Određivanje toplinskih prinosa energetskih pilota pri iskorištavanju plitke geotermalne energije

Francetić, Tomislav

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:750208

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

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

Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb

zir.nsk.hr

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij rudarstva

ODREĐIVANJE TOPLINSKIH PRINOSA ENERGETSKIH PILOTA PRI ISKORIŠTAVANJU PLITKE GEOTERMALNE ENERGIJE

Tomislav Francetić

R 253

Zagreb, 2021.

KLASA: 602-04/21-01/11
URBROJ: 251-70-03-21-2
U Zagrebu, 08.02.2021.

Tomislav Francetić, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/11, UR. BROJ: 251-70-11-21-1 od 01.02.2021. godine priopćujemo temu diplomskog rada koja glasi:

ODREĐIVANJE TOPLINSKIH PRINOSA ENERGETSKIH PILOTA PRI ISKORIŠTAVANJU PLITKE GEOTERMALNE ENERGIJE

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o diplomskom ispitu izv. prof. dr. sc. Tomislav Kurevija, izvanredni profesor Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i komentorica dr. sc. Marija Macenić.

Voditelj

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Tomislav Kurevija

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za završne i diplomske ispite

(potpis)

Doc. dr. sc. Dubravko Domitrović

(titula, ime i prezime)

Komentorica

(potpis)

Dr. sc. Marija Macenić

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor Kuhinek

(titula, ime i prezime)

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

ODREĐIVANJE TOPLINSKIH PRINOSA ENERGETSKIH PILOTA PRI ISKORIŠTAVANJU PLITKE GEOTERMALNE ENERGIJE

Tomislav Francetić

Diplomski rad je izrađen na: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

U posljednjih 20-ak godina, s ciljem uključivanja obnovljivih izvora energije u sektoru zgradarstva za potrebe grijanja i hlađenja, energetski piloti postaju sve više zastupljeni. Pri projektiranju energetskih pilota, piloti se prvo dimenzioniraju na nosivost kako bi zadovoljili funkciju temeljenja objekta. Naknadno se ugrađuju izmjenjivači topline u pilot, a testom toplinskog odaziva određuju se termogeološki parametri tla. Prema tome, u radu je modeliran energetski pilot u svrhu određivanja dostupnog toplinskog opterećenja za različite duljine pilota, vrijednosti toplinske vodljivosti tla, promjere ugrađenih izmjenjivača topline i ukupne protoke radnog fluida. Protok radnog fluida određen je hidrauličkom analizom, uz ostale hidrauličke parametre. Ista toplinska opterećenja kasnije su narinuta na energetski pilot s ciljem određivanja toplinskog kapaciteta pilota. Na kraju je prikazan princip modeliranja više energetskih pilota u polju, prilikom realnog rada sustava.

Ključne riječi: energetski piloti, nosivost pilota, toplinski prinosi, toplinska vodljivost, *FLS* metoda

Diplomski rad sadrži: 62 stranice, 6 tablica, 35 slika i 39 referenci

Jezik izvornika: Hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Izv.prof.dr.sc. Tomislav Kurevija

Komentor: dr.sc. Marija Macenić

Ocjenjivači: Izv.prof.dr.sc. Tomislav Kurevija
Doc.dr.sc. Dubravko Domitrović
Doc.dr.sc. Želimir Veinović

Datum obrane: 12.02.2021., Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology
and Petroleum Engineering

Master's Thesis

DETERMINATION OF HEAT CAPACITY OF ENERGY PILES WHEN UTILIZING SHALLOW GEOTHERMAL ENERGY

Tomislav Francetić

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology And Petroleum Engineering
Department of mining engineering and geotechnics
Pierottijeva 6, Zagreb

Abstract

In the last 20 years, with the aim of including renewable energy sources in the building sector for heating and cooling, energy piles are becoming more common. When designing energy piles, the piles are first dimensioned for load-bearing capacity to satisfy the foundation function. Subsequently, heat exchangers are installed in the pile, and the thermogeological parameters of the soil are determined by the thermal response test. Therefore, an energy pile was modeled for the purpose of determining the available heat load for different pile lengths, soil thermal conductivity values, diameters of installed heat exchangers and total working fluid flows. The working fluid flow was determined by hydraulic analysis, along with other hydraulic parameters. The same heat loads were later applied to the energy pile with the aim of determining the heat capacity of the pile. Finally, the principle of modeling multiple energy piles in the field, during the actual operation of the system, is presented.

Key words: Energy piles, load-bearing capacity of pile, heat capacity, heat conductivity, *FLS* method

Master's Thesis contains: 62 pages, 6 tables, 35 figures and 39 references
Original in: Croatian
Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Supervisor: Associated professor Tomislav Kurevija, PhD
Assistant Marija Macenić, PhD

Reviewers: Associated professor Tomislav Kurevija, PhD
Assistant professor Dubravko Domitrović, PhD
Assistant professor Želimir Veinović, PhD

Defense date: February 12, 2021., Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

POPIS TABLICA V

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA VI

1. UVOD 1

2. PILOTI U GEOTEHNICI 4

2.1. Preliminarna laboratorijska i terenska in-situ ispitivanja pri dubokom temeljenju 4

2.2. Dimenzioniranje pilota 6

2.2.1. Aksijalno opterećen pilot 6

2.2.2. Nosivost pilota u različitim vrstama tla 7

2.3. Tipovi pilota 9

3. ENERGETSKI PILOTI 12

3.1. Dizalica topline 12

3.1.1. Princip rada dizalice topline i primjena u geotermij 12

3.1.2. Koeficijenti za određivanje učinkovitosti dizalice topline 14

3.2. Princip izmjene topline između tla i temeljne konstrukcije 15

3.2.1. Toplinske i hidrodinamičke karakteristike 17

3.2.2. Koeficijent prijelaza toplinske energije 19

3.3. Konstrukcija i izvedbe energetskih pilota 20

3.4. Termogeološki parametri projektiranja 22

3.4.1. Test toplinskog odaziva TRT 24

3.4.1.1. Teoretska pozadina TRT-a 24

3.4.1.2. Provedba testa toplinskog odaziva (TRT) 28

3.4.1.3. Interpretacija podataka 29

3.4.1.4. Primjenjivost TRT-a na energetske pilote 33

3.4.2. Toplinski potencijal energetskih pilota 34

3.5. Utjecaj izmjene toplinske energije na mehanička svojstva pilota 36

4. MODELIRANJE ENERGETSKOG PILOTA 38

4.1. Hidraulička analiza 38

4.2. Određivanje dostupnog toplinskog opterećenja pri promjeni različitih termogeoloških, strukturnih i protočnih uvjeta 41

4.3. Određivanje energetskih prinosa pilota 48

5. MODELIRANJE POLJA ENERGETSKIH PILOTA - PREGLED PRIMJERA KORIŠTENJA 52

5.1. Grijanje i hlađenje trgovačkog centra "Designer Outlet Croatia" 52

5.2. Geološki sastav, hidrologija i geotermalni potencijal lokacije 53

5.3. Izvedena mjerenja i projektiranje sustava 54

5. ZAKLJUČAK 58

6. LITERATURA 60

POPIS SLIKA

Slika 2.1 Aksijalno opterećen pilot.....7
Slika 2.2 Izrada pilota tipa "Frenki".....9
Slika 2.3 Sistem izrade vijčanih, lijevanih, razmičućih pilota.....10
Slika 2.4 Sistem izrade bušeno, lijevanog pilota 11
Slika 3.1 T-s dijagram rada dizalice topline.....13
Slika 3.2 Shematski prikaz rada dizalice topline.....13
Slika 3.3 Prijelaz topline između tla, pilota i radnog fluida.....16
Slika 3.4 Potpuno razvijen profil brzine za a) laminaran protok, b) turbulentan.....17
Slika 3.5 Potpuno razvijen temperaturni profil za konstantnu temperaturu na stijenci cijevi a) Re = 10 000, Pr = 1, b) Re = 10 000, Pr = 10. 18
Slika 3.6 Konfiguracije energetskih pilota 21
Slika 3.7 Aparatura i shema provedbe testa toplinskog odaziva tla.....29
Slika 3.8 Tipski prikaz a) podataka dobivenih TRT mjerenjem, b) testa odaziva i oporavka temperature 30
Slika 3.9 Odnos logaritamske funkcije vremena provođenja TRT-a i razvoja prosječne temperature radnog fluida u bušotinskom izmjenjivaču 31
Slika 3.10 Tipski model derivacijske krivulje 32
Slika 3.11 Odnos logaritamske funkcije vremena provođenja TRT-a i razvoja prosječne temperature radnog fluida za vrijeme ustaljenog stanja širenja toplinskog toka 35
Slika 3.12 Dijagram proizvedene toplinske energije za energetske pilote 35
Slika 3.13 Određivanje potencijala pridobivanja i pohrane toplinske snage u tlo u funkciji EST 36
Slika 3.14 Utjecaj toplinskog opterećenja na geotehnički pilot u slučaju a) grijanja i b) hlađenja.....37
Slika 4.1 Grafički prikaz rezultata hidrauličke analize za 120 m duljine izmjenjivača topline.....40
Slika 4.2 Temperatura radnog fluida pri protoku od 0,5 l/s za pilot dubine 20 m, toplinsku vodljivost 1,8 W/m °C i promjer cijevi od 32 mm.....43
Slika 4.3 Toplinska snaga u odnosu na toplinske vodljivosti za promatrane dubine pilota pri protoku radnog fluida od 0,35 l/s i promjeru od 25 mm ugrađene HDPE cijevi.....46
Slika 4.4 Toplinska snaga u odnosu na toplinske vodljivosti za promatrane dubine pilota pri protoku radnog fluida od 0,35 l/s i promjeru od 32 mm ugrađene HDPE cijevi.....46

Slika 4.5 Toplinska snaga u odnosu na toplinske vodljivosti za promatrane dubine pilota pri protoku radnog fluida od 0,50 l/s i promjeru od 25 mm ugrađene HDPE cijevi.....47
Slika 4.6 Toplinska snaga u odnosu na toplinske vodljivosti za promatrane dubine pilota pri protoku radnog fluida od 0,50 l/s i promjeru od 32 mm ugrađene HDPE cijevi.....47
Slika 4.7 Toplinski odaziv tla.....49
Slika 4.8 Određivanje ustaljenog toplinskog prinosa u funkciji izlazne temperature radnog fluida za pilote opremljene s 2U izmjenjivačem topline unutarnjeg promjera od 25 mm i protokom radnog fluida od 0,35 l/s.....50
Slika 4.9 Određivanje ustaljenog toplinskog prinosa u funkciji izlazne temperature radnog fluida za pilote opremljene s 2U izmjenjivačem topline unutarnjeg promjera od 35 mm i protokom radnog fluida od 0,35 l/s.....50
Slika 4.10 Određivanje ustaljenog toplinskog prinosa u funkciji izlazne temperature radnog fluida za pilote opremljene s 2U izmjenjivačem topline unutarnjeg promjera od 25 mm i protokom radnog fluida od 0,50 l/s.....51
Slika 4.11 Određivanje ustaljenog toplinskog prinosa u funkciji izlazne temperature radnog fluida za pilote opremljene s 2U izmjenjivačem topline unutarnjeg promjera od 32 mm i protokom radnog fluida od 0,50 l/s.....51
Slika 5.1 HDPE cijevi postavljene na armaturni koš.....54
Slika 5.2 Opća geološka karta RH – list Ivanić grad, s izdvojenim područjem grada Zagreba i lokacije objekta 55
Slika 5.3 Oprema TRT-a i izvođenje testa na lokaciji.....56
Slika 5.4 Određivanje efektivne toplinske vodljivosti tla.....57
Slika 5.5 Toplinski odaziv tla s četiri toplinska uvjeta i jednim proširenim uvjetom (crtkana linija).....57
Slika 5.6 Grafički prikaz podataka Step TRT-a za određivanje ustaljenog prinosa u funkciji temperature radnog fluida za grijanje (crvena linija) i hlađenje (plava).....58

POPIS TABLICA

Tablica 2.1 Sumiran prikaz in-situ pokusa pri projektiranju pilota.....5
Tablica 4.1 Raspodjela potrebne energije za grijanje i hlađenje objekta pri toplinskom opterećenju od 2,4 kW na pilot dubine 20 m i toplinsku vodljivost od 1,6 W/m°C (srednje vanjske temperature zraka za grad Zagreb (*izvor:* DHMZ)).....42
Tablica 4.2 Dostupno toplinsko opterećenje (u kW) u ovisnosti o duljini pilota i toplinskoj vodljivosti za unutarnji promjer 2U izmjenjivača topline od 25 mm pri protoku fluida od 0,35 l/s.....43
Tablica 4.3 Dostupno toplinsko opterećenje (u kW) u ovisnosti o dubini pilota i toplinskoj vodljivosti za unutarnji promjer 2U izmjenjivača topline od 32 mm pri protoku fluida od 0,35 l/s.....44
Tablica 4.4 Dostupno toplinsko opterećenje (u kW) u ovisnosti o dubini pilota i toplinskoj vodljivosti za unutarnji promjer 2U izmjenjivača topline od 25 mm pri protoku fluida od 0,50 l/s.....44
Tablica 4.5 Dostupno toplinsko opterećenje (u kW) u ovisnosti o dubini pilota i toplinskoj vodljivosti za unutarnji promjer 2U izmjenjivača topline od 32 mm pri protoku fluida od 0,5
l/s.....44

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA

A_b - površina baze pilota (m2)

A_s - površina plašta (kN/m^2)

c_u - nedrenirana posmična čvrstoća (kN/m^2)

c_s - specifičan toplinski kapacitet fluida (J/kg℃)

d - promjer (m)

E_i – funkcija eksponencijalnog logaritma

l - duljina pilota (m)

H - dubina (m)

h - koeficijent prijelaza topline (W/m °C)

k - nagib pravca

m - maseni protok fluida (kg/s)

n - konstanta

n_i - broj cijevi u pilotu

N_c - faktor nosivosti

N_u - Nusselt-ov broj

R - radijus pilota (m)

r_b - radijus bušotine (m)

r - radijus (m)

r_i - unutarnji radijus cijevi (m)

r_o - vanjski promjer cijevi (m)

R'_p - ukupan toplinski otpor energetskog pilota (m°C/ W)

$R'_{conv,p}$ - toplinski otpor konvektivnom prijelazu između fluida i stijenke cijevi (m°C/ W)

$R'_{cond,p}$ - toplinski otpor konduktivnom prijelazu kroz stijenku cijevi (m°C/ W)

$R'_{cond,c}$ - toplinski otpor konduktivnom prijelazu kroz beton (m°C/ W)

R_e - Reynolds-ov broj

Pr - Prandl-ov broj

T_{in} - temperatura fluida na ulazu u cijev (℃)

T_{out} - temperatura fluida na izlazu iz cijevi (℃)

T_p - srednja vrijednost temperature na cijevi (°C)

T_b - srednja vrijednost temperature na kontaktu pilota sa okolnom formacijom (°C)

T_i - statička ustaljena temperatura tla (°C)

t - vrijeme (h)

t_s - vrijeme u kojemu je postignuto SSS stanje (h)

Q - Ukupna nosivost pilota (kN)

Q_b - Nosivost baze pilota (kN)

Q_s - Nosivost plašta pilota (kN)

Q_{usable} - procijenjena ukupna uporabljiva toplina isporučena dizalicom topline, pri čemu se u obzir uzimaju samo dizalice topline kod kojih je SPF > 1,15*1/η

Q_t/A - gustoća prijelaza toplinske energije (W/m^2)

Q_t - iznos izmijenjene toplinske energije (W)

q_b - nosivost temeljnog tla ispod baze pilota (kN/m^2)

q' - narinuti toplinski puls (W/m)

s - skin

τ_s - prosječna posmična čvrstoća plašta (kN/m^2)

σ'_n - normalno efektivno naprezanje na plaštu pilota (kN/m^2)

δ - kut trenja između pilota i tla (°)

α - empirijski faktor

σ'_v - vertikalno efektivno naprezanje (kN/m^2)

η - omjer između ukupne bruto proizvodnje električne energije i potrošnje primarne energije za proizvodnju električne energije

λ - toplinska vodljivost (W/m°C)

$\frac{\partial T}{\partial r}$ - temperaturni gradijent (°C/m)

λ_{cijevi} - toplinska vodljivost cijevi (W/m°C)

ΔT_{skin} – razlika temperature uslijed skin efekta (°C)

y – Eulerova konstanta

α_t - toplinski difuzivitet (m^3/h)

ρ - gustoća (kg/m^3)

g - funkcija

OIE – obnovljivi izvori energije

SPF - prosječni godišnji toplinski množitelj

TRST – Step Test toplinskog odaziva

TRT – Test toplinskog odaziva

EST – Temperatura ulaznog toka fluida (°C)

LST – Temperatura izlaznog toka fluida (°C)

USS – Neustaljeno stanje prijelaza toplinskog toka

SSS - Poluustaljeno stanje prijelaza toplinskog toka

1. UVOD

Prema projekcijama međunarodne agencije za energiju iz obnovljivih izvora (eng. *International Renewable Energy Agency,* IRENA-e) potražnja za energijom u svrhu grijanja i hlađenja objekata na globalnoj razini povećati će se barem za jednu trećinu u odnosu na sadašnju do 2050. godine, s time da se kroz taj period očekuje višestruka potražnja energije za hlađenje u odnosu na grijanje. Ista agencija daje podatke za 2014. godinu prema kojima fosilna goriva (ugljen, zemni plin, derivati nafte) čine glavne izvore energije za grijanje i hlađenje u postotku od 90,5 %, dok iz biomase i reciklaže dolazi tek 6,5 % energije, a čak manje od 3 % energije se pribavlja iz obnovljivih izvora (vjetroelektrane, solarna i geotermalna energija). U Europskoj Uniji, na sektor zgradarstva otpada 40 % ukupne energetske potrošnje, a najveći dio te energije utrošen je za potrebe grijanja i hlađenja objekata. Kako je velika većina te energije dobivena korištenjem neobnovljivih i za okoliš nepovoljnih fosilnih goriva, Europski parlament je u prethodna dva desetljeća donio niz direktiva u svrhu promicanja obnovljivih izvora energije (OIE) u sustavima grijanja i hlađenja. Posljednja u nizu, *Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources,* koja je donesena 11. prosinca 2018. godine, potkrepljuje određene stavke donesene u prijašnjoj direktivi 2009/28/EC, (relevantno tematici ovog rada, prilog VII. Obračunavanje energije iz toplinskih crpki), te daje reviziju učinjenog, smjernice i daljnje ciljeve za korištenje OIE. Za uključivanje obnovljive energije za grijanje i hlađenje, direktiva 2018/2001/EC u članku 23. ističe kako svaka država članica nastoji povisiti udio energije u tom sektoru okvirno za 1,3 postotna boda kao godišnji prosjek kroz narednih deset godina, odnosno 1,1 postotni bod za države članice u kojima se ne upotrebljava otpadna toplina i hladnoća. Konkretno za Hrvatsku, propisani cilj u direktivi za udio energije iz obnovljivih izvora u konačnoj bruto potrošnji 2020. iznosio je 20 %, što je Hrvatska i ostvarila prema podacima Eurostata za siječanj 2020. (ec.europa.eu/eurostat/statistics), prema kojima Hrvatska dobiva 28 % energije iz obnovljivih izvora.

Pod obnovljive izvore energije podrazumijeva se između ostalog i geotermalna energija, gdje se iz dubokih toplinskih izvora ugradnjom bušotinskih izmjenjivača topline pribavlja i pohranjuje toplinska energija, te se vrlo efikasno koristi i u proizvodnji električne energije. U posljednjih 30-ak godina pojavila se mogućnost iskorištavanja plitkih

niskotemperaturnih geotermalnih resursa za potrebe grijanja i hlađenja ugradnjom bušotinskih izmjenjivača topline do dubine od 50 do 150 m, a u novije vrijeme i kroz podzemne geotehničke objekte. Naime, temperatura na površini zemlje uvjetovana je atmosferskim prilikama, dok je na određenoj dubini temperatura tla/stijene ustaljena, nakon čega se dalje mijenja s dubinom u funkciji geotermalnog gradijenta. Ta statička temperatura tla otvara mogućnost pridobivanja i pohranjivanja energije za grijanje i hlađenje kroz temeljne konstrukcije, podzemne potporne konstrukcije i tunele koji u svojoj strukturi imaju ugrađene izmjenjivače topline, polietilenske plastične cijevi za protok radnog fluida. Od navedenih geotehničkih objekata, Loveridge (2012) navodi kako se od pilota sa ugrađenim polietilenskim cijevima iz kategorije temeljnih konstrukcija očekuje značajniji doprinos u vidu uključivanja OIE i smanjenja emisije CO_2 u sektoru grijanja i hlađenja. Piloti predstavljaju betonske i armirano betonske stupove (materijal može biti i drvo i čelik) zbijene, utisnute, bušene ili izvedene u tlu čija je primarna funkcija ograničavanje slijeganja i sprečavanje sloma temeljnog tla uslijed opterećenja uzrokovanog građevinskim objektom na površini. Ugradnjom polietilenskih cijevi, piloti poprimaju dvojaku funkciju, jer u tom slučaju služe i kao izmjenjivači topline između objekta na površini i podzemlja. Ovako konstruirani piloti nazivaju se energetski piloti koji kad su povezani s dizalicom topline, čine geotermalni sustav grijanog/hlađenog objekta. U posljednjih nekoliko godina, zabilježen je konstantan rast broja izvedenih energetskih pilota (Brandl, 2016), prvenstveno jer se piloti kao takvi izvode zbog tehničko-strukturnih razloga, pri čemu dodavanje funkcije izmjenjivača topline pilotu ne uzrokuje prevelike dodatne troškove, ali i zbog širine primjene u raznim vrstama tla i stijena. Mehanizam rada i izvedbe energetskih pilota, kao i bitni parametri opisani su u narednim poglavljima.

Plitki geotermalni sustavi s dizalicom topline, kod objekata koji su veći potrošači toplinske i rashladne energije, dimenzioniraju se za pokrivanje baznih i vršnih opterećenja, s time da postoje ograničenja u primjeni ako nastupe vršna opterećenja kroz dulji period. Kako bi se osigurala konstantna dobava prema potrošaču, uz geotermalni sustav kao primarni, izvodi se još i sekundarni izvor energije, primjerice plinski bojler, koji se može koristiti za pokrivanje vršnih opterećenja ili određenog dijela od ukupne energetske potrebe objekta. Kombinacija dva ili više neovisna energetska sustava ('klasična' ili obnovljiva) u cjelini predstavlja hibridni energetski sustav. Postoji više varijanti energetskih rješenja na ovu temu, na način da se kombiniraju vjetroelektrane i solarne elektrane, hidroelektrane i sustavi za pohranu energije itd. Pri projektiranju hibridnih energetskih sustava, naglasak se stavlja na povećanje pouzdanosti, učinkovitosti i raspoloživosti energetskih postrojenja, te

snižavanje troškova ulaganja i pogonskih troškova. Danas su u energetskom sektoru hibridni sustavi dobro zastupljeni te se očekuje njihova šira primjena u narednim godinama.

2. PILOTI U GEOTEHNICI

Tehnika dubokog temeljenja građevina izgrađenih na tlu ili stijeni nepovoljnih geomehaničkih karakteristika. Preko uspravnih ili gotovo uspravnih pilota, svrstava se u jednu od opsežnijih geotehničkih radnji s projektantskog i ekonomskog stajališta. Naime, kako bi se odredile dimenzije i potreban broj pilota koji će prenositi opterećenje građevine u dublje, bolje nosive slojeve tla, prethodno se provode geotehnička in-situ i laboratorijska ispitivanja, nakon čega se pristupa dimenzioniranju pilota te njihovoj izvedbi i kontroli izvedbe.

2.1. Preliminarna laboratorijska i terenska in-situ ispitivanja pri dubokom temeljenju

Za lokaciju na kojoj je predviđena izgradnja nekog objekta, neophodno je provesti laboratorijsku i terensku analizu materijala od kojeg je izgrađeno tlo i/ili stijena na datoj lokaciji. Preko takvih analiza određuju se parametri materijala tla/stijene koji su nužni za geotehničko projektiranje. Postupak provođenja ispitivanja, uređaji koji se moraju koristiti, dimenzije uzorka i upute standardizirani su za sve vrste geotehničkih ispitivanja, a u slučaju dubokog temeljenja, iste su propisane u normi BS5930.

Pri projektiranju dubokih temelja odnosno pilota, in-situ pokusi koji se prethodno provode prikazani su u tablici 2.1, u kojoj je također opisana i njihova primjena u projektiranju. Od laboratorijskih ispitivanja relevantnih za pilote, među uobičajene postupke spadaju: određivanje gustoće i vlažnosti, koeficijenta prekonsolidacije, granulometrijska analiza, te nekonsolidirani-nedrenirano (UU) i konsolidirano-nedrenirani (CU) pokusi u troosnom pokusu za određivanje nedrenirane čvrstoće tla.

Od ispitivanja koje nisu spomenuta u tablici 2.1, spadaju istraživanje podzemne vode i određivanje sastava i heterogenosti tla. Pojava podzemne vode bitno utječe na tip pilota, te u slučaju da sadrži rastopljene soli, može kemijski agresivno djelovati na betonske i čelične pilote. Razina podzemne vode određuje se istražnim bušenjem, gdje se prvo bilježi dubina na kojoj je zapažena njena pojava. Vrsta materijala tla i stupanj heterogenosti izravno utječu na postupak dimenzioniranja i tip pilota, a također se određuju istražnim bušenjem i uzimanjem uzoraka.

