivost mjerenja temperature od 2 m.

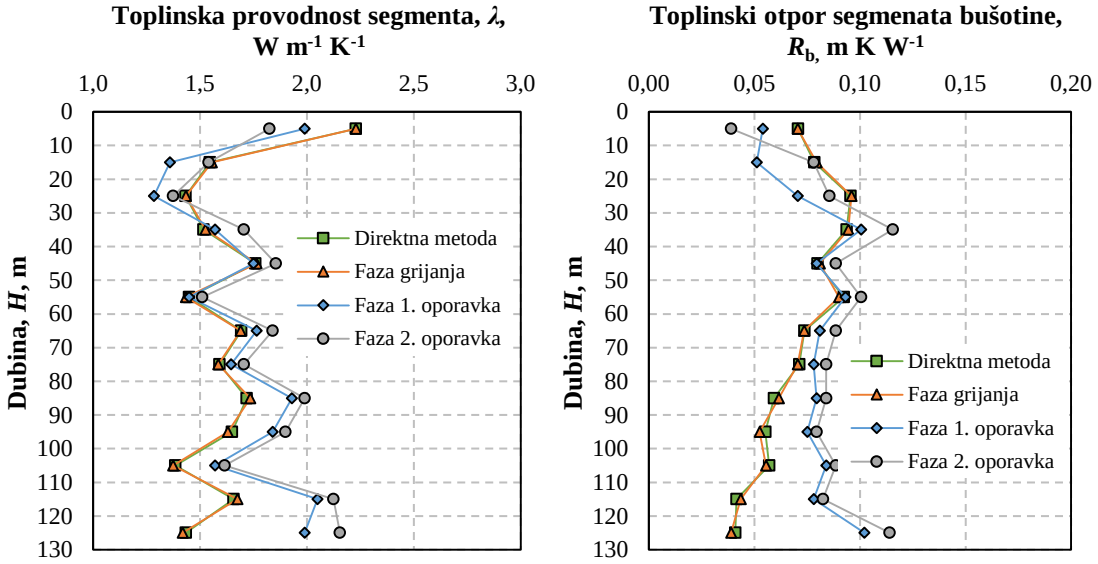


Slika 5-23 Isporučeni toplinski tok (W m^{-1}) po slojevima bušotine

Za svaki segment pojedinačno primijenjen je ILS model uvažavajući razdiobu temperature toplinski neporemećenog tla te predanog toplinskog toka. U fazi grijanja toplinska provodnost tla i toplinski otpor BIT-a određeni su korištenjem izravne metode i estimacijom parametara iz istog intervala mjerenih podataka. U fazi oporavka estimacijom parametra određena je toplinska provodnost segmenta tla, a dobivena vrijednosti je onda iskorištena kako bi se u fazi grijanja odredio toplinski otpor segmenta pa je tako svaki podatak određen iz vlastitog intervala mjerenja. Izračunate vrijednosti pridružene su dubinama koje predstavljaju sredinu promatranog segmenta (Slika 5-24). Zeleni kvadratići označavaju rezultate dobivene izravnom metodom iz faze grijanja, narančasti trokutići, plavi trapez i sivi kružić označavaju redom podatke dobivene estimacijom parametara iz faze grijanja, prve faze oporavka i druge faze oporavka.

Profili toplinske provodnosti tla i toplinskog otpora dobiveni u fazi grijanja gotovo su identični za dvije različite metode. Odstupanja po pojedinim segmentima manja su od točnosti kojom se toplinska provodnost može odrediti, dok su prosječne vrijednosti praktički jednake, a što odstupa od rezultata prikazanih u [116]. Razlog tome može biti u činjenici da je isti skup mjerenih podataka korišten i pri linearnoj interpolaciji i pri estimaciji parametara, a u citiranom radu to nije jasno navedeno. Toplinska svojstva određena iz faze oporavka niža su od onih iz faze grijanja u prva tri segmenta te viša u preostalim segmentima pri čemu odstupanja rastu s porastom dubine i duljinom trajanja promatrane faze oporavka. Uspoređujući uprosječene vrijednosti za sve segmente (Tablica 5-2), toplinska provodnost iz prve faze oporavka veća je

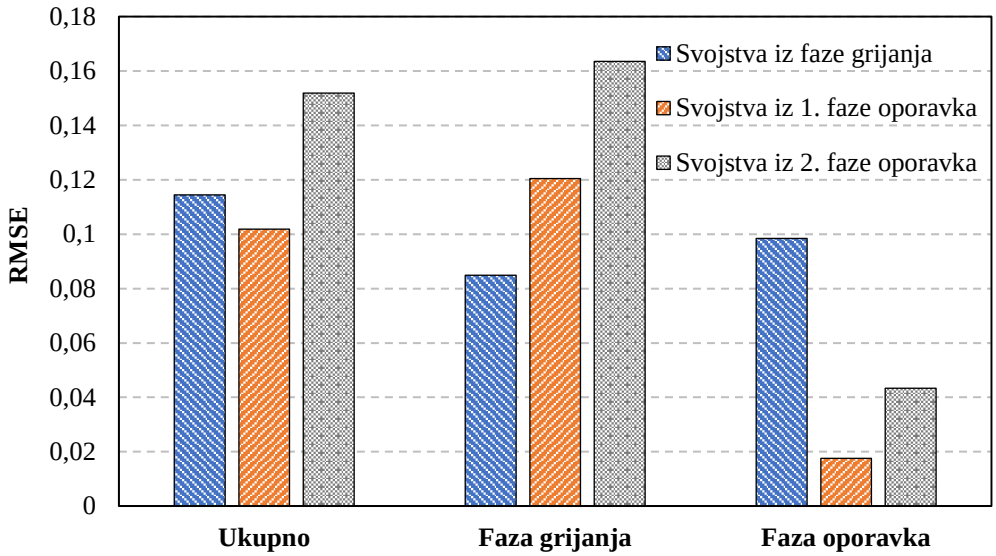
za oko 5 %, a otpor za 13 % u odnosu na fazu grijanja.



Slika 5-24 Toplinska provodnost tla (lijevo) i toplinski otpor bušotine (desno) određeni u različitim fazama DTRT-a

Tablica 5-2 Efektivna svojstva tla iskazana kao prosječna vrijednost segmenata

Prosječna vrijednost	Izravna metoda	Estimacija parametara		
	Faza grijanja	Faza grijanja	Faza 1. oporavka	Faza 2. oporavka
Toplinska provodnost W K^{-1} m^{-1}	1,62	1,62	1,71	1,78
Toplinski otpor m K W^{-1}	0,070	0,070	0,079	0,087



Slika 5-25 Korijen srednjeg kvadratnog odstupanja za modelirane odzive tla za različita toplinska svojstva tla

Kako bi se različiti dobiveni podaci za istu bušotinu stavili u kontekst efektivnih toplinskih svojstava, korištenjem ILS modela i prethodno prikazanih prosječnih svojstava (Tablica 5-2) modeliran je odziv tla zbog TRT-a te dobivene krivulje uspoređene s mjerenim temperaturama. Kod određivanja korijena srednjeg kvadratnog odstupanja nisu uzeti prvi sati faze grijanja i faze

oporavka u skladu s ograničenjima ILS modela. Odstupanja su prikazana u odnosu na cjelokupno mjerenje te odvojeno fazu grijanja i fazu oporavka (Slika 5-13). Prosječno veća odstupanja u fazi grijanja uvjetovana su promjenama temperature zbog nestabilnosti predanog toplinskog toka. Očekivano, u pojedinoj fazi mjerenja najmanja odstupanja su dobivena sa svojstvima određenima u toj fazi, dok je u fazi oporavka značajno manje odstupanje dobiveno sa svojstvima iz ranije faze oporavka. Upravo je ta kombinacija toplinske provodnosti i otpora bušotine rezultirala i s najmanjim odstupanjem od mjerenih podataka kada se promatra i ukupno mjerenje. Ipak, malena razlika u odnosu na podatke iz faze grijanja potvrđuje korelaciju između navedenih svojstava te da je prihvatljiv odziv tla moguće dobiti s više različitih kombinacija parametara, a što je posebno važno kod preslikavanja rezultata TRT-a na druge bušotine.

6. MODELIRANJE INTERAKCIJE TLA, BUŠOTINSKOG IZMJENJIVAČA TOPLINE I DIZALICE TOPLINE

6.1. Kratki uvod o modelu

Utjecaj vertikalne razdiobe toplinskih svojstava tla moguće je opisati modelom koji omogućuje definiranje različith toplinskih svojstava po dubini BIT-a. S obzirom na to da heterogenost tla utječe i na razdiobu toplinskog toka po dubini, nužno je da model omogućuje i repliciranje stvarnog profila temperature fluida unutar izmjenjivača po dubini bušotine.

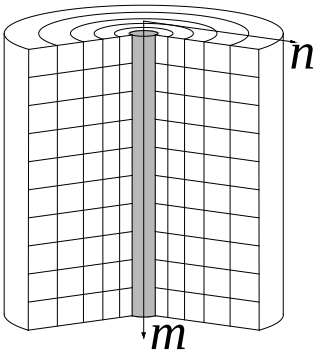
Potpuna diskretizacija domene tla i BIT-a nije prikladna za sezonsku simulaciju te je stoga odabran otporničko-kapacitvni pristup modeliranju. Otpornička mreža toplinskih otpora koristi se za opisivanje toplinskog otpora bušotinskog izmjenjivača topline u stacionarnom stanju. Dodavanjem toplinskih kapaciteta pojedinim komponentama moguće je opisati toplinske tokove izmjenjene između različitih komponenti sustava dizalica topline-bušotinski izmjenjivač topline-tlo pri prijelaznim pojavama [128–130]. Otporničko-kapacitvni pristup karakterizira fleksibilnost pri opisivanju geometrije BIT-a ovisno o željenoj točnosti modela i potrebnom računalnom vremenu za simulaciju, npr. dodavanjem većeg broja čvorova ispune [131] ili proširivanjem modela s toplinskim kapacitetom fluida i cijevi [132].

Bauer *et al.* usporedili su vlastiti otporničko-kapacitvni model s potpuno diskretiziranim modelom konačnih elemenata u komercijalnom alatu pri tranzijentnim promjenama. U modelu je strujanje fluida opisano samo diskretizacijom u vertikalnom smjeru, odnosno zanemaren je profil temperature po presjeku cijevi, te je zanemarena razdioba temperatura po obodu bušotine i segmenata tla. Potpuno tranzijentni model, u kojem svi elementi BIT-a imaju toplinski kapacitet, rezultirao je s najvećim odstupanjem toplinskog toka od 1,5 % pri promjeni ulazne temperature fluida, dok je polutranzijentni model (zanemaren kapacitet fluida) imao najveće odstupanje od 7,5 % u odnosu na potpuno diskretizirani model [133]. U nastavku je dan opis modela tla, BIT-a i dizalice topline s pripadnim jednadžbama i ulaznim podacima.

6.2. Model tla

Tlo oko BIT-a podijeljeno je u n koncentričnih cilindara i m vertikalnih segmenata. Svakom segmentu m moguće je pridružiti različita toplinska svojstva tla (Slika 6-1).

Veličina domene odabrana je tako da tijekom perioda simulacije rub domene nema utjecaja na izmjenu topline između tla i zida BIT-a. Rubni uvjeti pridruženi na rubovima domene mogu biti u obliku konstantnog toplinskog toka ili konstantne temperature, a početna temperatura jednaka je srednjoj temperaturi tla ili profilu temperature toplinski neporemećenog tla.



Slika 6-1 Diskretizacija tla oko BIT-a

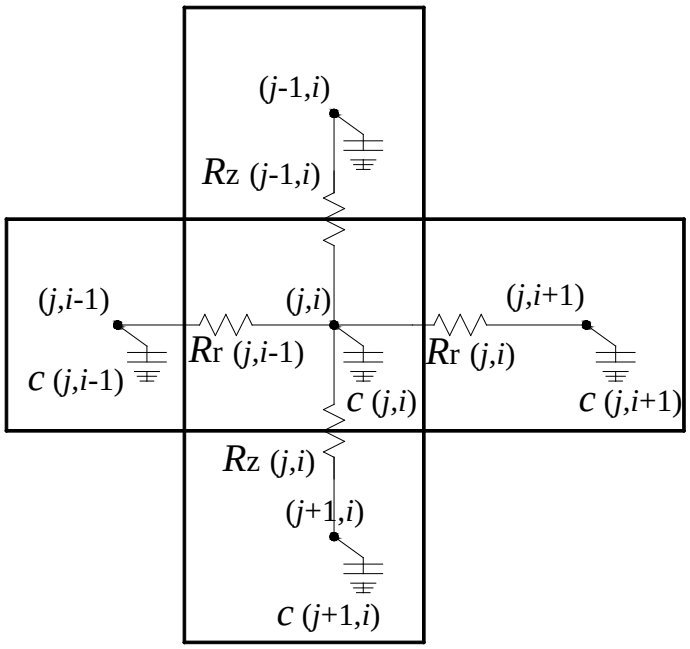
Tablica 6-1 Opis rubnih uvjeta domene

Dio domene	Početni/rubni uvjeti
Gornji dio	Vremenski promjenjiva temperatura (prema Kasudinom modelu) ili konstantna temperatura
Bočni dio	Konstantna temperatura (srednja ili temperaturni profil)
Donji dio	Konstantna temperatura prema temperaturnom profilu ili toplinski tok zbog geotermalnog temperaturnog gradijenta

Debljina segmenata *m* jednaka je po cijeloj domeni, dok se radijus *n* cilindara povećava prema sljedećoj relaciji pri čemu je radijus domene označen s *r(n)*:

$$r(i) = \sqrt[n]{\frac{r(n)}{r_b}}\left[r(i-1)\right] \tag{47}$$

Svaki segment tla u toplinskoj je interakciji sa susjednim segmentima (Slika 6-2) pri čemu je *C* toplinski otpor, a R_z i R_r su toplinski otpori provođenju u vertikalnoj i horizontalnoj ravnini.



Slika 6-2 Opis mreže za proizvoljni segment tla

Toplinska bilanca segmenta *R(j,i)* definirana je sljedećom jednadžbom,

$$q(j-1,i)+q(j+1,i)+q(j,i-1)+q(j,i+1)=\rho(j,i)c(j,i)V(j,i)\frac{d\vartheta(j,i)}{dt} \tag{48}$$

a raspisani izraz za konačni vremenski korak Δt glasi:

$$\frac{\vartheta(j-1,i)-\vartheta(j,i)}{\frac{R_z(j-1,i)+R_z(j,i)}{2}}+\frac{\vartheta(j+1,i)-\vartheta(j,i)}{\frac{R_z(j,i)+R_z(j+1,i)}{2}}+\frac{\vartheta(j,i-1)-\vartheta(j,i)}{R_r(j,i-1)}+\frac{\vartheta(j,i+1)-\vartheta(j,i)}{R_r(j,i+1)}= \tag{49}$$
$$=\frac{C(j,i)}{\Delta t}\left[\vartheta(j,i)-\vartheta(j,i)_{\Delta t\text{-}1}\right]$$

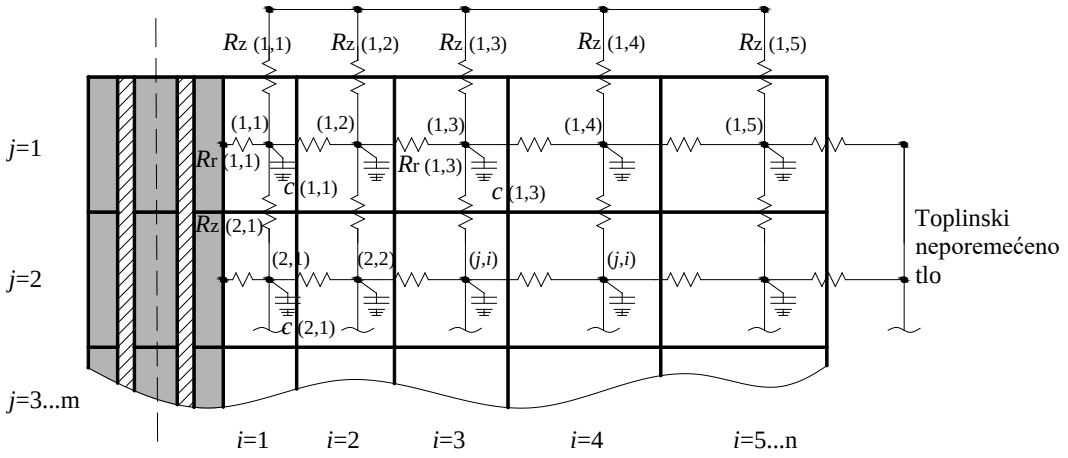
Toplinski otpori provođenju u vertikalnom i radijalnom smjeru definirani su preko visine segmenta *z*, a radijusom r_m je definiran prostorni položaj toplinskog kapaciteta *C*.

$$R_r(j,i)=\frac{1}{2\pi z\lambda_{tlo}(j)}\ln\left(\frac{r_m(i)}{r_m(i-1)}\right) \tag{50}$$

$$R_z(j,i)=\frac{z}{\pi\lambda_{tlo}(j)\left(r(i)^2-r(i-1)^2\right)} \tag{51}$$

$$r_m(i)=\sqrt{\frac{r(i)^2+r(i-1)^2}{2}} \tag{52}$$

Rubni elementi domene tla povezani su s čvorovima zida ispune, površine te toplinski neporemećenog tla na bočnoj i donjoj plohi. Zid bušotine u jednom sloju predstavljen je s jednim čvorom tako da je zanemarena razdioba temperature po obodu bušotine, a samim time i po obodu segmenta tla u blizini bušotine.

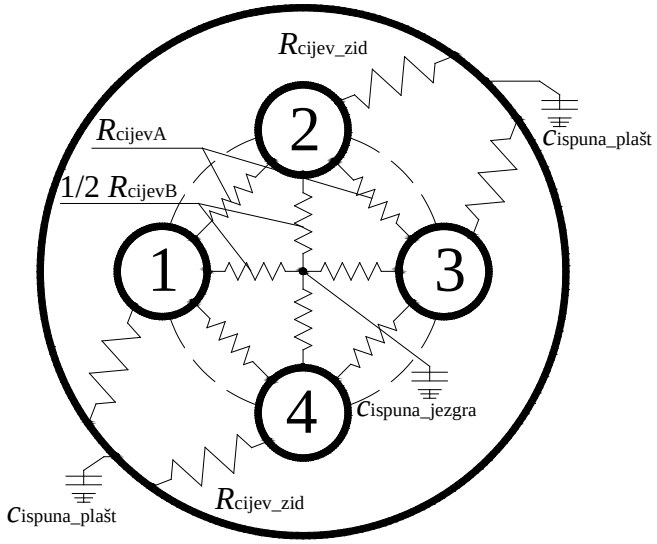


Slika 6-3 Prikaz otporničko-kapacitivne mreže za heterogeno tlo i veza s zidom bušotine

6.3. Model bušotinskog izmjenjivača topline

U ovom radu opisan je model izmjenjivača topline s dvostrukom U cijevi pri čemu su dvije cijevi silazne (1 i 2), a dvije uzlazne (3 i 4). Na dnu bušotine, izlaz iz cijevi 1 je ulaz u cijev 4

te izlaz iz cijevi 2 je ulaz u cijev 3. Iako je u praksi moguć i križni raspored (1 i 3 te 2 i 4), rjeđe se izvodi jer zahtjeva različite duljine cijevi i otežava vezivanje utega na dno izmjenjivača pri ugradnji. Ispuna bušotine podijeljena je na dva dijela: vanjski dio koji je u interakciji s tlom te unutarnji dio koji omogućuje toplinsku interakciju između silaznog i uzlaznog fluida. S obzirom na to da je za interakciju s tlom bitna temperatura na zidu bušotine, a ne lokalna razdioba temperatura unutar presjeka, kako bi se smanjio broj čvorova u modelu, toplinski otpor i kapacitet cijevi pridružen je otporu i kapacitetu ispune. Dodatno, vertikalna toplinska komunikacija u materijalu cijevi je zanemarena, dok model obuhvaća vertikalnu interakciju čvorova jezgre i ispune bušotine.



Slika 6-4 Presjek BIT-a s pripadnim toplinskim otporima i toplinskim kapacitetima ispune

Temperatura u čvoru s koji predstavlja vanjski dio ispune, tj. plašt, je temperatura na zidu bušotine i ona je veza između tla i BIT-a.

Toplinske otpori provođenju između cijevi i ispune (R_{cijevA}, R_{cijevB} *i* $R_{\text{cijev_zid}}$) moguće je odrediti višepolnom ekspanzijom (implementirana u programskom paketu *EED*) ili modeliranjem dvodimenzijskog provođenja u numeričkim alatima. Rezultat su toplinski otpor bušotine i unutarnji toplinski otpor pomoću kojih se onda mogu izračunati lokalni toplinski otpori ovisno o njihovoj definiciji u modelu [133].

Toplinska bilanca za svaku od cijevi opisana je sljedećim jednadžbama.

Cijev 1:

$$\frac{\vartheta_{\text{i,jezgra}}(j)-\vartheta_{\text{cijev,1}}(j)}{\frac{R_{\text{cijevB}}}{2}}+\frac{\vartheta_{\text{cijev,3}}(j)-\vartheta_{\text{cijev,1}}(j)}{R_{\text{cijevA}}}+\frac{\vartheta_{\text{i,plašt}}(j)-\vartheta_{\text{cijev,1}}(j)}{R_{\text{cijev_zid}}}+ \\ +\frac{\vartheta_{\text{fluid,1}}(j)-\vartheta_{\text{cijev,1}}(j)}{R_{\text{konv}}}=0 \tag{53}$$

Cijev 2:

$$\frac{\vartheta_{\mathrm{i,jezgra}}(j)-\vartheta_{\mathrm{cijev,2}}(j)}{\frac{R_{\mathrm{cijevB}}}{2}}+\frac{\vartheta_{\mathrm{cijev,4}}(j)-\vartheta_{\mathrm{cijev,2}}(j)}{R_{\mathrm{cijevA}}}+\frac{\vartheta_{\mathrm{i,plašt}}(j)-\vartheta_{\mathrm{cijev,2}}(j)}{R_{\mathrm{cijev_zid}}}+ \\ +\frac{\vartheta_{\mathrm{fluid,2}}(j)-\vartheta_{\mathrm{cijev,2}}(j)}{R_{\mathrm{konv}}}=0 \tag{54}$$

Cijev 3:

$$\frac{\vartheta_{\mathrm{i,jezgra}}(j)-\vartheta_{\mathrm{cijev,3}}(j)}{\frac{R_{\mathrm{cijevB}}}{2}}+\frac{\vartheta_{\mathrm{cijev,1}}(j)-\vartheta_{\mathrm{cijev,3}}(j)}{R_{\mathrm{cijevA}}}+\frac{\vartheta_{\mathrm{i,plašt}}(j)-\vartheta_{\mathrm{cijev,3}}(j)}{R_{\mathrm{cijev_zid}}}+ \\ +\frac{\vartheta_{\mathrm{fluid,3}}(j)-\vartheta_{\mathrm{cijev,3}}(j)}{R_{\mathrm{konv}}}=0 \tag{55}$$

Cijev 4:

$$\frac{\vartheta_{\mathrm{i,jezgra}}(j)-\vartheta_{\mathrm{cijev,4}}(j)}{\frac{R_{\mathrm{cijevB}}}{2}}+\frac{\vartheta_{\mathrm{cijev,2}}(j)-\vartheta_{\mathrm{cijev,4}}(j)}{R_{\mathrm{cijevA}}}+\frac{\vartheta_{\mathrm{i,plašt}}(j)-\vartheta_{\mathrm{cijev,4}}(j)}{R_{\mathrm{cijev_zid}}}+ \\ +\frac{\vartheta_{\mathrm{fluid,4}}(j)-\vartheta_{\mathrm{cijev,4}}(j)}{R_{\mathrm{konv}}}=0 \tag{56}$$

$$\vartheta_{\mathrm{fluid,2}}(j)=\vartheta_{\mathrm{fluid,1}}(j) \\ \vartheta_{\mathrm{fluid,3}}(j)=\vartheta_{\mathrm{fluid,4}}(j) \tag{57}$$

Bušotina jezgra:

$$\sum_{i}^{4}\frac{\vartheta_{\mathrm{cijev,i}}(j)-\vartheta_{\mathrm{i,jezgra}}(j)}{\frac{R_{\mathrm{cijevB}}}{2}}+\frac{\vartheta_{\mathrm{i,jezgra}}(j-1)-\vartheta_{\mathrm{i,jezgra}}(j)}{R_{\mathrm{z_ispuna_jezgra}}}+\frac{\vartheta_{\mathrm{i,jezgra}}(j+1)-\vartheta_{\mathrm{i,jezgra}}(j)}{R_{\mathrm{z_ispuna_jezgra}}} \\ =C_{\mathrm{z_ispuna_jezgra}}(j)\frac{\vartheta_{\mathrm{i,jezgra}}(j)-\vartheta_{\mathrm{i,jezgra}}(j)_{\Delta t-1}}{\Delta t} \tag{58}$$

Bušotina plašt:

$$\sum_{i}^{4}\frac{\vartheta_{\mathrm{cijev,i}}(j)-\vartheta_{\mathrm{i,plašt}}(j)}{\frac{R_{\mathrm{cijev_zid}}}{2}}+\frac{\vartheta_{\mathrm{i,plašt}}(j-1)-\vartheta_{\mathrm{i,plašt}}(j)}{R_{\mathrm{z_ispuna_plašt}}}+\frac{\vartheta_{\mathrm{i,plašt}}(j+1)-\vartheta_{\mathrm{i,plašt}}(j)}{R_{\mathrm{z_ispuna_plašt}}} \\ =C_{\mathrm{z_ispuna_plašt}}(j)\frac{\vartheta_{\mathrm{i,plašt}}(j)-\vartheta_{\mathrm{i,plašt}}(j)_{\Delta t-1}}{\Delta t} \tag{59}$$

6.4. Model fluida

Izmjena topline između fluida koji struji kroz cijev i stjenke cijevi određena je koeficijentom konvektivnog prijelaza topline.

$$\alpha = \frac{Nu\lambda_{\text{fluid}}}{D_{\text{cijev}}} \tag{60}$$

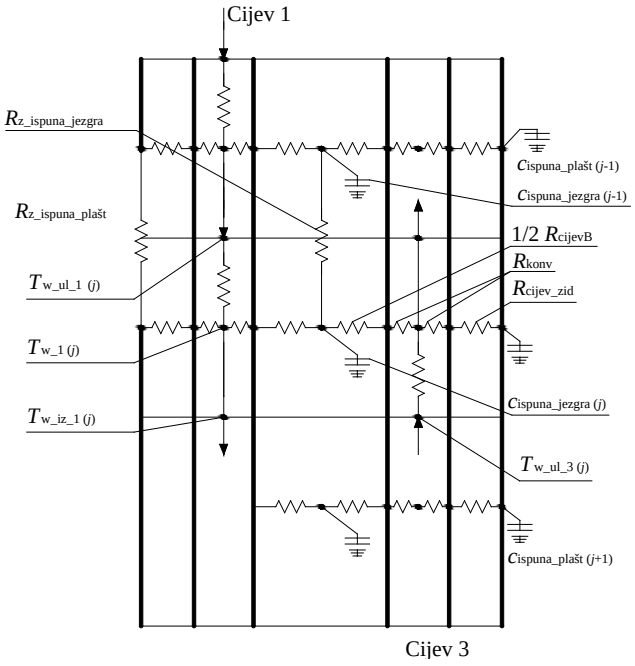
Nusseltova značajka računa se prema jednom od sljedećih izraza u ovisnosti o vrijednosti Reynoldsovog broja (Re<2300, 2300<Re<10000 i Re>10000) [134]:

$$Nu = \begin{cases} 4,364 \\ \dfrac{(\zeta/8)\,\mathrm{Re}\,\mathrm{Pr}}{1+12,7\sqrt{\zeta/8}\left(\mathrm{Pr}^{2/3}-1\right)}\left[1+\left(\dfrac{d}{L}\right)^{2/3}\right] \\ (1-\gamma)\,4,364+\gamma\left\{\dfrac{(\zeta/8)\,\mathrm{Re}\,\mathrm{Pr}}{1+12,7\sqrt{\zeta/8}\left(\mathrm{Pr}^{2/3}-1\right)}\left[1+\left(\dfrac{d}{L}\right)^{2/3}\right]\right\} \end{cases} \tag{61}$$

$$\gamma = \frac{\mathrm{Re}-2300}{10000-2300} \tag{62}$$

$$\zeta = \left(1,8\log_{10}\mathrm{Re}-1,5\right)^{-2} \tag{63}$$

Ulazna temperatura i svojstva strujanja fluida jednaka su za cijev 1 i 2 te 3 i 4 pri čemu je temperatura izlaznog fluida iz cijevi 1 i 2 jednaka ulaznoj temperaturi fluida u cijevima 3 i 4 gdje fluid struji uzlazno. U svakom segmentu *m* po dubini fluid ima ulaznu i izlaznu temperaturu, a srednja temperatura segmenta uzima se kao temperatura fluida u tom segmentu. Kako bi se pojednostavio sustav jednadžbi uvedena je pretpostavka da je srednja temperatura segmenta jednaka izlaznoj temperaturi fluida [128].



Slika 6-5 Vertikalni segment bušotinskog izmjenjivača topline

Toplinska bilanca za fluid u svakoj od cijevi je definirana sljedećom jednadžbom:

$$q_{\mathrm{mBIT}} c_{\mathrm{w}} \left[\vartheta_{\mathrm{fluid,ulaz}}(j) - \vartheta_{\mathrm{fluid,izlaz}}(j) \right] - 2\pi r_{\mathrm{u}} z \alpha \left[\vartheta_{\mathrm{fluid}}(j) - \vartheta_{\mathrm{cijev}} \right] = \\ = C_{\mathrm{fluid}}(j) \frac{\vartheta_{\mathrm{fluid}}(j) - \vartheta_{\mathrm{fluid}}(j)_{\Delta t-1}}{\Delta t} \tag{64}$$

6.5. Sustav jednadžbi

Model tla, izmjenjivača topline i fluida u cijevima u svakom sloju tla opisan je s ukupno n+10 jednadžbi. Pri čemu je n broj radijalnih dijelova tla, a fiksni dio od 10 jednadžbi odnose se na fluid, cijevi i dva dijela ispune. Odnosno, za vertikalni broj segmenata m, sustav se sastoji od m x (n+10) jednadžbi koje je moguće prikazati u matričnom obliku. Matrica A sadrži koeficijente jednadžbi, vektor ϑ nepoznate temperature, a vektor C sadrži slobodne članove:

$$[A][\vartheta] = [C] \tag{65}$$

Sustav jednadžbi se rješava inverzijom matrice A eksplicitnom metodom.

Kako bi sustav jednadžbi bio rješiv potrebno je unijeti sljedeće ulazne podatke:

Tablica 6-2 Ulazni podaci za opisani model

Dio modela	Potrebni ulazni podaci
Tlo	Vertikalna razdioba toplinskih svojstava i početni temperaturni profil tla
Bušotinski izmjenjivač topline	Dimenzije cijevi i bušotine, toplinska svojstva ispune i cijevi, unutarnji toplinski otpori
Fluid	Vrsta medija, termo-fizikalna svojstva, maseni protok medija
Model	Veličina domene, broj čvorova m i n, vremenski korak simulacije

Određeni skup ulaznih podataka koristi se samo za inicijalizaciju modela, dok se dio podataka, kao što je ulazna temperatura fluida koja ovisi o interakciji BIT-a i modela dizalice topline, mijenja u svakom koraku simulacije. Termo-fizikalna svojstva, ovisno o vrsti fluida u BIT-u i temperaturi, računaju se pomoću *CoolProp* baze podataka za radne tvari [135].

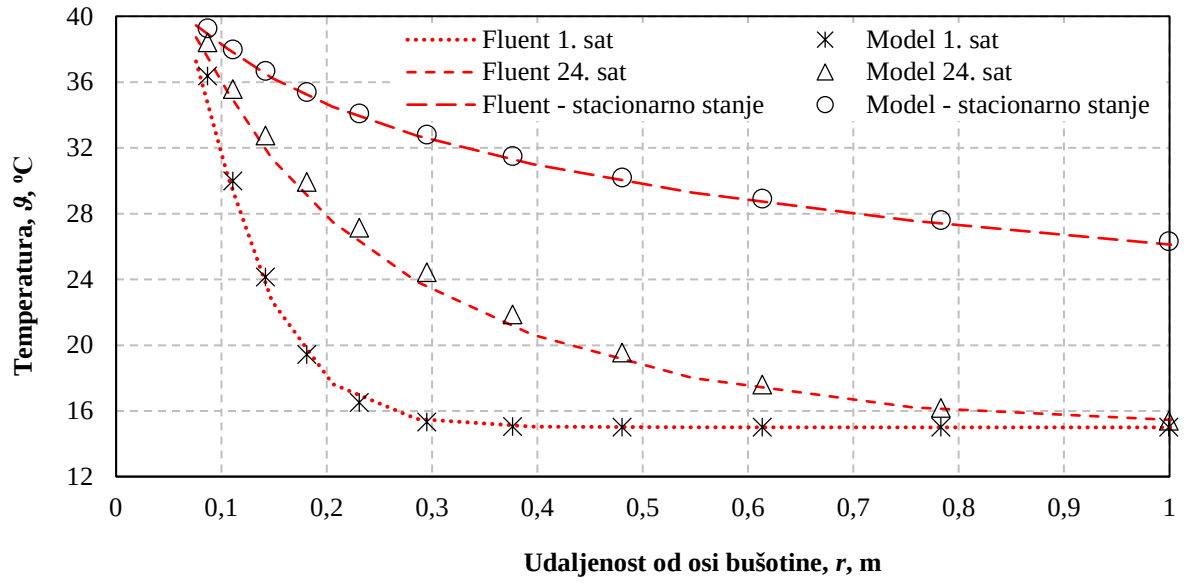
6.6. Validacija modela

Razvijeni model tla uspoređen je s analitičkim modelom beskonačnog linijskog izvora i s numeričkim modelom razvijenim u programskom paketu *Fluent*. Modelirana je samo domena tla od 20 m pri čemu je temperaturni rubni uvjet postavljen na zid bušotine.

