

Utjecaj svojstava toplinskih spremnika na sezonsku učinkovitost geotermalne dizalice topline

Tremac, Filip

Master's thesis / Diplomski rad

2016

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:235:718828>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-08**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



DIPLOMSKI RAD

Filip Tremac

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Vladimir Soldo, dipl. ing.

Mag. ing. mech. Luka Boban, dipl. ing.

Student:

Filip Tremac

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorima prof. Vladimiru Soldi i Luki Bobanu te kolegama Juri Stošiću i Eugenu Filipoviću na pruženoj pomoći i savjetima prilikom izrade ovog rada.

Veliku zahvalu dugujem svojoj obitelji, prijateljima i djevojci za strpljenje i pruženu podršku tijekom cijelog trajanja studija.

Filip Tremac



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Filip TREMAC**

Mat. br.: 0035186143

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj svojstava toplinskih spremnika na sezonsku učinkovitost geotermalne dizalice topline**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of heat source/sink properties on seasonal efficiency of the ground coupled heat pumps**

Opis zadatka:

Učinkovitost dizalice topline/rashladnog uređaja određena je temperaturama i svojstvima toplinskih spremnika koji sudjeluju u izmjeni topline. Toplinska svojstva tla kao toplinskog spremnika određuju se testom toplinskog odziva tla (engl. Thermal Response Test – TRT) koji je proveden na lokaciji Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Za poznate ulazne podatke o godišnjoj potrebnoj toplinskoj energiji za grijanje i hlađenje promatrane zgrade i svojstava tla potrebno je dimenzionirati polje bušotinskih izmjenjivača topline korištenjem programskog paketa EED (Earth Energy Designer), te usporediti s postojećim analitičkim modelima.

Dobiveno polje bušotina i sustav geotermalne dizalice topline potrebno je modelirati u programskom paketu TRNSYS s ciljem određivanja sezonske učinkovitosti sustava dizalice topline.

Rad treba sadržavati:

1. Dimenzioniranje polja bušotinskih izmjenjivača topline za grijanje i hlađenje promatrane zgrade.
2. Analizu utjecaja toplinske provodnosti tla i ispune bušotine na sezonsku učinkovitost sustava u režimu grijanja i hlađenja (SCOP i SEER).
3. Analizu utjecaja temperaturnog režima (vrste ogrjevnih/rashladnih tijela) i volumena akumulacijskog spremnika na učinkovitost sustava.

Ulazni podaci za proračun dostupni kod mentora.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

29. rujna 2016.

Rok predaje rada:

1. prosinca 2016.

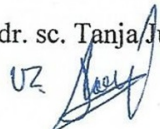
Predviđeni datumi obrane:

7., 8. i 9. prosinca 2016.

Zadatak zadao:


Dr.sc. Vladimir Soldo, izv.prof.

Predsjednica Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	IV
POPIS DIJAGRAMA	V
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK	IX
SUMMARY	X
1. UVOD	1
2. TEORIJSKE OSNOVE	2
2.1. Općenito o dizalicama topline	2
2.2. Princip rada dizalica topline	2
2.3. Toplinski izvori dizalica topline	6
2.3.1. Zrak kao toplinski izvor	7
2.3.2. Površinske vode kao toplinski izvor	9
2.3.3. Podzemene vode kao toplinski izvor	9
2.3.4. Sunce kao toplinski izvor	11
2.3.5. Otpadna toplina kao toplinski izvor	12
2.3.6. Tlo kao toplinski izvor	12
2.4. Bušotinski izmjenjivač topline	15
2.4.1. Prijelaz topline u bušotinskom izmjenjivaču topline	17
3. OSVRT NA PROVEDENO MJERENJE TOPLINSKOG ODZIVA TLA NA LOKACIJI FSB-a	20
3.1. Karakteristike ispitivane bušotine	21
3.2. Opis provedenih mjerenja	22
3.3. Rezultati mjerenja	24
3.4. Simulacija toplinskog odziva tla u TRNSYS-u	27
3.4.1. Rezultati simulacije TRT-a	29
3.5. Zaključak uz provedena mjerenja i simulacije	34

4. MODELIRANJE SUSTAVA GRIJANJA U RAČUNALNOM PROGRAMU	
TRNSYS.....	35
4.1. Model zgrade.....	36
4.2. Model toplinskog izvora	38
4.3. Modeliranje sustava dizalice topline i spremnika vode.....	41
4.4. Modeliranje sustava grijanja	42
4.5. Modeliranje regulacijskog sustava i opis rada simulacije.....	43
5. DIMENZIONIRANJE POLJA BUŠOTINSKIH IZMJENJIVAČA TOPLINE.....	47
5.1. Dimenzioniranje polja BIT-a upotrebom EED-a.....	48
5.2. Dimenzioniranje polja BIT-a prema Ingersollu i Zobelu.....	50
5.3. Usporedba dobivenih rezultata korištenjem analitičkih modela i računalnog programa	
50	
6. REZULTATI I KOMENTAR SIMULACIJE.....	52
6.1. Utjecaj toplinske provodnosti tla na toplinski množitelj dizalice topline.....	53
6.2. Utjecaj promjene volumena spremnika vode na toplinski množitelj dizalice topline	
55	
6.3. Utjecaj režima grijanja na toplinski množitelj dizalice topline.....	56
6.4. Utjecaj koeficijenta toplinske provodnosti ispune bušotine na SCOP	57
6.5. Kritički osvrt na rezultate simulacije	58
7. ZAKLJUČAK.....	60
LITERATURA.....	61
PRILOZI.....	63

POPIS SLIKA

Slika 1.	Shema ljevokretnog procesa [3].....	3
Slika 2.	Ljevokretni procesi: a) rashladni, b) ogrjevni i c) rashladno-ogrjevni [4]	3
Slika 3.	T-s dijagram rada dizalice topline [4]	4
Slika 4.	Usporedba učinkovitosti i djelotvornosti toplinskih izvora [1]	7
Slika 5.	Ovisnost COP-a o temperaturi okoliša [4]	8
Slika 6.	Shema sustava dizalice topline sa zrakom kao toplinskim izvorom [4].....	8
Slika 7.	Shema sustava dizalice topline koja koristi morsku vodu kao izvor topline [4]	9
Slika 8.	Shema sustava dizalice topline koja koristi podzemnu vodu kao toplinski izvor .	10
Slika 9.	Shema sustava solarne dizalice topline [4].....	11
Slika 10.	Shema sustava dizalice topline s horizontalnim izmjenjivačima položenim u tlo	13
Slika 11.	Shema sustava dizalice topline sa bušotinskim izmjenjivačem topline [2].....	15
Slika 12.	Jednostruka U-cijev i koaksijalni bušotinski izmjenjivač topline [7]	16
Slika 13.	Prikaz komponenti toplinskog otpora tla.....	18
Slika 14.	Shematski prikaz mjerne linije TRT uređaja [2].....	20
Slika 15.	a) Dvostruka U-cijev s utegom; b) Poprečni presjek bušotine s izmjenjivačem ..	21
Slika 16.	Dijagram toka provedenih mjerenja [2]	22
Slika 17.	Shematski prikaz pozicija termoparova postavljenih po obodu bušotine [2]	23
Slika 18.	Shema modela kojim se simulira kombinacija različitih toplinskih tokova u različitim vremenskim intervalima [2]	28
Slika 19.	Jednostavna shema simuliranog sustava	35
Slika 20.	Pojednostavljena shema simulacije iz TRNSYS-a - bez sustava regulacije.....	36
Slika 21.	Shema simulacije u TRNSYS-u za određivanje godišnje potrebne energije za grijanje prostora	37
Slika 22.	Shema modela sustava toplinskog izvora.....	40
Slika 23.	Shema modela sustava dizalice topline i spremnika vode.....	41
Slika 24.	Shema modela sustava grijanja	43
Slika 25.	Potpuna shema simulacije u TRNSYS-u – s regulacijskim sustavom i komponentama za ispis podataka.....	46
Slika 26.	Primjer rezultata jedne simulacije u TRNSYS-u	52

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba najčešćih toplinskih izvora dizalica topline [9].....	14
Tablica 2. Rezultati TRT mjerenja provedenih na lokaciji FSB-a [2].....	24
Tablica 3. Karakteristike modela zgrade	37
Tablica 4. Parametri komponente Type 557b	39
Tablica 5. Parametri komponente dizalice topline Type 927.....	42
Tablica 6. Parametri komponente spremnika vode Type 534.....	42
Tablica 7. Parametri komponente cijevi Type 604b.....	45
Tablica 8. Ulazni parametri i rezultati simulacije u EED-u.....	49

POPIS DIJAGRAMA

Dijagram 1.	Temperature fluida kroz BIT tijekom provedbe prvog TRT-a [2]	25
Dijagram 2.	3D prikaz ovisnosti temperaturnog profila po dubini bušotine o vremenu tijekom prvog TRT-a [2]	25
Dijagram 3.	Temperature fluida kroz BIT tijekom provedbe drugog TRT-a [2]	26
Dijagram 4.	3D prikaz ovisnosti temperaturnog profila po dubini bušotine o vremenu tijekom drugog TRT-a [2]	26
Dijagram 5.	Promjena parametara procesa uzrokovana početnim toplinskom tokom od 8 kW u trajanju od jednog sat [2].....	29
Dijagram 6.	Promjena parametara procesa uzrokovana početnim toplinskom tokom od 8 kW u trajanju od osam sati [2].....	29
Dijagram 7.	Odstupanje efektivne toplinske provodnosti tla od referentne vrijednosti ovisno o vremenu razmatranja rezultata dobivenih simulacijom (8 kW na 4 kW) [2] 30	
Dijagram 8.	Uvećani prikaz odstupanja efektivne toplinske provodnosti tla od referentne vrijednosti ovisno o vremenu razmatranja rezultata dobivenih simulacijom (8 kW na 4 kW) [2].....	30
Dijagram 9.	Promjena parametara procesa uzrokovana početnim toplinskom tokom od 10 kW u trajanju od jednog sat [2].....	31
Dijagram 10.	Promjena parametara procesa uzrokovana početnim toplinskom tokom od 10 kW u trajanju od osam sati.....	32
Dijagram 11.	Odstupanje efektivne toplinske provodnosti tla od referentne vrijednosti ovisno o vremenu razmatranja rezultata dobivenih simulacijom (10 kW na 5 kW) [2] 32	
Dijagram 12.	Uvećani prikaz odstupanja efektivne toplinske provodnosti tla od referentne vrijednosti ovisno o vremenu razmatranja rezultata dobivenih simulacijom (10 kW na 5 kW) [2]	33
Dijagram 13.	Potrebna energija za grijanje modela zgrade po mjesecima.....	38
Dijagram 14.	Usporedba potrebnih duljina BIT-a	50
Dijagram 15.	Ovisnost SCOP-a o toplinskoj provodnosti tla.....	53
Dijagram 16.	Kretanje COP-a kroz godinu	54

Dijagram 17.	Ovisnost SCOP-a o volumenu spremnika vode	55
Dijagram 18.	Kretanje COP-a kroz godinu u ovisnosti o volumenu spremnika vode.....	56
Dijagram 19	Krivulje grijanja korištene u simulaciji.....	56
Dijagram 20	Ovisnost SCOP-a o režimu grijanja.....	57
Dijagram 21	Ovisnost SCOP-a o toplinskoj provodnosti tla za umanjeni model zgrade .	58

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a	m^2/s	Koeficijent temperaturne provodnosti
c_p	$kJ/(kgK)$	Specifični toplinski kapacitet
d	m	Promjer
d_u	m	Unutarnji promjer U-cijevi
E_{res}	kJ	Obnovljivi dio toplinske energije isporučene za grijanje
$H_{bušotine}$	m	Duljina bušotinskog izmjenjivača topline
L_{cijevi}	m	Duljina cijevi
L_{IZ}	m	Potrebna duljina BIT-a prema Ingersollu i Zobelu
n	$[-]$	Broj bušotina
p_i	bar	Tlak isparivanja
p_k	bar	Tlak kondenzacije
s	m	Razmak između bušotina
Q	kJ	Toplinska energija
Q_i	kJ	Toplinska energija preuzeta na isparivaču
$Q_{isporučeno}$	kJ	Ukupna godišnja isporučena energija za grijanje
Q_k	kJ	Toplinska energija predana na kondenzatoru
R_b	$(m^2K)/W$	Toplinski otpor bušotine
R_{cijev}	$(m^2K)/W$	Toplinski otpor cijevi
Re	$[-]$	Reynoldsova značajka
R_f	$(m^2K)/W$	Toplinski otpor fluida
R_g	$(m^2K)/W$	Toplinski otpor tla
R_{ispuna}	$(m^2K)/W$	Otpor ispune
r	m	Radijus
r_u	m	Unutarnji radijus cijevi
r_v	m	Vanjski radijus cijevi
T	$^{\circ}C$	Temperatura
T_b	$^{\circ}C$	Temperatura stijenke bušotine

T_f	°C	Temperatura fluida
T_g	°C	Temperatura toplijeg toplinskog spremnika
T_{gr}	°C	Temperatura neporemećenog tla
T_i	°C	Temperatura isparivanja
T_k	°C	Temperatura kondenzacije
T_{ok}	°C	Temperatura okoliša
T_{pol}	°C	Temperatura polaza grijanja
T_w	°C	Srednja temperatura sekundarnog radnog medija u cijevima sonde BIT-a
T_0	°C	Temperatura hladnijeg toplinskog spremnika
U	W/(m ² K)	Koeficijent prijelaza topline građevinskog elementa
V	m ³	Volumen
W	kJ	Rad za pogon kompresora
\dot{W}	W	Snaga kompresora
w	m/s	Brzina strujanja fluida u cijevi
α	W/(m ² K)	Koeficijent prijelaza topline
$\varepsilon_{gr} (COP)$	[-]	Toplinski množitelj
$\varepsilon_{gr,G} (SPF)$	[-]	Godišnji toplinski množitelj
$\varepsilon_{hl} (EER)$	[-]	Faktor hlađenja
η_{el}	[-]	Efikasnost proizvodnje električne energije
λ	W/(m K)	Koeficijent toplinske provodnosti
λ_{cijev}	W/(m K)	Koeficijent toplinske provodnosti cijevi
λ_{ispuna}	W/(m K)	Koeficijent toplinske provodnosti ispune
ρ	kg/m ³	Gustoća
Φ	W	Toplinski tok
$\Phi_{grijanja}$	W	Ogrjevni učin dizalice topline
$\sum_{god} Q_{gr}$	kJ	Ukupno isporučena energija dizalice topline za grijanje
$\sum_{god} E_{sust}$	kJ	Ukupna uložena električna energija za pogon sustava dizalice topline

SAŽETAK

U ovom Diplomskom radu detaljno je opisana izrada i rezultati simulacije sustava grijanja s dizalicom topline, koja koristi tlo kao toplinski spremnik, u računalnom programu TRNSYS. Dizalica topline toplinsku energiju s tлом izmjenjuje pomoću bušotinskog izmjenjivača topline (u daljnjem tekstu: BIT). Svojstva tla i BIT-a preuzeta su iz rada „Eksperimentalno i numeričko određivanje toplinskih svojstava tla za geotermalne dizalice topline“ [2] u kojem je opisano provedeno mjerenje i računalna simulacija toplinskog odziva tla na lokaciji Fakulteta strojarstva i brodogradnje. U Diplomskom radu analiziran je utjecaj toplinske provodnosti tla, toplinske provodnosti ispune bušotine, volumena spremnika za vodu te režima grijanja na toplinski množitelj (COP) dizalice topline.

Ključne riječi: Dizalica topline, toplinski množitelj (COP), bušotinski izmjenjivač topline (BIT), TRNSYS, toplinski odziv tla

SUMMARY

This Master Thesis contains detailed description of ground source heat pump heating system modelling in TRNSYS. Heat pump gathers heat energy from the ground using borehole heat exchangers (BHE). Ground and BHE parameters are taken over from „Eksperimentalno i numeričko određivanje toplinskih svojstava tla za geotermalne dizalice topline“ [2], in which conducted thermal response test and its computer simulation in TRNSYS are described. BHE's location is at the site of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb. Ground's and heat pump system's parameters impact on heat pump's COP is analyzed in this work, respectively: ground thermal conductivity, borehole filling thermal conductivity, water storage tank volume and heating temperature regime.

Key words: Heat pump, borehole heat exchanger (BHE), thermal response test, TRNSYS, coefficient of performance (COP)

1. UVOD

Suvremeni način života omogućio je čovjeku mnogo lagodniji život no što je to bilo u bilo kojem trenutku povijesti. Uz sve povlastice modernog života, za očekivati je i neke negativne posljedice. Jedna od najutjecajnijih posljedica, posebno na zemljinu klimu, je upotreba energije koja je višestruko narasla u odnosu na sredinu 20. stoljeća. Zbog toga je posljednjih desetljeća zaživio trend smanjenja upotrebe energije, a s time i povećanja upotrebe obnovljivih izvora energije.

Dizalice topline ubrajaju se u obnovljive izvore ukoliko im je godišnji toplinski množitelj veći od 2,88 (uz uvjet da je iskoristivost proizvodnje električne energije 40%). One su postale vrlo popularne te se njihova tehnologija ubrzano razvija. U ovom radu naglasak će biti na efikasnosti rada dizalice topline koja koristi tlo kao toplinski izvor, a takva vrsta dizalica topline jedna je od najbrže rastućih po broju instaliranih jedinica posljednjih godina u Europi. Analizirat će se utjecaj svojstava tla te parametara rada sustava na efikasnost dizalice topline korištenjem računalnih simulacija. Očekuje se povećanje toplinskog množitelja dizalice topline povećanjem toplinske provodnosti tla i ispune bušotine te volumena spremnika vode. Također, očekuje se povećanje toplinskog množitelja za slučaj nižeg temperaturnog režima sustava grijanja. Provedene simulacije u računalnom programu TRNSYS nadovezane su na provedeno TRT ispitivanje na bušotinskom izmjenjivaču topline na lokaciji Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Spomenuto istraživanje pretočeno je u rad [2] koji je predan na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade.

U dogovoru s mentorom Diplomskog rada, hlađenje modelirane zgrade nije obrađeno u ovom radu.

2. TEORIJSKE OSNOVE

2.1. Općenito o dizalicama topline

Dizalice topline (eng. Heat pumps, njem. Wärmepumpen), u Hrvatskoj još poznate pod nazivom toplinske pumpe ili toplinske crpke, su uređaji koji prenose toplinu sa toplinskog spremnika niže temperature na toplinski spremnik više temperature uz utrošak rada s ciljem iskorištenja energije [4]. Dizalice topline nalaze se u svim veličinama i različitim primjenama, od najmanjih za grijanje stambenih prostora do velikih uređaja korištenih u industrijskim postrojenjima. Prva dizalica topline, instalirana kao jedini izvor grijanja, ugrađena je u gradskoj vijećnici u Zürichu 1939. godine. Kao toplinski izvor koristila se riječna voda. U Hrvatskoj, prva dizalica topline ugrađena je u Lučkom terminalu u Splitu 1979. godine. učinka grijanja 2x375 kW na temperaturnom režimu 45°/40° te učinka hlađenja 600 kW, temperaturnog režima 12°/7°.

S obzirom da je za pokretanje svakog ljevokretnog procesa, pa tako i za dizalicu topline, potrebno uložiti energiju, dizalice topline mogu se podijeliti na:

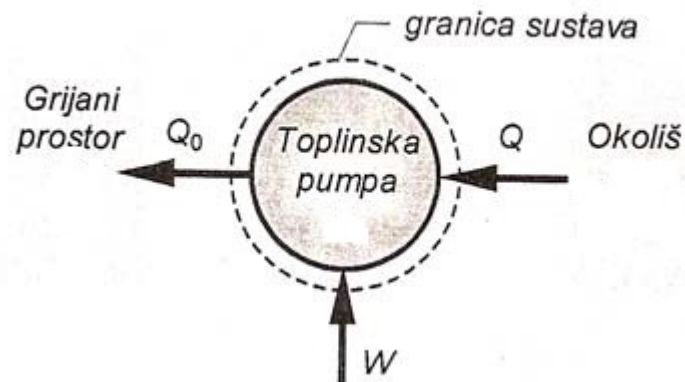
- Kompresijske uređaje – koriste mehanički rad za pogon kompresora i pumpi
- Apsorpcijske uređaje – koriste toplinsku energiju za pogon uređaja

U sustavu koji će se analizirati u ovom radu korištena je kompresijska dizalica topline.

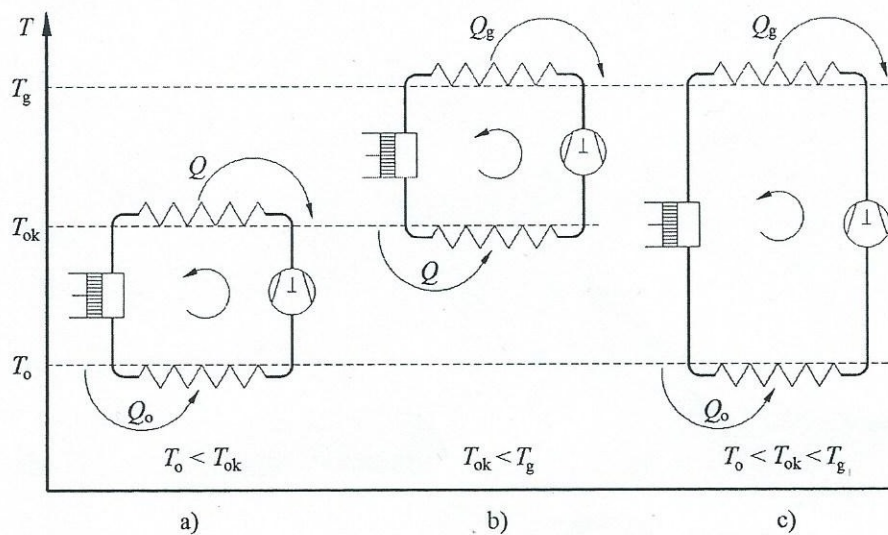
2.2. Princip rada dizalica topline

Dizalice topline funkcioniraju na principu ljevokretnog kružnog procesa. S obzirom na način iskorištenja energije ljevokretni kružni procesi dijele se na rashladne, ogrjevne i rashladno-ogrjevne procese. Nužni uvjet za realizaciju ljevokretnog kružnog procesa je raspoloživost dva toplinska spremnika različitih temperatura:

- Toplinski spremnik niže temperature ili toplinski izvor: toplinski spremnik od kojeg toplinu dizalica topline preuzima toplinsku energiju. Zrak, voda, tlo, otpadna toplina i direktno Sunčevo zračenje neki su od primjera toplinskih izvora
- Toplinski spremnik više temperature ili toplinski ponor: toplinski spremnik kojem dizalica topline predaje toplinsku energiju. Neki od primjera toplinskih ponora su radni medij sustava grijanja, zrak u prostoru koji se grije, voda (rijeke, mora, jezera, tehnološka voda u industrijskim postrojenjima), itd.