Tablica 2.1 Sumiran prikaz in-situ pokusa pri projektiranju pilota (Mufić, 2019)

In-situ pokus	*Primjene u projektiranju pilota*
Krilna sonda	Za mjerenje in-situ nedrenirane čvrstoće u mekim do čvrstim glinama. Rezultati se mogu primijeniti za procjenu slijeganja pilota. Čvrstoća zbijane, osjetljive gline mogu imati utjecaj na općenitu stabilnost povezanu sa ugrađivanjem pilota u meku glinu.
Standardni penetracijski pokus (SPP)	Istraživanje debljine nosivog sloja. Direktna primjena N-vrijednosti u empirijskim formulama za izračun maksimalnog naprezanja pilota. Procjena kuta trenja u zrnatim tlima. Gruba procjena kohezije u krutim glinama. Za procjenu tlačne čvrstoće vrlo slabe stijene.
Statički penetracijski pokus (CPT)	Direktna primjena trenja plašta i otpora stošca u projektiranju pilota. Procjena posmične čvrstoće glina i izrada detaljnih profila tla.
Presiometar	Procjena modula tla za primjenu u projektiranju pilota, ali rezultati nisu uvijek primjenjivi. Procjena posmične čvrstoće slabe stijene.
Opterećenje kružnom pločom	Određivanje posmične čvrstoće i modula tla u svim vrstama tla. Parametri posmične čvrstoće bitni su u projektiranju pilota, budući da se opterećuje skoro jednak volumen tla. Kod određivanja modula tla, vrijednosti ne moraju biti u potpunosti točne jer se parametri poremete kod ugradnje pilota.
Pokusi propusnosti	Omogućuje procjenu protoka u propusnim šljuncima i raspucanim stijenama, što može biti relevantan faktor kod odabira tipa pilota. Pokus se također može primijeniti u slabim stijenama za otkrivanje velike raspucanosti.

2.2. **Dimenzioniranje pilota**

Prilikom dimenzioniranja i odabira tipa pilota, praktični i ekonomski faktor imaju ključnu ulogu. Analitičkim proračunom nastoji se utvrditi hoće li svaki razmatrani pilot zadovoljiti funkciju elementa temeljenja. Shodno tome, analizom se utvrđuje i nosivost pilota te se razmatraju ostali potencijalni problemi.

2.2.1. Aksijalno opterećen pilot

Piloti koji su opterećeni paralelno sa svojom osi, preuzimaju nametnuto opterećenje dijelom preko trenja na plaštu pilota, dijelom preko normalnog naprezanja na bazu pilota (slika 2.1). Fleming i dr. (2009) navode da je ukupna nosivost pilota pod aksijalnim opterećenjem, prema izrazu 2-1, jednaka zbroju nosivosti baze i nosivosti plašta pilota:

$$Q = Qb + Qs = Ab \cdot qb + As \cdot \tau s \qquad (2\text{-}1)$$

Gdje je: Q – Ukupna nosivost pilota (kN)

Q_b – Nosivost baze pilota (kN)

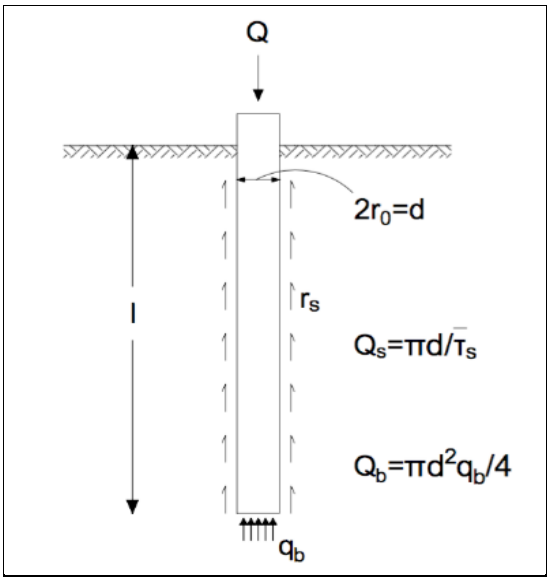
Q_s – Nosivost plašta pilota (kN)

A_b – površina baze pilota (m^2)

q_b – nosivost temeljnog tla ispod baze pilota (kN/m^2)

A_s – površina plašta (kN/m^2)

τ_s – prosječna posmična čvrstoća plašta (kN/m^2)



Slika 2.1 Aksijalno opterećen pilot (Fleming et al, 2009)

Odnos između nosivosti koje pilot ostvaruje preko plašta i baze u najvećoj je mjeri uvjetovan geologijom tla. Pilot ostvaruje veću nosivost preko baze u slučaju da prolazi kroz mekši sloj, a baza mu počiva na tvrđem sloju. Za slučaj kada se dobro nosivi sloj nalazi na prevelikoj dubini ili ga nema, nosivost pilota se zasniva na trenju između plašta i okolnog tla. U pravilu, u sitnozrnatim tlima do izražaja dolazi nosivost plašta, a u krupnozrnatim se nosivost raspoređuje duž plašta i baze pilota.

Randolph (2003) navodi kako su potrebni puno manji pomaci za aktiviranje nosivosti plašta pilota nego nosivosti baze. Ovu razliku potrebno je razmotriti pri predviđanju slijeganja pilota i raspodjeli naprezanja između baze i plašta jednom kad je pilot izveden u tlu. Uz ekonomski, slijeganje je također bitan faktor pri projektiranju pilota. S obzirom da se ista nosivost može postići nizom kombinacija promjera i duljine pilota, prije konačnog je odabira potrebno razmotriti prethodno navedene faktore.

2.2.2. Nosivost pilota u različitim vrstama tla

Mehanika tla dijeli materijal koji izgrađuje tlo na krupnozrnati, što podrazumijeva šljunke i pijeske, te sitnozrnati u koji spadaju gline i prahovi. Vrsta tla na lokaciji na kojoj se izvode piloti izravno utječe na odabir vrste i tipa pilota, iznos slijeganja i samu nosivost pilota. Konkretno kod nosivosti, različite vrste tla uvjetuju drugačiji pristup određivanja parametara iz jednadžbe 2-1.

Za krupnozrnata tla, dokazano je od strane Vesić (1977) da naprezanja na bazi pilota u pijescima rastu do određene granice nakon koje ne rastu proporcionalno s dubinom, što ograničava vrijednosti naprezanja na bazu pilota. Moderni pristupi projektiranja pilota odbacuju ovakav pristup, ali prihvaćaju da će u homogenim pijescima doći do postepenog smanjenja gradijenta projektiranog naprezanja na bazu pilota. U ovakvoj vrsti tla, zbog sličnosti između konusa i aksijalno opterećenog pilota, statički penetracijski pokus omogućava direktno određivanje nosivosti temeljnog tla ispod baze pilota, uz popravke rezultata zbog razlike u veličini i razlike u pomacima. Za određivanje vrijednosti posmičnog naprezanja na plaštu pilota, kao polazna točka koristi se izraz :

$$\tau s = \sigma' n \cdot tan\delta \qquad (2\text{-}2)$$

Gdje je : σ'_n – normalno efektivno naprezanje na plaštu pilota (kN/m^2)

δ – kut trenja između pilota i tla (°)

U sitnozrnatim tlima, pogotovo glinama, nosivost pilota veća je u uvjetima dreniranog stanja promatranog kroz duži period. Slijeganja koja su potrebna da bi se aktivirala nosivost prevelika su za većinu građevina, stoga se nosivost vrha pilota u glinama određuje pomoću faktora nosivosti i nedrenirane posmične čvrstoće gline:

$$q_b = Nc \cdot cu \qquad (2\text{-}3)$$

Gdje je: N_c - faktor nosivosti

c_u – nedrenirana posmična čvrstoća (kN/m^2)

Piloti ostvaruju veću nosivost preko plašta u sitnozrnatim tlima nego li u krupnozrnatim. Fleming i dr. (2009) navode da je omjer vrijednosti nosivosti koje pilot ostvaruje preko baze veći za 50 do 100 u odnosu na nosivost preko plašta u pijescima, dok je isti omjer manji 5 do 10 puta za pilote u glinama. Shodno tome, dodatni su napori uloženi u preciznije određivanje nosivosti plašta pilota, a kao rezultat razvijeno je nekoliko metoda, od kojih su najkorištenije metoda ukupnih naprezanja i metoda efektivnih naprezanja. Konkretno, posmična naprezanja po plaštu određuju se preko nedrenirane posmične čvrstoće gline i empirijskog faktora:

$$\tau_s = c_u \cdot \alpha, \qquad (2\text{-}4)$$

gdje je: α – empirijski faktor

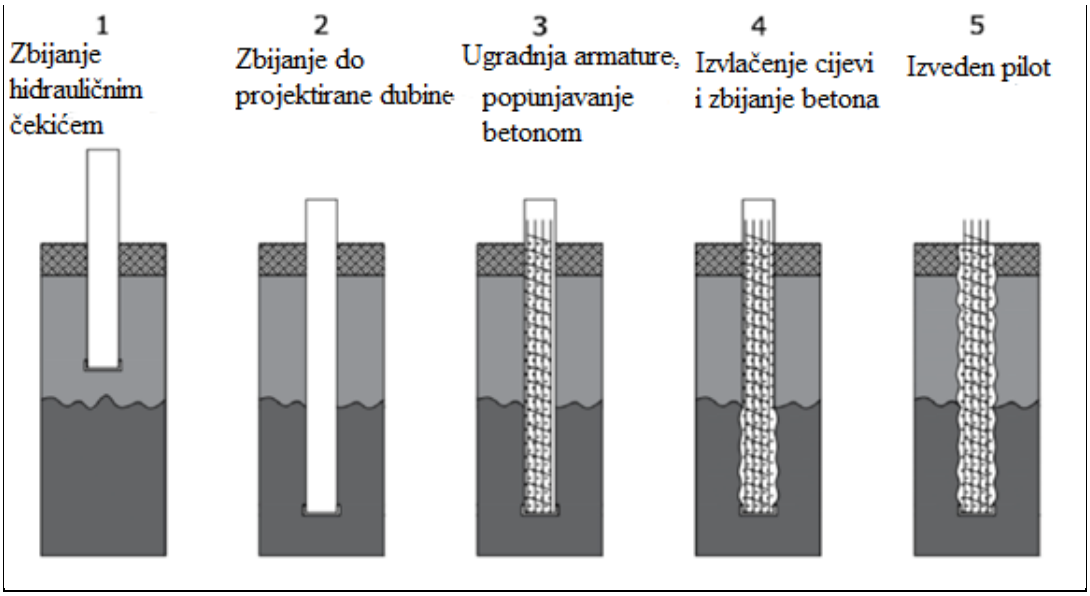
Faktor α, primjenom metode ukupnih naprezanja, izražen je kao funkcija omjera čvrstoće c_u/σ'_v, jer je utvrđeno da su posmična naprezanja zavisna ne samo o posmičnoj

čvrstoći, nego i o naprezanjima tla kroz povijest, što se izražava koeficijentom prekonsolidacije. Metoda efektivnih naprezanja bazira se na određivanju efektivnih naprezanja oko plašta pilota nakon ugradnje.

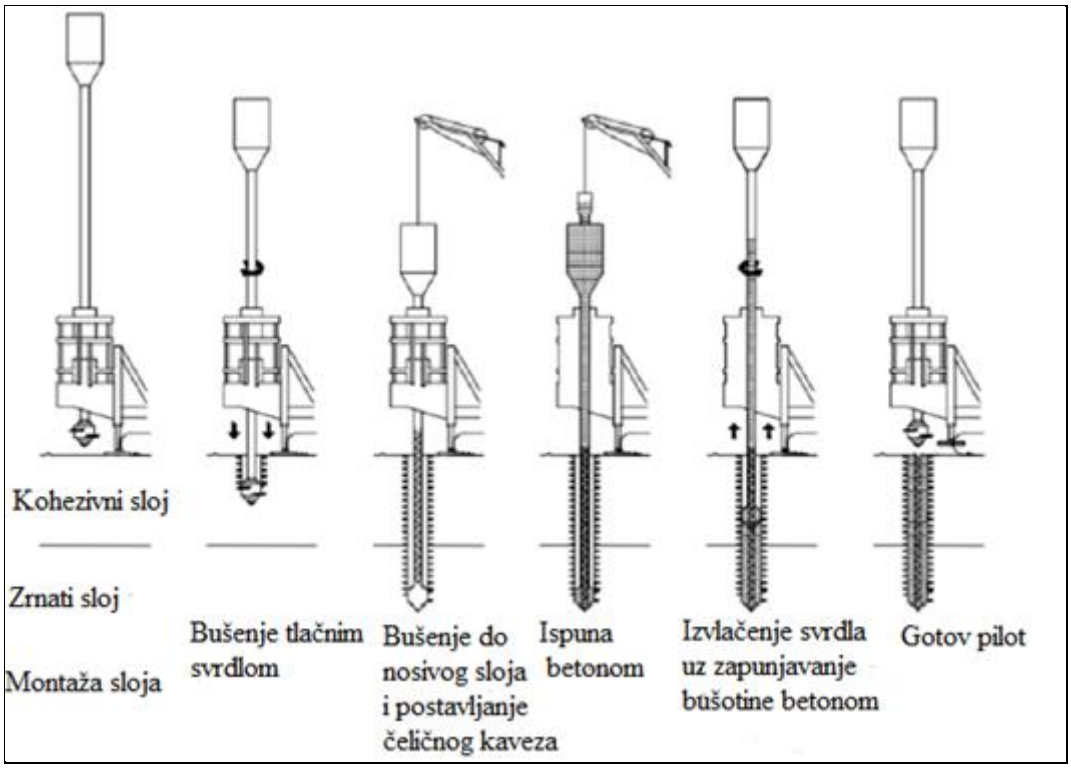
2.3. **Tipovi pilota**

Prijašnja klasifikacija dijelila je pilote na "zbijene" i "bušene", no danas se, zbog širokog spektra pilota u uporabi, oni klasificiraju na "razmičuće" i "nerazmičuće".

Razmičući piloti uglavnom su zbijeni, a prilikom njihove se penetracije tlo radijalno razmiče. Moguće su i komponente kretanja tla u vertikalnom smjeru. Proces razmicanja kao posljedicu ima zbijanje krupnozrnatog tla, dok je kod glinovitog tla trenutna promjena volumena mala, ali može doći do bubrenja (Mufić, 2019). Pod razmičuće pilote spadaju prethodno izrađeni betonski (armirani, spojni i šuplji) i čelični piloti (H-presjek, cjevasti presjek i ostali kao npr. vijčani piloti), te zbijeni, lijevani piloti "Franki" (slika 2.2) i vijčani, zbijeni razmičući piloti (slika 2.3).



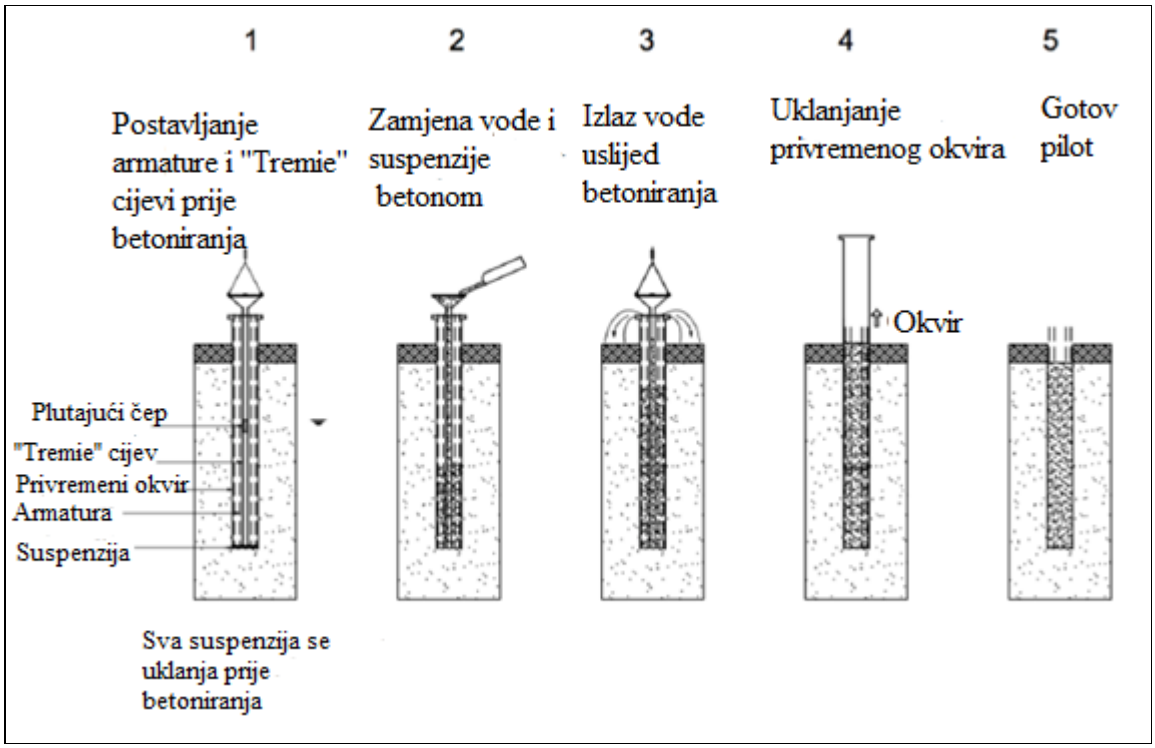
Slika 2.2 Izrada pilota tipa "Frenki" (Fleming et al., 2009)



Slika 2.3 Sistem izrade vijčanih, lijevanih, razmičućih pilota (Fleming et al., 2009)

Pod nerazmičuće pilote u najvećoj mjeri spadaju "bušeni" piloti, kod kojih prilikom izvedbe dolazi do smanjenja uzdužnih naprezanja u tlu zbog iskopa, i samo se djelomično vraćaju na prijašnju razinu nakon betoniranja. Kod ovakvog tipa ne postoje nedostatci koji su vezani uz razmicanje tla, ali izostaje pozitivan efekt zbijanja krupnozrnatog tla. Također, prilikom iskopa dobiva se jalovina, koju je potrebno ukloniti s gradilišta, što dodatno tereti troškove temeljenja.

Izrada ovih pilota temelji se na izradi bušotine i njenom zapunjavanju betonom. Stoga se, prema ovakvom načinu izvedbe, razlikuju bušeni, lijevani piloti (slika 2.4), djelomično predgotovljeni piloti i piloti kontinuiranog svrdla.



Slika 2.4 Sistem izrade bušeno, lijevanog pilota (Fleming et al., 2009)

3. ENERGETSKI PILOTI

Pridobivanje toplinske energije iz podzemlja kroz temeljne konstrukcije u praksi se provodi zadnjih 30-ak godina, gdje su prvi sustavi ovakvog tipa konstruirani u Austriji i Švicarskoj (Brandl, 2006). Niski troškovi ugradnje polietilenskih cijevi u temeljne konstrukcije, visoka efikasnost i jednostavno održavanje pravilno izvedenih sustava omogućili su napredak i povećanu uporabu energetskih temeljnih konstrukcija. Povezivanjem postavljenih energetskih pilota sa dizalicom topline, omogućeno je pridobivanje i pohrana toplinske energije iz ili u zemlju, a dizalica topline služi kao sredstvo prijenosa energije, koja se preko mreže cijevi i radijatora doprema do krajnjeg korisnika.

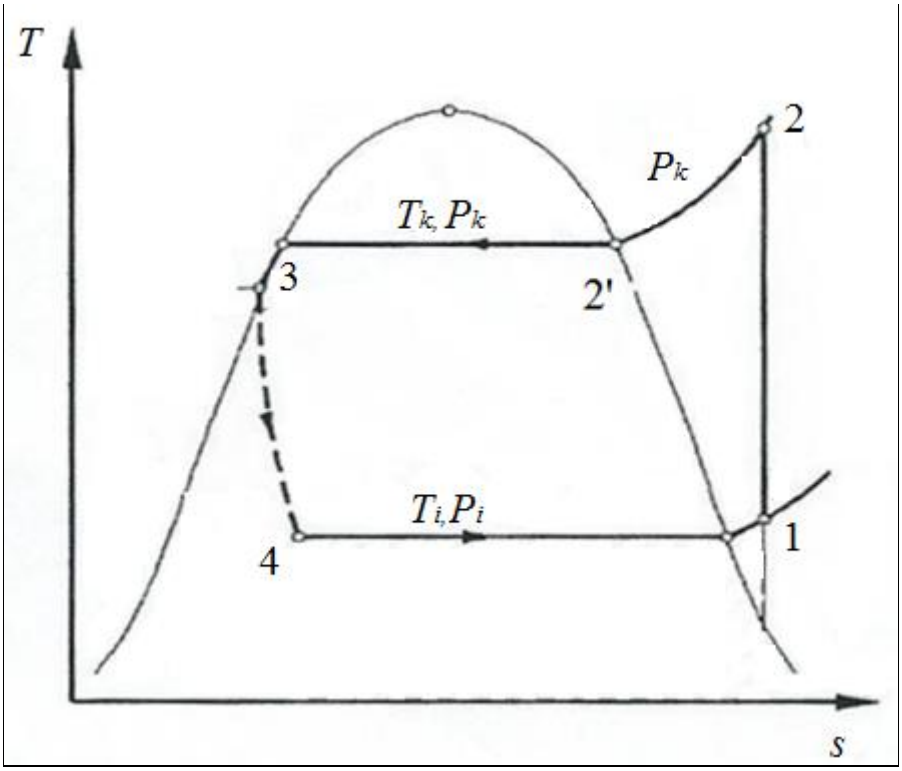
3.1. Dizalica topline

Dizalica topline ili toplinska pumpa predstavlja jednostavan i ekološki prihvatljiv sustav grijanja i hlađenja objekta, s time da toplinsku energiju može pridobivati iz zraka, vode i zemlje. Osnovna postavka rada dizalice topline jest premještanje topline iz okoliša u grijani prostor, a kako bi održavala temperaturu tog prostora višom od okoliša (Kurevija, 2010). Princip rada temelji se na lijevokretnom Carnotovom ciklusu, a konkretno se radi o parno kompresijskom ciklusu (slika 3.1), iako postoji nekoliko termodinamičkih ciklusa po kojima ista može raditi. Zbog svoje ekonomičnosti i efikasnosti, u EU primjena dizalice topline za grijanje i hlađenje u području kućanstva porasla je za 12 % u razdoblju od 2015. do 2018. godine (podaci prema *International Energy Agency*, IEA).

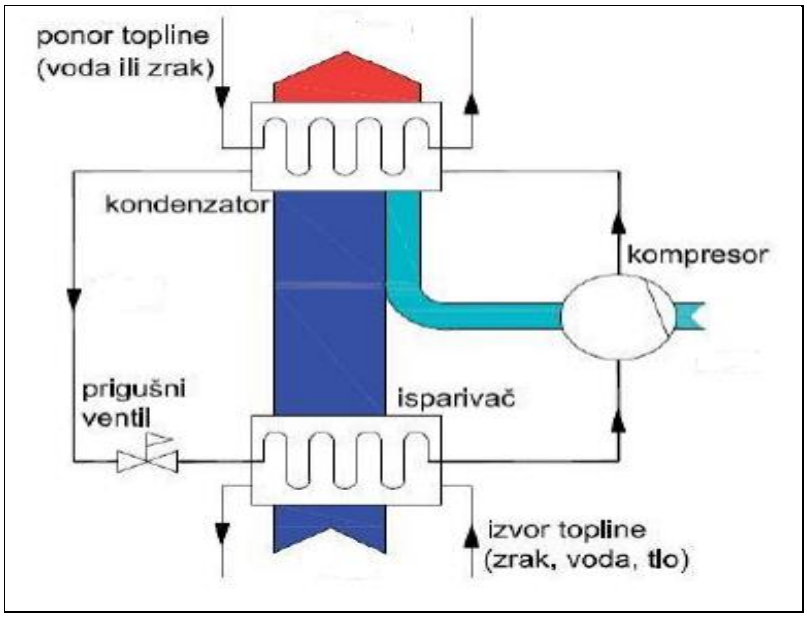
3.1.1. Princip rada dizalice topline i primjena u geotermij

Osnovne komponente dizalice topline su: isparivač, kondezator, kompresor, radni fluid i ekspanzijski ventil. Radni medij (NH_3, CO_2 itd.) cirkulira kroz sustav dizalice topline, te prolaskom kroz isparivač prelazi iz kapljevite u parnu fazu pri konstantnom tlaku (tlak isparavanja, p_i) i konstantnoj temperaturi (temperatura isparavanja, T_i) (slika 3.1, ciklus 4-1) preuzimajući toplinu dopremljenu iz instaliranog geotermalnog sustava (slika 3.2). Radni medij zatim prolazi kroz kompresor gdje mu se uslijed izentropske kompresije podižu tlak i temperatura (slika 3.1, ciklus 1-2). Dolaskom do kondenzatora, medij se prvo

izobarno hladi (slika 3.1, ciklus 2-2'), a zatim u kondenzatoru prelazi iz plinovite u kapljevitu fazu pri konstantnom tlaku i temperaturi (slika 3.2, ciklus 2'-3), predavajući toplinu drugom radnom mediju (slika 3.2). Kondenziranom radnom mediju se zatim ruši tlak i temperatura na ekspanzijskom ventilu na tlak i temperaturu isparavanja (slika 3.1, ciklus 4-1) čime počinje novi krug procesa.