Tablica 6-3 Ulazni podaci za validaciju modela

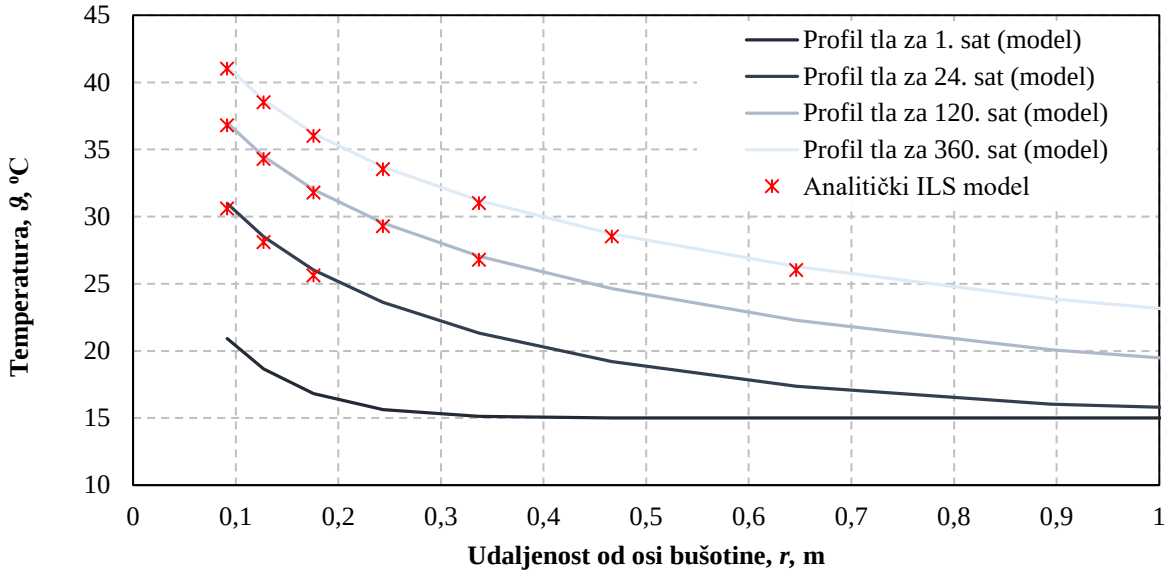
Veličina	Ulazni podaci
Gustoća tla	1500 kg m^{-3}
Specifični toplinski kapacitet tla	800 J kg^{-1} K^{-1}
Toplinska provodnost tla (*Fluent*/ILS)	1,5 W m^{-1} K^{-1} / 3 W m^{-1} K^{-1}
Temperatura zida bušotine	40 ºC (Rubni uvjet za Fluent)
Toplinski tok po metru duljine	145 W m^{-1} (Rubni uvjet za ILS model)

Temperatura domene	15 ºC



Slika 6-6 Usporedba temperaturnih profila tla razvijenog modela i numeričkog 3-D modela (Fluent)

Model uspješno replicira krivulje temperature tla za različite vremenske intervale pri čemu je usporedba s analitičkim modelom provedena samo za one radijuse koji zadovoljavaju uvjet točnosti modela opisan u uvodnom razmatranju (zbog čega krivulja za 1. sat nema markera).



Slika 6-7 Usporedba profila temperatura tla s beskonačnim kontinuiranim linijskim izvorom

Za kraće vremenske korake gdje dominiraju prijelazne pojave, model je uspoređen s rezultatima dostupnima u literaturi (Slika 6-8) [133] . Dubina bušotinskog izmjenjivača u navedenom radu je 100 m, a maseni protok vode 0,25 kg s^{-1}. Bušotina se napaja vodom temperature 80 ºC, a vrijeme potrebno da bi voda procirkulirala kroz izmjenjivač je 14 minuta i 20 sekundi.

Pristup opisu bušotinskog izmjenjivača topline sličan je kao u navedenom radu, ali razlike

postoje u definiranju unutarnji toplinskih otpora ispune te u načinu rješavanja sustava jednadžbi što onemogućuje kvantitativnu usporedbu. U navedenom istraživanju korišten je adaptivni vremenski korak, dok su prikazani rezultati u ovom radu dobiveni s vremenskim korakom simulacije od 1 sekunde. Vidljivo je da u istim vremenskim trenutcima model daje kvalitativno istovjetne rezultate te je moguće pratiti do koje dubine je u vremenskom trenutku došao ulazni medij temperature 80 °C (Slika 6-9). Po isteku vremena zadržavanja fluida u BIT-u, profil temperatura poprima prepoznatljiv izgled.

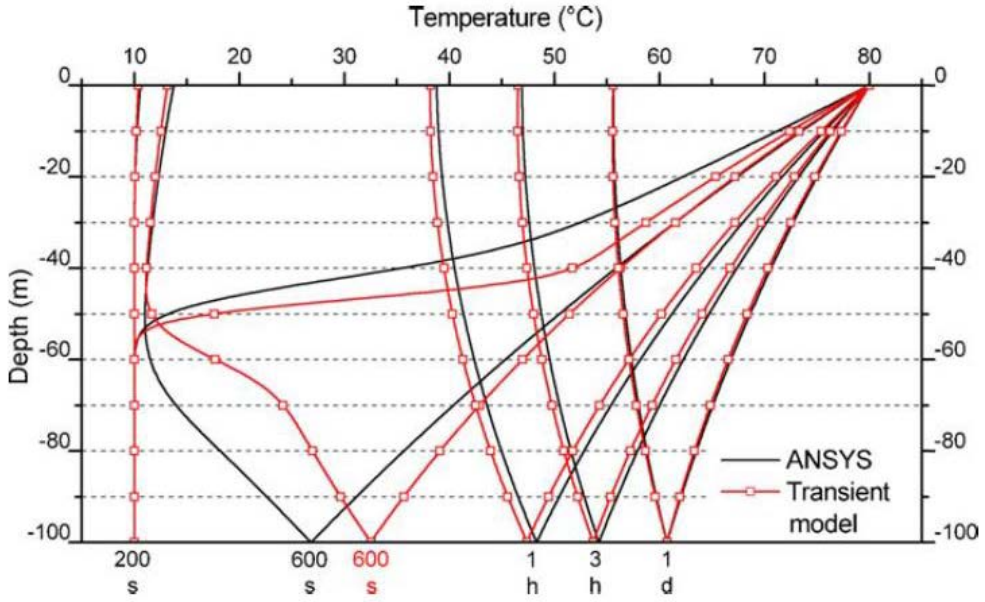
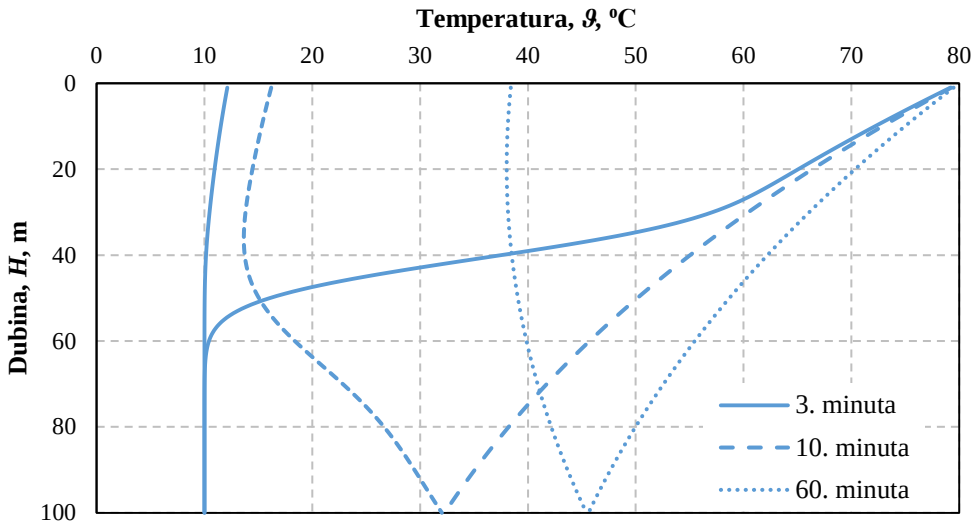
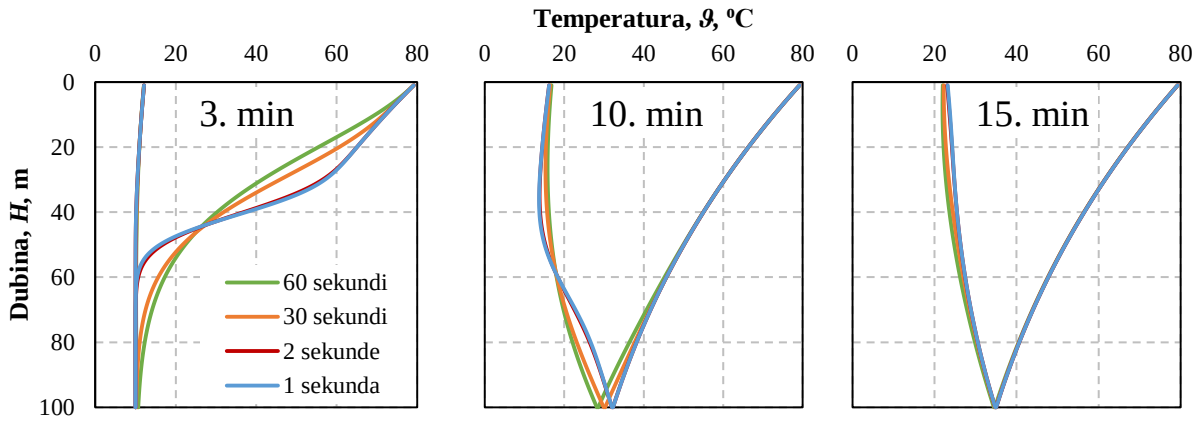


Fig. 8. Double U-tube BHE; fluid temperatures against depth at different times; transient model compared with reference.

Slika 6-8 Usporedba temperaturnih profila za različita vremena otporničko-kapacitivnog modela s 3D modelom razvijenim u ANSYS Fluentu [133]

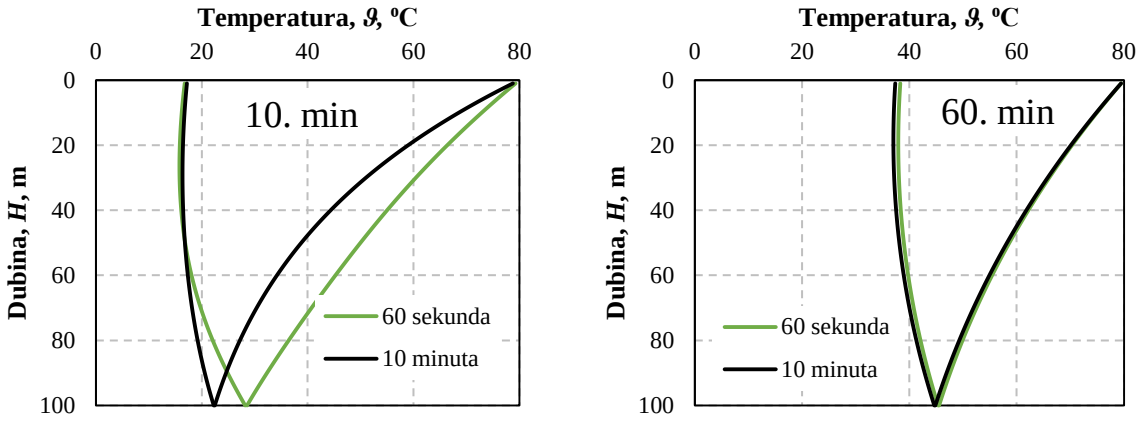


Slika 6-9 Temperaturne krivulje dobivene repliciranjem podataka iz literature [133]



Slika 6-10 Temperaturni profili za različite vremenske korake i trenutke simulacije (legenda se odnosi na sve dijagram)

Vremenski korak simulacije ima primjetan utjecaj na oblik temperaturnog profila za kraća vremenska razdoblja, odnosno za vrijeme manje od potrebnog vremena za prolaz medija kroz cijeli izmjenjivač. Iako su ulazna i izlazna stanja fluida jednaka, nagib profila temperature značajno se razlikuje ako se vremenskom koraku promijeni red veličine pa je vidljiva i osjetna pogreška u dubini do koje je medij procirkulirao. Za vrijeme simulacije dulje od vremena zadržavanja fluida u cijevi, nema primjetnih odstupanja profila temperature. Razlike u izlaznoj temperaturi zanemarive su s obzirom na to da se toplinski tok razlikuje manje od 1 % za različite vremenske korake.

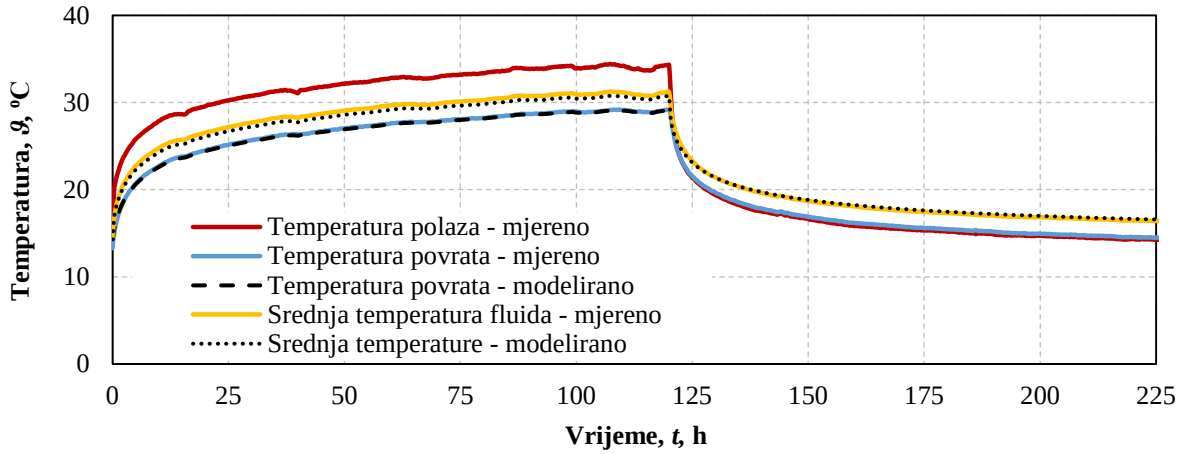


Slika 6-11 Temperaturni profili za vremenski korak simulacije od 10 min

Jednaki zaključak proizlazi iz usporedbe profila za vremenski korak od 1 i 10 minuta, odnosno, ako vrijeme zagrijavanja ili hlađenja tla putem BIT-a traje dulje od vremena cirkulacije medija kroz BIT, vremenski korak se može povećavati kako bi se skratilo vrijeme računanja za sezonsku simulaciju rada sustava. Ako je vrijeme zagrijavanja manje od vremena zadržavanja, povećanjem vremenskog koraka nije moguće odrediti temperaturni profil u tlu te se dugoročno utječe na temperaturu tla, iako se izlazna temperatura fluida značajno ne mijenja s povećanjem

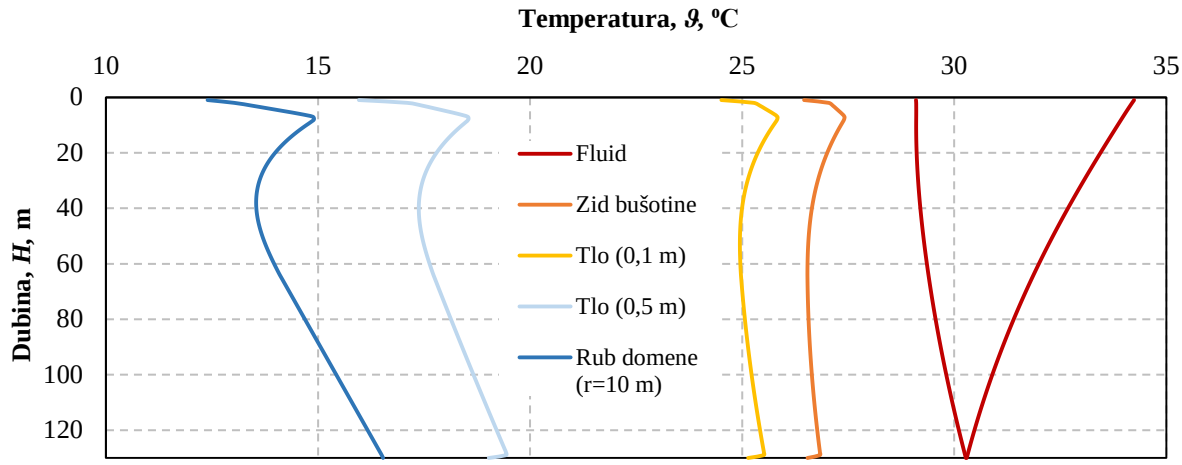
vremenskog koraka.

Slika 6-12 prikazuje temperature medija unutar BIT-a zabilježene tijekom DTRT-a i temperaturne krivulje dobivene otporničko-kapacitivnim modelom. Modelirana temperatura daje zadovoljavajuće poklapanje s izlaznom temperaturom iz bušotine kao i srednja temperatura fluida u cijevima. Prikazani profil temperatura dobiven je za efektivnu toplinsku provodnost 1,63 W m^{-1} K^{-1} i efektivni toplinski otpor 0,07 m K W^{-1} što je u skladu s mjerenim podacima. Odstupanje izlazne temperature se kreće oko 0,06 °C u odnosu na mjerenu, dok se kod srednje temperature odstupanje kreće oko 0,45 °C.

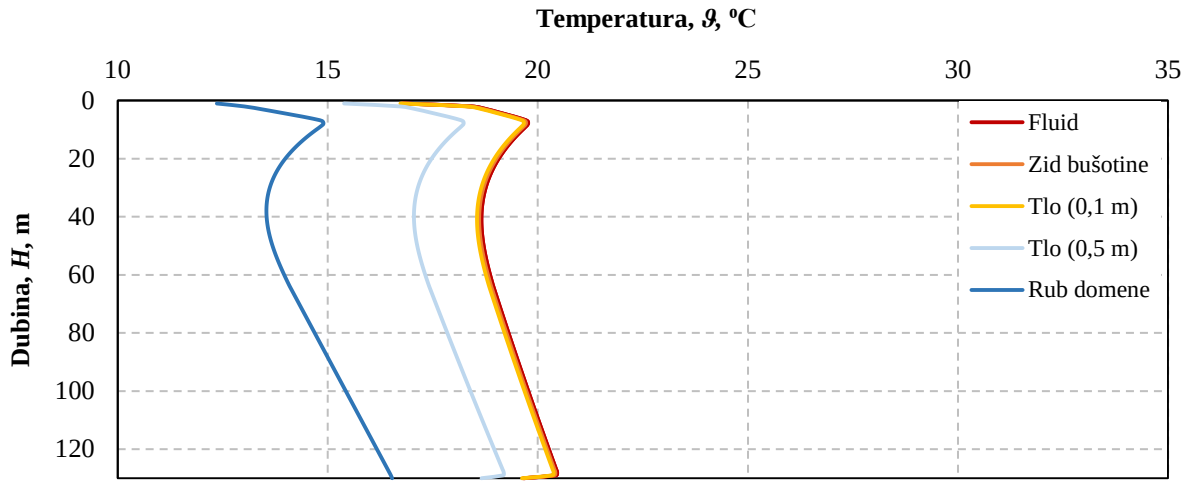


Slika 6-12 Usporedba modela s mjerenjima DTRT-a – crnim crtkanim linijama prikazane su krivulje temperatura dobivene otporničko-kapacitivnim modelom

Slika 6-13 i Slika 6-14 prikazuju vertikalne temperaturne profile u fazi grijanja i fazi oporavka. Modra krivulja označava profil na rubu domene što odgovara temperaturnom profilu toplinski neporemećenog tla. Prilikom oporavka tla nakon iščezavanja prijelaznih pojava temperature unutar bušotine i samog tla u blizini se izjednačavaju te vremenski jednoliko hlade.

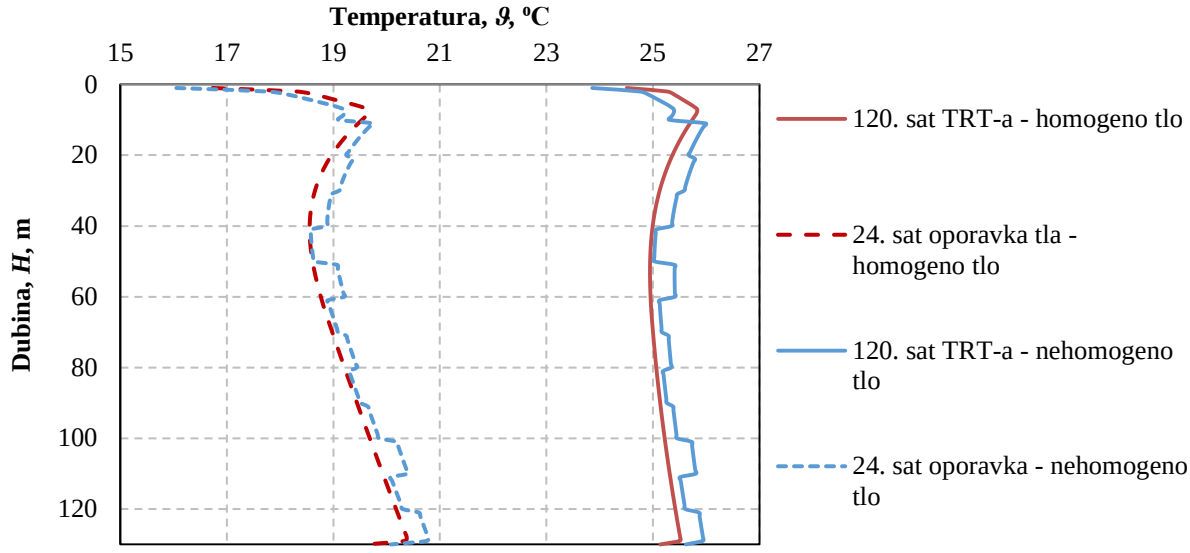


Slika 6-13 Vertikalni profili za 120. sat DTRT-a

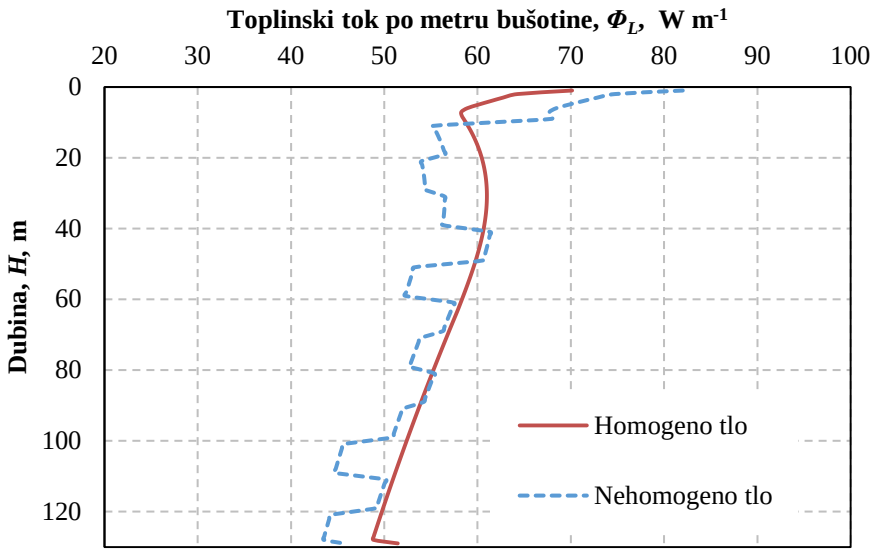


Slika 6-14 Vertikalni profili za 24. sat oporavka nakon DTRT-a

Prethodne slike podrazumijevaju homogeno tlo. Heterogenosti u tlu utječu u manjoj mjeri na temperaturni profil tla, ali u većoj mjeri na razdiobu toplinskog toka izmijenjenog s tlom. Oštri prijelazi iz segmenta u segment, vidljivi kod temperature, uvjetovani su pojednostavljenjem da je tlo idealno heterogeno po visini, odnosno da su slojevi tla različitog sastava paralelni s površinom. Ako se promatra homogeno tlo, razdioba toplinskog toka izravno je vezana uz razliku temperature fluida unutar BIT-a i toplinski neporemećenog tla te se toplinski tok po metru dubine smanjuje s dubinom. Kod nehomogenog tla, lokalna svojstva mogu utjecati na raznolikiju razdiobu toplinskog toka po dubini. U oba slučaja toplinski tok je izračunat pomoću masenog protoka fluida i pripadajućih razlika temperatura ostvarenih u svakom segmentu bušotine.



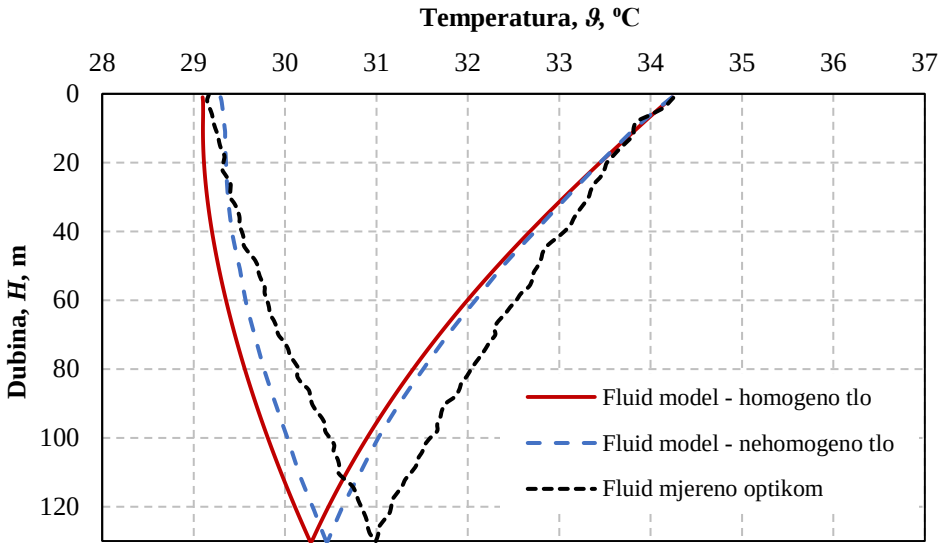
Slika 6-15 Usporedba temperaturnog profila zida bušotine homogenog i nehomogenog tla



Slika 6-16 Razdioba toplinskog toka po dubini bušotine za homogeno i nehomogeno tlo

Odstupanje profila temperature dobivenog modelom od izmjerenog (Slika 6-17) primjetno je i u slučaju homogenog i nehomogenog tla. Prilikom analize podataka napravljena je usporedba različitih veličina mreže te nije zabilježena primjetna razlika u temperaturnom profilu za bušotinu podijeljenu u 130 i 260 segmenata.

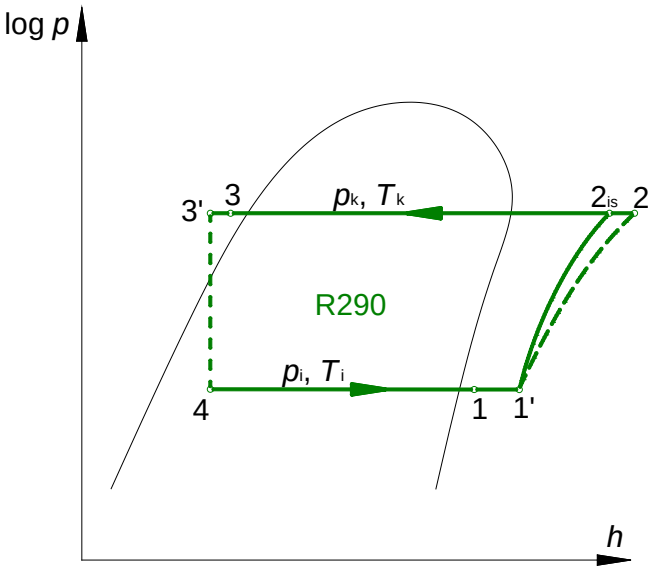
Kako su maseni protok i dubina BIT-a uzeti iz stvarnih podataka, odstupanja se pripisuju složenoj geometriji BIT-a i prijenosu topline između cijevi i ispune koja se nalaz između njih. Toplinski otpori unutar BIT-a pretpostavljaju idealan raspored cijevi, ali ni razmak ni položaj u odnosu na os bušotine nije moguće kontrolirati tijekom izvedbe iste, samim time i njihov opis nije jednostavan.



Slika 6-17 Usporedba temperaturnih profila fluida s mjerenim rezultatima

6.7. Model dizalice topline

Veza modela dizalice topline i bušotinskog izmjenjivača topline jest maseni protok i temperatura fluida na ulazu i izlazu iz ove dvije komponente. Pristup modeliranja dizalice topline preuzet je prema modelu prikazanom u radu Scarpe i ostalih [136]. Navedeni model, na temelju vrijednosti za nominalnu radnu točku, generira parametre koji se koriste za satnu analizu rada dizalice topline u uvjetima koji se razlikuju od nominalnih te računa faktor grijanja, odnosno hlađenja, te temperature polaza medija prema potrošaču i tlu. U tu svrhu model je podijeljen u dva dijela pri čemu prvi dio koristi ulazne podatke dizalice topline i generira ulazne podatke za drugi dio modela koji je vezan uz tlo i BIT te promjenjivu temperaturu povrata iz tla.



Slika 6-18 Prikaz ljevokretnog procesa s ugrađenim međuizmjenjivačem topline

Ulazni podaci su radna tvar, nominalni rashladni i ogrjevni učin, faktor grijanja i hlađenja, temperaturni režim na strani toplinskog izvora i ponora, potrošnja električne energije pomoćnih komponenti i učinkovitost elektromotora kompresora.

S obzirom na činjenicu da korištena dizalica topline nije komercijalni proizvod te nisu dostupni kataloški podaci, ulazni parametri određeni su prikupljenim mjerenim podacima u radu samog uređaja. Mjereni podaci obuhvaćaju period grijanja od 30 dana s vremenom akvizicije podataka od 1 minute te period hlađenja od 23 dana. Prije analize i osrednjavanja podataka filtrirani su podaci zabilježeni u trenutku uključivanja i isključivanja kompresora kada su tranzijentni procesi dominantni. Očitanja najvažnijih parametara prema pojavnosti u promatranom periodu nalaze se u Prilogu B i Prilogu C.