Slika 1. Shema ljevokretnog procesa [3]

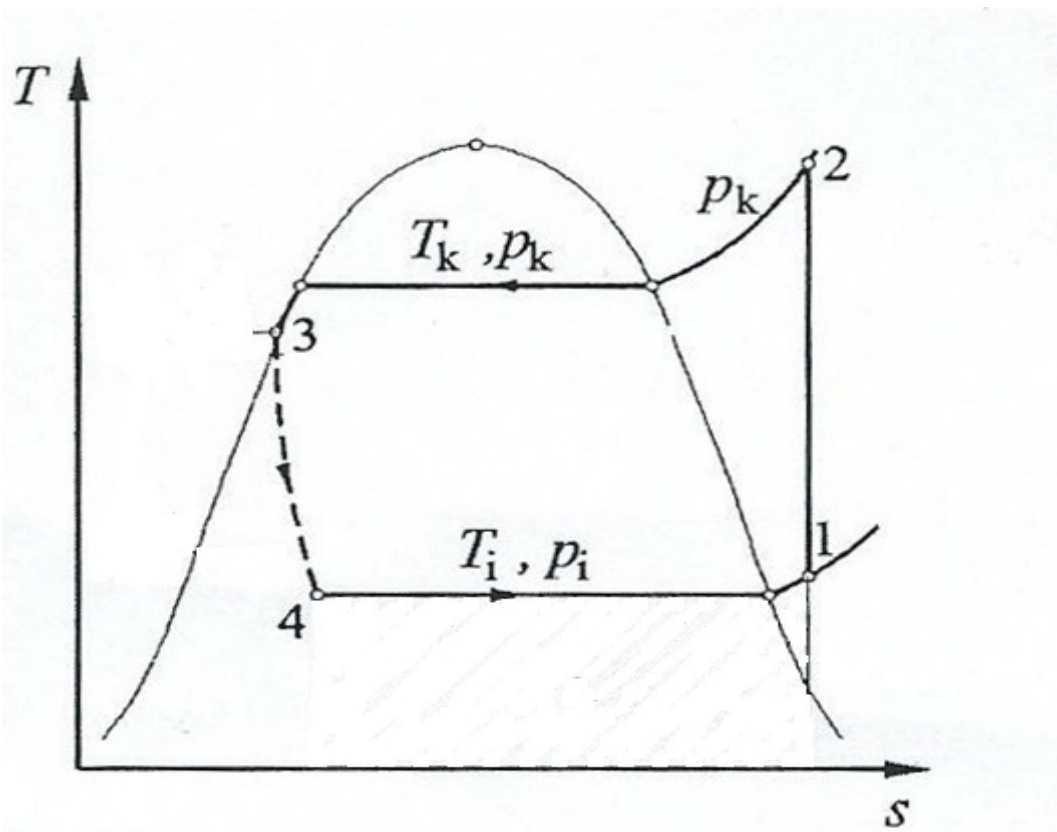


Slika 2. Ljevokretni procesi: a) rashladni, b) ogrjevni i c) rashladno-ogrjevni [4]

Svaka kompresijska dizalica topline sastoji se od pet osnovnih elemenata:

- Kompresora,
- Kondenzatora,
- Isparivača,
- Prigušnog ventila i
- Radne tvari

Isparivač i kondenzator su izmjenjivači topline preko kojih se toplina prenosi s radne tvari na toplinski spremnik i obrnuto. Radna tvar (npr. NH_3 , CO_2 , umjetne radne tvari, itd.) struji kroz sustav dizalice topline te prolaskom kroz isparivač (slika 3.: 4-1), ona prelazi iz kapljevite u parnu fazu (isparava) pri konstantnom tlaku (tlak isparavanja, p_i) i konstantnoj temperaturi (temperatura isparavanja, T_i) preuzimajući toplinu s toplinskog spremnika niže temperature. Izlaskom iz isparivača radna tvar ima nižu temperaturu od toplinskog spremnika više temperature, stoga isparena radna tvar prolazi kroz kompresor (slika 3.: 1-2) gdje joj se podižu tlak i temperatura. Slika 3. prikazuje izentropsku kompresiju radne tvari (točke 1-2). Izlaskom iz kompresora radna tvar ima višu temperaturu od temperature toplinskog ponora. Prolaskom kroz kondenzator (slika 3.: 2-3), predajući toplinu toplinskom ponoru, radna tvar prelazi iz parne u kapljevitu fazu (kondenzira) pri konstantnom tlaku (tlak kondenzacije, p_k). Kondenzirana radna tvar se nakon izlaska prigušuje (slika 3.: 3-4) na tlak isparivanja te ulazi u isparivač čime počinje novi krug procesa.



Slika 3. T-s dijagram rada dizalice topline [4]

Direktiva 2009/28/EC Europskog Parlamenta među ostalim obnovljivim izvorima energije definira i zahtjeve na učinkovitost dizalica topline kako bi se one mogle svrstati u obnovljive izvore energije. Nekoliko različitih faktora koristi se za opisivanje učinkovitosti dizalica topline:

- Faktor hlađenja, ε_{hl} (eng. energy efficiency ratio, EER)

Faktor hlađenja označava koliko se Joula toplinske energije može preuzeti od toplinskog izvora na račun jednog Joula uložene energije. Računa se kao omjer topline preuzete od toplinskog izvora na isparivaču i uloženog rada na kompresoru:

$$\varepsilon_{hl}(EER) = \frac{Q_i}{W} \quad (1)$$

- Koeficijent grijanja, ε_{gr} (eng. coefficient of performance, COP)

Koeficijent grijanja (toplinski množitelj), označava koliko se Joula toplinske energije može predati toplinskom ponoru na račun jednog Joula uložene energije. Računa se kao omjer topline predane toplinskom ponoru na kondenzatoru i uloženog rada na kompresoru:

$$\varepsilon_{gr}(COP) = \frac{Q_k}{W} = \frac{W + Q_0}{W} = 1 + \varepsilon_{hl} \quad (2)$$

- Godišnji toplinski množitelj, $\varepsilon_{gr,G}$ (eng. seasonal performance factor, SPF)

Godišnji toplinski množitelj predstavlja omjer ukupno isporučene toplinske energije nekom sustavu (npr. za grijanje prostora, PTV-a, itd.) i uložene električne energije za tu svrhu (pogon kompresora, pumpi, ventila, itd.):

$$\varepsilon_{gr,G}(SPF) = \frac{\sum_{god} Q_{gr}}{\sum_{god} E_{sust}} \quad (3)$$

Kako je ranije spomenuto, Europski Parlament putem direktive definirao je zahtjev prema kojem se, dizalice topline koje imaju $\varepsilon_{gr,G}(SPF) > 2,88$ svrstavaju se u obnovljive izvore energije. Odnosno, uvjet koji se krije u pozadini ovog zahtjeva glasi:

$$\varepsilon_{gr,G}(SPF) > 1,15 * \frac{1}{\eta_{el}}, \quad (4)$$

gdje je η_{el} efikasnost proizvodnje električne energije te je uobičajena vrijednost $\eta_{el} = 0,4$.

Drugim riječima obnovljivi dio toplinske energije pri uporabi dizalice topline koja ima godišnji toplinski množitelj 2,88 iznosi:

$$\frac{E_{res}}{Q_{isporučeno}} = 1 - \frac{1}{\varepsilon_{gr,G}} = 1 - \frac{1}{2,88} = 65\% \quad (5)$$

2.3. Toplinski izvori dizalica topline

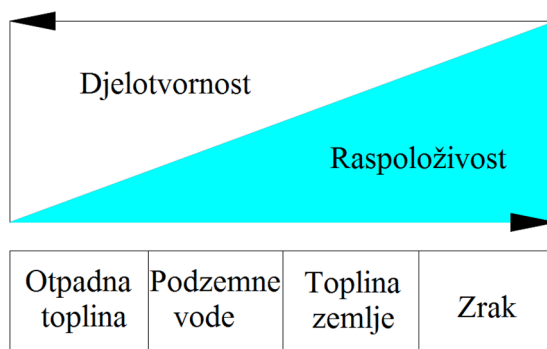
Učinkovitost dizalica topline ponajviše ovisi o svojstvima toplinskog izvora zbog čega se u tehničkim krugovima često kaže:

„Postrojenje za grijanje dizalicom topline je onoliko dobro, koliko je dobar njegov toplinski izvor.“ [4]

Najčešći niskotemperaturni toplinski spremnici su voda (riječna, jezerska, morska i podzemna), zrak, otpadna toplina, te tlo. Za osiguranje ekonomičnog rada dizalice topline nužno je da njezin toplinski množitelj bude što veći. Iz tog razloga se na izvor topline, kao najvažniji utjecajni faktor, postavlja niz zahtjeva među kojima su najvažniji sljedeći:

- toplinski izvor treba osigurati potrebnu količinu topline u svakom trenutku na što pogodnijoj temperaturi
- troškovi za priključenje toplinskog izvora na dizalicu topline trebaju biti što manji
- energija potrebna za transport topline od izvora do izmjenjivača dizalice topline treba biti što manja

Prema gore navedenim zahtjevima idealan toplinski izvor je neograničenog kapaciteta, ima konstantnu temperaturu tijekom cijele godine, vrlo je jeftin za eksploataciju te se nalazi nadohvat postrojenja dizalice topline. Jednostavno se može zaključiti da je takav toplinski izvor u stvarnosti nemoguće naći, no svejedno su vidljive jasne razlike u kvaliteti među realnim toplinskim izvorima. Slika 4. prikazuje vezu između učinkovitosti i dostupnosti različitih toplinskih izvora dizalica topline. Na prvi pogled se sa slike zaključuje da je „najbolji“ (otpadna toplina, npr. u nekom proizvodnom procesu) toplinski izvor u realnosti i najrjeđi i obrnuto, „najlošiji“ (zrak) je najdostupniji.

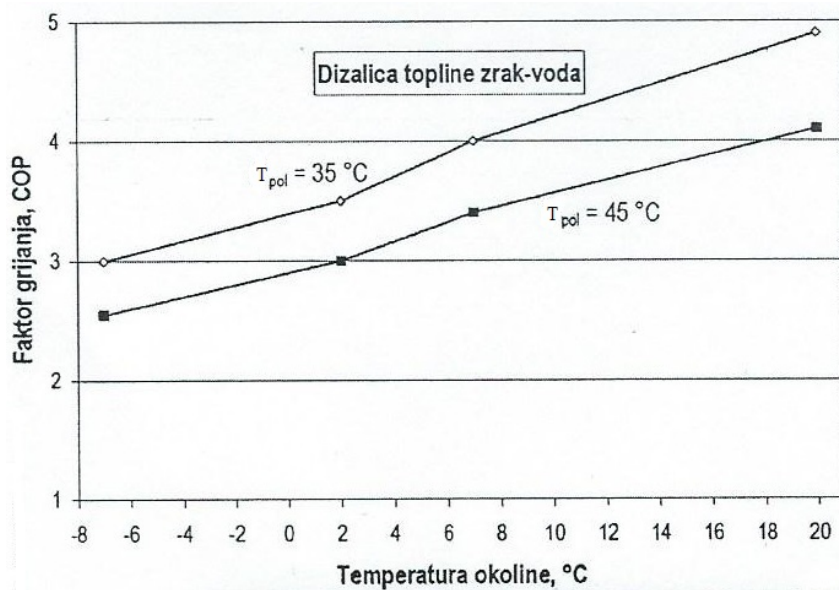


Slika 4. Usporedba učinkovitosti i djelotvornosti toplinskih izvora [1]

Važno je spomenuti još neke uvjete koji pridonose većim vrijednostima toplinskih množitelja. Što manja udaljenost toplinskog izvora i ponora vrlo je važna kako bi se smanjili gubici u prijenosu energije. Temperatura toplinskog ponora ne smije biti previsoka u odnosu na toplinski izvor, odnosno temperature kondenzacije i isparivanja trebaju biti što bliže po iznosu. Što je veća razlika između temperature kondenzacije i isparivanja povećava se potrošnja energije za pogon dizalice topline, a time se posljedično smanjuje toplinski množitelj. Također, poželjno je da postrojenje dizalice topline tijekom godine radi sa što manje prekida rada.

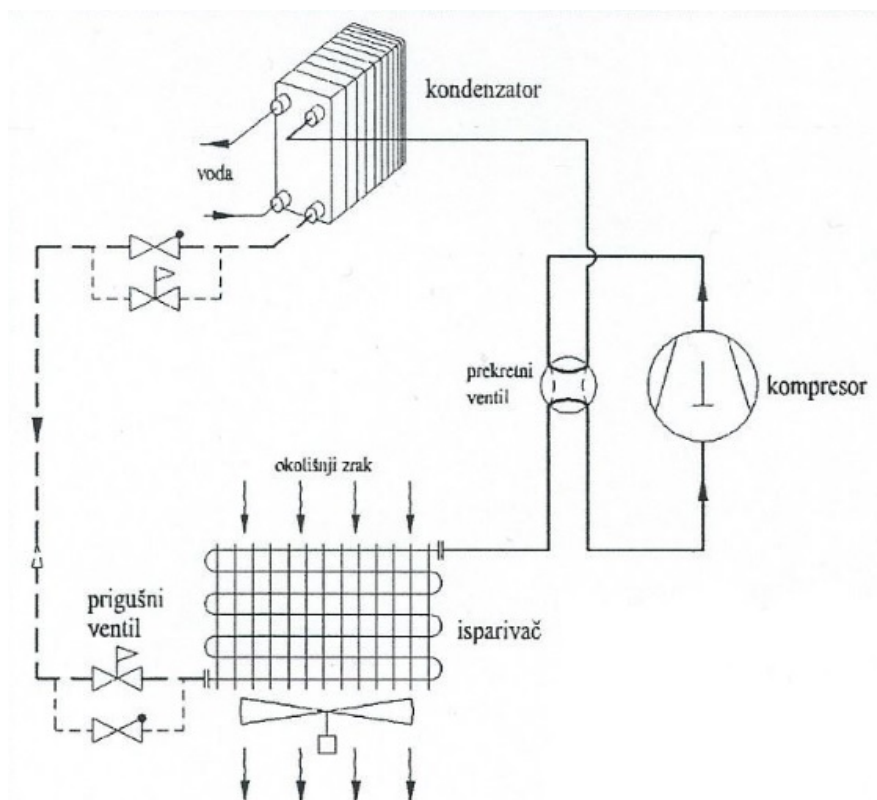
2.3.1. Zrak kao toplinski izvor

Zrak se nalazi svuda oko nas te je stoga najveći i najpristupačniji toplinski izvor za dizalice topline. Upotreba dizalica topline sa zrakom kao toplinskim izvorom široko je rasprostranjena u područjima umjerene klime. Nepogodna karakteristika zraka kao toplinskog izvora je njegova promjenjiva temperatura koja jako varira tijekom godine što znatno utječe na vrijednost toplinskog množitelja. Govoreći za umjerenu klimu, zimi kada postoji najveća potreba za grijanjem temperatura zraka je najniža, odnosno temperaturna razlika između toplinskog izvora i toplinskog ponora je najveća što negativno utječe na toplinski množitelj. U praksi, na dosta lokacija potrebno je uz sustav dizalice topline imati i dodatni izvor topline za grijanje jer na temperaturama okoliša ispod približno -5°C učinkovitost rada dizalice topline jako opada. Pri tako niskim temperaturama okoliša često se stvara led na površini isparivača čime se povećava otpor prijelazu topline zbog čega se dodatno povećava razlika između temperatura kondenzacije i isparivanja te posljedično smanjuje toplinski množitelj. U novim uređajima koji koriste zrak kao toplinski izvor, toplinski množitelj se uspijeva povećati inovativnim rješenjima (npr. ubrizgavanjem parne faze za vrijeme kompresije radne tvari).



Slika 5. Ovisnosnost COP-a o temperaturi okoliša [4]

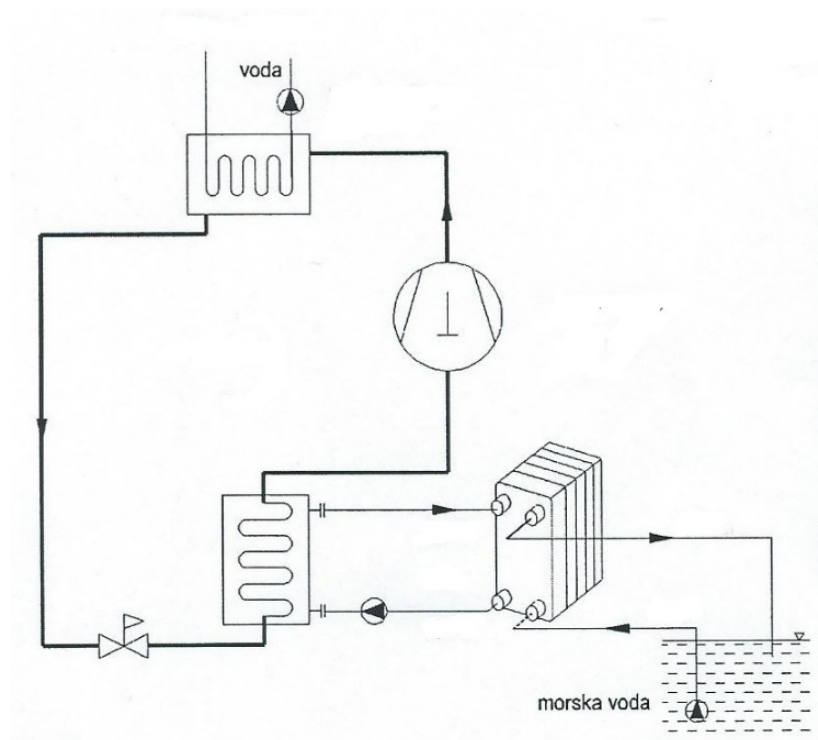
Osim spomenutih nedostataka, buka ventilatora vanjskih jedinica dizalica topline sa zrakom često je dodatan nedostatak kojeg je potrebno spomenuti.



Slika 6. Shema sustava dizalice topline sa zrakom kao toplinskim izvorom [4]

2.3.2. Površinske vode kao toplinski izvor

Površinske vode (rijeke, jezera, mora, potoci, itd.) često se koriste kao toplinski izvor za dizalice topline. Prednost površinskih voda kao izvora topline je u njihovoj temperaturi koja se najčešće kreće od 0° do 10°C , a ponegdje i više. Negativnih strana ima nekoliko. Prvo, da bi eksploatacija površinskih voda kao toplinskih izvora bila ekonomski isplativa, postrojenje dizalice topline se mora nalaziti na lokaciji što bližoj toplinskom izvoru. Drugo, često za eksploataciju površinskih voda potrebno je ishoditi odgovarajuće dozvole i koncesije (npr. morska voda) što u najmanju ruku povisuje investicijske troškove, a na pojedinim zaštićenim lokacijama ih je i nemoguće dobiti. Treće, zbog ekoloških i drugih razloga, površinska voda se najčešće ne iskorištava direktno već preko dodatnih izmjenjivača topline što dodatno povisuje troškove i smanjuje učinkovitost sustava.

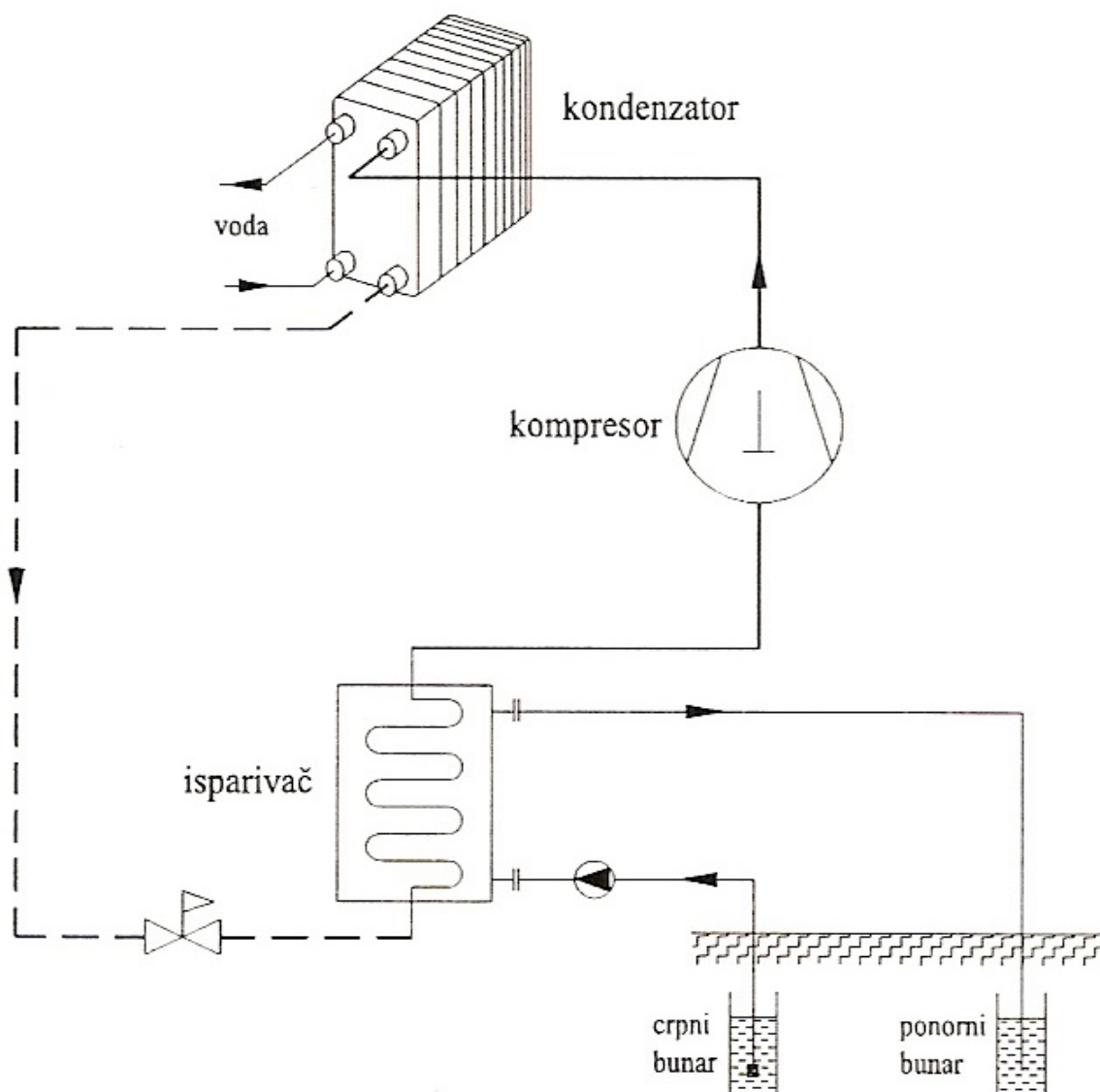


Slika 7. Shema sustava dizalice topline koja koristi morsku vodu kao izvor topline [4]

2.3.3. Podzemne vode kao toplinski izvor

Podzemne vode su sa termodinamičkog stajališta zbog svoje gotovo nepromjenjive temperature tijekom cijele godine jedan od najpovoljnijih izvora topline. Temperature podzemne vode se u većini slučajeva kreće od 10° do 14°C , ovisno o dubini bušotine iz koje se crpi. Za eksploataciju

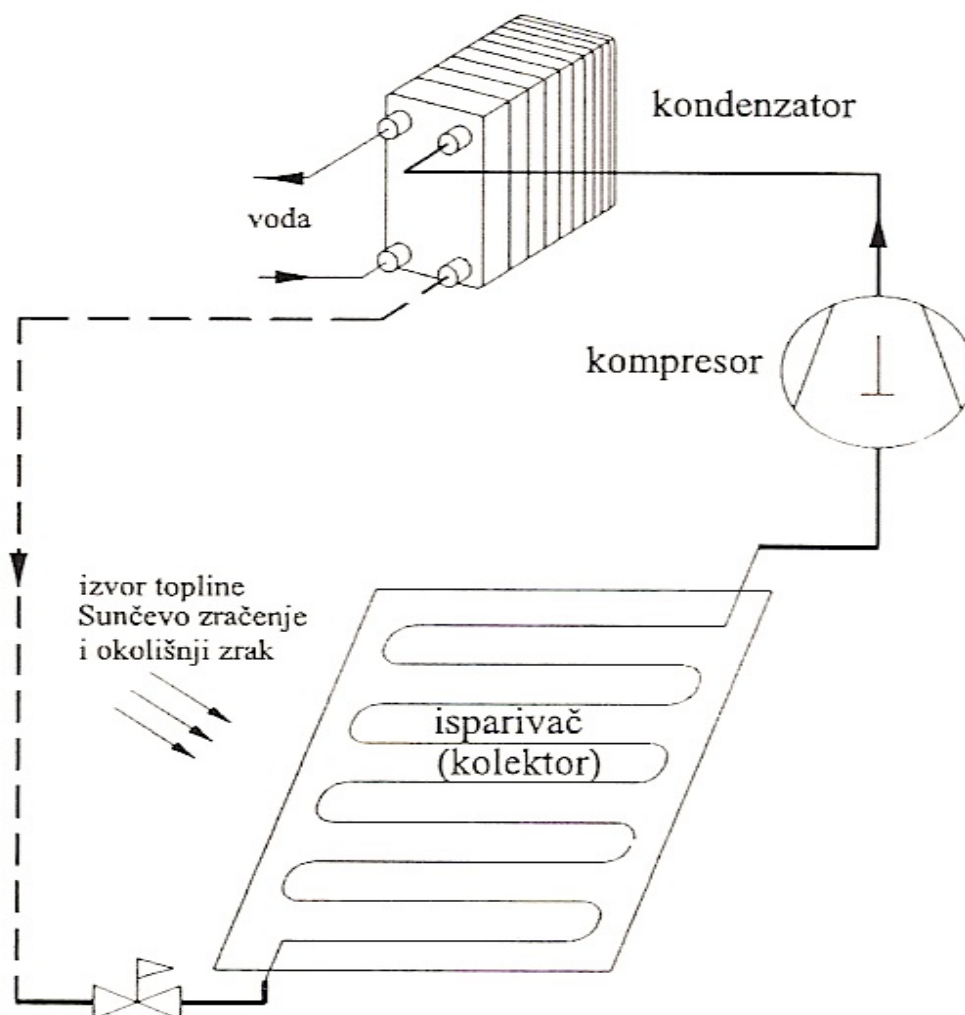
podzemne vode kao toplinskog izvora potrebno je izvesti najčešće dva bunara, jedan crpni i jedan ponorni što je potrebno dodati u investicijske troškove pri projektiranju sustava dizalica topline koje koriste podzemnu vodu. Crpni bunar mora biti izdašno dimenzioniran radi mogućnosti neprekidnog rada dizalice topline, a razmak između crpnog i ponornog bunara mora biti minimalno 10m te je obavezno postaviti ponorni bunar nizvodno od crpnog da bi se izbjegao negativan efekt miješanja ponorne vode s crpnom čime se mijenja temperatura vode u crpnom bunaru što može imati negativne posljedice na okoliš i efikasnost sustava dizalice topline.