Slika 3.1 T-s dijagram rada dizalice topline (Piljek, 2013)



Slika 3.2 Shematski prikaz rada dizalice topline (Piljek, 2013)

Konkretno, dizalica topline kao izvor topline može koristiti pohranjenu toplinsku energiju u tlu i u vodi. U slučaju iskorištavanja toplinske energije podzemne vode, sustav radi u otvorenom krugu, a toplina se pridobiva iz proizvodne i utisne bušotine. Za slučaj iskorištavanja topline iz tla, sustav radi u zatvorenom krugu, a dizalica topline opskrbljena je toplinom iz vertikalnih izmjenjivača topline i energetskih temeljnih konstrukcija (geotermalna dizalica topline), horizontalnih izmjenjivača topline (dizalice topline sa solarnim zemljanim kolektorom), te iskorištavanjem topline površinskih voda.

Ovisno o geotermalnim karakteristikama lokacije i energetske potrebe predviđenog objekta na toj lokaciji, geotermalna dizalica topline može biti dizajnirana za:

- Pokrivanje ukupne godišnje energetske potrebe objekta (monovalentni režim rada)
- Pokrivanje baznog opterećenja toplinske potrebe, s time da se drugi proizvođač, koji se koristi za pokrivanje vršnih opterećenja, opskrbljuje istovrsnim izvorom energije (monoenergetski režim rada)
- Rad dok se ne postigne točka bivalencije (granične vrijednosti vanjske temperature ispod koje je potrebno dogrijavanje), a toplinski gubici su pokriveni s proizvođačem toplinske energije koji koristi drugu vrstu energenata (bivalentni alternativni režim rada)
- Rad u kombinaciji s drugim proizvođačem topline koji koristi drugu vrstu energenata, ali se koristi za pokrivanje toplinskih gubitaka pri vršnim opterećenjima (bivalentni paralelni režim rada)

3.1.2. Koeficijenti za određivanje učinkovitosti dizalice topline

Količina geotermalne energije uhvaćena dizalicom topline koja se smatra energijom iz obnovljivih izvora, prema *Direktivi 2018/2001 – EU*, određuje se prema:

$$E_{RES} = Q_{usable} * (1 - \frac{1}{SPF}) \quad (3\text{-}1)$$

Gdje je

Q_{usable} - procjenjena ukupna uporabljiva toplina isporučena dizalicom topline, pri čemu se u obzir uzimaju samo dizalice topline kod kojih je SPF > 1,15*1/η

SPF - prosječni godišnji toplinski množitelj

η - omjer između ukupne bruto proizvodnje električne energije i potrošnje primarne energije za proizvodnju električne energije

U praksi, primjenjivost dizalice topline za generiranje toplinske energije ocjenjuje se koeficijentom efikasnosti dizalice topline (eng. *Coefficient Of Performance,* COP – u režima grijanja, *energy efficency ratio,* EER – u režima hlađenja). COP predstavlja odnos dobivene energije iz dizalice topline (kW) naspram utrošene električne energije za rad kompresora (kW). Vrijednosti mu se kreću u rasponu od 3,5 do 6, što znači da u slučaju kada COP iznosi 5, za 1 kW utrošene električne energije i energije dopremljene iz geotermalnog sustava, moguće je dobiti 5 kW_t korisne toplinske energije. Učinkovitost cjelokupnog sustava ocjenjuje se prosječnim godišnjim toplinskim množiteljem (eng. *Seasonal Performance Factor,* SPF). SPF u obzir uzima električnu energiju utrošenu za rad cjelokupnog sustava (kWh) i njegovih komponenti (npr. cirkulacijske pumpe), zbog čega za električne dizalice topline iznosi 3,8-4,3.

Efikasnost dizalice topline u najvećoj će mjeri ovisiti o razlici između temperature tla i temperature u grijanom/hlađenom objektu. Kako navodi Brandl (2006), efikasnost se dizalice smanjuje povećanjem razlike među dvjema temperaturama. Efikasnost cjelokupnog plitkog geotermalnog sustava ovisi o ovoj temperaturnoj razlici. Naime, kako bi se najbolje iskoristila toplinska energija pridobivena iz zemlje, utjecaj dizalice topline na podizanje temperature trebao bi biti minimaliziran. Zbog toga ovakvi sustavi postižu najveću efikasnost kada se koriste u kombinaciji na sustavima koji zahtijevaju manju dobavnu temperaturu na strani korisnika, kao što je podno grijanje koje zahtjeva dobavu topline na temperaturama od 30℃ do 45℃, za razliku od 45℃ do 55℃ kod niskotemperaturnih bojlera u kombinaciji sa radijatorima (Banks, 2012).

3.2. **Princip izmjene topline između tla i temeljne konstrukcije**

Izmjena topline između tla i temeljne konstrukcije ostvarena je preko fizikalnih procesa prelaska topline, kondukcije i konvekcije, u manjoj mjeri radijacijom, procesom vaporizacije i kondenzacije, izmjenom iona itd., uslijed prijelaza toplinske energije iz područja više temperature prema području niže temperature. Matematički je formulirana izrazom (3-2), a isti se izraz može aplicirati na energetske pilote, pri čemu tada dodatno sadrži i geometrijske parametre pilota, radijus i duljinu.

$$\frac{Q_t}{A} = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \qquad (3\text{-}2)$$

Gdje je: Q_t/A – gustoća prijelaza toplinske energije (W/m^2)

λ – toplinska vodljivost (W/m°C)

$\frac{\partial T}{\partial r}$ – temperaturni gradijent (°C/m)

Za energetske pilote ista jednadžba glasi:

$$\frac{Q}{A} = -2 \cdot R \cdot \lambda \cdot l \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \tag{3-3}$$

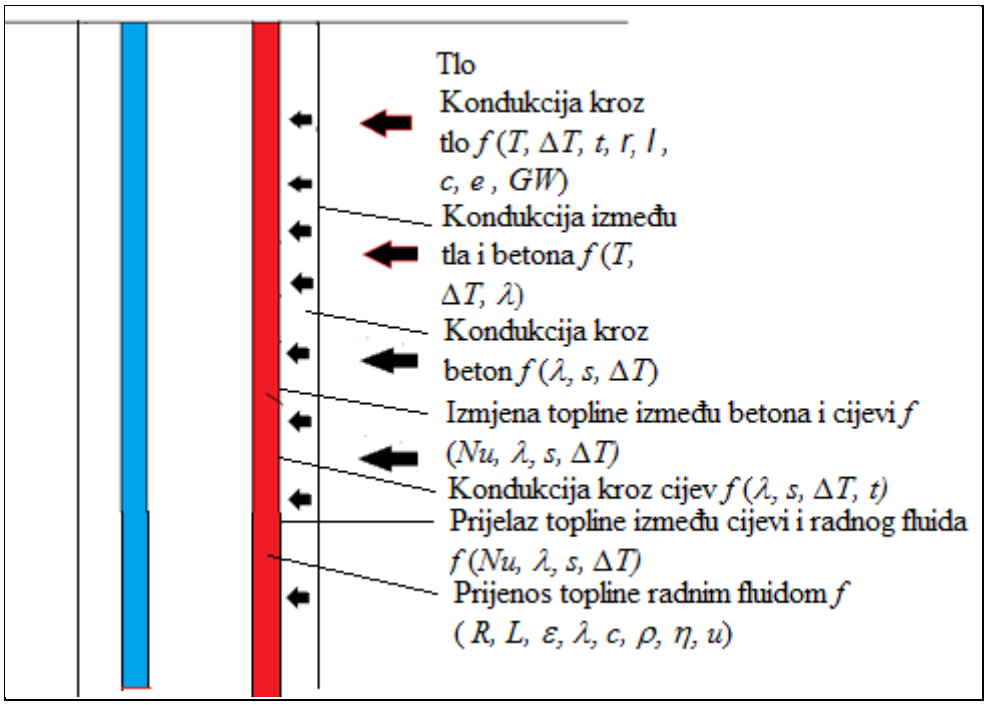
Gdje je: R – radijus pilota (m)

l – duljina pilota (m)

Loveridge (2013) navodi kako je koncept projektiranja energetskih pilota baziran na sljedećim mehanizmima prijelaza topline:

- kondukciji kroz tlo
- ravnomjernoj kondukciji kroz beton pilota i kroz cijev radnog fluida
- konvekciji na granici između cijevi i radnog fluida.

Na slici 3.3 prikazan je detaljniji koncept prijelaza topline od tla, kroz pilot, prema radnom fluidu, uz naznačene fizikalne veličine koje su utjecajne na prijelaz topline kroz pojedini medij.

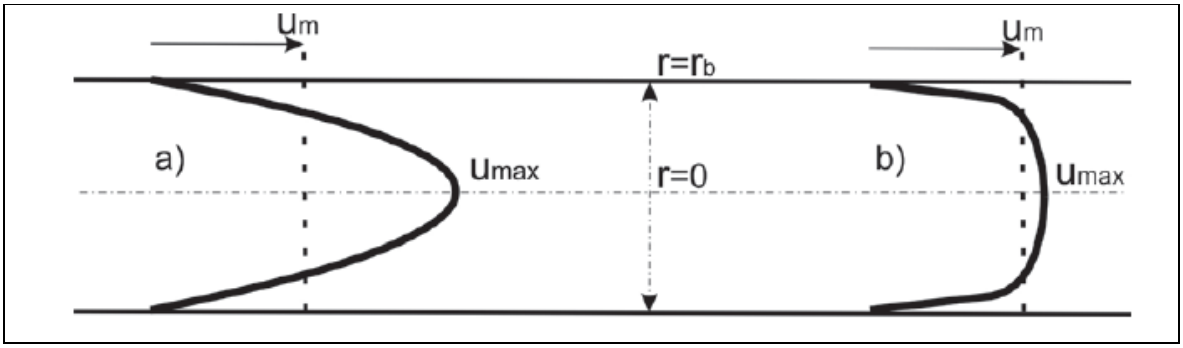


Slika 3.3 Prijelaz topline između tla, pilota i radnog fluida

T-temperatura, ΔT-razlika u temperaturi između dva medija, t – vrijeme, ρ – gustoća, λ – toplinska vodljivost, c – specifičan toplinski kapacitet, e – keof. poroznosti, GW – podzemna voda (eng. Ground water), α –toplinski difuzivitet, s – stupanj saturacije, Nu - Nusseltov broj, R – radijus pilota, l – duljina pilota, ε – hrapavost unutarnje stijenke zida, η – dinamički viskozitet, u – protočna brzina radnog fluida.

3.2.1. Toplinske i hidrodinamičke karakteristike

Iznos izmijenjene toplinske energije između radnog fluida i stjenke cijevi, kao i ukupan prinos topline, u velikoj mjeri ovisi o karakteristikama protoka fluida u cijevi, pri čemu protok može biti laminaran i turbulentan. Pri laminarnom protoku, strujnice fluida su linearne i glatke, dok je kod turbulentnog strujanja raspored strujnica kaotičan, a brzine su podložne velikim fluktuacijama. Intenzivno miješanje fluida pridonosi boljim toplinskim svojstvima radnog fluida u odnosu na laminaran protok, zbog čega se u većini plitkih geotermalnih sustava nastoji postići turbulentan protok u cijevima .Granicu između turbulentnog i laminarnog protoka predstavlja Reynoldsov broj, gdje protok prelazi u turbulentni za vrijednost od 2300, a puna turbulencija je postignuta za vrijednost Reynoldsovog broja od 4000. Puni profil brzine protoka fluida u cijevi ovisit će o trenju na unutarnjoj stijenki cijevi te o vrsti samog protoka. Za laminaran protok, profil brzine poprima izgled parabole, dok je za turbulentan protok ravniji (slika 3.4).



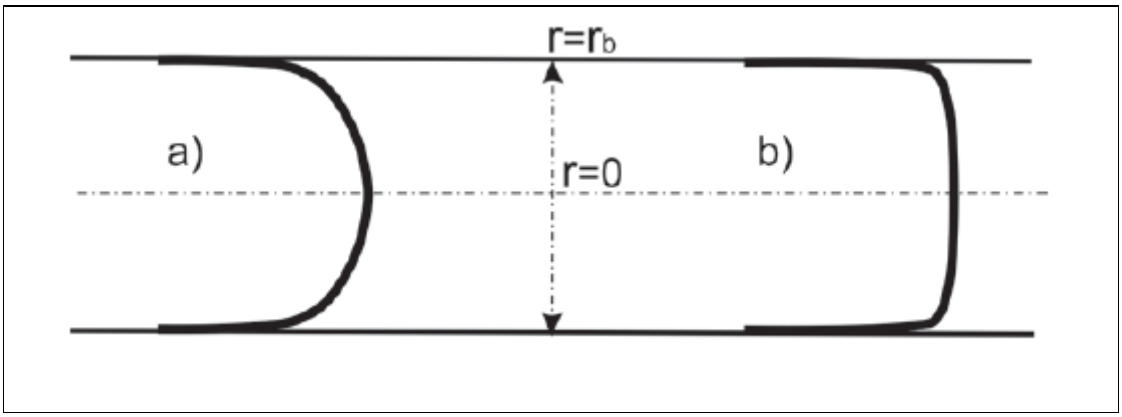
Slika 3.4 Potpuno razvijen profil brzine za a) laminaran protok, b) turbulentan.
(Loveridge, 2013)

Za razvijanje punog temperaturnog profila, jedan od ova dva uvjeta mora biti postignut:

- konstantna temperatura na stijenci cijevi
- konstantan toplinski tok na stijenci cijevi.

S postignutom konstantnom temperaturom ili konstantnim toplinskim tokom na stijenci zida, moguć je razvoj temperaturnog profila pri laminarnom i turbulentnom protoku. Razlika između dva protoka jest duljina potrebna da se razvije puni temperaturni i hidrodinamički profil, a samim tim i stabilan transfer topline. Pri turbulentnom protoku, profili su razvijeni otprilike nakon dva metra, dok za laminaran protok, isti profili poprimaju konačan izgled nakon 30 do 50 m (Loverdge, 2013).

Za turbulentan protok, izgled temperaturnog profila prikazan je na slici 3.5, a ovisi o navedenim uvjetima te Reynoldsovom i Prandtlovom broju, *Pr* (odnos viskoznog i toplinskog difuziviteta). Za konstantnu temperaturu na stijenci cijevi i vrijednosti Prandtlovog broja 1, profil je više paraboličan (slika 3.5a) nego u slučaju konstantne temperature i Pr = 10 kada je više poravnat (slika3.5b).



Slika 3.5 Potpuno razvijen temperaturni profil za konstantnu temperaturu na stijenci cijevi a) Re = 10 000, Pr = 1, b) Re = 10 000, Pr = 10. (Loveridge, 2013)

Za potpuno uspostavljene hidrodinamičke i temperaturne uvjete, moguće je odrediti iznos izmijenjene toplinske energije prema:

$$Q_t = m * c_s * (T_{out} - T_{in}) \quad (3\text{-}4)$$

Gdje je: Q_t - iznos izmijenjene toplinske energije (W)

m - maseni protok fluida (kg/s)

c_s - specifičan toplinski kapacitet fluida (J/kg℃)

T_{in} - temperatura fluida na ulazu u cijev (℃)

T_{out} - temperatura fluida na izlazu iz cijevi (℃).

U praksi se često pretpostavlja konstantan toplinski tok na stijenci cijevi, zbog jednostavnijeg određivanja srednje temperature radnog fluida, međutim, Loveridge (2013)

navodi kako bi u tom slučaju radni fluid morao izmjenjivati toplinsku energiju u konstantnom iznosu duž cijevi, odnosno po dubini pilota. Terenska mjerenja (Acuña et al, 2009) izvedena na bušotinskim izmjenjivačima topline pokazala su da su toplinski otpori u gornjem dijelu izmjenjivača veći nego u donjem, zbog velike temperaturne razlike, te da je izračunati ukupni toplinski otpor veći u slučaju konstantnog toplinskog toka nego konstantne temperature na stijenci zida.

3.2.2. Koeficijent prijelaza toplinske energije

U prvoj fazi određivanja iznosa izmijenjene toplinske energije između radnog fluida i okolnog tla potrebno je odrediti koeficijent prijelaza topline za konvencijski tok topline između radnog fluida i stijenke cijevi. Primjenjujući Newtonov zakon hlađenja, isti se koeficijent može koristiti za određivanje temperaturne razlike između prosječne temperature radnog fluida i stijenke cijevi. Pretpostavljajući nepromjenjiva svojstva fluida, za potpuno razvijene toplinske uvjete, koeficijent prijelaza topline je konstantan po cijeloj dužini cijevi.

Za laminaran protok, koeficijent prijelaza topline može biti direktno proporcionalan Nusseltovom broju, omjeru konvecijskog i konduktivnog prijelaza topline duž granice na danoj duljini. Izraz (3-4) predstavlja određivanje Nusseltovog broja za slučaj laminarnog protoka, a njegova vrijednost ovisi o temperaturnom uvjetu postignutom na stijenci cijevi. Za slučaj konstantnog toplinskog toka vrijednost mu je 4,36, dok pri konstantnoj temperaturi na zidu iznosi 3,66 (Loveridge, 2013).

$$Nu = \frac{h*d}{\lambda} \tag{3-5}$$

Gdje je: N_u - Nusselt-ov broj

h – koeficijent prijelaza topline (W/m °C)

d – promjer (m)

Za turbulentan protok, uz razvijene temperaturne uvjete, Nusseltov broj nije konstantan, već ovisi o Reynoldsovom i Prandltovom broju, sadržanima u Dittus-Boelter jednadžbi:

$$Nu = 0{,}023 * Re^{0{,}8} * Pr^{n} \tag{3-6}$$

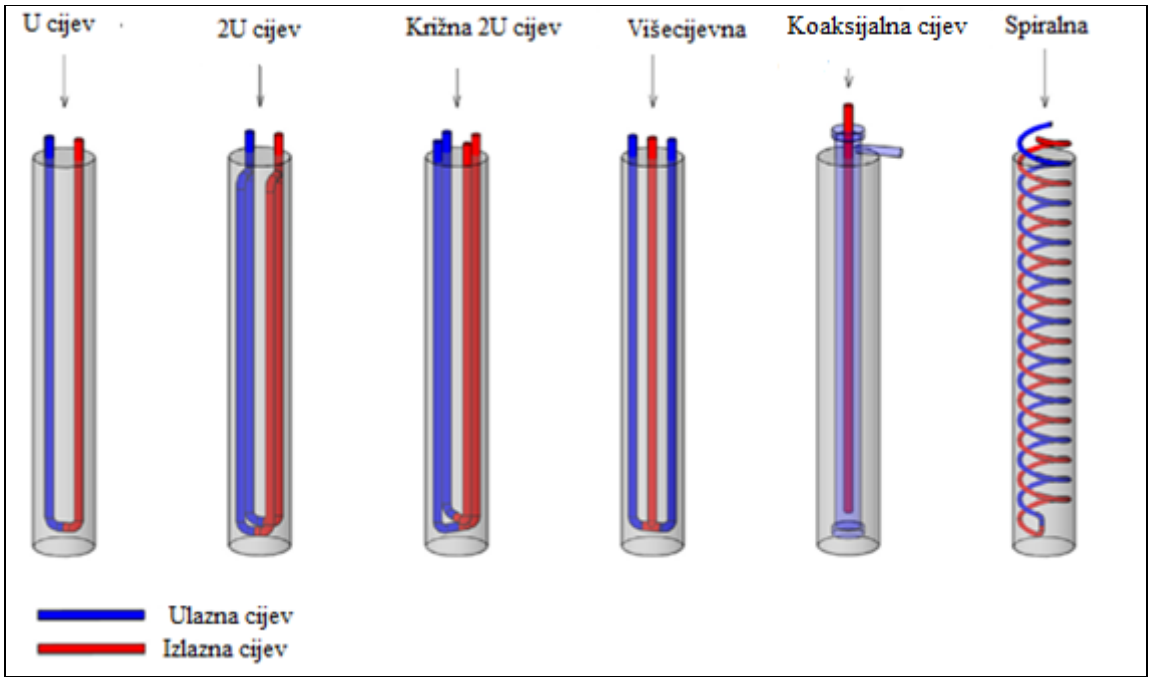
Gdje je n konstanta, s vrijednošću od 0,4 za grijanje i 0,3 za hlađenje. Ograničenja u primjeni Dittus-Boelterove jednadžbe očituju se kod većih temperaturnih razlika i fluida s

toplinskim svojstvima ovisnim o viskoznosti, te je primjenjiva samo u slučaju kada je Re > 10000.

3.3. **Konstrukcija i izvedbe energetskih pilota**

Energetski piloti predstavljaju nosive stupove u koje su dodatno ugrađeni izmjenjivači topline, odnosno polietilenske cijevi za protok radnog fluida, pri čemu takvi piloti u cjelini objedinjuju geotehničku funkciju i funkciju plitkog geotermalnog sustava. Od navedenih tipova pilota u poglavlju 2, kao energetski piloti mogu se koristiti zbijeni i bušeni piloti s armaturnim košem, dok su lijevani beton in-situ, prenapregnuti beton velike čvrstoće (PHC) i čelik dominantni materijali u izradi energetskih pilota (Fadejev et al., 2017). Polietilenske cijevi velike gustoće (HDPE), koje se ugrađuju u pilote, promjera su 20 do 40 mm s debljinom stijenke cijevi od 2 do 2,5 mm, a trajnost je osnovni razlog njihove primjene u ovakvoj strukturi. Na slici 3.6 prikazani su mogući načini ugradnje polietilenskih cijevi u pilot, pri čemu su pojedinačna U-cijev i dupla U-cijev najkorišteniji, dok je naglasak u današnjim istraživanjima na spiralno postavljenoj HDPE cijevi (Fadejev 2017, Park et al., 2015). Polietilenske cijevi vežu se na armaturni koš, a mogu biti postavljene i centralno, nakon čega se ulazna i izlazna cijev (za radni fluid) povezuje s manometrom i ventilom, održavajući tlak od 8 bara u cijevima, što omogućava provjeru integriteta cijevi i pruža otpor na pritisak uslijed lijevanja betona. Provjera se provodi nekoliko dana nakon lijevanja betona, te prije zatvaranja kompletnog kruga.

Zatvorene cijevi u izmjenjivaču priključuju se na zajednički priključak u strojarnici građevine za koju se izvode, te čine primarni krug. Sekundarni krug sastoji se od mreže cijevi, podnog grijanja/radijatora/ventilokonvektora, koji isporučuju toplinsku/rashladnu energiju korisniku. Oba kruga međusobno su povezana preko dizalice topline koja podiže temperaturu radnog fluida na projektiranu, ovisno o potrebama korisnika.



Slika 3.6 Konfiguracije energetskih pilota (Fadejev, 2017)

Kao radni fluid koji transferira izmijenjenu toplinsku energiju između tla i pilota prema toplinskoj pumpi, koristi se voda, najefikasniji medij za prijenos topline zbog njezinih povoljnih termalnih karakteristika i niskog viskoziteta (Loveridge, 2013). Međutim, kako se plitki geotermalni sustav dimenzionira za rad na temperaturama nižim od 0℃ tijekom zimskih mjeseci, vodi se dodaje antifriz, propilen glikol ili etilen glikol, čime se postiže snižavanje točke ledišta radnog fluida i do –14℃, ovisno o postotnom udjelu dodanog glikola. Dodavanje antifriza radnom fluidu također rezultira povećanjem viskoznosti istog, što zahtjeva veću snagu cirkulacijske pumpe za održavanje turbulentnog protoka fluida kroz cijev. Pojavu laminarnog protoka u cijevima izmjenjivača topline uslijed dodavanja mješavine glikola i cirkuliranja fluida na niskim temperaturama moguće je izbjeći u određenoj mjeri korištenjem HDPE cijevi s užljebljenom unutarnjom stijenkom zida, umjesto klasičnih cijevi sa glatkom cijevi. Mjerenjima provedenim u Zagrebu na bušotinskim izmjenjivačima topline koji su opremljeni pojedinačno s 2U glatkom cijevi promjera 32 mm, 2U užljebljenom cijevi jednakog promjera i 1U užljebljenom cijevi promjera 45 mm, ustanovljeno je da izmjenjivači topline s užljebljenim HDPE cijevima imaju povoljnije hidraulične uvjete u vidu manjeg pada tlaka po metru bušotine za iste protočne uvjete (Kurevija et al., 2019). Također, prijelazni i turbulentni režim pojavljuju se pri manjoj brzini protoka za 1U užljebljenu cijev u odnosu na 2U glatku cijev, definirano preko Reynoldsovog broja, što dovodi do manje godišnje energetske potrošnje

cirkulacijske pumpe i posljedično do većeg SPF-a. Primjenom nove varijante TRT-a, *Thermal Response Step Test-a* (TRST), izmjereni su veći toplinski prinosi kod užljebljenih izmjenjivača topline za iste termogeološke uvjete zbog pospješenog turbulentnog režima u istima, što dovodi do povećanja izmjene topline između radnog fluida i stijenke cijevi.

3.4. **Termogeološki parametri projektiranja**

Svrha projektiranja energetskih pilota jest određivanje količine energije koja se može pridobiti iz zemlje ili pohraniti u zemlju, odnosno određivanje koliko je energetskih pilota potrebno instalirati da bi se zadovoljila energetska potražnja građevine koja se izvodi na pilotima. Za dobru efikasnost sustava (COP ili SPF) uz pravilan odabir dizalice topline prema tehničkim zahtjevima, prilikom rada sustava potrebno je održavati temperaturne promjene u tlu i pilotu na prihvatljivoj razini.