Tablica 6-4 Popis ulaznih veličina za model dizalice topline

Veličina	Grijanje	Hlađenje
Učin kondenzatora (grijanje/hlađenje)	14,5 kW	14,25 kW
Učin isparivača (grijanje/hlađenje)	11,75 kW	11,75 kW
Snaga kompresora (grijanje/hlađenje)	2,75 kW	2,5 kW
Temperatura kondenzacije (grijanje/hlađenje)	44 °C	34,2 °C
Temperatura isparavanja (grijanje/hlađenje)	4,5 °C	1,3 °C
Temperaturni režim BIT (grijanje/hlađenje)	6,5/12,25 °C	33,5/26,9 °C
Temperaturni režim potrošača (grijanje/hlađenje)	45/37 °C	3,5/9,5 °C
Maseni protok medija kroz BIT	0,544 kg/s	0,544 kg/s
Maseni protok medija kroz razvod potrošač	0,593 kg/s	0,593 kg/s
Pregrijanje pri tlaku isparavanja	6,5 °C	
Pothlađenje pri tlaku kondenzacije	2,2 °C	
Učinkovitost međuizmjenjivača topline	0,31	

Na temelju ulaznih podataka, model dizalice topline računa efikasnost isparivača i kondenzatora:

$$\varepsilon_{isp} = \frac{\left|\vartheta_{sek,ulaz,isp,nom} - \vartheta_{sek,izlaz,isp,nom}\right|}{\left|\vartheta_{sek,ulaz,isp,nom} - \vartheta_{isparavanja,nom}\right|} \tag{66}$$

$$\varepsilon_{kon} = \frac{\left|\vartheta_{sek,ulaz,kon,nom} - \vartheta_{sek,izlaz,kon,nom}\right|}{\left|\vartheta_{sek,ulaz,kon,nom} - \vartheta_{kondenzacije,nom}\right|} \tag{67}$$

Dodatno, za ulazne parametre određuju se specifične entalpije u svim točkama procesa, nominalni protok radne tvari, dobava kompresora te izentropski stupanj djelovanja prema sljedećim jednadžbama:

$$P_{kompresor} = \Phi_{kondenzator} - \Phi_{isparivač} \tag{68}$$

$$q_{m,RT,nom} = \frac{\phi_{isparivač}}{h_1 - h_4} \tag{69}$$

$$h_2 = h_{1'} + \frac{\phi_{kompresor}}{q_{m,RT,nom}} \tag{70}$$

$$\eta_{is} = \frac{h_{2is} - h_1}{h_2 - h_1} \tag{71}$$

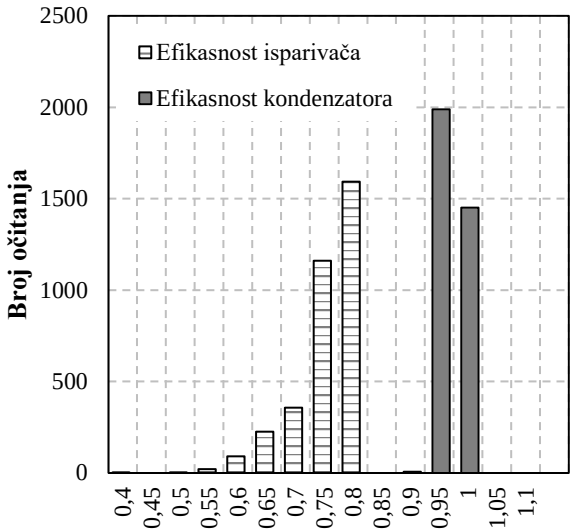
$$q_{v,kompresor,nom} = q_{m,RT,nom} \cdot v_{usis} \tag{72}$$

Tablica 6-5 Popis izlaznih veličina iz prve faze modela dizalice topline

Veličina	Izlazni podatak
Efikasnost kondenzatora (grijanje/hlađenje)	0,96 / 0,90

Efikasnost isparivača (grijanje/hlađenje)	0,74 / 0,73
Volumni protok radne tvari (grijanje/hlađenje)	0,036 m^3/h / 0,037 m^3/h
Izentropski stupanj djelovanja kompresora (grijanje/hlađenje)	0,75 / 0,72

Za sve ostale radne uvjete dizalice topline, koji se javljaju kroz sezonu grijanja i hlađenja, maseni protoci na strani potrošača i BIT-a te efikasnosti izmjenjivača topline smatraju se konstantnima. Slika 6-19 pokazuje razdiobu efikasnosti izmjenjivača u promatranom periodu pri čemu vrijednost na horizontalnoj osi označava raspon od prethodnog stupca do trenutnog pa je tako vidljivo da se sva očitanja za kondenzator nalaze u rasponu od 0,9 do 1. Provedena analiza potvrđuje uvedenu pretpostavku o usvajanju konstantnih efikasnosti izmjenjivača topline.



Slika 6-19 Učestalost pojavljivanja pojedine vrijednosti efikasnosti isparivača i kondenzatora u promatranom razdoblju grijanja

Određivanje toplinskih stanja tijekom promjenjivih uvjeta rada sustava temelji se na povratnim temperaturama od strane potrošača i povratne temperature iz BIT-a. Proračun započinje određivanjem temperature isparavanja i kondenzacije (navedeni izrazi vrijede za period grijanja):

$$\vartheta_{kondenzacije} = \frac{\phi_{kondenzator}}{q_{m,potrošač} c_{fluid} \varepsilon_{kond}} + \vartheta_{pov,potrosac} \tag{73}$$

$$\vartheta_{isparavanja} = \vartheta_{pov,BIT} - \frac{\phi_{isparivač}}{q_{m,bit} c_{fluid} \varepsilon_{isp}} \tag{74}$$

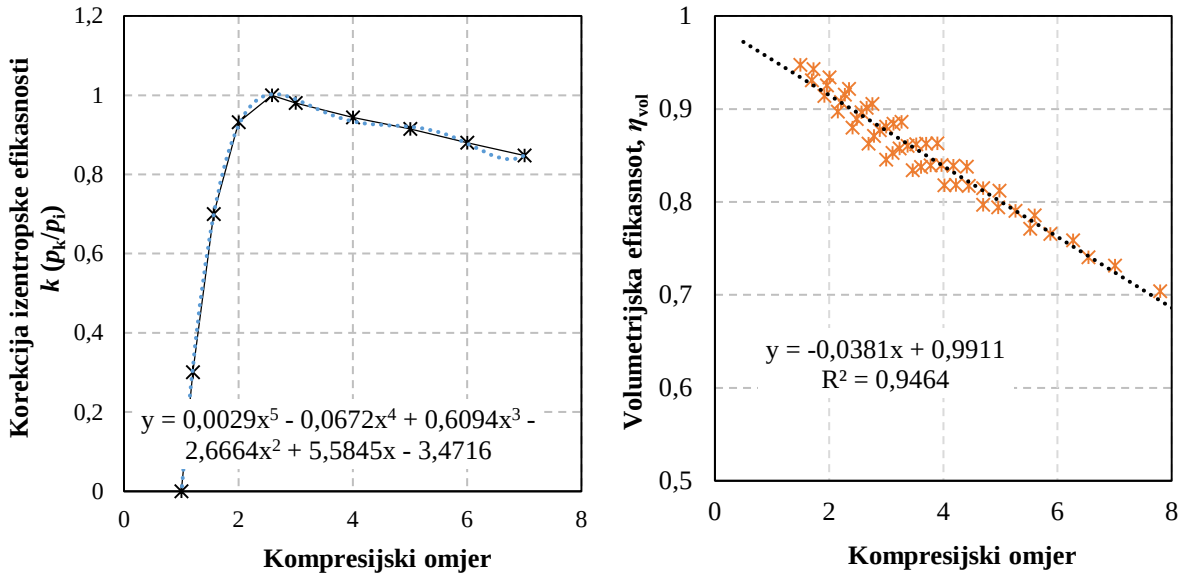
Nominalni izentropski stupanj djelovanja korigiran je na temelju tako izračunatih tlakova isparavanja i kondenzacije, kao i pripadna volumetrijska efikasnost kompresora, prema

prikazanim izrazima (Slika 6-20). Krivulja za volumetrijsku efikasnost kompresora dobivena je iz podataka proizvođača kompresora. Korigirani izentropski stupanj djelovanja i volumetrijska efikasnost kompresora koriste se za određivanje stanja na kraju kompresije i protoka radne tvari:

$$h_2 = h_{1'} - (h_{1'} - h_{2s}) / \left(\eta_{isen,kor} \cdot k\left(p_k / p_i \right) \right) \tag{75}$$

$$q_{m,RT} = q_{v,kompresor,nom} \cdot \frac{\left(\eta_{vol} / \eta_{vol,nom} \right)}{v_{us}} \tag{76}$$

Potom model dizalice topline računa specifične entalpije u svim točkama procesa te iz bilance isparivača ili kondenzatora određuje polaznu temperaturu glikolne smjese prema tlu. Za svaki vremenski korak izračun započinje s podacima za nominalnu radnu točku (faza 1) i postupak se iterira, dok se ne postigne toplinska ravnoteža učina isparivača/kondenzatora na strani radne tvari i na strani glikolne smjese, tj. na strani BIT-a.



Slika 6-20 Korekcijska krivulja izentropske i volumetrijske efikasnosti za kompresor za različite kompresijske omjere

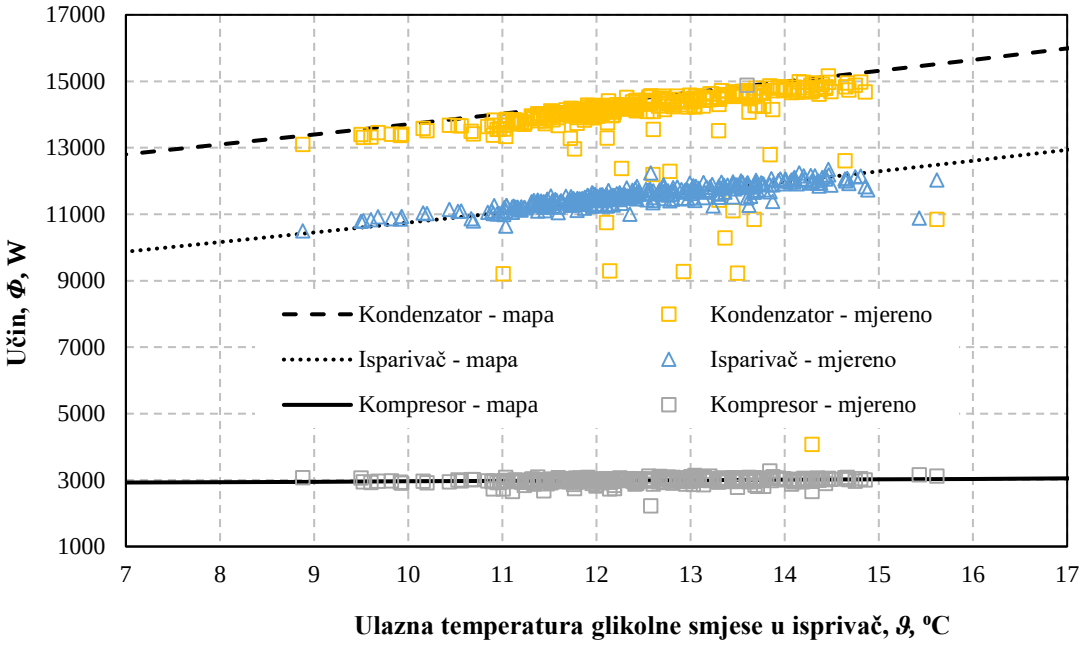
Izlazni podaci iz druge faze modela jesu polazne temperature prema BIT-u i potrošaču te učini svih komponenti dizalice topline.

Tablica 6-6 Popis ulaznih i izlaznih veličina iz druge faze modela dizalice topline

Ulazne veličine	Izlazne veličine
Temperatura povrata iz BIT-a	Temperatura polaza prema BIT-u
Temperatura povrata iz kruga potrošača	Temperatura polaza prema potrošaču
Potreban učin na strani potrošača	Učin komponenti dizalice topline

Na temelju prikazanog modela kreira se mapa dizalice topline koja daje učine komponenti za

različite temperature povrata glikolne smjese u isparivač i kondenzator. U sezonskoj simulaciji krivulje učina dizalice topline koriste se kako bi se odredilo potrebno vrijeme rada u jednom vremenskom trenutku u ovisnosti o potrebnom učinu na strani potrošača te povratne temperature glikolne smjese iz BIT-a. Slika 6-21 prikazuje usporedbu generirane mape učina dizalice topline za različite temperature povrata glikolne smjese za temperaturu kondenzacije 45 °C te izmjerenih podataka.



Slika 6-21 Usporedba mjerenih podataka i generirane mape dizalice topline za temperaturu kondenzacije 45 °C

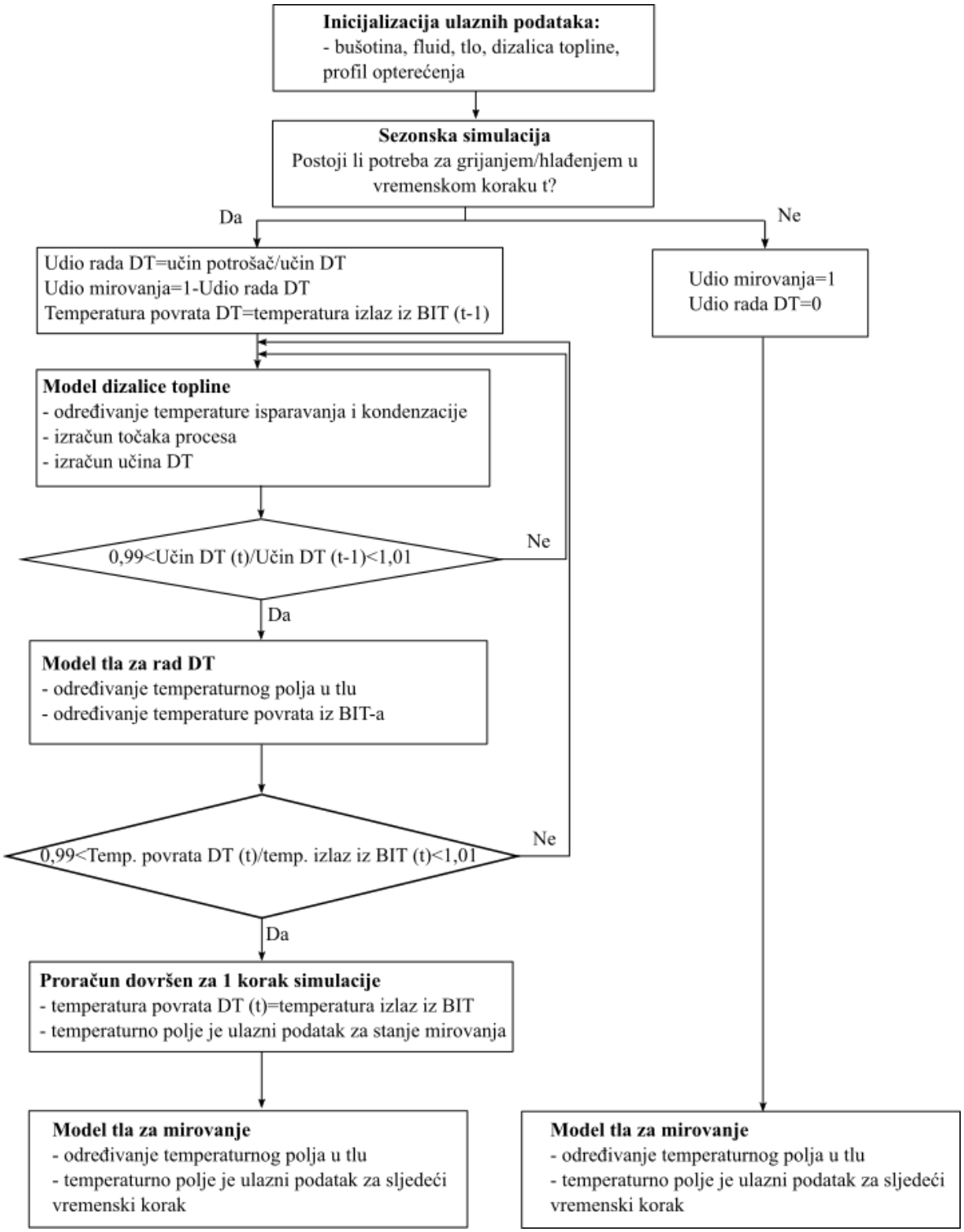
6.8. Sezonska interakcija dizalice topline i bušotinskog izmjenjivača topline

Sezonska simulacija rada dizalice topline prikazana je na dijagramu toka (Slika 6-22). Osim već opisanih ulaznih podataka za pojedine modele, potrebno je definirati opterećenje na strani potrošača te povratnu temperaturu medija iz sustava grijanja/hlađenja. Zbog jednostavnosti modeliranja rada sustava, uvedena je pretpostavka da je povratna temperatura iz sustava grijanja/hlađenja nepromjenjiva u vremenu. Za svaki vremenski korak opterećenja (npr. satno opterećenje) model provjerava postoji li potreba za radom dizalice topline u režimu grijanja ili hlađenja. Ako postoji potreba, onda se iz omjera toplinskog opterećenja u tom satu i učina dizalice topline za temperaturu povrata glikolne smjese iz BIT-a, iz prethodnog sata računa, vrijeme rada dizalice topline i vrijeme mirovanja u tom vremenskom koraku.

U prvom se koraku pretpostavlja da je temperatura povrata iz tla jednaka temperaturi iz prethodnog koraka simulacije. Pozivanjem modela dizalice topline iteracijski se računaju toplinska stanja u točkama ljevokretnog procesa, dok učin dizalice topline ne konvergira,

odnosno promjena učina u odnosu na prethodni korak ne bude manja od 1 % te se definira nova temperatura polaza prema tlu. Ta temperatura je ulazni podatak u model tla koji računa temperaturno polje na kraju vremena rada dizalice topline u promatranom vremenskom koraku simulacije te se nova temperatura povrata iz tla uspoređuje s onom iz prošlog koraka. Dok rješenje ne konvergira, tako da razlika povratne temperature iz tla između dva koraka ne bude manja od 1 %, model dizalice topline s novom povratnom temperaturom glikolne smjese iz tla ponovno računa točke procesa i traži učin dizalice topline koji zadovoljava uvjet konvergencije. Nakon konvergencije rješenja za obe petlje model sprema karakteristične veličine te se do kraja vremenskog koraka poziva samo model tla pri čemu se odvija oporavak tla. U slučaju da nema potrebe za grijanjem i hlađenjem, onda se odmah poziva model tla, u kojem se odvija mirovanje tla s oporavakom od prethodno unesenih toplinskih poremećaja.

Minimalno vrijeme rada dizalice topline unutar jednog koraka simulacije ovisi o dubini BIT-a i masenom protoku fluida. Kako bi opisani sustav jednadžbi dao dobro rješenje, nužno je davrijeme rada dizalice topline bude veće od vremena zadržavanja fluida u cijevima, odnosno, veći od vremena potrebnog fluidu da procirkulira kroz cijeli bušotinski izmjenjivač topline.

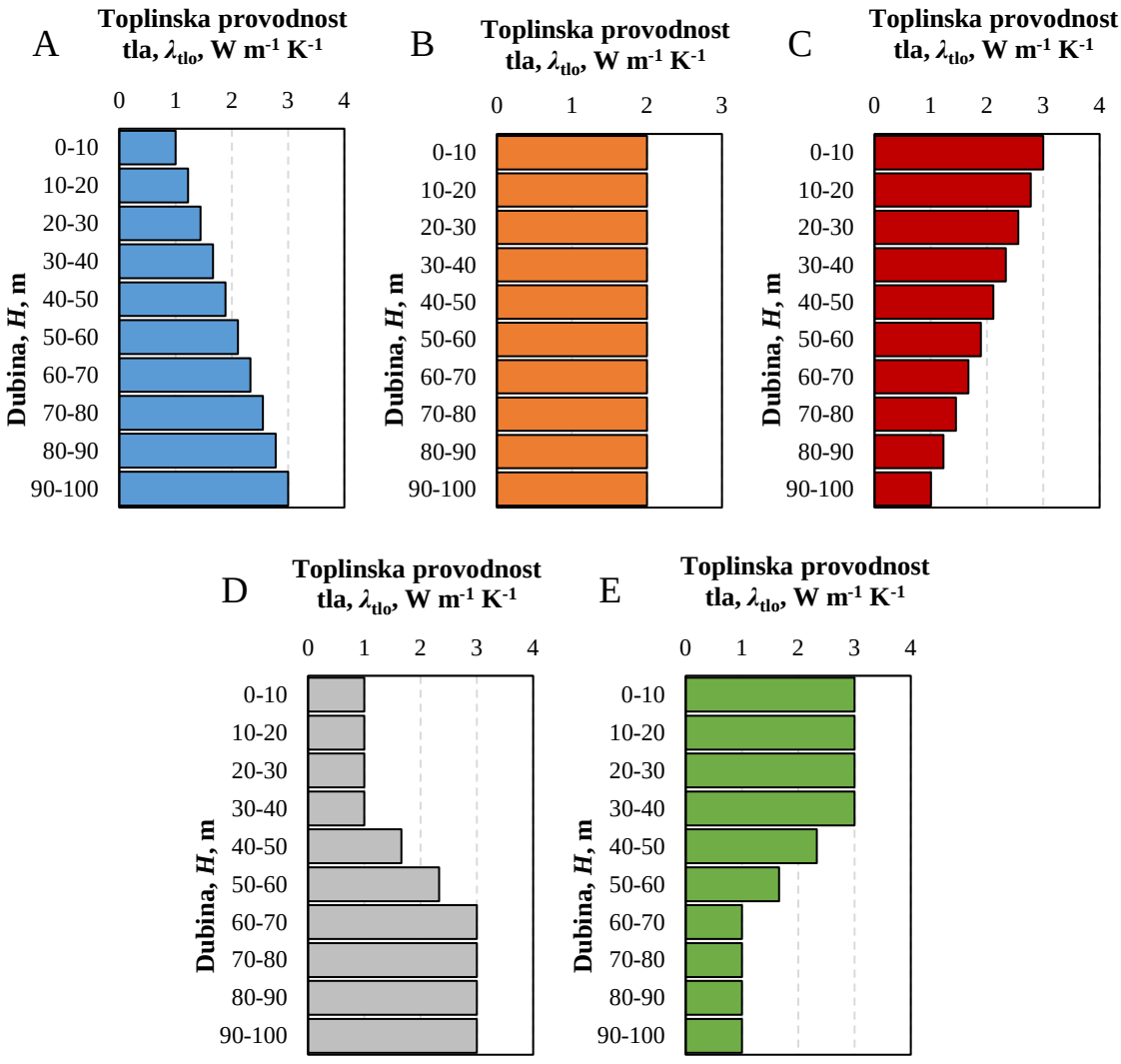


Slika 6-22 Dijagram toka sezonske simulacije modela

7. SEZONSKI RAD DIZALICE TOPLINE U GRIJANJU I HLAĐENJU

7.1. Ulazni podaci – svojstva tla

Za potrebe analize utjecaja svojstava na rad dizalice topline, definirano je nekoliko hipotetskih razdioba svojstava tla (Slika 7-1). Istom metodologijom kao i kod modeliranja DTRT-a određena su efektivna toplinska svojstva tla pri čemu je za sve profile pretpostavljena ista gustoća tla od 1950 kg m^{-3} i specifični toplinski kapacitet 1420 J kg^{-1} K^{-1}. Navedene vrijednosti jednake su u svim provedenim sezonskim simulacijama i nije promatran njihov utjecaj na učinkovitost sustava. Razlog tome su zaključci prethodno provedenih istraživanja koja su pokazala da volumni toplinski kapacitet tla, odnosno umnožak gustoće i specifičnog kapaciteta, ima zanemariv utjecaj na izlaznu temperaturu iz BIT-a i temperaturu tla u odnosu na toplinsku provodnost [52,55].



Slika 7-1 Preddefinirani profili toplinske provodnosti, W m^{-1} K^{-1}, za analizu utjecaja vertikalne razdiobe svojstava na rad geotermalne dizalice topline

S obzirom na to da su svojstva određena korištenjem ILS modela za modelirane TRT-ove, dobivena efektivna svojstva nisu jednaka ulaznom podatku postavljenom u numerički model koji opisuje izmjenu topline u tlu u vertikalnom i radijalnom smjeru, što je u skladu sa sličnim analizama dostupnim u literaturi [122]. Vidljivo je i da raspored slojeva tla utječe na efektivnu toplinsku provodnost te toplinski otpor. Za svaki par svojstava provjerena je potrebna dubina BIT-a prema poznatom opterećenju te je utvrđeno da je razlika između najdublje (D profil) i najpliće (B profil) potrebne bušotine oko 2 % dubine. U skladu s tim, sve simulacije su provedene za istu dubinu BIT-a od 100 m.

Tablica 7-1 Efektivna toplinska svojstva određena modelom linijskog izvora

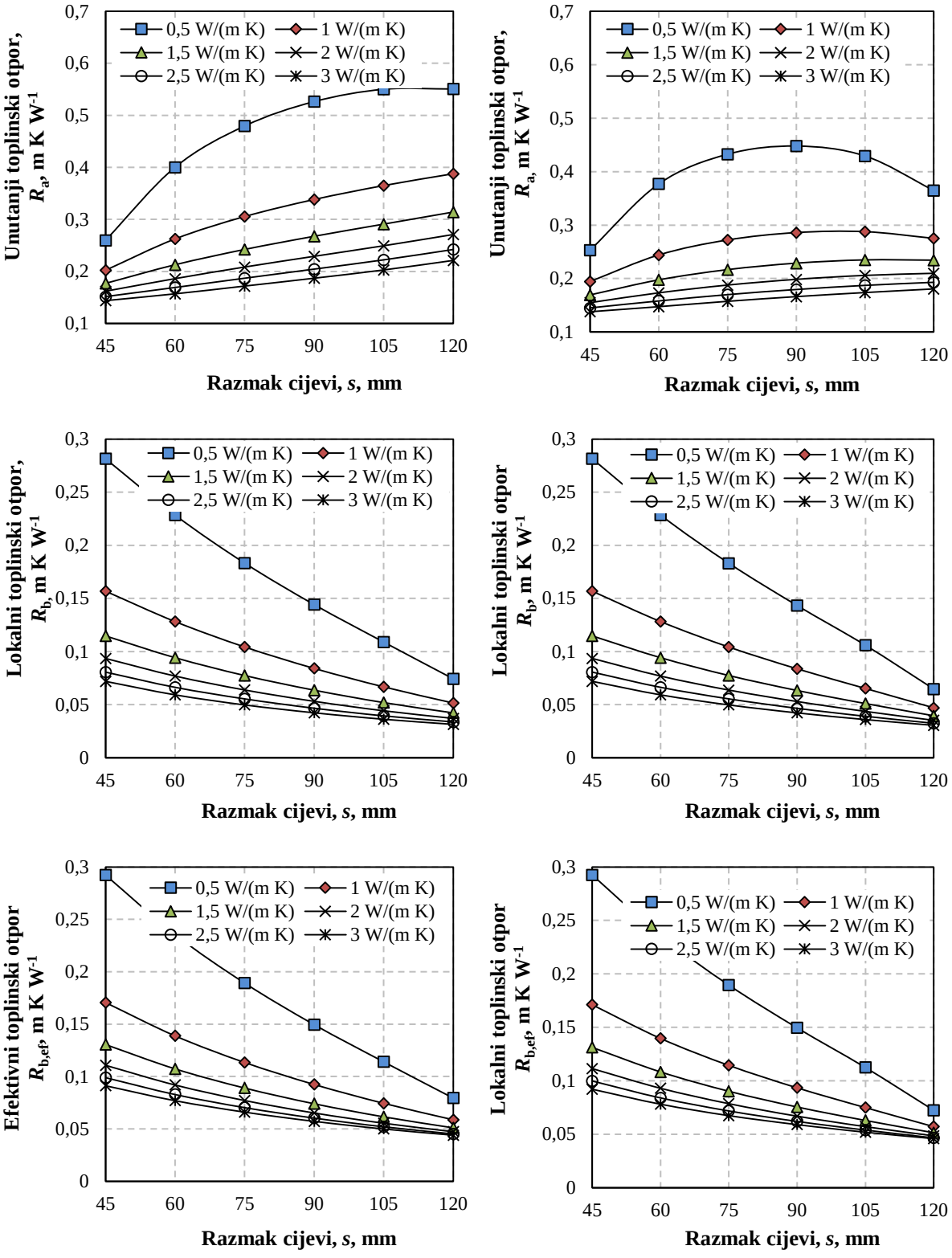
Slučaj	A	B	C	D	E
Efektivna toplinska vodljivost	1,783	1,84	1,80	1,73	1,76
Efektivni toplinski otpor	0,073	0,072	0,071	0,073	0,070

7.2. Toplinski otpori unutar BIT-a

Način određivanja toplinskog otpora, kao i opis unutarnjih toplinskih otpora dan je u prethodnim poglavljima. Kako pojedini parametri utječu na toplinski otpor BIT-a prikazano je na sljedećim dijagramima (Slika 7-2). Prikazani rezultati dobiveni su unutar programskog paketa *EED* [27] za bušotinu promjera 152 mm s dvostrukom U cijevi i volumenski protok vode kroz BIT 0,342 m^3 s^{-1}. Promjer cijevi je 32 mm te razmak između cijevi od 120 mm odgovara slučaju kada se cijevi nalaze uz rub bušotine, dok se kod razmaka osi od 45 mm stjenke cijevi nalaze na udaljenosti od 13 mm. Iz dijagrama je vidljivo da toplinska provodnost okolnog tla ima primjetan utjecaj na unutarnji toplinski otpor za sve promatrane konfiguracije BIT-a, dok na lokalni i efektivni toplinski otpor utjecaj postoji samo za slučaj kada su cijevi BIT-a postavljene u blizini zida bušotine.

Povećanjem razmaka između cijevi povećava se udio toplinskog toka koji fluidi izmjenjuju preko domene tla, a ta je pojava izraženija u slučaju veće provodnosti okolišnjeg tla od ispune. Za omjere toplinske provodnosti tla i ispune veće od 2 postoji razmak cijevi s maksimalnim iznosom unutarnjeg toplinskog otpora. Kod manjih omjera unutarnji otpor raste, a lokalni toplinski otpor se smanjuje, s porastom razmaka između cijevi. Potonji slučaj je poželjan jer veći unutarnji toplinski otpor uvjetuje manju toplinsku interakciju između silazne i uzlazne struje unutar BIT-a. Kako veća toplinska provodnost ispune smanjuje i unutarnji i lokalni toplinski otpor, preporučljivo je koristiti ispunu približnih ili boljih toplinskih svojstava od okolnog tla uz upotrebu *odstojnika*.

Efektivni toplinski otpor ovisi o dubini i protoku fluida kroz BIT. Kod ove usporedbe dubina BIT-a je 100 m i krivulje lokalnog i efektivnog otpora imaju isti trend, ali vrijednosti efektivnog otpora su veće u rasponu od 3 do 50 % ovisno o konfiguraciji BIT-a. Veća razlika očituje se kod konfiguracija s većom toplinskom provodnosti ispune i većim razmakom cijevi.

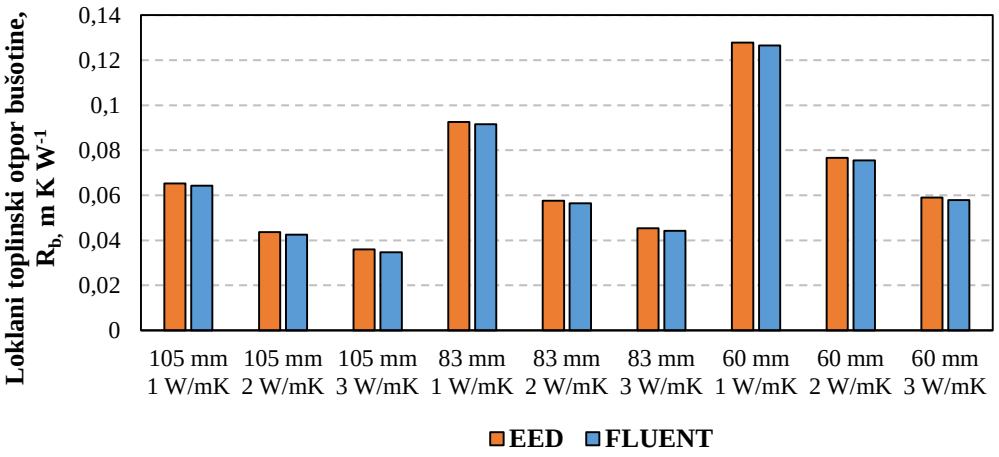


Slika 7-2 Usporedba unutarnjeg R_a, lokalnog R_b i efektivnog toplinskog otpora $R_{b,ef}$ za toplinsku

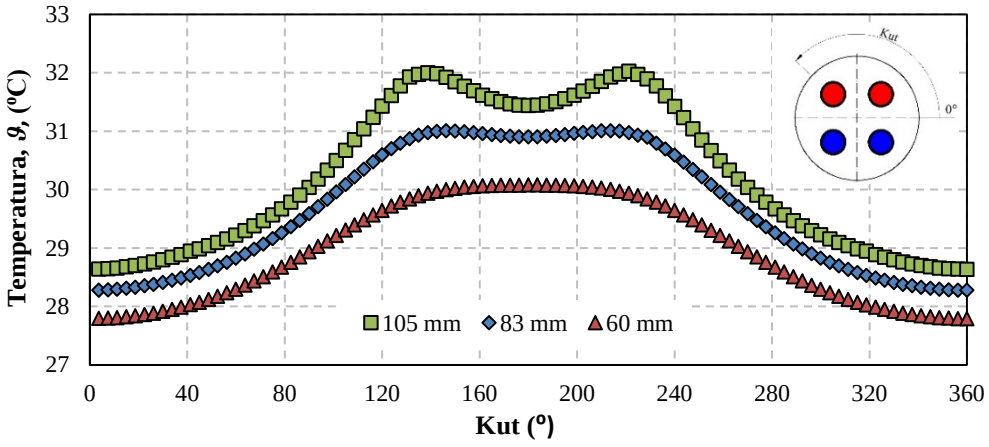
provodnost tla od 1 (lijevo) i 3 W m^{-1} K^{-1} (desno) za različite provodnosti ispune i razmak između cijevi

Slična analiza napravljena je u programskom paketu za *Fluent* gdje je razvijen 3D model presjeka bušotine debljine 1 m. U blizini BIT-a modelirana je domena tla u radijusu 5 m te je diskretizirana tako da se elementi po radijusu povećavaju s udaljavanjem od BIT-a. Obod tla i BIT-a sadrže po 96 čvorova, stjenke cijevi po 48, dok je po visini domena podijeljena u 25 dijelova. Mreža stjenke cijevi i tla sastoji se od pravokutnih, a ispuna BIT-a od trokutastih elemenata. Na vanjskom rubu tla postavljen je rubni uvjet konstantne temperature (14,5 °C), a unutar cijevi konvektivni rubni uvjet (α=2500 W m^{-2} K^{-1}) te temperature fluida 35 i 30 °C.