Slika 8 Shema sustava dizalice topline koja koristi podzemnu vodu kao toplinski izvor [6]

2.3.4. Sunce kao toplinski izvor

Zračenje Sunca koristi se kao toplinski izvor za direktno isparavanjem radne tvari u solarnom kolektoru solarnih dizalica topline. U pravilu se kod solarnih dizalica topline postižu više temperature isparavanja radne tvari nego kod drugih toplinskih izvora zbog čega je toplinski množitelj nerijetko viši. Efikasnost kolektora je poboljšana (0,6 do 0,9) u odnosu na klasični kolektorski sustav (0,4-0,6). Često se koriste vakuumski kolektori koji rade čak i noću kada nema Sunčeve energije ukoliko je temperatura okoliša povoljna. Toplinski množitelj sustava dizalice topline ovisi o temperaturi okoline, sunčevom ozračenju, te temperaturi vode na izlazu iz kondenzatora. Vrijednosti toplinskih množitelja najčešće se kreću od 3 do 8. [4]



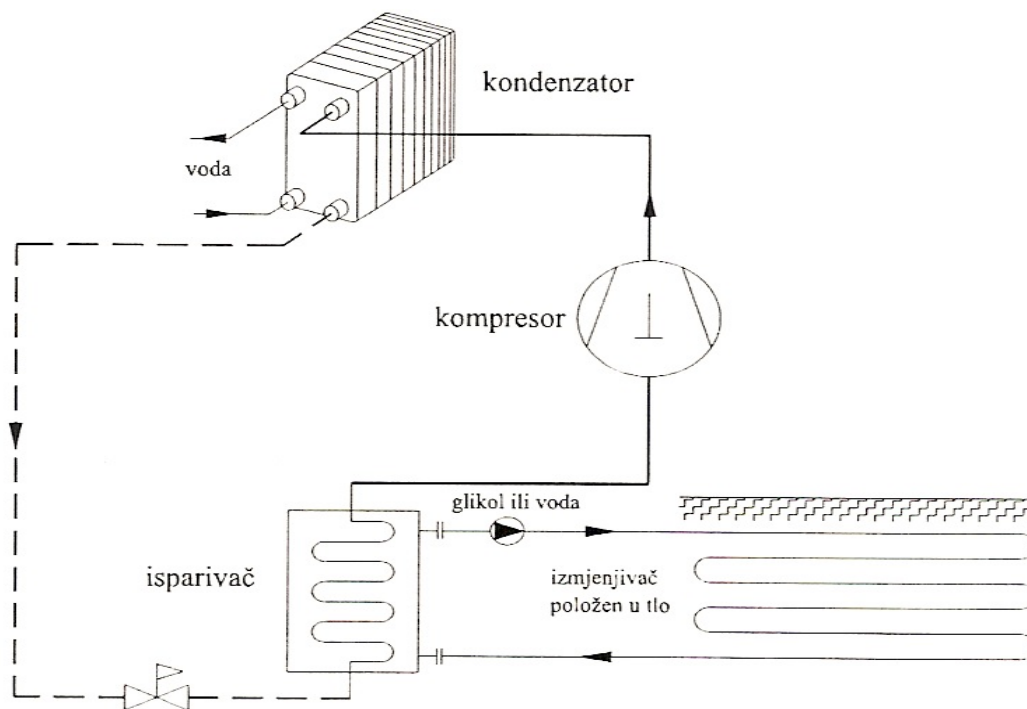
Slika 9. Shema sustava solarne dizalice topline [4]

2.3.5. Otpadna toplina kao toplinski izvor

Otpadna toplina je također vrlo povoljan toplinski izvor za dizalice topline no i rijetko dostupan. Mjesta gdje nalazimo otpadnu toplinu su obično industrijska postrojenja, tvornice, rafinerije itd. Temperatura otpadne struje zraka, vode ili neke druge tvari često je dovoljno visoke temperature za direktnu primjenu u različite svrhe te u tom slučaju dizalica topline postaje suvišna.

2.3.6. Tlo kao toplinski izvor

Relativno stabilna temperatura tla tijekom cijele godine te pristupačnost glavni su razlozi zašto je broj sustava dizalica topline koji ga koriste u velikom porastu. Tlo već na dubini od 2m ima vrlo povoljnu temperaturu tijekom cijele godine (7° do 13°C). Toplina se iz tla uzima preko izmjenjivača topline u horizontalnoj ili vertikalnoj izvedbi. Horizontalna izvedba podrazumijeva postavljanje snopa PE cijevi najčešće na dubinu 1,2 do 1,5 m ispod površine. Duljina snopa ovisi o sastavu tla. Loša strana horizontalnog izmjenjivača je potreba za velikom površinom na koju će se on postaviti. Vertikalna izvedba podrazumijeva korištenje bušotinskih izmjenjivača topline koji se postavljaju najčešće na dubine 60 do 200 m. Negativna strana iskorištavanja tla kao toplinskog izvora su dodatni investicijski troškovi zbog potrebe za iskapanjem zemlje. O bušotinskim izmjenjivačima topline bit će više riječi u idućem poglavlju.



Slika 10. Shema sustava dizalice topline s horizontalnim izmjenjivačima položenim u tlo [6]

U tablici 1. prikazana je usporedba najčešće korištenih toplinskih izvora dizalica topline.

Kriteriji prema kojima je usporedba napravljena su:

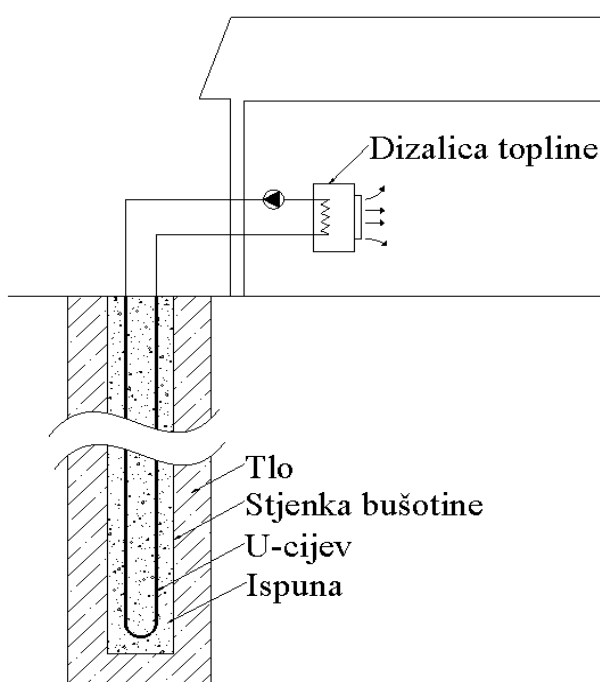
- temperaturna razina (uobičajeno kretanje temperature tijekom godine)
- raspoloživost tijekom godine
- raspoloživost s obzirom na lokaciju
- vremenska podudarnost potrošnje i raspoloživosti
- mogućnost samostalnog korištenja
- kemijska i fizikalna svojstva koja otežavaju uporabu pojedinog toplinskog izvora
- potrošnja energije za transport radnog fluida
- troškovi izvedbe postrojenja
- utjecaj na energetske ravnotežu okoliša
- utjecaj na onečišćenje okoliša
- prikladnost za masovnu proizvodnju i korištenje

Tablica 1. Usporedba najčešćih toplinskih izvora dizalica topline [9]

KRITERIJ ZA OCJENU VALJANOSTI	ZRAK		ZEMLJA	VODA					SUNCE
	okolišni	odvodi iz klimatiz. sust.		podzemna	riječna	jezerska	morska	otpadna, kućanstva i industrijska	
Temperatura (energijska) razina	-25 – 20 °C	>22 °C	-5 – 15 °C (8-15 Wm ⁻²)	5 – 15 °C	0 – 10°C	0 – 10 °C	3-8 °C	>10 °C	-25 – 40 °C (0 – 300 Wm ⁻²)
Lokacijska raspoloživost	posvuda	pri grijanju i/ili hlađenju zrakom	ponegdje, ovisno o terenu	ponegdje	ponegdje	ponegdje	ponegdje	ponegdje	posvuda
Vremenska raspoloživost	uvijek	ponekad ovisno o radnom režimu	uvijek	uvijek	ne uvijek, radi suše i temp. <2 °C	ne uvijek, radi niskih temperatura	uvijek	uvijek	promjenjivo i nepredvidivo
Vremenska podudarnost i potrošnje raspoloživosti	nekoherentno (najviša potreba - najmanja raspoloživost)	koherentno (najviša potreba - najviša raspoloživost)	djelomično koherentno (raspoloživost opada prema kraju sezone grijanja)	koherentno (konstantna raspoloživost tijekom godine)	djelomično koherentno ili nekoherentno	djelomično koherentno	djelomično koherentno	koherentno	nekoherentno (najviša potreba - najmanja raspoloživost)
Mogućnost samostalnog korištenja	da	djelomično	da	da	djelomično	djelomično	da	da	jedva moguće
Kemijska ili fizikalna svojstva koja otežavaju uporabu	zaleđivanje	-	zaleđivanje, korozija	korozija	korozija, prljavština, soli	prljavština, soli	prljavština, soli, alge	prljavština, korozija, neugodni mirisi	-
Utrošak energije za transport nositelja topline	velik	-	velik	velik	raznolik	raznolik	raznolik, često velik	raznolik	raznolik
Troškovi izvedbe postrojenja	mali do srednji	nikakvi do mali	velik	velik	srednji do velik	srednji do velik	srednji do velik	srednji do velik	velik
Utjecaj na energetska ravnotežu okoliša	nema znatnog utjecaja	nema nikakvih utjecaja	zanemarivo malen	nije zanemariv	zanemarivo malen	zanemarivo malen	zanemarivo malen	nema nikakvih utjecaja	nema nikakvih utjecaja
Utjecaj na kontaminaciju okoliša	nema	nema	neutralno	ima	djelomično	djelomično	neutralno	nema	nema
Prikladnost za masovnu proizvodnju	dobra	dobra	umjerena	dobra	dobra	dobra	dobra	umjerena	umjerena

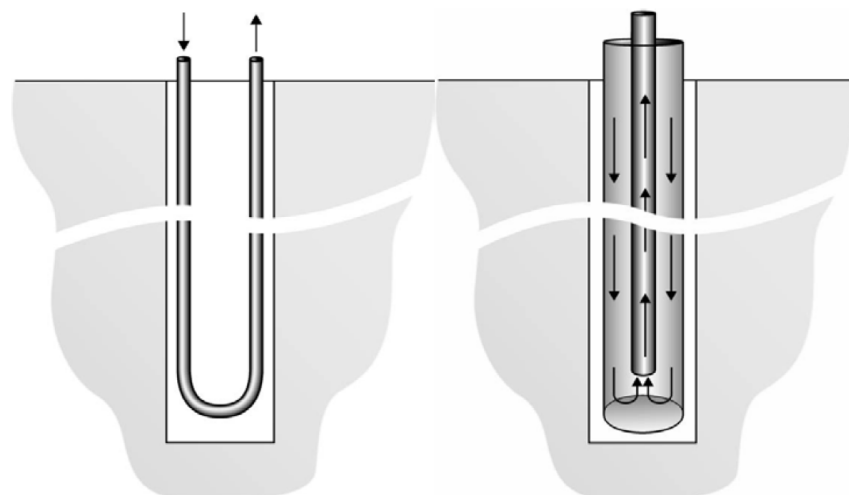
2.4. Bušotinski izmjenjivač topline

Najčešća metoda za izmjenu topline s tlom jest korištenje bušotinskih izmjenjivača topline (u daljnjem tekstu: BIT) instaliranih u vertikalnim bušotinama. Slika 11. prikazuje tipičan bušotinski izmjenjivač topline koji se sastoji od dvije jednake cijevi spojene na dnu čineći zajedno U-cijev. Sekundarni fluid, voda ili mješavina vode i glikola, struji kroz BIT silazno-uzlazno izmjenjujući toplinu sa zemljom. BIT je spojen na dizalicu topline te ovisno o režimu grijanja ili hlađenja uzima od tla ili toplinu predaje tlu.



Slika 11. Shema sustava dizalice topline sa bušotinskim izmjenjivačem topline [2]

Prema geometriji izmjenjivača bušotinski izmjenjivači topline mogu biti u izvedbi U-cijevi ili u izvedbi cijev u cijevi (koaksijalni izmjenjivač) što prikazuje Slika 12. Izmjenjivači u obliku U-cijevi mogu se sastojati od jedne ili dvije U-cijevi, a rjeđe je moguće i od tri. Oni se ugrađuju u bušotinu s ili bez distancera za održavanje razmaka među cijevima. Kod U-cijevi obje struje (silazna i uzlazna) sudjeluju u izmjeni topline sa zemljom, dok kod koaksijalnih tipova sudjeluje samo jedna [7]. Unutarnja cijev koaksijalnih izmjenjivača obično se izolira kako bi se izbjegla toplinska interakcija između silazne i uzlazne struje. Koaksijalni izmjenjivači se ne primjenjuju često i još uvijek su u fazi istraživanja optimalnog rasporeda ulaznih i izlaznih cijevi kako bi se postigao što bolji prijelaz topline.



Slika 12. Jednostruka U-cijev i koaksijalni bušotinski izmjenjivač topline [7]

Osnovni parametri koji utječu na izmjenu topline između tla i bušotinskog izmjenjivača topline su sljedeći:

- toplinska svojstva tla
- geometrija i karakteristike BIT-a
- režim strujanja i svojstva fluida unutar BIT-a

Na brzinu i način prijenosa topline, a samim time i na rad dizalice topline povezane s tlom, bitan utjecaj imaju svojstva tla. Razlikuju se ovisno o sastavu tla od lokacije do lokacije i na njima se ne može utjecati. Tlo treba imati što veću toplinsku provodnost (oznaka λ [W/(m·K)]) i što veći specifični toplinski kapacitet (oznaka c_p [J/(kgK)]), koji osim o mineralnom sastavu pojedinih slojeva tla značajno ovise i o njegovoj poroznosti te razini podzemnih voda. Kako je tlo najčešće nehomogene strukture, provodnost tla se izražava kao srednja provodnost za zadanu lokaciju. Najnepovoljniji slučaj predstavlja tlo velike poroznosti i niske razine podzemnih voda. Veličina koja povezuje toplinsku provodnost i toplinski kapacitet naziva se temperaturna provodnost (oznaka a [m²/s]) i računa se kao:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (6)$$

Vrijednost koeficijenta temperaturne provodnosti pokazuje brzinu promjene temperature. To znači da će u promatranoj krutini brže doći do izjednačavanja temperatura ako krutina ima veću vrijednost koeficijenta a . Drugim riječima, ako tlo ima veću temperaturnu provodnost, ono će

brže reagirati na toplinske promjene u okolišu, odnosno, ako tlo ima manju temperaturnu provodnost, bit će potrebno dulje vrijeme za postizanje toplinske ravnoteže s okolišem.

Osim svojstava tla, na izmijenjenu količinu topline u BIT-u značajno utječu njegova izvedba i geometrijski parametri. Povećanjem dubine izmjenjivača smanjuje se razlika između srednje temperature fluida i temperature tla za istu količinu topline preuzete ili predane tlu [8]. Utjecaj radijusa BIT-a sličan je kao i utjecaj dubine izmjenjivača. Njegovim povećanjem potrebna je manja temperaturna razlika za izmjenu jednake količine topline. Bitan utjecaj na toplinski otpor bušotine ima udaljenost između cijevi te materijal ispune. Stoga se prostor između cijevi izmjenjivača i stjenke bušotine ispunjava posebnim smjesama, kojim se osigurava njihov međusobni kontakt i sprječava urušavanje samog BIT-a. Bušotina stoga mora biti izvedena kontinuirano i bez šupljina koje bi predstavljale otpor prijelazu topline. U slučaju nekvalitetne ispune BIT-a s vremenom se mogu pojaviti mjehurići plina koji predstavljaju otpor prolazu topline pa time smanjuju efikasnost rada cijelog sustava.

2.4.1. Prijelaz topline u bušotinskom izmjenjivaču topline

Prijelaz topline u BIT-u sastoji se od izmjene topline fluida konvekcijom sa stjenkom cijevi, te provođenja topline kroz cijev i materijal ispune. Iz navedenog, može se zaključiti da toplinski otpor BIT-a sadrži tri osnovne komponente (Slika 13.):

- toplinski otpor konvektivnom prijelazu topline između fluida i stjenke cijevi

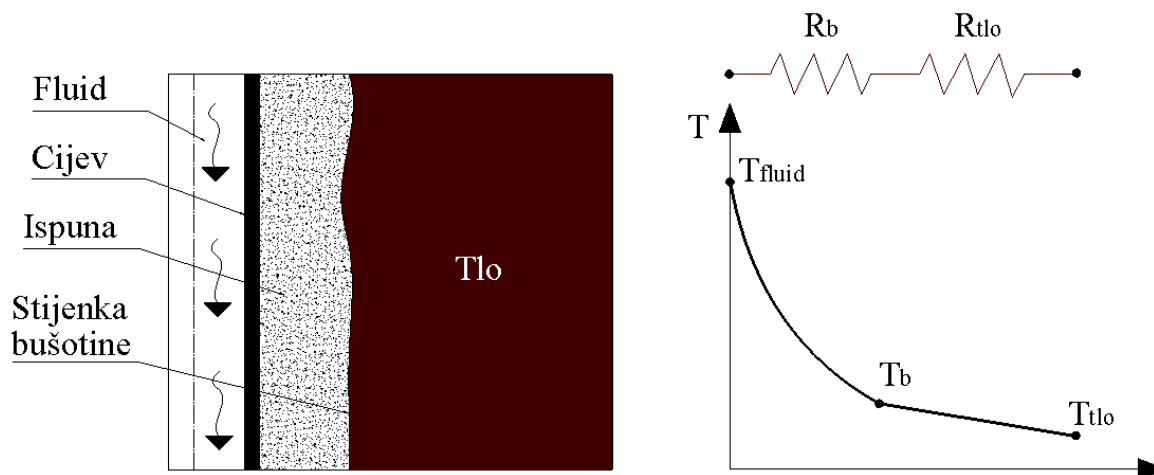
$$R_f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_u \cdot \alpha} \quad (7)$$

- toplinski otpor provođenju kroz cijev

$$R_{cijev} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{cijev}} \cdot \ln\left(\frac{r_v}{r_u}\right) \quad (8)$$

- toplinski otpor provođenju kroz ispunu od cijevi do stjenke bušotine

$$R_{ispuna} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{ispuna}} \cdot \ln\left(\frac{r_b}{r_v}\right) \quad (9)$$



Slika 13. Prikaz komponenti toplinskog otpora tla

Efektivni toplinski otpor BIT-a R_b koji uključuje sve gore navedene komponente definiran je omjerom razlike osrednjene temperature fluida T_f i stijenke bušotine T_b te specifičnog toplinskog toka q [W/m]:

$$R_b = R_f + R_{cijev} + R_{ispuna} = \frac{T_f - T_b}{q} \quad (10)$$

Obzirom da kao parametar značajno utječe na rad cjelokupnog sustava, preporučljivo je imati što niži toplinski otpor BIT-a. Vrijednosti toplinskih otpora BIT-a obično se kreću od 0,01 do 0,1 (m K)/W za otvorene sustave, te od 0,05 do 0,2 (m K)/W za zatvorene sustave [8]. Očito je da na toplinski otpor značajno utječu toplinska svojstva materijala cijevi i ispune. Stoga je važno odabrati cijevi što tanje stijenke i dobre toplinske vodljivosti kao i materijal ispune. Također, bitan utjecaj na toplinski otpor BIT-a ima ispravno centriranje cijevi u bušotini kao i međusobna udaljenost između cijevi kako bi se izbjegla toplinska interakcija između silazne i uzlazne struje fluida.

Obzirom da temperatura stijenke bušotine nije jednolika duž cijele bušotine, teško ju je odrediti, pa se stoga jednadžba (10) ne koristi za određivanje toplinskog otpora BIT-a. Za određivanje toplinskog otpora BIT-a danas se obično koriste eksperimentalne metode, a najčešće korištena metoda je mjerenje toplinskog odziva tla.

Treći parametar koji utječe na količinu izmijenjene topline u izmjenjivaču je režim strujanja fluida u cijevi koji može bit laminaran ili turbulentan. Kod laminarnog strujanja u cijevi pojedine čestice tekućine u strujnici međusobno se ne miješaju sa česticama iz drugih strujnica,

te se izmjena topline poprečno na laminarne slojeve odvija samo provođenjem, jednako kao kod tekućina u mirovanju. Poprečno gibanje čestica karakteristika je turbulentnog strujanja pa je izmjena topline uslijed miješanja čestica dominantno konvektivna [2].

Obzirom da je kod turbulentnog strujanja bolji prijelaz topline nego kod laminarnog, poželjno je strujanje u BIT-u održavati u turbulentnom režimu. Kriterij za postizanje potpuno razvijenog turbulentnog strujanja je Reynoldsov broj čija vrijednost mora biti viša od 10000 kako bi se pouzdano ostvario turbulentni režim strujanja [8]:

$$Re = \frac{w \cdot d_u}{\nu} > 10000 \quad (11)$$

- w - brzina strujanja fluida u cijevi [m/s]
 d_u - unutarnji promjer U-cijevi [m]
 ν - kinematička viskoznost fluida [Pa·s]

U područjima s hladnom klimom temperatura optočne vode ponekad će biti ispod 0°C, te je nužno korištenje sredstva protiv smrzavanja. Prevelika koncentracija glikola može povećati otpor toplinskom toku kao i potrebnu snagu optočne pumpe, te je stoga pri određivanju optimalnog režima rada sustava potrebno postići kompromis između [15]:

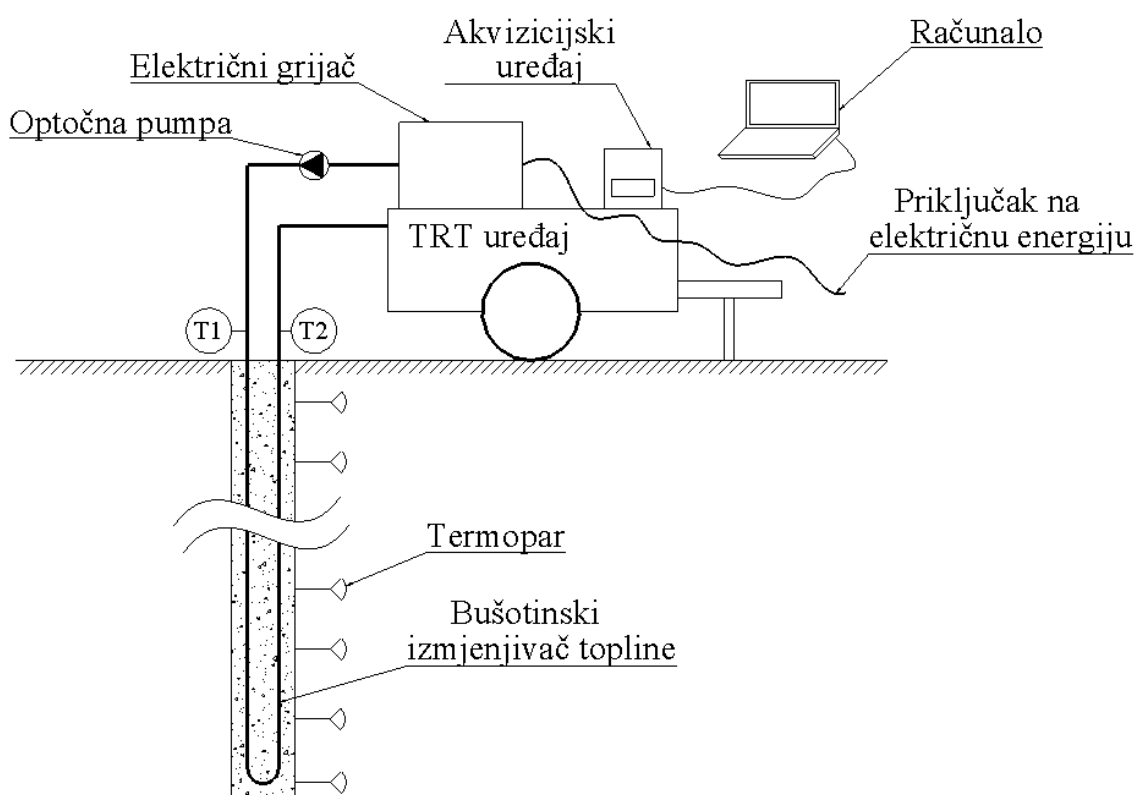
- potrebnog protoka optočne mješavine kroz izmjenjivač topline u dizalici topline
- snage cirkulacijske pumpe
- otpora toplinskom toku unutar BIT-a

Pojam tla, u inženjerskom smislu prema [16], odnosi se na kompliciran materijal sastavljen od čvrstih čestica različitih sastava (mineralnih i/ili organskih), te raznih oblika i veličina koji su nasumično raspoređeni zajedno s porama između njih. Ove pore sadrže zrak i obično vodu u njezinim različitim fazama kao što su para, kapljevina ili led. Stoga, osim provođenja, mogući mehanizmi prijenosa topline u tlu su konvekcija, pa čak i zračenje. Modeliranje izmjene topline u mediju s takvim svojstvima gotovo je nemoguće, pa se prijenos topline u tlu promatra kao provođenje kroz izotropnu i homogenu krutinu čije temperaturno polje izraženo diferencijalnom jednačinom u polarnim koordinatama glasi:

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (12)$$

3. OSVRT NA PROVEDENO MJERENJE TOPLINSKOG ODZIVA TLA NA LOKACIJI FSB-a

Tijekom travnja 2016. godine, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje provedeno je ispitivanje toplinskog odziva tla (u nastavku teksta: TRT ispitivanje) na postojećem bušotinskom izmjenjivaču topline. Ispitivanje je provedeno u suradnji s kolegama Eugenom Filipovićem i Jurom Stošićem uz mentoriranje izv. prof. dr. sc. Vladimira Solde te mag. ing. mech. Luke Bobana. TRT (Thermal Response Test) ispitivanje provodi se pomoću TRT uređaja koji se spaja na bušotinski izmjenjivač topline. TRT uređaj zagrijava radni fluid koji struji kroz BIT gotovo konstantnim toplinskim tokom te mjeri i zapisuje temperature polazne i povratne struje fluida iz BIT-a u određenim vremenskim koracima. Ispitivanja se obično provode u vremenu od minimalno 48h. Temperature fluida se kasnije analiziraju te se pomoću analitičkih modela (npr. ILS – Infinite Line Source model) izračunava toplinski otpor bušotine te toplinska provodnost tla.

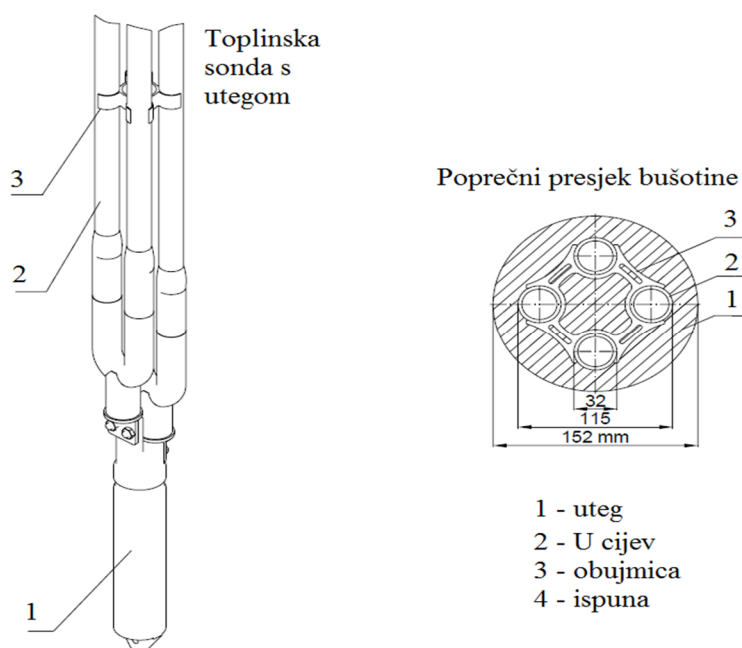


Slika 14. Shematski prikaz mjerne linije TRT uređaja [2]

Osim provedenih mjerenja napravljena je i simulacija u računalnom programu TRNSYS s kojom se pokušala ispitati mogućnost skraćivanja trajanja TRT-a povećanjem toplinskog toka uz uvjet da dobiveni rezultati budu i dalje dovoljno pouzdani. Bitno je naglasiti da se skraćivanjem trajanja TRT-a ne smije dovesti u pitanje kvaliteta rezultata, stoga je uveden kriterij točnosti za efektivnu toplinsku provodnost kojeg zadovoljavaju vrijednosti koje odstupaju najviše $\pm 5\%$ od prosječne referentne efektivne vrijednosti toplinske provodnosti tla.

3.1. Karakteristike ispitivane bušotine

Mjerenja su provedena na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, u Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje, gdje se nalazi dizalica topline s izmjenjivačem u vertikalnoj bušotini dubine 100 metara. Bušotina promjera 152 mm smještena je u neposrednoj blizini laboratorija i u nju je postavljena izmjenjivačka sonda u obliku dvostruke U-cijevi. Dvostruka U-cijev izvedena je iz polietilena visoke gustoće PE 100 i promjera 32 mm. Na samom dnu sonde obješen je uteg mase 30 kg, koji je omogućio lakšu ugradnju i bolje centriranje sonde (Slika 15.). Uz izmjenjivač topline u bušotinu su položeni temperaturni osjetnici (termoparovi), koji omogućuju mjerenje temperature tla na različitim dubinama [13]. Bušotina je zapunjena specijalnom smjesom bentonita i cementa čiji iznos koeficijenta toplinske provodnosti iznosi 2,35 W/(m K).



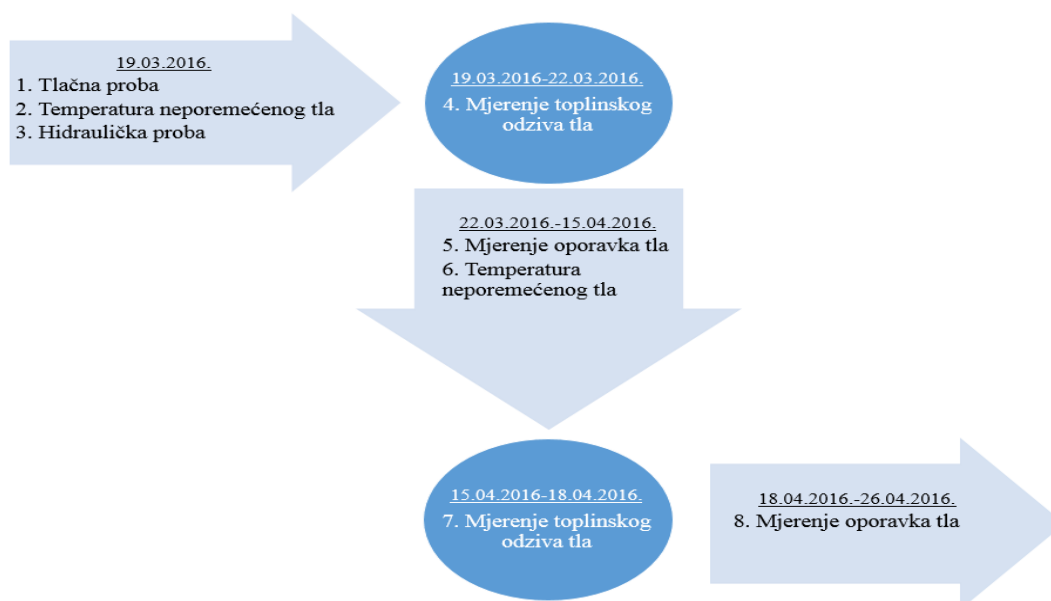
Slika 15. a) Dvostruka U-cijev s utegom; b) Poprečni presjek bušotine s izmjenjivačem [2]

3.2. Opis provedenih mjerenja

Obzirom da je mjerenje toplinskog odziva tla preporučeno provoditi korištenjem čiste vode, prije samog početka provođenja ispitivanja glikolna smjesa u BIT-u zamijenjena je vodovodnom vodom, kako bi se smanjio utjecaj na pogrešku rezultata. Nakon toga, uslijedilo je postavljanje TRT uređaja GEOgert 2.0 na predviđenu lokaciju ispitivanja, te spajanje uređaja na sondu. Također, postavljen je i uključen akvizicijski uređaj na kojeg su spojeni svi termoparovi za mjerenje temperature. Akvizicijski uređaj zatim je priključen na računalo, čime je omogućena pohrana temperature tla po visini bušotine. Nakon što su ispitani svi spojevi na uređaju i sondi, GEOgert 2.0 priključen je na električnu mrežu, te je omogućeno uključivanje uređaja.

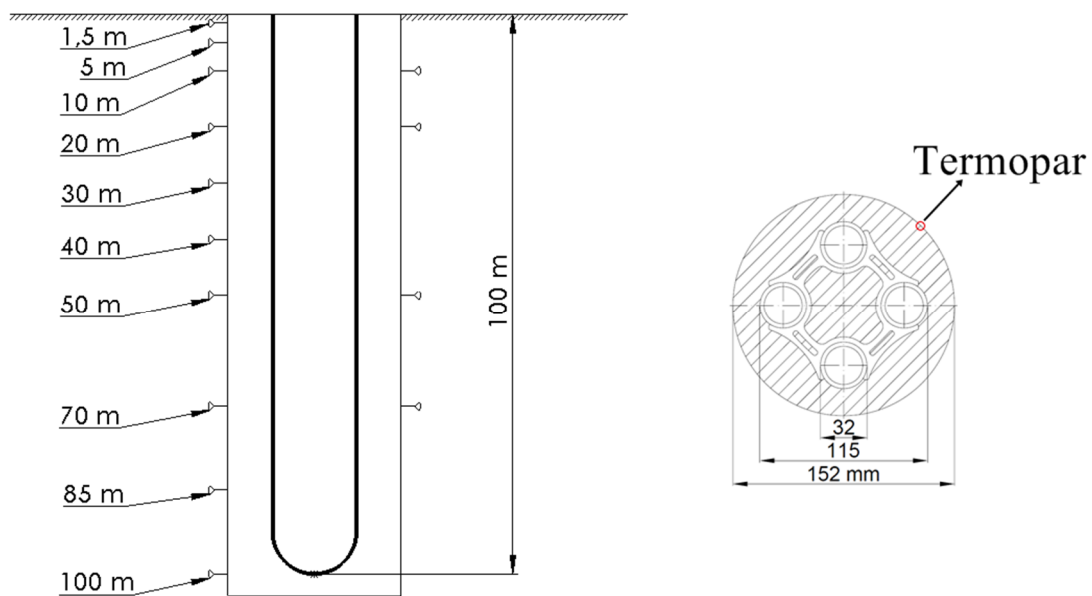
Provedena mjerenja u osnovi se mogu podijeliti u osam faza (Slika 16.):

1. Provođenje tlačne probe
2. Mjerenje neporemećene temperature tla
3. Provođenje hidrauličke probe
4. Prvo mjerenje toplinskog odziva tla
5. Mjerenje oporavka tla
6. Mjerenje nove temperature neporemećenog tla
7. Drugo mjerenje toplinskog odziva tla
8. Mjerenje oporavka tla



Slika 16. Dijagram toka provedenih mjerenja [2]

Provedena su dva mjerenja toplinskog odziva tla svako u trajanju od 72h s prosječnim toplinskim tokom od 4,4kW tijekom prvog i 7,64kW tijekom drugog mjerenja. Osim mjerenja temperatura polazne iz i povratne struje fluida u BIT mjerena je i temperatura tla preko postavljenih termoparova na rubu bušotine na različitim dubinama. Između dva mjerenja bilo je potrebno da se tlo oporavi te da njegova neporemećena temperatura bude $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ u odnosu na prvo mjerenje kako bi ona bila usporediva. Za oporavak tla bilo je potrebno 24 dana.

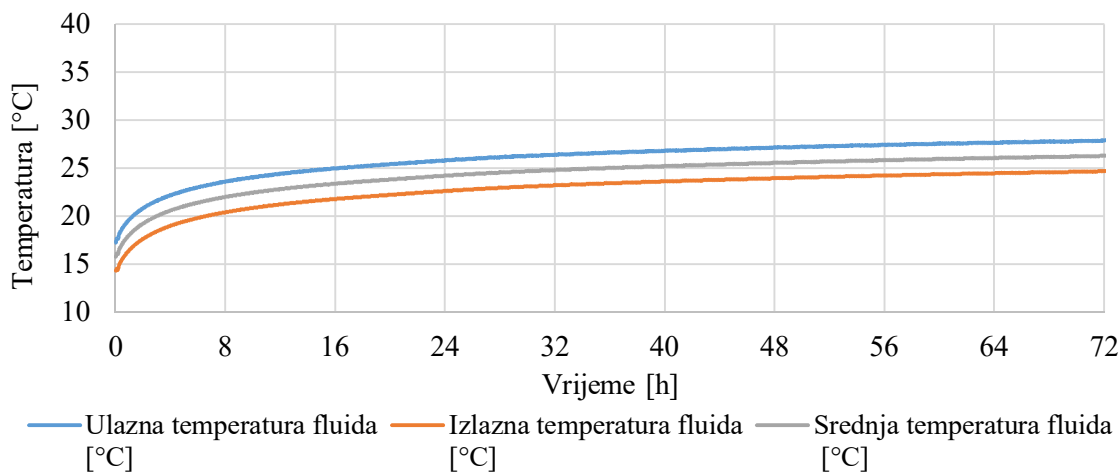


Slika 17. Shematski prikaz pozicija termoparova postavljenih po obodu bušotine [2]

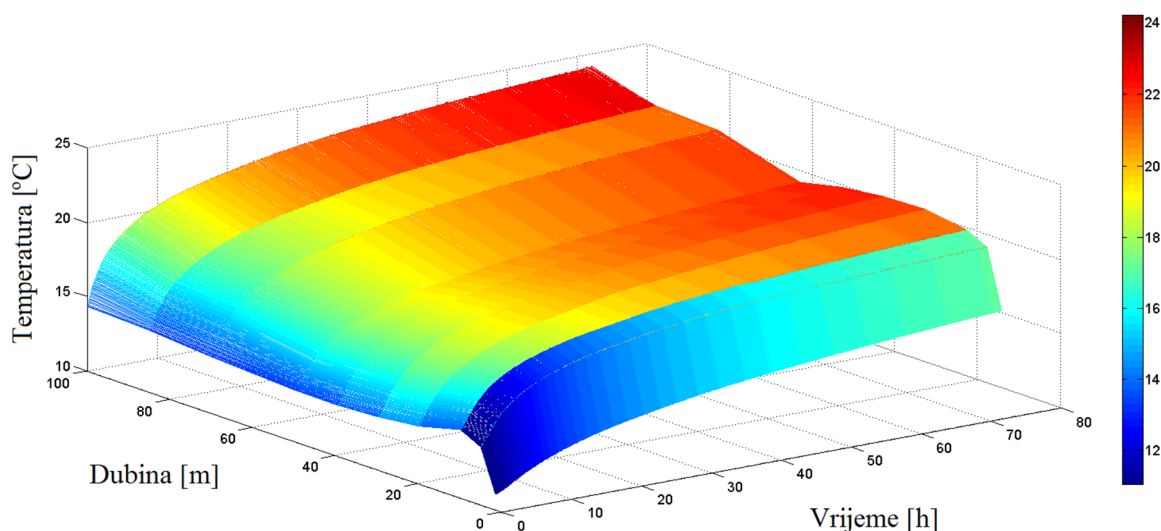
3.3. Rezultati mjerenja

Tablica 2. Rezultati TRT mjerenja provedenih na lokaciji FSB-a [2]

	Prvo mjerenje toplinskog odziva tla	Drugo mjerenje toplinskog odziva tla
Početak	19.03.2016.	15.04.2016.
Kraj	22.03.2016.	18.04.2016.
Isporučeni prosječni toplinski tok fluidu Φ [kW]	4,44	7,64
Temperatura neporemećenog tla T_{gr} [°C]	13,97	14,23
Referentna efektivna toplinska provodnost tla $\lambda_{ref,ef}$ [W/(m·K)]	1,837	1,801
Referentni efektivni toplinski otpor BIT-a $R_{b,ref,ef}$ [(m·K)/W]	0,069	0,064
Prosječna referentna efektivna toplinska provodnost tla $\overline{\lambda_{ref,ef}}$ [W/(m·K)]	1,819	
Prosječni referentni efektivni toplinski otpor BIT-a $\overline{R_{b,ref,ef}}$ [(m·K)/W]	0,067	



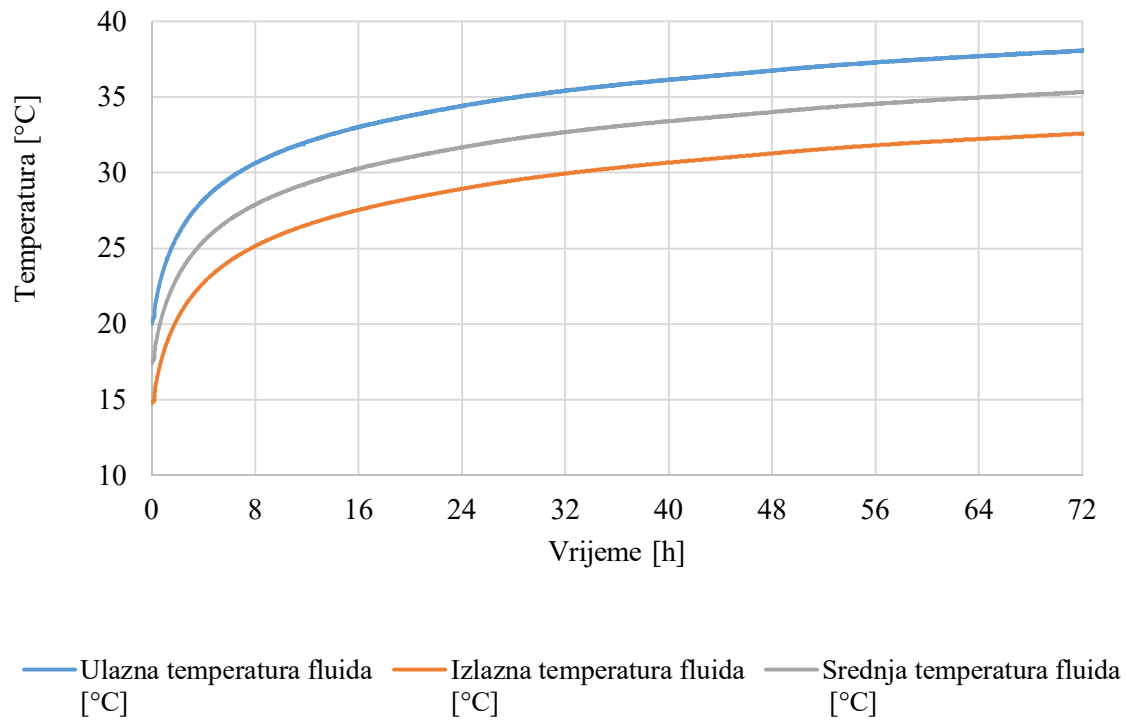
Dijagram 1. Temperature fluida kroz BIT tijekom provedbe prvog TRT-a [2]



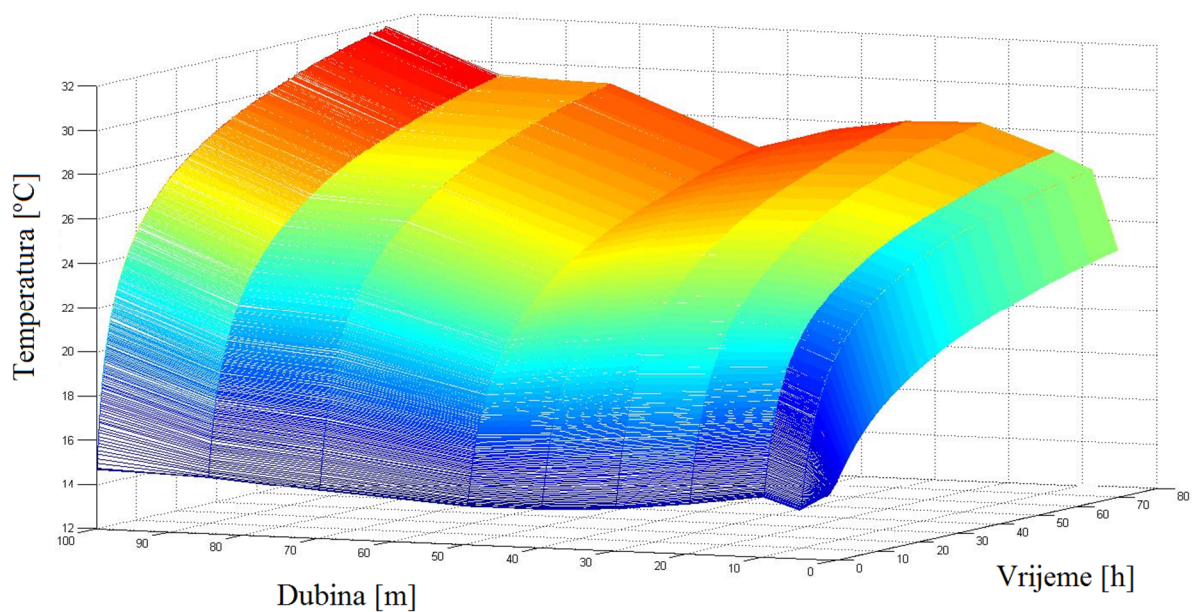
Dijagram 2. 3D prikaz ovisnosti temperaturnog profila po dubini bušotine o vremenu tijekom prvog TRT-a [2]

Dijagram 1. prikazuje promjenu temperatura fluida na ulazu i izlazu iz BIT-a tijekom prvog TRT-a. Vidljivo je da postoji izrazito nestacionarna promjena temperatura u prvim satima mjerenja. Uzrok takvog kretanja temperaturnih krivulja je neprogrijanost i toplinski kapacitet cijevi, ispunjene bušotine i ostalih komponenti koje sudjeluju u prijenosu topline. U prvih 16 sati provođenja TRT-a temperatura fluida na izlazu iz BIT-a promijeni se za 7,4°C, dok se u preostalim 56 sati promijeni za 3,5°C. Sporija promjena temperature od 16. sata pa nadalje, posljedica je progrijavanja bušotine i izmjene topline s tlom. Tlo se intenzivnije zagrijava u prvim satima provođenja TRT-a nakon čega intenzitet zagrijavanja opada. Ulazna temperatura fluida u BIT u posljednjem satu mjerenja iznosi 27,9°C, a izlazna 24,7°C.

Dijagram 2. prikazuje temperature izmjerene pomoću termoparova postavljenih po obodu bušotine.



Dijagram 3. Temperature fluida kroz BIT tijekom provedbe drugog TRT-a [2]



Dijagram 4. 3D prikaz ovisnosti temperaturnog profila po dubini bušotine o vremenu tijekom drugog TRT-a [2]

U prvih šesnaest sati provođenja drugog TRT-a temperatura fluida na izlazu iz BIT-a se promijeni za $12,8^{\circ}\text{C}$, dok se u preostalih 56 sati promijeni za $5,1^{\circ}\text{C}$. Ulazna temperatura fluida u BIT u posljednjem satu mjerenja iznosi $38,1^{\circ}\text{C}$, a izlazna $32,6^{\circ}\text{C}$.

Dijagram 4. prikazuje temperature izmjerene pomoću termoparova postavljenih po obodu bušotine. Dijagrami 2. i 4. napravljeni su korištenjem računalnog programa MATLAB.

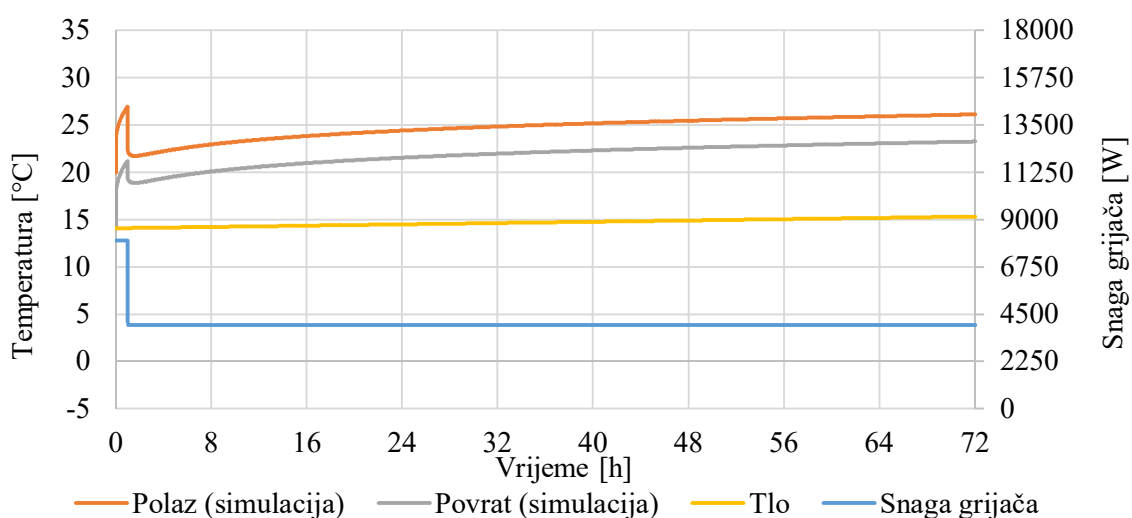
3.4. Simulacija toplinskog odziva tla u TRNSYS-u

Računalnom simulacijom u TRNSYS-u cilj je bilo modelirati BIT koji vjerodostojno opisuje bušotinu na kojoj su provedena mjerenja. Pri modeliranju BIT-a glavna vodilja je bilo poklapanje ulazne i izlazne temperature radnog fluida koji teče kroz BIT. Pri parametrima kada su izmjerene vrijednosti poklopile sa simuliranim model BIT-a u TRNSYS-u proglašen je dovoljno točnim za simuliranje toplinskog odziva tla. Cilj simulacije TRT-a bio je analizirati mogućnost skraćivanja vremena trajanja provođenja TRT ispitivanja upotrebom promjenjivih toplinskih tokova. a Računalna simulacija je provedena za dvije skupine toplinskih tokova u različitim trajanjima:

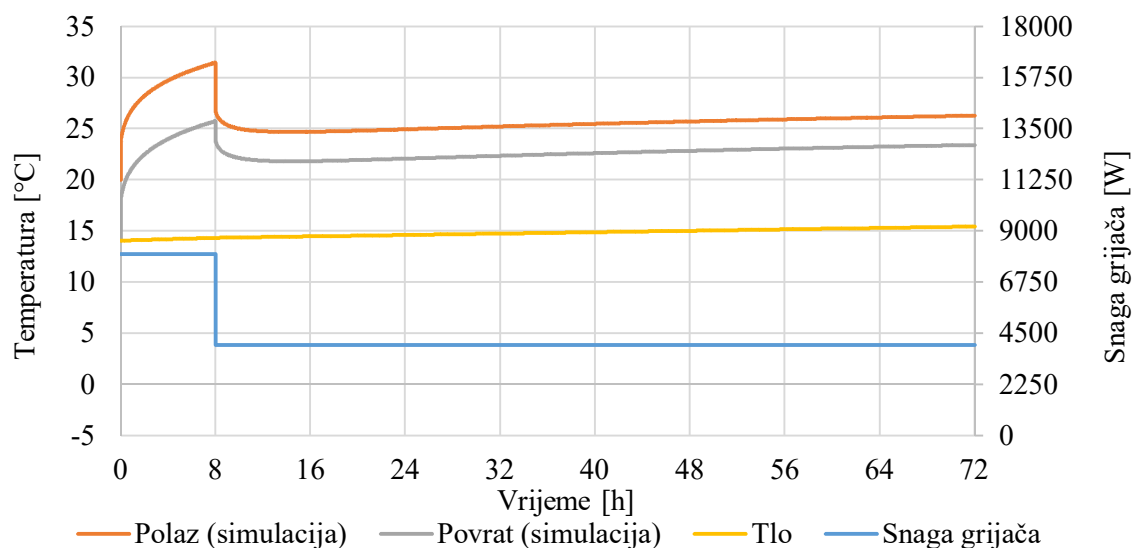
- Prva skupina toplinskih tokova podrazumijeva kombinaciju početnog toplinskog toka od 8 kW u različitim vremenskim trajanjima (1 h, 2 h, 3 h, 4 h, 5 h, 6 h, 7 h i 8 h), nakon čega se nastavlja zagrijavanje fluida toplinskim tokom od 4 kW
- Druga skupina toplinskih tokova podrazumijeva kombinaciju početnog toplinskog toka od 10 kW u istim vremenskim trajanjima kao i prva skupina, nakon čega se nastavlja zagrijavanje fluida toplinskim tokom od 5 kW

3.4.1. Rezultati simulacije TRT-a

Dijagrami 5. i 6. prikazuju korištenje većeg toplinskog toka u prvim satima simulacije zbog čega na početku postoji intenzivno zagrijavanje fluida, nakon kojeg se koristi upola manji toplinski tok. Nakon smanjivanja toplinskog toka vidljiv je i nagli pad temperature fluida dok se opet ne uspostavi stacionarna izmjena topline s tlom. Primjećuje se da vrlo brzo nakon spomenutog „efekta hlađenja“ karakteristika temperature poprima linearnu karakteristiku iz koje je moguće izračunati toplinsku provodnost tla.

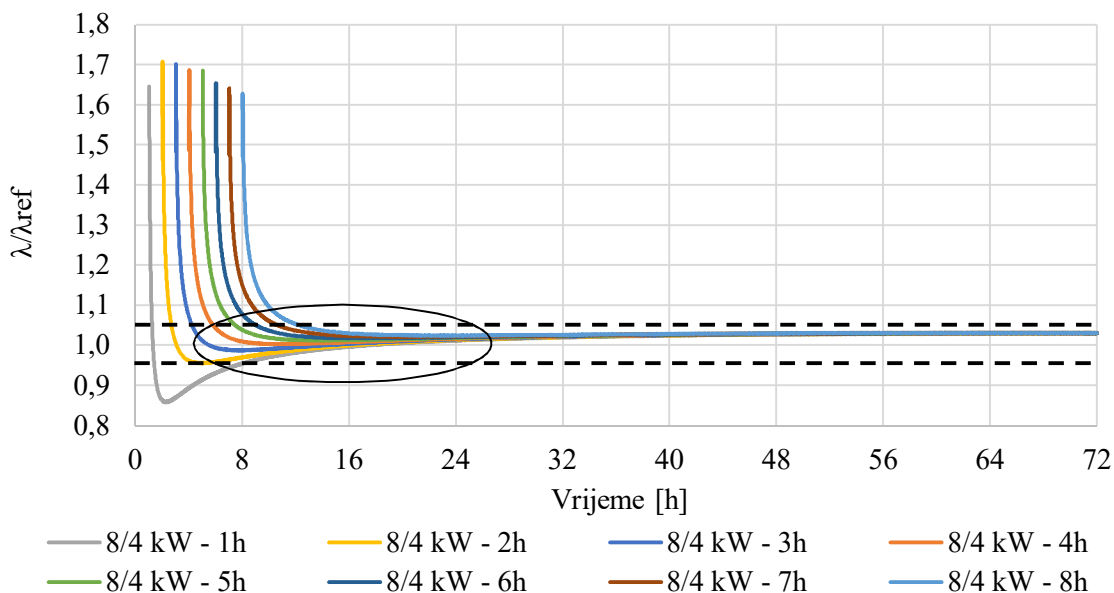


Dijagram 5. Promjena parametara procesa uzrokovana početnim toplinskim tokom od 8 kW u trajanju od jednog sat [2]

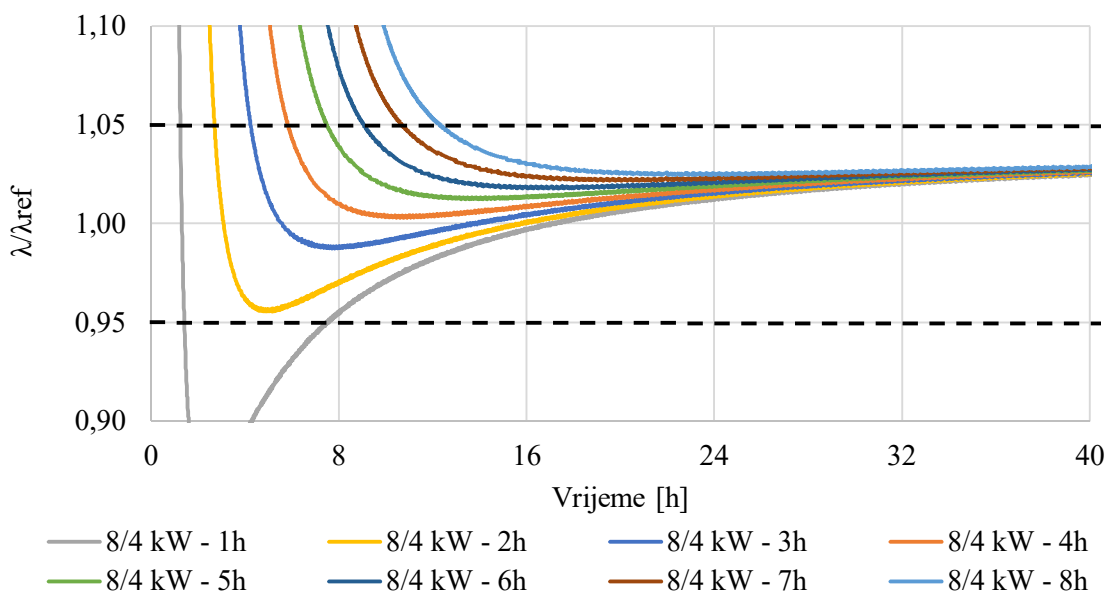


Dijagram 6. Promjena parametara procesa uzrokovana početnim toplinskim tokom od 8 kW u trajanju od osam sati [2]

Dijagram 7. prikazuje odstupanje efektivne toplinske provodnosti tla u odnosu na referentnu vrijednost za različita vremena trajanja većeg toplinskog toka. Ako je trajanje toplinskog toka od 8 kW manje od 4 sata, već nakon 20 sati mjerenja moguće je dobiti efektivnu toplinsku provodnost tla koja odstupa manje od 5% od referentne vrijednosti.



Dijagram 7. Odstupanje efektivne toplinske provodnosti tla od referentne vrijednosti ovisno o vremenu razmatranja rezultata dobivenih simulacijom (8 kW na 4 kW) [2]



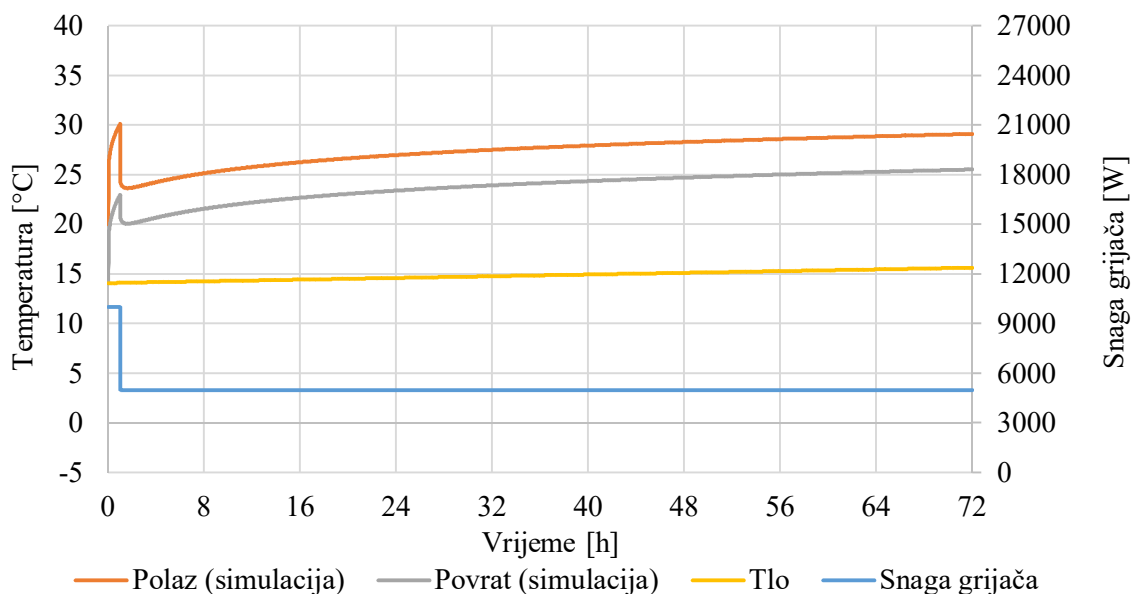
Dijagram 8. Uvećani prikaz odstupanja efektivne toplinske provodnosti tla od referentne vrijednosti ovisno o vremenu razmatranja rezultata dobivenih simulacijom (8 kW na 4 kW) [2]

Kriterij točnosti korišteni za definiranje minimalnog vremena provođenja TRT-a i minimalnog vremena trajanja segmenta za obradu podataka su [2]:

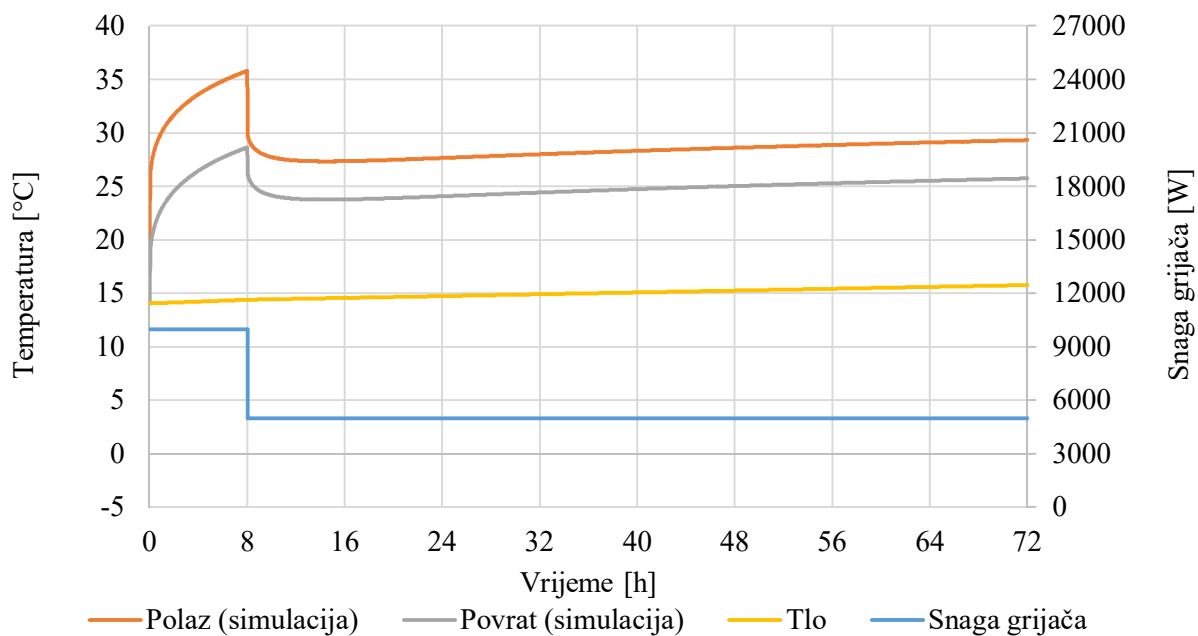
- odstupanja efektivnih toplinskih provodnosti od referentne vrijednosti moraju biti unutar $\pm 5\%$
- oscilacija efektivne toplinske provodnosti mora biti unutar $\pm 2\%$ u vremenu od minimalno 12 sati

Iz dijagrama 7. i 8. vidljivo je da postoji koherencija između trajanja impulsa toplinskog toka i vremena provođenja TRT-a. Dijagrami jasno prikazuju da se korištenjem impulsa toplinskog toka od 8kW u trajanju od 2 sata ostvaruje odstupanje efektivne toplinske provodnosti od referentne vrijednosti unutar $\pm 5\%$ nakon 3. sata od početka simulacije. Problem koji je izražen kod dvosatnog impulsa je velika oscilacija toplinske provodnosti. Iako se odstupanje nalazi unutar definiranog kriterija, razlog zbog kojeg se neće razmatrati ovaj impuls je oscilacija u vrijednosti toplinske provodnosti od 9% u razmaku od 2 sata.

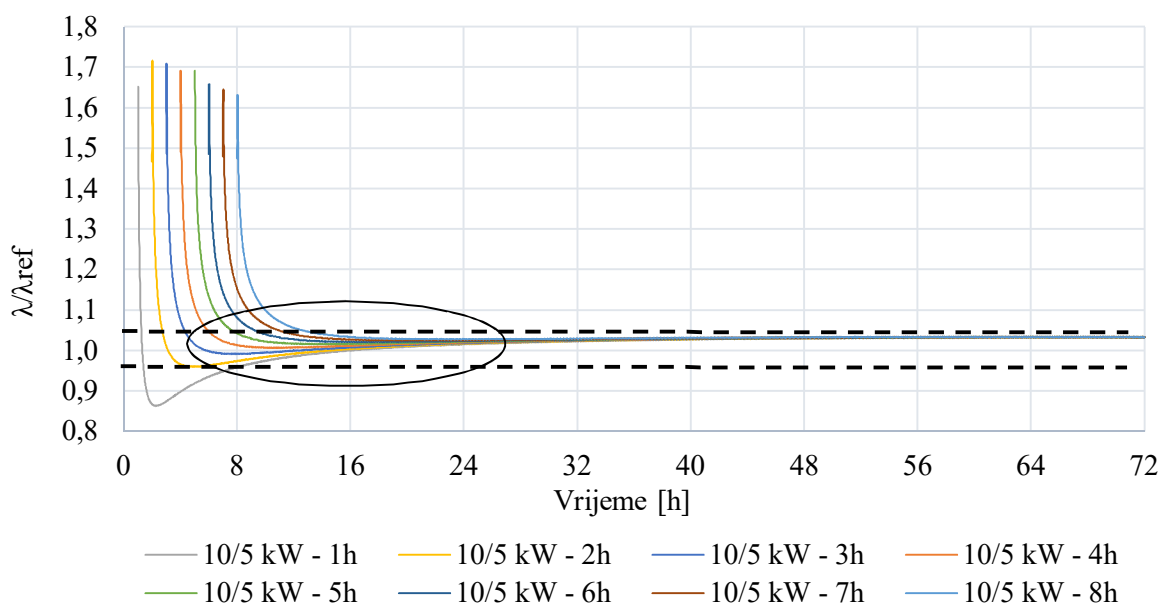
Dijagrami 9., 10., 11. i 12. pokazuju rezultate simulacije TRT-a korištenjem jačeg toplinskog toka od 10 kW te slabijeg od 5 kW.



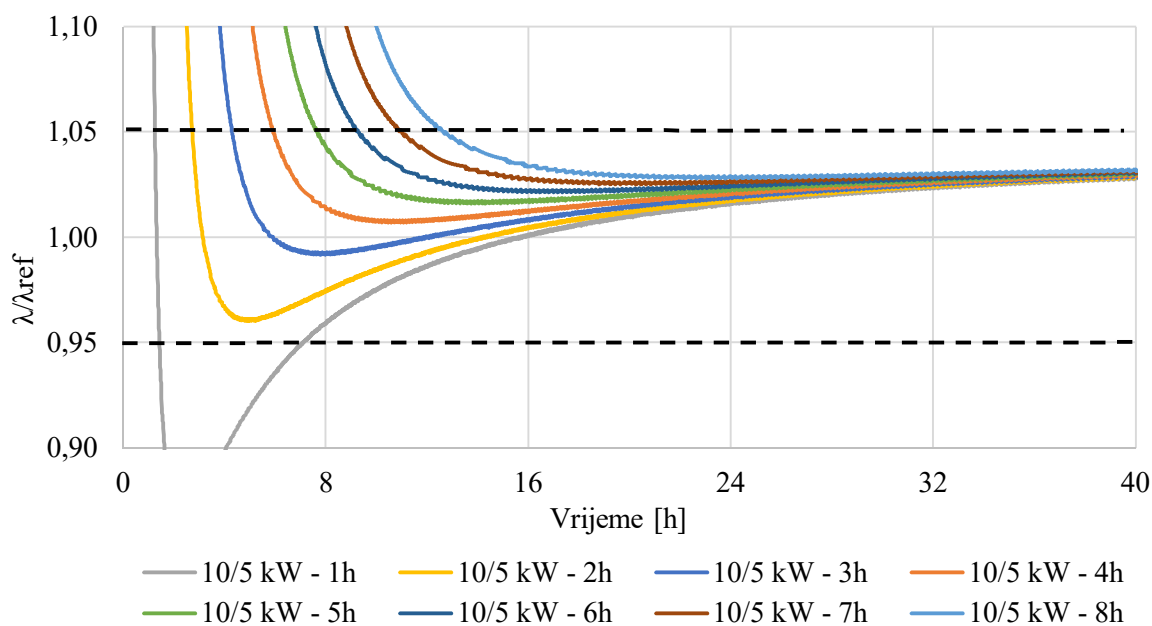
Dijagram 9. Promjena parametara procesa uzrokovana početnim toplinskom tokom od 10 kW u trajanju od jednog sat [2]



Dijagram 10. Promjena parametara procesa uzrokovana početnim toplinskom tokom od 10 kW u trajanju od osam sati



Dijagram 11. Odstupanje efektivne toplinske provodnosti tla od referentne vrijednosti ovisno o vremenu razmatranja rezultata dobivenih simulacijom (10 kW na 5 kW) [2]



Dijagram 12. Uvećani prikaz odstupanja efektivne toplinske provodnosti tla od referentne vrijednosti ovisno o vremenu razmatranja rezultata dobivenih simulacijom (10 kW na 5 kW) [2]

Usporedbom dijagrama 8. i 12. vidljivo je da promjena jačine početnog impulsa s 8 kW na 10 kW ima utjecaj na skraćivanje perioda stabilizacije vrijednosti toplinske provodnosti. Utjecaj promjene jačine toplinskog toka na rezultate simulacije slabije je izražen zbog malih razlika u jačini toplinskih tokova. Usporedbom rezultata mjerenja i simulacije i zaključaka koji proizlaze iz njih uočava se podudarnost. U oba slučaja vidljiva je sprega između povećanja jačine toplinskog toka i skraćivanja vremena provođenja TRT-a. Primjenom kriterija točnosti na trajanje TRT-a za slučaj konstantnog toplinskog toka od 8 kW dobiva se minimalno trajanje od 26,5 sata, dok za slučaj konstantnog toplinskog toka od 10 kW dobivamo trajanje od 24,5 sata. U slučaju kombiniranih toplinskih tokova, za četverosatni impuls od 8 kW minimalno vrijeme trajanja TRT-a iznosi 19 sati, dok je u slučaju četverosatnog impulsa od 10 kW minimalno vrijeme trajanja 18,7 sati.

3.5. Zaključak uz provedena mjerenja i simulacije

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti:

- Povećanjem toplinskog toka moguće je skratiti trajanje mjerenja toplinskog odziva tla bez utjecaja na točnost rezultata.
- Korištenjem jačeg toplinskog toka smanjuje se utjecaj nehomogenosti strukture tla i vodonosnika.
- Računalnim simulacijama je pokazano da se kombiniranjem toplinskih tokova različitih jačina ostvaruje dodatno skraćivanje vremena provođenja toplinskog odziva tla.

Kritički osvrt na rezultate

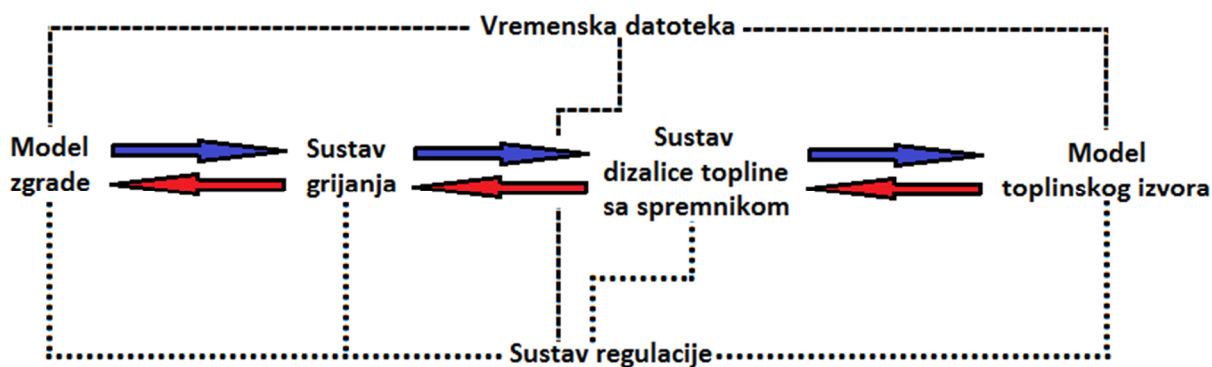
- Korišteni modeli ne uzimaju u obzir nehomogenosti strukture tla kao ni vodonosnike. U slučaju njihove izražene pojave, moguć je velik utjecaj na dobivene efektivne vrijednosti mjerenjem.
- Korišteni simulacijski model relativno je pojednostavljen, a rezultati simulacija bi se mogli potvrditi novim modelima, koji u obzir uzimaju više utjecajnih parametara te provedenim TRT mjerenjima na stvarnim lokacijama s parametrima koji su korišteni u simulacijama.

4. MODELIRANJE SUSTAVA GRIJANJA U RAČUNALNOM PROGRAMU TRNSYS

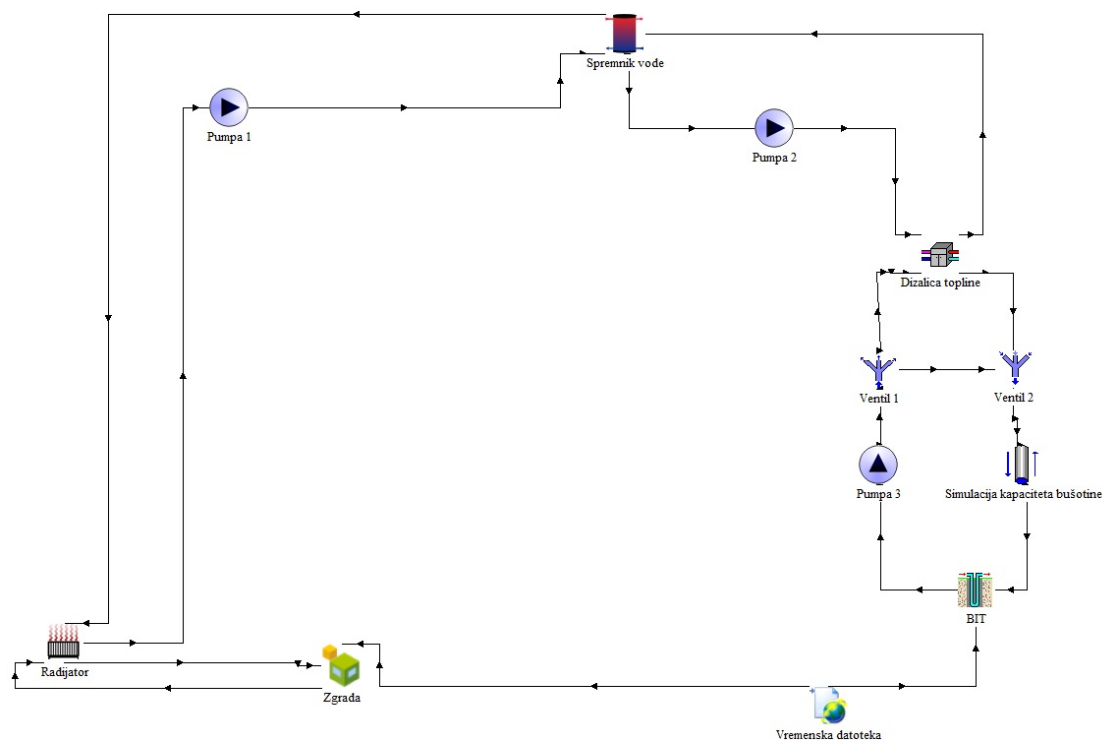
Računalni program TRNSYS (*TRaNsient SYstem Simulation program*) služi za simuliranje tranzijentnih promjena nekog sustava. Najčešća primjena ovog programa je u simulacijama i projektiranju različitih objekata, opreme te razmatranju upotrebe obnovljivih izvora energije. Njegova modularna struktura omogućava opisivanje brojnih problema kombiniranjem različitih komponenti, koje su definirane u sklopu programa ili, ako komponente nisu definirane, poznavanjem ostalih programskih jezika (C++, PASCAL, itd.) omogućeno je samostalno definirati nove komponente [2].

U računalnom programu TRNSYS napravljen je model sustava grijanja zgrade s dizalicom topline čiji je toplinski izvor tlo. Simulacija se sastoji od nekoliko podsustava:

- Model grijane zgrade
- Podsustav toplinskog izvora povezanog s komponentom dizalice topline
- Podsustav dizalice topline sa spremnikom vode za grijanje
- Podsustav grijanja priključen na model zgrade
- Podsustav regulacije



Slika 19. Jednostavna shema simuliranog sustava



Slika 20. Pojednostavljena shema simulacije iz TRNSYS-a - bez sustava regulacije

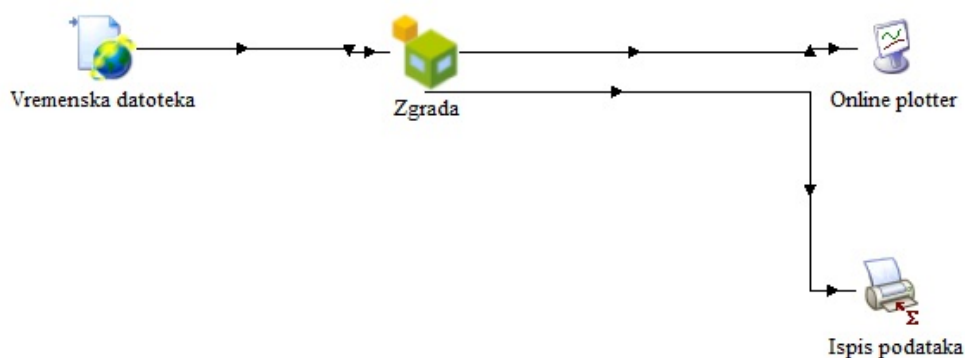
U sljedećim poglavljima bit će opisano modeliranje pojedinih komponenti sustava.

4.1. Model zgrade

Kao podloga za geometriju modela zgrade koju je potrebno grijati korišten je jedan kat nebodera južne zgrade FSB-a. Model se sastoji od vanjskih zidova s prozorima te poda i stropa prema vanjskom okolišu. Za izradu modela i proračune energetske potrebe za grijanje korišten je računalni program TRNBuild koji je sastavni dio TRNSYS-a. Površina poda i stropa zgrade iznosi 560m^2 , površina sjevernog i južnog zida 100m^2 , od čega je 70% staklena površina (prozori), te površina istočnog i zapadnog zida iznosi 35m^2 . Model je napravljen tako da se pod zgrade nalazi na tlu s pretpostavljenom srednjom godišnjom temperaturom površine tla od približno $11,6\text{ }^\circ\text{C}$. Materijali zidova, poda i stropa slični su materijalima kakvi su korišteni na zgradi FSB-a.

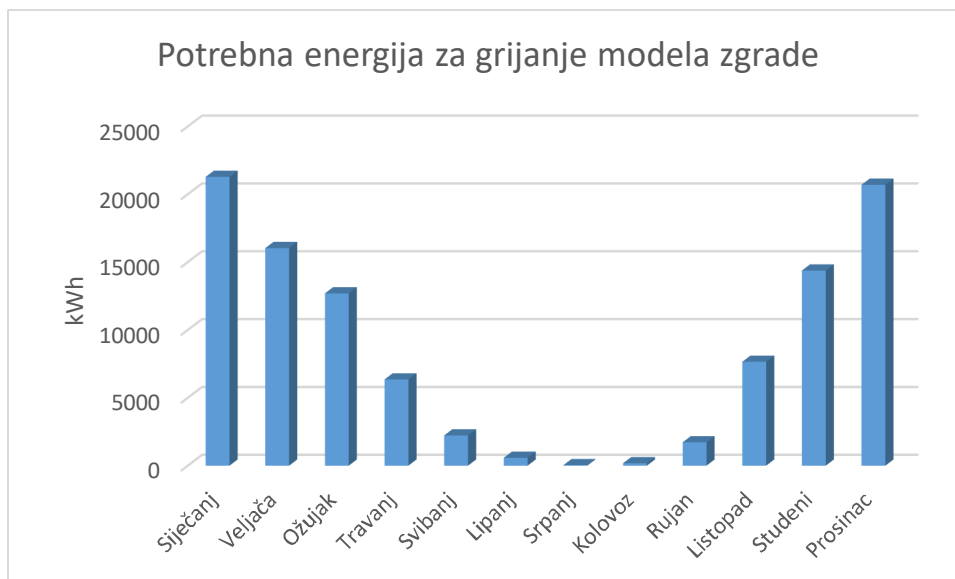
Tablica 3. Karakteristike modela zgrade

Zgrada	Građevni elementi	U vrijednost [W/m ² K]	Infiltracija [h ⁻¹]	Toplinski kapacitet [kJ/K]
Jednozonska zgrada s jednom etažom	Pod	1,77	0,6	1680
	Strop	1,19		
	Vanjski zid	3,50		
	Prozor	2,83		



Slika 21. Shema simulacije u TRNSYS-u za određivanje godišnje potrebne energije za grijanje prostora

U model su uračunati toplinski gubici kroz pod, strop, zidove i prozore, gubici zbog infiltracije te unutarnji toplinski dobici. Model zgrade napravljen je u TRNBuild-u učitani je u TRNSYS Simulation studio u komponentu Type 56. Pokretanjem simulacije izračunata je ukupna potrebna godišnja energija za grijanje prostora koja iznosi 103,83 MWh uz postavnu temperaturu grijanja od 20°C kroz sve sate u godini.



Dijagram 13. Potrebna energija za grijanje modela zgrade po mjesecima

4.2. Model toplinskog izvora

Dizalica topline preuzima toplinu iz tla preko bušotinskog izmjenjivača topline u obliku U-cijevi simuliranog upotrebom komponente Type 557b u TRNSYS-u. Komponenta Type 557b se temelji na DST modelu (Duct storage system model, [11]). Ovaj numerički model dijeli volumen tla koji obuhvaća bušotine, na dva dijela. Prvi dio odnosi se na toplinske promjene oko pojedinog izmjenjivača, „lokalno područje“, a drugi na toplinske promjene oko cijelog volumena, koji uključuje sve izmjenjivače i tlo koje ih okružuje, „globalno područje“ [12]. Procesi koji se odvijaju unutar „lokalnog“ i „globalnog“ područja opisuju se superpozicijom temperatura, a svaka od njih se sastoji od tri komponente:

- globalna komponenta
- lokalna komponenta
- komponenta konstantnog toka

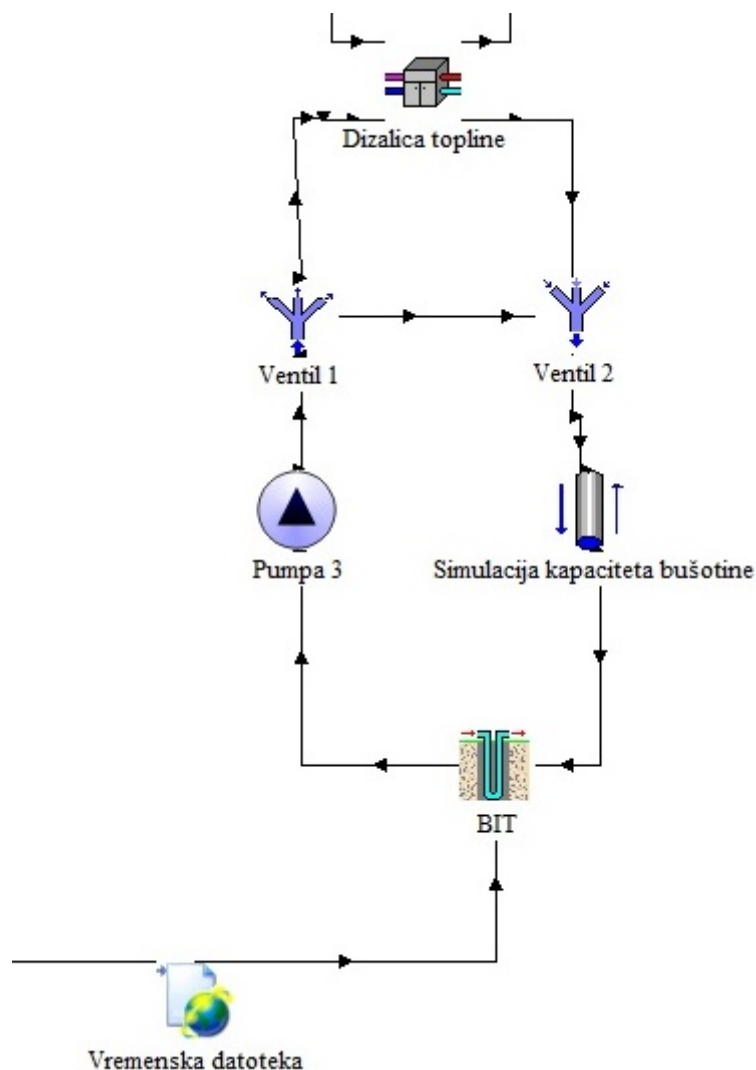
Globalna komponenta temperature rezultat je toplinske interakcije između tla u blizini BIT-ova (toplinski poremećeno tlo) i tla na udaljenosti gdje BIT-ovi više nemaju utjecaj na temperaturu (toplinski neporemećeno tlo). Lokalna radijalna komponenta temperature je posljedica kratkotrajnih poremećaja. Promjene temperature nastale uslijed dovođenja konstantnog toplinskog toka u okolini BIT-a opisane su komponentom konstantnog toka. Rezultat

superpozicije komponenti temperatura je temperatura u određenoj točki volumena tla na koju utječe konstantan toplinski tok iz BIT-a [14].

Radni fluid koji protječe kroz bušotinski izmjenjivač topline je voda (radi pojednostavljenja), dok je u realnom sustavu to obično mješavina vode i glikola (mješavina ima niže ledište od čiste vode). Parametri komponente 557b (npr. toplinski otpor bušotine, svojstva ispune, itd.) preuzeti su iz [2].

Tablica 4. Parametri komponente Type 557b

Dubina jedne bušotine	100 m
Broj bušotina	13
Radijus bušotine	0,076 m
Toplinska provodnost volumena tla koji obuhvaćaju BIT-ovi	1,819 W/(m K)
Specifični toplinski kapacitet volumena tla koji obuhvaćaju BIT-ovi	2769 kJ/(m ³ K)
Toplinski otpor bušotine	0,067 (m K)/W
Toplinska provodnost tla	1,819 W/(m K)
Toplinski kapacitet tla	2769 kJ/(m ³ K)

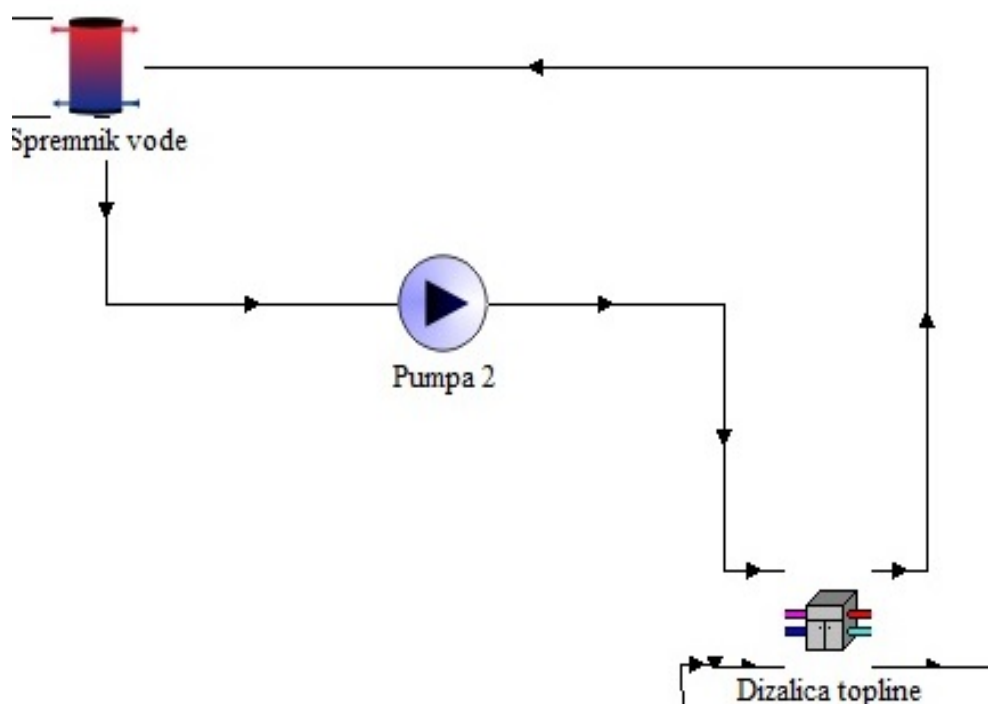


Slika 22. Shema modela sustava toplinskog izvora

Komponenta BIT-a dobiva iz vremenske datoteke učitane preko komponente Type 15-6 meteorološke podatke za grad Zagreb. Komponenta Type 114 predstavlja cirkulacijsku pumpu koja pumpa vodu iz BIT-a prema dizalici topline gdje ona na isparivaču izmjenjuje toplinu s radnom tvari dizalice topline. Nakon izlaska iz dizalice topline voda struji prema BIT-u prolazeći kroz komponentu Type 604b koja simulira toplinski kapacitet bušotine. Nakon prolaska vode kroz BIT započinje novi ciklus kruženja kroz cirkulacijsku pumpu i prema dizalici topline. Komponente Type 604b, 647 i 649 bit će detaljnije objašnjene u poglavlju regulacije.

4.3. Modeliranje sustava dizalice topline i spremnika vode

Dizalica topline modelirana je korištenjem komponente Type 927. Radi stabilnosti sustava i postizanja konvergencije simulacije u TRNSYS-u odabrana je jača dizalica topline nego što je potrebno za modeliranu zgradu. Ogrjevni kapacitet odabrane dizalice topline je 75 kW. Ona je spojena na spremnik tople vode koji u TRNSYS-u predstavlja komponenta Type 534. Voda struji iz dizalice topline prema spremniku ulazi na vrh spremnika te izlazi na dnu prolazeći kroz cirkulacijsku pumpu Type 114. Nakon toga ulazi u dizalicu topline gdje se zagrijava i izmjenjuje toplinu s radnom tvari dizalice topline na kondenzatoru.



Slika 23. Shema modela sustava dizalice topline i spremnika vode

U nastavku se nalaze tablice 5. i 6. sa ulaznim parametrima komponenta Type 927 (dizalica topline) i Type 534 (spremnik tople vode).

Tablica 5. Parametri komponente dizalice topline Type 927

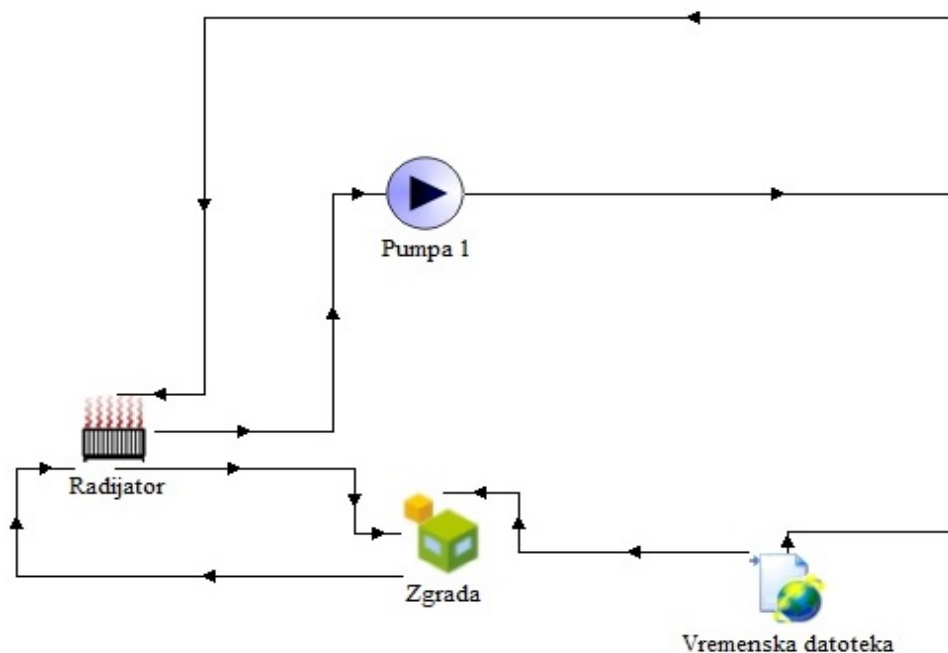
Specifični toplinski kapacitet radnog fluida (vode) – strana toplinskog izvora i ponora	4,187 kJ/(kg K)
Gustoća radnog fluida (vode) – strana toplinskog izvora i ponora	998 kg/m ³
Kapacitet grijanja dizalice topline	75 kW
Snaga kompresora	15 kW

Tablica 6. Parametri komponente spremnika vode Type 534

Volumen spremnika	2 m ³
Visina spremnika	1,5 m
Broj izotermnih zona spremnika	10
Specifični toplinski kapacitet radnog fluida (vode)	4,187 kJ/(kg K)
Gustoća radnog fluida (vode)	998 kg/m ³

4.4. Modeliranje sustava grijanja

Grijanje prostora u svakom vremenskom koraku simulacije provodi se preko komponente radijatora – Type 1231. Komponenta Type 1231 kao ulazne parametre koristi protok i temperaturu vode koji dolaze iz spremnika tople vode te temperaturu prostora koji se grije. Izlazni parametri iz komponente su protok i temperatura vode koja se vraća u spremnik tople vode te toplinska energija koja se predaje za grijanje prostora.



Slika 24. Shema modela sustava grijanja

4.5. Modeliranje regulacijskog sustava i opis rada simulacije

Regulacija rada sustava dizalice topline napravljena je pomoću komponente termostata (Type 2), račvastog (Type 647) i miješajućeg (Type 649) ventila čije je vođenje opisano pomoću matematičkih jednadžbi. Simulacija rada sustava provedena je za cijelu godinu uz vremenski korak simulacije od 10 minuta. Regulaciju rada sustava moguće je podijeliti u tri podskupine:

- Regulacija rada dizalice topline i pumpe u krugu spremnika i dizalice topline
- Regulaciju rada račvastog ventila u krugu bušotinskog izmjenjivača topline
- Regulaciju rada pumpe kruga grijanja

Termostat (Type 2) bilježi temperaturu polaznog voda iz spremnika prema radijatoru te ju uspoređuje s namještenom temperaturom na termostatu. Ukoliko je temperatura polaznog voda u nekom vremenskom trenutku niža od namještene, termostat će poslati „1“ kao izlazni signal, a ukoliko je temperatura polaznog voda viša od postavne temperature termostat će poslati „0“ kao izlazni signal. Kako bi se spriječilo prečesto uključivanje i isključivanje, postavljena je histereza na termostatu od $+5^{\circ}/-5^{\circ}\text{C}$. Postavna temperatura na termostatu mijenja se u svakom vremenskom periodu simulacije te ovisi o vanjskoj temperaturi zraka. U simulaciji je korištena jednadžba krivulje grijanja (Komponenta u TRNSYS-u: „Potrebna temperatura polaza prema

radijatoru“) pomoću koje je dobivena temperatura polaza vode prema radijatoru u ovisnosti o temperaturi vanjskog zraka. Dobivene temperature polaza korištene su kao postavne temperature termostata. U svakom vremenskom intervalu simulacije termostat odašilje signale na tri mjesta. Signal uključeno („1“) ili isključeno („0“) šalje se dizalici topline te pumpi kruga spremnik vode-dizalica topline. Treće mjesto je međukomponenta kruga BIT-a (Komponenta u TRNSYS-u: „Regulacija kruga BIT-a“). U krugu BIT-a, pumpa radi cijelu godinu, a regulira se rad račvastog ventila, odnosno hoće li on vodu propustiti prema dizalici topline ili obilaznim vodom (bypass) nazad prema BIT-u. Naime, u međukomponenti su postavljena 2 uvjeta:

- Ukoliko termostat daje izlazni signal „1“ tada račvasti ventil (Ventil 1) propušta 100% protoka vode iz BIT-a prema dizalici topline
- Ukoliko termostat daje izlazni signal „0“ tada račvasti ventil (Ventil 1) propušta 100% protoka kroz obilazni vod prema BIT-u

Obilazni vod uveden je kako bi se simulirao toplinski kapacitet bušotinskog izmjenjivača topline jer se korištenjem komponente bušotinskog izmjenjivača topline Type 557b tlo ne regenerira u očekivanoj mjeri s obzirom na izmjerene podatke. Iz navedenog razloga nakon miješajućeg ventila postavljena je cijev (Type 604b) koja simulira toplinski kapacitet bušotine, a njena geometrija je u skladu sa istraživanjem Parisch-a i drugih [10]. Cijev je modelirana tako da se zanemare toplinski gubici konvekcijom i zračenjem.

Prema [10], unutarnji promjer cijevi izračunava se prema jednadžbi (13):

$$d_{ucijevi} = 2 * d_{vU-cijevi} * \sqrt{\frac{H_{bušotine}}{L_{cijevi}}} [m], \quad (13)$$

Gdje je

- $D_{vU-cijevi}$ – vanjski promjer U-cijevi BIT-a, [m]
- $H_{bušotine}$ – ukupna duljina bušotinskog izmjenjivača topline, [m]
- $L_{cijevi} = H_{bušotine}$ – duljina cijevi, [m]

$$d_{ucijevi} = 2 * 0,032 * \sqrt{\frac{1300}{1300}}$$

Prema [10], vanjski promjer cijevi računa se prema jednadžbi (14):

$$d_{vcijevi} = d_{vbušotine} * \sqrt{\frac{H_{bušotine}}{L_{cijevi}}} \text{ [m]}, \quad (14)$$

Gdje je

- $D_{vbušotine}$ – vanjski promjer bušotine, [m]

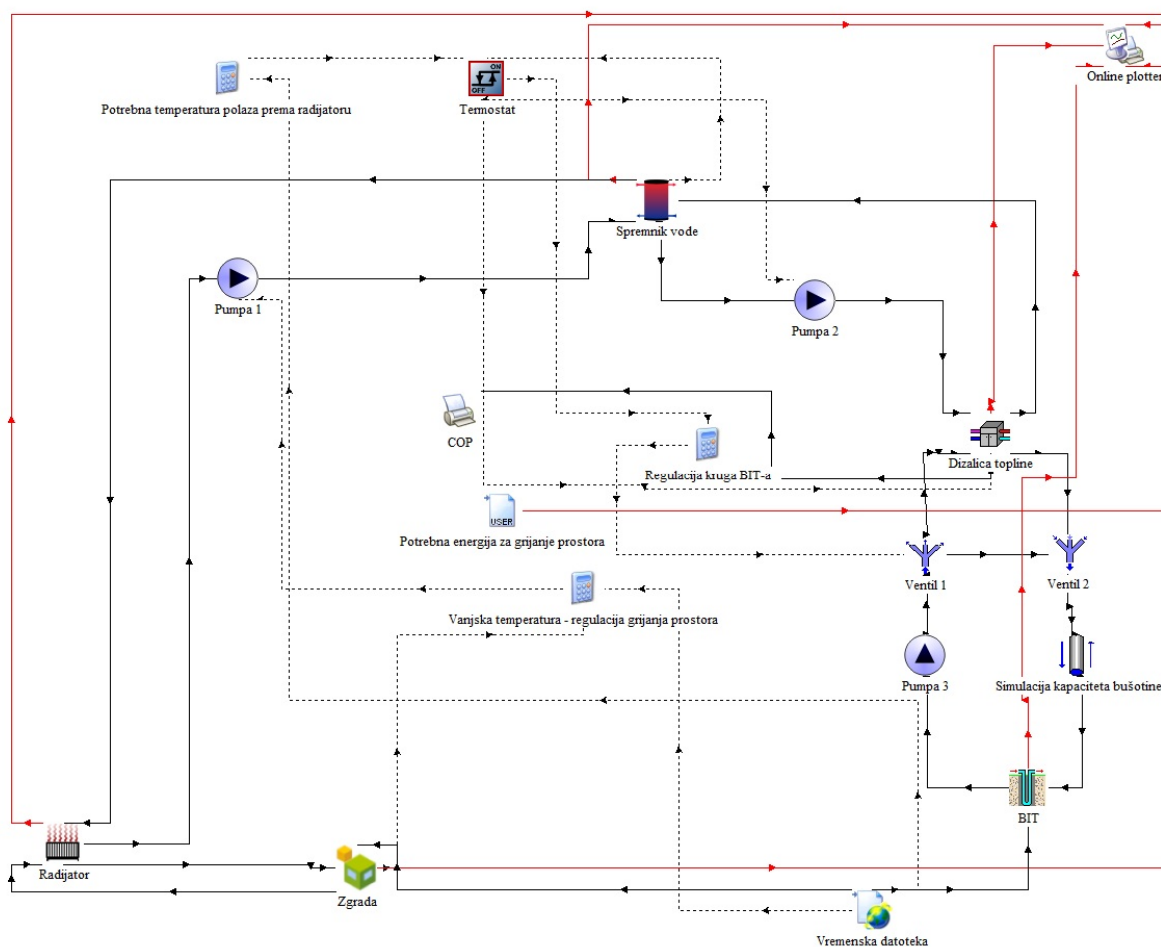
$$d_{vcijevi} = 0,152 * \sqrt{\frac{1300}{1300}}$$

U tablici 7. se mogu naći postavni parametri cijevi (Type 604b) koji odgovaraju ispuni BIT-a.

Tablica 7. Parametri komponente cijevi Type 604b

Duljina cijevi	1300 m
Unutarnji promjer cijevi	0,064 m
Vanjski promjer cijevi	0,152 m
Gustoća materijala cijevi = gustoći ispune bušotine	1800 kg/m ³
Toplinska provodnost cijevi = toplinskoj provodnosti ispune bušotine	2,35 W/(m K)
Specifični toplinski kapacitet cijevi = specifičnom toplinskom kapacitetu bušotine	1,2 kJ/kgK
Specifični toplinski kapacitet radnog fluida (vode)	4,187 kJ/(kg K)
Gustoća radnog fluida (vode)	998 kg/m ³

Rad pumpe u krugu grijanja (Pumpa 1) ovisi o temperaturi u prostoru te temperaturi okoliša u svakom vremenskom intervalu simulacije. Uvedena je međukomponenta (Komponenta u TRNSYS-u: „Vanjska temperatura – regulacija grijanja prostora“) koja s obzirom na navedene temperature upućuje signal uključeno („1“) ili isključeno („0“) pumpi kruga grijanja. Ukoliko su temperatura prostora i temperatura okoliša istovremeno manje od 20°C tada će izlazni signal biti „1“. U slučaju da jedan ili oba postavljena uvjeta nisu zadovoljena izlazni signal će biti „0“ te neće biti protoka kroz radiator, odnosno grijanje u prostoru će biti isključeno.



Slika 25. Potpuna shema simulacije u TRNSYS-u – s regulacijskim sustavom i komponentama za ispis podataka

5. DIMENZIONIRANJE POLJA BUŠOTINSKIH IZMJENJIVAČA TOPLINE

Dimenzioniranje polja bušotinskih izmjenjivača topline provodi se pomoću računalnih programa, poput EED-a (Earth Energy Design), ili pomoću analitičkih modela. Dimenzije polja bušotinskih izmjenjivača topline ponajviše ovise o ([17]):

- Geološkim i termogeološkim značajkama tla i stijena (npr. neporemećena temperatura tla, sastav i svojstva tla, itd.)
- Hidrogeološkim karakteristikama tla i stijena (prisutnost vodonosnika u tlu)
- Geotermalnom gradijentu i geotermalnom toplinskom toku po dubini tla
- Tehno-ekonomskim parametrima bušotina (npr. cijeni bušenja, načinu bušenja i vrsti instalirane opreme, itd.)
- Klimatskim uvjetima i potrebama za grijanje/hlađenje objekta za koji će se primjenjivati sustav dizalice topline s tlom kao toplinskim izvorom

Polje bušotinskih izmjenjivača topline vrlo je važno pravilno dimenzionirati kako bi se izbjegli negativni utjecaji na tehno-ekonomske parametra rada sustava dizalice topline. Naime, u slučaju poddimenzioniranog polja, dizalica topline će iz tla brže povlačiti toplinsku energiju no što se ono može regenerirati. Zbog nedovoljne regeneracije, usred dugogodišnjeg rada sustava, tlo će se kontinuirano pothlađivati zbog čega će temperature radnog fluida na polazu iz BIT-a biti niže što će negativno utjecati na učinkovitost rada dizalice topline. Ukoliko je polje predimenzionirano, investicijski troškovi (npr. bušenje, bušotinski izmjenjivači topline, itd.) bit će veći što će negativno utjecati na isplativost cijelog postrojenja. Pravilnim dimenzioniranjem varijacije temperature tla te radnog fluida bit će smanjene na najmanju moguću vrijednost. Što su manje varijacije temperature lakše je predvidjeti dinamiku rada sustava, a time i učinkovitost dizalice topline.

Polje BIT-ova korišteno u simulaciji dimenzionirano je s obzirom na kapacitet dizalice topline te uz uvjet da temperature povrata radnog fluida u BIT ne padnu ispod ledišta radnog fluida, već da su barem 1-2 °C iznad temperature ledišta. Za usporedbu s odabranim dimenzijama polja bušotinskog izmjenjivača topline u simulaciji prikazat će se rezultati dobiveni putem EED-a te analitičkog proračuna.

5.1. Dimenzioniranje polja BIT-a upotrebom EED-a

EED je računalni program koji za unijeta svojstva tla, bušotinskog izmjenjivača topline, radnog fluida i potrebne energije za grijanje građevine predlaže nekoliko rješenja u smislu broja, rasporeda i dubine bušotinskih izmjenjivača topline. Komponenta Type 557b u TRNSYS-u smješta unijeti broj bušotina u cilindrični volumen, dok je raspored bušotina dobiven EED-om u linijskom ili pravokutnom (kvadratnom) rasporedu. Odabrano rješenje dobivenom EED-om nije ono s najmanjim brojem bušotina i najmanjom dubinom. Odabrano je optimalno rješenje pod uvjetom da je raspored bušotina kvadratni te da minimalna temperatura radnog fluida koji struji kroz BIT ne padne ispod 2°C. Kvadratni raspored odabran je jer geometrijski najbliže odgovara cilindričnom koji koristi TRNSYS. U tablici 8. su prikazani ulazni parametri i potrebna duljina BIT-a:

Tablica 8. Ulazni parametri i rezultati simulacije u EED-u

ULAZNI PARAMETRI	
Tlo	
Toplinska provodnost	1,819 W/(m K)
Specifični toplinski kapacitet	2,769 MJ/(m ³ K)
Temperatura površine	11,6 °C
Radni fluid	
Toplinska provodnost	0,59 W/(m K)
Specifični toplinski kapacitet	4,187 kJ/(kg K)
Gustoća	998 kg/m ³
Protok kroz sve bušotine	4,48 kg/s
Bušotinski izmjenjivač topline	
Izvedba	Dvostruka U-cijev
Vanjski promjer U-cijevi	32 mm
Debljina stjenke U-cijevi	2,9 mm
Promjer bušotine	152 mm
Toplinska provodnost ispune bušotine	2,35 W/(m K)
Toplinski otpor bušotine	0,067 (m K)/W
REZULTAT	
Broj bušotina	16
Raspored bušotina	4 x 4
Dubina jednog BIT-a	73,98 m
Ukupna duljina svih BIT-ova	1183,62 m

5.2. Dimenzioniranje polja BIT-a prema Ingersollu i Zobelu

Proračun prema Ingersollu i Zobelu temelji se na pretpostavci da je toplinski tok između tla i radnog fluida koji protječe kroz BIT tijekom vremena konstantan.

Potrebna duljina bušotinskog izmjenjivača topline izračunava se prema jednadžbi:

$$L_{IZ} = \frac{(\Phi - \dot{W}) * R_g}{T_g - T_w} \text{ [m]}, \quad (15)$$

gdje su:

$\Phi_{grijanja} = 75000 \text{ W}$ – ogrjevni učin dizalice topline

$\dot{W} = 15000 \text{ W}$ – snaga kompresora za pogon dizalice topline

$R_g = 0,282 \text{ (m K)/W}$ – toplinski otpor tla (prema [5])

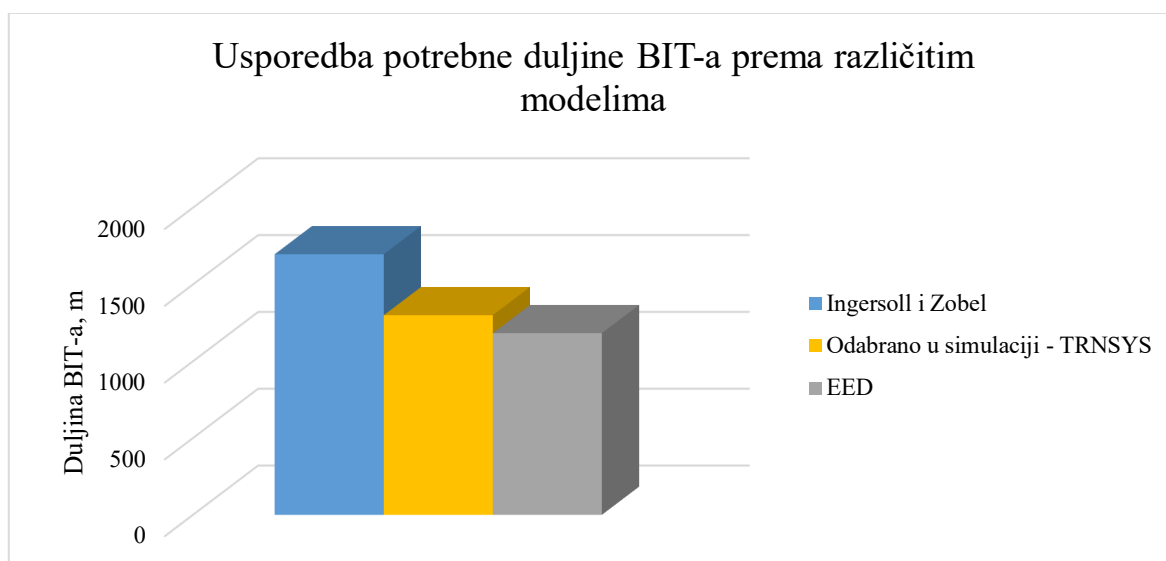
$T_{gr} = 13,97 \text{ °C}$ – neporemećena temperatura tla

$T_w = 4 \text{ °C}$ – srednja temperatura sekundarnog radnog medija u cijevima sonde BIT-a

Potrebna duljina sonde BIT-a prema Ingersollu i Zobelu iznosi:

$$L_{IZ} = 1697,1 \text{ m}$$

5.3. Usporedba dobivenih rezultata korištenjem analitičkih modela i računalnog programa

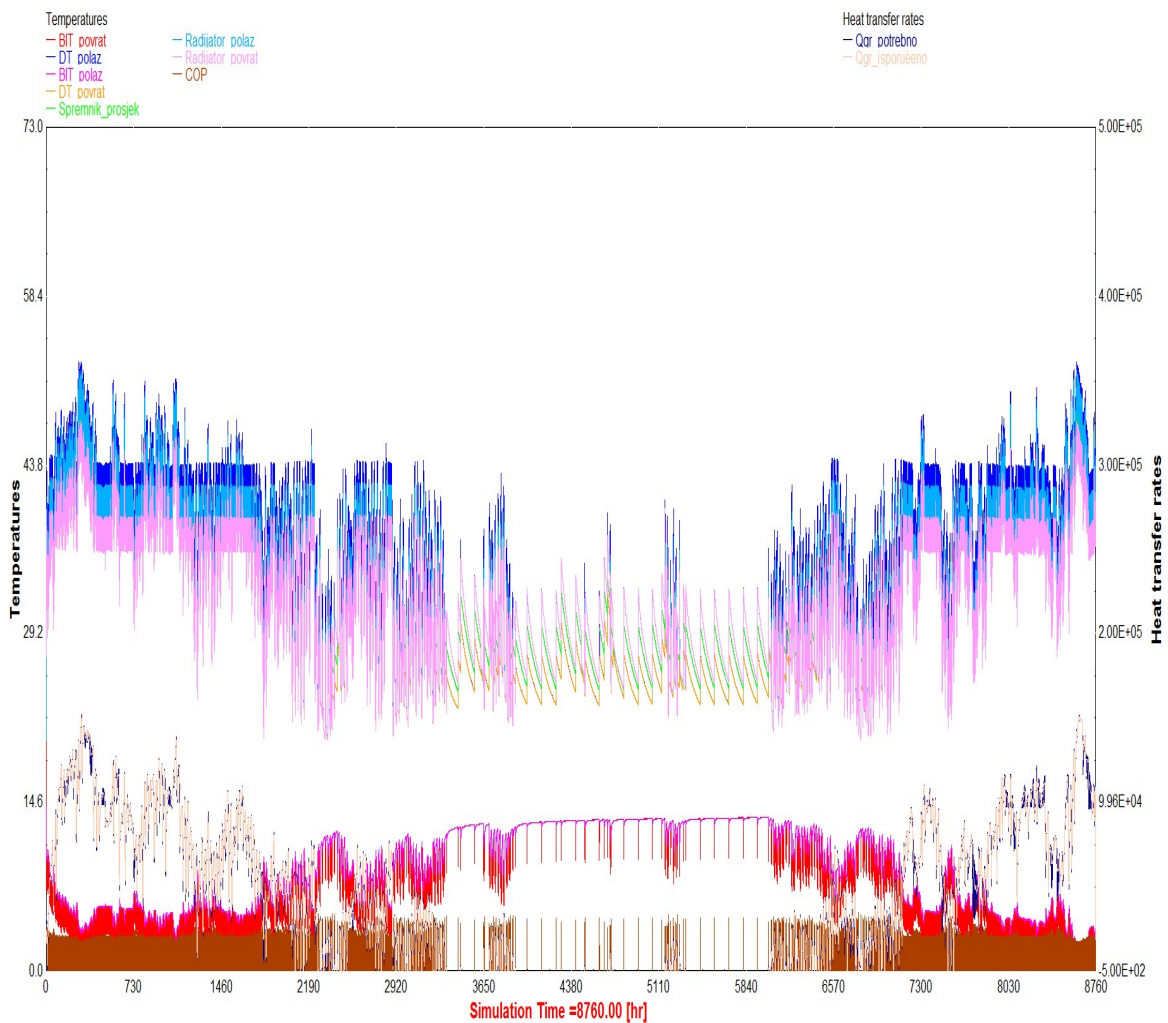


Dijagram 14. Usporedba potrebnih duljina BIT-a

Dijagram 14. prikazuje potrebne duljine BIT-a dobivene analitičkom metodom (prema Ingersollu i Zobelu), računalnom simulacijom u EED-u te duljinu odabranu u TRNSYS-u. Rezultati dobiveni EED-om i TRNSYS-om su slični (razlikuju se oko 9%) što bi se moglo objasniti različitostima u modelima. Naime, komponenta BIT-a u TRNSYS-u (Type557b) razmješta bušotine u cilindrični volumen za razliku od kvadratnog raspored kod EED-a, odnosno drugačija je geometrija. Također, u simulaciji napravljenoj u TRNSYS-u, uzeta je fiksna dubina jednog BIT-a (100 m) iz razloga što je takva dubina stvarne bušotine na kojoj su provedena TRT mjerenja. Proračun prema Ingersollu i Zobelu u obzir ne uzima geometriju bušotina i njihov broj već samo daje ukupnu duljinu bušotinskih izmjenjivača topline potrebnu da pokrije ogrjevni kapacitet dizalice topline. U proračunu po Ingersollu i Zobelu velik utjecaj na rezultate ima srednja temperatura fluida koji struji kroz BIT. Za 1°C njene promjene potrebna duljina bušotinskih izmjenjivača topline promijeni se za približno 10%.

6. REZULTATI I KOMENTAR SIMULACIJE

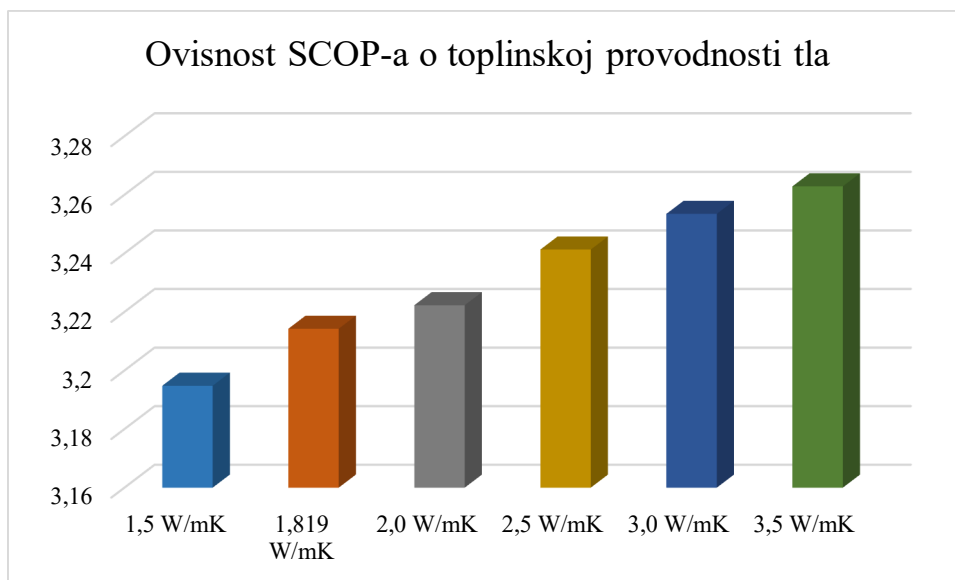
Računalna simulacija rada sustava grijanja s dizalicom topline koja koristi tlo kao toplinski spremnik napravljena je za period jedne godine s vremenskim korakom simulacije od 10 minuta. Cilj simulacije je pokazati ovisnost toplinskog množitelja (COP) dizalice topline o različitim svojstvima tla te parametrima rada pojedinih komponenata sustava. Dijagram 15. prikazuje rezultate simulacije rada sustava kroz period od jedne godine.



Slika 26. Primjer rezultata jedne simulacije u TRNSYS-u

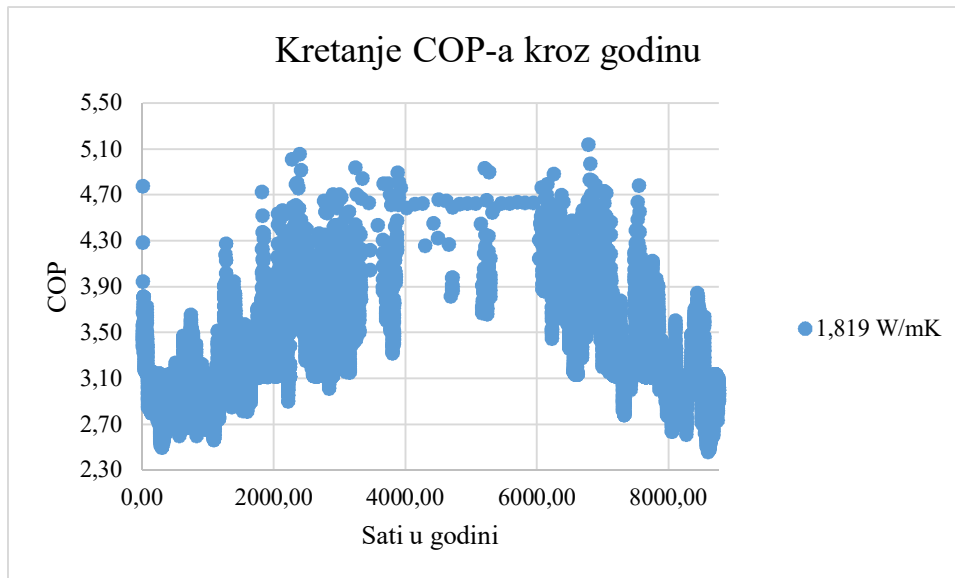
6.1. Utjecaj toplinske provodnosti tla na toplinski množitelj dizalice topline

Pri analizi utjecaja toplinske provodnosti tla na COP dizalice topline svi parametri su se održavali konstantnima (s početnim vrijednostima) osim toplinske provodnosti tla.



Dijagram 15. Ovisnost SCOP-a o toplinskoj provodnosti tla

Rezultati simulacije potvrdili su očekivanja. Prosječni godišnji toplinski množitelj (SCOP) dizalice topline bit će viši što je veći koeficijent toplinske provodnosti tla. Rezultat je logičan jer veća toplinska provodnost tla znači bolje provođenje topline, odnosno bušotinski izmjenjivač topline moći će kvalitetnije izvući toplinu iz tla koje je udaljenije od BIT-a nego u slučaju da je toplinska provodnost manja. Više izmijenjene topline s tlom znači da će temperaturni režim fluida koji struji kroz BIT biti viši. Zbog toga će i temperatura isparivanja dizalice topline narasti te će se smanjiti temperaturna razlika između temperature kondenzacije i temperature isparivanja. Kako je opisano u poglavlju o teorijskim osnovama dizalice topline, manja temperaturna razlika između isparivača i kondenzatora, uz ostale jednake radne uvjete sustava, znači i viši COP.

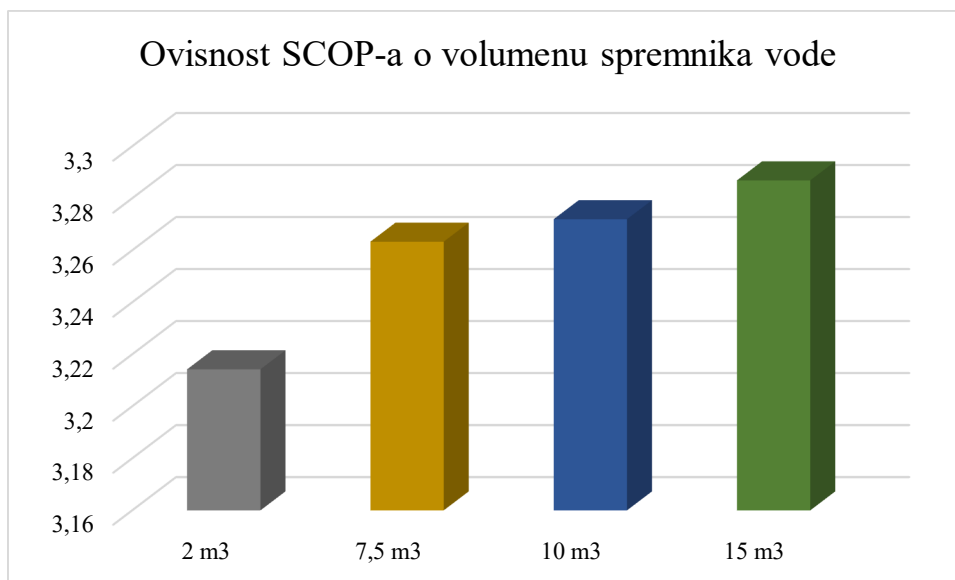


Dijagram 16. Kretanje COP-a kroz godinu

Dijagram 17. prikazuje kretanje COP-a kroz period simulacije u trenucima kada je dizalica topline uključena za vrijednost toplinske provodnosti tla koja je dobivena TRT mjerenjem (1,819 W/(m K)). Tijekom vremena najvećih potreba za grijanjem vidljivo je da su vrijednosti COP-a nešto niže od prosjeka dok ona značajno raste u ljetnim mjesecima. S druge strana na prosječnu godišnju vrijednost COP-a zimski mjeseci imaju više utjecaja od ljetnih iz razloga što je zimi dizalica topline uključena puno češće nego ljeti.

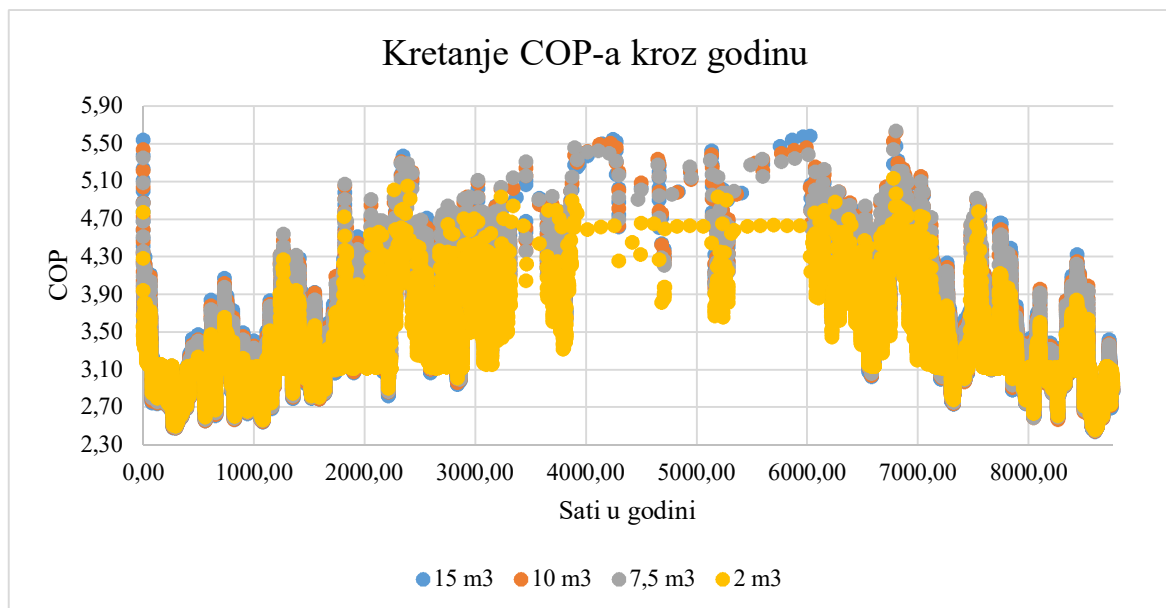
6.2. Utjecaj promjene volumena spremnika vode na toplinski množitelj dizalice topline

Pri analizi utjecaja toplinske provodnosti tla na COP dizalice topline svi parametri su se održavali konstantnima (s početnim vrijednostima) osim volumena spremnika vode za grijanje.



Dijagram 17. Ovisnost SCOP-a o volumenu spremnika vode

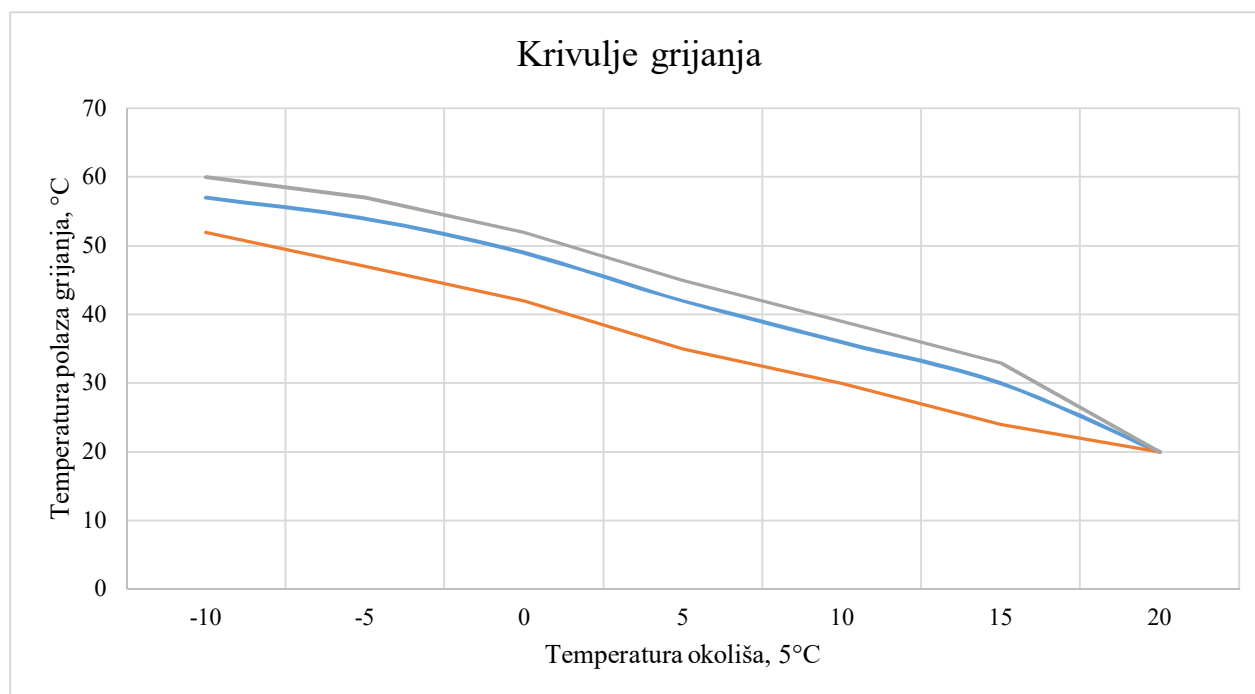
Povećanjem volumena spremnika dolazi do izraženije temperaturne stratifikacije u njemu. Odnosno na dnu spremnika se izdvaja najhladnija voda, a na vrhu najtoplija. Što je veći spremnik temperatura povrata vode iz spremnika prema dizalici topline je niža čime se snižava i temperatura kondenzacije na dizalici topline. Što je niža temperatura kondenzacije manja je temperaturna razlika u odnosu na temperaturu isparivanja što povećava COP.



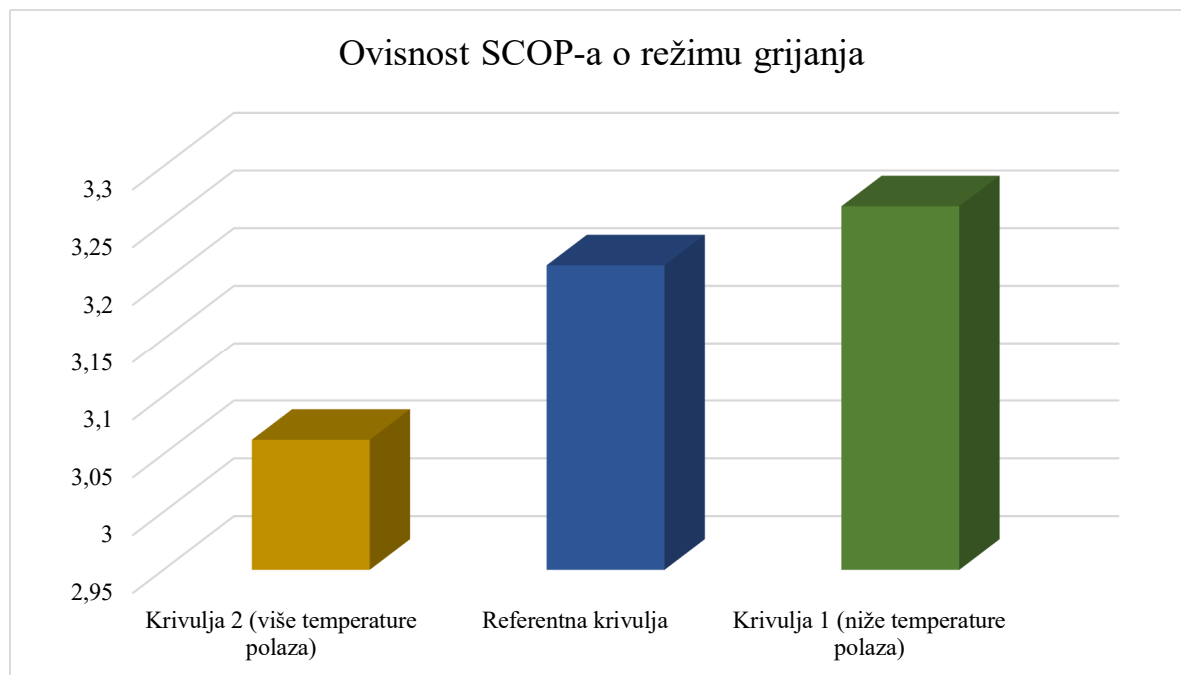
Dijagram 18. Kretanje COP-a kroz godinu u ovisnosti o volumenu spremnika vode

Dijagram 19. prikazuje kretanje COP-a u ovisnosti o različitim volumenima spremnika vode kroz svaki vremenski korak simulacije.

6.3. Utjecaj režima grijanja na toplinski množitelj dizalice topline



Dijagram 19 Krivulje grijanja korištene u simulaciji



Dijagram 20 Ovisnost SCOP-a o režimu grijanja

Iz dijagrama 21. je vidljivo da niže temperature polaza prema radijatoru pozitivno utječu na SCOP dizalice topline. Rezultat je očekivan iz razloga što niža potrebna temperatura vode u spremniku traži i nižu temperaturu polazne vode koja ulazi u spremnik iz dizalice topline zbog čega je snižena i temperatura kondenzacije što posljedično povećava COP. Krivulje grijanja korištene u simulaciji prikazane su u dijagramu 10.

6.4. Utjecaj koeficijenta toplinske provodnosti ispune bušotine na SCOP

Toplinska provodnost i kapacitet bušotine simulirani su korištenjem cijevi (Type 604b). Promjenom toplinske provodnosti analiziran je utjecaj na SCOP dizalice topline. Rezultati su pokazali da se povećanjem koeficijenta toplinske provodnosti bušotine povećava i SCOP. Kvantitativno su ta povećanja vrlo mala. Za referentnu toplinsku provodnost ispune bušotine (2,35 W/(m K)) SCOP iznosi 3,214 dok pri vrijednosti toplinske provodnosti 5 W/(m K) SCOP iznosi 3,215 što je povećanje od 0,03%. Rezultat simulacije pokazuje da je povećanje SCOP-a još manje nego što je slučaj kod povećanja toplinske provodnosti tla ili volumena spremnika vode.

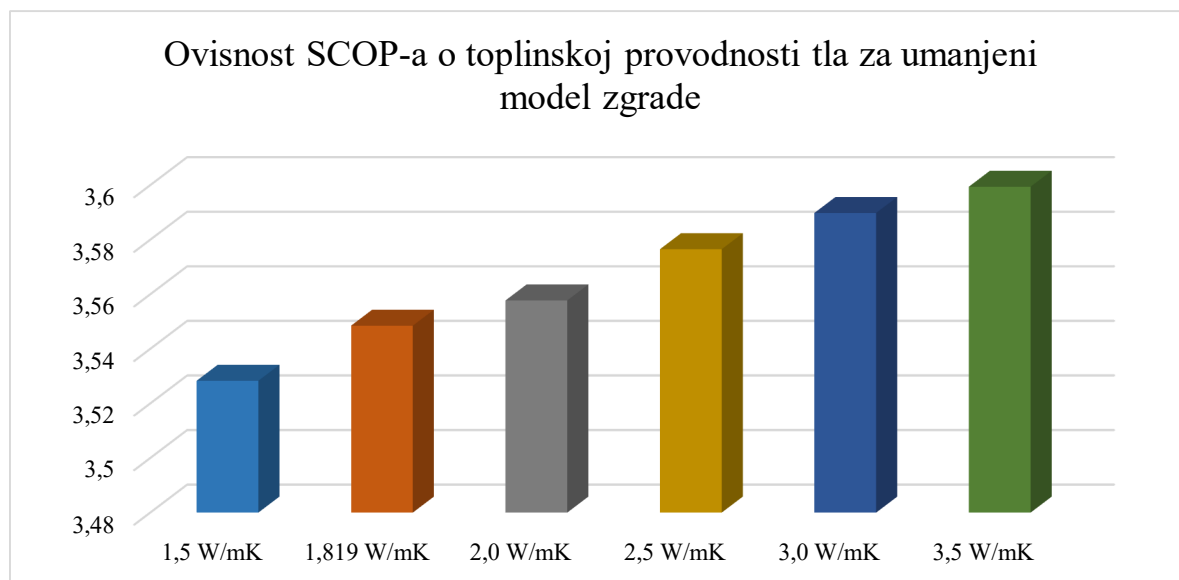
6.5. Kritički osvrt na rezultate simulacije

Simulacija rada sustava grijanja s dizalicom topline koja koristi tlo kao toplinski izvor kvalitativno je pokazala rezultate u skladu s očekivanjima. S druge strane, očekivao se veći utjecaj na promjenu COP-a. Na primjer, povećanjem toplinske provodnosti tla sa referentne vrijednosti (1,819 W/(m K)) na 2,5 W/(m K) SCOP poraste za ~0,84%. Razlog zašto SCOP ne varira promjenom parametara kao što je to očekivano najvjerojatnije leži u pozadini modela BIT-a u TRNSYS-u (Type 557b) i specifičnog računanja volumena bušotine. Naime, komponenta Type 557b razvrstava bušotine u cilindričnu postavu te s obzirom na broj bušotina, njihov razmak i dubinu računa volumen koji one zauzimaju prema formuli:

$$V = \pi * H_{bušotine} * n * (0,525 * s)^2 [m^3], \quad (16)$$

gdje je $H_{bušotine}$ dubina bušotine, n broj bušotina, a s razmak između dvije bušotine. S obzirom da se u simulaciji za pokrivanje potreba modela zgrade koristi 13 bušotina taj volumen jako velik te je moguće da je on razlog tromosti sustava.

Još jedna mogućnost da promjena toplinskog kapaciteta ima utjecaj samo na vanjske bušotine u cilindričnom rasporedu otklonjena je simulacijom na zgradi manjeg kapaciteta grijanja (~5 kW) uz upotrebu samo jedne bušotine. Dijagram 12 prikazuje ovisnost SCOP-a o toplinskoj provodnosti tla na zgradi manjeg kapaciteta uz korištenje samo 1 bušotine dubine 100m.



Dijagram 21 Ovisnost SCOP-a o toplinskoj provodnosti tla za umanjeni model zgrade

Iz dijagrama 12 je vidljivo da je povećanje SCOP-a za slučaj toplinske provodnosti tla $2,5 \text{ W/(m K)}$ u odnosu na referentnu vrijednost ($1,819 \text{ W/(m K)}$) $\sim 0,79\%$ što je u skladu s rezultatima dobivenim i na originalnom modelu zgrade.

7. ZAKLJUČAK

Upotrebom računalnog programa TRNSYS napravljena je simulacija rada sustava grijanja s dizalicom topline koja koristi tlo kao toplinski spremnik. Rezultati simulacije su, u kvalitativnom smislu, potvrdili inicijalna očekivanja. Prosječni godišnji toplinski množitelj u režimu grijanja raste u slučaju:

- Povećanja toplinske provodnosti tla
- Povećanja volumena spremnika vode
- Povećanja toplinske provodnosti ispune bušotine
- Snižavanja temperaturnog režima grijanja

Kvantitativno, rezultati nisu u potpunosti ispunili moja očekivanja, odnosno, simulirani sustav pokazao se vrlo tromim. Razlog tromosti najvjerojatnije leži u modelu BIT-a (komponenta Type 557b u TRNSYS-u). Pretpostavljena su dva moguća razloga tromosti simuliranog sustava:

- Volumen tla kojeg obuhvaćaju bušotinski izmjenjivači topline (ulazni parametar komponente Type 557b) je vrlo velik – zbog velikog volumena smanjen je utjecaj ulaznih parametara na promjenu temperature fluida kroz BIT
- Toplinski kapacitet bušotine nije realno simuliran upotrebom komponente 557b zbog čega je u sustav BIT-a dodana komponenta Type 604b (cijev s toplinskim kapacitet) kao zamjena za toplinski kapacitet bušotine – ispravnost modeliranja toplinskog kapaciteta bušotine na spomenuti način nije potvrđena (nije pronađen drugi model s kojim bi se usporedili rezultati)

Mala promjena toplinskog množitelja dizalice topline (COP) u simuliranom modelu uzrokovana je malom promjenom ulazne temperature fluida u isparivač na strani toplinskog izvora.

Kvalitativno gledajući rezultate simulacije može se zaključiti da je simulacija ispravno postavljena, no korištena komponenta bušotinskog izmjenjivača topline možda realno ne opisuje dinamiku sustava što otvara mogućnost za daljnju nadogradnju modela.

Pod pretpostavkom da je simulirani sustav previše trom, za budući rad predlažem izradu simulacije u kojoj će se napraviti novi model BIT-a (npr. korištenjem računalnog programa MATLAB), te analizu i usporedbu dobivenih rezultata s rezultatima Diplomskog rada.

LITERATURA

- [1] V. Soldo: *Rashladni sustavi i dizalice topline, oprema i komponente*, poglavlje 9., Priručnik za energetska certificiranje zgrada, ur. V. Zanki, B. Pavković, UNDP, Zagreb, 2010.
- [2] Filipović E., Stošić J., Tremac F.: *Eksperimentalno i numeričko određivanje toplinskih svojstava tla za geotermalne dizalice topline*
- [3] Galović A.: *Termodinamika II*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [4] Soldo V.: *Dizalice topline (Projektiranje rashladnih sustava)*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [5] Draženović N.: *Diplomski rad*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [6] Ćurko, T.: *Projektiranje rashladnih sustava*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2006.
- [7] Gehlin, S.: *Thermal response test – Method development and evaluation*, Lulea University of Technology, Sweden, 2002.
- [8] Eklöf, C., Gehlin, S.: *TED – A mobile equipment for thermal response test – testing and evaluation*, Lulea University of Technology, Sweden, 1996.
- [9] Bupić, M., Čustović, S.: „Stanje i trendovi uprabe dizalice topline“ časopis“ Naše more“br.53/2006.(str. 213-219)
- [10] Parisch P., Mercker O., Oberdorfer P., Bertram E., Tepe R., Rockendorf G.: *Short-term experiments with borehole heat exchangers and model validation in TRNSYS*, Germany, 2014.
- [11] Hellström G.: *Ground heat storage - thermal analyses of duct storage systems*. Sweden: Lunds University; 1991.
- [12] Zhang, C., Guo, Z., Liu, Y, Cong, X., Peng, D.: *A review on thermal response test of ground-coupled heat pump systems*, China, 2014.
- [13] Soldo, V., Ruševljan, M., Ćurko, T.: *Test geothermal heat pump with a 100 m deep borehole heat exchanger*, Klima forum Zadar, 2009.
- [14] Hellström, G: *Duct Ground Heat Storage Model – Manual for Computer Code*, University of Lund, Sweden, 1996.
- [15] Ruševljan, M.: *Projektiranje dizalica topline s bušotinskim izmjenjivačem topline i mjerenje toplinskih svojstava tla*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb

- [16] Omar T. Farouki: Thermal properties of soils, CRREL Monograph, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory Hanover, New Hampshire, U.S.A, 1981.
- [17] Kurevija T.: Energetsko vrednovanje plitkih geotermalnih potencijala Republike Hrvatske, Zagreb, 2010.

PRILOZI

I. CD-R disc