Toplinska energija ostvarljiva preko pilota, osim o geometriji pilota, broju i konfiguraciji instaliranih cijevi, ovisi o sljedećim bitnim toplinskim svojstvima: toplinskom otporu pilota, toplinskoj vodljivosti tla, volumetrijskom toplinskom kapacitetu tla i statičkoj ustaljenoj temperaturi tla.

Uslijed prijelaza toplinske energije sa formacije na pilot, za svaki se fizikalni proces prijelaza toplinske energije u pilotu javlja odgovarajući toplinski otpor. Prema tome, razlikuje se toplinski otpor konvektivnom prijelazu između radnog fluida i unutarnje stijenke cijevi, toplinski otpor konduktivnom prijelazu kroz stijenke cijevi i toplinski otpor konduktivnom prijelazu kroz materijal od kojeg je izgrađen pilot. Za iste se otpore pretpostavlja da se serijski nastavljaju jedan na drugi, pa njihov zbroj predstavlja ukupan toplinski otpor energetskog pilota:

$$R'_p = R'_{conv,p} + R'_{cond,p} + R'_{cond,c} \qquad (3\text{-}7)$$

Gdje je: R'_p - ukupan toplinski otpor energetskog pilota (m °C/ W)

$R'_{conv,p}$ -toplinski otpor konvektivnom prijelazu između fluida i stijenke cijevi (m °C/ W)

$R'_{cond,p}$ - toplinski otpor konduktivnom prijelazu kroz stijenku cijevi (m °C/ W)

$R'_{cond,c}$ - toplinski otpor konduktivnom prijelazu kroz beton (m °C/ W)

Toplinski otpor konvektivnom prijelazu nadalje se određuje preko izraza (3-8), prema čemu je ovisan o broju cijevi unutar poprećnog presjeka izmjenjivača topline, unutarnjem radijusu cijevi i koeficijentu prijelaza topline.

$$R'_{conv,p} = \frac{1}{2n_i \pi r_i h_i} \tag{3-8}$$

Gdje je: n_i - broj cijevi u pilotu

r_i - unutarnji radijus cijevi (m)

Koristeći jednadžbu za određivanje otpora praznog cilindra, moguće je odrediti toplinski otpor stijenke cijevi :

$$R'_{cond,p} = \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2n\pi\lambda_{cijev}} \tag{3-9}$$

Gdje je: r_o - vanjski promjer cijevi (m)

λ_{cijevi} – toplinska vodljivost cijevi (W/m °C)

Po veličini, najutjecajniji je toplinski otpor prijelazu toplinske energije kroz materijal od kojeg je izrađen pilot - do 65 %, a najmanji uslijed konvektivnog prijelaza između fluida i stjenke cijevi - 2-3 % (Laloui et al., 2019). Za određivanje toplinskog otpora betona, od kojeg su u većini slučajeva izrađeni piloti, isti se može odrediti numerički (3-10) ili analitički, korištenjem *multi-pole* metode (Loveridge et al., 2013).

$$R'_{cond,c} = \frac{\overline{T_p} - \overline{T_b}}{q'} \tag{3-10}$$

Gdje su: T_p – srednja vrijednost temperature na cijevi (°C)

T_b - srednja vrijednost temperature na kontaktu pilota sa okolnom formacijom (°C)

q' - narinuti toplinski puls (W/m)

Toplinska vodljivost tla jedan je od bitnijih termogeoloških parametara jer izravno utječe na toplinsku energiju koju je moguće pridobiti iz tla na određenoj lokaciji. Definira se kao svojstvo materijala da provodi toplinu. Vrijednosti toplinske vodljivosti često se pretpostavljaju metodom analogije ili iščitavanjem iz kataloga i literature, što lako može dovesti do podimenzioniranja ili predimenzioniranja sustava (Strpić, 2017). Navedenu veličinu moguće je puno preciznije odrediti testom toplinskog odaziva (eng. *Thermal Response Test*, TRT), koji se također koristi za određivanje i statički ustaljene temperature tla, a potencijalno i za određivanje toplinskog otpora pilota.

Statički ustaljena temperatura tla predstavlja temperaturu koja se mijenja kao sinusna funkcija do određene dubine, gdje klimatski parametri i sunčevo zračenje više nemaju utjecaj na promijenjenu temperaturu (Hillel, 1982). Ispod te dubine temperatura tla/stijene mijenja se isključivo u funkciji geotermalnog gradijenta.

Za određivanje toplinskog difuziviteta potrebno je poznavati volumetrijski toplinski kapacitet i toplinsku vodljivost (3-11):

$$\alpha_t = \frac{\lambda}{\rho * c} \tag{3-11}$$

Gdje je: α_t - toplinski difuzivitet (m^3/h)

ρ - gustoća (kg/m^3)

Prilikom izračuna se vrijednost volumetrijskog toplinskog kapaciteta tla često preuzima iz literature za pojedinu formaciju, zbog čega ne mora odgovarati stvarnoj vrijednosti stijenske formacije.

3.4.1. Test toplinskog odaziva TRT

Test toplinskog odaziva (eng. *Thermal response test*, TRT) predstavlja in-situ mjernu metodu određivanja termogeoloških parametara, ponajviše statičke temperature tla na određenoj dubini i toplinske vodljivosti, za potrebe projektiranja plitkih geotermalnih sustava na određenoj lokaciji. Iz podataka dobivenih TRT-om također se određuju bušotinski toplinski otpori koji se mogu objasniti kao veličina razlike između temperature bušotinskog radnog fluida i stijenke cijevi. Isti TRT se kasnije koristi na projektiranom i instaliranom sustavu u cilju određivanja njegovih karakteristika i efikasnosti. Metoda je u praksi česta, a s obzirom na širinu primjene i važnost u ovakvim sustavima, ista se nastoji poboljšati u vidu što preciznijeg određivanja toplinskih parametara tla i izmjenjivača topline.

3.4.1.1. *Teoretska pozadina TRT-a*

Podaci dobiveni testom toplinskog odaziva interpretiraju se metodom koja se temelji na Kelvinovom linijskom modelu prijelaza topline. Naime, moguće je pretpostaviti da se bušotinski izmjenjivači topline, zbog zanemarivog radijusa u odnosu na duljinu, ponašaju

kao linijski izvori topline, a primjenom linijskog modela dobiva se analitičko rješenje za opis radijalnog prijelaza topline i promjene temperature u funkciji vremena i radijusa bušotine tijekom provođenja TRT-a (Carslaw i Jaeger, 1946; Ingersol et al., 1954; Lee, 1982). Analitičko rješenje temelji se na Fourierovom zakonu provođenja topline, a izvedeno je iz parcijalne jednadžbe difuziviteta (3-12).

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{c\rho}{\lambda}\frac{\partial T}{\partial t} \tag{3-12}$$

Gdje je: t - vrijeme (h)

r - radijus (m)

T - temperatura (°C)

Jedno od analitičkog rješenja jest linijski model prijelaza toplinske energije beskonačne duljine (engl. *Infinite line source model*, ILS) koji opisuje radijalno širenje toplinske energije kondukcijom kroz čvrsti medij, a čije je rješenje (Carslaw i Jaeger, 1946) za taj model pri primjeni TRT-a kod zagrijavanja tla i određivanja temperature na stijenci bušotine prikazano izrazom (3-13):

$$T(r_b, t) = T_i + \frac{q'}{2\pi\lambda}\left\{\frac{1}{2}E_i\left(\frac{{r_b}^2}{4\alpha t}\right)\right\} = T_i + \frac{q'}{4\pi\lambda}\left\{E_i\left(\frac{{r_b}^2}{4\alpha t}\right)\right\}. \tag{3-13}$$

Gdje je: T_i - statička ustaljena temperatura tla (°C)

r_b - radijus bušotine (m)

q' - toplinski prinos/opterećenje (W/m)

U slučaju kada se toplinska energija pridobiva iz tla, odnosno kada se tlo pothlađuje, rješenje jednadžbe dizufije poprima oblik:

$$T(r_b, t) = T_i + \frac{q'}{2\pi\lambda}\left\{-\frac{1}{2}E_i\left(\frac{{r_b}^2}{4\alpha t}\right)\right\} = T_i - \frac{q'}{4\pi\lambda}\left\{E_i\left(\frac{{r_b}^2}{4\alpha t}\right)\right\}. \tag{3-14}$$

E_i predstavlja funkciju eksponencijalnog integrala, čije je rješenje prikazano izrazom (3-15), a može se aproksimirati s funkcijom prirodnog logaritma uz grešku manju od 0,6 % (3-16) za slučaj kada je $\left(\frac{4\alpha t}{{r_b}^2}\right) > 50$ (Lee, 1982):

$$-E_i(-x) = \int_x^\infty \frac{e^u}{u}du \tag{3-15}$$

$$-E_i(-x) \cong -\ln(yx) \cong -\ln(e^y x) \cong \ln\left(\frac{1}{x}\right) - 0.5772 \tag{3-16}$$

Oznaka y predstavlja Eulerovu konstantu koja iznosi 0.5772. Primjenom navedene aproksimacije, rješenja jednadžbe difuzije za zagrijavanje (3-17) i pothlađivanje (3-18) su:

$$T(r_b,t) = T_i - \frac{q'}{4\pi\lambda}\ln\left(\frac{e^y {r_b}^2}{4\alpha t}\right) = T_i - \frac{q'}{4\pi\lambda}\left(ln\frac{{r_b}^2}{4\alpha t} + 0.5772\right) = T_i - \frac{q'}{4\pi\lambda}\left(ln\frac{{r_b}^2}{4\alpha t} - 0.8097\right) \quad (3\text{-}17)$$

$$T(r_b,t) = T_i + \frac{q'}{4\pi\lambda}\ln\left(\frac{e^y {r_b}^2}{4\alpha t}\right) = T_i + \frac{q'}{4\pi\lambda}\left(ln\frac{{r_b}^2}{4\alpha t} + 0.5772\right) = T_i + \frac{q'}{4\pi\lambda}\left(ln\frac{{r_b}^2}{4\alpha t} - 0.8097\right) \quad (3\text{-}18)$$

Temperatura radnog fluida, osim o termogeološkim parametrima i toplinskom pulsu, ovisna je i o pribušotinskom otporu, koji se još naziva skin (3-19), a koji je potrebno svladati da bi se uspostavio prijelaz toplinske energije između formacije i izmjenjivača.

$$\Delta T_{skin} = s\left(\frac{q'}{2\pi\lambda}\right) = R_b \cdot q' \quad (3\text{-}19)$$

Gdje je : ΔT_{skin} – razlika temperature uslijed skin efekta (°C)

s - skin

Koeficijent skina predstavlja oštećenje u pribušotinskoj zoni nastalo uslijed izrade bušotine, a definira se kao (Kurevija et al., 2018a):

$$s = \frac{1}{2}\ln\left(\frac{e^y r_b^2}{4\alpha t}\right) + \frac{(T_i - T)2\pi\lambda}{q'} \quad (3\text{-}20)$$

Gdje je: y – Eulerova konstanta

Izrazom (3-21) definirana je prosječna temperatura radnog fluida za slučaj kada se toplinska energija pohranjuje u tlo:

$$T(f) = T_i - \frac{q'}{4\pi\lambda}\ln\left(\frac{e^y {r_b}^2}{4\alpha t}\right) + \Delta T_{skin}, \quad (3\text{-}21)$$

Daljnjim raspisivanjem jednadžbe (3-21) isti izraz se može prikazati kao:

$$T(f) = T_i - \frac{q'}{4\pi\lambda}\left(ln\frac{{r_b}^2}{4\alpha t} - 0.8097\right) + s\left(\frac{q'}{2\pi\lambda}\right) = T_i - \frac{q'}{4\pi\lambda}\left(ln\frac{{r_b}^2}{4\alpha t} - 0.8097 + 2s\right) \quad (3\text{-}22)$$

Prethodno opisani model pretpostavlja da je izmjenjivač beskonačno dug, što ne odgovara stvarnoj situaciji. Primjenom modela linijskog prijelaza konačne duljine (eng. *Finite line source model – FLS)* promatra se prava, konačna duljina izmjenjivača.

Temperatura na stijenci bušotine ovisna o vremenu i radijusu bušotine određuje se korištenjem takozvane g-funkcije koja je definirana izrazom (3-25) (Claesson i Eskilson, 1987):

$$T(r_b, t) = T_i - \frac{q'}{2\pi\lambda} g\left(\frac{t}{t_s}, \frac{r}{H}\right) \tag{3-24}$$

$$g\left(\frac{t}{ts}, \frac{r}{H}\right) = \begin{cases} \ln\left(\frac{H}{2r}\right), & t > t_s \\ \ln\left(\frac{H}{2r}\right) + \frac{1}{2}\ln\left(\frac{t}{ts}\right), & \frac{5r^2}{\alpha} < t < t_s \end{cases} \tag{3-25}$$

Gdje je: H - dubina (m)

t_s - vrijeme u kojemu je postignuto SSS stanje (h)

g - funkcija

Prosječna temperatura radnog fluida u izmjenjivaču definirana je izrazom (3-26), a njeno se rješenje može primijeniti u procjeni temperaturnog odziva bušotinskog izmjenjivača u slučaju konstantnih toplinskih opterećenja tijekom rada sustava.

$$T(f) = T_i - \frac{q'}{2\pi\lambda} g\left(\frac{t}{ts}, \frac{r}{H}\right) + \Delta T_{skin} \tag{3-26}$$

U slučaju promjenjivog toplinskog opterećenja, temperaturni će odziv biti ovisan o trajanju pojedinog toplinskog opterećenja. Određivanje ukupnog toplinskog odziva moguće je primjenom načela superpozicije, odnosno zbrajanjem temperaturnih odziva za pojedino toplinsko opterećenje. Stoga u slučaju da je nakon određenog vremena i opterećenja q'_1 nastupilo manje toplinsko opterećenje q'_2, temperaturu bušotinskog fluida u drugom vremenskom razdoblju moguće je odrediti prema:

$$T(f) = T_i - \frac{1}{2\pi\lambda}\left[(q'_1 \cdot g_{t1}) + (-q'_2 + q'_1) \cdot g_{t2-t1}\right] + \Delta T_{skin2} \tag{3-27}$$

Daljnjim smanjivanjem toplinskog opterećenja na q'_3, za treće vremensko razdoblje itd.:

$$T(f) = T_i - \frac{1}{2\pi\lambda}\left[(q'_1 \cdot g_{t1}) + (-q'_2 + q'_1) \cdot g_{t2-t1} + ((-q'_3 + q'_2) \cdot g_{t3-t2}\right] + \Delta T_{skin3} \tag{3-28}$$

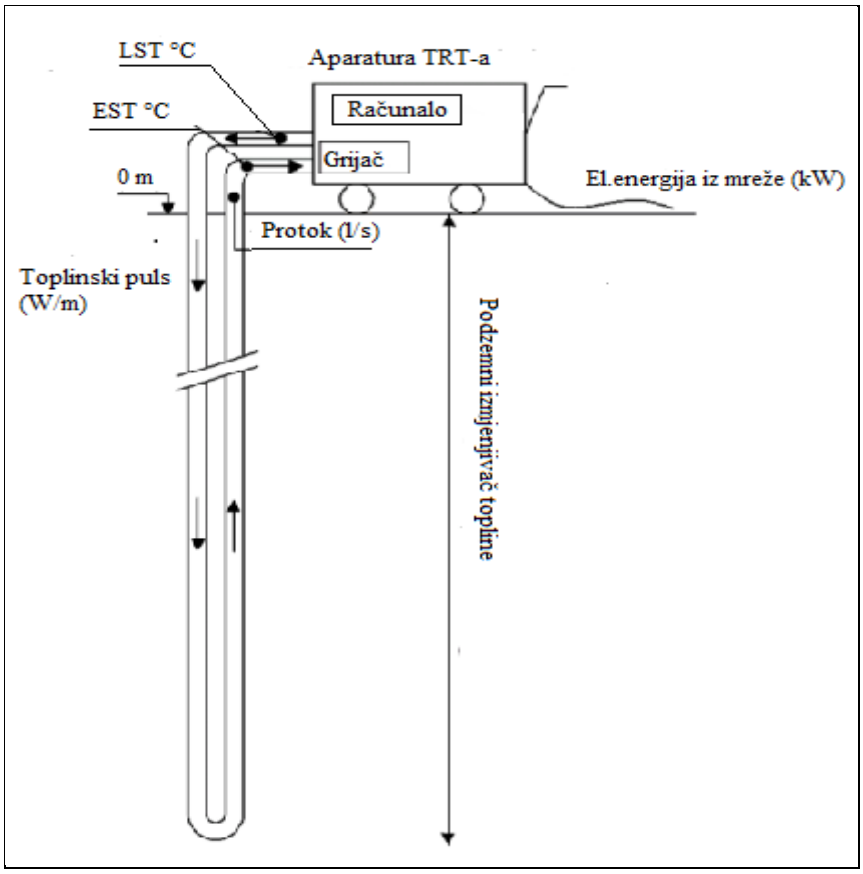
Za određivanje temperature radnog fluida pri promjenjivom toplinskom opterećenju potrebno je odrediti razliku temperatura uzrokovanih skinom za svaki period zasebno.

Uz dva analitička rješenja linijskog modela prijelaza topline, Eskilson (1987) je predstavio i numeričko rješenje ovog modela. Za razliku od linijskog modela, iz jednadžbe

difuziviteta izveden je još i cilindrični model prijelaza toplinske energije, u kojemu je bušotinski izmjenjivač predstavljen kao cilindar beskonačne duljine, a dati model, kao i linijski, opisuje prijelaz toplinske energije kroz konduktivnu sredinu uz konstantan toplinski tok.

3.4.1.2. *Provedba testa toplinskog odaziva (TRT)*

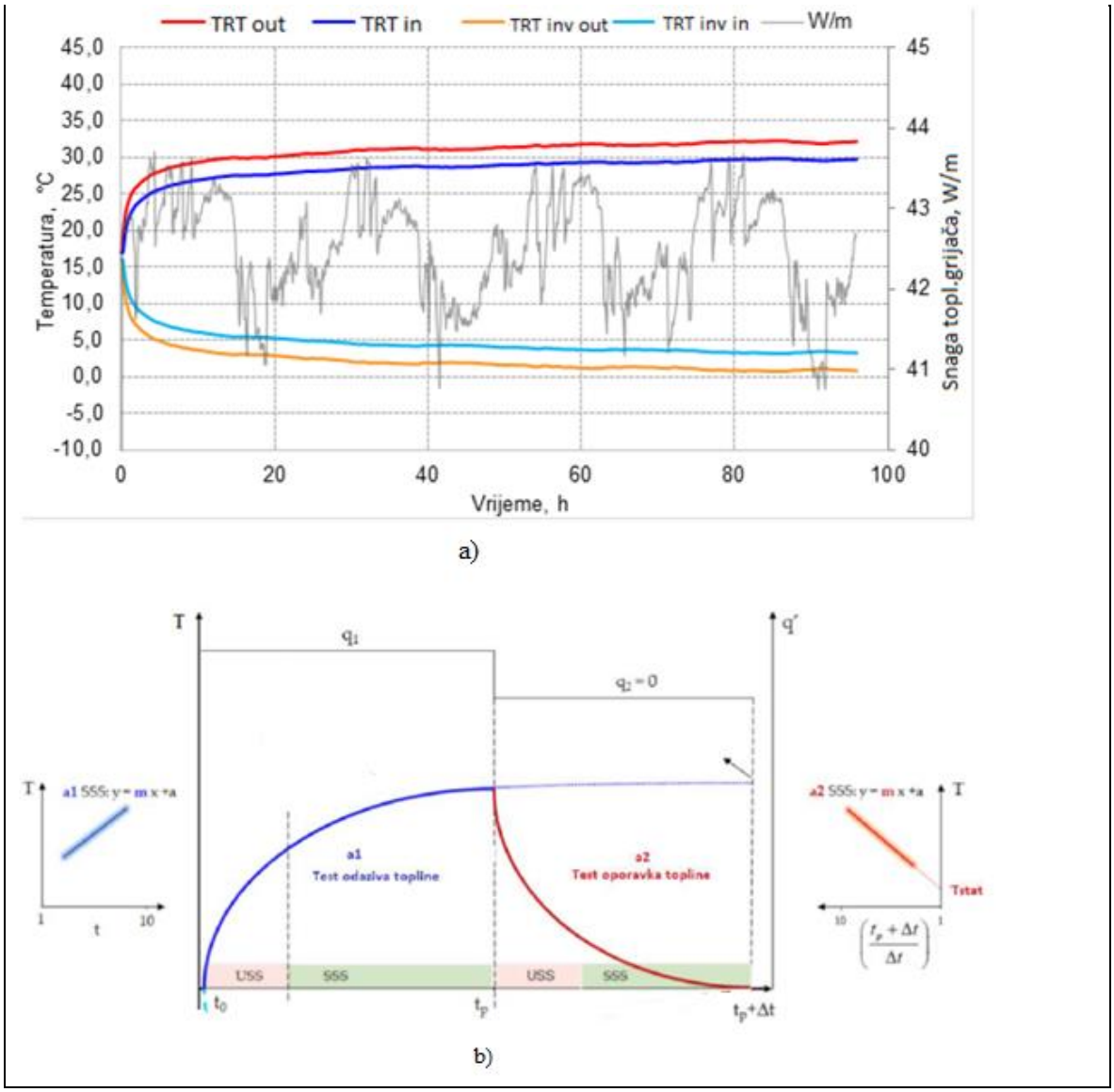
Terenska izvedba testa toplinskog odaziva na bušotinskim izmjenjivačima topline pojednostavljeno je prikazana na slici 3.7. zajedno s komponentama sadržanim u kućištu TRT-a. Površinske cijevi TRT aparature povezuju se čvrstom i plinotjesnom vezom s ugrađenim bušotinskim izmjenjivačem, pri čemu bi površinske cijevi trebale biti što kraće i toplinski izolirane kako bi se umanjio utjecaj atmosferskih prilika (Strpić, 2018), te kako bi se dobili pouzdaniji podaci. Električni grijači služe za održavanje konstantno narinutog toplinskog pulsa koji bi se trebao održavati na barem 95% konstantnosti, a da bi se dobiveni podaci smatrali vjerodostojnima za daljnji proračun (ASHRAE, 2011). Pored navedenog i prikazanog na slici 3.7, aparatura sadrži još i cirkulacijsku pumpu i mjerač protoka, temperaturni senzor i računalo za snimanje podataka. Vrijeme trajanja TRT mjerenja nije striktno određeno i ono ovisi isključivo o izvođaču, dok bi prema ASHRAE priručniku trebao trajati barem 36 ili 48 sati. Duže trajanje testa uzrokuje veće financijske troškove u preliminarnoj fazi projektiranja, međutim, veća količina podataka omogućuje preciznije projektiranje sustava, pogotovo na lokacijama s geološkim profilom tla velike heterogenosti, a također je moguće uočiti nepravilnosti koje se pojavljuju prilikom samog mjerenja. Naime, aparatura TRT-a u većini se slučajeva priključuje na lokalnu električnu mrežu, a neravnomjerno opterećenje mreže od strane drugih korisnika uzrokuje fluktuacije u napajanju električnih grijača, što posljedično dovodi do varijacija toplinskog pulsa. Ovakve fluktuacije direktno utječu na ulaznu temperaturu na strani primarnog kruga (eng. *Entering Source Remperature,* EST), raspored rezultata mjerenja, te promjenu temperature naspram vremena, što je nužno za izračunavanje toplinske vodljivosti i bušotinskog toplinskog otpora. Zbog toga bi se TRT trebao izvoditi koristeći cikluse u trajanju 24 sata, kako bi se nedosljednosti u mjerenju mogle povezati s uobičajenim dnevnim oscilacijama u električnoj mreži (Kurevija el at, 2018).



Slika 3.7 Aparatura i shema provedbe testa toplinskog odaziva tla

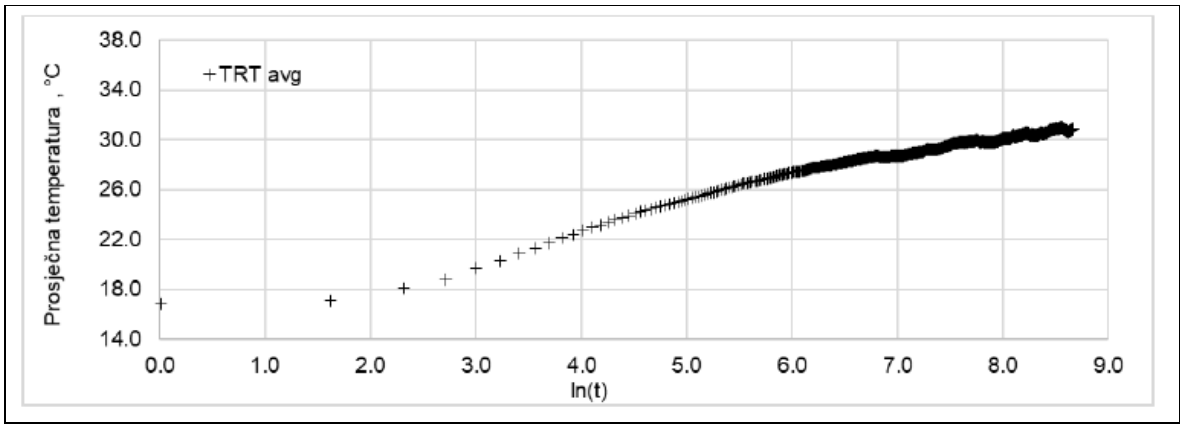
3.4.1.3. *Interpretacija podataka*

Prvi termogeološki parametar koji se bilježi u TRT mjerenju jest statička temperatura tla na dubini do koje je postavljen bušotinski izmjenjivač. U prvoj su fazi električni grijači ugašeni, a radni fluid cirkulira kroz izmjenjivač sve dok mu se temperatura ne izjednači sa temperaturom stijenske formacije, minimalno 15 minuta. Električni grijači su zatim upaljeni te poznatom toplinskom snagom griju radni fluid koji nastavlja cirkulirati kroz izmjenjivač. Bilježi se EST i izlazna temperatura (eng. *leaving source temperature*, LST) u petominutnim intervalima. Ovakav pristup omogućuje praćenje ponašanja i promjene temperature tla u funkciji vremena uz konstantnu narinutu toplinsku snagu grijača (Strpić, 2018). Mjereni podaci prikazani su grafički na slici 3.8a, na kojoj su sivom linijom prikazane oscilacije napona u lokalnoj električnoj mreži. Crvena i plava krivulja predstavljaju temperature zabilježene TRT mjerenjem, dok inverzne krivulje, dobivene metodom zrcaljenja, daju uvid u ponašanje temperature tla prilikom crpljenja toplinske energije iz tla, odnosno kada je sustav u funkciji.