Dobiveni rezultati za promatrane parametre BIT-a odstupaju u rasponu od 1 do 3,4 %, a razlog tome je zanemarivanje nejednolike razdiobe temperature ispune oko cijevi fluida i na zidu bušotine (Slika 7-3). Nejednolika razdioba temperature izraženija je za veći razmak između cijevi i veću toplinsku provodnost ispune (Slika 7-4).



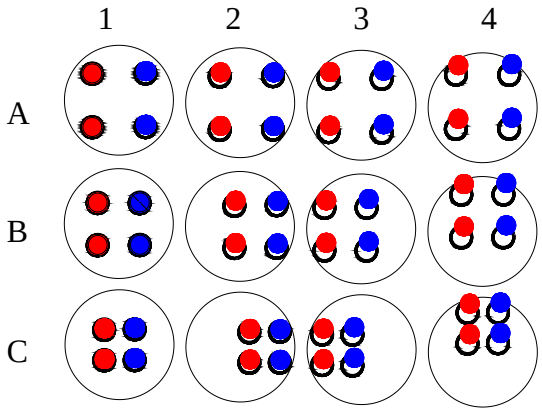
Slika 7-3 Usporedba toplinskih otpora izračunatih višepolnom ekspanzijom u EED-u i numeričkom simulacijom za različite toplinske provodnosti ispune i razmak cijevi unutar BIT-a



Slika 7-4 Razdioba temperatura po obodu bušotine za različit razmak između cijevi (toplinska provodnost ispune 2 W m^{-1} K^{-1})

Numerički model moguće je proširiti za različite položaje cijevi unutar presjeka bušotine kako

bi se ocijenio utjecaja njihovog položaja na toplinski otpor. Za bušotinu promjera 152 mm s tri različita razmaka između cijevi i tri toplinske provodnosti ispune te asimetričan položaj cijevi izračunati su toplinski otpori. Svi izračuni su rađeni s tlom toplisnke provodnosti 2 W m^{-1} K^{-1}.



Slika 7-5 Prikaz različitog položaja cijevi i oznaka promatranog slučaja

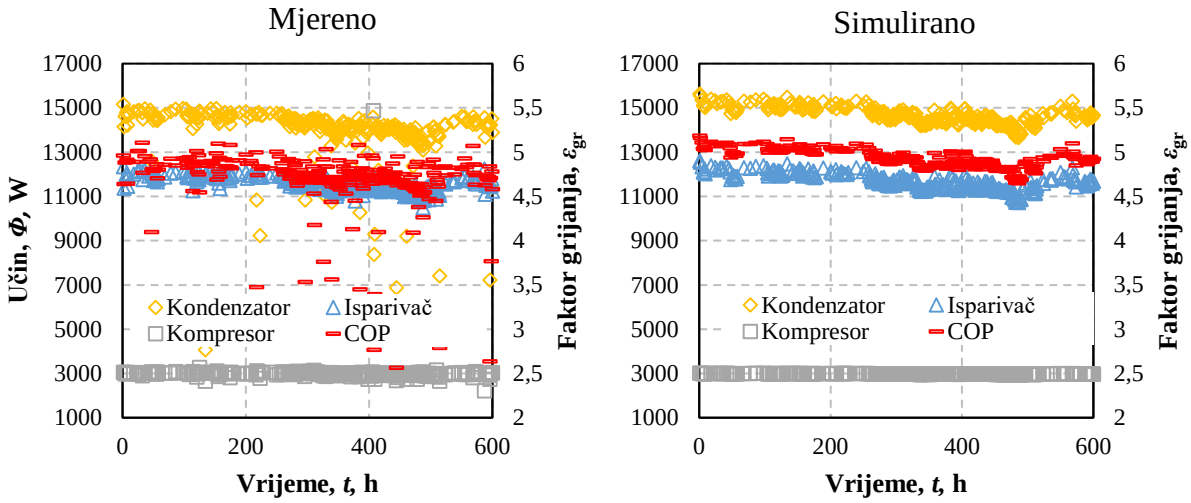
Rezultati su prikazani u Tablica 7-2. Stupac 1 označava vrijednosti za simetričan položaj, a stupci 2, 3 i 4 za položaj cijevi uz sami rub bušotine i različitu orijentaciju istih. Veći razmak između cijevi očekivano je manje osjetljiv na različite položaje s obzirom na ograničenost mogućeg pomaka te su razlike lokalnog toplinskog otpora unutar 5 %. Najveća relativna razlika i najveće smanjenje toplinskog otpora vidljivo je za slučaj C3 u odnosu na C1, odnosno približavanjem cijevi s toplijom strujom samom zidu bušotine za ispunu niske toplinske provodnosti. Relativna razlika tada iznosi 15 %. Asimetričan položaj cijevi unutar BIT-a naglašava utjecaj omjera toplinske provodnosti tla i ispune na rezultirajući otpor te je kod ispuna niže provodnosti od okolišnjeg tla povoljniji simetričan položaj cijevi. U slučaju da su okolno tlo i ispuna jednakih toplinskih svojstava, relativni položaj cijevi nema utjecaja na toplinski otpor bušotine.

Tablica 7-2 Toplinski otpori bušotine za različite položaje cijevi (m K W^{-1})

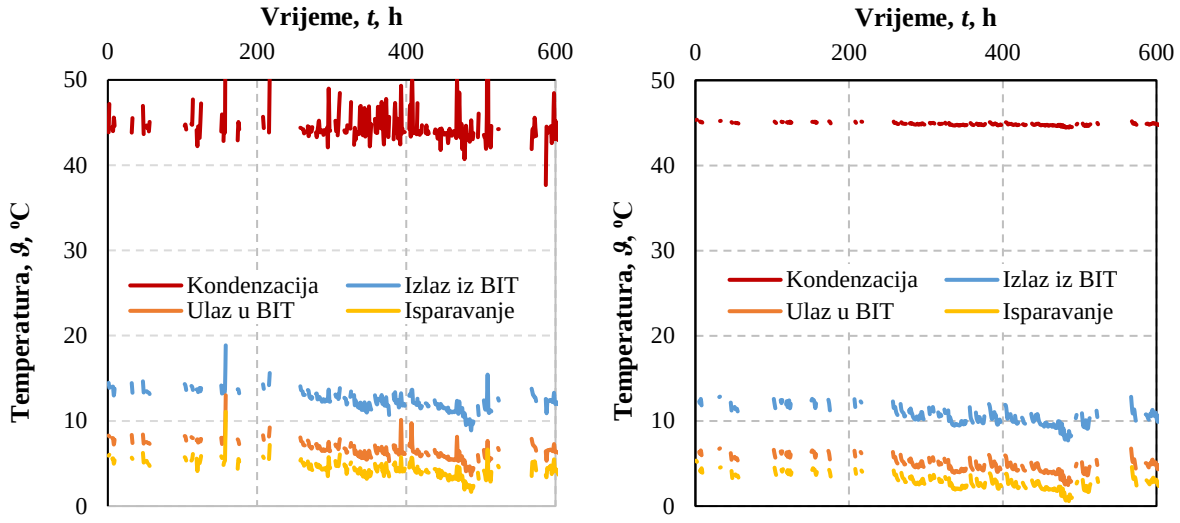
Slučaj	Razmak cijevi mm	Toplinska provodnost ispune W m^{-1} K^{-1}	1	2	3	4
A	105	1	0,064	0,066	0,061	0,063
	105	2	0,042	0,042	0,043	0,043
	105	3	0,035	0,034	0,036	0,035
B	83	1	0,092	0,091	0,081	0,086
	83	2	0,056	0,056	0,057	0,056
	83	3	0,044	0,043	0,047	0,045
C	60	1	0,127	0,121	0,107	0,114
	60	2	0,076	0,076	0,076	0,076
	60	3	0,058	0,058	0,063	0,060

7.3. Satna simulacija rada sustava

Model dizalice topline i BIT-a uspoređen je s mjerenim podacima prikupljenima na sustavu u radu. Kao ulazni podatak uneseno je satno opterećenje sustava. Mjereni rezultati prikupljeni s vremenskim korakom od 1 minute u režimu grijanja svedeni su na satno opterećenje tako da su za svaki sat osrednjeni toplinski učini predani potrošaču na strani kondenzatora. Prilikom sumiranja učina za svaki sat filtrirani su podaci prikupljeni pri pokretanju ili isključivanju kompresora, kako bi se izbjegao utjecaj nestacionarnih procesa u sustavu i dizalici topline na bilancu isporučene topline.



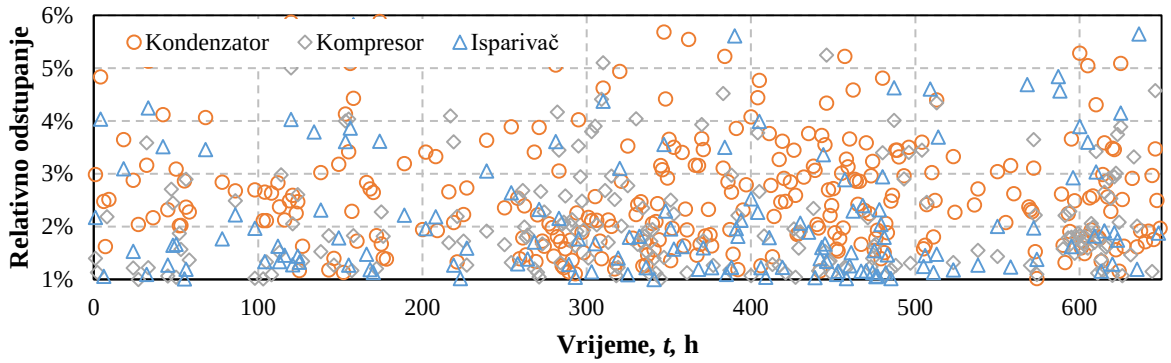
Slika 7-6 Usporedba mjerenih učina komponenti i onih dobivenih simuliranjem rada sustava



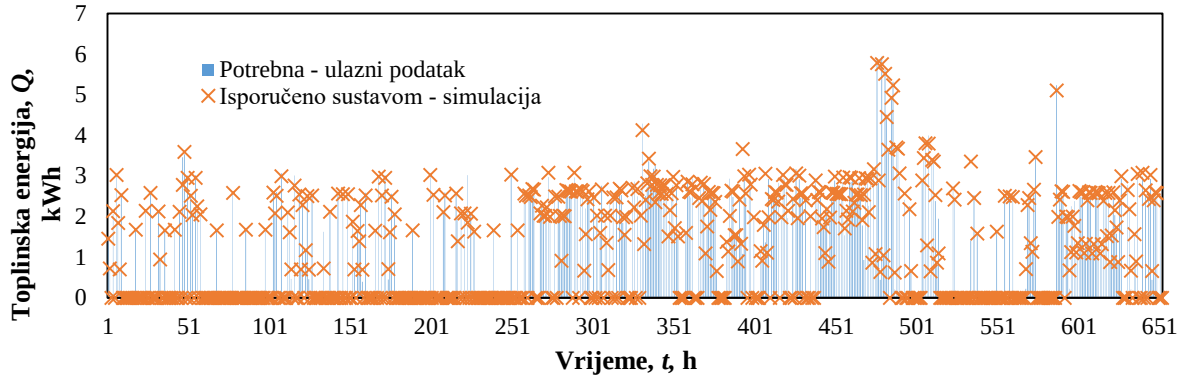
Slika 7-7 Usporedba temperatura isparavanja i temperaturnog režima na strani bušotinskog izmjenjivača topline (lijevo su mjereni, desno simulirani rezultati)

Usporedba dobivenih rezultata s mjerenim (Slika 7-6 i Slika 7-7) pokazuje da model dobro simulira promjene karakterističnih veličina, ali postoje odstupanja u konačnom iznosu. Na dijagramima je vidljivo da su učini dobiveni modelom većeg apsolutnog iznosa. Najveće

odstupanje zabilježeno je kod učina kondenzatora, do 6 %. Manje odstupanje postignuto je za učin isparivača (Slika 7-8). Manja dinamika temperature kondenzacije rezultat je uvedenog pojednostavljenja u obliku poznate i konstantne temperature povrata medija od strane potrošača. Simulirani temperaturni režim na isparivaču niži je od izmjerenog te se temperatura isparavanja razlikuje od izmjerene za oko 1,5 °C. Više je razloga koji utječu na nemogućnost potpunog repliciranja mjerenih rezultata, a jedan od njih je i način na koji su minutna očitanja prevedena u satno opterećenje. Nadalje, dizalica topline u stvarnom radu se u jednom satu više puta uključuje i isključuje ovisno o dinamici potrošača, dok je u modelu, zbog uštede računalnih resursa, pretpostavljeno da dizalica topline radi neprestano, dok ne preda potrošaču potrebnu toplinsku energiju. Slika 7-9 prikazuje toplinsko opterećenje kao ulazni podatak i markerima označenu predanu energiju u svakom satu simulacije te je vidljivo da rezultati modela odgovaraju, većim dijelom, ulaznim podacima, ali i da u pojedinim satima postoji primjetno odstupanje. Dodatno, mjerenja su podložna brojnim utjecajima koje je nemoguće opisati, od činjenice da se temperature mjere na ulazu u dizalicu topline, dok je model opisan temperaturama glikolne smjese na ulazu i izlazu iz tla, pa do toplinskog kapaciteta medija i materijala u sustavu razvoda unutar i izvan kondicioniranog prostora koji nisu obuhvaćeni modelom.

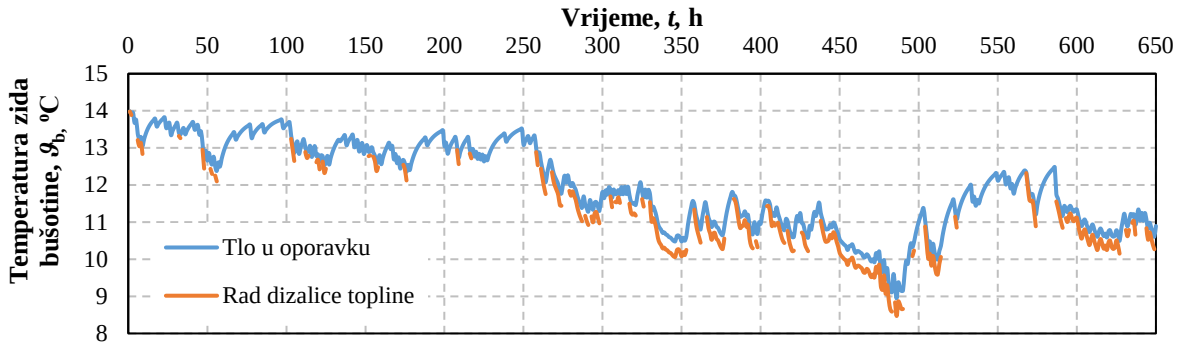


Slika 7-8 Relativno odstupanje modeliranih učina od mjerenih



Slika 7-9 Usporedba potrebne i isporučene energije potrošaču

Rezultat modeliranja temperaturnog polja tla prikazuje dinamiku temperature na zidu bušotine pod utjecajem rada sustava i oporavka tla (Slika 7-10). Vidljivo je kako dulji periodi mirovanja utječu na oporavak temperature tla u blizini bušotine te samim time i povoljnije uvjete rada u sljedećem vremenskom trenutku.

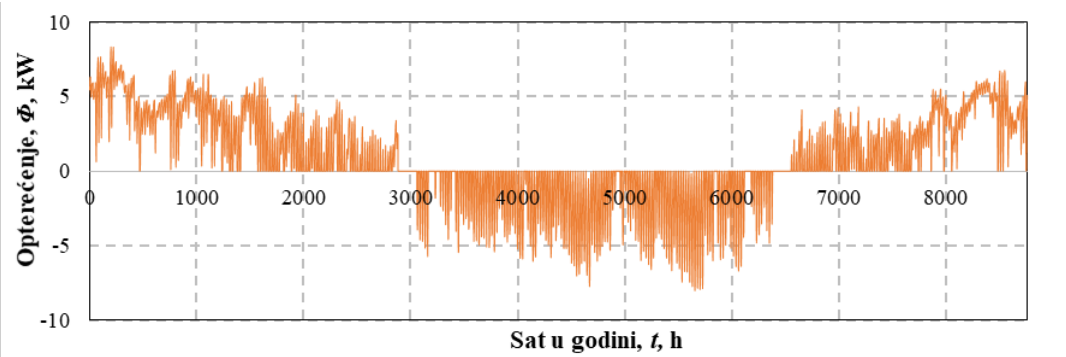


Slika 7-10 Modelirane temperature na zidu bušotine u vremenu rada sustava i vremenu oporavka tla

Model kvalitativno dobro opisuje dinamičke promjene u tlu zbog rada sustava te je stoga primjenjiv za analizu utjecaja razdiobe topinskih svojstava na učinkovitost sustava, polazeći od činjenice da su preostali ulazni podaci jednaki.

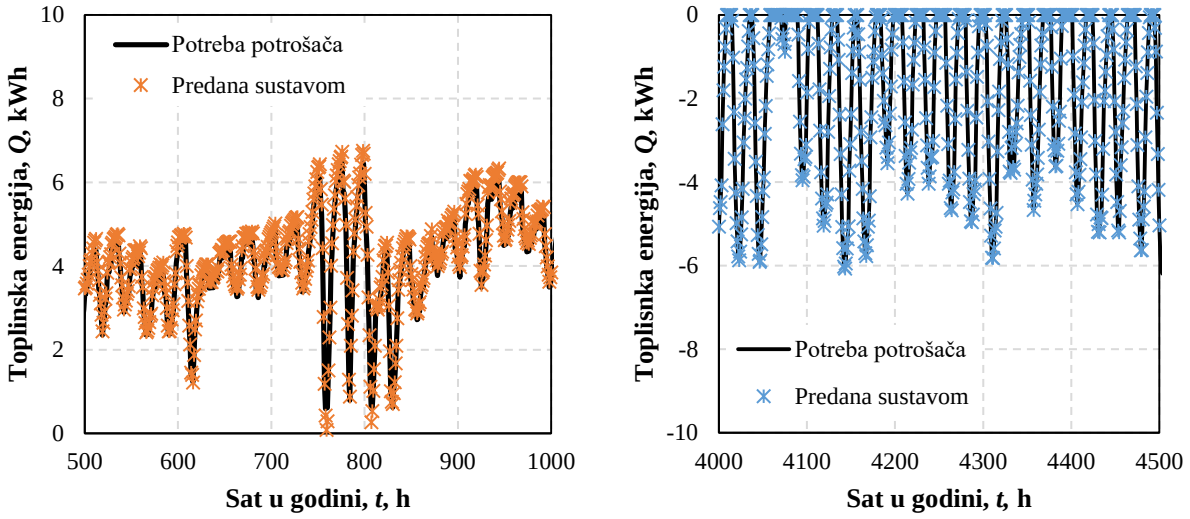
7.4. Analiza utjecaja slojeva tla na rad sustava dizalice topline

Za potrebe sezonske simulacije rada sustava odabrana je dubina BIT-a od 100 m kako bi se smanjenjem domene skratilo vrijeme računanja. U skladu s tim i satno opterećenje učionica je proporcionalno smanjeno (Slika 7-11). Kako sustav može raditi samo u režimu grijanja i samo u režimu hlađenja, prije prekretanja procesa predviđeno je mirovanje od 7 dana oko 3000. sata i oko 6500. sata u godini. Kao medij koji cirkulira kroz BIT odabrana je glikolna smjesa s 27 % udjela etilen glikola. Domena je podijeljena u 100 vertikalnih i 10 radijalnih pri čemu je radijus domene 10 m. Karakteristike izmjenjivača topline jednake su onom korištenom na lokaciji Fakulteta. Povratne temperature od strane potrošača su 38 °C u sezoni grijanja i 12 °C u sezoni hlađenja. Izmjereni profil toplinski neporemećenog tla je inicijaliziran po domeni kao početni uvjet, a na rubovima domene kao rubni uvjet.



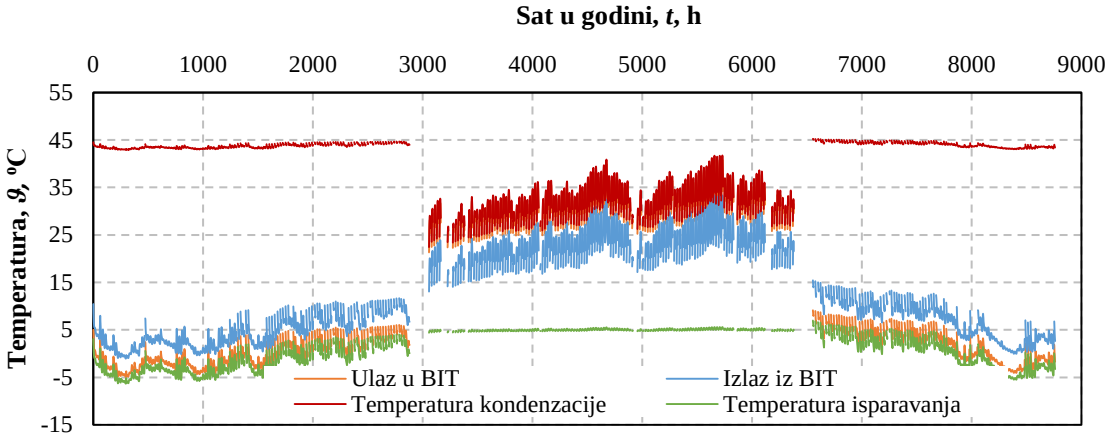
Slika 7-11 Korigirano satno opterećenje prostora

Slika 7-12 prikazuje iste veličine kao i Slika 7-9 pri čemu je u ovom slučaju postignuto bolje poklapanje predane i potrebne energije na strani potrošača, što potvrđuje tezu da repliciranje mjerenja na izvedenom sustavu sadrži veliki broj parametara koje nije moguće obuhvatiti modelom.

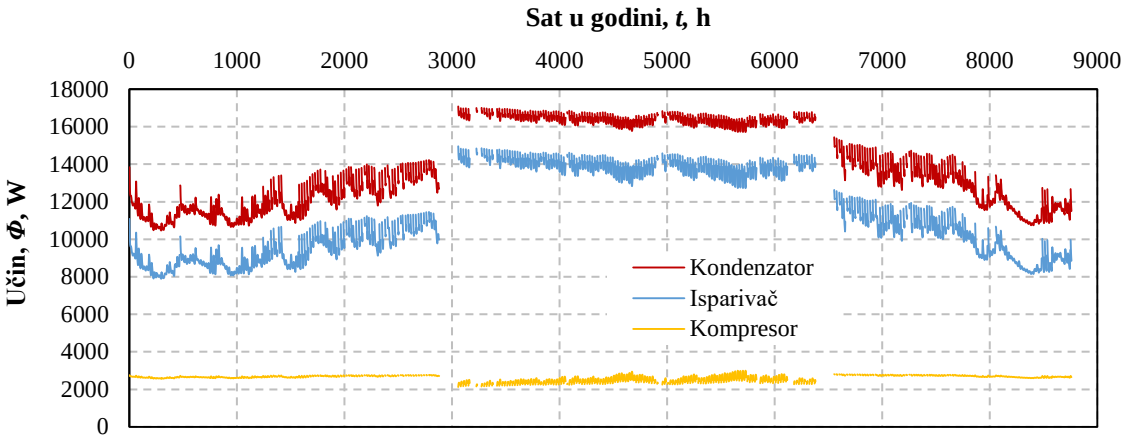


Slika 7-12 Usporedba potrebne i isporučene toplinske energije za dio sezone grijanja (lijevo) i dio sezone hlađenja (desno)

Za navedeni slučaj (profil tla B) prikazane su temperature na ulazu i izlazu iz izmjenjivača u tlu te temperature isparavanja i kondenzacije (Slika 7-13). Temperaturni režim na strani potrošača nije prikazan jer je on u model unesen kao ulazni podatak. Očita je manja razlika temperature isparavanja i kondenzacije u ljetnom režimu rada, što rezultira većim učinom dizalice topline, ali i učinkovitijim radom (Slika 7-14).

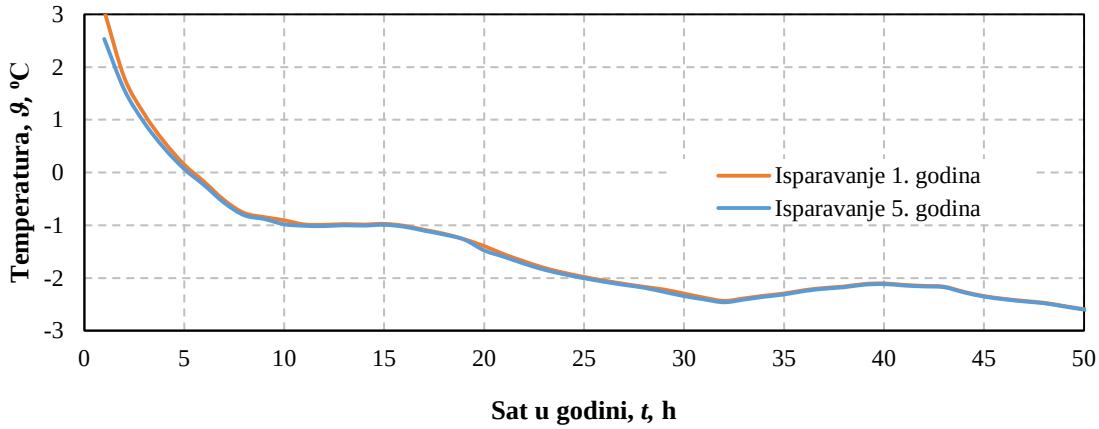


Slika 7-13 Karakteristične temperature za profil tla B



Slika 7-14 Modelirani učini komponenti dizalice topline za profil tla B

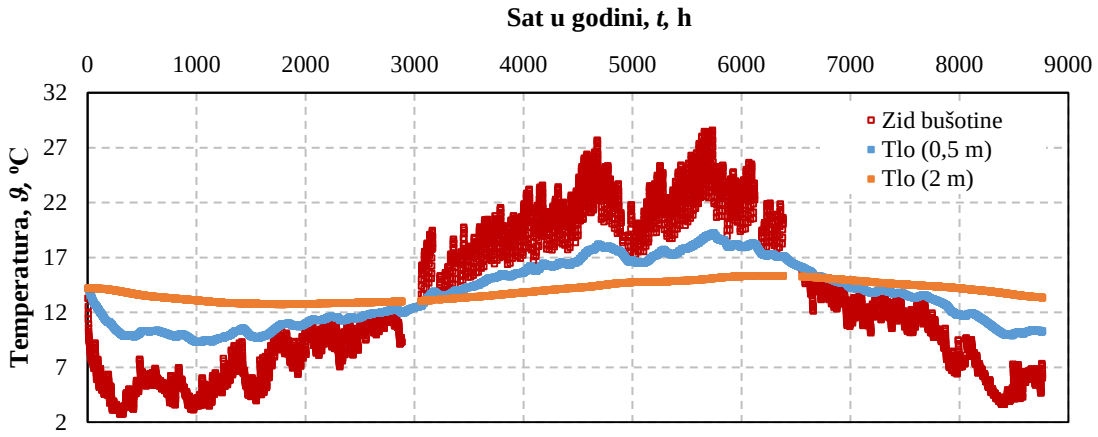
Tijekom rada sustava u sezoni grijanja dizalica topline ukupno je radila 1127 sati te je iz tla uzeto 10166 kWh toplinske energije, a u ljetnom režimu rada tlu je predano 6920 kWh za ukupno 426 sati rada. Iako prijenos topline s tlom nije uravnotežen, dugoročno ne dolazi do značajnog zagrijavanja ili pothlađenja tla. Usporedba temperaturnog polja na kraju godine za 5 godina rada sustava pokazala je da su odstupanja temperaturnih profila uz bušotinu manja od 0,01 °C. Navedena činjenica u skladu je s rezultatima dimenzioniranja bušotine koristeći programski paket *EED*, prema kojem je za korišteno opterećenje potrebna dubina BIT od 103 m za profil tla B. Jedina razlika se manifestira u temperaturnom polju u prvim satima simulacije, ali već nakon 10-ak sati nema razlike između parametara rada sustava za 1. i 5. godinu (Slika 7-15).



Slika 7-15 Usporedba temperature isparavanja za 1. i 5. godinu simulacije

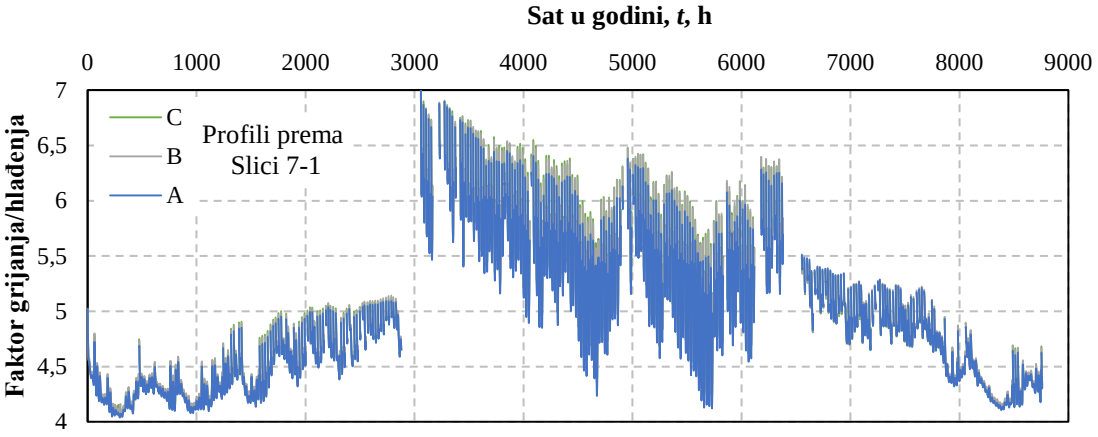
Analizirani profili na različitim udaljenostima od bušotine pokazuju koliki dio domene je zahvaćen toplinskim poremećajima unesenima u tlo tijekom rada sustava. Tlo uz samu stjenku bušotine podložno je promjenama na satnoj razini, a udaljavanjem do radijusa 2 m intenzitet promjene temperature se smanjuje i za promatranu udaljenost temperatura se kroz godinu kreće

u rasponu od 12,5 do 15,5 °C. Dodatnim udaljavanjem utjecaj bušotine na okolno tlo iščezava.



Slika 7-16 Temperaturni odziv tla na različitim udaljenostima od izmjenjivača topline

Usporedba faktora grijanja za različite profile tla primjetno je da heterogenost tla ne utječe na izgled samih krivulja (Slika 7-17).



Slika 7-17 Faktori grijanja i hlađenja za profile tla A, B i C

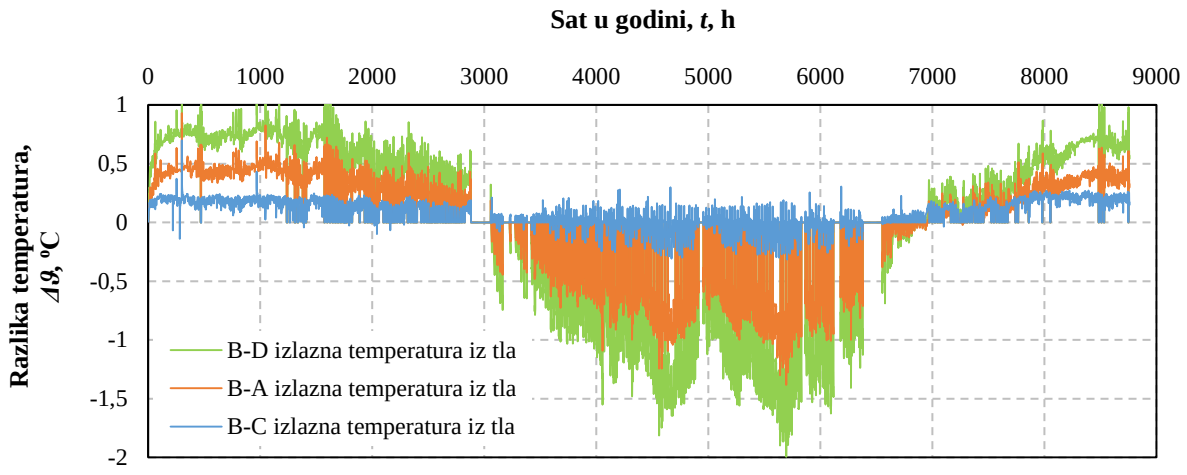
Tablica 7-3 daje vrijednosti faktora grijanja i hlađenja pojedinačno te kumulativno za cijelu godinu određene na temelju sezonske simulacije. Najveću sezonsku učinkovitost ima profil tla B s homogenom razdiobom. Temperaturni profili A i D su sličnog karaktera, svojstva su u dubljim slojevima bolja pri čemu profil D ima nelinearniju razdiobu svojstava. Odstupanje od homogenog tla, odnosno profila B, korelirano je s dobivenim vrijednostima faktora grijanja i hlađenja koji su za oba profila niži u odnosu na homogeno tlo. Učinkovitost sustava za profil C po vrijednostima najsličnija je homogenom tlu. Povećanjem razlike u toplinskim svojstvima gornjih i donjih slojeva tla za slučaj porasta toplinske provodnosti s dubinom (profil D) dolazi do većeg odstupanja u faktorima grijanja u odnosu na homogeno tlo. Iako razlike u dobivenim faktorima grijanja i hlađenja postoje, njihov relativni omjer ukazuje na zaključak da različita razdioba toplinskih svojstava nema značajan utjecaj na sezonsku učinkovitost sustava, uz

pretpostavku da je bušotinski izmjenjivač topline dobro dimenzioniran.