Slika 3.8 Tipski prikaz a) podataka dobivenih TRT mjerenjem, b) testa odaziva i oporavka temperature (Kurevija et al, 2018c)

Srednja vrijednost temperature radnog fluida se zatim stavlja u odnos s funkcijom prirodnog logaritma vremena (slika 3.9). Iz ukupnog vremena trajanja TRT-a potrebno je odrediti početni period neustaljenog stanja širenja toplinskog toka (eng.*Unsteady State heat flow*, USS) i početak poluustaljenog stanja (eng.*Semi-steady state heat flow*, SSS), odnosno period u kojem je toplinski tok svladao bušotinski toplinski otpor, pa je razvoj temperature isključio u funkciji toplinske vodljivosti tla.

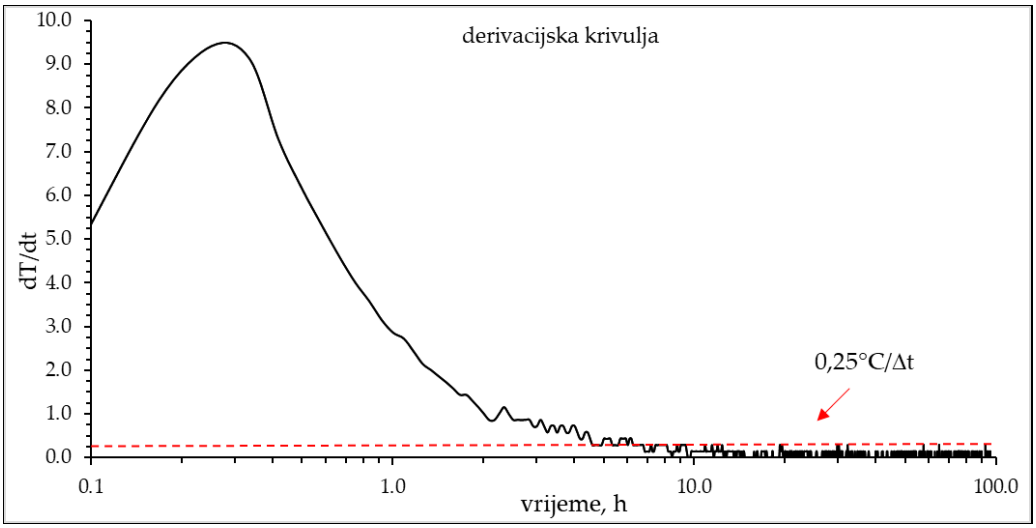


Slika 3.9 Odnos logaritamske funkcije vremena provođenja TRT-a i razvoja prosječne temperature radnog fluida u bušotinskom izmjenjivaču (Strpić, 2018)

Analitičkim se putem trajanje neustaljenog stanja širenja toplinskog toka određuje iz izraza (3-29), u kojem se vrijednost toplinskog difuziviteta pretpostavlja i uzima iz priručnika i kataloga.

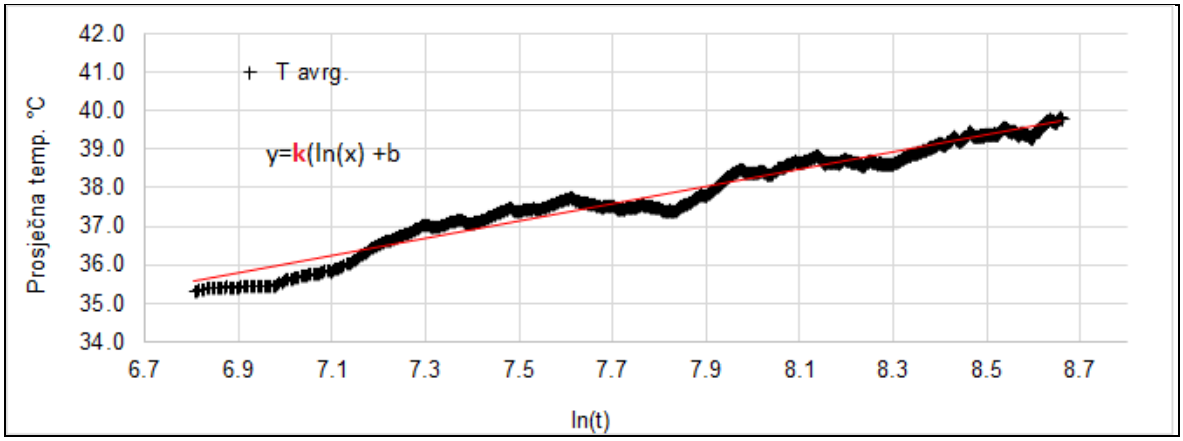
$$\frac{\alpha t}{r^2} > 5 \qquad (3\text{-}29)$$

Pretpostavka o vrijednosti toplinskog difuziviteta tla ovisno o njegovom sastavu može dovesti do greške od 10 %, što posljedično dovodi do veće sumirane greške prilikom proračuna toplinske vodljivosti. Precizniji način određivanja početka SSS perioda jest primjenom metode derivacijske krivulje (Kurevija et al., 2018a) (slika 3.10). Promatra se promjena temperature u kratkom vremenskom intervalu u odnosu na ukupno vrijeme trajanja TRT-a. U trenutku kada promjena temperature u vremenu postane toliko mala, proizvoljno odabrano 0,25°C u periodu od 10 min, što odgovara vremenu u kojem radni fluid procirkulira kroz izmjenjivač, promjena se može zanemariti i zaključiti da je započeo SSS period.



Slika 3.10 Tipski model derivacijske krivulje (Kurevija, 2018a)

Vrijeme prije početka SSS perioda zanemaruje se u određivanju toplinske vodljivosti tla. Stavljanjem u odnos srednje temperature radnog fluida s logaritamskom funkcijom vremena za SSS period i aproksimacijom podataka pravcem, uz određeni nagib pravca (Slika 3.11), prema izrazu (3-30) izračunava se toplinska vodljivost tla (Gehlin, 2002).



Slika 3.11 Odnos logaritamske funkcije vremena provođenja TRT-a i razvoja prosječne temperature radnog fluida za vrijeme ustaljenog stanja širenja toplinskog toka (Strpić, 2018)

$$\lambda = \frac{q'}{4\pi k} \tag{3-30}$$

Gdje je: k - nagib pravca

Ovako određen koeficijent toplinske vodljivosti tla može značajnije odstupati od stvarne vrijednosti zbog varijabilnog ponašanja napona u javnoj električnoj mreži, što dovodi do fluktuacija u toplinskoj snazi električnih grijača koji su spojeni na mrežu. Kako bi se

negirao utjecaj napona na pouzdanost mjerenih podataka, razvijena je nova metoda predstavljena u nekoliko znanstvenih radova (Kurevija et al 2018; Strpić, 2017; Strpić 2018). Metoda se bazira na promatranju oporavka temperature prema statičkoj vrijednosti nakon što je proveden TRT, a podaci se interpretiraju primjenom Hornerove metode u kojoj se izmjerena promjena temperature stavlja u odnos s Hornerovim vremenom, $(t_p + \Delta t)/\Delta t$. Varijabla t_p predstavlja vrijeme u kojemu je na bušotinski izmjenjivač bio narinut konstantan toplinski puls, dok Δt predstavlja vrijeme nakon kojeg su isključeni električni grijači. Preporučeno vrijeme trajanja testa oporavka, radi referentne usporedbe dobivenih podataka, jest duljina trajanja provedenog TRT-a. Krivulje odaziva i oporavka temperature prikazane su na slici 3.8b, zajedno s grafovima srednje temperature radnog fluida u logaritamskom vremenu u SSS periodu. U primjeni Hornerove metode, koeficijent nagiba k je negativan zbog pada temperature za vrijeme oporavka. Odabire se onaj dio podataka u kojem prevladava ustaljeno stanje širenja toplinskog toka, dok je početno, neustaljeno stanje nešto kraće nego u slučaju klasičnog TRT-a, jer su grijači ugašeni pa izostaje utjecaj fluktuacija napona na mjerene podatke (Kurevija, 2017).

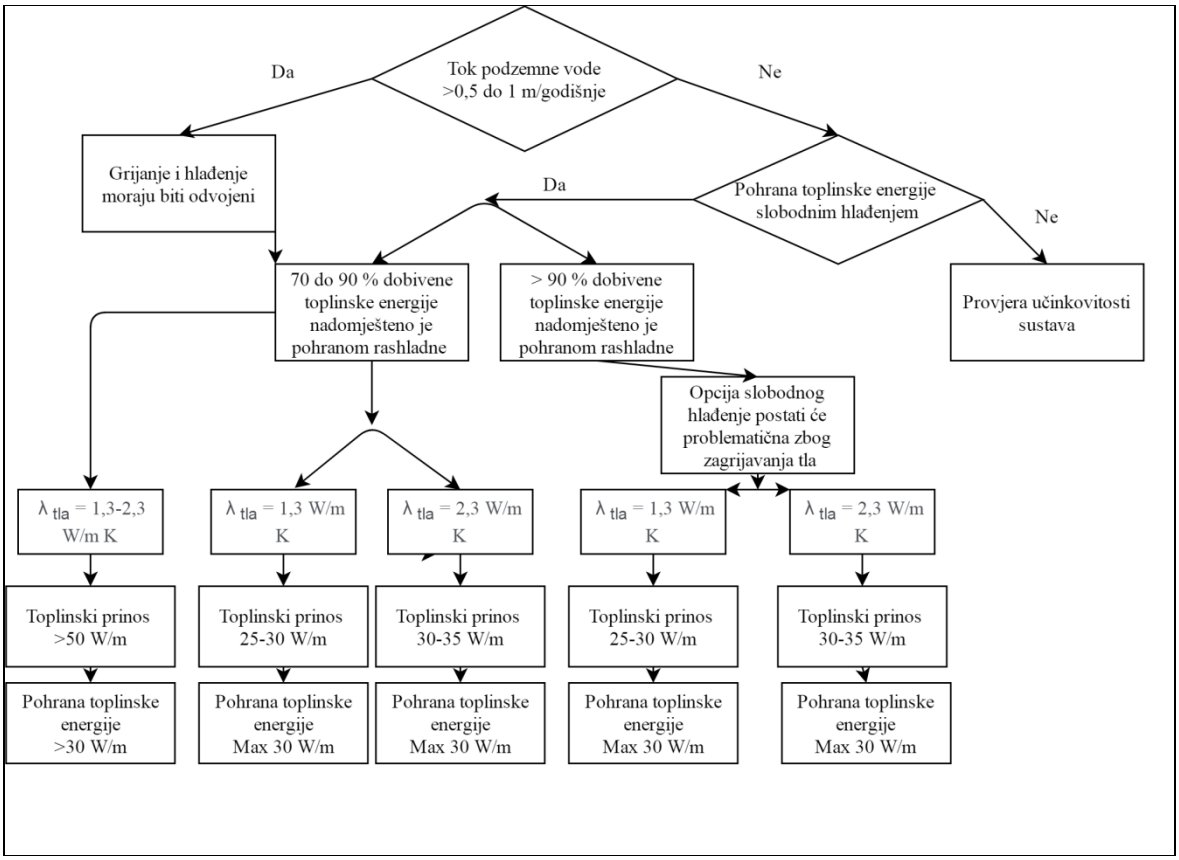
3.4.1.4. *Primjenjivost TRT-a na energetske pilote*

Mehanizam rada energetskih pilota utemeljen je na principu rada bušotinskih izmjenjivača topline, u kojem kroz podzemnu konstrukciju radni fluid preko izmjenjivača topline uzima ili pohranjuje toplinsku energiju u tlo ovisno o režimu rada. Termogeološki parametri nužni za projektiranje bušotinskih izmjenjivača potrebni su i za projektiranje energetskog dijela energetskih pilota, zbog čega se TRT metoda koristi i na energetskim pilotima. Bušotinski izmjenjivači imaju zanemariv radijus u odnosu na duljinu, pa se mogu promatrati kao linijski izvori te je primjena TRT-a efikasna. U slučaju pilota, omjer duljine i promjera je puno manji, zbog čega praktična primjena TRT-a ne mora nužno biti prikladna za pilote kao za bušotinske izmjenjivače (Badenes et al, 2015). Dosadašnja terenska istraživanja (Jensen-Page et al, 2019; Loveridge, 2014; Badenes et al, 2015) potvrdila su mogućnost primjene TRT mjerenja na energetske pilote do 450 mm promjera, dok bi za pilote s većim promjerima trebalo provoditi TRT mjerenja u značajno duljem vremenu. Isti autori navode nepovoljan utjecaj toplinskih otpora pilota na postizanje SSS stanja širenja toplinskog toka, zbog čega bi se faktor pet u izrazu (3-27) trebao zamijeniti sa deset, kako bi se odredilo trajanje USS perioda za energetske pilote. Primjenom metode

derivacijske krivulje, moguće je preciznije odrediti kraj USS perioda s obzirom da ista ne uzima u obzir radijus pilota, već promjenu temperature u intervalu vremena. Smjernice GSHPA (2012) također predlažu duže vrijeme izvođenja TRT-a na energetskim pilotima s promjerima iznad 30 cm ili ako je moguće, izradu bušotine opremljene s 1U cijevi za određivanje lokalnih termogeoloških parametara. Interpretacija podataka temelji se na metodi linijskog prijelaza toplinske energije, s mogućnošću primjene testa oporavka topline. Istraživanja na ovu temu razmatraju primjenu različitih analitičkih i numeričkih modela za interpretaciju podataka i određivanje toplinskih parametara tla i pilota (Jensen-Page et al., 2019, et al.,).

3.4.2. Toplinski potencijal energetskih pilota

Uz analitičko i numeričko modeliranje koje koriste danas dostupni programski paketi za dizajniranje energetskih pilota (COSMOL, ABAQUS, GHX Toolbox software), vrijednosti ostvarive energije iz pilota sadržane su u tablicama i grafovima stručnih literatura i kataloga, a koje su određene na temelju primjera iz prakse. Toplinski prinos izražava se kao jedinica toplinske snage dobivena po metru ugrađenog pilota (W/m). Jedan takav graf prikazan je na slici 3.12, (Loveridge, 2012) na kojem su prikazane vrijednosti toplinske energije koje je moguće pridobiti i pohraniti po metru dubine pilota ovisno o hidrogeološkim i toplinskim svojstvima tla. Također, isti graf daje vrijednosti ostvarive energije za pilote s promjerom do 0,4 m, dok bi za one većeg promjera, preko 1 m, date vrijednosti mogle biti i do 50 % veće. Pristup određivanja i vrijednosti sa slike 3.7 služe samo kao smjernice u svrhu okvirnog određivanja toplinskih prinosa energetskih pilota.

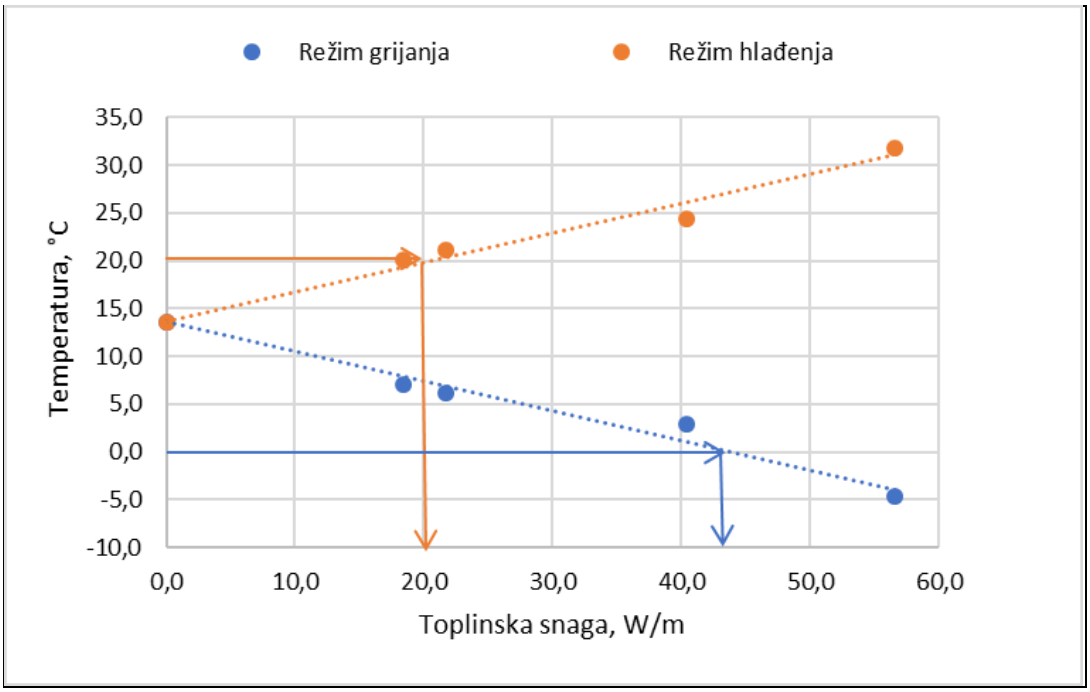


Slika 3.12 Dijagram proizvedene toplinske energije za energetske pilote (Loveridge, 2012)

Kurevija i Strpić (2018) predstavljaju novu in-situ metodu za određivanje prinosa toplinske snage bušotinskih izmjenjivača topline, a koja se može koristiti i na energetskim pilotima. Steady State Thermal Response Test (SSTRT), ili test višestrukih toplinskih uvjeta, metoda je u kojoj se nakon što je postignuto SSS stanje za prvi toplinski uvjet smanjuje vrijednost narinutog toplinskog pulsa preko električnih grijača za koju se ponovno postiže SSS stanje. Ovakvim je pristupom moguće pratiti ponašanje temperature prilikom promjenjivih uvjeta prinosa topline. Potrebna su minimalno tri toplinska uvjeta, pri čemu je toplinska snaga grijača najveća u prvom toplinskom uvjetu.

U prvom toplinskom uvjetu, primjenom derivacijske krivulje za određivanje početka SSS stanja, moguće je odrediti vrijednost toplinske vodljivosti i toplinskog otpora, nakon čega se prvi toplinski uvjet ekstrapolira na 96 sati primjenom rješenja jednadžbe za linijski prijelaz. Daljnjom promjenom toplinskih uvjeta i primjenom načela superpozicije (3-27, 3-28) moguće je odrediti ponašanje temperature za određeni toplinski prinos. Obrađeni podaci prikazuju se grafički (slika 3.13), gdje se u odnos stavlja temperatura bušotinskog fluida za svaki period toplinskog uvjeta, a interpolacijom se dobiva krivulja preko koje se može odrediti toplinski prinos bušotinskog izmjenjivača ili pilota za danu temperaturu

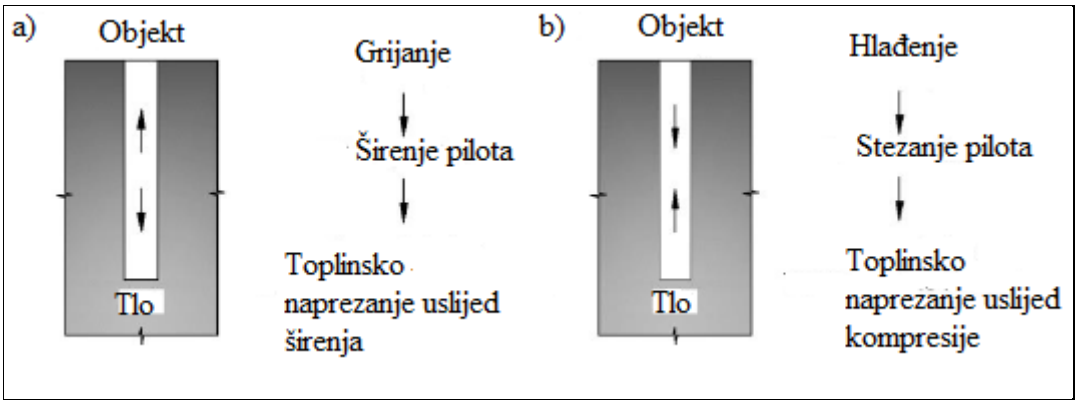
radnog fluida. Metodom zrcaljenja dobivena je krivulja za rad sustava u režimu grijanja u svrhu određivanja toplinskih prinosa. Tako za primjer sa slike 3.13, za temperaturu radnog fluida od 0 °C, prinos toplinske snage po metru bušotine iznosi 43 W/m u režimu grijanja, dok prilikom hlađenja, za temperaturu radnog fluida od 20 °C, sustav pohranjuje 20 W toplinske snage po metru bušotinskog izmjenjivača u tlo.



Slika 3.13 Određivanje potencijala pridobivanja i pohrane toplinske snage u tlo u funkciji EST (Strpić, 2018)

3.5. **Utjecaj izmjene toplinske energije na mehanička svojstva pilota**

U završnoj fazi projektiranja plitkog geotermalnog sustava, potrebno je razmotriti utjecaj temperature na mehanička svojstva pilota. Građevinski piloti prvenstveno se izvode u cilju preuzimanja mehaničkog opterećenja objekta, zbog čega je potrebno razmotriti toplinska opterećenja na geomehanička svojstva pilota. Kako je prikazano na slici 3.14, promjena temperature može dovesti do dodatnih toplinskih naprezanja unutar pilota odnosno do širenja pilota u režimu grijanja ili kontrakcije u režimu hlađenja. Posljedično, pomaci uslijed toplinskih naprezanja odražavaju se na mobilizaciju nosivosti plašta i baze, koje tad postaju i temperaturno ovisne.



Slika 3.14 Utjecaj toplinskog opterećenja na geotehnički pilot u slučaju a) grijanja i b) hlađenja (Alderdi-Pagola, 2018)

Alberdi-Pagola (2018) navodi još kako toplinski procesi mogu izazvati očvršćivanje tla u okolini pilota, inicirati protok podzemne vode i razviti veće porne pritiske i volumne promjene uslijed toplinske konsolidacije. Za navedene efekte najveću pozornost treba obratiti kod srednje konsolidiranih glina, zbog velike promjene volumena uslijed zagrijavanja. Dosadašnja terenska i laboratorijska ispitivanja zaključno su pokazala da toplinska opterećenja i pomaci nastali uslijed istih neće dovesti do geotehničkog sloma pilota (Sani et al., 2019). Ispitivanja su također pokazala da se povećana slijeganja, trenje i pomaci u jednom režimu, vraćaju na prvotnu vrijednost u drugom režimu. Kako bi se izbjeglo smrzavanje porne vode u betonu, smrzavanje površine plašta i baze pilota, temperatura radnog fluida ne smije pasti ispod 0 °C. Ovako postavljeni temperaturno-mehanički uvjet negativno se odražava na ukupnu energetsku učinkovitost energetskih pilota, s obzirom da su toplinski prinosi funkcionalno ovisni o temperaturi radnog fluida.

4. MODELIRANJE ENERGETSKOG PILOTA

Modeliranje energetskog pilota izvedeno je u programu *"GHX Designer Toolbox"* koji koristi *FLS* metodu za određivanje temperature radnog fluida, a zatim je primijenjen sintetički "*Step Test"* za određivanje toplinskog kapaciteta energetskog pilota. Hidrauličkom analizom određuje se vrsta strujanja za pojedine protoke te padovi tlaka u cijevima za iste, a proračun je izveden u online kalkulatoru *"Pressure Drop Calculator"*. U postupku modeliranja, razmatra se jedan pilot, konstantnog promjera 0,60 m s različitim dubinama od 10, 15, 20, 25 i 30 m. Pilot je izgrađen od betona s armaturnim košem na koji je postavljena 2U cijev. Razmatrana su dva tipična unutarnja promjera 2U cijevi: 25 i 32 mm, pri čemu je unutarnja površina cijevi glatka. Kao radni fluid koji cirkulira kroz pilot, odabrana je voda s dodatkom antifriza, a razmatrana su dva protoka koja za danu smjesu postižu turbulentno strujanje. Za pilot se pretpostavlja da je postavljen u prekonsolidiranoj glini, pri čemu su razmatrane vrijednosti toplinske vodljivosti od 1,4 W/m °C do 2,0 W/m °C, s inkrementalnim povećanjem od 0,2 W/m °C, tipične za vrste tla u kojima je potrebno temeljenje objekta na pilotima. Dizalica topline na koju se povezuje geotermalni sustav radi pri konstantnom opterećenju s COP-om 4 u režimu grijanja i EER od 5,5 u režimu hlađenja.

4.1. Hidraulička analiza

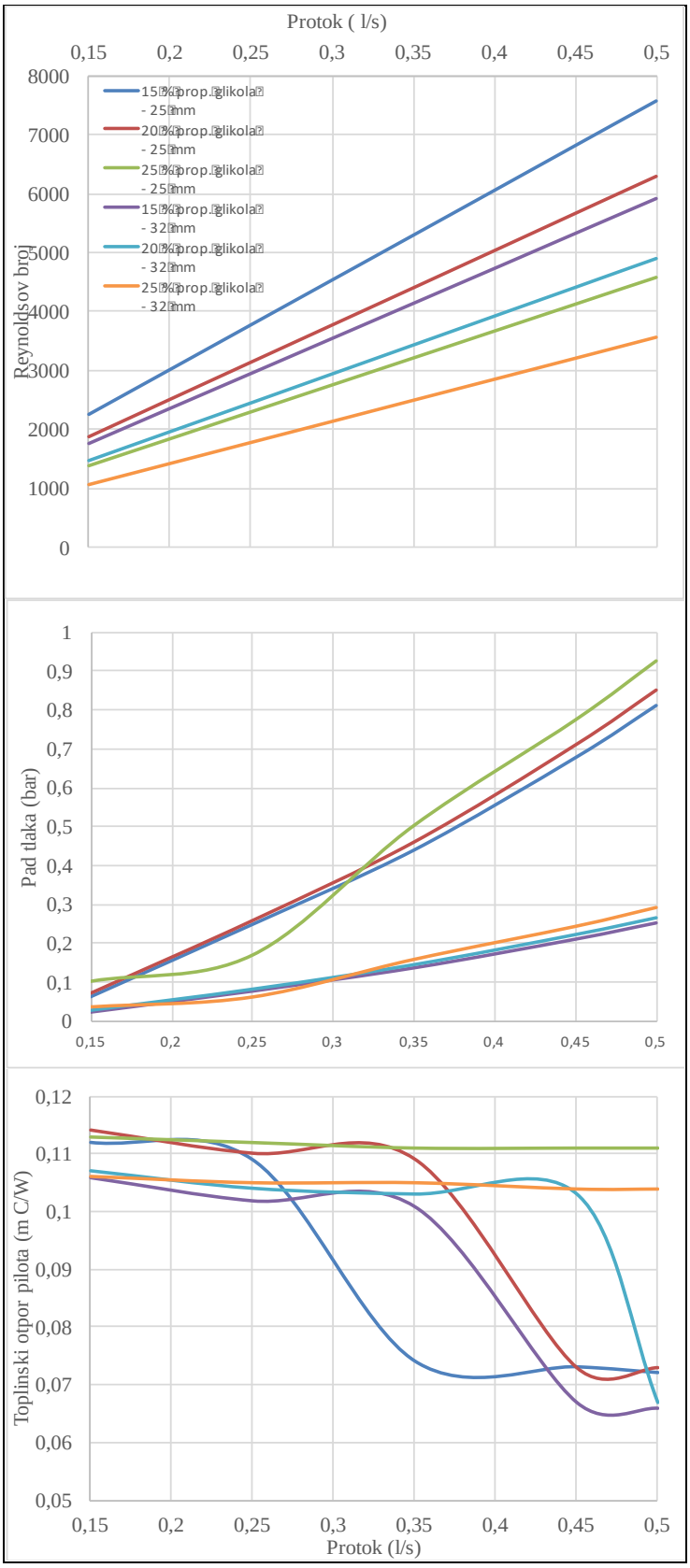
Pri projektiranju energetskog pilota, za postavljene geometrijske karakteristike pilota i izmjenjivač topline, potrebno je odrediti vrstu i količinu protoka radnog fluida koji cirkulira kroz izmjenjivač. Kriterij koji odabrani protok mora zadovoljiti jest postignuto turbulentno strujanje u cijevima. Kako bi se izbjeglo smrzavanje radnog fluida pri niskim temperatura, vodi se dodaje propilen glikol u određenom postotku.

U hidrauličkoj analizi razmotreno je pet protoka za pilot dubine 30 metara. Ukupna duljina postavljenog izmjenjivača u takvom pilotu iznosi 120 metara, a količina protoka s kojom je postignuto turbulentno strujanje u tom pilotu postiže turbulentno strujanje u ostalim pilotima manje dubine, s obzirom na veću duljinu 2U izmjenjivača. Na slici 4.1 grafički su prikazani rezultati proračuna provedeni u *"Pressure Drop Calculatoru"*, a preko prvog se dijagrama može odrediti za koju je količinu protoka radnog fluida s određenim postotnim udjelom propilen glikola postignuto turbulentno strujanje. odnosno dostignuta

vrijednost Reynoldsovog broja preko 4000. Etilen glikol nije razmatran zbog mogućeg štetnog utjecaja na okoliš u slučaju curenja fluida. Uspoređujući dva promjera, za isti udio antifriza u radnom fluidu, kod 2U izmjenjivača s unutarnjim promjerom od 25 mm, turbulentno se strujanje može postići za manje količine protoka nego kod promjera od 32mm. Za protok do 0,25 l/s, ni u jednom 2U izmjenjivaču topline nije postignuto turbulentno strujanje, kao ni za protok od 0,5 l/s s dodanih 25 % propilen glikola u izmjenjivaču unutarnjeg promjera 32 mm. Promatrajući utjecaj antifriza na vrstu strujanja, isti protok s povećanjem udjela propilen glikola teže postiže turbulentno strujanje.

Na drugom dijagramu slike 4.1 prikazane su proračunate vrijednosti pada tlaka u pilotu za dva izmjenjivača topline različitog promjera. U 2U izmjenjivaču s unutarnjim promjerom od 32 mm zabilježeni su manji padovi tlaka nego u izmjenjivaču s promjerom od 25 mm. Veće vrijednosti pada tlaka u instaliranom geotermalnom sustavu zahtijevaju veću snagu cirkulacijske pumpe i veću potrošnju električne energije, što se negativno odražava na ukupni *SPF*. Također, veći udjeli antifriza povećavaju gustoću radnom fluidu, što nepovoljno utječe na padove tlaka u energetskom pilotu.

Vrijednosti toplinskih otpora energetskog pilota pri pojedinom protoku određene su u *"GHX Software Toolbox-u"*. Za 2U izmjenjivač s unutarnjim promjerom cijevi od 25 mm, smanjenje toplinskih otpora postiže se za protok od 0,25 l/s pri dodanih 15 % propilen glikola, dok za izmjenjivač s promjerom od 32 mm, za istu količinu antifriza, protok radnog fluida na smanjenje toplinskih otpora počinje imati utjecaj tek za 0,45 l/s. Za udio antifriza od 25 %, količina protoka ima zanemariv utjecaj na toplinski otpor energetskog pilota.



Slika 4.1 Grafički prikaz rezultata hidrauličke analize za 120 m duljine izmjenjivača topline

4.2. Određivanje dostupnog toplinskog opterećenja pri promjeni različitih termogeoloških, strukturnih i protočnih uvjeta

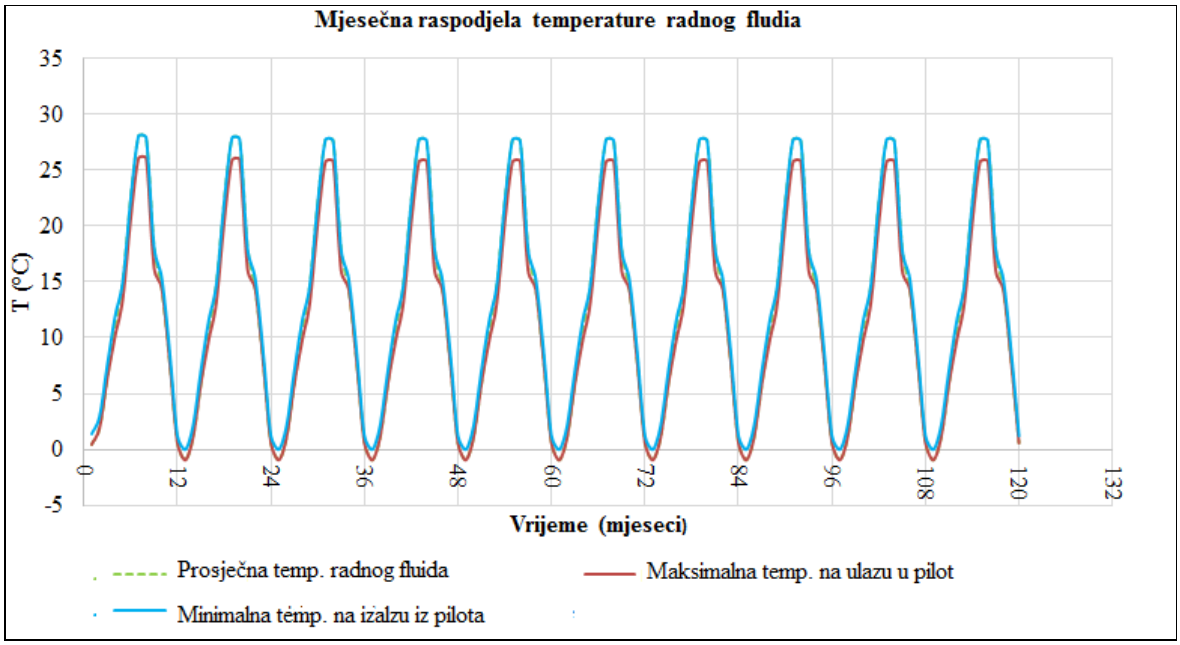
Određivanje dostupnog toplinskog opterećenja za pilot opremljen s 2U izmjenjivačem provedeno je modeliranjem energetskog pilota u programu *"GHX Designer Toolbox"*. Razmatrano je 5 pilota različitih dubina pojedinačno postavljenih u tlu s različitim vrijednostima toplinske vodljivosti. U svaki pilot prvo je postavljen 2U izmjenjivač topline s unutarnjim promjerom od 25 mm, a zatim 2U izmjenjivač s unutarnjim promjerom od 32 mm. Korištenjem *FLS* metode određuje se temperatura radnog fluida koja za nametnuto toplinsko opterećenje ne smije pasti ispod 0 °C, kako bi se izbjeglo daljnje pothlađivanje tla pri dugotrajnom radu energetskog pilota u režimu grijana, te kako ne bi došlo do smrzavanja pilota. U_režimu hlađenja, temperatura radnog fluida ne smije prijeći 30 °C zbog mogućeg prekomjernog zagrijavanja tla. Kao radni fluid koristi se voda s dodanih 15 % propilen glikola, s obzirom da je s tim udjelom antifriza postignuto dovoljno sniženje točke ledišta radnog fluida, a isti ima najmanji utjecaj na hidrauličke karakteristike protoka od ostalih (slika 4.1). Za ukupan protok radnog fluida u izmjenjivaču odabran je protok od 0,35 l/s, jer je danim protokom postignuto turbulentno strujanje kod izmjenjivača s unutarnjim promjerom od 25 mm i 32 mm. Modeliranje je također izvedeno za protok od 0,5 l/s u svrhu određivanja utjecaja protoka na dostupno toplinsko opterećenje. Za geotermalni sustav se pretpostavlja da radi 1500 h u ciklusu grijanja i 750 h u ciklusu hlađenja, točnije količinom radnih sati kojom se većinom projektiraju ogrjevni i rashladni sustavi za kontinentalnu RH.

Prije pokretanja simulacija, prvo se odabire vrijednost toplinskog opterećenja za koje se smatra da dani energetski pilot može podnijeti. Za postavljeno toplinsko opterećenje, prema broju radnih sati u režimu grijanja i hlađenja, određuje se potrebna toplinska i rashladna energija. Ukupan iznos potrebne toplinske i rashladne energije nadalje se raspoređuje prema mjesecima u godini ovisno o srednjoj vanjskoj temperaturi zraka za pojedini mjesec (tablica 4.1). U program se unose vrijednosti geometrijskih parametara pilota, radijus i duljina, termogeološki parametri tla, toplinska vodljivost i ustaljena statička temperatura tla te odabrani protok. 2U izmjenjivač topline ugrađen je po obodu pilota. Energetski pilot spojen je s dizalicom topline, a na ovako postavljeni geotermalni sustav nameće se odabrano toplinsko opterećenje i mjesečna raspodjela potrebne toplinske i rashladne energije.

Tablica 4.1 Raspodjela potrebne energije za grijanje i hlađenje objekta pri toplinskom opterećenju od 2,4 kW na pilot dubine 20 m i toplinsku vodljivost od 1,6 W/m°C (srednje vanjske temperature zraka za grad Zagreb (*izvor:* DHMZ))

Mjesec	Srednja temp. zraka °C	Temp. percentil Φ_1	Temp. percentil Φ_{99}	Energiija grijanja (kWh_t)	Snaga grijanja (kW)	Energija hlađenja (kWh_f)	Snaga hlađenja (kW)
Siječan	-0,8	-13,7	9,9	986,4	2,4	0,0	0,0
Veljača	1,9	-10,8	11,6	678,6	2,16	0,0	0,0
Ožujak	5,9	-6,1	14,5	360	1,76	0,0	0,0
Travanj	10,6	3	18,6	43,2	1,00	1,8	0,74
Svibanj	15,3	6,9	22,2	0,0	0,0	136,8	1,48
Lipanj	18,5	10,6	25	0,0	0,0	419,4	2,05
Srpanj	20,1	13	26,7	0,0	0,0	617,4	2,4
Kolovoz	19,3	12,6	25,7	0,0	0,0	547,2	2,19
Rujan	15,8	8,8	23	0,0	0,0	77,4	1,64
Listopad	10,5	2,2	18	86,4	1,07	0,0	0,0
Studeni	5,3	-4,6	15,9	475,2	1,64	0,0	0,0
Prosinac	0,9	-9,2	12,5	972	2,02	0,0	0,0

Simulacijom u programu prati se temperatura radnog fluida na izlazu iz pilota pri radu sustava od 10 godina za odabrano toplinsko opterećenje, a isto se smanjuje ili povećava u slučaju da je izlazna temperatura iznad ili ispod 0 °C. Rezultati takve simulacije za jedan od razmatranih energetskih pilota prikazani su na slici 4.2, u kojoj je toplinsko opterećenje povećano s odabranih 2,7 kW na 2,85 kW, za koje je postignuta minimalna temperatura od 0 °C na izlazu iz pilota, a maksimalna nije prešla 30 °C.



Slika 4.2 Temperatura radnog fluida pri protoku od 0,5 l/s za pilot dubine 20 m, toplinsku vodljivost 1,8 W/m °C i promjer cijevi od 32 mm

Isti postupak u modeliranju energetskog pilota proveden je za pilote duljine 10, 15, 20, 25 i 30 m, opremljenih s dva 2U izmjenjivača topline unutarnjeg promjera od 25 i 32 mm. Koeficijent toplinske vodljivosti iznosio je 1,4, 1,6, 1,8 i 2,0 W/m °C, a statička temperatura tla na dubini od 10 m iznosila je 13,4 °C za kontinentalni dio RH. Ista se dalje prema dubini mijenjala u funkciji geotermalnog gradijenta za to područje u iznosu od 0,049 °C/m. Vrijednosti dostupnog toplinskog opterećenje za pojedini energetski pilot i koeficijent toplinske vodljivosti pri protoku radnog fluida od 0,35 l/s prikazane su u tablicama 4.2 i 4.3, dok su za protok od 0,5 l/s prikazane u tablicama 4.4 i 4.5.

Tablica 4.2 Dostupno toplinsko opterećenje (u kW) u ovisnosti o duljini pilota i toplinskoj vodljivosti za unutarnji promjer 2U izmjenjivača topline od 25 mm pri protoku fluida od 0,35 l/s

λ (W/m°C) / Dubina, (m)	1,4	1,6	1,8	2,0
10	1,20	1,30	1,30	1,40
15	1,80	2,00	2,10	2,20
20	2,50	2,65	2,70	2,90
25	3,20	3,35	3,50	3,70
30	3,90	4,05	4,20	4,30

Tablica 4.3 Dostupno toplinsko opterećenje (u kW) u ovisnosti o dubini pilota i toplinskoj vodljivosti za unutarnji promjer 2U izmjenjivača topline od 32 mm pri protoku fluida od 0,35 l/s

λ (W/m°C) / Duljina, (m)	1,4	1,6	1,8	2,0
10	1,15	1,15	1,20	1,25
15	1,70	1,80	1,90	2,20
20	2,30	2,45	2,60	2,70
25	2,90	3,00	3,15	3,30
30	3,50	3,65	3,80	3,95

Tablica 4.4 Dostupno toplinsko opterećenje (u kW) u ovisnosti o dubini pilota i toplinskoj vodljivosti za unutarnji promjer 2U izmjenjivača topline od 25 mm pri protoku fluida od 0,50 l/s

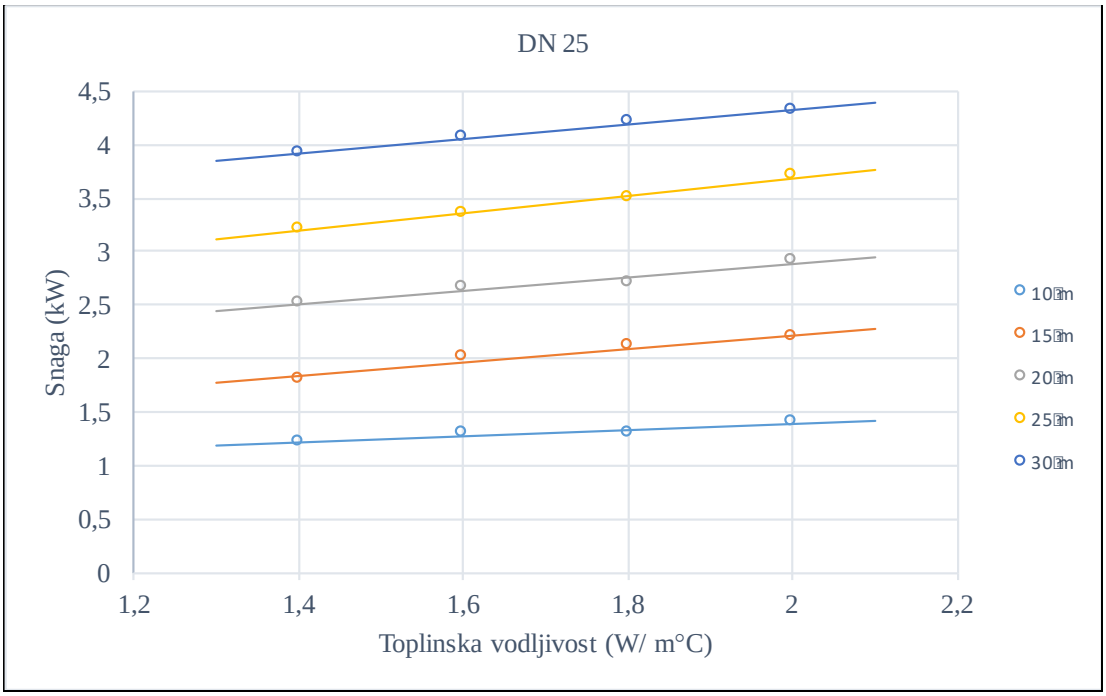
λ (W/m°C) / Dubina, (m)	1,4	1,6	1,8	2,0
10	1,20	1,30	1,35	1,40
15	1,80	2,05	2,10	2,20
20	2,50	2,60	2,70	2,95
25	3,15	3,40	3,55	3,70
30	3,95	4,10	4,25	4,35

Tablica 4.5 Dostupno toplinsko opterećenje (u kW) u ovisnosti o dubini pilota i toplinskoj vodljivosti za unutarnji promjer 2U izmjenjivača topline od 32 mm pri protoku fluida od 0,50 l/s

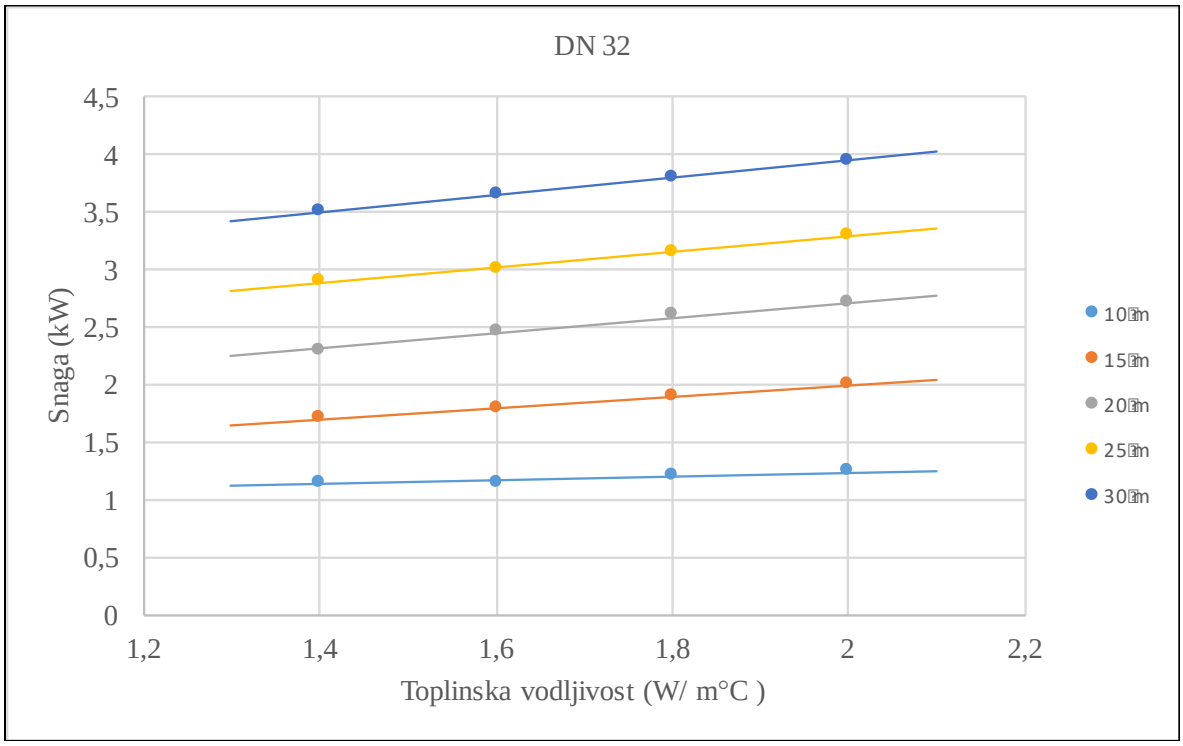
λ (W/m°C) / Dubina, (m)	1,4	1,6	1,8	2,0
10	1,25	1,30	1,35	1,40
15	1,90	2,00	2,10	2,20
20	2,60	2,70	2,85	3,00
25	3,15	3,30	3,40	3,50
30	3,95	4,05	4,20	4,35

Iz priloženih se tablica, kod svih modela pilota, može vidjeti značajniji utjecaj duljine izmjenjivača topline na povećanje toplinske snage pilota u odnosu na toplinsku vodljivost. Za konstantnu toplinsku vodljivost, toplinska snaga pilota raste gotovo proporcionalno s povećanjem duljine pilota, od 0,6 do 0,8 kW između dva pilota s razlikom od 5 m u duljini. Promatrajući toplinsku snagu jednog pilota pri različitim vrijednostima toplinske vodljivosti, primjećuje se manji doprinos iste na pilote manje dubine. Tako za pilot postavljen na dubini od 10 m razlika između toplinskih snaga za različite vrijednosti toplinske vodljivosti iznosi od 0,05 do 0,10 kW, dok kod pilota s većim duljinama izmjenjivača veće vrijednosti toplinske vodljivosti tla doprinose većoj toplinskoj snazi u iznosu od 0,10 do 0,50 kW.