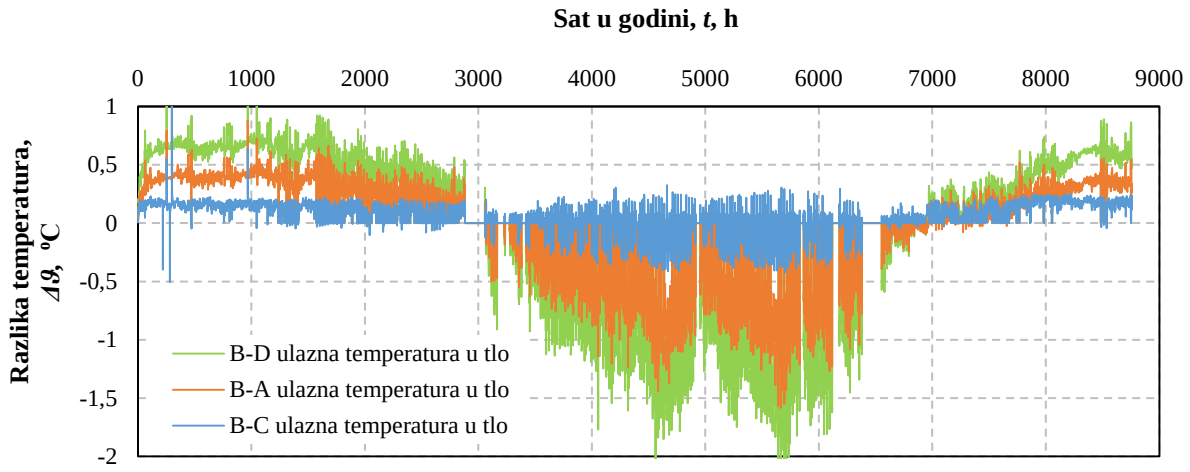
Tablica 7-3 Faktori grijanja i hlađenja na razini godine za različite profile tla za temperaturni profil tla na lokaciji bušotine u Zagrebu

	A	B	C	D	E
ε_{gr}	4,52	4,55	4,54	4,51	4,52
ε_{hl}	5,39	5,49	5,49	5,34	5,45
ε_{ukupni}	4,81	4,86	4,85	4,78	4,83

Najveća relativna razlika ukupnog faktora grijanja, u odnosu na homogeno tlo, zabilježena je za profil D u sezoni hlađenja iznosa 3 % te 2 % u sezoni grijanja. Različita svojstva po dubini utječu na izlazne, ali i ulazne temperature u izmjenjiva. Razlog tome je toplinska interakcija silazne i uzlazne cijevi te povezanost temperatura preko učina isparivača/kondenzatora dizalice topline. Slika 7-18 i Slika 7-19 pokazuju odstupanja ulaznih i izlaznih temperatura za profile tla A, C i D u odnosu na B te je vidljiva povezanost odstupanja s oblikom heterogenosti tla. Ta pojava u skladu je s rezultatima prikazanima u radu Floridesa et al. gdje je analiziran toplinski odziv heterogenog tla na TRT u trajanju od 14 sati [121]. S obzirom na to da dizalica topline radi intermitentno, promjena u izlaznim temperaturama iz BIT-a ne uzrokuje značajne promjene faktora grijanja i hlađenja.



Slika 7-18 Razlika izlaznih temperatura glikolne smjese za profile A, C i D u odnosu na profil B



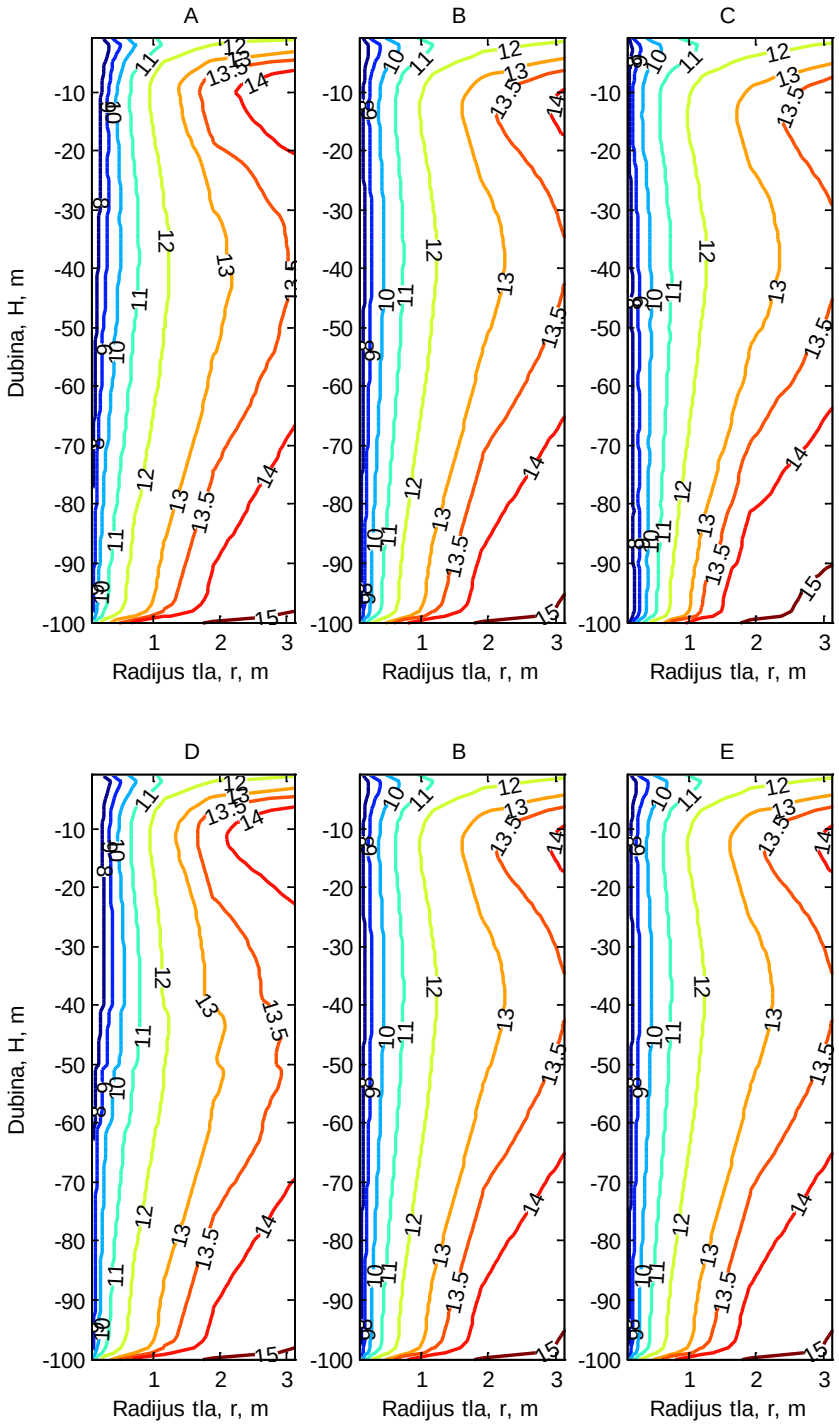
Slika 7-19 Razlika ulaznih temperatura glikolne smjese za profile A, C i D u odnosu na profil B

Slika 7-20 prikazuje izoterme u blizini zida bušotine tijekom rada sustava u zadnjem satu u godini. Vidljivo je pomicanje izotermi najnižih vrijednosti prema slojevima tla s većom toplinskom provodnosti te se kvalitativno može uočiti sličnost temperaturnih polja za slučaj B i C što je u skladu s izračunatim faktorima grijanja i hlađenja.

Kako bi se ispitao utjecaj profila temperature toplinski neporemećenog tla, ista simulacija je napravljena za jednoliko raspodijeljenu temperaturu tla od 14,1 °C što odgovara definiciji početnih uvjeta u citiranim istraživanjima s analizom utjecaja heterogenog tla [121,122]. Navedena temperatura je osrednjena vrijednost stvarnog profila do dubine 100 metara te uključuje utjecaj geotermalnog temperaturnog gradijenta i negativnog temperaturnog gradijenta pri površini.

Slika 7-21 prikazuje izoterme za slučaj uniformne temperature tla od 14,1 °C. Utjecaj heterogenosti tla na temperaturne profile izraženiji je kada nema geotermalnih temperaturnih gradijenata, ali je već pokazano da pri intermitentnom radu dizalice topline navedene razdiobe slojeva tla imaju zanemariv utjecaj na učinkovitost dizalice topline.

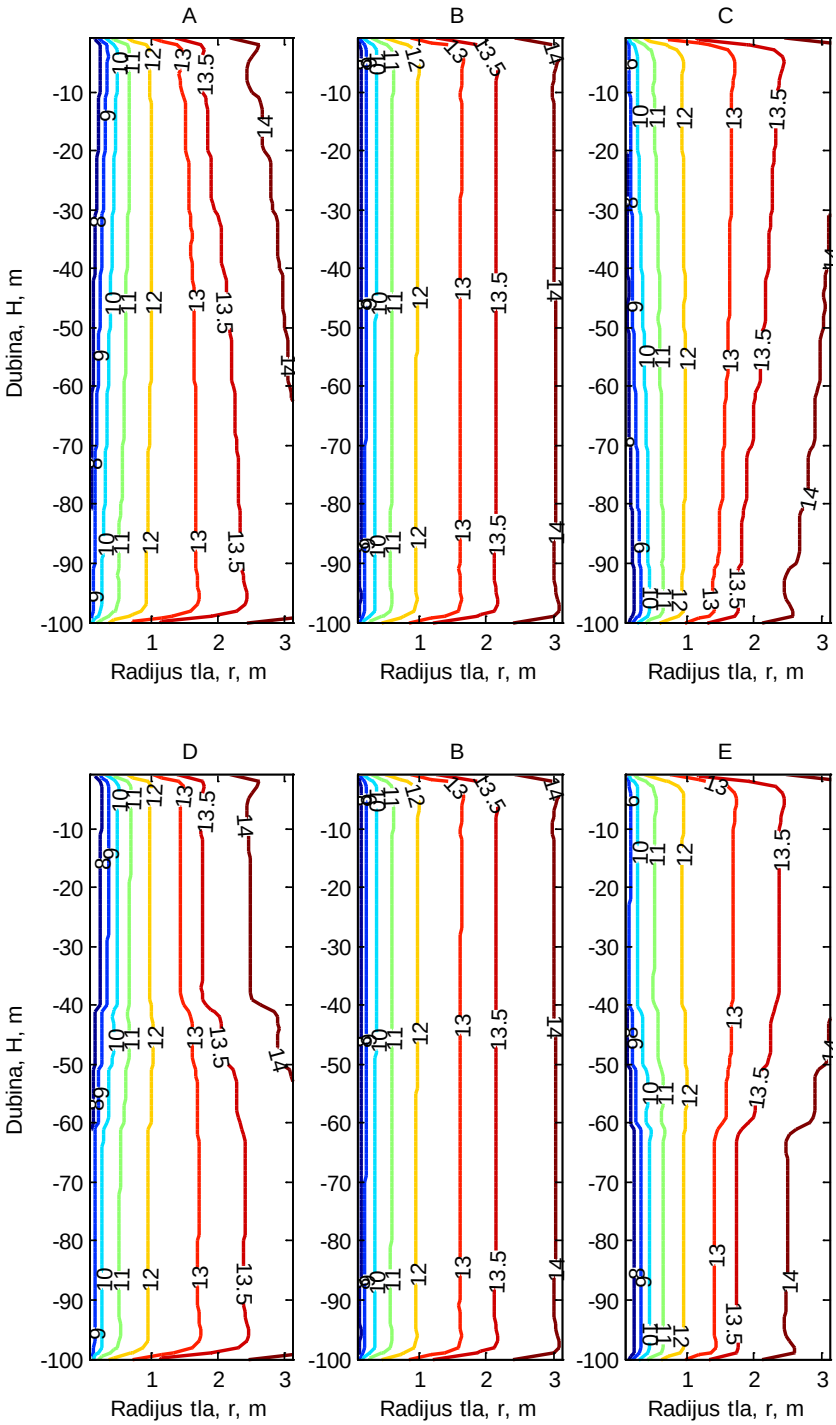
Dobiveni su jednaki rezultati za ε_{ukupni}, dok su za sve profile tla faktori grijanja veći, a faktori hlađenja manji (Tablica 7-4). Navedeno ukazuje na postojanje utjecaja razdiobe temperature u tlu, ali zanemarivog apsolutnog i relativnog iznosa. Utjecaj samo negativnog temperaturnog gradijenta u gornjem dijelu bušotine, koji je karakterističan za urbane sredine, na primjeru homogenog profila tla B pokazao je da lokalno povećanje temperature povećava faktor grijanja sa 4,51 na 4,55 te smanjuje faktor hlađenja s 5,57 na 5,49. Negativni gradijent efektivno povećava lokalnu temperaturu tla te se za pliće bušotine očekuje njegov veći utjecaj.



Slika 7-20 Izoterme tla za 8760. sat u godini tijekom rada dizalice topline (stvarni profil temperature toplinski neporemećenog tla)

Tablica 7-4 Faktori grijanja i hlađenja na razini godine za različite profile svojstava tla i temperaturu tla bez geotermalnog temperaturnog gradijenata

	A	**B**	**C**	**D**	**E**
ε_{gr}	4,53	4,56	4,56	4,51	4,54
ε_{hl}	5,38	5,47	5,46	5,33	5,44
ε_{ukupni}	4,81	4,86	4,85	4,78	4,83



Slika 7-21 Izoterme tla za 8760. sat u godini tijekom rada dizalice topline (uniformna temperatura toplinski neporemećenog tla od 14,1 °C)

8. ZAKLJUČAK

Pregled dostupnih istraživanja omogućuje usporedbu različitih čimbenika koji utječu na rad dizalice topline povezane s tlom, ali i na određivanje efektivnih toplinskih svojstava tla. Jedan od njih je heterogenost tla koja ima bitan utjecaj na razdiobu toplinskog toka po dubini bušotine te na temperaturni režim fluida koji izmjenjuje toplinu s tlom. Ipak, dugoročni utjecaj heterogenog tla, u odnosu na idealizirano homogeno tlo, na rad sustava u literaturi nije istražen te je kao cilj ovog rada definiran eksperimentalno istraživanje sustava geotermalne dizalice topline sa svrhom razvoja modela interakcije izmjenjivača u tlu i sustava dizalice topline.
Eksperimentalni dio istraživanja obuhvaća izvedenu bušotinu dubine 130 metara opremljenu kabelima s optičkim vlaknima za distribuirano mjerenje temperature. Korištenjem takvog osjetnika temperature izmjereni su temperaturni profili toplinski neporemećenog tla te vremenski promjenjivi profili zbog unošenja toplinskog poremećaja u obliku konstantnog toplinskog toka. Temperaturni profili fluida unutar bušotine iskazani su po dubini i u vremenu te su temelj određivanja vertikalne razdiobe toplinskih svojstava tla. Izmjenjivač u tlu povezan je s dizalicom topline koja se koristi za grijanje i hlađenje dviju učionica i čiji se parametri rada prate. Prikupljeni podaci omogućuju opisivanje rada dizalice topline u realnim uvjetima.

Temperaturni profil toplinski neporemećenog tla određen je kao srednja temperatura u periodu mjerenjea od 17. do 43. sata, a koji je identificiran kao najdulji period s minimalnom varijacijom temperature u vremenu po slojevima tla. Unutar tog perioda srednja razlika maksimalnih i minimalnih temperatura po slojevima iznosi 0,12 °C. Tijekom cjelokupnog mjerenja od 120 sati srednja razlika maksimalnih i minimalnih temperatura po sloju iznosila je 0,23 °C. Lokalni minimum temperature u iznosu 13,52 °C zabilježen je oko 42. metra ispod površine i navedena dubina je granica ispod koje iščezavaju toplinski utjecaji s površine tla. Povećanjem dubine profil temperature linearno raste u skladu s geotermalnim temperaturnim gradijentom. Uzimajući očitanja temperature na dubini od 70 do 120 metara određen je iznos temperaturnog gradijenta od 0,037 °C/m. Očitanje temperature za dubinu od 100 m razlikuje se za 0,04 °C u odnosu na mjerenja temperature tla termoparovima na postojećoj bušotini na lokaciji Fakulteta. Poznavajući geotermalni temperaturni gradijent moguće je koristeći srednju godišnju temperaturu zraka ekstrapolirati profil temperature tla čime je ostvareno bolje poklapanje s izmjerenim profilom nego razvojem temperature analitičkim modelom prema Kasudi.
Temperaturni profil toplinski neporemećenog tla karakteriziran je odstupanjem od geotermalnog temperaturnog gradijenta u višim slojevima tla što je rezultat dugogodišnje

interakcije zgrade Fakulteta i okolišnjeg tla. Temperaturno polje u tlu u blizini zgrade Fakulteta simulirano je za razdoblje postojanja Fakulteta te je uz pretpostavljenu gustoću toplinskog toka od 2,35 W m^{-2} profil tla repliciran za period simulacije između 40. i 50. godine. Razvijenim modelom analiziran je utjecaj zgrade na lokalni porast temperature te je uočeno da se toplinski poremećaj ne širi u prostoru na značajne udaljenosti, ali u slučaju interferencije dvaju dijelova zgrade lokalni prirast temperature iznosi i do 3 °C. Prirast temperature povoljan je za iskorištavanje toplinske energije, ali i predstavlja nesigurnost kod dimenzioniranja sustava ako se koriste očitanja prikupljena u blizini postojeće građevine.

Ispitivanje toplinskog odziva tla sastojalo se od dvije faze, 120 sati zagrijavanja tla te promatranja oporavka tla u trajanju od 336 sati. Obe faze su značajno dulje nego kod komercijalnog ispitivanja odziva tla, a segmenti za obradu podataka odabrani su na temelju usporedbe koeficijenata determinacije mjerenih podataka za različite intervale obrađenih podataka.. Vertikalna razdioba toplinske provodnosti i toplinskog otpora tla određena je na temelju faze grijanja i faze oporavka. Uočeno je da produljenje faze oporavka rezultira s višim efektivnim vrijednostima toplinske provodnosti i toplinskog otpora. Uspoređujući rezultate iz različitih faza DTRT-a, efektivna svojstva (toplinska provodnost 1,71 W m^{-1} K^{-1} i toplinski otpor 0,079 m K W^{-1}) određena u ranijoj fazi oporavaka najbolje repliciraju krivulju temperature za cjelokupno mjerenje, a u odnosu na fazu grijanja određena provodnost veća je za 5 %, a otpor za 13 %. Usporedba različitih metoda osrednjavanja temperature fluida pokazala je da aritmetička sredina ulaza i izlaza rezultira s višim efektivnim svojstvima od stvarnog profila, ali bez distribuiranog mjerenja temperature. Stvarni profil temperature nije moguće točno odrediti. Aproksimacija profila temperature *p*-linearnom metodom zahtjeva poznavanje još barem jedne temperature izuzev ulaza i izlaza iz BIT-a, ali svojstva dobivena za parametar *p* promjenjiv su u vremenu unutar 1 % od onih dobivenih sa stvarnim temperaturnim profilom.
Iz analize unutarnjeg i lokalnog toplinskog otpora izmjenjivača topline s dvostrukom U cijevi pokazano je da manja toplinska provodnost okolišnjeg tla rezultira s većim vrijednostima unutarnjeg toplinskog otpora, dok nema primjetan utjecaj na lokalni i efektivni toplinski otpor bušotine. Veća toplinska provodnost ispune smanjuje i unutarnji toplinski otpor i lokalni toplinski otpor, dok veći razmak cijevi unutar BIT-a povećava unutarnji toplinski otpor i smanjuje lokalni toplinski otpor. Modeliranjem segmenta bušotine proširene su spoznaje o otporu za različite nesimetrične položaje cijevi unutar bušotine. Ovisno o svojstvima ispune i položaju cijevi unutar presjeka bušotine relativna razlika otpora može biti i do 15 %.

Teorijsko istraživanje obuhvaća razvoj modela izmjenjivača topline u tlu. Tlo i bušotina opisani su otporničko-kapacitivnim modelom, a model dizalice topline rekonstruiran je na temelju mjerenja sustava u radu. Model bušotine i tla uspoređen je s numeričkim i analitičkim rješenjima za kratkoročni i dugoročni odziv tla te je uspješno replicirao izlaznu temperaturu glikolne smjese iz bušotine za vrijeme DTRT-a. Time je pokazano da je model primjenjiv za sezonsku simulaciju rada sustava te ispitivanje hipoteze rada. Osim repliciranja osnovnih parametara rada dizalice topline, model omogućuje proširivanje istraživanja na okolišnje tlo te praćenje temperaturnih promjena zbog unesenih toplinskih poremećaja. Model je upotrijebljen za analizu utjecaja heterogenosti tla na učinkovitost sustava. Pokazano je da osim redoslijeda slojeva tla, utjecaj na učinkovitost ima i temperaturni profil tla. Različiti profili tla imaju utjecaj na učinkovitost sustava, ali ne u mjeri u kojoj bi se optimiranjem polja bušotina postigle osjetne razlike na sezonskoj učinkovitosti, izuzetak mogu biti ekstremne razlike u svojstvima koje nisu razmatrane u okviru ovog rada. Ovime su i potvrđene osnovne hipoteze te je stvoren temelj za daljnje istraživanje pojava koje nisu usko vezane uz temu ovog rada.

Prijedlog budućih istraživanja:

- prilikom modeliranja sustava uvedena je pretpostavka o konstantnoj temperaturi povrata iz kruga potrošača. Nadalje, pretpostavljeno je da je temperatura izlaza iz bušotine jednaka temperaturi ulaza u dizalicu topline. Budućim istraživanjem moguće je proširenje modela s razvodom sustava na strani potrošača, kako bi se modelirali promjenjivi uvjeti na strani potrošača te razvoda prema tlu, u svrhu određivanja toplinskih gubitaka/dobitaka cijevnog razvoda s ciljem realnijeg prikaza rada sustava. Razvoj modela može obuhvatiti i uvođenje promjenjivog vremenskog koraka simulacije koji bi omogućio ciklički rad dizalice topline unutar jednog sata,
- lokalni prirast temperature tla zbog antropogenih izvora na površini karakterističan je za urbane sredine u kojima postoji ograničen prostor za ugradnju izmjenjivača topline. Detaljna analiza toplinskih tokova u urbanim sredinama i razvoj modela za plitke bušotine ili toplinski aktivirane pilote omogućili bi razvoj alata za lakše i točnije planiranje primjene sustava za iskorištavanje plitke geotermalne energije.

POPIS LITERATURE

[1] IEA. Transition to Sustainable Buildings - Strategies and opportunities to 2050. Paris: International Energy Agency; 2013.

[2] Direktiva 2009/28/EZ o poticanju uporabe energije iz obnovljivih izvora energije.

[3] Self SJ, Reddy B V., Rosen M. Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. Appl. Energy. Elsevier Ltd; 2013;101:341–348.

[4] Bayer P, Saner D, Bolay S, Rybach L, Blum P. Greenhouse gas emission savings of ground source heat pump systems in Europe: A review. Renew. Sustain. Energy Rev. Elsevier Ltd; 2012;16:1256–1267.

[5] Carvalho AD, Mendrinos D, De Almeida AT. Ground source heat pump carbon emissions and primary energy reduction potential for heating in buildings in Europe—results of a case study in Portugal. Renew. Sustain. Energy Rev. Elsevier; 2015;45:755–768.

[6] Lund JW, Boyd TL. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. Geothermics. 2016;60:66–93.

[7] Turcotte D, Schubert J. Geodynamics. 2nd ed. New York: Cambridge University Press; 2002.

[8] Boehler R. Melting temperature of the Earth's mante and core: Earth's Thermal Structure. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 1996;24:15–40.

[9] Henry N. Pollack, Hurter SJ, Johnson JR. Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set. Rev. Geophys. 1993;31:267–280.

[10] Muffler P, Cataldi R. Methods for regional assessment of geothermal resources. Geothermics. 1978;7:53–89.

[11] VDI-4640 Thermal use of the underground: Fundamentals, approvals, environmental aspects. Dusseldorf, Germany: VDI; 2000.

[12] VDI-4640 Thermal use of the underground: Ground source heat pump systems. Dusseldorf, Germany: VDI; 2001.

[13] VDI-4640 Utilization of the subsurface for thermal purposes: Undergound thermal energy storage. Dusseldorf, Germany: VDI; 2001.

[14] VDI-4640 Thermal use of the underground: Direct uses. Dusseldorf, Germany: VDI; 2004.

[15] Soni SK, Pandey M, Bartaria VN. Ground coupled heat exchangers: A review and applications. Renew. Sustain. Energy Rev. Elsevier; 2015;47:83–92.

[16] Florides G, Kalogirou S. Ground heat exchangers-A review of systems, models and applications. Renew. Energy. 2007;32:2461–2478.

[17] Rees SJ. An introduction to ground-source heat pump technology. Adv. Ground-Source Heat Pump Syst. Elsevier; 2016. p. 1–25.

[18] Kleefkens O, Riviere P, Nowak T, Zottl A, Lehmann A, Polyzou O, et al. EU-project SEPEMO-Build: Final report. 2012;

[19] Odluka 2013/114/EZ Europskog parlamenta i Vijeća o utvrđivanju smjernica za države članice o izračunu obnovljive energije iz toplinskih crpki za različite tehnologije toplinskih crpki. 2008;192–195.

[20] Ministarstvo graditeljstva i prostornog uređenja. Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama. 2015.

[21] Kusuda T, R. Achenbach P. Earth Temperature and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States. ASHRAE Trans. 1965;71:233.

[22] Badache M, Eslami-Nejad P, Ouzzane M, Aidoun Z, Lamarche L. A new modeling approach for improved ground temperature profile determination. Renew. Energy. Elsevier Ltd; 2016;85:436–444.

[23] Banks D. An Introduction to Thermolgeology: Ground source heating and cooling. Oxford: Blackwell Publishing; 2008.

[24] Hillel D. Introduction to Environmental Soil Physics. Oxford: Elsevier Academic Press; 2004.

[25] Choi JC, Park J, Lee SR. Numerical evaluation of the effects of groundwater flow on borehole heat exchanger arrays. Renew. Energy. Elsevier Ltd; 2013;52:230–240.

[26] Dehkordi SE, Olofsson B, Schincariol R. Effect of groundwater flow in vertical and horizontal fractures on borehole heat exchanger temperatures. Bull. Eng. Geol. Environ. 2015;74:479–491.

[27] Hellstrom G, Sanner B. Earth Energy Designer: Software for Dimensioning of Deep Boreholes for Heat Exctraction. Department of Mathematical Physics, Lund University; 1994.

[28] Spitler J. GLHEPRO-a design tool for commercial building ground loop heat exchangers. Fourth Int. Heat Pumps Cold Clim. Conf. Aylmer; 2000.

[29] Eskilson P. Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes, , PhD thesis. Universtiy of Lund; 1987.

[30] ASHRAE. ASHRAE Handbook-HVAC Applications. ASHRAE Handbook-HVAC Appl. Atlanta; 2011.

[31] Fossa M, Rolando D. Improving the Ashrae method for vertical geothermal borefield design. Energy Build. Elsevier B.V.; 2015;93:315–323.

[32] Capozza A, De Carli M, Zarrella A. Design of borehole heat exchangers for ground-source heat pumps: A literature review, methodology comparison and analysis on the penalty temperature. Energy Build. Elsevier B.V.; 2012;55:369–379.

[33] Desmedt J. Experimental performance of borehole heat exchangers and grouting materials for ground source heat pumps. Int. J. energy Res. 2007;31:135–147.

[34] Zhang W, Yang H, Lu L, Fang Z. Investigation on influential factors of engineering design of geothermal heat exchangers. Appl. Therm. Eng. 2015;84:310–319.

[35] Luo J, Rohn J, Bayer M, Priess A. Thermal efficiency comparison of borehole heat exchangers with different drillhole diameters. Energies. 2013;6:4187–4206.

[36] Delaleux F, Py X, Olives R, Dominguez A. Enhancement of geothermal borehole heat exchangers performances by improvement of bentonite grouts conductivity. Appl. Therm. Eng. Elsevier Ltd; 2012;33–34:92–99.

[37] Borinaga-Treviño R, Pascual-Muñoz P, Castro-Fresno D, Blanco-Fernandez E. Borehole thermal response and thermal resistance of four different grouting materials measured with a TRT. Appl. Therm. Eng. Elsevier Ltd; 2013;53:13–20.

[38] Li Y, Mao J, Geng S, Han X, Zhang H. Evaluation of thermal short-circuiting and influence on thermal response test for borehole heat exchanger. Geothermics. 2014;50:136–147.

[39] Li XY, Li TY, Qu DQ, Yu JW. A new solution for thermal interference of vertical U-tube ground heat exchanger for cold area in China. Geothermics. 2017;65:72–80.

[40] Dehkordi SE, Schincariol R a., Reitsma S. Thermal performance of a tight borehole heat exchanger. Renew. Energy. Elsevier Ltd; 2015;83:698–704.

[41] Sandler S, Zajaczkowski B, Bialko B, Malecha ZM. Evaluation of the impact of the thermal shunt effect on the U-pipe ground borehole heat exchanger performance. Geothermics. Elsevier Ltd; 2017;65:244–254.

[42] Jun L, Xu Z, Jun G, Jie Y. Evaluation of heat exchange rate of GHE in geothermal heat pump systems. Renew. Energy. Elsevier Ltd; 2009;34:2898–2904.

[43] Han C, Yu X (Bill). Sensitivity analysis of a vertical geothermal heat pump system. Appl. Energy. Elsevier Ltd; 2016;170:148–160.

[44] Pu L, Qi D, Li K, Tan H, Li Y. Simulation study on the thermal performance of vertical U-tube heat exchangers for ground source heat pump system. Appl. Therm. Eng. 2015;79:202–213.

[45] Casasso A, Sethi R. Efficiency of closed loop geothermal heat pumps: A sensitivity analysis. Renew. Energy. Elsevier Ltd; 2014;62:737–746.

[46] Dai LH, Shang Y, Li XL, Li SF. Analysis on the transient heat transfer process inside and outside the borehole for a vertical U-tube ground heat exchanger under short-term heat storage. Renew. Energy. 2016;87:1121–1129.

[47] Qian H, Wang Y. Modeling the interactions between the performance of ground source heat pumps and soil temperature variations. Energy Sustain. Dev. Elsevier Inc.; 2014;23:115–121.

[48] Cao X, Yuan Y, Sun L, Lei B, Yu N, Yang X. Restoration performance of vertical ground heat exchanger with various intermittent ratios. Geothermics. 2015;54:115–121.

[49] Atam E, Helsen L. Ground-coupled heat pumps: Part 1 - Literature review and research challenges in modeling and optimal control. Renew. Sustain. Energy Rev. Elsevier; 2016;54:1653–1667.

[50] Zarrella A, Pasquier P. Effect of axial heat transfer and atmospheric conditions on the energy performance of GSHP systems: A simulation-based analysis. Appl. Therm. Eng. Elsevier Ltd; 2015;78:591–604.

[51] Bidarmaghz, Narsilio G, Johnston IW, Colls S. The Importance of Surface Air Temperature Fluctuations on Long-term Performance of Vertical Ground Heat Exchangers. Geomech. Energy Environ. Elsevier Ltd; 2016;

[52] Hein P, Kolditz O, Görke UJ, Bucher A, Shao H. A numerical study on the sustainability and efficiency of borehole heat exchanger coupled ground source heat pump systems. Appl. Therm. Eng. Elsevier Ltd; 2016;100:421–433.

[53] Kurevija T, Vulin D, Krapec V. Influence of Undisturbed Ground Temperature and Geothermal Gradient on the Sizing of Borehole Heat Exchangers. World Renew. Energy Congr. 2011;1360–1367.

[54] Kurevija T. Energetsko vrednovanje plitkih geotermalnih potencijala Republike Hrvatske. Sveučilište u Zagrebu; 2010.

[55] Dehkordi SE, Schincariol R. Effect of thermal-hydrogeological and borehole heat exchanger properties on performance and impact of vertical closed-loop geothermal heat pump systems. Hydrogeol. J. 2014;22:189–203.

[56] Ozgener O, Hepbasli A. Modeling and performance evaluation of ground source (geothermal) heat pump systems. Energy Build. 2007;39:66–75.

[57] Ouzzane M, Eslami-Nejad P, Badache M, Aidoun Z. New correlations for the prediction of the undisturbed ground temperature. Geothermics. 2015;53:379–384.

[58] Gwadera M, Larwa B, Kupiec K. Undisturbed Ground Temperature—Different Methods of Determination. Sustainability. 2017;9:2055.

[59] Gehlin SEA, Nordell B. Determining undisturbed ground temperature for thermal response test. ASHRAE Trans. 2003;109:151–156.

[60] Florides G, Kalogirou S. First in situ determination of the thermal performance of a U-pipe borehole heat exchanger, in Cyprus. Appl. Therm. Eng. 2008;28:157–163.

[61] Austin WA, Yavuzturk C, Spitler JD. Development of an in-situ system for measuring ground thermal properties. ASHRAE Trans. 2000;106:365–379.

[62] Martos J, Montero Á, Torres J, Soret J, Martínez G, García-Olcina R. Novel wireless sensor system for dynamic characterization of borehole heat exchangers. Sensors. 2011;11:7082–7094.

[63] Fujii H, Okubo H, Itoi R. Thermal response tests using optical fiber thermometers. Trans. - Geotherm. Resour. Counc. 2006;30:545–551.

[64] Fujii H, Okubo H, Nishi K, Itoi R, Ohyama K, Shibata K. An improved thermal response test for U-tube ground heat exchanger based on optical fiber thermometers. Geothermics. 2009;38:399–406.

[65] Acuña J, Mogensen P, Palm B. Distributed thermal response test on a U-pipe borehole heat exchanger. EFSTOCK. Stockholm, Sweden; 2009.

[66] Soldo V, Boban L, Borović S. Vertical distribution of shallow ground thermal properties in different geological settings in Croatia. Renew. Energy. 2016;99.

[67] Vieira A, Alberdi-Pagola M, Christodoulides P, Javed S, Loveridge F, Nguyen F, et al. Characterisation of ground thermal and thermo-mechanical behaviour for shallow geothermal energy applications. Energies. 2017;10.

[68] Menberg K, Bayer P, Zosseder K, Rumohr S, Blum P. Subsurface urban heat islands in German cities. Sci. Total Environ. Elsevier B.V.; 2013;442:123–133.

[69] Ferguson G, Woodbury AD. Urban heat island in the subsurface. Geophys. Res. Lett. 2007;34:2–5.

[70] Rybach L, Bayer P, Rivera JA, Blum P. Influence factors in the depth domain of borehole heat exchangers – global warming and urban heating. Eur. Geotherm. Congr. 2016. Strasbourg; 2016. p. 2–5.

[71] Derežić D, Vučetić V. Tendencija povećanja srednje temperature tla u Hrvatskoj. Croat. Meteorol. J. 2011;85–96.

[72] Rivera J, Blum P, Bayer P. Increased ground temperatures in urban areas: Estimation of the technical geothermal potential. Renew. Energy. Elsevier B.V.; 2017;103:388–400.

[73] Yun TS, Santamarina JC. Fundamental study of thermal conduction in dry soils. Granul. Matter. 2008;10:197–207.

[74] Abu-Hamdeh NH, Khdair a. I, Reeder RC. A comparison of two methods used to evaluate thermal conductivity for some soils. Int. J. Heat Mass Transf. 2001;44:1073–1078.

[75] Luo J, Rohn J, Xiang W, Bertermann D, Blum P. A review of ground investigations for ground source heat pump (GSHP) systems. Energy Build. Elsevier B.V.; 2016;117:160–175.

[76] Soldo V, Borovic S, Leposa L, Boban L. Comparison of different methods for ground

thermal properties determination in a clastic sedimentary environment. Geothermics. 2016;61:1–11.

[77] Javed S, Spitler J. Accuracy of borehole thermal resistance calculation methods for grouted single U-tube ground heat exchangers. Appl. Energy. Elsevier Ltd; 2017;187:790–806.

[78] Lamarche L, Kajl S, Beauchamp B. A review of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heat-pump systems. Geothermics. 2010;39:187–200.

[79] Hellstrom G. Ground heat storage. Thermal analysis of duct storage systems, PhD thesis. University of Lund; 1991.

[80] Sharqawy MH, Mokheimer EM, Badr HM. Effective pipe-to-borehole thermal resistance for vertical ground heat exchangers. Geothermics. 2009;38:271–277.

[81] Liao Q, Zhou C, Cui W, Jen TC. New Correlations for Thermal Resistances of Vertical Single U-Tube Ground Heat Exchanger. J. Therm. Sci. Eng. Appl. 2012;4:31010.

[82] Sagia Z, Stegou A, Rakopoulos C. Borehole Resistance and Heat Conduction Around Vertical Ground Heat Exchangers. Open Chem. Eng. J. 2012;32–40.

[83] Claesson J, Hellström G. Multipole method to calculate borehole thermal resistances in a borehole heat exchanger. HVAC&R Res. 2011;17:895–911.

[84] Marcotte D, Pasquier P. On the estimation of thermal resistance in borehole thermal conductivity test. Renew. Energy. 2008;33:2407–2415.

[85] Beier R. Vertical temperature profile in ground heat exchanger during in-situ test. Renew. Energy. Elsevier Ltd; 2011;36:1578–1587.

[86] Beier R, Acuña J, Mogensen P, Palm B. Vertical temperature profiles and borehole resistance in a U-tube borehole heat exchanger. Geothermics. 2012;44:23–32.

[87] Zeng H, Diao N, Fang Z. Heat transfer analysis of boreholes in vertical ground heat exchangers. Int. J. Heat Mass Transf. 2003;46:4467–4481.

[88] Zhang L, Zhang Q, Huang G, Du Y. A p(t)-linear average method to estimate the thermal parameters of the borehole heat exchangers for in situ thermal response test. Appl. Energy. Elsevier Ltd; 2014;131:211–221.

[89] Beier R, Spitler JD. Weighted average of inlet and outlet temperatures in borehole heat exchangers. Appl. Energy. Elsevier Ltd; 2016;174:118–129.

[90] Zanchini E, Jahanbin A. Effects of the temperature distribution on the thermal resistance of double u-tube borehole heat exchangers. Geothermics. Elsevier; 2018;71:46–54.

[91] Spitler JD, Gehlin SE. Thermal response testing for ground source heat pump systems—An historical review. Renew. Sustain. Energy Rev. Elsevier; 2015;50:1125–1137.

[92] Zhang C, Guo Z, Liu Y, Cong X, Peng D. A review on thermal response test of ground-coupled heat pump systems. Renew. Sustain. Energy Rev. Elsevier; 2014;40:851–867.

[93] Gustafsson M, Westerlund L. Heat extraction thermal response test in groundwater-filled borehole heat exchanger - Investigation of the borehole thermal resistance. Renew. Energy. Elsevier Ltd; 2011;36:2388–2394.

[94] Liebel HT, Javed S, Vistnes G. Multi-injection rate thermal response test with forced convection in a groundwater-filled borehole in hard rock. Renew. Energy. Elsevier Ltd; 2012;48:263–268.

[95] Wang H, Qi C, Du H, Gu J. Improved method and case study of thermal response test for borehole heat exchangers of ground source heat pump system. Renew. Energy. Elsevier Ltd;

2010;35:727–733.

[96] Xiaohui Y, Yufeng Z, Na D, Hongting M, Shengming D. Thermal response test for ground source heat pump based on constant temperature and heat-flux methods. Appl. Therm. Eng. Elsevier Ltd; 2015;93:678–682.

[97] Beier R, Smith MD. Minimum duration of in-situ tests on vertical boreholes. ASHRAE Trans. 2003;109:475–486.

[98] Raymond J, Therrien R, Gosselin L, Lefebvre R. A Review of Thermal Response Test Analysis Using Pumping Test Concepts. Ground Water. 2011;49:932–945.

[99] Signorelli S, Bassetti S, Pahud D, Kohl T. Numerical evaluation of thermal response tests. Geothermics. 2007;36:141–166.

[100] L. R. Ingersoll , O. J. Zobel , A. C. Ingersoll Jamieson JC. Heat Conduction, with Engineering, Geological, and Other Applications. J. Geol. 1955;63:196.

[101] Bandos T V, Montero Á, de Córdoba PF, Urchueguía JF. Improving parameter estimates obtained from thermal response tests: Effect of ambient air temperature variations. Geothermics. 2011;40:136–143.

[102] Choi W, Ooka R. Effect of disturbance on thermal response test, part 1: Development of disturbance analytical model, paramteric study, and sensitvity analysis. Renew. Energy. Elsevier Ltd; 2016;85:306–318.

[103] Choi W, Ooka R. Effect of disturbance on thermal response test, part 2: Numerical study of applicability and limitation of infinite line source model for interpretation under disturbance from outdoor environment. Renew. Energy. Elsevier Ltd; 2016;85:1090–1105.

[104] Boban L, Lepoša L, Soldo V, Grozdek M. Influence of groundwater flow on implementation of distributed thermal response test. Int. Congr. Refrig. Yokohama: IIR; 2015.

[105] Sanner B, Hellström G, Spitler JD, Gehlin S. More than 15 years of mobile Thermal Response Test – a summary of experiences and prospects. Eur. Geotherm. Congr. 2013;

[106] Wagner V, Blum P, Kübert M, Bayer P. Analytical approach to groundwater-influenced thermal response tests of grouted borehole heat exchangers. Geothermics. 2013;46:22–31.

[107] Lamarche L, Beauchamp B. A new contribution to the finite line-source model for geothermal boreholes. Energy Build. 2007;39:188–198.

[108] Bandos T V., Montero Á, Fernández E, Santander JLG, Isidro JM, Pérez J, et al. Finite line-source model for borehole heat exchangers: effect of vertical temperature variations. Geothermics. 2009;38:263–270.

[109] Rivera J, Blum P, Bayer P. A finite line source model with Cauchy-type top boundary conditions for simulating near surface effects on borehole heat exchangers. Energy. Elsevier Ltd; 2016;98:50–63.

[110] Philippe M, Bernier M, Marchio D. Validity ranges of three analytical solutions to heat transfer in the vicinity of single boreholes. Geothermics. 2009;38:407–413.

[111] Lamarche L. Short-term behavior of classical analytic solutions for the design of ground-source heat pumps. Renew. Energy. Elsevier Ltd; 2013;57:171–180.

[112] Marcotte D, Pasquier P, Sheriff F, Bernier M. The importance of axial effects for borehole design of geothermal heat-pump systems. Renew. Energy. Elsevier Ltd; 2010;35:763–770.

[113] Witte HJL. Error analysis of thermal response tests. Appl. Energy. 2013;109:302–311.

[114] Carslaw HS, Jaeger JC. Conduction of Heat in Solids. Second edi. Clarendon Press,

Oxford; 1959.

[115] Wagner V, Bayer P, Kübert M, Blum P. Numerical sensitivity study of thermal response tests. Renew. Energy. Elsevier Ltd; 2012;41:245–253.

[116] Badenes B, Mateo Pla M, Lemus-Zúñiga L, Sáiz Mauleón B, Urchueguía J. On the Influence of Operational and Control Parameters in Thermal Response Testing of Borehole Heat Exchangers. Energies. 2017;10:1328.

[117] Choi W, Ooka R. Interpretation of disturbed data in thermal response tests using the infinite line source model and numerical parameter estimation method. Appl. Energy. 2015;148:476–488.

[118] Christodoulides P, Florides G, Pouloupatis P. A practical method for computing the thermal properties of a Ground Heat Exchanger. Renew. Energy. Elsevier Ltd; 2016;94:81–89.

[119] Yu X, Zhang Y, Deng N, Wang J, Zhang D, Wang J. Thermal response test and numerical analysis based on two models for ground-source heat pump system. Energy Build. Elsevier B.V.; 2013;66:657–666.

[120] Bland JM, Altman DG. Measuring agreement in method comparison studies. Stat. Methods Med. Res. 1999;8:135–160.

[121] Florides G, Christodoulides P, Pouloupatis P. Single and double U-tube ground heat exchangers in multiple-layer substrates. Appl. Energy. Elsevier Ltd; 2013;102:364–373.

[122] Raymond J, Lamarche L. Simulation of thermal response tests in a layered subsurface. Appl. Energy. 2013;109:293–301.

[123] Luo J, Rohn J, Bayer M, Priess A, Xiang W. Analysis on performance of borehole heat exchanger in a layered subsurface. Appl. Energy. Elsevier Ltd; 2014;123:55–65.

[124] Acuña J, Mogensen P, Palm B. Distributed thermal response tests on a multi-pipe coaxial borehole heat exchanger. HVAC&R Res. 2011;17:1012–1029.

[125] Radioti G, Delvoie S, Charlier R, Dumont G, Nguyen F. Heterogeneous bedrock investigation for a closed-loop geothermal system: A case study. Geothermics. Georisorse; 2016;62:79–92.

[126] Soldo V, Ruševljan M, Ćurko T. Ispitna geotermalna dizalica topline sa sondom dubine 100 metara. Klimaforum. Zadar, Hrvatska: Energetika marketing; 2009.

[127] Ansys Fluent.

[128] De Carli M, Tonon M, Zarrella A, Zecchin R. A computational capacity resistance model (CaRM) for vertical ground-coupled heat exchangers. Renew. Energy. Elsevier Ltd; 2010;35:1537–1550.

[129] Bauer D. Thermal resistance and capacity models for borehole heat exchangers. Int. J. energy Res. 2007;31:135–147.

[130] Ruiz-Calvo F, De Rosa M, Acuña J, Corberán JM, Montagud C. Experimental validation of a short-term Borehole-to-Ground (B2G) dynamic model. Appl. Energy. Elsevier Ltd; 2015;140:210–223.

[131] Pasquier P, Marcotte D. Short-term simulation of ground heat exchanger with an improved TRCM. Renew. Energy. Elsevier Ltd; 2012;46:92–99.

[132] Zarrella A, Scarpa M, De Carli M. Short time step analysis of vertical ground-coupled heat exchangers: The approach of CaRM. Renew. Energy. Elsevier Ltd; 2011;36:2357–2367.

[133] Bauer D, Heidemann W, Diersch HJG. Transient 3D analysis of borehole heat exchanger

modeling. Geothermics. 2011;40:250–260.

[134] VDI. VDI Heat Atlas. 2nd ed. VDI, editor. Dusseldorf, Germany: Springer Berlin Heidelberg; 2010.

[135] Bell IH, Wronski J, Quoilin S, Lemort V. Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp. Ind. Eng. Chem. Res. 2014;53:2498–2508.

[136] Scarpa M, Emmi G, De Carli M. Validation of a numerical model aimed at the estimation of performance of vapor compression based heat pumps. Energy Build. Elsevier B.V.; 2012;47:411–420.

ŽIVOTOPIS

Luka Boban rođen je 18. travnja 1989. godine u Splitu. Osnovnu i srednju školu pohađao je u Splitu, a maturirao je 2008. godine u III. gimnaziji. Nakon završetka 1. godine studija na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu, visokoškolsko obrazovanje nastavio je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu na procesno-energetskom smjeru. Tijekom studija aktivno je sudjelovao u radu studentske udruge SUPEUS i sveučilišnom timu UNIZG za natjecanje *Solar Decathlon Europe 2014*. Diplomirao je 2014. godine pod mentorstvom prof. dr. sc. Vladimira Solde s temom rada „Parametarska analiza bušotinskog izmjenjivača topline u tlu“. Preddiplomski i diplomski studij završio je s Velikom pohvalom za postignuti uspjeh te je dobitnik stipendija *Instituta Hrvoje Požar* za studente energetskog usmjerenja za 2012. i 2013. godinu.

Tijekom studija zaposlen ja kao asistent voditelja na projektu *Istraživanje i promocija plitkih geotermalnih potencijala u Hrvatskoj (GeoMapping)* financiranom iz strukturnih fondova, a od 2014. godine zaposlen je kao asistent na Zavodu za termodinamiku, toplinsku i procesnu tehniku pri Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Iste akademske godine upisao je i poslijediplomski doktorski studij pod mentorstvom prof. dr. sc. Vladimira Solde.

Aktivni je član tehničkog odbora HZN/TO 86, Uređaji za hlađenje, klimatizaciju i dizalice topline pri Hrvatskom zavodu za norme od 2016. godine i član Povjerenstva za odnose s javnošću Fakulteta strojarstva i brodogradnje od 2015. godine.

Objavio je više radova u časopisima i zbornicima konferencija.

Radovi objavljeni u časopisima:

Zanchi, Vedran, Boban, Luka, Soldo, Vladimir, 2019. Refrigerant Options in the Near Future. // Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, u postupku objave, doi: https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d6.025

Boban, Luka; Soldo, Vladimir; Stošić, Jure; Filipović, Eugen; Tremac, Filip
Ground Thermal Response and Recovery after Heat Injection: Experimental Investigation. // Transactions of FAMENA, 42 (2018), SI-1; 39-50, doi:10.21278/TOF.42Si104

Soldo, Vladimir; Boban, Luka; Borović, Staša
Vertical distribution of shallow ground thermal properties in different geological settings in Croatia. // Renewable energy, 99 (2016), 1202-1212, doi:10.1016/j.renene.2016.08.022

Soldo, Vladimir; Borović, Staša; Lepoša, Leon; Boban, Luka
Comparison of different methods for ground thermal properties determination in a clastic sedimentary environment. // Geothermics, 61 (2016), 1-11, doi:10.1016/j.geothermics.2015.12.010

Radovi u zbornicima skupova:

Soldo, Ivan; Dalla Libera, Gastone; Boban, Luka; Soldo, Vladimir
Eksperimentalna i teorijska analiza isparavanja propana u cijevnom isparivaču. // Klima forum 2017, Osijek, Hrvatska, 2017.

Dalla Libera, Gastone; Soldo, Vladimir; Boban, Luka; De Carli, Michele; Cukrov, Alen
Eksperimentalna analiza pada tlaka u spiralnom isparivaču. // Zbornik radova Osmog susreta Hrvatskog društva za mehaniku, Osijek, Hrvatska, 2017.

Boban, Luka; Soldo, Vladimir; Stošić, Jure; Filipović, Eugen; Tremac, Filip
The Influence of Injected Heat Flux on Thermal Response Test. // Zbornik Interklima 2017, Zagreb, Hrvatska, 2017.

Soldo, Vladimir; Boban, Luka; Grubišić, Toni
Propan kao radna tvar u rashladnim uređajima i dizalicama topline. // Energetska i procesna postrojenja, Rovinj, Hrvatska, 2016.

Boban, Luka; Soldo, Vladimir Soldo; Mandić, Marko
Borehole temperature distribution during Thermal Response Test. // Energija i okoliš 2016. / Rijeka, Hrvatska, 2016.

Lepoša, Leon; Boban, Luka; Soldo, Vladimir
Određivanje toplinskih svojstava tla primjenom optičkih kabela. // Energetska i procesna postrojenja, Rovinj, Hrvatska, 2014.

Boban, Luka; Lepoša, Leon; Soldo, Vladimir; Grozdek, Marino
Influence of Groundwater Flow on Implementation of Distributed Thermal Response Test. // Proceedings of the International Congress of Refrigeration, Yokohama, Japan, 2015.

Soldo, Vladimir; Lepoša, Leon; Boban, Luka; Borović, Staša
Implementation of the Distributed Thermal Response Test at Characteristic Geological Regions throughout Croatia. // Proceedings of the World Geothermal Congress, Melbourne, Australia, 2015.

PRILOG A: Matlab kod modela tla i dizalice topline

```
clc;
clearvars;
clear all;
close all
tic
addpath('C:\CoolProp\matlab')
%-----------------------------------------------------------------------

fluid_bit='INCOMP::AEG[0.17]';
qm_bit_zadano=0.544;
qm_potrosac_zadano=0.5925;
DT_pov_potr_zadano_gr=38;
DT_pov_potr_zadano_hl=12;

%učitavanje pomoćnih skripti
ulazni_podaci;
MapaDT;
svojstva_fluid; %konvektivni toplinski otpor
ucin_potrosac=0.65*1000*dlmread('ucin_potrosac_F.csv');
DT_pov_bit=temperature(n2);

for kkk=1:1:8760 %jedna godina 8760
    %jednadžba za temp_površine
    temperatura_povrsina=13.43-12.5*exp(-0.01*(pi/(8760*(3600*lambda_tlo(1)/↙
(ro_tlo*c_tlo)))^0.5))*cos(2*pi/8760*(kkk-0.01/2*(8760/(pi*(3600*lambda_tlo(1)/↙
(ro_tlo*c_tlo))))^0.5));

    if(ucin_potrosac(kkk)>0)
       %sezona grijanja
        faktor_intermitencije(kkk)=ucin_potrosac(kkk)/(p_gr(1)*DT_pov_bit^2+p_gr(2)↙
*DT_pov_bit+p_gr(3));
                vrijeme_rada_DT(kkk)=round(faktor_intermitencije(kkk)*60); %u minutama
        if(vrijeme_rada_DT(kkk)<t_min)
            vrijeme_rada_DT(kkk)=t_min;
        elseif(vrijeme_rada_DT(kkk)>60)
            vrijeme_rada_DT(kkk)=60;
        end
        vrijeme_mirovanja(kkk)=60-vrijeme_rada_DT(kkk);
     %faza rada DT
        qm_bit=qm_bit_zadano;
        qm_fluid=qm_bit_zadano/2;
        R_konv=1/(alfa_gr*r_cijev_u*z);
        vrijeme_simulacije=vrijeme_rada_DT(kkk);
        dizalica_topline_gr
        temperature_prethodni_korak=temperature;
     %izlazni podaci
        temperatura_ulaz_BIT_sim(kkk)=temp_polje(1,n2-2);
        temperatura_izlaz_BIT_sim(kkk)=temp_polje(1,n2);
        temperatura_polaz_potr(kkk)=DT_pol_potr;
        temperatura_povrat_potr(kkk)=DT_pov_potr;
        t_isparavanja_sim(kkk)=t_isparavanja_gr;
        t_kondenzacije_sim(kkk)=t_kondenzacije_gr;
        %Q_bit(kkk)=-qm_bit*cp_fluid*(temp_polje(1,n2-2)-temp_polje(1,n2));
        snaga_kondenzator_sim(kkk)=snaga_kondenzator2;
        snaga_kompresor_sim(kkk)=snaga_kompresor2;
```

```
        snaga_isparivac_sim(kkk)=snaga_isparivac2;
        COP_sim(kkk)=snaga_kondenzator2/snaga_kompresor2;
        t_zid_bit_rad(kkk)=mean(temp_polje(:,n+1));
        t_tlo_4_rad(kkk)=mean(temp_polje(:,4));
        t_tlo_7_rad(kkk)=mean(temp_polje(:,7));
        t_domena_rub(kkk)=mean(temp_polje(:,n));
        if(kkk==8760)
             temp_polje_rad_8760=temp_polje;
        end
     %faza mirovanja sustava
        qm_fluid=0;
        qm_bit=0;
         R_konv=1/(80*r_cijev_u*z);
        vrijeme_simulacije=vrijeme_mirovanja(kkk);
        tlo_bit_slojevi_n4;
        temperature_prethodni_korak=temperature;
        t_zid_bit_nerad(kkk)=mean(temp_polje(:,n+1));
        t_tlo_4_nerad(kkk)=mean(temp_polje(:,4));
        t_tlo_7_nerad(kkk)=mean(temp_polje(:,7));

        elseif(ucin_potrosac(kkk)<0)
     %sezona hlađenja
        faktor_intermitencije(kkk)=-1*ucin_potrosac(kkk)/(p_hl(1)*DT_pov_bit^2+p_hl(2)↙
*DT_pov_bit+p_hl(3));
                vrijeme_rada_DT(kkk)=round(faktor_intermitencije(kkk)*60); %u minutama
        if(vrijeme_rada_DT(kkk)<t_min)
            vrijeme_rada_DT(kkk)=t_min;
        elseif(vrijeme_rada_DT(kkk)>60)
            vrijeme_rada_DT(kkk)=60;
        end
        vrijeme_mirovanja(kkk)=60-vrijeme_rada_DT(kkk);
     %faza rada DT
        qm_bit=qm_bit_zadano;
        qm_fluid=qm_bit/2;
        R_konv=1/(alfa_hl*r_cijev_u*z);
        vrijeme_simulacije=vrijeme_rada_DT(kkk);
        dizalica_topline_hl
        temperature_prethodni_korak=temperature;
     %izlazni podaci
        temperatura_ulaz_BIT_sim(kkk)=temp_polje(1,n2-2);
        temperatura_izlaz_BIT_sim(kkk)=temp_polje(1,n2);
        temperatura_polaz_potr(kkk)=DT_pol_potr;
        temperatura_povrat_potr(kkk)=DT_pov_potr;
        t_isparavanja_sim(kkk)=t_isparavanja_hl;
        t_kondenzacije_sim(kkk)=t_kondenzacije_hl;
        %Q_bit(kkk)=-qm_bit*cp_fluid*(temp_polje(1,n2-2)-temp_polje(1,n2));
        snaga_kondenzator_sim(kkk)=snaga_kondenzator2;
        snaga_kompresor_sim(kkk)=snaga_kompresor2;
        snaga_isparivac_sim(kkk)=snaga_isparivac2;
        COP_sim(kkk)=snaga_isparivac2/snaga_kompresor2;
        t_zid_bit_rad(kkk)=mean(temp_polje(:,n+1));
        t_tlo_4_rad(kkk)=mean(temp_polje(:,4));
        t_tlo_7_rad(kkk)=mean(temp_polje(:,7));
        t_domena_rub(kkk)=mean(temp_polje(:,n));
        if(kkk==5535)
```

```
            temp_polje_rad_5535=temp_polje;
        end
     %faza mirovanja sustava
        qm_fluid=0;
        qm_bit=0;
         R_konv=1/(80*r_cijev_u*z);
        vrijeme_simulacije=vrijeme_mirovanja(kkk);
        tlo_bit_slojevi_n4;
        temperature_prethodni_korak=temperature;
        t_zid_bit_nerad(kkk)=mean(temp_polje(:,n+1));
        t_tlo_4_nerad(kkk)=mean(temp_polje(:,4));
        t_tlo_7_nerad(kkk)=mean(temp_polje(:,7));
        else
    %mirovanje kada je učin potrošača(kkk)=0
        qm_fluid=0;
        R_konv=1/(80*r_cijev_u*z);
        vrijeme_mirovanja(kkk)=60;
        vrijeme_simulacije=vrijeme_mirovanja(kkk);
        tlo_bit_slojevi_n4;
        temperature_prethodni_korak=temperature;
        temperatura_ulaz_BIT_sim(kkk)=NaN;
        temperatura_izlaz_BIT_sim(kkk)=NaN;
        temperatura_polaz_potr(kkk)=NaN;
        temperatura_povrat_potr(kkk)=NaN;
        t_isparavanja_sim(kkk)=NaN;
        t_kondenzacije_sim(kkk)=NaN;
        COP_sim(kkk)=NaN;
        Q_bit(kkk)=NaN;
        snaga_kondenzator_sim(kkk)=NaN;
        snaga_kompresor_sim(kkk)=NaN;
        snaga_isparivac_sim(kkk)=NaN;
        t_zid_bit_rad(kkk)=NaN;
        t_zid_bit_nerad(kkk)=mean(temp_polje(:,n+1));
        t_tlo_4_nerad(kkk)=mean(temp_polje(:,4));
        t_tlo_7_nerad(kkk)=mean(temp_polje(:,7));
        if(kkk==3000)
            temp_polje_nerad_3000=temp_polje;
        end
        if(kkk==6500)
            temp_polje_nerad_6500=temp_polje;
        end
     end
     DT_pov_bit=temperature_prethodni_korak(n2+n2);
    kkk
end

toc
```

```
m=100;       % broj vertikalnih slojeva tla (ili segmenata bušotine) - broj redova
n=10;        %broj prstenova/cilindara, odnosno horizontalnih slojeva tla - broj stupaca
n2=n+10;
r_domena=10;       %radius domene (metri)
r_busotina=0.076;  %radius  bušotine (metri)
prirast_n=nthroot(r_domena/r_busotina,n);  %prirast radiusa
H=100; %dubina BIT-a (metri)
z=H/m; %visina elementa (metri)
r_cijev_v=0.016; % PEHD 32x2.9 cijev (m)
r_cijev_u=0.0131; % PEHD 32x2.9 cijev (m)
razmak_cijevi=0.083; %dijagonalna dimenzija distancera (m)
broj_cijevi=4;
t=60; %vremenski korak simulacije (u sekundama)

%svojstva tla
ro_tlo=1950; %gustoća (kg/m3)
c_tlo=1420; %topl. kapacitet (J/kgK)
lambda_tlo(1:10)=3.0; %topl. provodnost (W/mK)
lambda_tlo(11:20)=3.0;
lambda_tlo(21:30)=3.0;
lambda_tlo(31:40)=3.0;
lambda_tlo(41:50)=2.333;
lambda_tlo(51:60)=1.666;
lambda_tlo(61:70)=1;
lambda_tlo(71:80)=1;
lambda_tlo(81:90)=1;
lambda_tlo(91:100)=1;

%svojstva ispune
ro_ispuna=2200;          %gustoća (kg/m3)
cp_ispuna=1700;          %spec. topl. kapacitet (J/kgK)
lambda_ispuna=2.3;       %topl. provodnost (W/mK)
%svojstva PEHD cijevi
ro_cijev=950;           %gustoća (kg/m3)
c_cijev=2250;           %spec. topl. kapacitet (J/kgK)
lambda_cijev=0.5;       %topl. provodnost (W/mK)
%svojstva fluida
ro_fluid=CoolProp.PropsSI('D','T',20+273.154,'P',101325,fluid_bit); %gustoća(kg/m3
cp_fluid=CoolProp.PropsSI('CPMASS','T',20+273.154,'P',101325,fluid_bit);          %topl. kapacitet (J/kgK)
lambda_fluid=CoolProp.PropsSI('CONDUCTIVITY','T',20+273.154,'P',101325,fluid_bit); %topl. provodnost (W/mK)

t_min=2*H/(qm_bit_zadano/(2*r_cijev_u^2*pi*ro_fluid))/60; % vrijeme prolaza fluida kroz bušotinu
%inicijalizacija ulaznih i izlaznih podataka
ucin_potrosac=zeros(1,8760);
faktor_intermitencije=zeros(1,8760);
vrijeme_rada_DT=zeros(1,8760);
vrijeme_mirovanja=zeros(1,8760);
temperatura_ulaz_BIT_sim=zeros(1,8760);
temperatura_izlaz_BIT_sim=zeros(1,8760);
temperatura_polaz_potr=zeros(1,8760);
temperatura_povrat_potr=zeros(1,8760);
```

```
t_isparavanja_sim=zeros(1,8760);
t_kondenzacije_sim=zeros(1,8760);
COP_sim=zeros(1,8760);
Q_bit=zeros(1,8760);
snaga_kondenzator_sim=zeros(1,8760);
snaga_kompresor_sim=zeros(1,8760);
snaga_isparivac_sim=zeros(1,8760);
t_zid_bit_rad=zeros(1,8760);
t_zid_bit_nerad=zeros(1,8760);
t_domena_rub=zeros(1,8760);
temp_izlaz_rad=zeros(1,8760);
temp_izlaz_rad2=zeros(1,8760);
temp_izlaz_nerad=zeros(1,8760);
temp_izlaz_nerad2=zeros(1,8760);
t_tlo_4_rad=zeros(1,8760);
t_tlo_7_rad=zeros(1,8760);
t_tlo_4_nerad=zeros(1,8760);
t_tlo_7_nerad=zeros(1,8760);
t_domena_rub=zeros(1,8760);

%%Toplinski otpori i kapaciteti
Rr=zeros(m,n+1);
Rz=zeros(m,n);
c=zeros(m,n);
A=zeros(m*n2,m*n2);
C=zeros(m*n2,1);
r=zeros(1,n);
r_m=zeros(1,n);

%radiusi horizontalnih slojeva tla i toplinskog kapaciteta
r(1)=r_busotina*prirast_n; %radius koji opisuje geometrijski segment
r_m(1)=sqrt((r(1).^2+r_busotina^2)/2);  %položaj toplinskog kapaciteta
for ii=2:1:n
    r(ii)=r(ii-1)*prirast_n;
    r_m(ii)=sqrt((r(ii).^2+r(ii-1).^2)/2);
end

%toplinski otpori i toplinski kapaciteti segmenata tla
j=1; i=1;
for j=1:1:m
    Rr(j,i)=(2*pi*z.*lambda_tlo(j)).^-1*log(r_m(1)./r_busotina); %toplinski otpori↙
provođenju između čvorova (radijalni) (K/W)
    c(j,i)=ro_tlo*c_tlo*pi*z*(r(1).^2-r_busotina^2);         %toplinski kapacitet↙
horizontalnih segmenanta
    Rz(j,i)=z/(lambda_tlo(j).*pi*(r(1)^2-r_busotina^2));     %toplinski otpori↙
provođenju segmetna tla (vertikalni) (K/W)
end
j=1;
i=1;
for j=1:1:m
for i=2:1:n
    Rr(j,i)=(2*pi*z.*lambda_tlo(j)).^-1*log(r_m(i)./r_m(i-1)); %toplinski otpori↙
provođenju između čvorova (radijalni)
    Rz(j,i)=z/(lambda_tlo(j).*pi*(r(i).^2-r(i-1).^2));  %toplinski otpori provođenju↙
segmetna tla (vertikalni)
```

```
    c(j,i)=ro_tlo*c_tlo*pi*z*(r(i).^2-r(i-1).^2);        %toplinski kapacitet
horizontalnih segmenanta
end
    Rr(j,n+1)=(2*pi*z.*lambda_tlo(j)).^-1*log(prirast_n)/2; %toplinski otpor do
toplinski neporemećenog tla
end

%toplinski otpori i kapaciteti segmenata BIT-a
kut1=acos(r_cijev_v/razmak_cijevi);
kut2=pi-2*kut1;
c_cijevi=broj_cijevi*ro_cijev*c_cijev*pi*z*((r_cijev_v)^2-(r_cijev_u)^2);   %sve 4
cijevi BIT-a zajedno
temp_jezgra=(1-(((0.5*(razmak_cijevi^2)/4*(2*kut2-sin(2*kut2)+0.5*(r_cijev_v^2)*(pi-
kut2-sin(kut2)))))/((r_cijev_v)^2-(r_cijev_u)^2)))*c_cijevi;
temp_plast=(((0.5*(razmak_cijevi^2)/4*(2*kut2-sin(2*kut2)+0.5*(r_cijev_v^2)*(pi-kut2-
sin(kut2)))))/((r_cijev_v)^2-(r_cijev_u)^2))*c_cijevi;
c_ispuna_jezgra=temp_jezgra+ro_ispuna*cp_ispuna*z*(pi*(razmak_cijevi^2)/4-broj_cijevi*
(0.5*(razmak_cijevi^2)/4*(2*kut2-sin(2*kut2)+0.5*(r_cijev_v^2)*(pi-kut2-sin(kut2)))));
%središnji dio ispune, međusobna komunikacija cijevi BIT-a, pribrojen kapacitet cijevi
c_ispuna_plast=temp_plast+ro_ispuna*cp_ispuna*z*(pi*(r_busotina^2-razmak_cijevi^2/4)
+broj_cijevi*(0.5*(razmak_cijevi^2/4)*(2*kut2-sin(2*kut2)+0.5*(r_cijev_v^2)*(pi-kut2-
sin(kut2))))-broj_cijevi*pi*r_cijev_v^2);    %vanjski dio ispune, u komunikaciji s
zidom BIT-a, pribrojen kapacitet cijevi
c_fluid=ro_fluid*cp_fluid*pi*z*(r_cijev_u)^2;  %u jednoj cijevi
c_ispuna=ro_ispuna*cp_ispuna*z*pi*(r_busotina^2-broj_cijevi*r_cijev_v^2);
Rz_ispuna_jezgra=z/(lambda_ispuna*(pi*(razmak_cijevi^2)/4-broj_cijevi*(0.5*
(razmak_cijevi^2)/4*(2*kut2-sin(2*kut2)+0.5*(r_cijev_v^2)*(pi-kut2-sin(kut2))))));
Rz_ispuna_plast=z/(lambda_ispuna*(pi*(r_busotina^2-razmak_cijevi^2/4)+broj_cijevi*(0.5
*(razmak_cijevi^2/4)*(2*kut2-sin(2*kut2)+0.5*(r_cijev_v^2)*(pi-kut2-sin(kut2))))-
broj_cijevi*pi*r_cijev_v^2));
R_cijevA=0.373/z;
R_cijevB=0.527/z;
R_cijev_zid=0.24/z;
%Ttemperaturno polje u tlu
temperatura_povrsina=11.73;
geo_gradijent=0.037; %K/m
temperatura_dno=temperatura_povrsina+geo_gradijent*H;
%inicijalizacija temperaturnog polja
tt=1;
while tt<=m
        if(tt<8/z)
        temperatura_tla(tt)=0.3817*(tt*z)+12.294;
    elseif (tt<65/z)
        temperatura_tla(tt)=-0.000013*(tt*z)^3+0.002638*(tt*z)^2-0.144031*(tt*z)+15.
917378;
    else
        temperatura_tla(tt)=temperatura_povrsina+geo_gradijent*(tt*z);
    end
      tt=tt+1;
end
tt=1; kk=1; ff=1;
while ff<=m
while kk<=n2
    temperature(n2*(ff-1)+kk)=temperatura_tla(ff);
    temperature_prethodni_korak(n2*(ff-1)+kk)=temperatura_tla(ff);
```

```
    kk=kk+1;
    end
ff=ff+1;
kk=1;
end
tt=1; kk=1; ff=1;
%temperature(:,:)=14.2;
temperature_pocetne=temperature;
%incijalizacija modela DT
RT='R290';
korekcija_kapaciteta=1; %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Q_kondenzator_gr_nom=14.5*korekcija_kapaciteta; %kW
Q_isparivac_gr_nom=11.75*korekcija_kapaciteta; %kw
Q_kondenzator_hl_nom=14.25*korekcija_kapaciteta;
Q_isparivac_hl_nom=11.75*korekcija_kapaciteta; %kW
DT_pregrijanje=6.5;
DT_pothladenje=2.2;
DT_ihx=10;
%temperature polaza i povrata prema DT (grijanje)
DT_pol_potr_gr_nom=43.8;
DT_pov_potr_gr_nom=37.5;
DT_pol_bit_gr_nom=6.5;
DT_pov_bit_gr_nom=12.25;
%temperature polaza i povrata prema DT (hlađenje)
DT_pol_potr_hl_nom=3.5;
DT_pov_potr_hl_nom=9.5;
DT_pol_bit_hl_nom=33.5;
DT_pov_bit_hl_nom=26.9;
%temperature isparavanja i kondenzacije
t_isparavanja_gr_nom=4.5;
t_kondenzacije_gr_nom=44;
t_isparavanja_hl_nom=1.3;
t_kondenzacije_hl_nom=34.2;
efikasnost_elektricna=0.89; %mjerenja
%izračun faze 1 u grijanju!
P_kompr_gr_nom=1000*(Q_kondenzator_gr_nom-Q_isparivac_gr_nom);
efikasnost_kondenzator_gr=abs(DT_pov_potr_gr_nom-DT_pol_potr_gr_nom)/abs↙
(DT_pov_potr_gr_nom-t_kondenzacije_gr_nom);
efikasnost_isparivac_gr=abs(DT_pov_bit_gr_nom-DT_pol_bit_gr_nom)/abs↙
(DT_pov_bit_gr_nom-t_isparavanja_gr_nom);
%izračun točaka procesa
p_isparavanja_gr_nom=CoolProp.PropsSI('P','T',t_isparavanja_gr_nom+273.15,'Q',0.5,RT);
p_kondenzacije_gr_nom=CoolProp.PropsSI('P','T',t_kondenzacije_gr_nom+273.15,'Q',0.5,↙
RT);

h1=CoolProp.PropsSI('H','T',t_isparavanja_gr_nom+DT_pregrijanje+273.15,'P',↙
p_isparavanja_gr_nom,RT);
s1=CoolProp.PropsSI('S','T',t_isparavanja_gr_nom+DT_pregrijanje+273.15,'P',↙
p_isparavanja_gr_nom,RT);
h1_ihx=CoolProp.PropsSI('H','T',t_isparavanja_gr_nom+DT_pregrijanje+DT_ihx+273.15,'P',↙
p_isparavanja_gr_nom,RT);
s1_ihx=CoolProp.PropsSI('S','T',t_isparavanja_gr_nom+DT_pregrijanje+DT_ihx+273.15,'P',↙
p_isparavanja_gr_nom,RT);
v1_gr=1/CoolProp.PropsSI('D','P',p_isparavanja_gr_nom,'H',h1_ihx,RT);
h2s=CoolProp.PropsSI('H','P',p_kondenzacije_gr_nom,'S',s1_ihx,RT);
```

```
h3=CoolProp.PropsSI('H','T',t_kondenzacije_gr_nom-DT_pothladenje+273.15,'P',↙
p_kondenzacije_gr_nom,RT);
h3_ihx=h3-(h1_ihx-h1);
h4=h3_ihx;
qm_rt_gr_nom=(Q_isparivac_gr_nom/(h1-h4))*1000;
h2=h1_ihx+P_kompr_gr_nom/qm_rt_gr_nom;
izen_st_kompr_gr_nom=(h1_ihx-h2s)/(h1_ihx-h2);
snaga_isparivac_gr=(h1-h4)*qm_rt_gr_nom;
snaga_kondenzator_gr=(h2-h3)*qm_rt_gr_nom;
snaga_kompresor_gr=(h2-h1_ihx)*qm_rt_gr_nom;
v1_gr=1/CoolProp.PropsSI('D','P',p_isparavanja_gr_nom,'H',h1_ihx,RT);
qv_kompresor_gr_nom=qm_rt_gr_nom*v1_gr;
%izračun faze 1 u hladenju!
P_kompr_hl_nom=1000*(Q_kondenzator_hl_nom-Q_isparivac_hl_nom);
efikasnost_kondenzator_hl=abs(DT_pov_bit_hl_nom-DT_pol_bit_hl_nom)/abs↙
(DT_pov_bit_hl_nom-t_kondenzacije_hl_nom);
efikasnost_isparivac_hl=abs(DT_pov_potr_hl_nom-DT_pol_potr_hl_nom)/abs↙
(DT_pov_potr_hl_nom-t_isparavanja_hl_nom);
%izračun točaka procesa
p_isparavanja_hl_nom=CoolProp.PropsSI('P','T',t_isparavanja_hl_nom+273.15,'Q',0.5,RT);
p_kondenzacije_hl_nom=CoolProp.PropsSI('P','T',t_kondenzacije_hl_nom+273.15,'Q',0.5,↙
RT);

h1=CoolProp.PropsSI('H','T',t_isparavanja_hl_nom+DT_pregrijanje+273.15,'P',↙
p_isparavanja_hl_nom,RT);
s1=CoolProp.PropsSI('S','T',t_isparavanja_hl_nom+DT_pregrijanje+273.15,'P',↙
p_isparavanja_hl_nom,RT);
h1_ihx=CoolProp.PropsSI('H','T',t_isparavanja_hl_nom+DT_pregrijanje+DT_ihx+273.15,'P',↙
p_isparavanja_hl_nom,RT);
s1_ihx=CoolProp.PropsSI('S','T',t_isparavanja_hl_nom+DT_pregrijanje+DT_ihx+273.15,'P',↙
p_isparavanja_hl_nom ,RT);
h2s=CoolProp.PropsSI('H','P',p_kondenzacije_hl_nom,'S',s1_ihx,RT);
h3=CoolProp.PropsSI('H','T',t_kondenzacije_hl_nom-DT_pothladenje+273.15,'P',↙
p_kondenzacije_hl_nom,RT);
h3_ihx=h3-(h1_ihx-h1);
h4=h3_ihx;
qm_rt_hl_nom=(Q_isparivac_hl_nom/(h1-h4))*1000;
h2=h1_ihx+P_kompr_hl_nom/qm_rt_hl_nom;
izen_st_kompr_hl_nom=(h1_ihx-h2s)/(h1_ihx-h2);
snaga_isparivac_hl=(h1-h4)*qm_rt_hl_nom;
snaga_kondenzator_hl=(h2-h3)*qm_rt_hl_nom;
snaga_kompresor_hl=(h2-h1_ihx)*qm_rt_hl_nom;
v1_hl=1/CoolProp.PropsSI('D','P',p_isparavanja_hl_nom,'H',h1_ihx,RT);
qv_kompresor_hl_nom=qm_rt_hl_nom*v1_hl;

%%%%%%kraj
```

```
%---------------Model tla i BIT-a-----------
kk=1;
t=vrijeme_simulacije*60;
k=0;
j=1; %popunjavanje matrica A i C s čvorovima prvog retka
for i=1:n2
  k=k+1;
  if(i==1)
   %A((j-1)*n2+i,(j-1)*n2+i-1)=0;
   A((j-1)*n2+i,(j-1)*n2+i)=-1/Rr(j,i)-1/Rr(j,i+1)-2/Rz(j,i)-2/(Rz(j+1,i)+Rz(j,i))-c↙
(j,i)/t;
   A((j-1)*n2+i,(j-1)*n2+i+1)=1/Rr(j,i+1);
   %A((j-1)*n2+i,(j-1)*n2+i-n2)=0;
   A((j-1)*n2+i,(j-1)*n2+i+n2)=2/(Rz(j+1,i)+Rz(j,i));
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i+n)=1/Rr(j,i); %veza s čvorom koji predstavlja zid BIT-a!↙
(upitna točnost adrese)
   C((j-1)*n2+i,1)=-c(j,i)/t*temperature((j-1)*n2+i)-temperatura_povrsina*2/Rz(j,i);
  elseif(i<n)
   A((j-1)*n2+i,(j-1)*n2+i-1)=1/Rr(j,i);
   A((j-1)*n2+i,(j-1)*n2+i)=-1/Rr(j,i)-1/Rr(j,i+1)-2/Rz(j,i)-2/(Rz(j+1,i)+Rz(j,i))-c↙
(j,i)/t;
   A((j-1)*n2+i,(j-1)*n2+i+1)=1/Rr(j,i+1);
   %A((j-1)*n2+i,(j-1)*n2+i-n2)=0;
   A((j-1)*n2+i,(j-1)*n2+i+n2)=2/(Rz(j+1,i)+Rz(j,i));
   C((j-1)*n2+i,1)=-c(j,i)/t*temperature((j-1)*n2+i)-temperatura_povrsina*2/Rz(j,i);
   elseif(i==n)
   A((j-1)*n2+i,(j-1)*n2+i-1)=1/Rr(j,i);
   A((j-1)*n2+i,(j-1)*n2+i)=-1/Rr(j,i)-1/Rr(j,i+1)-2/Rz(j,i)-2/(Rz(j+1,i)+Rz(j,i))-c↙
(j,i)/t;
   %A((j-1)*n2+i,(j-1)*n2+i+1)=0;
   %A((j-1)*n2+i,(j-1)*n2+i-n2)=0;
   A((j-1)*n2+i,(j-1)*n2+i+n2)=2/(Rz(j+1,i)+Rz(j,i));
   C((j-1)*n2+i,1)=-c(j,i)/t*temperature((j-1)*n2+i)-temperatura_tla(j)./Rr(j,i+1)-↙
temperatura_povrsina*2/Rz(j,i);
   elseif(i==n+1) %ispuna_plašt; popunjavanje stupca s čvorovima zida BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+3)=1/R_cijev_zid; %cijevi BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+4)=1/R_cijev_zid;
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+5)=1/R_cijev_zid;
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+6)=1/R_cijev_zid;
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-4/R_cijev_zid-1/Rz_ispuna_plast-1/Rr(j,1)-2/Rz(j,1)-↙
c_ispuna_plast/t;
   %A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i-n2)=1/Rz_ispuna_plast; %čvor ispod/iznad
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i+n2)=1/Rz_ispuna_plast; %čvor ispod/iznad
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i-n)=1/Rr(j,1);          %prvi čvor tla!
   C((j-1)*n2+i,1)=-c_ispuna_plast/t*temperature((j-1)*n2+i)-temperatura_povrsina*2/Rz↙
(j,1);
   elseif(i==n+2) %ispuna_jezgra
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+3)=2/R_cijevB; %cijevi BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+4)=2/R_cijevB; %cijevi BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+5)=2/R_cijevB; %cijevi BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+6)=2/R_cijevB; %cijevi BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-4*2/R_cijevB-1/Rz_ispuna_jezgra-2/Rz(j,1)-↙
c_ispuna_jezgra/t;
   %A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i-n2)=1/Rz_ispuna_jezgra; %čvor ispod/iznad
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i+n2)=1/Rz_ispuna_jezgra; %čvor ispod/iznad
```

```
   C((j-1)*n2+i,1)=-c_ispuna_jezgra/t*temperature((j-1)*n2+i)-↙
temperatura_povrsina*2/Rz(j,1);
   elseif(i==n+3) %cijev 1
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+2)=2/R_cijevB; %jezgra ispune
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+5)=1/R_cijevA; %cijev 3 BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+1)=1/R_cijev_zid; %zid BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+7)=1/R_konv; %fluid u cijev 1
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-2/R_cijevB-1/R_cijevA-1/R_cijev_zid-1/R_konv;
   C((j-1)*n2+i,1)=0;
   elseif(i==n+4) %cijev 2
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+2)=2/R_cijevB; %jezgra ispune
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+6)=1/R_cijevA; %cijev 4 BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+1)=1/R_cijev_zid; %zid BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+8)=1/R_konv; %fluid u cijev 2
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-2/R_cijevB-1/R_cijevA-1/R_cijev_zid-1/R_konv;
   C((j-1)*n2+i,1)=0;
   elseif(i==n+5) %cijev 3
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+2)=2/R_cijevB; %jezgra ispune
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+3)=1/R_cijevA; %cijev 1 BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+1)=1/R_cijev_zid; %zid BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+9)=1/R_konv; %fluid u cijev 3
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-2/R_cijevB-1/R_cijevA-1/R_cijev_zid-1/R_konv;
   C((j-1)*n2+i,1)=0;
   elseif(i==n+6) %cijev 4
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+2)=2/R_cijevB; %jezgra ispune
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+4)=1/R_cijevA; %cijev 2 BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+1)=1/R_cijev_zid; %zid BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+10)=1/R_konv; %fluid u cijev 3
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-2/R_cijevB-1/R_cijevA-1/R_cijev_zid-1/R_konv;
   C((j-1)*n2+i,1)=0;
   elseif(i==n+7) %fluid 1
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+3)=1/R_konv; %stjenka cijevi 1
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-(qm_fluid*cp_fluid+1/R_konv+c_fluid/t); %čvor fluida
   %A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i-n2)=qm_fluid*c_fluid; %čvor ispod/iznad (ulazni fluid u↙
segment)
   %A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i+n2)=qm_fluid*c_fluid; %čvor ispod/iznad (ulazni fluid u↙
segment)
   C((j-1)*n2+i,1)=-c_fluid/t*temperature((j-1)*n2+i)-↙
temperatura_ulaz_BIT*qm_fluid*cp_fluid;
   elseif(i==n+8) %fluid 2
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+4)=1/R_konv; %stjenka cijevi 2
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-(qm_fluid*cp_fluid+1/R_konv+c_fluid/t); %čvor fluida
   %A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i-n2)=qm_fluid*c_fluid; %čvor ispod/iznad (ulazni fluid u↙
segment)
   %A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i+n2)=qm_fluid*c_fluid; %čvor ispod/iznad (ulazni fluid u↙
segment)
   C((j-1)*n2+i,1)=-c_fluid/t*temperature((j-1)*n2+i)-↙
temperatura_ulaz_BIT*qm_fluid*cp_fluid;
   elseif(i==n+9) %fluid 3
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+5)=1/R_konv; %stjenka cijevi 3
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-(qm_fluid*cp_fluid+1/R_konv+c_fluid/t); %čvor fluida
   %A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i-n2)=qm_fluid*c_fluid; %čvor ispod/iznad (ulazni fluid u↙
segment)
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i+n2)=qm_fluid*cp_fluid; %čvor ispod/iznad (ulazni fluid u↙
segment)
```

```
   C((j-1)*n2+i,1)=-c_fluid/t*temperature((j-1)*n2+i);
   elseif(i==n+10)%fluid 4
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+6)=1/R_konv; %stjenka cijevi 4
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-(qm_fluid*cp_fluid+1/R_konv+c_fluid/t); %čvor fluida
   %A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i-n2)=qm_fluid*c_fluid; %čvor ispod/iznad (ulazni fluid u segment)
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i+n2)=qm_fluid*cp_fluid; %čvor ispod/iznad (ulazni fluid u segment)
   C((j-1)*n2+i,1)=-c_fluid/t*temperature((j-1)*n2+i);
  end
end

for j=2:m-1 %popunjavanje matrice koefcijenata (A) i C matrice za n x m čvorova !
 for i=1:n2
   k=k+1;
   if(i==1)  %popunjavanje prvog  stupca (bez elemenata u kutevima)
   %A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)-1)=0;
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-1/Rr(j,i)-1/Rr(j,i+1)-2/(Rz(j-1,i)+Rz(j,i))-2/(Rz(j+1,i)+Rz(j,i))-c(j,i)/t;
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i+1)=1/Rr(j,i+1);
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i-n2)=2/(Rz(j-1,i)+Rz(j,i));
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i+n2)=2/(Rz(j+1,i)+Rz(j,i));
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i+n)=1/Rr(j,i); %veza s čvorom koji predstavlja zid BIT-a!
   C((j-1)*n2+i,1)=-c(j,i)/t*temperature((j-1)*n2+i); %-temperatura_cijevi(kk)/Rr(j,i);
  elseif(i<n) %popunjavanje m-2xn-2 dijela matrice
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i-1)=1/Rr(j,i);
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-1/Rr(j,i)-1/Rr(j,i+1)-2/(Rz(j-1,i)+Rz(j,i))-2/(Rz(j+1,i)+Rz(j,i))-c(j,i)/t;
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i+1)=1/Rr(j,i+1);
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i-n2)=2/(Rz(j-1,i)+Rz(j,i));
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i+n2)=2/(Rz(j+1,i)+Rz(j,i));
   C((j-1)*n2+i,1)=-c(j,i)/t*temperature((j-1)*n2+i);
   elseif(i==n) %popunjavanje zadnjeg stupca (bez elemenata u kutevima)
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i-1)=1/Rr(j,i);
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-1/Rr(j,i)-1/Rr(j,i+1)-2/(Rz(j-1,i)+Rz(j,i))-2/(Rz(j+1,i)+Rz(j,i))-c(j,i)/t;
   %A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i+1)=0;
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i-n2)=2/(Rz(j-1,i)+Rz(j,i));
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i+n2)=2/(Rz(j+1,i)+Rz(j,i));
   C((j-1)*n2+i,1)=-c(j,i)/t*temperature((j-1)*n2+i)-temperatura_tla(j)/Rr(j,i+1);
   elseif(i==n+1) %ispuna_plašt; popunjavanje stupca s čvorovima zida BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+3)=1/R_cijev_zid; %cijevi BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+4)=1/R_cijev_zid;
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+5)=1/R_cijev_zid;
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+6)=1/R_cijev_zid;
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-4/R_cijev_zid-2/Rz_ispuna_plast-1/Rr(j,1)-c_ispuna_plast/t;
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i-n2)=1/Rz_ispuna_plast; %čvor ispod/iznad
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i+n2)=1/Rz_ispuna_plast; %čvor ispod/iznad
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i-n)=1/Rr(j,1);          %prvi čvor tla!
   C((j-1)*n2+i,1)=-c_ispuna_plast/t*temperature((j-1)*n2+i);
   elseif(i==n+2) %ispuna_jezgra
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+3)=2/R_cijevB; %cijevi BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+4)=2/R_cijevB; %cijevi BIT-a
```

```
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+5)=2/R_cijevB; %cijevi BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+6)=2/R_cijevB; %cijevi BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-4*2/R_cijevB-2/Rz_ispuna_jezgra-c_ispuna_jezgra/t;
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i-n2)=1/Rz_ispuna_jezgra; %čvor ispod/iznad
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i+n2)=1/Rz_ispuna_jezgra; %čvor ispod/iznad
   C((j-1)*n2+i,1)=-c_ispuna_jezgra/t*temperature((j-1)*n2+i);
   elseif(i==n+3) %cijev 1
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+2)=2/R_cijevB; %jezgra ispune
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+5)=1/R_cijevA; %cijev 3 BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+1)=1/R_cijev_zid; %zid BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+7)=1/R_konv; %fluid u cijev 1
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-2/R_cijevB-1/R_cijevA-1/R_cijev_zid-1/R_konv;
   C((j-1)*n2+i,1)=0;
   elseif(i==n+4) %cijev 2
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+2)=2/R_cijevB; %jezgra ispune
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+6)=1/R_cijevA; %cijev 4 BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+1)=1/R_cijev_zid; %zid BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+8)=1/R_konv; %fluid u cijev 2
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-2/R_cijevB-1/R_cijevA-1/R_cijev_zid-1/R_konv;
   C((j-1)*n2+i,1)=0;
   elseif(i==n+5) %cijev 3
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+2)=2/R_cijevB; %jezgra ispune
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+3)=1/R_cijevA; %cijev 1 BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+1)=1/R_cijev_zid; %zid BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+9)=1/R_konv; %fluid u cijev 3
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-2/R_cijevB-1/R_cijevA-1/R_cijev_zid-1/R_konv;
   C((j-1)*n2+i,1)=0;
   elseif(i==n+6) %cijev 4
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+2)=2/R_cijevB; %jezgra ispune
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+4)=1/R_cijevA; %cijev 2 BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+1)=1/R_cijev_zid; %zid BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+10)=1/R_konv; %fluid u cijev 3
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-2/R_cijevB-1/R_cijevA-1/R_cijev_zid-1/R_konv;
   C((j-1)*n2+i,1)=0;
   elseif(i==n+7) %fluid 1
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+3)=1/R_konv; %stjenka cijevi 1
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-(qm_fluid*cp_fluid+1/R_konv+c_fluid/t); %čvor fluida
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i-n2)=qm_fluid*cp_fluid; %čvor ispod/iznad (ulazni fluid u↙
segment)
   %A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i+n2)=qm_fluid*c_fluid; %čvor ispod/iznad (ulazni fluid u↙
segment)
   C((j-1)*n2+i,1)=-c_fluid/t*temperature((j-1)*n2+i);
   elseif(i==n+8) %fluid 2
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+4)=1/R_konv; %stjenka cijevi 1
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-(qm_fluid*cp_fluid+1/R_konv+c_fluid/t); %čvor fluida
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i-n2)=qm_fluid*cp_fluid; %čvor ispod/iznad (ulazni fluid u↙
segment)
   %A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i+n2)=qm_fluid*c_fluid; %čvor ispod/iznad (ulazni fluid u↙
segment)
   C((j-1)*n2+i,1)=-c_fluid/t*temperature((j-1)*n2+i);
   elseif(i==n+9) %fluid 3
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+5)=1/R_konv; %stjenka cijevi 1
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-(qm_fluid*cp_fluid+1/R_konv+c_fluid/t); %čvor fluida
   %A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i-n2)=qm_fluid*c_fluid; %čvor ispod/iznad (ulazni fluid u↙
segment)
```

```
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i+n2)=qm_fluid*cp_fluid; %čvor ispod/iznad (ulazni fluid u segment)
   C((j-1)*n2+i,1)=-c_fluid/t*temperature((j-1)*n2+i);
   elseif(i==n+10)%fluid 4
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+6)=1/R_konv; %stjenka cijevi 1
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-(qm_fluid*cp_fluid+1/R_konv+c_fluid/t); %čvor fluida
   %A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i-n2)=qm_fluid*c_fluid; %čvor ispod/iznad (ulazni fluid u segment)
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i+n2)=qm_fluid*cp_fluid; %čvor ispod/iznad (ulazni fluid u segment)
   C((j-1)*n2+i,1)=-c_fluid/t*temperature((j-1)*n2+i);
    end
  end
end

j=m; %popunjavanje zadnjeg retka
for i=1:n2
  k=k+1;
  if(i==1)
   %A((j-1)*n2+i,(j-1)*n2+i-1)=0;
   A((j-1)*n2+i,(j-1)*n2+i)=-1/Rr(j,i)-1/Rr(j,i+1)-2/Rz(j,i)-2/(Rz(j-1,i)+Rz(j,i))-c(j,i)/t;
   A((j-1)*n2+i,(j-1)*n2+i+1)=1/Rr(j,i+1);
   A((j-1)*n2+i,(j-1)*n2+i-n2)=2/(Rz(j-1,i)+Rz(j,i));
   %A((j-1)*n2+i,(j-1)*n2+i+n2)=0;
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i+n)=1/Rr(j,i); %veza s čvorom koji predstavlja zid BIT-a! (upitna točnost adrese)
   C((j-1)*n2+i,1)=-c(j,i)/t*temperature((j-1)*n2+i)-temperatura_dno*2/Rz(j,i);
  elseif(i<n)
   A((j-1)*n2+i,(j-1)*n2+i-1)=1/Rr(j,i);
   A((j-1)*n2+i,(j-1)*n2+i)=-1/Rr(j,i)-1/Rr(j,i+1)-2/Rz(j,i)-2/(Rz(j-1,i)+Rz(j,i))-c(j,i)/t;
   A((j-1)*n2+i,(j-1)*n2+i+1)=1/Rr(j,i+1);
   A((j-1)*n2+i,(j-1)*n2+i-n2)=2/(Rz(j-1,i)+Rz(j,i));
   %A((j-1)*n2+i,(j-1)*n2+i+n2)=0;
   C((j-1)*n2+i,1)=-c(j,i)/t*temperature((j-1)*n2+i)-temperatura_dno*2/Rz(j,i);
  elseif(i==n)
   A((j-1)*n2+i,(j-1)*n2+i-1)=1/Rr(j,i);
   A((j-1)*n2+i,(j-1)*n2+i)=-1/Rr(j,i)-1/Rr(j,i+1)-2/Rz(j,i)-2/(Rz(j-1,i)+Rz(j,i))-c(j,i)/t;
   %A((j-1)*n2+i,(j-1)*n2+i+1)=0;
   A((j-1)*n2+i,(j-1)*n2+i-n2)=2/(Rz(j-1,i)+Rz(j,i));
   %A((j-1)*n2+i,(j-1)*n2+i+n2)=0;
   C((j-1)*n2+i,1)=-c(j,i)/t*temperature((j-1)*n2+i)-temperatura_tla(j)./Rr(j,i+1)-temperatura_dno*2/Rz(j,i);
   elseif(i==n+1) %ispuna_plašt; popunjavanje stupca s čvorovima zida BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+3)=1/R_cijev_zid; %cijevi BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+4)=1/R_cijev_zid;
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+5)=1/R_cijev_zid;
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+6)=1/R_cijev_zid;
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-4/R_cijev_zid-1/Rz_ispuna_plast-1/Rr(j,1)-2/Rz(j,1)-c_ispuna_plast/t;
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i-n2)=1/Rz_ispuna_plast; %čvor iznad
   %A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i+n2)=1/Rz_ispuna_plast; %čvor ispod/iznad
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i-n)=1/Rr(j,1);          %prvi čvor tla!
```

```
   C((j-1)*n2+i,1)=-c_ispuna_plast/t*temperature((j-1)*n2+i)-temperatura_dno*2/Rz(j,↙
1);
   elseif(i==n+2) %ispuna_jezgra
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+3)=2/R_cijevB; %cijevi BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+4)=2/R_cijevB; %cijevi BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+5)=2/R_cijevB; %cijevi BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+6)=2/R_cijevB; %cijevi BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-4*2/R_cijevB-1/Rz_ispuna_jezgra-2/Rz(j,1)-↙
c_ispuna_jezgra/t;
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i-n2)=1/Rz_ispuna_jezgra; %čvor ispod/iznad
   %A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i+n2)=1/Rz_ispuna_jezgra; %čvor ispod/iznad
   C((j-1)*n2+i,1)=-c_ispuna_jezgra/t*temperature((j-1)*n2+i)-temperatura_dno*2/Rz(j,↙
1);
   elseif(i==n+3) %cijev 1
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+2)=2/R_cijevB; %jezgra ispune
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+5)=1/R_cijevA; %cijev 3 BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+1)=1/R_cijev_zid; %zid BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+7)=1/R_konv; %fluid u cijev 1
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-2/R_cijevB-1/R_cijevA-1/R_cijev_zid-1/R_konv;
   C((j-1)*n2+i,1)=0;
   elseif(i==n+4) %cijev 2
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+2)=2/R_cijevB; %jezgra ispune
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+6)=1/R_cijevA; %cijev 4 BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+1)=1/R_cijev_zid; %zid BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+8)=1/R_konv; %fluid u cijev 2
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-2/R_cijevB-1/R_cijevA-1/R_cijev_zid-1/R_konv;
   C((j-1)*n2+i,1)=0;
   elseif(i==n+5) %cijev 3
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+2)=2/R_cijevB; %jezgra ispune
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+3)=1/R_cijevA; %cijev 1 BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+1)=1/R_cijev_zid; %zid BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+9)=1/R_konv; %fluid u cijev 3
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-2/R_cijevB-1/R_cijevA-1/R_cijev_zid-1/R_konv;
   C((j-1)*n2+i,1)=0;
   elseif(i==n+6) %cijev 4
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+2)=2/R_cijevB; %jezgra ispune
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+4)=1/R_cijevA; %cijev 2 BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+1)=1/R_cijev_zid; %zid BIT-a
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+10)=1/R_konv; %fluid u cijev 3
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-2/R_cijevB-1/R_cijevA-1/R_cijev_zid-1/R_konv;
   C((j-1)*n2+i,1)=0;
   elseif(i==n+7) %fluid 1
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+3)=1/R_konv; %stjenka cijevi 1
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-(qm_fluid*cp_fluid+1/R_konv+c_fluid/t); %čvor fluida
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i-n2)=qm_fluid*cp_fluid; %čvor ispod/iznad (ulazni fluid u↙
segment)
   %A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i+n2)=qm_fluid*c_fluid; %čvor ispod/iznad (ulazni fluid u↙
segment)
   C((j-1)*n2+i,1)=-c_fluid/t*temperature((j-1)*n2+i);
   elseif(i==n+8) %fluid 2
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+4)=1/R_konv; %stjenka cijevi 1
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-(qm_fluid*cp_fluid+1/R_konv+c_fluid/t); %čvor fluida
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i-n2)=qm_fluid*cp_fluid; %čvor ispod/iznad (ulazni fluid u↙
segment)
   %A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i+n2)=qm_fluid*c_fluid; %čvor ispod/iznad (ulazni fluid u↙
```

```
segment)
   C((j-1)*n2+i,1)=-c_fluid/t*temperature((j-1)*n2+i);
   elseif(i==n+9) %fluid 3
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+5)=1/R_konv; %stjenka cijevi 1
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-(qm_fluid*cp_fluid+1/R_konv+c_fluid/t); %čvor fluida
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i-2)=qm_fluid*cp_fluid; %čvor iz cijevi 2 (ulazni fluid u
segment)
   %A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i+n2)=qm_fluid*c_fluid; %čvor ispod/iznad (ulazni fluid u
segment)
   C((j-1)*n2+i,1)=-c_fluid/t*temperature((j-1)*n2+i);
   elseif(i==n+10)%fluid 4
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+n+6)=1/R_konv; %stjenka cijevi 1
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i)=-(qm_fluid*cp_fluid+1/R_konv+c_fluid/t); %čvor fluida
   A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i-2)=qm_fluid*cp_fluid; %čvor iz cijevi 2 (ulazni fluid u
segment)
   %A((j-1)*n2+i,n2*(j-1)+i+n2)=qm_fluid*c_fluid; %čvor ispod/iznad (ulazni fluid u
segment)
   C((j-1)*n2+i,1)=-c_fluid/t*temperature((j-1)*n2+i);
  end
end

temperature=mldivide(A,C);                  %temperature u prethodnom koraku
%rezultat(1:n*m,kk)=temperature;            %spremanje temperatura u svakom vremenskom
koraku

temp_polje=transpose(reshape(temperature,[n2,m]));
%kraj
```

```
%------------Model dizalice topline---------------------

qm_potrosac=qm_potrosac_zadano;
DT_pov_potr=DT_pov_potr_zadano_gr;
% prvi korak za petlju
Q_kondenzator_gr=snaga_kondenzator_gr;
Q_isparivac_gr=snaga_isparivac_gr;
kontrola1=0;
   while(kontrola1==0)
    kontrola2=0;
   temperature=temperature_prethodni_korak;
       while (kontrola2==0)

        %izračun temperature isparavanja i kondenzacije
        t_isparavanja_gr=DT_pov_bit-Q_isparivac_gr/↙
(qm_bit*cp_fluid*efikasnost_isparivac_gr);
        t_kondenzacije_gr=Q_kondenzator_gr/↙
(qm_potrosac*cp_fluid*efikasnost_kondenzator_gr)+DT_pov_potr;

        p_isparavanja=CoolProp.PropsSI('P','T',t_isparavanja_gr+273.15,'Q',0.5,RT);
        p_kondenzacije=CoolProp.PropsSI('P','T',t_kondenzacije_gr+273.15,'Q',0.5,RT);

        izen_st_kompr=izen_st_kompr_gr_nom*(0.0029*(p_kondenzacije/p_isparavanja)^5-↙
0.0672*(p_kondenzacije/p_isparavanja)^4+0.6094*(p_kondenzacije/p_isparavanja)^3-2.6664↙
*(p_kondenzacije/p_isparavanja)^2+5.5845*(p_kondenzacije/p_isparavanja)-3.4716);
        vol_efikasnost=(-0.0381*(p_kondenzacije/p_isparavanja)+0.9911)/(-0.0381*↙
(p_kondenzacije_gr_nom/p_isparavanja_gr_nom)+0.9911);
        h1=CoolProp.PropsSI('H','T',t_isparavanja_gr+DT_pregrijanje+273.15,'P',↙
p_isparavanja,RT);
        s1=CoolProp.PropsSI('S','T',t_isparavanja_gr+DT_pregrijanje+273.15,'P',↙
p_isparavanja,RT);
        h1_ihx=CoolProp.PropsSI('H','T',t_isparavanja_gr+DT_pregrijanje+DT_ihx+273.↙
15,'P',p_isparavanja,RT);
        s1_ihx=CoolProp.PropsSI('S','T',t_isparavanja_gr+DT_pregrijanje+DT_ihx+273.↙
15,'P',p_isparavanja,RT);
        h2s=CoolProp.PropsSI('H','P',p_kondenzacije,'S',s1_ihx,RT);
        h3=CoolProp.PropsSI('H','T',t_kondenzacije_gr-DT_pothladenje+273.15,'P',↙
p_kondenzacije,RT);
        h3_ihx=h3-(h1_ihx-h1);
        h4=h3_ihx;
        h2=h1_ihx-(h1_ihx-h2s)/izen_st_kompr;
        v1=1/CoolProp.PropsSI('D','P',p_isparavanja,'H',h1_ihx,RT);
        qm_rt=qv_kompresor_gr_nom/v1*vol_efikasnost;
        snaga_isparivac2=(h1-h4)*qm_rt;
        snaga_kondenzator2=(h2-h3)*qm_rt;
        snaga_kompresor2=(h2-h1_ihx)*qm_rt;

        if ((1.01<snaga_isparivac2/Q_isparivac_gr || 0.99↙
>snaga_isparivac2/Q_isparivac_gr  ))
            Q_isparivac_gr=snaga_isparivac2;
            Q_kondenzator_gr=snaga_kondenzator2;
            kontrola2=0;
        else
            kontrola2=1;
```

```
        end

       end
    %izlazni podaci
    DT_pol_bit=DT_pov_bit-snaga_isparivac2/(qm_bit*cp_fluid);
    DT_pol_potr=DT_pov_potr+snaga_kondenzator2/(qm_potrosac*cp_fluid);
    temperatura_ulaz_BIT=DT_pol_bit; %inicijalizacija vrijednosti za model BIT-a i↙
tla!
    tlo_bit_slojevi_n4 %pozivnanje modela tla
    temperatura_izlaz_BIT=temperature(n2);
     if(abs(DT_pov_bit/temperatura_izlaz_BIT)>1.01 || abs↙
(DT_pov_bit/temperatura_izlaz_BIT)<0.99)
         DT_pov_bit=temperature(n2);
     else
        kontrola1=1;
        DT_pov_bit=temperatura_izlaz_BIT;
        temperature_prethodni_korak=temperature;
     end

    end  kontrola1=0;
```

```
%------------Model dizalice topline---------------------

qm_potrosac=qm_potrosac_zadano;
DT_pov_potr=DT_pov_potr_zadano_hl;
% prvi korak za petlju
Q_kondenzator_hl=snaga_kondenzator_hl;
Q_isparivac_hl=snaga_isparivac_hl;
kontrola1=0;
while(kontrola1==0)
    kontrola2=0;
   temperature=temperature_prethodni_korak;
       while (kontrola2==0)
        %izračun temperature isparavanja i kondenzacije
        t_isparavanja_hl=DT_pov_potr-Q_isparivac_hl/↙
(qm_potrosac*cp_fluid*efikasnost_kondenzator_hl);
        t_kondenzacije_hl=Q_kondenzator_hl/(qm_bit*cp_fluid*efikasnost_kondenzator_hl)↙
+DT_pov_bit;

        p_isparavanja=CoolProp.PropsSI('P','T',t_isparavanja_hl+273.15,'Q',0.5,RT);
        p_kondenzacije=CoolProp.PropsSI('P','T',t_kondenzacije_hl+273.15,'Q',0.5,RT);

        izen_st_kompr=izen_st_kompr_hl_nom*(0.0029*(p_kondenzacije/p_isparavanja)^5-↙
0.0672*(p_kondenzacije/p_isparavanja)^4+0.6094*(p_kondenzacije/p_isparavanja)^3-2.6664↙
*(p_kondenzacije/p_isparavanja)^2+5.5845*(p_kondenzacije/p_isparavanja)-3.4716);
        vol_efikasnost=(-0.0381*(p_kondenzacije/p_isparavanja)+0.9911)/(-0.0381*↙
(p_kondenzacije_gr_nom/p_isparavanja_gr_nom)+0.9911);
        h1=CoolProp.PropsSI('H','T',t_isparavanja_hl+DT_pregrijanje+273.15,'P',↙
p_isparavanja,RT);
        s1=CoolProp.PropsSI('S','T',t_isparavanja_hl+DT_pregrijanje+273.15,'P',↙
p_isparavanja,RT);
        h1_ihx=CoolProp.PropsSI('H','T',t_isparavanja_hl+DT_pregrijanje+DT_ihx+273.↙
15,'P',p_isparavanja,RT);
        s1_ihx=CoolProp.PropsSI('S','T',t_isparavanja_hl+DT_pregrijanje+DT_ihx+273.↙
15,'P',p_isparavanja,RT);
        h2s=CoolProp.PropsSI('H','P',p_kondenzacije,'S',s1_ihx,RT);
        h3=CoolProp.PropsSI('H','T',t_kondenzacije_hl-DT_pothladenje+273.15,'P',↙
p_kondenzacije,RT);
        h3_ihx=h3-(h1_ihx-h1);
        h4=h3_ihx;
        h2=h1_ihx-(h1_ihx-h2s)/izen_st_kompr;
        v1=1/CoolProp.PropsSI('D','P',p_isparavanja,'H',h1_ihx,RT);
        qm_rt=qv_kompresor_hl_nom/v1*vol_efikasnost;
        snaga_isparivac2=(h1-h4)*qm_rt;
        snaga_kondenzator2=(h2-h3)*qm_rt;
        snaga_kompresor2=(h2-h1_ihx)*qm_rt;
        if ((1.01<snaga_isparivac2/Q_isparivac_hl || 0.99↙
>snaga_isparivac2/Q_isparivac_hl  ))
            Q_isparivac_hl=snaga_isparivac2;
            Q_kondenzator_hl=snaga_kondenzator2;
            kontrola2=0;
        else
            kontrola2=1;
        end
```

```
       end
    %izlazni podaci
    DT_pol_bit=DT_pov_bit+snaga_kondenzator2/(qm_bit*cp_fluid);
    DT_pol_potr=DT_pov_potr-snaga_isparivac2/(qm_potrosac*cp_fluid);
    temperatura_ulaz_BIT=DT_pol_bit; %inicijalizacija vrijednosti za model BIT-a i tla!
    tlo_bit_slojevi_n4 %pozivnanje modela tla
    temperatura_izlaz_BIT=temperature(n2);
     if(abs(DT_pov_bit/temperatura_izlaz_BIT)>1.01 || abs(DT_pov_bit/temperatura_izlaz_BIT)<0.99)
         DT_pov_bit=temperature(n2);
     else
        kontrola1=1;
        DT_pov_bit=temperatura_izlaz_BIT;
        temperature_prethodni_korak=temperature;
     end

    end  kontrola1=0;
```

```
%inicijalizacija podataka
Q_kondenzator_gr=snaga_kondenzator_gr;
Q_isparivac_gr=snaga_isparivac_gr;
Q_kondenzator_hl=snaga_kondenzator_hl;
Q_isparivac_hl=snaga_isparivac_hl;
qm_bit=qm_bit_zadano;
qm_potrosac=qm_potrosac_zadano;
kontrola2=0;
tttt=1;
Q_isparivac_gr_mapa(1:20)=zeros;
Q_kondenzator_gr_mapa(1:20)=zeros;

    DT_pov_potr=DT_pov_potr_zadano_gr;
    DT_pov_bit=-10;
while tttt<=31 %grijanje

    while (kontrola2==0)
        t_isparavanja_gr=DT_pov_bit-Q_isparivac_gr/↙
(qm_bit*cp_fluid*efikasnost_isparivac_gr);
        t_kondenzacije_gr=Q_kondenzator_gr/↙
(qm_potrosac*cp_fluid*efikasnost_kondenzator_gr)+DT_pov_potr;

        p_isparavanja=CoolProp.PropsSI('P','T',t_isparavanja_gr+273.15,'Q',0.5,RT);
        p_kondenzacije=CoolProp.PropsSI('P','T',t_kondenzacije_gr+273.15,'Q',0.5,RT);

        izen_st_kompr=izen_st_kompr_gr_nom*(0.0029*(p_kondenzacije/p_isparavanja)^5-↙
0.0672*(p_kondenzacije/p_isparavanja)^4+0.6094*(p_kondenzacije/p_isparavanja)^3-2.6664↙
*(p_kondenzacije/p_isparavanja)^2+5.5845*(p_kondenzacije/p_isparavanja)-3.4716);
        vol_efikasnost=(-0.0381*(p_kondenzacije/p_isparavanja)+0.9911)/(-0.0381*↙
(p_kondenzacije_gr_nom/p_isparavanja_hl_nom)+0.9911);
        h1=CoolProp.PropsSI('H','T',t_isparavanja_gr+DT_pregrijanje+273.15,'P',↙
p_isparavanja,RT);
        s1=CoolProp.PropsSI('S','T',t_isparavanja_gr+DT_pregrijanje+273.15,'P',↙
p_isparavanja,RT);
        h1_ihx=CoolProp.PropsSI('H','T',t_isparavanja_gr+DT_pregrijanje+DT_ihx+273.↙
15,'P',p_isparavanja,RT);
        s1_ihx=CoolProp.PropsSI('S','T',t_isparavanja_gr+DT_pregrijanje+DT_ihx+273.↙
15,'P',p_isparavanja,RT);
        h2s=CoolProp.PropsSI('H','P',p_kondenzacije,'S',s1_ihx,RT);
        h3=CoolProp.PropsSI('H','T',t_kondenzacije_gr-DT_pothladenje+273.15,'P',↙
p_kondenzacije,RT);
        h3_ihx=h3-(h1_ihx-h1);
        h4=h3_ihx;
        h2=h1_ihx-(h1_ihx-h2s)/izen_st_kompr;
        v1=1/CoolProp.PropsSI('D','P',p_isparavanja,'H',h1_ihx,RT);
        qm_rt=qv_kompresor_gr_nom/v1*vol_efikasnost;
         snaga_isparivac2=(h1-h4)*qm_rt;
        snaga_kondenzator2=(h2-h3)*qm_rt;
        snaga_kompresor2=(h2-h1_ihx)*qm_rt;
        if ((1.0001<snaga_isparivac2/Q_isparivac_gr || 0.9999↙
>snaga_isparivac2/Q_isparivac_gr  ))
            Q_isparivac_gr=snaga_isparivac2;
            Q_kondenzator_gr=snaga_kondenzator2;
            kontrola2=0;
        else
```

```
            kontrola2=1;
           Q_isparivac_gr_mapa(tttt)=snaga_isparivac2;
             Q_kondenzator_gr_mapa(tttt)=snaga_kondenzator2;
             Q_kompresor_gr_mapa(tttt)=snaga_kompresor2;
             DT_pov_bit_gr_mapa(tttt)=DT_pov_bit;
             t_ispa(tttt)=t_isparavanja_gr;
        end
    end
    kontrola2=0;
    tttt=tttt+1;
    DT_pov_bit=DT_pov_bit+1;
end
kontrola2=1;
tttt=0;
    DT_pov_potr=DT_pov_potr_zadano_hl;
    DT_pov_bit=30;
while tttt<=31 %hlađenje

    while (kontrola2==0)
        t_isparavanja_hl=DT_pov_potr-Q_isparivac_hl/↙
(qm_potrosac*cp_fluid*efikasnost_kondenzator_hl);
        t_kondenzacije_hl=Q_kondenzator_hl/(qm_bit*cp_fluid*efikasnost_kondenzator_hl)↙
+DT_pov_bit;

        p_isparavanja=CoolProp.PropsSI('P','T',t_isparavanja_hl+273.15,'Q',0.5,RT);
        p_kondenzacije=CoolProp.PropsSI('P','T',t_kondenzacije_hl+273.15,'Q',0.5,RT);

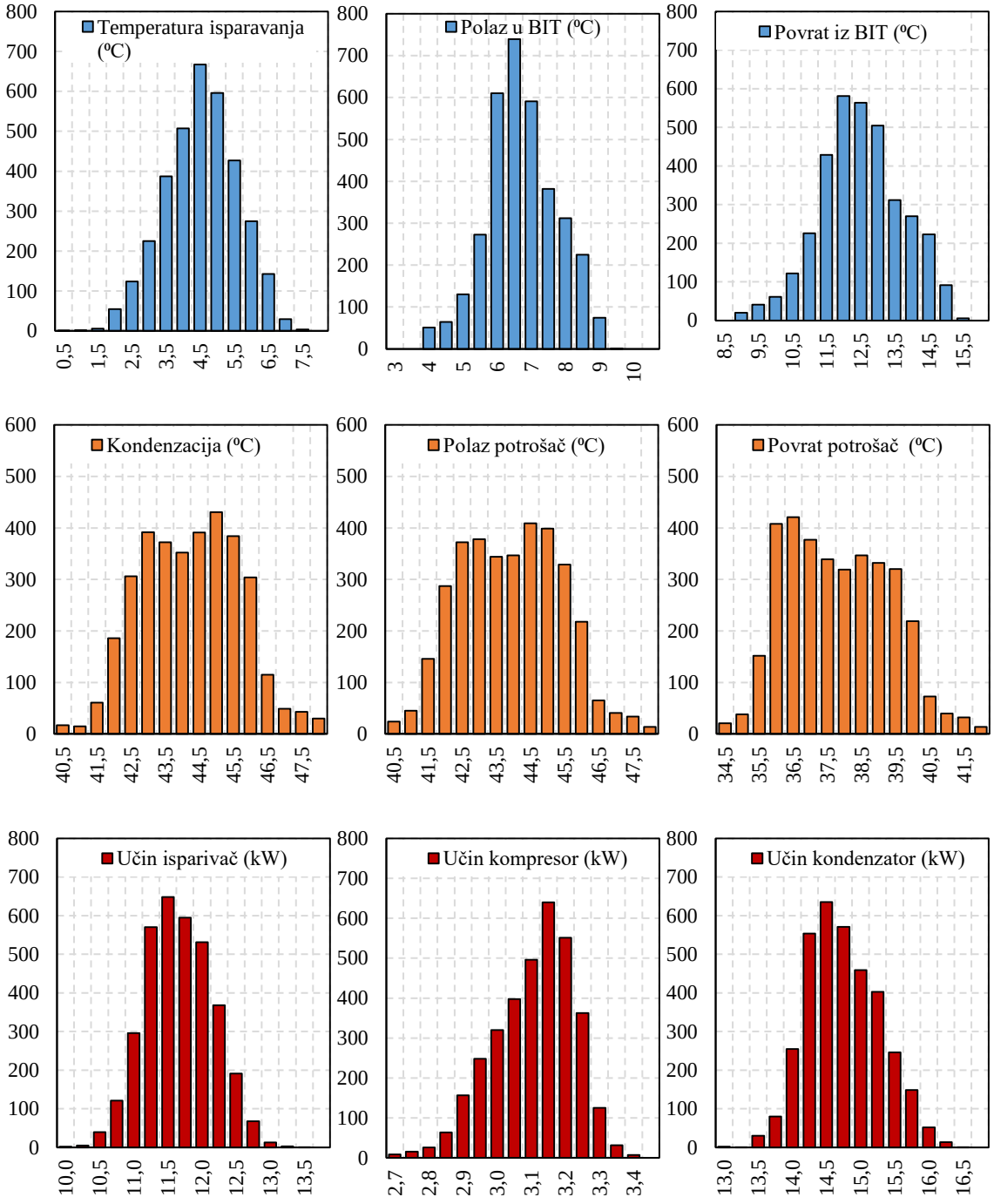
        izen_st_kompr=izen_st_kompr_gr_nom*(0.0029*(p_kondenzacije/p_isparavanja)^5-↙
0.0672*(p_kondenzacije/p_isparavanja)^4+0.6094*(p_kondenzacije/p_isparavanja)^3-2.6664↙
*(p_kondenzacije/p_isparavanja)^2+5.5845*(p_kondenzacije/p_isparavanja)-3.4716);
        vol_efikasnost=(-0.0381*(p_kondenzacije/p_isparavanja)+0.9911)/(-0.0381*↙
(p_kondenzacije_gr_nom/p_isparavanja_hl_nom)+0.9911);
        h1=CoolProp.PropsSI('H','T',t_isparavanja_hl+DT_pregrijanje+273.15,'P',↙
p_isparavanja,RT);
        s1=CoolProp.PropsSI('S','T',t_isparavanja_hl+DT_pregrijanje+273.15,'P',↙
p_isparavanja,RT);
        h1_ihx=CoolProp.PropsSI('H','T',t_isparavanja_hl+DT_pregrijanje+DT_ihx+273.↙
15,'P',p_isparavanja,RT);
        s1_ihx=CoolProp.PropsSI('S','T',t_isparavanja_hl+DT_pregrijanje+DT_ihx+273.↙
15,'P',p_isparavanja,RT);
        h2s=CoolProp.PropsSI('H','P',p_kondenzacije,'S',s1_ihx,RT);
        h3=CoolProp.PropsSI('H','T',t_kondenzacije_hl-DT_pothladenje+273.15,'P',↙
p_kondenzacije,RT);
        h3_ihx=h3-(h1_ihx-h1);
        h4=h3_ihx;
        h2=h1_ihx-(h1_ihx-h2s)/izen_st_kompr;
        v1=1/CoolProp.PropsSI('D','P',p_isparavanja,'H',h1_ihx,RT);
        qm_rt=qv_kompresor_hl_nom/v1*vol_efikasnost;
        snaga_isparivac2=(h1-h4)*qm_rt;
        snaga_kondenzator2=(h2-h3)*qm_rt;
        snaga_kompresor2=(h2-h1_ihx)*qm_rt;
        if ((1.0001<snaga_isparivac2/Q_isparivac_hl || 0.9999↙
>snaga_isparivac2/Q_isparivac_hl  ))
            Q_isparivac_hl=snaga_isparivac2;
            Q_kondenzator_hl=snaga_kondenzator2;
```

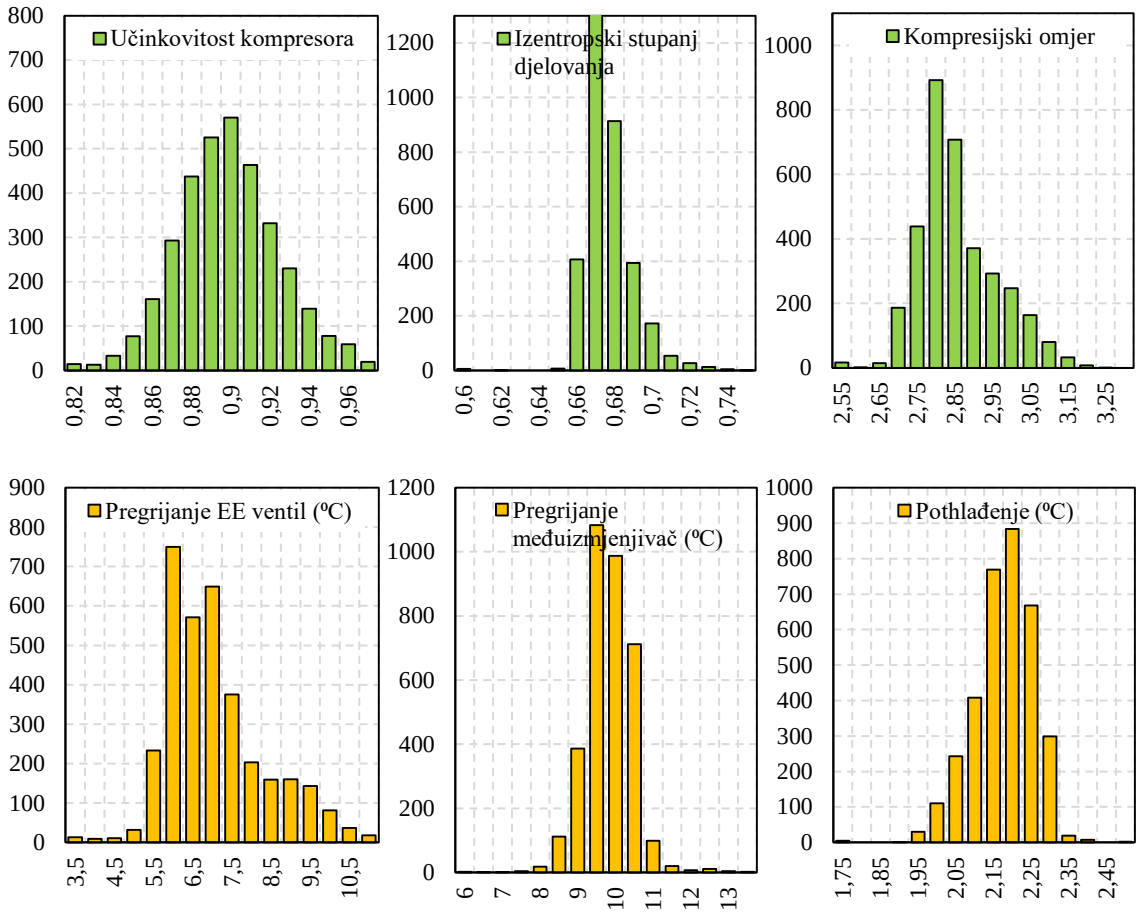
```
            kontrola2=0;
        else
            kontrola2=1;
           Q_isparivac_hl_mapa(tttt)=snaga_isparivac2;
             Q_kondenzator_hl_mapa(tttt)=snaga_kondenzator2;
             DT_pov_bit_hl_mapa(tttt)=DT_pov_bit;
        end
    end
    kontrola2=0;
    tttt=tttt+1;
    DT_pov_bit=DT_pov_bit+1;
end

    p_gr=polyfit(DT_pov_bit_gr_mapa,Q_kondenzator_gr_mapa,2);
    p_hl=polyfit(DT_pov_bit_hl_mapa,Q_isparivac_hl_mapa,2;

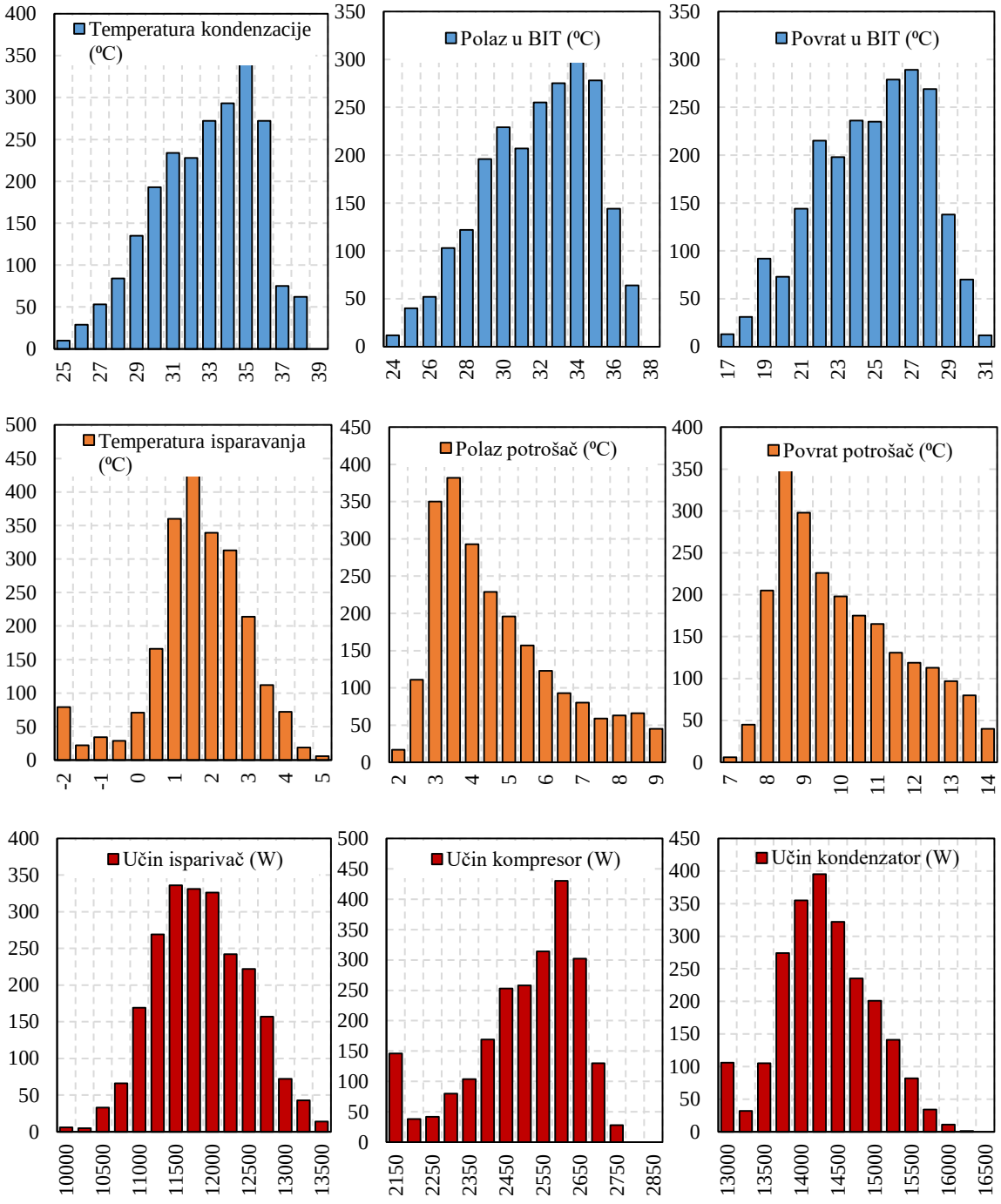
%kraj
```

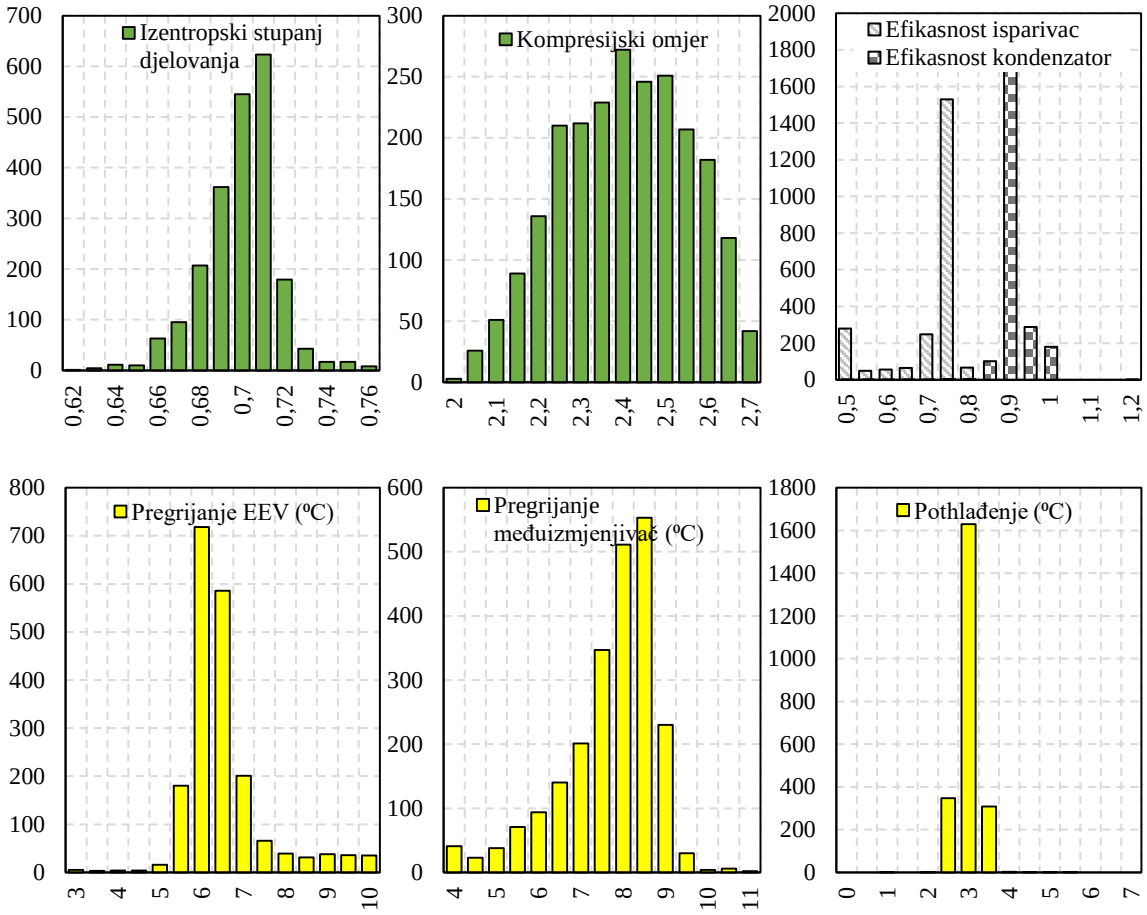
PRILOG B: Radni parametri dizalice topline u režimu grijanja




Učinkovitost kompresora
0,82
0,84
0,86
0,88
0,9
0,92
0,94
0,96
Izentropski stupanj djelovanja
0,6
0,62
0,64
0,66
0,68
0,7
0,72
0,74
Kompresijski omjer
2,55
2,65
2,75
2,85
2,95
3,05
3,15
3,25
Pregrijanje EE ventil (ºC)
3,5
4,5
5,5
6,5
7,5
8,5
9,5
10,5
Pregrijanje međuizmjenjivač (ºC)
6
7
8
9
10
11
12
13
Pothlađenje (ºC)
1,75
1,85
1,95
2,05
2,15
2,25
2,35
2,45

PRILOG C: Radni parametri dizalice topline u režimu hlađenja




Izentropski stupanj djelovanja
Kompresijski omjer
Efikasnost isparivac
Efikasnost kondenzator
Pregrijanje EEV (ºC)
Pregrijanje međuizmjenjivač (ºC)
Pothlađenje (ºC)