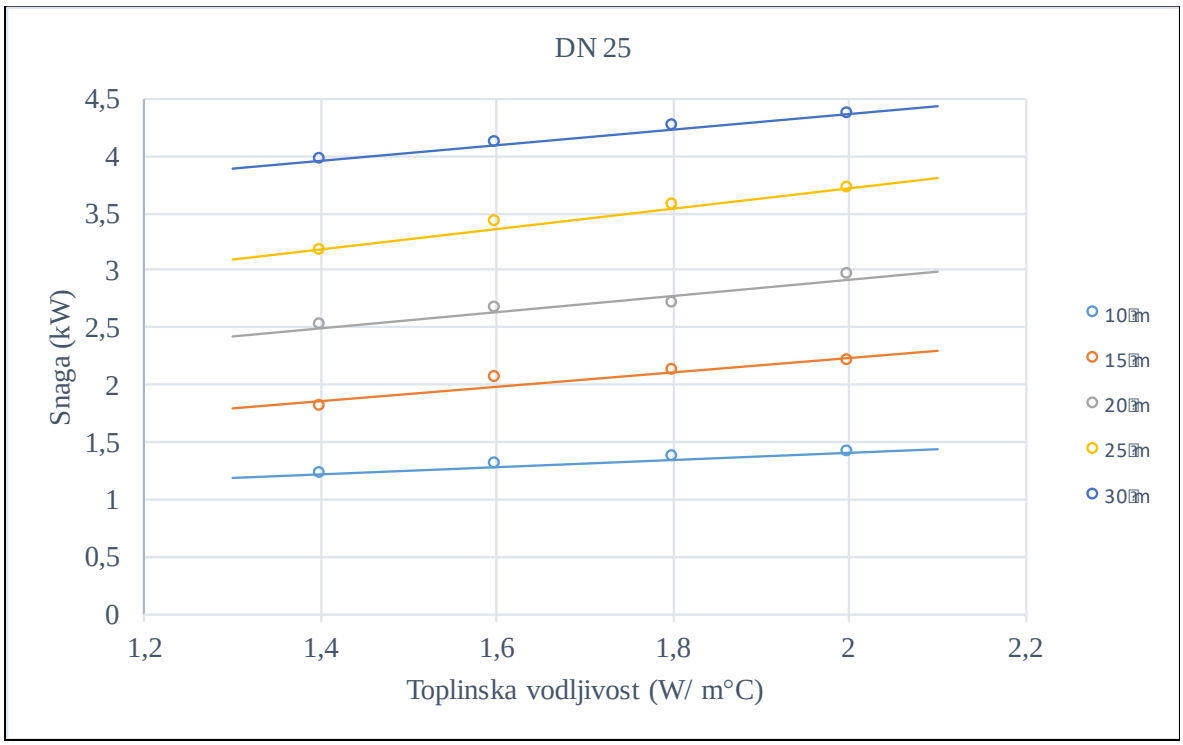
Rezultati simulacija prikazani su i grafički na slikama 4.3, 4.4, 4.5 i 4.6. Toplinska snaga stavljena je u odnos s toplinskom vodljivosti za pojedinu dubinu pilota, a pomoću opcije *Trendline* u *"MS Office Excel"* izvedena je interpolacija među unesenim podacima. S obzirom na dobar koeficijent korelacije, koji iznosi iznad 0,8 za svaku krivulju, može se utvrditi zavisnost toplinske snage geotermalnog pilota o toplinskoj vodljivosti za oba promjera cijevi.



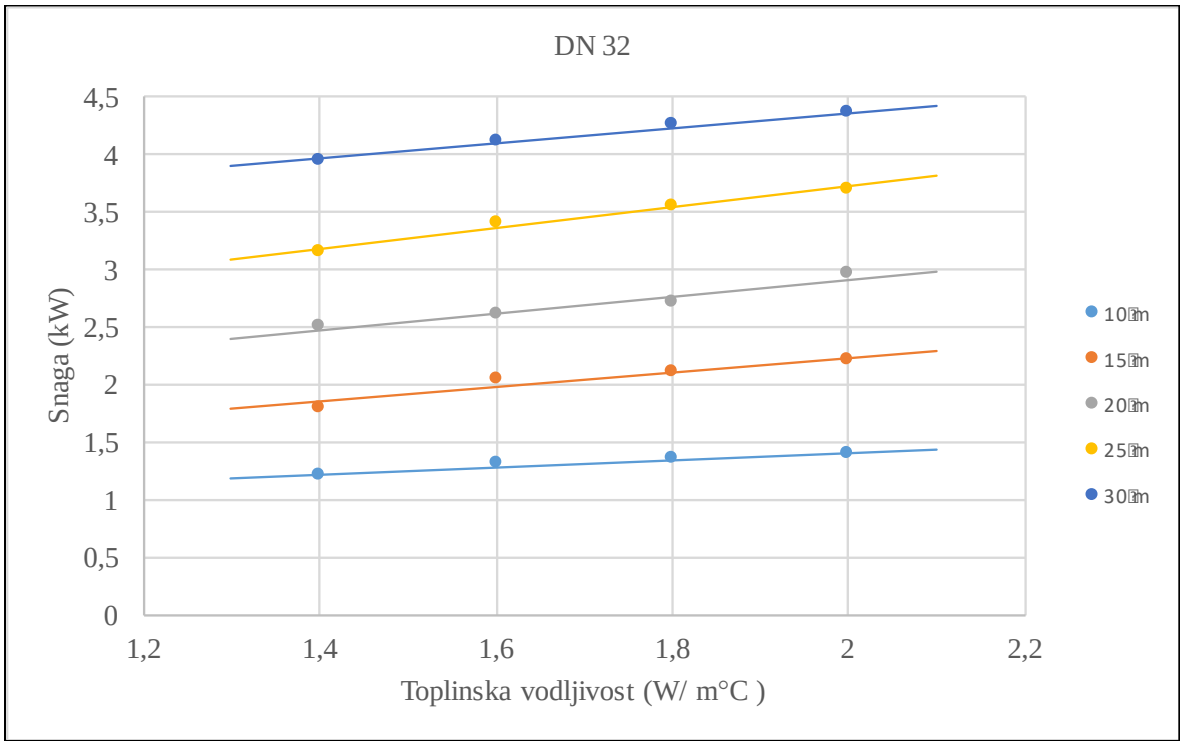
Slika 4.3 Toplinska snaga u odnosu na toplinske vodljivosti za promatrane dubine pilota pri protoku radnog fluida od 0,35 l/s i promjeru od 25 mm ugrađene HDPE cijevi



Slika 4.4 Toplinska snaga u odnosu na toplinske vodljivosti za promatrane dubine pilota pri protoku radnog fluida od 0,35 l/s i promjeru od 32 mm ugrađene HDPE cijevi



Slika 4.5 Toplinska snaga u odnosu na toplinske vodljivosti za promatrane dubine pilota pri protoku radnog fluida od 0,50 l/s i promjeru od 25 mm ugrađene HDPE cijevi



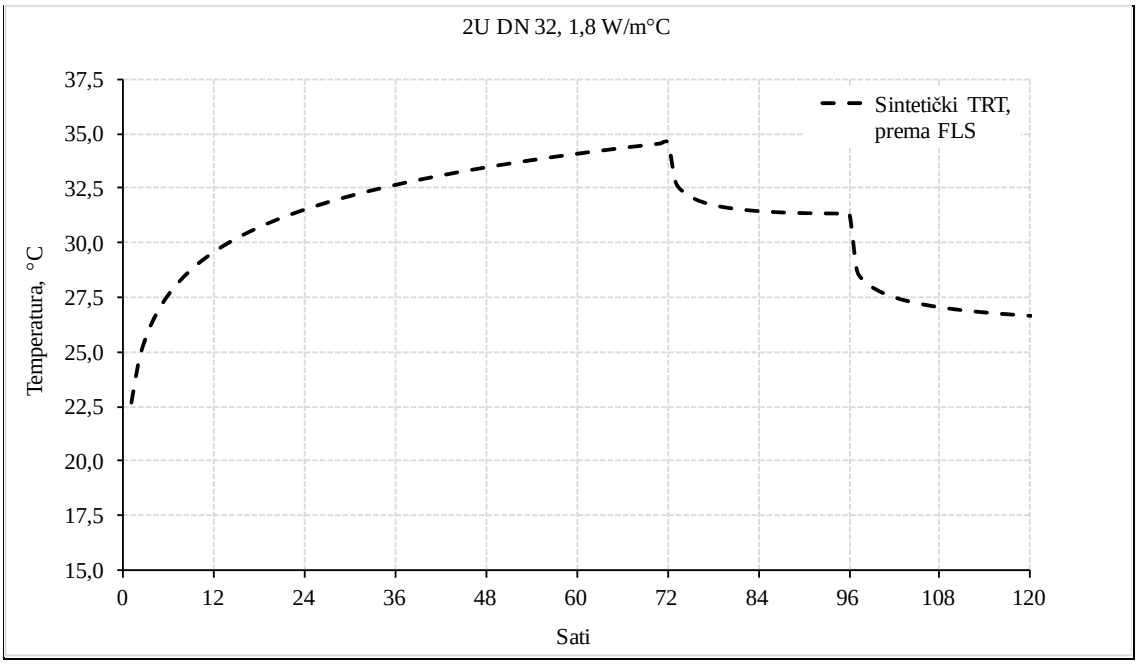
Slika 4.6 Toplinska snaga u odnosu na toplinske vodljivosti za promatrane dubine pilota pri protoku radnog fluida od 0,50 l/s i promjeru od 32 mm ugrađene HDPE cijevi

Promatrajući tablične vrijednosti i dijagrame (slika 4.3 i 4.4), vidljivo je da energetski piloti u kojima je korišten 2U izmjenjivač topline s unutarnjim promjerom od 25 mm, pri protoku od 0,35 l/s, mogu podnijeti veća toplinska opterećenja u odnosu na one opremljene s izmjenjivačem unutarnjeg promjera od 32 mm. Pri tome je utjecaj toplinske vodljivosti na toplinsku snagu pilota isti na oba izmjenjivača. Povećanjem protoka (slika 4.5 i 4.6) radnog fluida na 0,50 l/s toplinska snaga energetskog pilota opremljenog s izmjenjivačem promjera 32 mm raste od 0,1 do 0,4 kW, ovisno o duljini pilota i koeficijentu toplinske vodljivosti u odnosu na protok od 0,35 l/s za isti promjer izmjenjivača. Također, povećanjem protoka radnog fluida u izmjenjivaču topline s unutarnjim promjerom od 32 mm, postižu se slične vrijednosti toplinske snage kao i kod izmjenjivača s promjerom od 25 mm. U slučaju povećanja ukupnog protoka na 0,50 l/s, kod energetskog pilota opremljenog s 2U izmjenjivačem topline s unutarnjim promjerom od 25 mm, povećanje ukupnog protoka s 0,35 l/s na 0,50 l/s doprinosi povećanju toplinske snage pilota do 0,05 kW

.

4.3. **Određivanje energetskih prinosa pilota**

Određivanje toplinskog prinosa energetskog pilota za pojedinu dubinu, toplinsku vodljivost i protok radnog fluida izvedeno je korištenjem sintetičkog Step TRT-a. Validacija sintetičkog Step testa potvrđena je mjerenjima TRT (Kurevija et al 2018b). Na pojedini pilot je u prvom uvjetu narinut toplinski puls u iznosu jednakom toplinskom opterećenju koje pilot može podnijeti (Tablice 4.2, 4.3, 4.4 i 4.5), a da temperatura radnog fluida ne padne ispod 0 °C. Prvi je uvjet trajao 72 h nakon čega je u drugom uvjetu, koji je trajao 24 h, narinuta vrijednost toplinskog pulsa smanjena za 25 % vrijednosti. U trećem toplinskom uvjetu, s trajanjem od 24 h, narinuti toplinski puls smanjen je za dodatnih 25 %. Za tri toplinska uvjeta dobiven je toplinski odaziv tla za svaki razmatrani pilot, a primjer krivulje za jedan od razmatranih pilota prikazan je na slici 4.7.

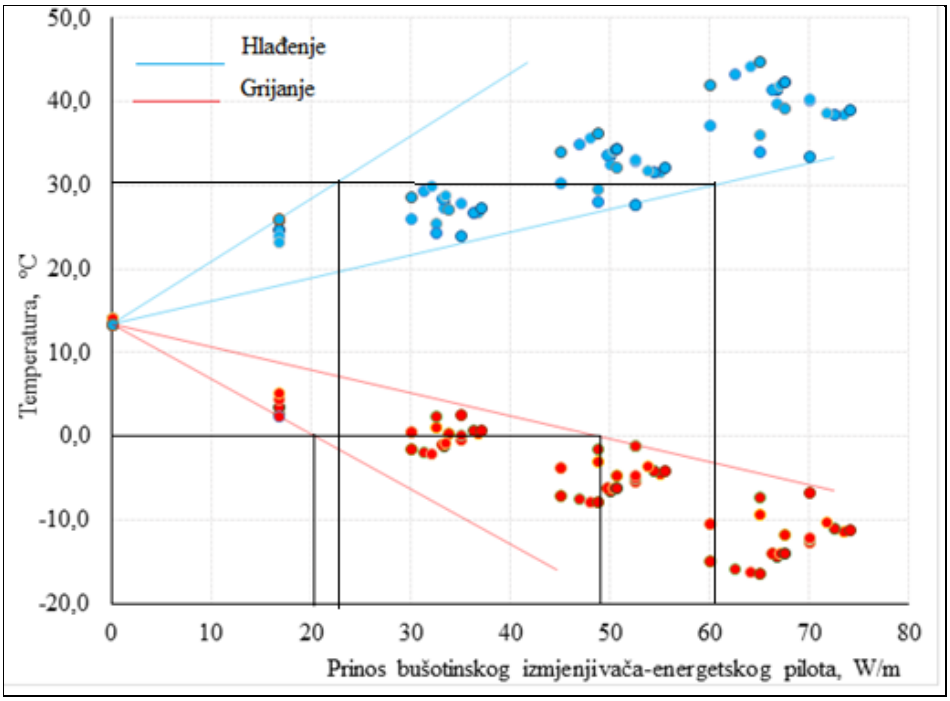


Slika 4.7 Toplinski odaziv tla

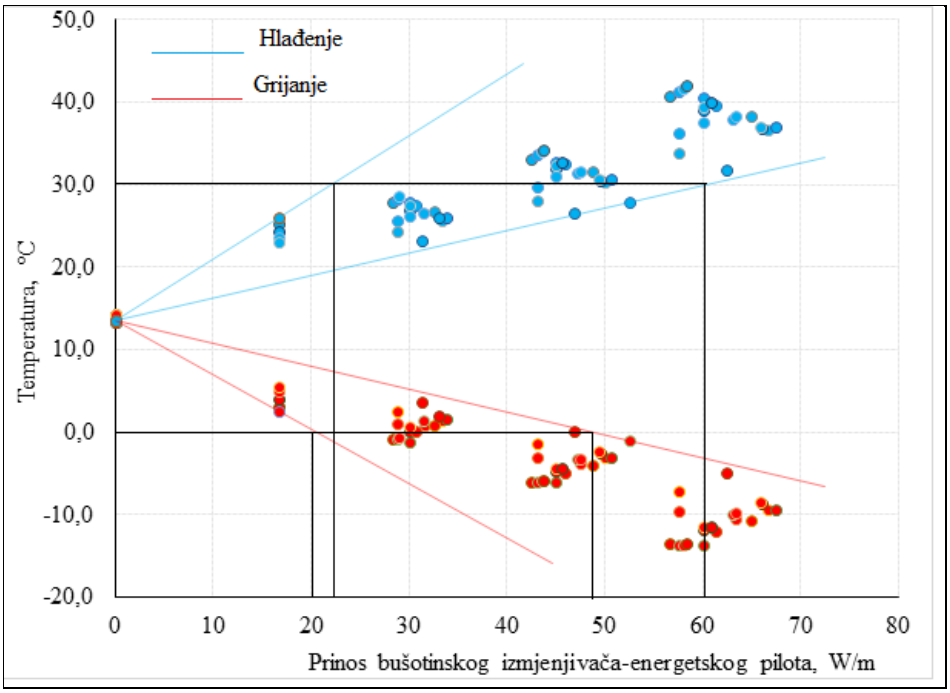
Iščitavanjem temperatura za postavljene uvjete pri kojima je postignuto ustaljeno stanje širenja toplinske energije, konstruirani su dijagrami (slika 4.8, 4.9, 4.10 i 4.11) za očitavanje toplinskih prinosa energetskih pilota (W/m) u funkciji željene izlazne temperature iz pilota (EST).

Iz priloženih se dijagrama, za dva uzeta unutarnja promjera 2U izmjenjivača topline i dva protoka radnog fluida, može vidjeti da su podaci grupirani ovisno o toplinskoj

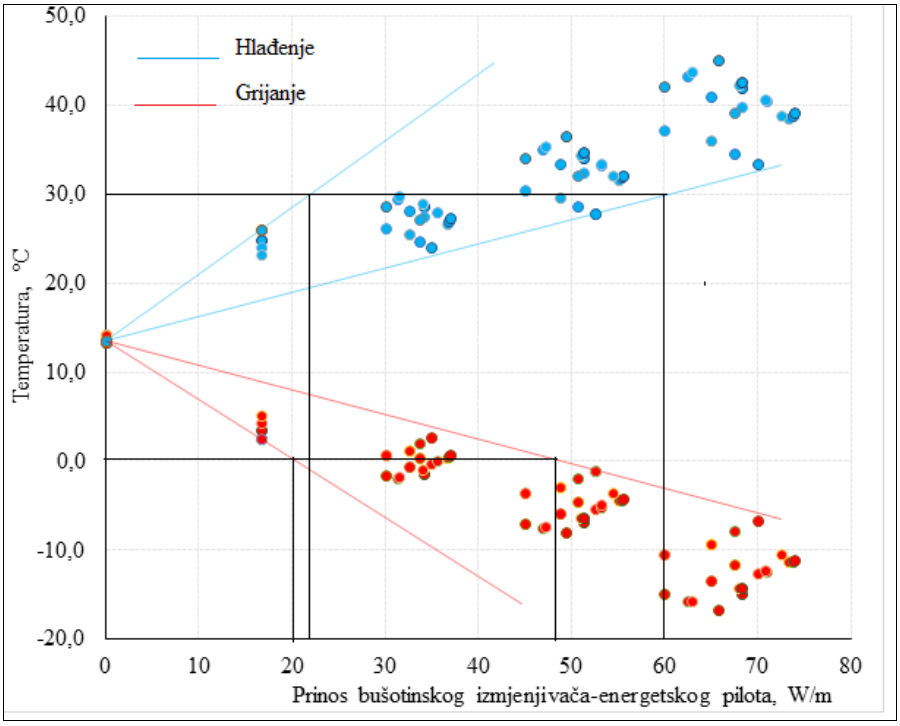
vodljivosti tla i duljini pilota. Prema tome, za veće vrijednosti toplinske vodljivosti tla i dubinu pilota, moguće je ostvariti veće toplinske prinose po metru instaliranog pilota. Na dijagramima je također određen raspon podataka za energetski prinos u režimu hlađenja i grijanja kako bi se mogle odrediti maksimalne i minimalne vrijednosti ustaljenog prinosa ovisno o unutarnjem promjeru izmjenjivača i ukupnom protoku radnog fluida za iste vrijednosti izlazne temperature radnog fluida iz energetskog pilota.



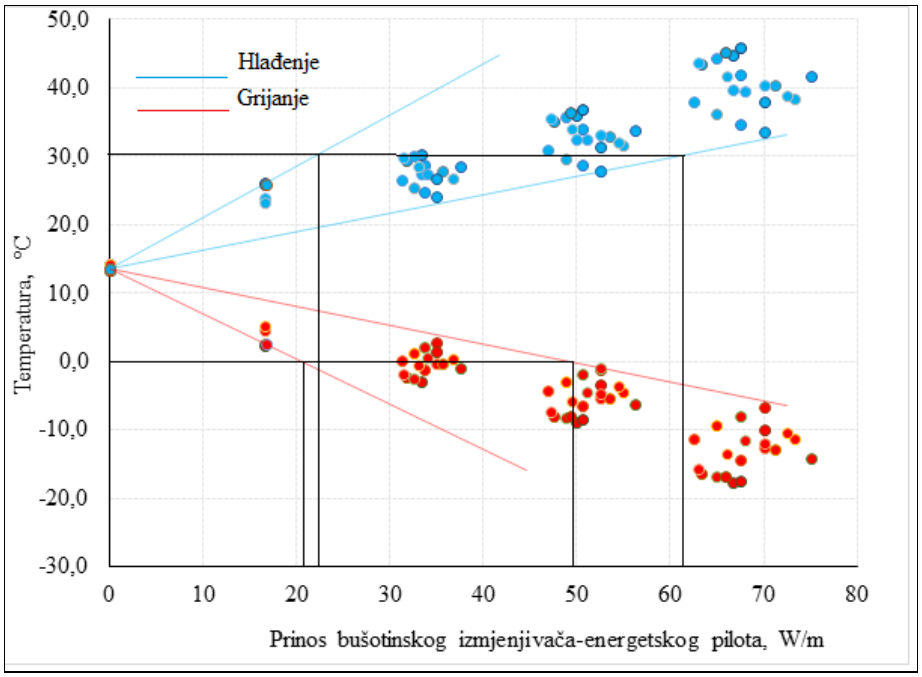
Slika 4.8 Određivanje ustaljenog toplinskog prinosa u funkciji izlazne temperature radnog fluida za pilote opremljene s 2U izmjenjivačem topline unutarnjeg promjera od 25 mm i protokom radnog fluida od 0,35 l/s



Slika 4.9 Određivanje ustaljenog toplinskog prinosa u funkciji izlazne temperature radnog fluida za pilote opremljene s 2U izmjenjivačem topline unutarnjeg promjera od 35 mm i protokom radnog fluida od 0,35 l/s



Slika 4.10 Određivanje ustaljenog toplinskog prinosa u funkciji izlazne temperature radnog fluida za pilote opremljene s 2U izmjenjivačem topline unutarnjeg promjera od 25 mm i protokom radnog fluida od 0,50 l/s



Slika 4.11 Određivanje ustaljenog toplinskog prinosa u funkciji izlazne temperature radnog fluida za pilote opremljene s 2U izmjenjivačem topline unutarnjeg promjera od 32 mm i protokom radnog fluida od 0,50 l/s

U režimu grijanja, izlazna temperatura postavljena je na 0 °C, a minimalni ustaljeni prinos iznosi 20 W/m za promatrane 2U izmjenjivače i protoke. Maksimalan ustaljeni prinos u režimu grijanja kreće se od 47 do 49 W/m, s time da je razlika između korištenih izmjenjivača i protoka zanemariva. U režimu hlađenja, korištenjem jednog od dva 2U izmjenjivača različita promjera pri protoku od 0,35 i 0,50 l/s, moguće je pohraniti u tlo između 22 do 61 W/m, ovisno o dubini pilota i toplinskoj vodljivosti tla.

5. MODELIRANJE POLJA ENERGETSKIH PILOTA - PREGLED PRIMJERA KORIŠTENJA

Prilikom realnog rada geotermalnog sustava, u modeliranju polja energetskih pilota, potrebno je razmotriti geološku i hidrogeološku situaciju na predviđenoj lokaciji te energetske potrebe objekta za kojeg se projektiraju. Kroz opisani izvedeni projekt (izvještaj trvtke "*Termogea*") prikazan je princip određivanja termogeološki parametara tla i toplinskog kapaciteta pilota. Prema određenim parametrima i potrebama objekta za grijanje i hlađenje, projektiran je geotermalni sustav te je određena točka bivalencije iznad koje je potrebno korištenje drugih rashladnih i ogrjevnih sustava za pokrivanje vršnih opterećenja. Za razliku od modeliranja jednog energetskog pilota, prilikom modeliranja više energetskih pilota, u obzir je potrebno uzeti i termalne interferencije između energetskih pilota kako bi se izbjeglo pothlađivanje tla i pad temperature radnog fluida.

5.1. Grijanje i hlađenje trgovačkog centra "Designer Outlet Croatia"

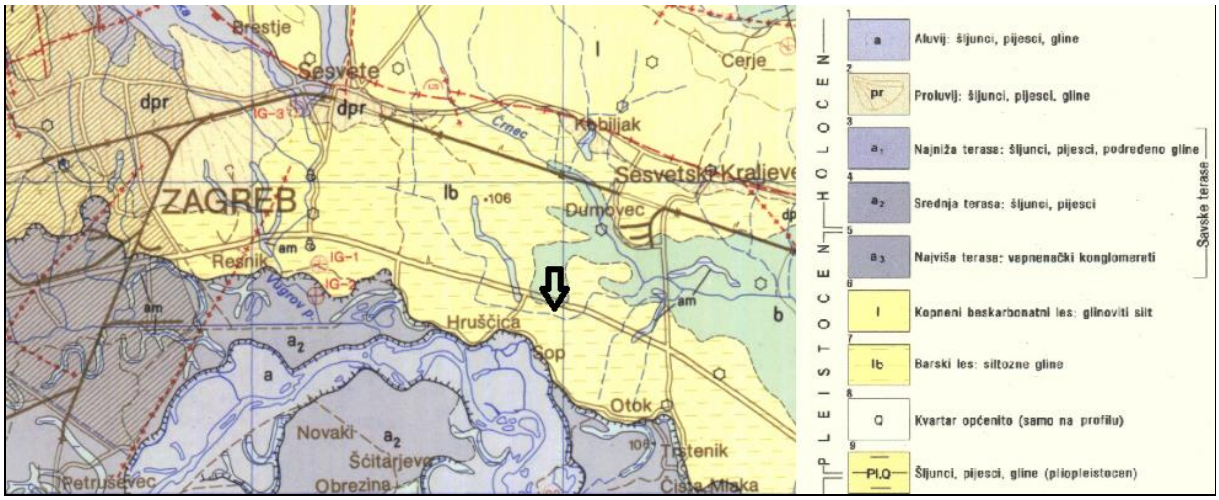
Za energetske potrebe grijanja i hlađenja trgovačkog centra "Designer Outlet Croatia" u blizini grada Zagreba predviđeno je iskorištavanje plitkih geotermalnih izvora u bivalentnom paralelnom termotehničkom sustavu s prirodnim plinom. Korištenjem geotermalne energije pokrivaju se bazna opterećenja i sustav radi kontinuirano u sezoni grijanja, dok plinski sustav pokriva vršna opterećenja. Cijeli je objekt podijeljen na 13 zasebnih dilatacija, a svaka je dilatacija temeljena na pilotima dubine od 19,3 do 21,3 m. Od ukupnog broja instaliranih pilota, 260 pilota promjera 60 cm ih je opremljeno izmjenjivačima topline postavljenim u dvostrukoj petlji (2U) na armaturni koš po obodu pilota (Slika 5.1), u prosječnoj linijskoj duljini od 20 m. Jedan energetski pilot tako čini ukupno 80 m izmjenjivača topline. Hidrauličkim spajanjem dva susjedna pilota u seriju dobiveno je 130 parova energetskih pilota. Temeljni piloti izvedeni su CFA tehnologijom (eng. *Continuous Flight Auger*) gdje se prvotno izrađuju bušotine pomoću beskonačne spirale koja osigurava stabilnost bušotine pa izostaje zaštita kolona. Prilikom izvlačenja spirale, bušotina se zapunjuje betonom, a armaturni se koš sa izmjenjivačem topline ugrađuje vibracijom ili utiskivanjem. Klasičnim TRT-om određeni su termogeološki parametri projektiranja, a Step TRT-om ustaljeni energetski prinosi u funkciji izlazne temperature.

Slika 5.1 HDPE cijevi postavljene na armaturni koš

5.2. **Geološki sastav, hidrologija i geotermalni potencijal lokacije**

Grad Zagreb sa okolicom nalazi se na savskoj ravnici između planine Medvednice i brežuljkastog područja Vukomeričkih Gorica. Prema geološkoj karti Ivanić Grada (slika 4.2) na kojoj je izdvojena mikrolokacija predviđenog objekta, vidljivo je da je savska terasa izgrađena od sedimenata kvartarne starosti. Na jugoistočnom potezu, od grada Zagreba prema lokaciji objekta, tlo sačinjava sitnozrnata glina iz pleistocena (lb) do dubine od 80 m, dok je južni dio izgrađen od aluvijalnih sedimenata, šljunka, pijeska i gline (a, a_1, a_2) iz holocena, a debljina naslaga kreće se od 10 do 45 m. Sam objekt nalazi se u močvarnom području kojeg izgrađuju barski sedimenti (b), pretežito gline, krupnozrnati šljunci i pijesci te siltovi holocenske starosti. Hidrogeološka situacija lokacije određena je zagrebačkim vodonosnim sustavom otvorenog tipa čija je voda ploha u stalnom kontaktu s rijekom Savom. Njegovo horizontalno prostiranje određeno je kvartarnim naslagama koje pak dijele vodonosnik u dva dijela; plići i dublji vodonosnik. Plići vodonosnik građen je od aluvijalnih naslaga, šljunka i pijeska, dok je dublji vodonosnik izgrađen od jezersko-barskih naslaga s latelarnim i vertikalnim izmjenama šljunka, pijeska i gline. Plići i dublji

vodonosnik hidraulički su povezani i čine jedinstveni vodonosnik, zbog velike hidrauličke vodljivosti šljunka, koja u zapadnom dijelu premašuje 3000 m/dan (Kapularić, 2013). Smjer kretanja podzemne vode je od zapada prema istoku, a vodonosnik se u najvećoj mjeri opskrbljuje iz rijeke preko veoma provodljivih aluvijalnih holocenskih naslaga (Bačani, 2014).



Slika 5.2 Opća geološka karta RH – list Ivanić grad, s izdvojenim područjem grada Zagreba i lokacije objekta (Basch, 1983)

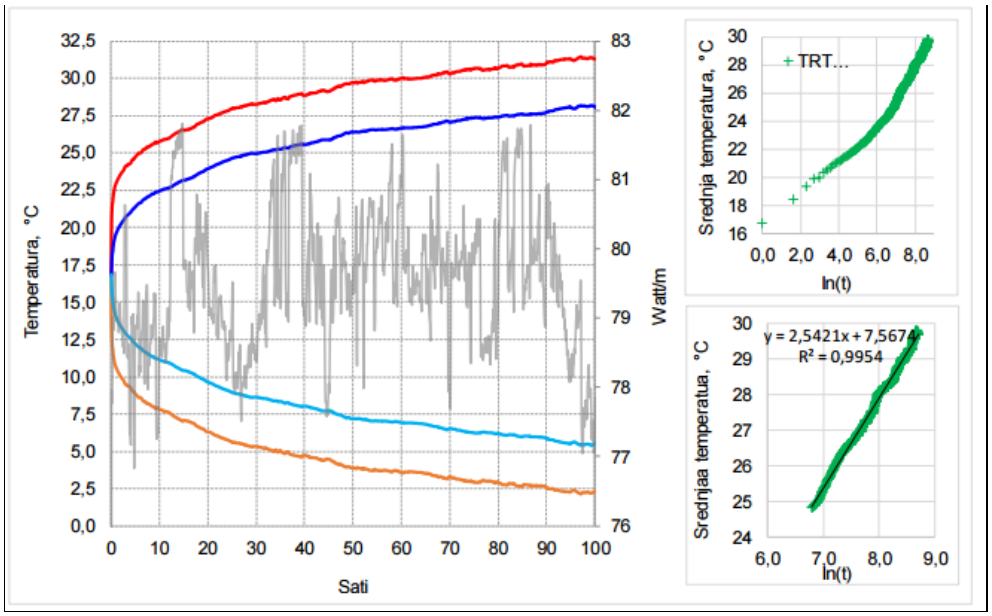
Teritorij Republike Hrvatske može se podijeliti na dva područja, ovisno o potencijalu za iskorištavanje geotermalne energije; na obalni i kontinentalni dio. Obalni dio Hrvatske karakterizira niski geotermalni gradijent, do 18 °C/km, uz prosječan toplinski tok od 29 mW/m^2. Grad Zagreb smješten je u kontinentalnom dijelu, gdje zbog geotermalnog gradijenta od0,049 °C/m i prosječnog toplinskog toka od 76mW/m^2 postoje dobri uvjeti za iskorištavanje plitke geotermalne energije (Jelić et al., 1995, Macenić et al., 2020).

5.3. **Izvedena mjerenja i projektiranje sustava**

Klasični TRT izveden je na dva serijski spojena pilota, međusobno razmaknuta 4 metra (Slika 5.3). Kumulativna duljina ovako spojenih pilota iznosi 40 m, a ugrađenih polietilenskih cijevi 160 m. Ukupno trajanje testa, uz protok vode od 0,23 l/s pri kojem je postignuto turbulentno strujanje u cijevima, iznosilo je 250 sati. Prvo je određena statička temperatura tla od 16,8 °C na dubini od 20 metara tijekom ljetnih mjeseci, dok u zimskom periodu iznosi 14,8 °C.

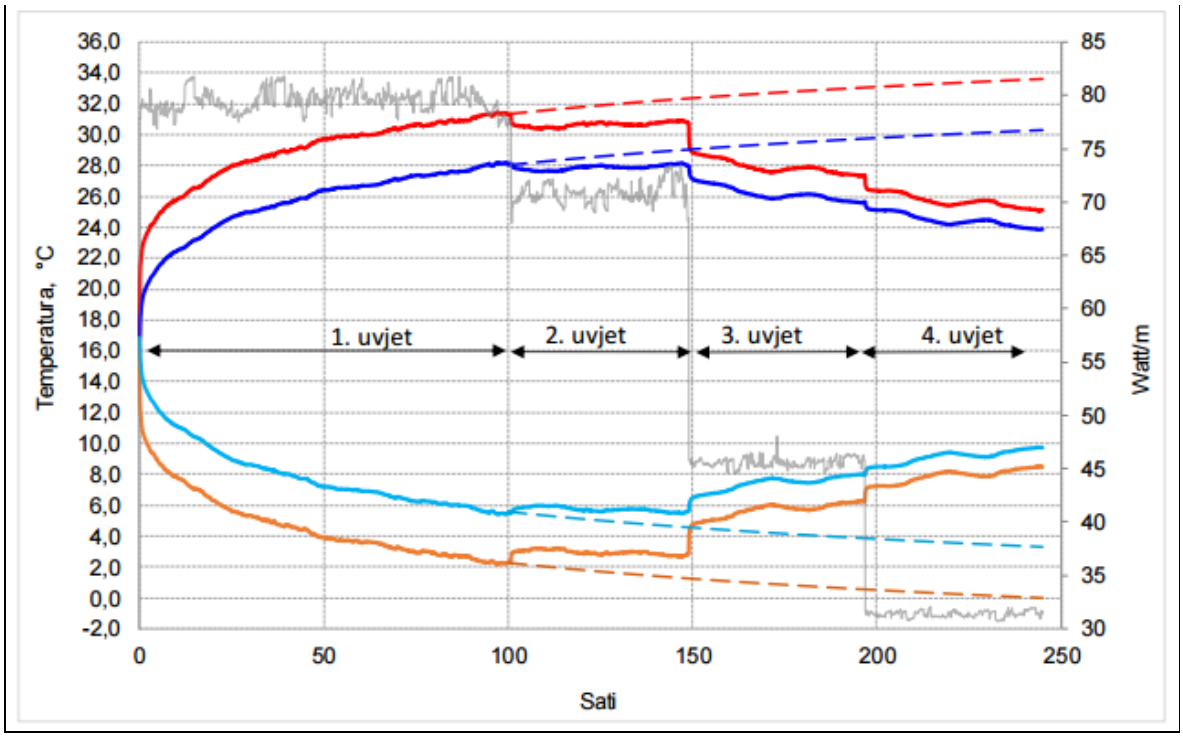
Slika 5.3 Oprema TRT-a i izvođenje testa na lokaciji

Korištenjem derivacijske krivulje određen je početak perioda poluustaljenog stanja, kada se temperatura cirkulirajućeg fluida ne mijenja za više od 0,25 °C u petominutnom intervalu. Interpretacijom podataka za period poluustaljenog stanja, uz narinutu toplinsku snagu od 79,55 W/m, određena je toplinska vodljivost u vrijednosti od 2,49 W/m °C (slika 5.4).



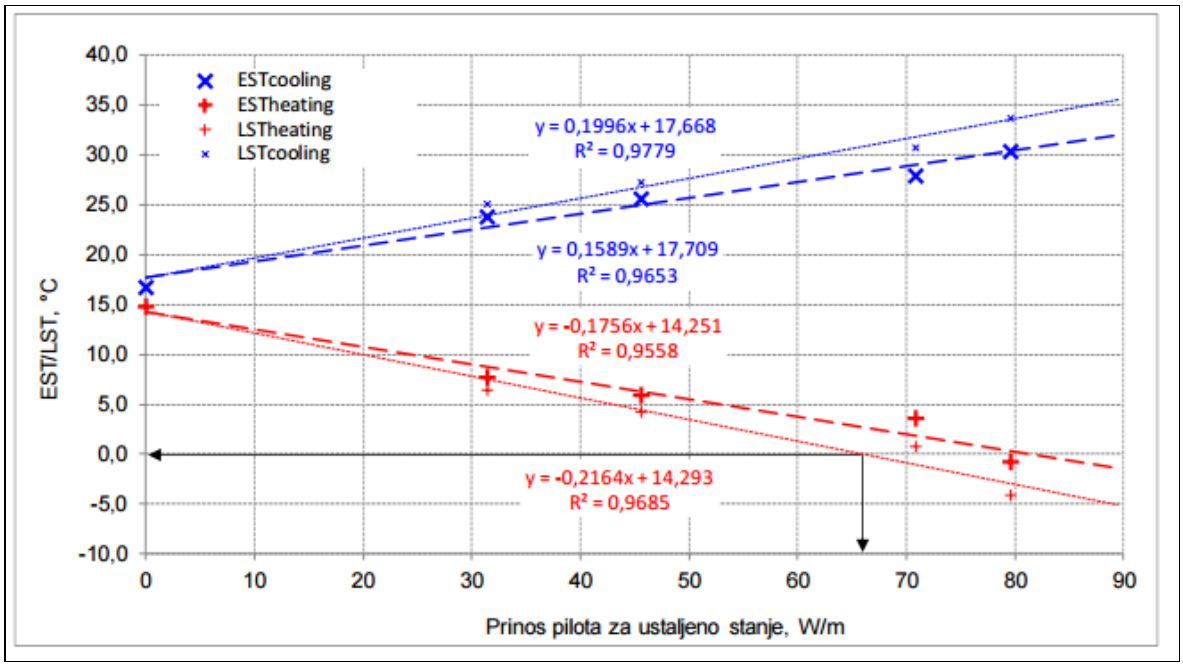
Slika 5.4 Određivanje efektivne toplinske vodljivosti tla

Uz poznatu toplinsku vodljivost i geometrijske karakteristike, određen je toplinski otpor pilota u iznosu od 0,109 m °C/W. Toplinski kapacitet energetskih pilota određen je Step TRT-om (slika 5.6), odnosno smanjivanjem toplinske snage u dodatna tri toplinska uvjeta (slika 5.5) kako bi se postigle točke temperaturne stabilizacije i ustaljeni režim rada pilota.



Slika 5.5 Toplinski odaziv tla s četiri toplinska uvjeta i jednim proširenim uvjetom (crtkana linija)

Iz dobivenog dijagrama prinosa pilota u funkciji EST, uz postavljanje LST od 0°C, određen je energetski prinos od 1,32 kW po pilotu za kontinuirano dugotrajno ustaljeno grijanje prostora. Uz poznavanje toplinske vodljivosti i difuzije, za kontinuirano nejednoliko toplinsko opterećenje, rješenjem jednadžbe difuzije za linijski prijelaz toplinske energije, izračunata je temperatura tla na određenoj udaljenosti od pilota. Rješenjem jednadžbe, za 2000 neprekinutih radnih sati, temperatura tla pada za 1 °C na udaljenosti 2 metra od pilota, što odgovara polovici razmaka između pojedinih pilota. Nakon te udaljenosti piloti počinju toplinski interferirati međusobno, što može dovesti do daljnjeg pothlađivanja tla i pada efikasnosti sustava. Zbog toga je potrebno, prilikom ljetnih mjeseci, pohranjivati toplinsku energiju u tlo, čime bi se sustav doveo u ravnotežno stanje.



Slika 5.6 Grafički prikaz podataka Step TRT-a za određivanje ustaljenog prinosa u funkciji temperature radnog fluida za grijanje (crvena linija) i hlađenje (plava)

Uz uračunatu toplinsku snagu kompresora dizalice topline za vrijednost COP-a 4, geotermalno polje sa ukupno 255 pilota opremljenih izmjenjivačima topline može isporučiti 448 kW_t energije potrošaču u vršnom periodu. Za slučaj hlađenja objekta, uz istu dizalicu topline i za EST/LST = 30/35°C, geotermalno polje isporučuje 584 kW_f rashladne energije. Ukupne energetske potrebe objekta za grijanje iznose 370 kW_t odnosno 750 kW_f za hlađenje objekta. Daljnjim modeliranjem i na temelju rezultata dobivenih Step TRT-om zaključeno je da geotermalni sustav može u potpunosti zadovoljiti potrebe grijanja, dok za potrebe hlađenja sustav mora raditi u bivalentnom paralelnom režimu rada sa suhim rashladnikom uz postavljenu točku bivalencije na temperaturu zraka od 27 °C, u kojem 70 % opterećenja pokriva geotermalni sustav, a ostatak rashladni toranj.

5. ZAKLJUČAK

Energetski piloti predstavljaju geotehničke temeljne konstrukcije primarno izrađene u svrhu temeljenja površinskih objekta na njima, a dodatno je isti taj objekt opskrbljen toplinskom i rashladnom energijom iz samog pilota. Nosivost pilota određuje se preko geomehaničkih parametara tla, dok su energetske mogućnosti pilota uvjetovane termogeološkim i strukturnim parametrima. U radu je, modeliranjem energetskog pilota, određena toplinska snaga pojedinog pilota za postavljene geometrijske i termogeološke parametre pilota i okolnog tla, a razmotren je i utjecaj unutarnjeg promjera glatke cijevi instaliranog 2U izmjenjivača topline i ukupnog protoka radnog fluida na toplinsku snagu pilota. Prvo su analizirani ukupni protoci radnog fluida, kojeg sačinjava voda s dodanim antifrizom, propilen glikolom. Veći udjeli dodanog antifriza povećavaju gustoću i viskoznost radnog fluida, što dovodi do veće vrijednosti pada tlaka u izmjenjivaču i težeg postizanja turbulentnog strujanja. U izmjenjivaču topline manjeg promjera lakše se postiže turbulentno strujanje u cijevi, dok je pad tlaka manji pri korištenju izmjenjivača s većim promjerom. Iz hidrauličke analize, odabrana su dva protoka za daljnji postupak modeliranja energetskog pilota. Nakon brojnih simulacija, iz priloženih se rezultata može zaključiti značajniji utjecaj strukturne komponente, odnosno dubine, na toplinsku snagu pilota u odnosu na toplinsku vodljivost. S obzirom da se prilikom dimenzioniranja pilota na nosivost razmatraju različiti promjeri i dubine, treba uzeti u obzir da će smanjenje promjera uz povećanje dubine pilota imati pozitivan učinak na energetsku učinkovitost pilota. Korištenje 2U izmjenjivača topline s manjim promjerom, za isti protok radnog fluida, doprinosi većoj toplinskoj snazi pilota, dok povećanje ukupnog protoka ima značajniji utjecaj na toplinsku snagu energetskih pilota u kojima je korišten izmjenjivač s većim unutarnjim promjerom. Pri odabiru između dva izmjenjivača topline s različitim promjerom, potrebno je razmotriti efikasnost i isplativost sustava s obzirom na manje padove tlaka u izmjenjivačima s većim unutarnjim promjerom i veći doprinos toplinskoj snazi pilota kod izmjenjivača s manjim promjerom. Na energetske pilote je zatim narinuto toplinsko opterećenje s postupnim smanjenjem u tri uvjeta, u svrhu određivanja toplinskog kapaciteta pilota. Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da dublji piloti ostvaruju veće toplinske prinose, dok različiti promjeri cijevi izmjenjivača i protoci radnog fluida ne utječu značajno na toplinski kapacitet energetskog pilota. Pregledom primjera korištenja energetskih pilota pri realnom radu geotermalnog sustava, prikazano je modeliranje polja energetskih pilota, pri čemu je razmotreno i toplinsko djelovanje između susjednih pilota.

Termogeološki parametri tla i toplinski kapacitet pilota određeni su metodama mjerenja koje su opisane u radu. Geotermalni sustav projektiran je prema energetskim potrebama objekta, a modeliranjem je zaključeno da polje energetskih pilota ne može zadovoljiti energetske potrebe objekta u režimu hlađenja, zbog čega je bilo potrebno postaviti točku bivalencije na određenu vanjsku temperaturu, nakon koje se uključuje drugi proizvođač rashladne energije koji koristi drugu vrstu energenata.

6. **LITERATURA**

ACUNA, J., PALM, B., 2013. Distributed thermal respone test on pipe-in-pipe borehole heat exchangers, Applied Energy, 109, str. 312-320.

ALBERDI – PAGOLA, M., 2018. Design and performance of energy pile foundations: Precast quadratic pile heat exchangers for shallow geothermal energy systems. Aalborg Universitetsforlag. Ph.d.-serien for Det Ingeniør- og Naturvidenskabelige Fakultet, Aalborg Universite

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), 2011. ASHRAE Handbook—HVAC Applications; American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers: Atlanta, GA, USA, poglavlje 34

BANKS, D., 2012. An introduction to thermogeology: ground source heating and cooling. John Wiley & Sons.

BADENES, B.; MAGRANER, T.; BUEY, C.; URCHUEGUIA, J. 2016. Thermal characterization of a geothermal precast pile in Valencia. European Geothermal Congress 2016, Strasbourg, France.

BASCH, O. 1983. Osnovna geološka karta SFRJ – list Ivanić Grad. Zagreb, Hrvatski geološki institut.

BRANDL, H., 2006 Energy foundations and other thermo active ground structures, Geotechnique, 56 (2), 81 – 122.

BANKS, D., 2012. An introduction to thermogeology: ground source heating and cooling. John Wiley & Sons.

BAČANI, A., 2014. Elaborat o zonama zaštite izvorišta grada Zagreba, Projektni zadatak, Rudarsko-Geološko-Naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. 2005. BS EN 14199:2005. Execution of Special Geotechnical Works. Micropiles. London: BSI

CARSLAW, H.S.; JAEGER, J. C., 1946. Conduction of Heat in Solids, Claremore Press: Oxford, Ujedinjeno Kraljevstvo

CLAESSON, J., & ESKLISON, P., 1987. Conductive Heat Extraction by a Deep Borehole. Analytical Studies. PREPRINT of a paper Submitted to the International Journal of Heat and Mass Transfer. Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. Dep. of Mathematics and Physics, University of Lund, Sweden, 1-26

FADEJEV, J., SIMSON, R., KURNITSKI, J., HAGHIGHAT, F., 2017. A review on energy piles, design, sizing and modelling, Energy, 122, str. 390 - 407

FLEMING K., WELTMAN A., RANDOLPH M, ELSON K., 2009. Piling Engineering. Treće izdanje. Oxon: Taylor & Francis.

GEHLIN, S., 2002. Thermal Response Test: Method Development and Evaluation, Doktorska disertacija, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden

GSHP Association., 2012. Thermal pile designe, installation and materials standard. Ground Source Heat Pump Association, Milt Keynes, USA, poglavlje 82

HAMADA, Y., SAITOH, H., NAKAMURA, M., KUBOTA, H., OCHIFUJI, K. 2007. Field performance of an energy pile system for space heating, Energy build, 39, str. 517-524

INGERSOLL, L.R., ZOBEL, O.J., INGERSOLL, A.C., 1954. Heat Conduction with Engineering, Geological and other Applications, McGraw-Hill: New York, NY, USA, str. 325-327

JENSEN – PAGE, L.; LOVERIDGE, F.; NARISILIO, G. 2019. Thermal Response Testing of Large Diameter Energy Piles. Energies, 2700, str. 1-25

JELIĆ, K.; KEVRIĆ, I., 1997. Plitka geotermalna energija u Hrvatskoj, 6. forum Hrvatskog energetskog društva , Zagreb : Hrvatsko energetsko društvo, str. 181-199

KAPULARIĆ, J. 2013. Identifikacija utjecaja temperaturnih oscilacija rijeke Save i geotermalnih anomalija na temperaturne oscilacije podzemne vode zagrebačkog i samoborskog vodonosnika. Diplomski rad, Rudarsko-Geološko-Naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb

KUREVIJA, T.; STRPIĆ, K., 2018a. Hydraulic and thermogeological design differences between two-loop vertical and inclined coaxial borehole heat exchangers, Renewable Energy, 117, str. 314–323

KUREVIJA, T.; MACENIĆ, M.; STRPIĆ, K., 2018b. Steady state heat rejection rates for coaxial borehole heat exchanger during passive and active cooling determined with the novel thermal response test method, Rudarsko- geološko- naftni zbornik, 33, str. 1– 17

KUREVIJA, T.; STRPIĆ, K.; KOŠČAK – KOLIN, S., 2018c. Applying Petroleum the Pressure Buildup Well Test Procedure on Thermal Response Test – A Novel Method for Analyzing Temperature Recovery Period, Energies, 366, str. 1-22

KUREVIJA, T., 2010. Energetsko vrednovanje plitkih geotermalnih potencijala Republike Hrvatske, Doktorska disertacija, Rudarsko-Geološko-Naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb

LEE, J., 1982. Well Testing, 1. izdanje, Society of Petroleum Engineers of AIME: New York, NY, USA, str.1–71

LALOUI, L.; ROTTA LORIA, ALESSANDRO F. 2019. Analysis and Design of Energy Geostructures, Theoretical Essentials and Practical Application. Academic Press.

LOVERIDGE, F., 2012. The Thermal Performance of Foundation Piles used as Heat Exchangers in Ground Energy Systems, Doktorska disertacija, Faculty of engineering and the environment, University of Southampton, Southampton.

LOVERIDGE, F.; POWRIE, W., 2013. Temperature response functions (*G* – functions) for single pile heat exchangers, Energy, 57, str. 554-564

LOVERIDGE, F.; POWRIE, W., 2014. 2D Thermal resistance of pile heat exchangers, Geothermics, 50, str, 122-135

MUFIĆ, V., 2019. Modeliranje dinamičkog probnog opterećenja pilota na lokaciji Ilica, Diplomski rad, Rudarsko-Geološko-Naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb

MACENIĆ, M., 2020. Konceptualni model eksploatacije geotermalne energije revitalizacijom napuštenih naftnih i plinskih bušotina u kontinentalnom dijelu Republike Hrvatske, Doktorska disertacija, Rudarsko-Geološko-Naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb

STRPIĆ, K., 2017. Razvoj nove metode izvođenja i interpretacije testa odaziva topline tla primjenom modela hidrodinamičkih ispitivanja u naftnom inženjerstvu, Rektorova nagrada, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb

STRPIĆ, K., 2018. Određivanje optimalnog toplinskog prinosa bušotinskih izmjenjivača topline i potencijal tehnologije u Hrvatskoj, Diplomski rad, Rudarsko-Geološko-Naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb

RANDOLPH M.F. 1983. Settlement considerations in the design of axially loaded piles. Ground Engineering. 16(4), str. 28-32

VESIC A.S. 1997. Design of Pile Foundations. National Co-operative Highway Research Program. Synthesis of Highway Practice No 42. Transportation Research Board. National Research Council. Washington D.C.

SANI, A.; MARTAND SINGH, R.; AMIS, T.; CAVARRETTA, I. 2019. A review of the performance of geothermal energy pile foundation, its design process and applications. Renewable and Sustainable Energy Review, 106, str. 57-78.

PARK, S.; SUNG, C.; JUNG, K. 2015. Constructability and heat exchange efficiency of large diameter cast-in-place energy piles with various configurations of heat exchange pipe. Applied Thermal Engineering, str. 1-11.

PILJEK, D. 2013. Mjereni rezultati rada dizalice topline povezane s tlom pri kontinuiranom radu. Završni rad, Fakultet Strojarstva i Brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb