

Revitalizacija istražne bušotine Savica-1 ugradnjom koaksijalnog izmjenjivača topline

Sušić, Edis

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:169:866963>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-07**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij naftnog rudarstva

**REVITALIZACIJA ISTRAŽNE BUŠOTINE SAVICA-1 UGRADNJOM
KOAKSIJALNOG IZMJENJIVAČA TOPLINE**

Diplomski rad

Edis Sušić

N414

Zagreb, 2024.

REVITALIZACIJA ISTRAŽNE BUŠOTINE SAVICA-1 UGRADNJOM KOAKSIJALNOG
IZMJENJIVAČA TOPLINE

Edis Sušić

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Kontinuirani porast broja stanovnika i razvoj industrije u zemljama trećeg svijeta rezultiraju većom potražnjom za energijom. S obzirom da mnoge države nemaju vlastite resurse fosilnih goriva ili provode "zelenu politiku" postepeno se razvijaju tehnologije iskorištavanja obnovljivih izvora energije. Geotermalna energija ističe se mogućnošću kontinuirane opskrbe krajnjih korisnika. Ipak, mogućnost proizvodnje vruće slojne vode ovisi o hidrogeološkim svojstvima sloja. Bušotinski izmjenjivač topline jedna je od tehnologija koja omogućava toplinsko iskorištavanje niskih do srednje visokih temperatura suhih bušotina. Veliki broj napuštenih bušotina posjeduje takve toplinske karakteristike. S obzirom na varijabilnost cijena fosilnih goriva, revitalizacija takvih bušotina sve je češća praksa. Ovisno o karakteristikama bušotine i sloja, pridobivena toplina koristi se direktno ili u kombinaciji s drugim izvorima energije. Zbog jednostavnosti ugradnje i visoke učinkovitosti, česta je kombinacija bušotinskog izmjenjivača topline s dizalicom topline na površini. Napuštena bušotina Savica-1 ima potencijal za grijanje objekata srednje veličine. Stoga, cilj ovog diplomskog rada je odabir optimalnog sustava bušotinskog izmjenjivača topline kako bi ekstrakcija toplinske energije bila što učinkovitija.

Ključne riječi: napuštena bušotina, bušotinski izmjenjivač topline, geotermalni potencijal, toplinska vodljivost, protok, toplina, temperatura

Diplomski rad sadrži: 63 stranice, 7 tablica, 27 slika, i 82 reference.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Tomislav Kurevija, redoviti profesor RGNF

Pomagao pri izradi/komentor: Dr. sc. Marija Macenić, viša asistentica RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Tomislav Kurevija, redoviti profesor RGNF
Dr. sc. Daria Karasalihović Sedlar, redovita profesorica RGNF
Dr. sc. Luka Perković, izvanredni profesor RGNF

REVITALIZATION OF THE SAVICA-1 EXPLORATORY WELL BY INSTALLING A COAXIAL
HEAT EXCHANGER

Edis Sušić

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of petroleum and gas engineering and energy
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

Continuous population growth and industrial development in third-world countries result in an increased demand for energy. Given that many countries lack their own fossil fuel resources or implement "green policies," technologies for harnessing renewable energy sources are gradually developing. Geothermal energy stands out because of its ability to continuously supply end-users. However, the possibility of producing hot layer water depends on the hydrogeological properties of the layer. A borehole heat exchanger is one of the technologies that enable thermal utilization of low to medium-high temperatures of dry boreholes. A large number of abandoned boreholes possess such thermal characteristics. Considering the variability of fossil fuel prices, the revitalization of such boreholes is becoming increasingly common. Depending on the characteristics of the borehole and the layer, the obtained heat can be used directly or in combination with other energy sources. Due to the simplicity of installation and high efficiency, the combination of a borehole heat exchanger with a surface heat pump is frequent. The abandoned borehole Savica-1 has the potential to heat medium-sized buildings. Therefore, the aim of this master's thesis is to determine the optimal system of a borehole heat exchanger in order to make the extraction of thermal energy from as efficient as possible.

Keywords: abandoned borehole, borehole heat exchanger, geothermal potential, thermal conductivity, flow, heat, temperature

Thesis contains: 63 pages, 7 tables, 27 figures, i 82 references.

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisors: Full Professor Tomislav Kurevija, PhD

Tech. assistance: Senior Assistant Marija Macenić, PhD

Reviewers: Full professor Tomislav Kurevija, PhD
Full professor Daria Karasalihović Sedlar, PhD
Associate Professor Luka Perković, PhD

Defence date: February 22, 2024, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	V
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA	VI
1. UVOD	1
2. VRSTE GEOTERMALNIH IZVORA	3
2.1 Geotermalne polja s dominantnom konvekcijom (CV)	3
2.2 Geotermalna polja u kojima dominira kondukcija (CD)	4
3. METODE ISPITIVANJA LEŽIŠTA	6
3.1 Laboratorijska ispitivanja toplinske vodljivosti	6
3.2 Ispitivanje toplinskog odziva (TRT)	7
3.2.1 Izvedba TRT-a	9
3.2.2 Matematički modeli	11
3.2.2.1 Analitički modeli.....	11
3.2.2.2 Numerički modeli.....	15
3.3 Ispitivanje toplinskim tragom (TTT)	16
3.4 Terenska procjena hidrauličkih parametara	17
4. GEOTERMALNI SUSTAVI	18
4.1 Vrste bušotinskih izmjenjivača topline	20
4.2 Dimenzioniranje koaksijalnih cijevi	23
4.2.1 Promjer cijevi izmjenjivača topline	23
4.2.2 Toplinska vodljivost materijala	24
4.2.2.1 Plastične cijevi	25
4.2.2.2 Metalne cijevi.....	27
4.3 Projektiranje radnog fluida	29
4.3.1 Toplinska vodljivost radne tekućine	30
4.3.2 Gustoća radne tekućine	31

4.3.3	Specifični toplinski kapacitet.....	31
4.3.4	Viskoznost	32
4.3.5	Ulazna temperatura	33
5.	PRIJENOS TOPLINE KOD ZATVORENOG SUSTAVA BUŠOTINSKOG IZMJENJIVAČA TOPLINE	34
5.1	Bušotinski izmjenjivači topline U-oblika	34
5.2	Dvostruki geotermalni izmjenjivači topline u obliku slova U	35
5.3	Prstenasti koaksijalni geotermalni izmjenjivači topline.....	36
5.4	Centralni koaksijalni geotermalni izmjenjivači topline	37
6.	REVITALIZACIJA BUŠOTINE SAVICA-1.....	38
6.1	Savska depresija	40
6.2	Dimenzioniranje koaksijalnog izmjenjivača topline GHX programskim paketom	42
7.	UTJECAJ NA OKOLIŠ	53
8.	ZAKLJUČAK.....	55
9.	LITERATURA	56

POPIS SLIKA

Slika 3-1. Shema TRT ispitivanja bušotinskog izmjenjivača topline U-oblika	8
Slika 3-2. Površinska TRT jedinica	9
Slika 3-3. Rezultati neometanog TRT-a bušotinskog izmjenjivača topline U-oblika	10
Slika 3-4. Rezultati TRT-a BHE U-oblika pod utjecajem okoline	11
Slika 3-5. Primjena konvencionalnog TRT-a pri određivanju toplinske vodljivosti	13
Slika 4-1. Shematski prikaz direktnog i indirektnog zatvorenog sustava bušotinskog izmjenjivača topline.....	19
Slika 4-2. Bušotinski izmjenjivač topline U-oblika	20
Slika 4-3. Bušotinski izmjenjivač topline s dvostrukom U-cijevi obavijen termalnom žbukom	21
Slika 4-4. Dvostruki bušotinski izmjenjivač topline U-oblika.....	22
Slika 4-5. Koaksijalni bušotinski izmjenjivač topline.....	22
Slika 4-6. Dijagram utjecaja promjera cijevi BHE na temperaturu i toplinsku snagu radnog fluida.....	24
Slika 4-7. Dijagram utjecaja izolacije cijevi BHE na temperaturu i toplinsku snagu radnog fluida.....	25
Slika 4-8. Dijagram utjecaja toplinske vodljivosti fluida na temperaturu i toplinsku snagu radnog fluida.....	30
Slika 4-9. Dijagram utjecaja gustoće fluida na temperaturu i toplinsku snagu radnog fluida	31
Slika 4-10. Dijagram utjecaja toplinskog kapaciteta na temperaturu i toplinsku snagu radnog fluida.....	32
Slika 4-11. Dijagram utjecaja viskoznosti na temperaturu i toplinsku snagu radnog fluida	32
Slika 4-12. Dijagram utjecaja ulazne temperature na temperaturu i energiju izlaznog fluida	33
Slika 6-1. Konfiguracija bušotine Savica-1	38
Slika 6-2. Nova karta geotermalnih gradijenata na području kontinentalne Hrvatske	41
Slika 6-3. Prva geotermalna karta RH na području Panonskog bazena.....	42
Slika 6-4. Mjesečne temperature radnog fluida BHE (1744 m) pri protoku 550 l/min i vršnoj snazi grijanja od 250 kW	47
Slika 6-5. Izvedba izabrane cirkulacijske pumpe CME 25-2 za dubinu ugradnje BHE do 1744 m	48

Slika 6-6. Mjesečne temperature radnog fluida BHE (2202 m) pri protoku 400 l/min i vršnoj snazi grijanja od 300 kW	49
Slika 6-7. Izvedba cirkulacijske pumpe TPE 40-63.....	50
Slika 6-8. Mjesečne temperature radnog fluida BHE (2202 m) pri protoku 400 l/min i vršnoj snazi grijanja od 250 kW	50
Slika 6-9. Mjesečne temperature radnog fluida BHE (2202 m) pri protoku 350 l/min i vršnoj snazi grijanja od 250 kW	51
Slika 6-10. Izvedba cirkulacijske pumpe CM 15-4.....	52

POPIS TABLICA

Tablica 4-1. Toplinska vodljivost termoplastičnih materijala	25
Tablica 4-2. Usporedba radnih temperatura, vijeka i cijena plastičnih materijala	26
Tablica 4-3. Vrijednosti toplinskih vodljivosti metala i legura	29
Tablica 6-1. Opis formacija kroz koju prolazi bušotina Savica-1	39
Tablica 6-2. Ekvivalentne dimenzije zaštitnih cijevi do dubine 1744,5 m i 2202,2 m	43
Tablica 6-3. Padovi tlaka odabranih tubinga	45
Tablica 6-4. Najniže izlazne i ulazne temperature oba scenarija u periodu od 20 godina .	46

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
T	K ili °C	temperatura
q	W/m	toplinski tok
λ	W/mK ili W/m°C	toplinska vodljivost
α	m ² /s	toplinska difuzivnost
t	s	vrijeme
r	m	promjer
R	K/W	toplinski otpor
Q	J	toplinska energija
m	kg	masa
C_p	J/kgK	specifični toplinski kapacitet
b	(W/m ² K)	koeficijent prijenosa topline konvekcijom

1. UVOD

Geopolitička zbivanja na europskom teritoriju u posljednjih par godina dokazala su da cijene nafte i prirodnog plina direktno ovisne o vanjskim čimbenicima. Početkom 2020. godine, potaknuto pandemijom virusa Covid-19, cijene nafte i plina bile su na rekordno niskim razinama. Takva situacija ulijevala je nadu u novo razdoblje jeftine energije na području Europe. Ipak, u periodu od dvije godine cijene su se postepeno normalizirale. 2022. godine dogodio se veliki zaokret u cijenama nafte i plina na europskom tržištu. Napadom Rusije na Ukrajinu, u veljači 2022. godine cijene nafte i prirodnog plina dosegle su rekordne visine. Cijena nafte je u ožujku 2022. godine dosegla oko 700 €/m³ (120 \$/Bbl), a prirodnog plina 340 €/MWh na TTF-u.

Europska unija svjesna je svoje situacije na energetsom tržištu te od početka 2000-ih godina radi na razvoju strategije kojom bi smanjili ovisnost o uvoznim energentima. Jedne od većih inicijativa EU bile su Europski zeleni plan (Fetting, 2020) te njegov mehanizam sufinanciranja pod imenom Just Transition Mechanism. Cilj ovih inicijativa bio je smanjiti emisije stakleničkih plinova za 55% u odnosu na razinu iz 1990. godine te povećati udio obnovljivih izvora energije na 40% ukupne potrošnje do 2030. godine. Ovi ciljevi revidirani su kroz prijedlog Europske komisije pod nazivom REPowerEU (Europska komisija, 2022). Ovim prijedlogom postavljeni su još ambiciozniji ciljevi za 2030. godinu koji bi doprinijeli energetske neovisnosti. Napad Hamasa na Izrael i odgovor Izraela u listopadu 2023. godine te netrpeljivost između SAD-a i Irana opravdavaju želju Europske unije da postane energetski neovisna s obzirom da bi ti sukobi mogli rezultirati novim porastom cijena fosilnih goriva za stanovnike EU.

U skladu s prijedlogom REPowerEU članice EU obvezale su se na dodatno povećanje udjela obnovljivih izvora energije u ukupnoj potrošnji energije. Uz dodatno povećanje broja vjetroelektrana i solarnih elektrana REPowerEU navodi povećanje udjela dizalica topline kao jedan od ključnih ciljeva. Dizalice topline jedan su od alata za iskorištavanje geotermalnog potencijala. Plan Europske unije da u razdoblju od pet godina broj dizalica topline naraste na 10 miliona jedinica dokaz je da EU razmatra maksimalno iskorištavanje svih obnovljivih izvora energije.

Iako EU uspješno provodi politiku smanjenja emisija CO₂, prema IEA (2023), u 2022. godini proizvodnja električne i toplinske zabilježila je najveći porast emisija CO₂. Zabilježeno je povećanje od 1,8%, odnosno 261 tona te ukupno rekordnih 14,6 Gt. Porast emisija CO₂ u proizvodnji električne energije iznosio 2,1% u odnosu na prethodnu godinu. Ovo povećanje uglavnom je uzrokovano širenjem tržišta u razvoju i usponu na području Azije.

Svojim prednostima u odnosu na konvencionalne izvore energije geotermalna energija privukla je interese u cijelom svijetu. Prednosti ovog obnovljivog izvora energije su male emisije stakleničkih plinova, dostupnost u cijelom svijetu, mogućnost održive opskrbe električnom energijom te mali utjecaj na okoliš. Mnoge države s odgovarajućim geološkim predispozicijama prepoznaju potencijal ovog izvora energije. Instalirani geotermalni proizvodni kapacitet u cijelom svijetu porastao je s 1300 MW iz 1975. godine na 16 127 MW do kraja 2022. godine.

Ipak, veliki udio geotermalnog potencijala u EU i svijetu još nije iskorišten te postoji prostor za povećanje udjela geotermalne energije u ukupnoj proizvodnji energije. Geotermalni potencijal plitkih i dubokih ležišta moguće je iskorištavati na razne načine. A pridobivenu toplinsku energiju moguće je iskoristiti u izvornom ili transformiranom obliku. S obzirom da se u EU nalazi veliki broj napuštenih bušotina, cilj je pronaći odgovarajući način njihova iskorištavanja kako bi se smanjila ovisnost o uvoznim fosilnim gorivima. Ovaj diplomski rad dati će uvid u mogućnost revitalizacije napuštene bušotine Savica-1 za iskorištavanje toplinske energije sloja.

2. VRSTE GEOTERMALNIH IZVORA

U prošlosti se razvoj iskorištavanja geotermalne energije uglavnom koncentrirao na proizvodnju električne energije i korištenje tople vode iz dubokih sedimentnih ležišta koje imaju visoke temperature. Danas se temperature od 80 °C, pa čak i niže, mogu koristiti za grijanje zgrada, a proizvodnja električne energije sada je izvediva s temperaturama između 80 i 150 °C (Raymond, 2008). Potencijal za nekonvencionalnu ekstrakciju geotermalne energije uvelike je povećan razvojem geotermalnih tehnologija, posebno u regijama s niskim ili umjerenim protokom topline. Primjeri ovih tehnologija su poboljšani geotermalni sustavi (EGS – engl. *Enhanced Geothermal Systems*) i koncepti izmjenjivača topline dubokih bušotina (DBHE – engl. *Deep Borehole Heat Exchanger*) (Moeck, 2014).

U cijelom svijetu postoji između 20 i 30 milijuna napuštenih bušotina koje predstavljaju opasnost za onečišćenje (Barbier, 2002). Osim uklanjanja opasnosti vezanih uz bušenje i istraživanje, prenamjena napuštenih bušotina može smanjiti njihov utjecaj na okoliš. Podaci iz seizmičkih studija i ispitivanja napuštenih bušotina, poput onih o svojstvima ležišta, bušotinskim temperaturama, strukturi (rasjedi i pukotine), poroznosti i propusnosti, mogu biti vrlo korisni za odabir proizvodne tehnike. Ovi podaci, zajedno s toplinskim i hidrauličkim karakteristikama stijene, nude pouzdane parametre za procjenu geotermalnih sustava i njihovog potencijala za proizvodnju energije (Moeck, 2014). Kako bi se maksimizirala iskoristivost svake bušotine potrebno je odabrati optimalnu tehniku proizvodnje. No da bi se to postiglo nužno je poznavati ležište i njegove karakteristike. Sljedeća podjela opisuje opće karakteristike ležišta:

2.1 Geotermalne polja s dominantnom konvekcijom (CV)

To su geotermalna polja s jakim tektonskim aktivnostima te obično imaju resurse visoke entalpije zbog dinamičke izmjene fluida između Zemljine litosfere i astenosfere. Obično nastaju u regijama poput srednjooceanskih grebena, zonama rascjepa i magmatskih lukova iznad zona subdukcije gdje granice aktivnih ploča pokazuju znakove vulkanizma i tektonizma (Moeck, 2014). Prema Moeck (2014) geotermalna polja u kojima dominira konvekcija (CV) mogu se klasificirati kao magmatska ili nemagmatska.

Magmatska geotermalna polja vulkanskog tipa (CV1) nastaju podizanjem magme iz astenosfere ili gornjeg plašta u litosferu, često kulminirajući bazaltnim vulkanizmom. Na ovakvim poljima pojavljuju se zona istjecanja niske entalpije i zona istjecanja visoke entalpije. Zone niske entalpije raspršuje toplinu i hidrotermalnu tekućinu bočno preko okolnih stijena, stvarajući vruće izvore i travertin na kraju zone (Hochstein, 1988). Dok zone visoke entalpije raspršuju toplinu i slojnu vodu okomito kroz vulkanske otvore. Stoga se prvenstveno zona visoke entalpije koriste za proizvodnju geotermalne energije. Iduća podvrsta su magmatska geotermalna polja plutonskog tipa (CV2) koja nastaju kad magma ne dođe do površine te ostane zatvorena u litosferi. Uzimajući u obzir starost magmatske aktivnosti može se približno odrediti geotermalni potencijal ovih polja (McCoy i sur., 2011).

Nemagmatska geotermalna polja (CV3) karakteriziraju rasjedni sustavi s ekstenzijskim naprezanjima. Vrući fluid iz astenosfere ulazi kroz rasjede u plitku litosferu pomoću svojstva konvekcije. Zemljinu litosferu presijecaju rasjedi i pukotine koji služe kao vodovi vrućeg fluida. U tim zonama dolazi do miješanja vrućeg fluida s meteorskom vodom. Posljedično nastaju regije tanke kore s visokim geotermalni gradijentom (Reed, 1983).

2.2 Geotermalna polja u kojima dominira kondukcija (CD)

Ovakva polja poznata su kao pasivna geotermalna polja. Dije se na polja kontrolirana rasjedima (petrotermalna) i kontrolirana litofacijesom (hidrotermalna). U geotermalnim sustavima u kojima dominira kondukcija, tehnologija poboljšanog geotermalnog sustava (EGS) obično se koristi za smanjenje ležišnih prepreka (Moeck, 2014).

Hidrotermalna polja uglavnom su pod utjecajem litofacijesa te nisu usko povezana sa sustavima rasjeda. Duboki vodonosnici u ovim poljima zagrijevaju se prirodnim geotermalnim gradijentom budući da nema konvekcije. Obično se nalaze u planinskim pojasevima ili intrakratonskim kotlinama. Stoga su poznata kao hidrotermalna-intrakratonska geotermalna polja (CD1). Visoki geotermalni potencijal i odgovarajuće karakteristike ležišta nužne su za što bolju proizvodnju. Ukoliko određene karakteristike ne zadovoljavaju kriterije koriste se različiti postupci stimulacije ležišta (Zimmermann i Brandt, 2008). U planinskim pojasevima toplina se prenosi kretanjem meteorske vode kroz duboko ukorijenjene rasjede i izrazito propusne zone, što često rezultira stvaranjem toplih izvora. Ova geotermalna polja poznata su kao polja hidrotermalnog-orogenog tipa (CD2). U orogenim pojasevima morski sedimenti služe kao zadrživači topline. Budući da sol ima

visoku toplinsku vodljivost, kora iznad solnih formacija može funkcionirati kao geotermalni spremnik (Noack i sur., 2010).

Prema Moeck (2014) petrotermalna-vruća suha polja (CD3) kontrolirana su rasjedima te ih karakteriziraju vruće i suhe formacije. Entalpija ovih polja veća je od one hidrotermalnih polja. Toplina iz Moho sloja (Mohorovičićev diskontinuitet) i radioaktivnost unutar magmatskog masiva glavni su izvor njihove topline. Propusnost i poroznost ovih formacija je izrazito niska. Stoga, uvjeti nisu idealni za proizvodnju geotermalne vode. S obzirom da ova polja nemaju dovoljno prirodne cirkulacije fluida, ubrizgavanje fluida kroz umjetne ili prirodne pukotine kontrolira proizvodnju topline. Kako bi se poboljšali uvjeti u kristalinskim bazenima, koristi se EGS tehnologija. Hidrauličko frakturiranje ovakvih formacija omogućava nastanak pukotina između proizvodne i utisne bušotine čime stijene postaju prirodni izmjenjivač topline.

3. METODE ISPITIVANJA LEŽIŠTA

Napuštene bušotine posjeduju veliki broj podataka o svojim karakteristikama. Ipak, određene karakteristike koje se tiču toplinskih svojstava ponekad je nužno definirati. Ukoliko određeni podaci nisu poznati potrebno je odraditi određena ispitivanja kako bi se potvrdila iskoristivost ležišta u geotermalne svrhe.

Prije planiranja geotermalnih sustava radi se početna studija hidrauličkih i toplinskih svojstava terena, kao i ekonomskih, tehničkih i projektnih čimbenika. Toplinski parametri mogu se dobiti iz raznih izvora. Brojna regionalna geološka istraživanja pružaju javno dostupne podatke koji opisuju toplinska i hidraulička svojstava većine geoloških formacija na lokalitetu. Laboratorijske procjene dodatan su izvor toplinskih i hidrauličkih karakteristika ležišta. Vrijednosti toplinske vodljivosti mogu se odrediti u laboratoriju iz jezgri bušotine. In situ ispitivanja hidrauličkog i toplinskog odziva treća su opcija pridobivanja toplinskih i hidrauličkih karakteristika specifičnih za teren, ali su i skuplja. Ispitivanja toplinskog odziva (TRT) i ispitivanja toplinskog traga (TTT) primjeri su terenskih ispitivanja (García Gil i sur., 2022).

3.1 Laboratorijska ispitivanja toplinske vodljivosti

Prema Clarke i sur. (2008) sljedeće laboratorijske tehnike koriste se za mjerenje toplinske vodljivosti uzoraka stijena:

1. Standardni postupak ispitivanja (ASTM E1225, 2004):

Uzorak stijene postavlja se između dva diska referentnog materijala poznate toplinske vodljivosti. Usporedba zabilježenog temperaturnog gradijenta uspoređuje se s nastalim u referentnom materijalu, što omogućuje preciznu kvantifikaciju protoka topline kroz uzorak. Vodljivost materijala uzorka također se uspoređuje s vodljivošću poznatog materijala.

2. Standardni postupak ispitivanja (ASTM C518, 2004):

Ispitivanje svojstava prijenosa topline u stabilnom stanju provodi se pomoću opreme za mjerenje protoka topline. Uređaj za mjerenje protoka topline mjeri toplinski tok u stacionarnom stanju kroz ravne ploče. Mjerač protoka topline mora biti kalibriran prema

pretpostavljenom rasponu toplinskog toka, tipu materijala, kondukciji, debljini sloja i temperaturnom gradijentu.

3. Ispitivanje zaštićenom vrućom pločom (ASTM C177, 2004):

Ova metoda nije česta s obzirom da zahtjeva velike količine uzorka. Prvenstveno se koristi za ocjenu toplinske vodljivosti velikih uzoraka toplinsko-izolacijskih materijala za građevinske konstrukcije.

4. Metoda vruće žice (ASTM C1113, 2004):

Uključuje umetanje grijaćeg elementa u aksijalnu rupu unutar ispitnog uzorka te mjerenje radijalne temperaturne razlike na uzorku. Smatra se prikladnom za geološka ispitivanja stijena.

5. Metoda iglene toplinske sonde (ASTM D5334, 2008):

Koristi se na nekonsolidiranim uzorcima sedimenta. Grijaća nit u obliku igle prenosi toplinu kroz ispitivani uzorak. Pritom, temperatura se mjeri pomoću sonde bazirane na termoparovima. Tijekom ispitivanja mjere se varijacije temperature dok se ne uspostave stabilni uvjeti. Rezultati mjerenja omogućavaju izračunavanje toplinske vodljivosti. Ova metoda kalibrirana je pomoću materijala poznatih svojstava.

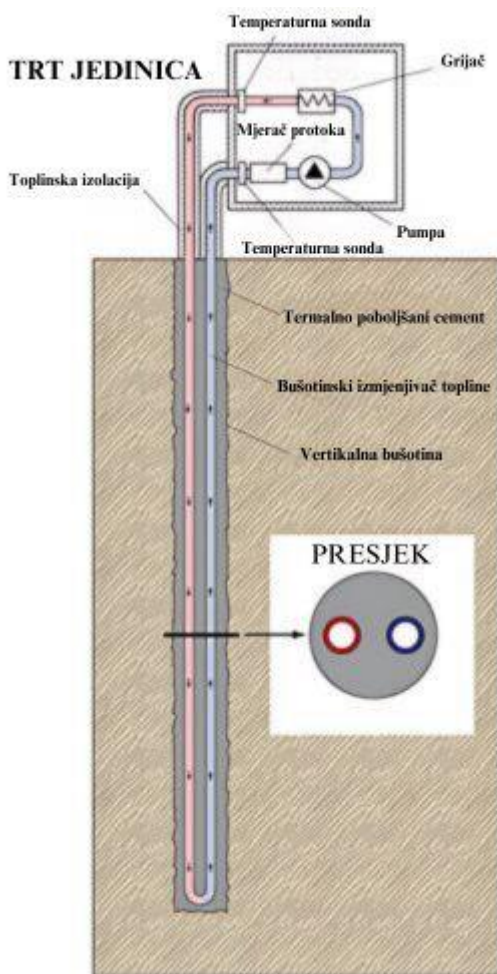
6. Metoda toplinskog pulsa s dvostrukom iglom:

Za razliku od tehnike s jednom iglom, ova tehnika koristi drugu žarnu nit s dodatnim sensorom temperature. Grijanom toplinskom sondom proizvodi se toplinski puls te se prati toplinski odgovor tijekom vremena. Budući da se radi o prolaznom procesu, ova metoda omogućuje procjenu toplinske difuznosti koja se razlikuje od toplinskog kapaciteta (Bristow i sur., 1994). Važno je napomenuti da se tumačenje ovih testova često oslanja na pretpostavku da se uzorak ponaša kao beskrajni homogeni medij.

3.2 Ispitivanje toplinskog odziva (TRT)

Metoda je ispitivanja na licu mjesta kojom se određuje efektivna toplinska vodljivost tla i toplinski otpor bušotinskog izmjenjivača topline (Morgensen, 1983). Toplinski otpor bušotinskog izmjenjivača topline odnosi se na prijenos topline unutar izmjenjivača zatvorene petlje. Ispitivanje toplinskog odziva (engl. *Thermal Response Test*) uglavnom se izvodi prije izgradnje plitkih geotermalnih postrojenja s bušotinskim izmjenjivačem topline (BHE – engl. *Borehole Heat Exchanger*) kako bi se odredio optimalan broj, raspored i dubina njihove

ugradnje (García Gil i sur., 2022). TRT mjeri prijenos topline između vertikalnog izmjenjivača topline i ležišnih formacija (Slika 3-1.).



Slika 3-1. Shema TRT ispitivanja bušotinskog izmjenjivača topline U-oblika (García Gil i sur., 2022)

Učinkovitost prijenosa topline varira ovisno o toplinskoj vodljivosti zemlje i toplinskom otporu bušotinskog izmjenjivača topline. Tijekom TRT-a, zagrijana radna tekućina prolazi kroz bušotinski izmjenjivač zatvorene petlje (Lim, K. B. i sur., 2006). Površinska TRT jedinica (Slika 3-2.) bilježi ulaznu i izlaznu temperaturu tekućine nosača topline u redovitim intervalima tijekom vremenskog razdoblja od 10-70 sati. Temperaturna razlika između izlaza i ulaza u korelaciji je s prijenosom topline između bušotinskog izmjenjivača topline i formacije pri konstantnoj brzini protoka fluida. Također, postoje TRT sustavi s reverzibilnim dizalicama topline koji mogu provoditi ispitivanja rasipanja, odnosno analiziraju apsorpciju topline hlađenjem tla (Witte, 2001).



Slika 3-2. Površinska TRT jedinica (Lim, K. B. i sur., 2006)

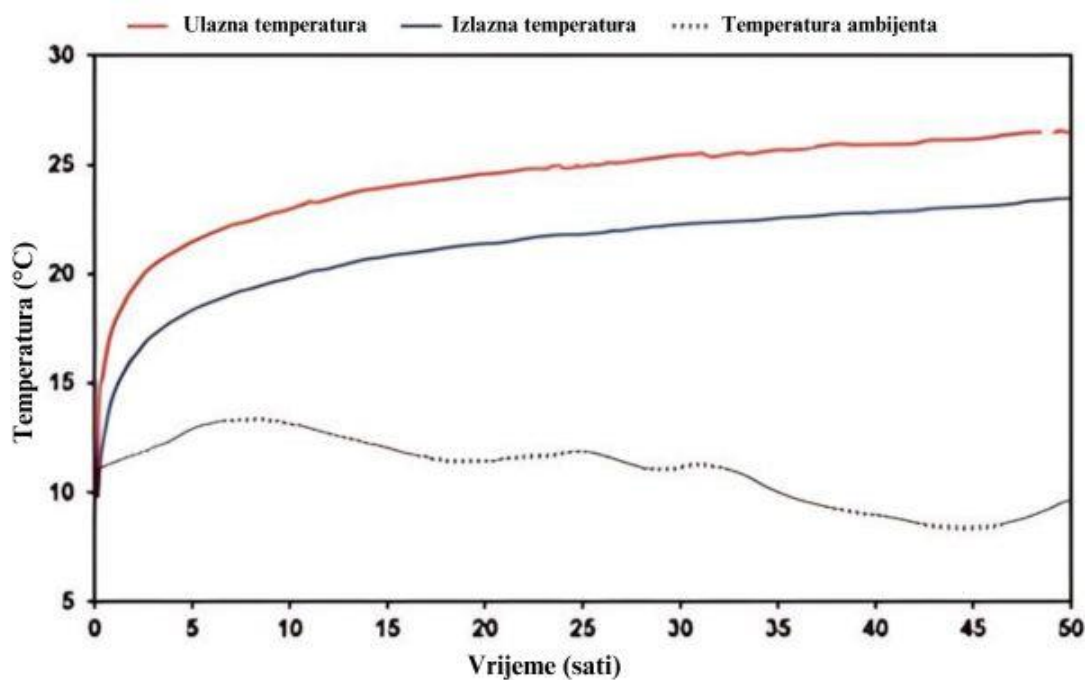
Osim tradicionalnih TRT jedinica, postoji nekoliko vrsta poboljšanih testova geotermalnog odziva (EGRT – engl. *Enhanced Geothermal Response Test*) za otkrivanje temperatura na različitim dubinama duž bušotinskog izmjenjivača topline. Ova ispitivanja služe za procjenu distribucije toplinskih karakteristika ležišta (Wagner i Rohner, 2008). Prvi EGRT-ovi koristili su senzore tipa termoparova za praćenje temperature na različitim dubinama. Dok modernije izvedbe koriste optička vlakna i termoaktivnu žicu koja može grijati tlo duž cijele duljine izmjenjivača. (Luo i sur., 2015).

3.2.1 Izvedba TRT-a

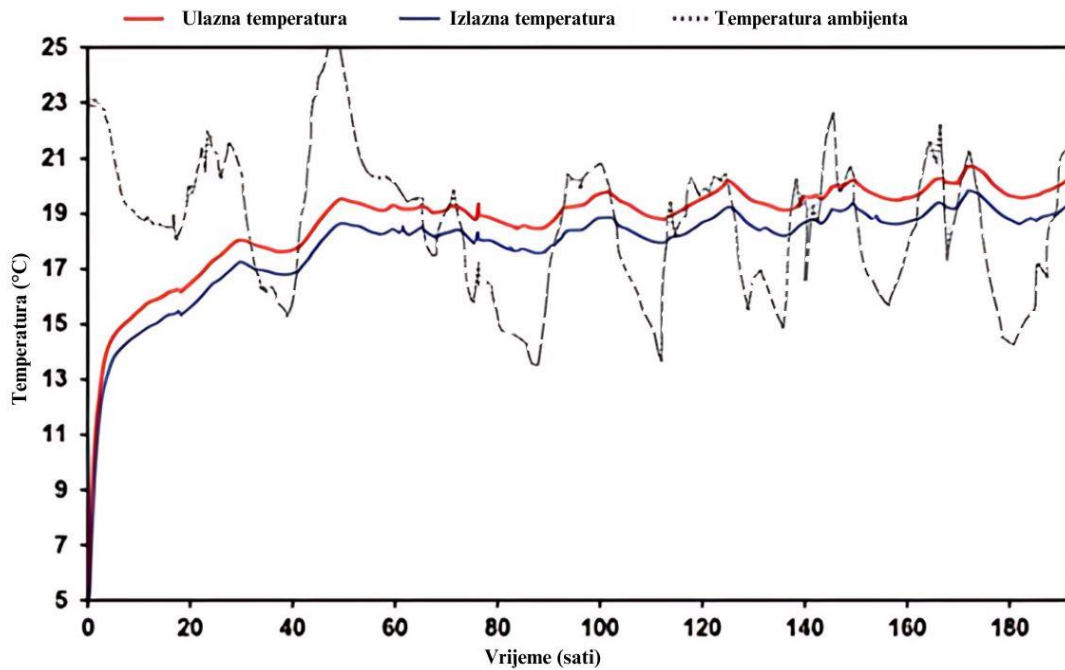
Kako bi se provelo ispitivanje toplinskog odziva potrebna je bušotina u kojoj se nalazi bušotinski izmjenjivač topline (BHE) jednostruke ili dvostruke U-cijevi, okružen toplinski poboljšanom žbukom. Nakon ulijevanja žbuke potrebno je pričekati nekoliko dana da se dovoljno stvrdne. Nakon što bušotinski izmjenjivač topline postigne toplinsku ravnotežu s okolinom, recirkulacijom radne tekućine omogućava se proračun prosječne temperature unutar izmjenjivača topline. Prije mobilizacije pumpe preporučljivo je odrediti početni profil temperature unutar BHE, s obzirom da se tijekom cirkulacije radnog fluida temperatura homogenizira (García Gil i sur., 2022).

Konvencionalni TRT počinje prijenosom topline na cirkulirajući fluid pri konstantnoj brzini protoka. Energija zagrijavanja uglavnom je u rasponu od 20 do 80 W/m. Prenesena topline i protok moraju ostati konstantni tijekom ispitivanja kako bi se osigurala točnost podataka. Okolnosti poput vremena, sunčeve svjetlosti ili infiltracije padalina također mogu utjecati na točnost podataka. Zbog toga, vanjski vodovod i sama TRT jedinica zahtijevaju toplinsku izolaciju te se tijekom ispitivanja mjeri temperatura okolnog zraka kako bi se utvrdila učinkovitost izolacije (Bandos i sur., 2011).

Tijekom ispitivanja temperaturnog odziva prate se brzina protoka radnog fluida, temperatura na ulazu i izlazu bušotinskog izmjenjivača topline te temperaturna razlika između cirkulacijske pumpe i sustava grijanja/hlađenja. Slike 3-3. i 3-4. pokazuju temperaturu okoline kao i evoluciju temperature radnog fluida.



Slika 3-3. Rezultati neometanog TRT-a bušotinskog izmjenjivača topline U-oblika (Poulsen i Alberdi-Pagola, 2015)



Slika 3-4. Rezultati TRT-a BHE U-oblika pod utjecajem okoline (Vieira i sur., 2017)

Temperatura okolnog zraka obično se prati i prikazuje zajedno s temperaturama izmjenjivača kako bi se osiguralo da rezultati ispitivanja nisu ometeni. Isprekidana linija na Slici 3-4. prikazuje temperaturu okoline te njen negativan utjecaj na rezultate TRT-a.

3.2.2 Matematički modeli

Dijele se na numeričke i analitičke te se koriste prilikom terenskog određivanja termalnih karakteristika ležišta. Metodom pokušaja i pogreške nastoji se uskladiti njihove rezultate s terenskim podacima. Kalibracija podrazumijeva prilagodbu parametara na sustavan način sve dok se razlika između izmjerenih podataka i matematičkih modela ne svede na minimum. Numerički i analitički modeli omogućavaju uvrštavanje poznatih parametara kako bi se mogli učinkovito predvidjeti nepoznati parametri. Njihova preciznost ovisi o aspektima kao što su kvaliteta podataka, točnosti odabranog modela prijenosa topline te preciznosti i učinkovitosti optimizacije algoritma. Kako bi se postigla što veća preciznost potrebno je broj nepoznatih parametara svesti na minimum.

3.2.2.1 Analitički modeli

Model beskonačnog linearnog izvora (ILS) često se koristi za tumačenje standardnih testova toplinskog odziva (TRT) i poboljšanih testova geotermalnog odziva (EGRT). ILS

model pretpostavlja isključivo kondukciju kao mehanizam prijenosa topline. Također pretpostavlja izotropan, homogen i beskonačan medij s neograničenim i stalnim izvorom topline. Ostali modeli, poput modela beskonačnog cilindričnog izvora (ICS – engl. *Infinite Cylindrical Source*), modela konačnog linearnog izvora (FLS – engl. *Finite Linear Source*) i modela pokretnog beskonačnog linearnog izvora (MILS – engl. *Moving Infinite Linear Source*), mogu se koristiti kada je advekcija topline zbog protoka podzemne vode bitan faktor. ILS model je često prikladan za rješavanje inverznog problema i tumačenje TRT rezultata u istraživanjima koja uključuju niske propusnosti ili nezasićene terene. ILS model može se koristiti i aproksimirati (Carslaw i Jaeger, 1986) prema Jednadžbi 3-1:

$$T(r, t) \cong T_0 + \frac{q^o}{4\pi\lambda} \left(\ln \left(\frac{4\alpha t}{r^2} \right) - \gamma \right) \quad (3-1)$$

gdje su:

- T_0 – početna temperatura [K]
- q^o – toplinski tok [W/m]
- λ – toplinska vodljivost [W/m K]
- α – toplinska difuzivnost [m²/s]
- t – vrijeme [s]
- r – radijalna udaljenost od bušotinskog izmjenjivača topline [m]
- γ - Euler-Mascheronijeva konstanta [$\gamma \approx 0,577215$]

Ukoliko je $r = r_s$ prosječna temperatura \bar{T} može se izraziti kao (Wagner i Clauser, 2005):

$$\bar{T} = T(r_s, t) + q^o R_I = \frac{q^o}{4\pi\lambda} \ln(t) + q^o R_I + \frac{q^o}{4\pi\lambda} \left(\ln \left(\frac{4\alpha}{r_s^2} \right) - \gamma \right) + T_0 \quad (3-2)$$

gdje su:

- R_I - toplinski otpor BHE i stijenke bušotine [K/W]
- T_i – temperatura tekućine na ulaznoj cijevi [K]
- T_o – temperatura tekućine na izlaznoj cijevi [K]
- $\bar{T} = (T_i - T_o)/2$

Provođenjem supstitucija:

$$a = \frac{q^o}{4\pi\lambda} \quad (3-3)$$

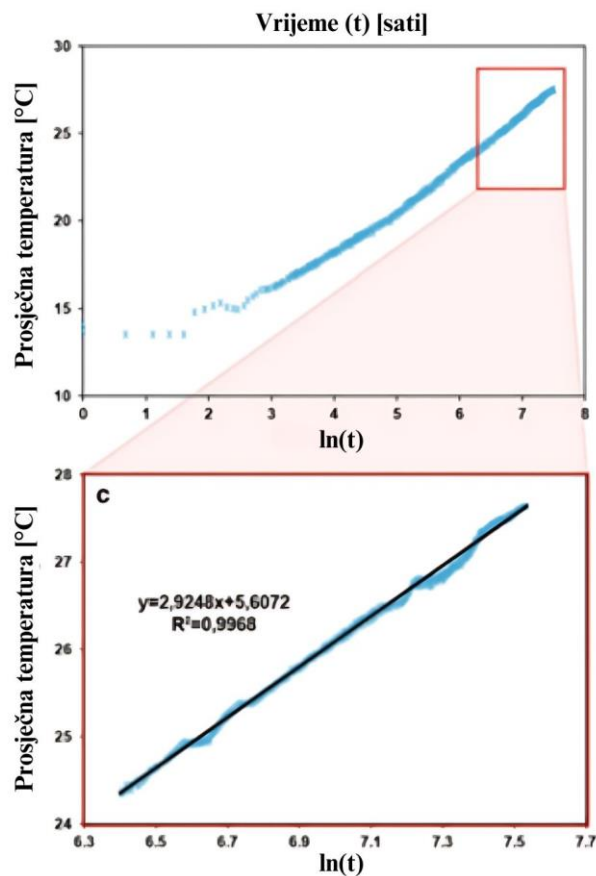
$$c = q^o R_I + \frac{q^o}{4\pi\lambda} \left(\ln\left(\frac{4\alpha}{r_s^2}\right) - y \right) + T_0 \quad (3-4)$$

Jednadžba 3-2 može biti napisana u obliku:

$$\bar{T} = a \ln(t) + c \quad (3-5)$$

Jednadžba 3-5 pokazuje da srednja temperatura stjenke bušotine ima linearni odnos s vremenom na prirodnoj logaritamskoj skali, odnosno funkcija je ravna linija. Konstanta proporcionalnosti (a) raste s povećanjem protoka topline iz geotermalnog izmjenjivača topline. Niža vrijednost konstante proporcionalnosti označava veću toplinsku vodljivost. Odnosno, što je veća sposobnost medija da prenosi toplinu, veća je temperatura stijenke izmjenjivača topline za istu brzinu zagrijavanja (TRT za grijanje). Nagib krivulje Jednadžbe 3-5 je $a = \Delta\bar{T}/\Delta \ln(t)$ te ga je moguće odrediti grafički ili pomoću linija regresije (Kurevija i sur., 2017) (Slika 3-5.). Uvrštavanjem ovog zaključka u Jednadžbu 3-5 toplinska vodljivost zemlje može se izračunati na sljedeći način:

$$\lambda = \frac{q^o \Delta \ln(t)}{4\pi \Delta \bar{T}} \quad (3-6)$$



Slika 3-5. Primjena konvencionalnog TRT-a pri određivanju toplinske vodljivosti (Kurevija i sur., 2017)

Tijekom ranijih faza TRT-a, prijenos topline utječe na neposredno područje oko BHE, odnosno ne ponaša se kao beskonačni linearni izvor (ILS) (Slika 3-5.). Utjecaj BHE opada kako vrijeme prolazi te se toplina ravnomjernije raspršuje terenom. Nakon odgovarajućeg vremenskog razdoblja ILS model pruža prihvatljivu aproksimaciju. Za proračun potrebnog vremena (Jednadžba 3-7.) može se koristiti jednadžba 3-6. Međutim, za korištenje Jednadžbe. 3-6. potrebna je prethodna procjena efektivne toplinske vodljivosti i toplinskog kapaciteta terena.

$$t > \frac{20r_s^2}{\alpha} \quad (3-7)$$

Jednadžba toplinskog otpora bušotinskog izmjenjivača topline može se dobiti pomoću jednadžbi 3-2 i 3-4 te poznate vrijednosti toplinske vodljivosti:

$$R_I = + \frac{c-T_o}{q^o} - \left(\frac{1}{4\pi\lambda} \left[\ln\left(\frac{4\alpha}{r_s^2}\right) - y \right] \right) \quad (3-8)$$

Konvencionalni TRT ima određena ograničenja zbog korištenih pretpostavki ILS modela (Stauffer i sur., 2013):

1. U prvim satima TRT-a nije moguće ispravno analizirati termalne karakteristike terena.
2. Ravnomjerni prijenosi topline korištenjem TRT jedinice teško je ostvariti u praksi . Stoga se načelo vremenske superpozicije, unatoč svojoj analitičkoj složenosti, može koristiti za upravljanje promjenjivim toplinskim tokovima.
3. ILS model zanemaruje prisutnost uzlaznog vertikalnog toka topline koji stvara geotermalni gradijent. Numerička istraživanja pokazala su da ILS model podcjenjuje efektivnu toplinsku vodljivost tla i toplinski otpor izmjenjivača topline za vrijednosti gradijenta 0-52 K/km. (Wagner i sur., 2012).
4. S obzirom da geotermalni izmjenjivači topline prolaze kroz formacije različitih hidrauličkih i toplinskih svojstava, pretpostavka o homogenosti i izotropiji je upitna. Pretpostavka efektivne toplinske vodljivosti ležišta također nije ispravna zbog heterogenosti ležišta (Raymond i sur., 2011b). Numerički modeli i testovi poboljšanog geotermalnog odziva (EGRT) preporučuju se u slučajevima značajne geološke varijabilnosti. (Raymond i Lamarche, 2013).

5. ILS model ne uzima u obzir regionalno horizontalno kretanje podzemne vode. Na rezultate TRT-a značajno utječu horizontalne brzine podzemne vode veće od 0,1 m/dan (Signorelli i sur., 2007). Uzimanje u obzir hidrogeoloških svojstava podzemne vode je preporučivo, posebno u scenarijima gdje se ležište koristi za skladištenje toplinske energije.
6. Vertikalni tok podzemne vode također može utjecati na rezultate TRT-a potičući konvekciju topline unutar BHE. Ovaj problem najčešće se javlja kod loše konstruiranih BHE ili BHE bez termalno poboljšane žbuke. (Sanner i sur., 2005).

3.2.2.2 Numerički modeli

Numerički modeli uključuju vremenske i prostorne varijable koje analitički modeli ponekad zanemaruju. Regionalni i lokalni tok podzemne vode između bušotina, dizajn bušotinskog izmjenjivača topline koji se koristi za TRT i heterogenosti toplinskih i hidrauličkih svojstava zemlje faktori su koje treba uzeti u obzir. Iako se smatra da numerički modeli oduzimaju više vremena od analitičkih modela, poboljšanje grafičkih sučelja smanjuje trajanje postupka.

SBM (engl. *Superposition Borehole Model*), jedan je od prvih algoritama kojim je moguće modelirati trodimenzionalno temperaturno polje jednog ili više BHE (Eskilson, 1986.). SBM algoritam zajedno s alatom za optimizaciju GenOpt, integriran je u komercijalni programski paket TRNSBM za simulaciju prijenosa topline u tlu i predviđanje ležišnih parametara (Witte i van Gelder, 2006).

Godine 1999. napravljen je jednodimenzionalni numerički model s automatskim kalibracijskim algoritmom za procjenu parametara iz TRT podataka (Shonder i Beck, 1999). Ovaj numerički model koristi model cilindričnog izvora za simulaciju temperatura i protoka ulaznih i izlaznih cijevi. U usporedbi s analitičkim modelom beskonačnog cilindričnog izvora (ICS) pokazuje veću točnost u ranijim fazama TRT-a. Iste godine izrađen je dvodimenzionalni prijelazni numerički model konačnog volumena (Yavuzturk i Spitler, 1999). Algoritam ovog modela omogućio je procjenu toplinske vodljivosti tla te toplinskog otpora izmjenjivača topline.

Wagner i Clauser (2005) predložili su korištenje trodimenzionalnog algoritma konačne razlike (SHEMAT) za procjenu toplinskih parametara iz TRT-a. Ova inverzna tehnika

omogućila je procjenu ne samo efektivne toplinske vodljivosti tla i otpornosti izmjenjivača topline, već i toplinskog kapaciteta tla. Kod ove metode temperaturne varijacije na izlaznoj cijevi iznosile su $\pm 2\%$.

Signorelli i sur. (2007) ponudili su trodimenzionalni je model za TRT analizu pod nazivom FRACTure. Ovaj model inspirirao je razvoj drugih numeričkih programa kao što su HydroGeoSphere (Raymond i sur., 2011a) i FEFLOW (Diersch i sur., 2011), koji su simulirali povezani protok podzemne vode i topline čime se omogućila interakciju s BHE. FEFLOW se smatra najstabilnijim i najpouzdanijim programom za modeliranje protoka podzemne vode i prijenosa topline, kako u znanstvenoj tako i u praktičnoj uporabi. FEFLOW analiza vertikalne bušotine neujednačenog geotermalnog gradijenata i toplinske disperzivnosti dokazala je da razmak cijevi BHE i neujednačeni geotermalni gradijenti imaju mali učinak ($< 10\%$) na vodljivosti i otpore (Wagner i sur., 2012). Međutim, mijenjanje vrijednosti toplinske disperzivnosti može imati značajan utjecaj na toplinski otpor zatvorenog geotermalnog izmjenjivača topline ukoliko je protok podzemne vode konstantan.

3.3 Ispitivanje toplinskim tragom (TTT)

Ispitivanje toplinskim tragom (TTT – engl. *Thermal Tracer Test*) provodi se kada hidrauličko ispitivanje koristi toplinu kao lokator. U početku koristio se za ispitivanje učinaka klimatskih promjena (Brouyère i sur., 2004), odnosa između rijeka i vodonosnika (Vogt i sur., 2010), identifikaciju preferencijalnih zona protoka ili zona pukotina u bušotinama (Pehme i sur., 2013) te proučavanje dinamike prošlih utjecaja na okoliš (Engelhardt i sur., 2013). No, prve primjene topline kao lokatora fokusirane su na proučavanje karakteristika skladišta topline u geološkim formacijama niske propusnosti pomoću bušotinskih izmjenjivača topline otvorene petlje (Sauty i sur., 1982).

Kod ispitivanja plitke geotermalne energije mogu se koristiti jedan od dva oblika TTT-a: s brzim odgovorom ili dugoročni testovi (Wagner i sur., 2014). Dugoročni TTT-ovi provode se kako bi se procijenio kapacitet termalnog skladišnog sustava. Prilikom testa utiskuju se velike količine tople vode uz dugoročno praćenje promjena temperature iste. (Wu, i sur., 2008). Sekundarna svrha dugoročnog TTT-a je procjena stope povrata toplinske energije u usporedbi s unesenom količinom. TTT-ovi s brzim odgovorom testovi su koji se koriste za određivanje toplinskih i hidrauličkih parametara tla (Wagner i sur., 2014). Voda temperature različite od temperature tla utiskuje se u kratkim intervalima. Pritom se prate temperaturne

promjene korištenjem piezometra ili mjerenjem temperature u susjednim bušotinama, ukoliko postoji mogućnost.

3.4 Terenska procjena hidrauličkih parametara

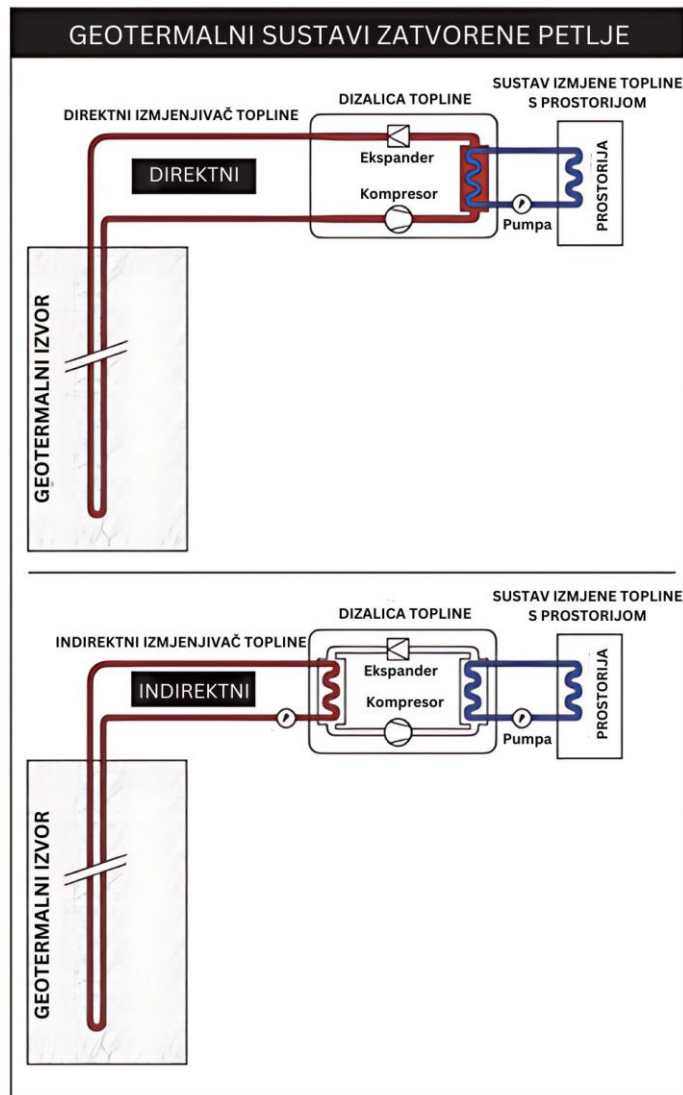
Poznavanje hidrauličke vodljivosti nužno je za određivanje prijenosa topline, ponajviše kod konvekcijskog širenja topline. Poroznost ima značajan utjecaj na hidrauličko i toplinsko ponašanje poroznih medija. Hidraulička karakterizacija traži se kod projektiranja plitkih geotermalnih postrojenja, pogotovo onih s otvorenim sustavom cirkulacije radnog fluida (Banks, 2012). Test pumpanja rutinska je praksa koja omogućava određivanje hidrauličke vodljivosti i koeficijenta skladištenja. Naprednije tehnike, kao što je hidraulička topografija (Bohling i Butler, 2010) ili metode izravnog guranja (Butler i sur., 2002), koriste se za dobivanje detaljne prostorne raspodjele hidrauličke propusnosti u sustavima u kojima dominiraju uvjeti niske propusnosti.

4. GEOTERMALNI SUSTAVI

Za proizvodnju geotermalne energije iz napuštenih suhих bušotina nužni su remontni radovi. Ovisno o karakteristikama ležišta postoje dva načina prenamjene takvih bušotina. Razlikuju se sustavi otvorene i sustavi zatvorene petlje.

Otvoreni sustavi desetljećima se koriste za ekstrakciju toplinske energije ležišta. No, smatra se da samo 2% zemljinih geotermalnih resursa se nalazi u propusnim područjima, korisnim za konvencionalne tehnologije (Geiser i sur., 2016). Sustavi otvorene petlje imaju najmanje jednu utisnu i jednu proizvodnu bušotinu. Radna tekućina ubrizgava se u ležište putem utisne bušotine. Uslijed cirkulacije, fluid apsorbira toplinu iz okolnih stijena te se u konačnici proizvodi na proizvodnoj bušotini. Kao što je već navedeno, za povećanje efikasnosti sustava može se koristiti tehnologiju poboljšanog geotermalnog sustava (EGS), koja podrazumijeva umjetnu propusnost nastalu hidrauličkim ili kiselinskim frakturiranjem. Međutim, bitno je naglasiti da tehnologija hidrauličkog frakturiranja zahtijeva značajna kapitalna ulaganja i nosi opasnost od uzrokovanja seizmičke aktivnosti. Nadalje, sustavi otvorene petlje često se suočavaju s problemima kao što su korozija, kamenac i gubitak tekućine. Potaknuti protok tekućine kroz formacije može uzrokovati začepljenje pora i gubitak propusnosti, što može rezultirati smanjenjem protoka radnog fluida (Evans i sur., 2011).

Sustavi zatvorene petlje uglavnom se koriste za plitku geotermalnu kako bi se ekstrahirale niske do srednje temperature ležišta. Ovi sustavi osiguravaju da tekućina ne dođe u izravan dodir sa okolnim stijenama, čime se izbjegavaju ranije navedeni problemi. Brojna eksperimentalna istraživanja i računalne simulacije potvrdili su da slaba toplinska vodljivost stijena predstavlja značajnu prepreku za ovakve sustave. Najčešća upotreba zatvorenog sustava bušotinskog izmjenjivača topline je za potrebe dizalica topline. Pritom se koriste jedan od dva moguća geotermalna sustava zatvorene petlje: sustav izravne ekspanzije (DX) ili neizravne ekspanzije (IX) (Slika 4-1.). Sustavi s izravnom ekspanzijom koriste kruženje radnog fluida toplinske pumpe izravno kroz stijenske formacije. Unutar bušotine nalaze se hermetički zatvorene cijevi, koje služe kao isparivač/kondenzator za toplinsku pumpu. Dok sustavi s neizravnom ekspanzijom koriste radni fluid koji cirkulira kroz zatvoreni sustav podzemnih cijevi kako bi prenio toplinu na drugi zatvoreni krug koji je dio dizalice topline. (García Gil i sur., 2022)



Slika 4-1. Shematski prikaz direktnog i indirektnog zatvorenog sustava bušotinskog izmjenjivača toplote (García Gil i sur., 2022)

DX-GSHP sustavi poznati su po svojoj izvrsnoj učinkovitosti koja se pripisuje velikom rasponu radnih temperatura pri kojima radna tekućina primarnog kruga (unutar dizalice toplote) obavlja svoju funkciju. Npr. u fazi grijanja radni medij R407c može raditi na temperaturama ispod $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, a u fazi hlađenja na temperaturama višim od $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Također, prednost ovog sustava je postojanje samo jednog procesa izmjene toplote čime se smanjuju gubici energije uslijed prijenosa toplote. U sustavima direktne ekspanzije obično se koriste metalne cijevi. Metalne cijevi, u odnosu na PVC cijevi koje se koriste u indirektnim sustavima, imaju veću toplinsku vodljivost (Soni i sur., 2016).

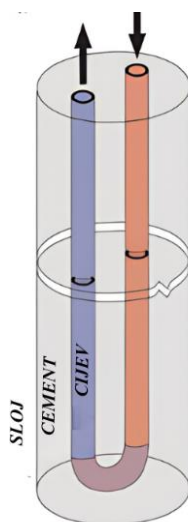
Zbog postojanja opasnosti od gubljenja radnog medija opasnog po okoliš uslijed djelovanja korozije te narušavanja strukturnog integriteta cijevi uslijed mehaničkih opterećenja okolnih stijena, DX sustavi su izgubili naklonost pojedinih zemalja. Ovaj problem nastoji se riješiti razvojem sustava cjevovoda od nehrđajućeg čelika koji koriste CO₂ kao radni fluid. Dodatni nedostatak ove tehnologije je mogućnost curenja ulja iz kompresora u radni fluid što bi moglo povećati sile trenja prilikom cirkulacije radnog medija (Gao i sur., 2017b).

U usporedbi sa sustavima izravne ekspanzije, sustavi neizravne ekspanzije koriste ekološki prihvatljive radne medije kao što su alkoholi i glikoli. Ove se metode smatraju održivijima budući da izbjegavaju potencijalni utjecaj fluorouglijika na okoliš. Za rad u uvjetima ispod nule, radna tekućina obično je mješavina vode i 20-25% antifrizna. Kemikalije protiv smrzavanja koje se obično koriste su etilen glikol, propilen glikol, metanol ili sol, s promjenjivim omjerima miješanja o kojima ovisi točka njihova smrzavanja.

4.1 Vrste bušotinskih izmjenjivača topline

Uglavnom, zatvoreni bušotinski izmjenjivač topline skup je PVC cijevi koje čine izolirani sustav za izmjenu topline s ležištem. Međutim, bušotinski izmjenjivači topline mogu se razlikovati po svom dizajnu.

Slika 4-2. prikazuje sklop cijevi u obliku slova U okružen toplinski ojačanom smjesom od bentonita i cementa (termalna žbuka). Jedan kraj ovog izmjenjivača topline služi za injektiranje radnog fluida, dok se na drugom kraju cijevi proizvodi zagrijani fluid.



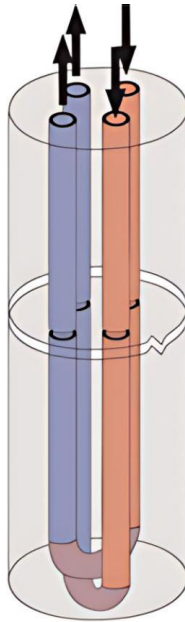
Slika 4-2. Bušotinski izmjenjivač topline U-oblika (García Gil i sur., 2022)

Smjesa djeluje kao termoaktivni materijal koji poboljšava kontakt između cijevi i tla, a pritom smanjuje djelovanje podzemne vode na ugrađene cijevi. Bentonitno-cementna smjesa može se izostaviti u tlima s tvrdim stijenama što dovodi do ispunjavanja prstenastog područja između stijena i sklopa cijevi slojnom vodom. Njene prednosti su visoka toplinska vodljivost, niska viskoznost za učinkovito pumpanje, potpuno punjenje prstenastog prostora, čvrsto prianjanje na cijevi, minimalno slijeganje nakon postavljanja te dugotrajno održavanje toplinskih svojstava (Chiasson, 2016). Slika 4-3. prikazuje bušotinu ispunjenu termalnom žbukom.



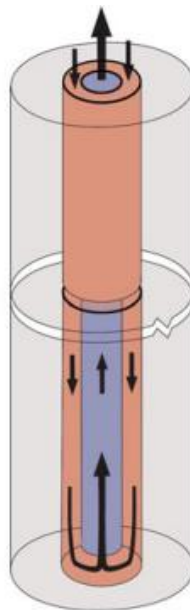
Slika 4-3. Bušotinski izmjenjivač topline s dvostrukom U-cijevi obavijen termalnom žbukom (García Gil i sur., 2022)

Dizajn izmjenjivača topline s dvostrukom U-cijevi ima dva kraja za ulazak tekućine-nosača topline i dva kraja za izlazak (Slika 4-4.). Uvođenjem drugog kruga poboljšane su toplinske performanse izmjenjivača te je postignuta učinkovitija cirkulacija topline putem prisilne konvekcije. Ovaj dizajn rezultira smanjenjem toplinskog otpora, što omogućava smanjenje dubine bušotine za 22% u usporedbi s jednostrukim U-izmjenjivačima za istu količinu toplinske energije (Yavuzturk i Chiasson, 2002). Stoga, ovakvi izmjenjivači topline omogućavaju bolju iskoristivost plićih napuštenih bušotina.



Slika 4-4. Dvostruki bušotinski izmjenjivač topline U-oblika (García Gil i sur., 2022).

Treća vrsta bušotinskog izmjenjivača topline je sustav koaksijalnih cijevi. Sastoji se od unutarnje i vanjske cijevi. Moguća su dva načina cirkuliranja radne tekućine. Fluid za prijenos topline može ulaziti kroz prstenasti prostor između dvije cijevi, a izlaziti kroz središnju cijev (Slika 4-5.). Druga izvedbe podrazumijeva korištenje središnje cijevi za injektiranje, a prstenastog prostor za proizvodnju zagrijanog fluida.



Slika 4-5. Koaksijalni bušotinski izmjenjivač topline (García Gil i sur., 2022)

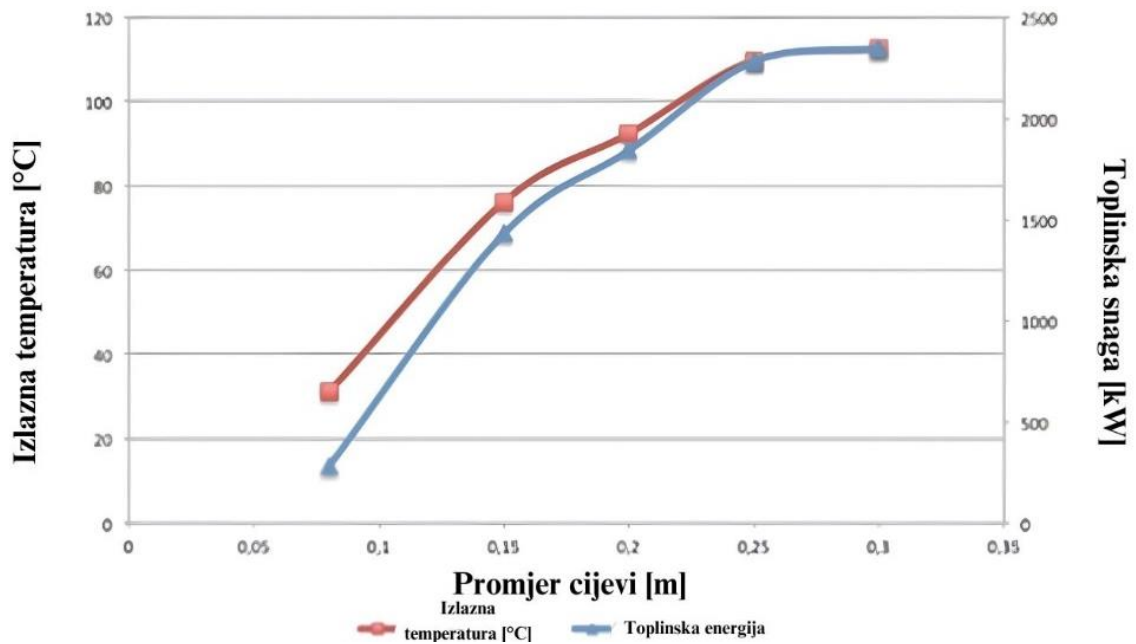
4.2 Dimenzioniranje koaksijalnih cijevi

Zbog svoje visoke fleksibilnosti, isplativosti i općenito dobrih toplinskih svojstava, polietilenske cijevi visoke gustoće (HDPE – engl. *High-Density Polyethylene*) preporučuju se za jednostruke U-cijevi. HDPE je izuzetno otporan na habanje te nadmašuje metalne cijevi u otpornosti na koroziju. Također, omogućuju termofuzijsko zavarivanje, što rezultira čvrstim spojevima. Polietilenske cijevi uglavnom imaju vanjski promjer između 26 i 40 mm. Tijekom rada izmjenjivača topline radna tekućina se tlači na 2-3 bara, dok se tlačna ispitivanja cjevovoda izvode na 10-16 bara.

Dimenzioniranje promjera cijevi podrazumijeva maksimiziranje brzine protoka, smanjenje trenja te pravilan odabir i konfiguriranje cirkulacijske pumpe. Turbulentno strujanje je poželjno s obzirom da poboljšava izmjenu topline između stijenke cijevi i tekućine nosača topline. Međutim, turbulentno strujanje povećava pad tlaka uslijed trenja. Stoga je nužna optimizacija protoka. Reynoldsov broj (Re), bezdimenzionalna je mjera koja pokazuje svojstva protoka fluida. Kritičan je za predviđanje turbulentnog ponašanja. Vrijednosti Re veće od 4000 ukazuju na turbulentno strujanje. Gustoća i dinamička viskoznost tekućine mijenjaju se s temperaturom, pritom utječući na ponašanje protoka. Varijacije u omjerima miješanja antifrizna također mijenjaju gustoću i viskoznost tekućine nosača topline.

4.2.1 Promjer cijevi izmjenjivača topline

U slučaju centralnog koaksijalnog BHE povećanje promjera unutarnje cijevi direktno utječe na smanjene volumena prstenastog prostora s obzirom da je promjer bušotine fiksna. Smanjenje površine presjeka prstenastog prostora rezultira povećanom brzinom fluida za konstantan protok, što poboljšava konvekciju topline pri silaznom toku radnog fluida. Međutim, povećanjem promjera središnje cijevi, brzina toka fluida unutar nje se smanjuje te tekućina ima više vremena za gubitak topline prilikom uzlaznog toka. Stoga, učinkovita izolacija nužna je za sprječavanje prijenosa topline iz uzlazne cijevi na prstenasti prostor. Slika 4-6. pokazuje da povećanje promjera dovodi do veće izlazne temperature i više toplinske energije proizvedene iz bušotine.

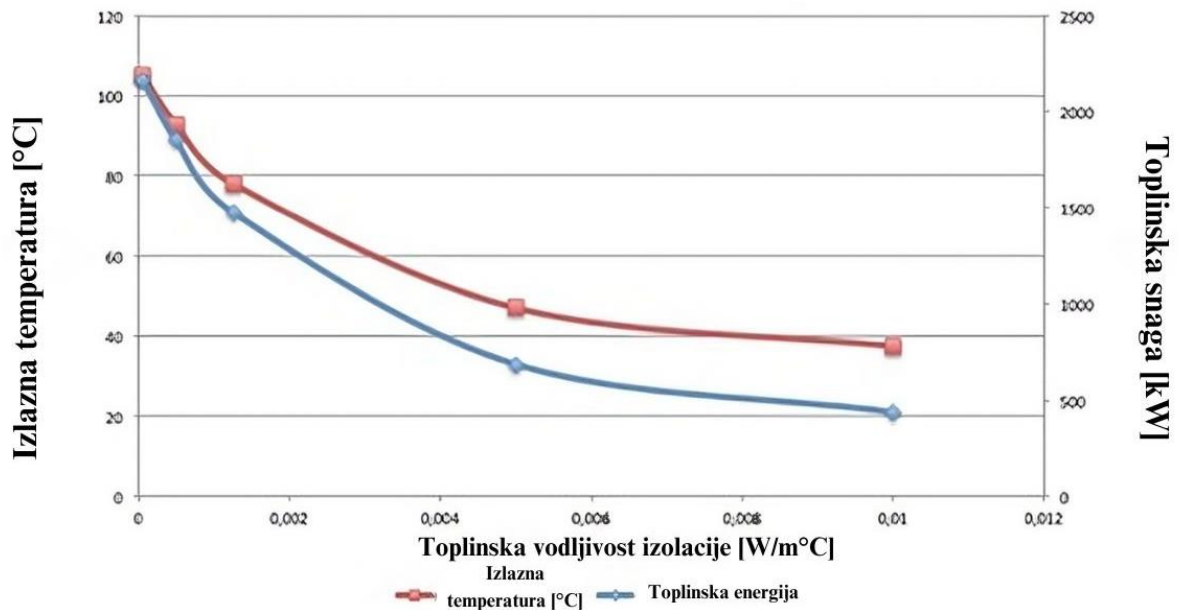


Slika 4-6. Dijagram utjecaja promjera cijevi BHE na temperaturu i toplinsku snagu radnog fluida (Sui i sur., 2018)

Kod koaksijalnog bušotinskog izmjenjivača topline s uzlaznim tokom kroz prstenasti prostor, smanjenjem promjera središnje cijevi raste temperatura fluida na izlazu iz bušotine. Veća površina prstenastog prostora omogućava bolju ekstrakciju topline za iste protoke. Također, uzrokuje povećanje pada tlaka što je potrebno kompenzirati snagom cirkulacijske pumpe.

4.2.2 Toplinska vodljivost materijala

Čelične cijevi imaju izrazitu toplinsku vodljivost stoga je stalna izmjena topline između radnog fluida i okoline neizbježna. Kako bi se ostvarilo bolju izolaciju poželjni su materijali niske toplinske vodljivosti (λ). Izolacija ima dvije funkcije. Prva ograničava kretanje topline između vanjske i unutarnje cijevi čime se postiže zadržavanje topline unutar unutarnje cijevi ukoliko se proizvodi kroz središnju cijev. Dok druga ograničava gubitak topline ulaznog fluida, što je nužno kada temperatura ulaznog fluida premašuje temperaturu gornjeg dijela bušotine (Templeton, 2013). Slika 4-7. prikazuje učinak povećanja stupnja izolacije BHE na izlaznu temperaturu tekućine i proizvedenu količinu toplinske energije. Naime, povećanje izolacije s $0,01 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ na $0,00005 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ rezultira rastom izlazne temperature za 182% zbog čega se izoliranje cijevi smatra isplativim pristupom.



Slika 4-7. Dijagram utjecaja izolacije cijevi BHE na temperaturu i toplinsku snagu radnog fluida (Sui i sur., 2018)

4.2.2.1 Plastične cijevi

Uglavnom se koriste za ekstrakciju malih temperatura plitkih bušotina. Prednost plastike je otpornost na uvjete koje potiču korodiranje metala i legura. Također, troškovi ugradnje plastičnih cijevi manji su u usporedbi s metalnim cijevima. Nedostatak plastike kao materijala je ograničenost raspona radnih temperatura. Većina plastika rastapa se na temperaturama iznad 60 °C. Toplinska vodljivost plastičnih cijevi je u rasponu od 0,14 do 0,46 W/m°C što je niže od efektivne toplinske vodljivosti podzemnih formacija koja je u rasponu 1,5 do 3,0 W/m°C. Tablica 4-1. prikazuje termoplastične materijale i njihovu toplinsku vodljivost (Mendrinis i sur., 2016).

Tablica 4-1. Toplinska vodljivost termoplastičnih materijala (Boudenne i sur., 2004; Verein Deutscher Ingenieure, 2010; Zhao i Ye, 2011; Wypych, 2016)

Termoplastični materijal	[W/(m°C)]
Akrilonitril butadien stiren (ABS)	0,16
Celulozni acetat butirat (CAB)	0,17-0,33
Polioksimetilen (POM)	0,42
HDPE	0,44
LDPE	0,35
PEX	0,41
Toplinski poboljšani HDPE	1,2-2,2

Polipropilen (PP)	0,23
Ojačani PP	0,15
Polivinil klorid (PVC)	0,16
Klorirani polivinil klorid (CPVC)	0,14
Poliviniliden fluorid (PVDF)	0,22
Poliamid-6 (najlon-6)	0,22
Polibutilen (PB)	0,22
Polifenilen oksid (PPO)	0,2
TPE	0,17

Mendrinis i sur. (2016) opisali su navedene plastike. Na temelju njihova opisa izrađena je Tablica 4-2. raspona radnih temperatura, radnog vijeka i cijene spomenutih plastika. Cijene i radni vijek materijala nije moguće precizno odrediti s obzirom da cijene variraju ovisno o stanju na tržištu, a radni vijek ovisi o uvjetima korištenja.

Tablica 4-2. Usporedba radnih temperatura, vijeka i cijena plastičnih materijala (Mendrinis i sur., 2016)

Termoplastični materijal	Temperature (°C)	Radni vijek (godine)	Cijena (€/toni)
Akilonitril butadien stiren (ABS)	-34 do 82	/	1500
Celulozni acetat butirac (CAB)	-18 do 60	/	/
Polioksimetilen (POM)	-18 do 77	/	2100
HDPE	-50 do 90	75	1400
LDPE	-50 do 85	75	1300
PEX (PEX-A)	-29 do 82 (-40 do 93)	75	1430
Polipropilen (PP)	-1 do 99	75	1300
Polivinil klorid (PVC)	-18 do 60	75	1470
Klorirani polivinil klorid (CPVC)	-18 do 80	/	1600
Poliviniliden klorid (PVDC)	4 do 71	/	1100
Poliviniliden fluorid (PVDF)	-18 do 135	/	1250
Poliamid-6 (najlon-6)	-34 do 80	/	/
Polibutilen (PB)	-18 do 99	/	2900
Polifenilen oksid (PPO)	-1 do 99	/	/
TPE	-10 do 100	/	5100

Na temelju ove tablice moguće je zaključiti da su cijene većine plastika slične. No, mora se uzeti u obzir da su cijene ovih materijala izrazito promjenjive te da je ovo gruba procjena njihove trenutne vrijednosti.

4.2.2.2 Metalne cijevi

Metalne cijevi uglavnom se koriste za revitalizaciju dubljih bušotina s obzirom da bolje podnose visoke temperature. Njihov nedostatak je narušavanje integriteta uslijed korozije. Odabir vrste metala i načina njihove zaštite utječe na brzinu djelovanja korozije na bušotinski izmjenjivač topline. Mendrinós i sur. (2016) opisali su svojstva različitih metalnih cijevi te načine koji im mogu produljiti životni vijek.

Meki čelik vrsta je čelika s niskim sadržajem ugljika (0,05 do 0,15%). Karakteriziraju ga jednostavnost izrade, široka dostupnost i niska cijena. Pri uvjetima pH vrijednosti manjima od 6 nužna je primjena zaštitnih metoda protiv korozije. Pri pH vrijednostima iznad 6 te koncentraciji klorida u podzemnoj vodi ispod 2% brzina korozije je u rasponu od 0,02 do 0,25 mm/god. Stoga, povećanje debljine stijenke za 5 mm produžuje radni vijek cijevi za 20 do 250 godina, ali i cijenu cijevi. Zbog niske granice tečenja mekani čelik otporan je na pucanja uslijed korozije te mu je stopa hrđanja manja za 40% u odnosu na standardni čelik. Ipak, lokalizirani napadi korozije mogu biti indicirani kloridnim ionom otopljenim u podzemnoj vodi uz prisustvo kisika. Stoga, takvi primjeri korozije uglavnom se pojavljuju u gornjim dijelovima zone zasićenja vodom.

Najčešći način zaštite cijevi izmjenjivača topline je njihova izolacija vodonepropusnim cementom. Ukoliko ova metoda nije primjenjiva cijev je moguće zaštititi korištenjem katodne zaštite. Za katodnu zaštitu koristi se žrtvena anoda od magnezija, aluminijska ili cinka koja sama inducira električnu struju ili trajna anoda koju napaja površinski izvor električne energije. Vruće pocinčavanje čelika često se koristi kako bi se oko cijevi stvorila vanjska žrtvena anoda. U uvjetima pogodnim za nastanak korozije zaštita se troši te na taj način ne dopušta korodiranje čeličnih cijevi. Ovisno o uvjetima, ovakva zaštita može produžiti životni vijek 30-80 godina za 0,1 mm debljine sloja cinka, no pritom se povećavaju troškovi cijevi za 50-60%. Bitumenski, polietilenski i epoksidni premaz od staklenih ljuskica alternativni su premazi. Bitumenski premazi su najstariji te ih se sve više zamjenjuje polietilenskima. Epoksidni premazi još uvijek se rijetko koriste usprkos dobrim svojstvima i mogućnošću produljenja životnog vijeka za 20 godina zbog povećanja troškova na cijevi za 60 %.

Cijevi od nehrđajućeg čelika imaju odličnu zaštitu od korozije zbog visokog udjela kroma (12% ili više). Krom uslijed reakcije s kisikom stvara zaštitni sloj krom-oksida koji onemogućava nastanak korozije. Nehrđajući čelik ima ovakva svojstva u uvjetima gdje

postoji kisik. Stoga, pri većim dubinama jednako brzo korodira kao obični čelik. Općenito, cijena nehrđajućeg čelika veća je za 50 % u odnosu na ugljični čelik, a određene legure mogu biti još skuplje.

Nikal i njegove legure također su vrlo otporne na koroziju u neutralnim i blago kiselim sredinama. U uvjetima visoke temperature s visokim koncentracijama klorida legure nikla osjetljive su na rupičastu i pukotinsku koroziju. (Miller, 1980). Pri istim uvjetima aluminij ima slična svojstva. Dok pri niskim temperaturama pokazuje visoku otpornost na koroziju. Bakar i njegove legure podložne su općoj ili lokalnoj koroziji u okruženjima koja sadrže podzemne vode s velikim koncentracijama sulfida, sulfata, amonijaka ili klorida. U neagresivnom okruženju bušotinski izmjenjivači topline od spomenutih metala mogu imati dugi radni vijek.

Titanske cijevi imaju najbolju otpornost na koroziju. U kontaktu s vodom ili zrakom dolazi do reakcije kojom nastaje TiO_2 koji služi kao odlična zaštita od korozije. Izradom legura titana s paladijem, niklom ili molibdenom dodatno se smanjuje vjerojatnost pojave korozije. Pogodan je za primjenu u uvjetima visoke temperature. S obzirom na izdržljivost materijala smatra se da je životni vijek titana veći od tisuću godina. Nedostatak titana je što je katodan, a to svojstvo potiče korodiranje metala koji se nađu u galvanskom spoju s njim. Legure kobalta također se mogu koristiti u visokotemperaturnim uvjetima te ne podliježu pucanju uslijed naprezanja sulfida.

Toplinska vodljivost svih metala izrazito je visoka. Tablica 4-3. navodi toplinske vodljivosti najčešće korištenih metala za revitalizaciju bušotine.

Tablica 4-3. Vrijednosti toplinskih vodljivosti metala i legura (Mendrinov i sur., 2016)

Metal/legura	W/(m°C)	
	T=0 °C	T=20 °C
Aluminij	236	
Bakar	401	
Željezo	84	
Meki čelik		43
Nehrđajući čelik		50
<i>X20 Cr11 MoV 1 (SS 410)</i>		24
<i>X2 Cr18 Ni10 C0,03 max (SS 304L)</i>		17
<i>X6 Cr18 Ni10 C0,08 max (SS 304)</i>		15
<i>X15 Cr20 Ni12 Si1,5 max (SS 310)</i>		13
<i>X6 Cr17 Ni12 Mo2 Ti (SS 316)</i>		13
Nikal	94	
<i>Ni 99.2 (Nikal 201)</i>	72,2	
<i>Ni - Cu30 - Fe2 (Monel)</i>	21,4	
<i>Ni - Cr15 Fe (Nichrome)</i>	14,5	
<i>Ni - Cr 21 Mo9 (Inconel 825)</i>	11,4	
<i>Ni - Mo16 Cr15 W3 (Hastelloy C22)</i>	9,6	
<i>Ni - Cr22 Mo9 Nb (Hastelloy)</i>	9,3	
Tantal	57	
Titanij	22,5	
<i>Ti - Al6V4</i>		6,5

Bakar i aluminij imaju najveće toplinske vodljivosti pri temperaturi od 0 °C. Materijali tako visokih toplinskih vodljivost nisu u stanju zadržati toplinu. Stoga, materijale tako velike toplinske vodljivosti nije isplativo koristiti u sustavima bušotinskih izmjenjivača topline.

4.3 Projektiranje radnog fluida

Cilj je dimenzionirati parametre koji imaju najveći utjecaj na količinu prikupljene toplinske energije (Q). U svrhu optimizacije sustava koriste se simulacije koje uspoređuju izlaznu temperaturu ekstrahiranih fluida i akumulaciju topline iz bušotine. Programi korišteni za potrebe simulacije temelje se na sljedećoj jednadžbi:

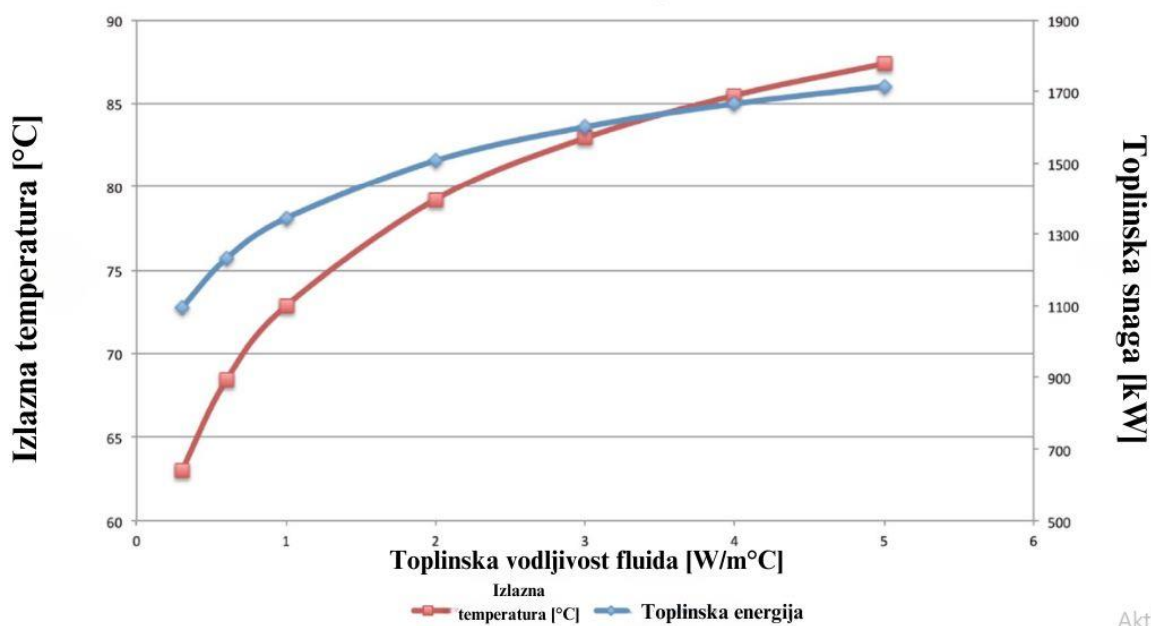
$$Q = mC_p\Delta T = mC_p(T_{out} - T_{in}) \quad (5-1)$$

gdje su m masa tekućine, C_p specifični toplinski kapacitet, T_{in} ulazna temperatura radne tekućine u bušotinski izmjenivač topline, T_{out} izlazna temperatura radne tekućine koja cirkulira sustavom, i ΔT temperaturna razlika između izlazne i ulazne temperature.

Prilikom analize osjetljivosti jedan parametar se modificira unutar odgovarajućeg raspona, dok se ostali parametri drže na zadanim vrijednostima. Parametri odabrani za analizu su gustoća radne tekućine, toplinska vodljivost, specifični toplinski kapacitet, viskoznost i ulazna temperaturu, kao i učinci izolacije i promjeri cijevi.

4.3.1 Toplinska vodljivost radne tekućine

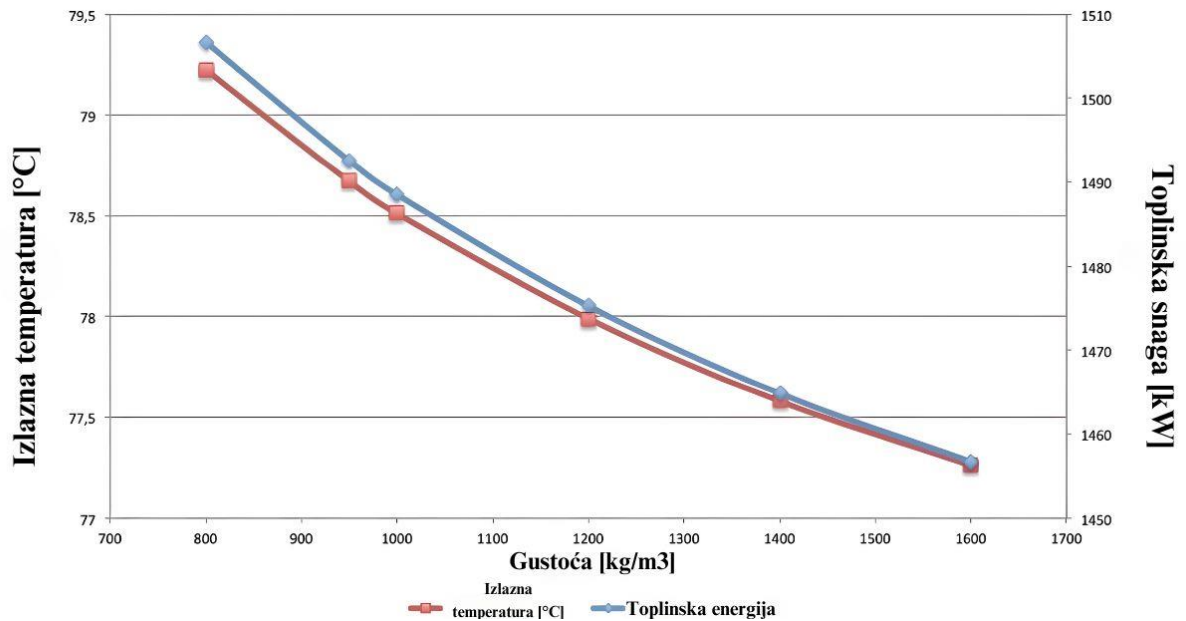
Toplinska vodljivost sposobnost je materijala da provodi toplinu. Prema Slici 4-8., povećana toplinska vodljivost radne tekućine rezultira povećanom izmjenom topline između radne tekućine i okolnih stijena. Tekućine s većom toplinskom vodljivošću apsorbiraju više topline, što rezultira višom izlaznom temperaturom. No, primjetno je da se povećanjem toplinske vodljivosti brzina preuzimanja topline smanjuje. Povećanje toplinske vodljivosti fluida s $0,3 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$ na $5,0 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$ rezultira povećanjem izlazne temperature od $63,02$ do $87,38 \text{ }^\circ\text{C}$. Velika razlika u izlaznim temperaturama fluida različite toplinske vodljivost dokazuje važnost ovog parametra.



Slika 4-8. Dijagram utjecaja toplinske vodljivosti fluida na temperaturu i toplinsku snagu radnog fluida (Sui i sur., 2018)

4.3.2 Gustoća radne tekućine

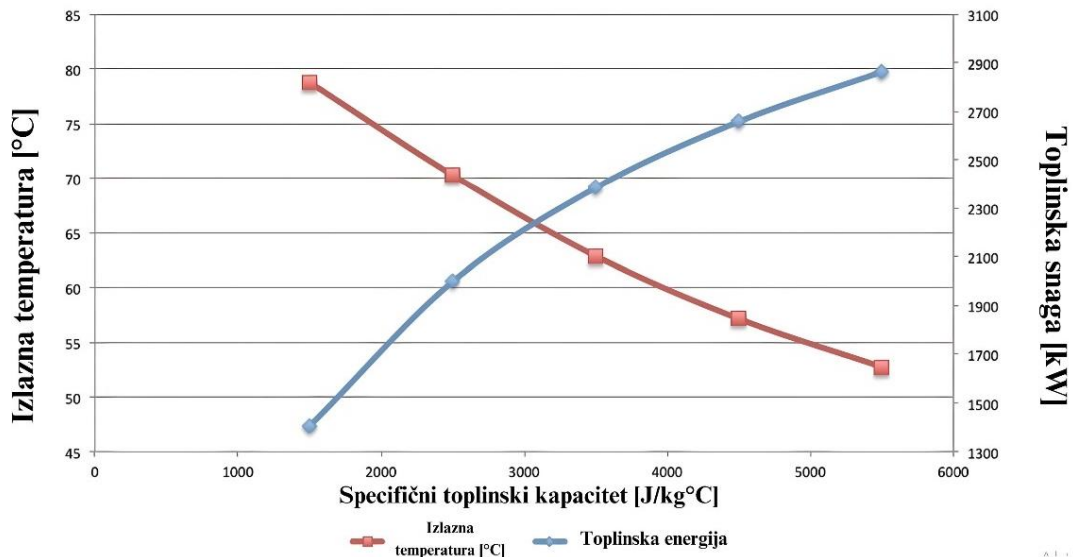
Kao što je vidljivo na Slici 4-9., u pravilu lakša tekućina rezultira nešto višom izlaznom temperaturom. Prema dijagramu, povećanje gustoće s 800 kg/m^3 na 1600 kg/m^3 utječe na promjenu izlazne temperature za samo $1,96 \text{ }^\circ\text{C}$, odnosno rezultira smanjenjem za $2,48\%$. Ovisno o toplinski potrebama, utjecaj povećanja gustoće radnog fluida na smanjenje izlazne temperature može biti bitan faktor.



Slika 4-9. Dijagram utjecaja gustoće fluida na temperaturu i toplinsku snagu radnog fluida (Sui i sur., 2018)

4.3.3 Specifični toplinski kapacitet

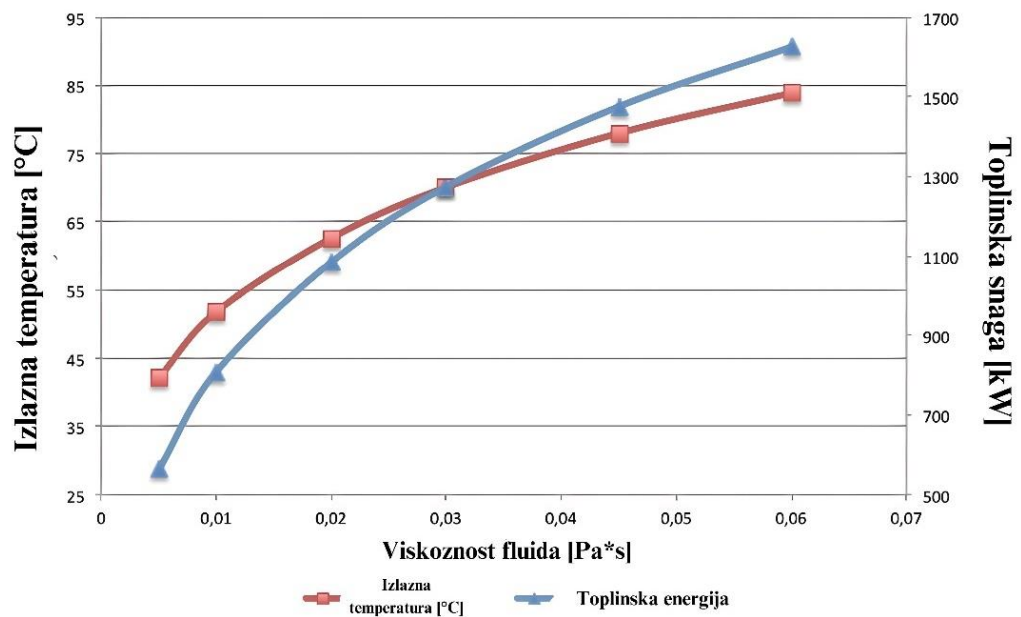
Specifični toplinski kapacitet količina je toplinske energije potrebne za podizanje temperature fluida za jedan stupanj Celzija po jedinici mase. Ova karakteristika bitno utječe na učinkovitost prijenosa topline. Slika 4-10. prikazuje smanjenje izlaznih temperatura prilikom povećanja specifičnog toplinskog kapaciteta. Porast specifičnog toplinskog kapaciteta sa $1500 \text{ J/(kg}^\circ\text{C)}$ na $5500 \text{ J/(kg}^\circ\text{C)}$ rezultira smanjenjem izlaznih temperatura sa 79 na $53 \text{ }^\circ\text{C}$. Prema tome manji specifični toplinski kapacitet rezultira boljim ishodom. Međutim, s obzirom da je toplinski kapacitet izravno proporcionalan toplini, opaža se obrnuti trend za ostvarivu toplinsku snagu (Sui i sur., 2018).



Slika 4-10. Dijagram utjecaja toplinskog kapaciteta na temperaturu i toplinsku snagu radnog fluida (Sui i sur., 2018)

4.3.4 Viskoznost

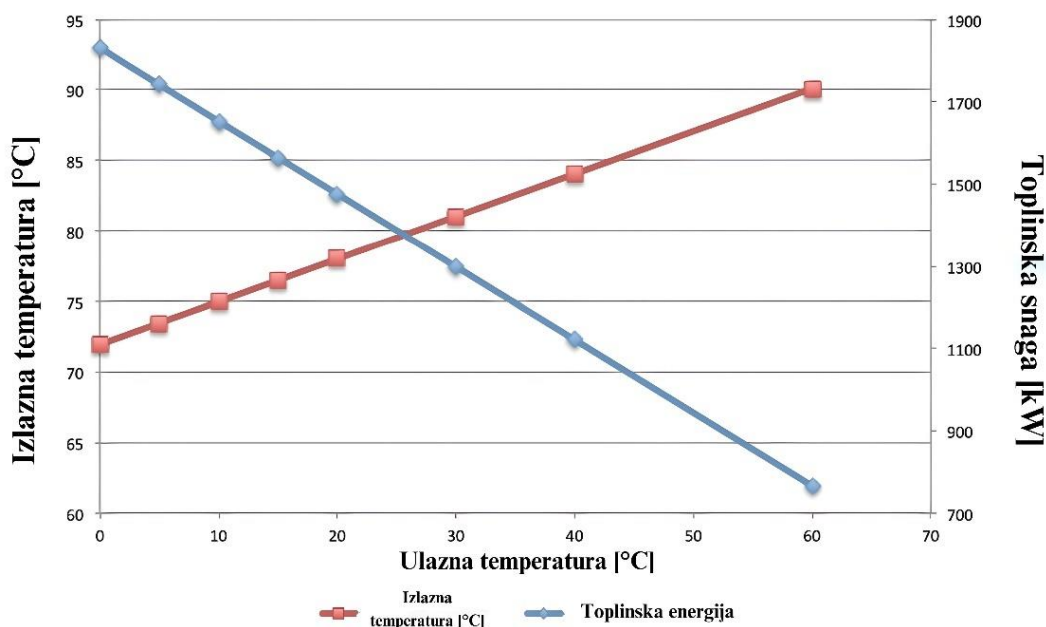
Viskoznost ima značajan utjecaj na karakteristike protoka bilo koje tekućine, utječući na aspekte poput režima protoka i pada tlaka. Prema Sui i sur. (2018), viskoznost utječe na konvektivni prijenos topline s obzirom da je bitan parametar za proračun vrijednosti Reynoldsovog i Prandtlovog broja. Kao što se vidi na Slici 4-11., viskoznost ima značajan utjecaj na temperaturu izlazne tekućine. Izlazna temperatura raste povećanjem viskoznosti. Porastom viskoznosti s 0,005 Pas na 0,1 Pas, izlazna temperatura raste za 98,9%.



Slika 4-11. Dijagram utjecaja viskoznosti na temperaturu i toplinsku snagu radnog fluida (Sui i sur., 2018)

4.3.5 Ulazna temperatura

Poznavanje temperature ubrizganog radnog fluida nužno je za određivanje izlaznih vrijednosti nakon punog ciklusa cirkulacije. Kako bi se postigle veće izlazne temperature, koje su često prikladnije za proizvodnju električne energije, moraju se uzeti u obzir veće ulazne temperature. Niže ulazne temperature povećavaju toplinsku snagu sustava jer je temperaturna razlika između ulazne i izlazne temperature veća. Kao što je vidljivo na Slici 4-12., linearno povećanje ulazne temperature s 0 na 60 °C rezultira linearnim povećanjem izlazne temperature. U ovom primjeru, temperatura fluida na ulazu 60 °C rezultira temperaturom na izlazu od 90,11 °C. Niske ulazne temperature, kao što je 0 °C, istražuju se kako bi se teoretski objasnio trend, ali je malo vjerojatno da će se koristiti u komercijalnom geotermalnom sustavu. Prema istraživanju Sui i sur. (2018) ulazna temperatura od 0 °C rezultira izlaznom temperaturom od 71,93 °C.



Slika 4-12. Dijagram utjecaja ulazne temperature na temperaturu i energiju izlaznog fluida (Sui i sur., 2018)

Projektiranje radnih fluida treba uzeti u obzir geotermalni gradijent i dubinu bušotine. Karakteristike radnih tekućina imaju značajan utjecaj na učinkovitost izmjenjivača topline. To uključuje ne samo termodinamičke kvalitete, već i toplinsku stabilnost, toksičnost, zapaljivost i utjecaj na okoliš. Pravilan izbor radne tekućine ključan je za sprječavanje oštećenja postrojenja, kontrolu operativnih troškova i troškova održavanja te ublažavanje mogućih opasnosti za ljude i prirodni okoliš (Astolfi i sur., 2014).

5. PRIJENOS TOPLINE KOD ZATVORENOG SUSTAVA BUŠOTINSKOG IZMJENJIVAČA TOPLINE

Sastavne komponente ovog sustava su porozni medij i elementi izmjenjivača topline. (cjevovod, tekućina za prijenos topline i toplinski poboljšana žbuka). Svaka komponenta ima izravan dodir s jednom ili više komponenti sustava, ali i neizravan s ostalim komponentama.

U osnovi, učinkovitost prijenosa topline između izmjenjivača topline i zemlje određena je dimenzijama bušotine i razmakom između cijevi (Sui i sur., 2018). S obzirom na inherentnu složenost prijenosa topline razvijeni su brojni matematički modeli s različitim stupnjevima kompliciranosti. Slijedeći primjeri daju gotovi oblik formula za proračun energetskih bilanci različitih dizajna bušotinskih izmjenjivača topline.

5.1 Bušotinski izmjenjivači topline U-oblika

Energetska bilanca ulazne cijevi definirana je Jednadžbom 5-1.:

$$(c\rho)_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = b_{ig}(T_i - T_g) + \lambda_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} - (vc\rho)_{fi} \frac{\partial T_i}{\partial z} \quad (5-1)$$

Izraz s lijeve strane jednakosti predstavlja energiju pohranjenu u komponenti. Odnosi se na promjenu temperature cijevi kao funkcije njezinog toplinskog kapaciteta. Prvi izraz s desne strane jednakosti opisuje prijenos topline kao funkciju toplinske povezanosti (ili toplinskog otpora) i temperaturne razlike između ulazne cijevi i toplinski poboljšanog cementa koji ju okružuje. Drugi izraz odnosi se na kondukciju topline kroz materijal cijevi i tekućine unutar cijevi u vertikalnom smjeru (z-os), a treći izraz na advekciju topline niz cijev u smjeru z osi. Jednadžba 5-2. prikazuje energetsku bilancu izlazne cijevi koju se može interpretirati jednako kao jednadžbu ulazne cijevi.

$$(c\rho)_o \frac{\partial T_o}{\partial t} = b_{og}(T_o - T_g) + \lambda_o \frac{\partial^2 T_o}{\partial z^2} - (vc\rho)_{fo} \frac{\partial T_o}{\partial z} \quad (5-2)$$

U scenariju hlađenja temperatura ulazne cijevi veća je od temperature toplinski poboljšane žbuke, što rezultira negativnim učinkom prijenosa topline, odnosno otpuštanjem topline u komponentu žbuke. Stoga, prvi član s desne strane jednadžbe bit će negativan.

Prijenos topline iz ulazne cijevi sustava u toplinski poboljšanu žbuku odvija se putem kondukcije i advekcije što znači da su drugi i treći izraz desne strane jednadžbe pozitivni. Po izlazu medija iz sustava ($z = dz$) temperatura na izlazu mora biti niža od temperature na ulazu. Ukoliko radni medij na kraju ulaznog dijela cijevi ima temperaturu višu od toplinski poboljšane žbuke, toplina će se nastaviti raspršivati radijalno tijekom kretanja radnog medija kroz izlazni dio cijevi. Pritom, mehanizam prijenosa topline identičan je mehanizmu ulazne cijevi, samo u manjem rasponu zbog manje temperaturne razlike između radnog medija i toplinski poboljšane žbuke.

$$(c\rho)_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = b_{gi}(T_g - T_i) + b_{go}(T_g - T_o) + \lambda_g \frac{\partial^2 T_g}{\partial z^2} \quad (5-3)$$

Jednadžba 5-3. definira toplinsku ravnotežu unutar toplinski poboljšane žbuke. Desna strane ove jednadžbe sadrži izraze koji se odnose na razliku temperatura između cijevi i termalno poboljšanog cementa na ulazu i izlazu s obzirom da je cement direktno povezan s oba dijela cijevi. U scenariju hlađenja oba bi izraza bila pozitivna jer temperature ulaznih i izlaznih cijevi premašuju temperature toplinski poboljšane žbuke. S obzirom na iznimno nisku hidrauličku vodljivost materijala, u smjeru z-osi postoji samo kondukcija.

5.2 Dvostruki geotermalni izmjenjivači topline u obliku slova U

Parcijalne energetske bilance za ulazne cijevi 1 i 2 definirane su Jednadžbama 5-4 i 5-5:

$$(c\rho)_{i1} \frac{\partial T_{i1}}{\partial t} = b_{i1g}(T_{i1} - T_g) + \lambda_{i1} \frac{\partial^2 T_{i1}}{\partial z^2} - (vc\rho)_{f_{i1}} \frac{\partial T_{i1}}{\partial z} \quad (5-4)$$

$$(c\rho)_{i2} \frac{\partial T_{i2}}{\partial t} = b_{i2g}(T_{i2} - T_g) + \lambda_{i2} \frac{\partial^2 T_{i2}}{\partial z^2} - (vc\rho)_{f_{i2}} \frac{\partial T_{i2}}{\partial z} \quad (5-5)$$

A parcijalne energetske bilance izlaznih cijevi 1 i 2 definirane su Jednadžbama 5-6 i 5-7:

$$(c\rho)_{o1} \frac{\partial T_{o1}}{\partial t} = b_{o1g}(T_{o1} - T_g) + \lambda_{o1} \frac{\partial^2 T_{o1}}{\partial z^2} - (vc\rho)_{f_{o1}} \frac{\partial T_{o1}}{\partial z} \quad (5-6)$$

$$(c\rho)_{o2} \frac{\partial T_{o2}}{\partial t} = b_{o2g}(T_{o2} - T_g) + \lambda_{o2} \frac{\partial^2 T_{o2}}{\partial z^2} - (vc\rho)_{f_{o2}} \frac{\partial T_{o2}}{\partial z} \quad (5-7)$$

Kod ovakvog dizajna, četiri cijevi istovremeno djeluju na toplinski poboljšanu žbuku. Stoga, jednadžba koja opisuje toplinsku ravnotežu toplinski poboljšane žbuke nadograđuje

se uvođenjem dvaju izraza koji definiraju utjecaj ulaznog i izlaznog dijela dodatne cijevi (Jednadžba 5-8):

$$(c\rho)_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = b_{gi1}(T_g - T_i) + b_{go1}(T_g - T_{o1}) + b_{gi2}(T_g - T_{i2}) + b_{go2}(T_g - T_{o2}) + \lambda_g \frac{\partial^2 T_g}{\partial z^2} \quad (5-8)$$

5.3 Prstenasti koaksijalni geotermalni izmjenjivači topline

Koaksijalni bušotinski izmjenjivač topline sastoji se od tri komponente: dvije cijevi i toplinski poboljšane žbuke. Za razliku od izmjenjivača U-oblika, izlazna cijev ovog dizajna nije u dodiru s toplinski poboljšanom žbukom. Izlazna cijev manjeg je promjera od vanjske, odnosno ulazne cijevi. Prstenasti prostor između ovih dviju cijevi služi za ulaz radne tekućine. Stoga su ulazna i izlazna cijev u izravnom dodiru. Vanjska strana ulazne cijevi u neposrednom je dodiru sa stijenkom bušotine, odnosno toplinski poboljšanom žbukom. Energetska ravnoteža u ulaznoj cijevi opisana je pomoću Jednadžbe 5-9:

$$(c\rho)_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = b_{ig}(T_i - T_g) + b_{io}(T_i - T_o) + \lambda_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} - (vc\rho)_{fi} \frac{\partial T_i}{\partial t} \quad (5-9)$$

Izlazna cijev u izravnom je dodiru samo s ulaznom cijevi. Stoga, parcijalna diferencijalna jednadžba izlazne cijevi je sljedeća:

$$(c\rho)_o \frac{\partial T_o}{\partial t} = +b_{oi}(T_o - T_i) + \lambda_o \frac{\partial^2 T_o}{\partial z^2} - (vc\rho)_{fo} \frac{\partial T_o}{\partial t} \quad (5-10)$$

Jednadžba 5-11 prikazuje diferencijalnu jednadžbu toplinski poboljšane žbuke koja je u dodiru samo s ulaznom cijevi:

$$(c\rho)_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = b_{gi}(T_g - T_i) + \lambda_g \frac{\partial^2 T_g}{\partial z^2} \quad (5-11)$$

5.4 Centralni koaksijalni geotermalni izmjenjivači topline

Ovakav dizajn koaksijalnog izmjenjivača topline razlikuje se po zamjeni funkcija unutrašnje i vanjske cijevi, odnosno utisna cijev nalazi se u središtu. Prilikom cirkulacije radni fluid izlazi kroz prstenasti prostor izmjenjivača topline. Sljedeće jednačbe opisuju toplinsku povezanost unutarnje cijevi, vanjske cijevi i termalno pojačanog cementa :

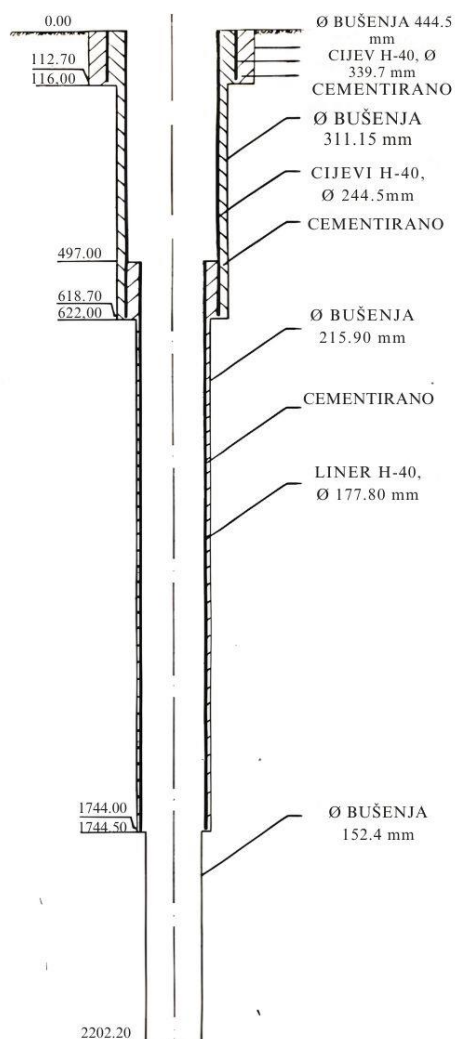
$$(c\rho)_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = b_{io}(T_i - T_o) + \lambda_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} - (vc\rho)_{fi} \frac{\partial T_i}{\partial z} \quad (5-12)$$

$$(c\rho)_o \frac{\partial T_o}{\partial t} = b_{og}(T_o - T_g) + b_{oi}(T_o - T_i) + \lambda_o \frac{\partial^2 T_o}{\partial z^2} - (vc\rho)_{fo} \frac{\partial T_o}{\partial z} \quad (5-13)$$

$$(c\rho)_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = b_{go}(T_g - T_o) + \lambda_g \frac{\partial^2 T_g}{\partial z^2} \quad (5-14)$$

6. REVITALIZACIJA BUŠOTINE SAVICA-1

Planirana dubina bušotine Savica-1 iznosila je 2120 m. Ova dubina trebala je omogućiti istraživanje tercijarnih naslaga koje do tog trenutka nisu bile istražene na tom području. Stoga, njena izrada dala je uvid u razvoj naslaga jugoistočnog dijela zagrebačkog akvifera i dubljih vodonosnih horizonata. U konačnici izbušeno je 2202,2 m. Do dubine 116 m bušeno je profilom promjera 17 1/2" (444,5 mm) nakon čega je ugrađena i cementirana uvodna kolona zaštitnih cijevi promjera 13 3/8" (339,7 mm) do dubine 112,7 m. Do dubine 622 m bušena je profilom promjera 12 1/4" (311,15 mm). Potom, ugrađena i cementirana je tehnička kolona zaštitnih cijevi promjera 9 5/8" (244,5 mm). Profilom promjera 8 1/2" (215,9 mm) bušena je do dubine 1744,5 m. Potom je od 497 m do 1744 m ugrađen liner promjera 7" (177,8 mm). Do konačne dubine od 2202,2 m izbušena je profilom promjera 6" (152,4 mm) te taj dio bušotine nije zacjevljen. Slika 6-1. prikazuje opisanu konfiguraciju bušotine.



Slika 6-1. Konfiguracija bušotine Savica-1 (Geotehnika – Zagreb, 1986)

Ova bušotina prolazi kroz šest litografskih jedinica. Do dubine 882 m prostire se Lonja formacija. Potom se nastavlja formacija Široko Polje do dubine od 1227 m, Kloštar Ivanić formacija do dubine 1449 m, Ivanić Grad formacija do dubine 1653 m i Prkos formacija do 1740 m. Prečec formacija prostire se od 1740 do 2202,2 m te taj dio kanala bušotine nije zacjevljen. Opis formacija nalazi se u Tablici 6-1.

Tablica 6-1. Opis formacija kroz koju prolazi bušotina Savica-1 (Geotehnika – Zagreb, 1986)

Formacija	Dubina (m)	Opis
Lonja formacija	0 - 882 m	Kroz krovinski dio formacije izmjenjuju se ošljunak, saglinjeni pijesak i plastična glina. Zatim slijede sivozelena i laporovita glina i glinoviti lapor koji se izmjenjuju s proslojcima sitnozrnog do srednjezrnog pijeska u ugljenu
Široko Polje formacija	882 - 1227 m	Sastoji se od Voloder člana (882 - 1039 m) koji je izgrađen od mekanog glinovitog lapora u proslojcima sitnozrnog slabovezanog pješčenjaka, Krivaj člana (1039 - 1151 m) koji je sličan i Ježevo člana (1151 - 1227 m) koji se u litološkom pogledu ne razlikuje od prethodna dva člana, ali mu je na dubini od 1227 m konstatirana stratigrafska praznina uvjetovana rasjedom.
Kloštar Ivanić formacija	1227 - 1449 m	Čine ju glinoviti lapor sa proslojcima sitnozrnog slabovezanog pješčenjaka.
Ivanić Grad formacija	1449 - 1653 m	Sastoji se od Zagreb člana (1449 - 1521 m) kojeg izgrađuje glinoviti lapor s proslojcima slabo vezanog pješčenjaka i Lipovec lapora (1521 - 1653 m) čiji je krovinski dio izgrađen od glinovitog lapora i srednje tvrdog lapora, a podinski lapor je sitnozrnati, tvrd i vapnovit.
Prkos formacija	1653 - 1740 m	Formaciju čini siltozni tvrdi vapnoviti lapor.
Prečec formacija	1740 – 2202,2 m + x.m	Izgrađena je od litotamnijeskog vapnenca (1740 - 1835 m); tamnosivog tvrdog, mjestomično siltoznog lapora (1835 - 2000 m); lapora s proslojcima kvarcnog pješčenjaka (2000 - 2110 m); šejla (2110 - 2130 m) i brečokonglomerata (2130- 2202,2 m)

Budući da je brečokonglomerat kolektor, cijeli nezacjevljeni dio bušotine ispitivao se metodom DST-a kako bi se odredila mogućnost proizvodnje geotermalne vode iz ove bušotine. Ova metoda koristila se u tri navrata za vrijeme izrade bušotine. Usprkos neželjenim rezultatima protoka, drugi i treći DST potvrdili su da temperatura sloja na dubini 1687 m iznosi 94,4 °C. Bušotinski uvjeti nisu omogućavali proizvodnju vode bez sekundarnih metoda proizvodnje. U konačnici, osvajanje bušotine Savica-1 1984. godine izvedeno je metodom klipovanja, a temperatura vode na ušću bušotine oscilirala je od 22 do 55 °C sve dok se nije stabilizirala na oko 32 °C. S obzirom da bušotina nije zadovoljila kriterije za proizvodnju vode u konačnici je napuštena.

6.1 Savska depresija

Iako bušotina Savica-1 nije ispunila svoju prvotnu svrhu postoji potencijal njena iskorištavanja za toplinske potrebe. S obzirom da se bušotina nalazi u blizini poslovne zone njen toplinski potencijal mogao bi se iskoristiti za grijanje obližnjih kompleksa. Najbliže tvornice i poslovnice nalaze se na udaljenosti manjoj od 500 m. Revitalizacija bušotine mogla bi se provesti ugradnjom bušotinskog izmjenjivača topline. S obzirom na mali promjer bušotine, koaksijalni izmjenjivač nudi se kao najbolja opcija. Prednost ovog dizajna je što omogućuje iskorištavanje postojeće zaštitne cijevi kao vanjske cijevi koaksijalnog izmjenjivača topline.

Kako bi se odredio potencijal proizvodnje toplinske energije potrebno je znati vrijednosti geotermalnog gradijenta. S obzirom da se unutar Zemljine kore prijenos topline većinski odvija kondukcijom, uz pretpostavku da je toplinska vodljivost sloja konstanta, vrijedi Fourierov zakon (Jednadžba 6-1):

$$Q = \lambda \cdot A \left(\frac{dT}{dz} \right) \quad (6-1)$$

Gdje su: Q – toplinski tok (W/m^2)
 λ - toplinska vodljivost stijenske formacije ($W/m^\circ C$)
 A – poprečna površina okomita na smjer toplinskog toka (m^2)
 $\frac{dT}{dz}$ – vertikalni temperaturni gradijent ($^\circ C/m$)

Na temelju ovog zakona razvilo se pojednostavljenje da je promjena temperature s dubinom linearna. Ova uvriježena pretpostavka opisana je Jednadžbom 6-2:

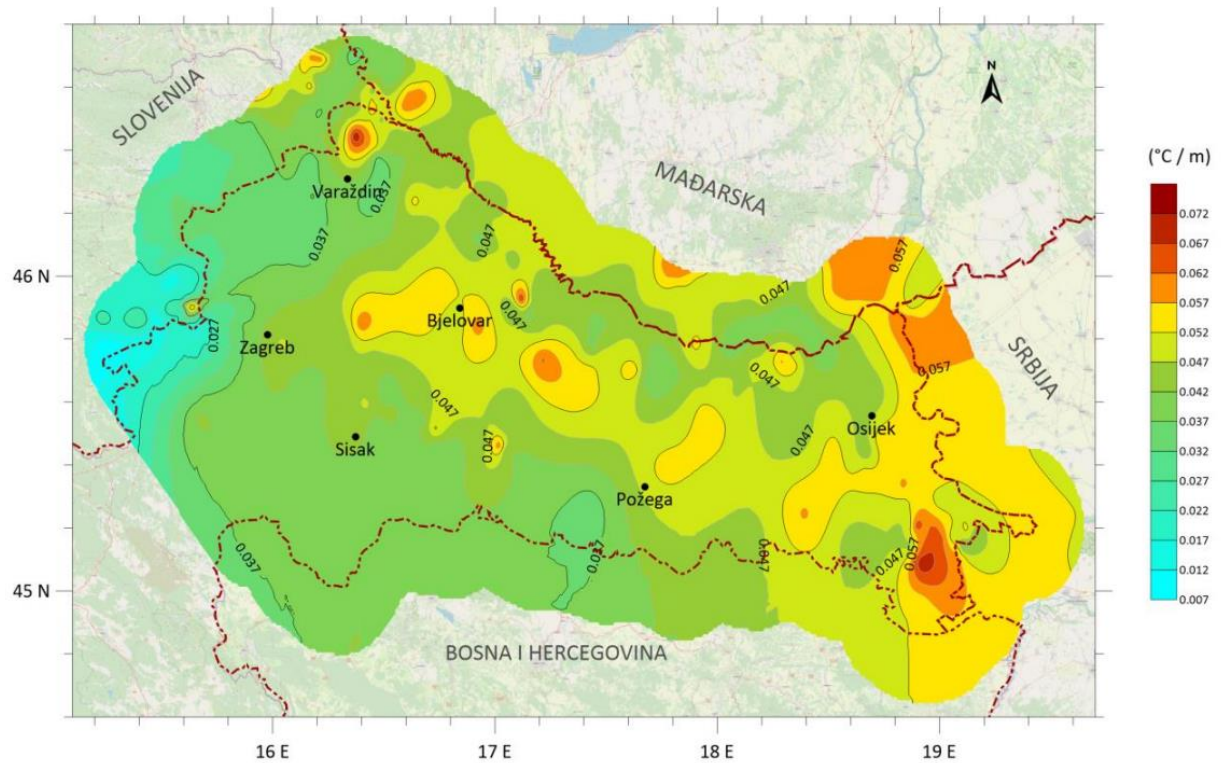
$$T_f = T_s + g_T \cdot D \quad (6-2)$$

Gdje su: T_f – temperatura formacije ($^\circ C$)
 T_s – temperatura na površini ($^\circ C$)
 g_T – geotermalni gradijent ($^\circ C/m$)
 D – dubina (m)

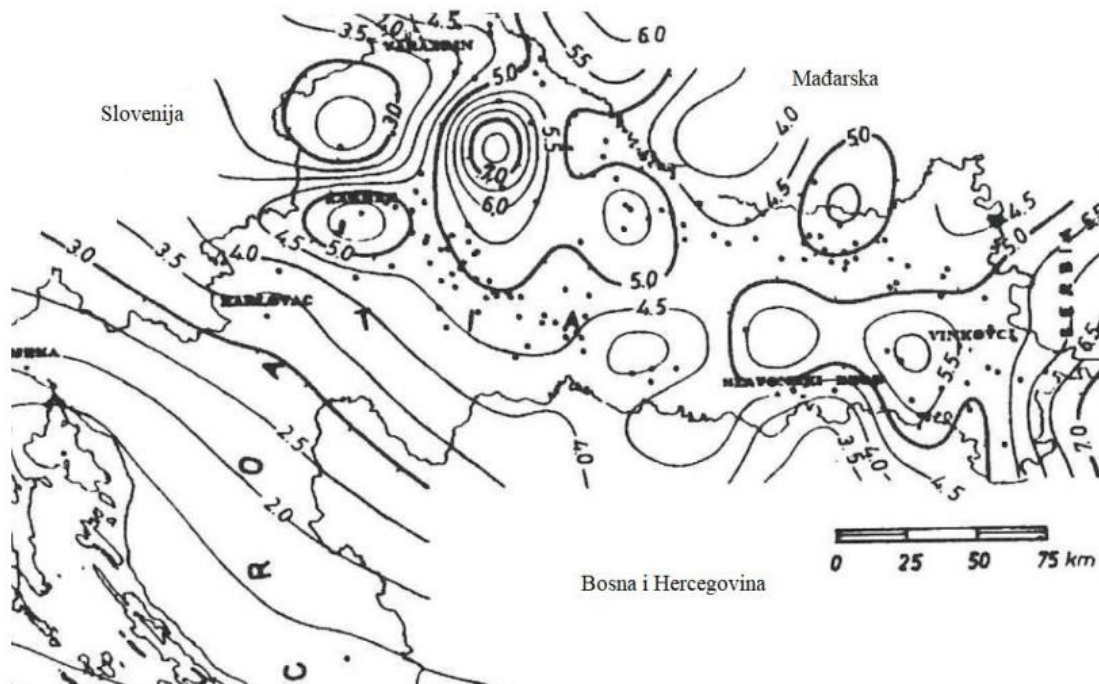
Ako se u ovu jednadžbu uvrste vrijednost temperature na dubini od 1687 m, koja iznosi 94,4 $^\circ C$ (INA -Naftaplin, 1981) i srednja površinska temperatura za kontinentalnu Hrvatsku u

vrijednosti od 11,6 °C, geotermalni gradijent na ovoj lokaciji iznosi 0,049 °C/m. Prema Jeliću i Kevriću (1997) geotermalni gradijent Savske depresije iznosi 0,048 °C/m, a toplinski tok 0,067 W/m² što se poklapa s dobivenom vrijednošću.

Macenić (2020) je na temelju novih izračuna geotermalnih gradijenata 154 bušotine izradila unaprijeđenu verziju (Slika 6-2.) prve geotermalne karte kontinentalne Hrvatske (Jelić i sur., 1995) (Slika 6-3.).



Slika 6-2. Nova karta geotermalnih gradijenata na području kontinentalne Hrvatske (Macenić, 2020)



Slika 6-3. Prva geotermalna karta RH na području Panonskog bazena (Jelić i sur., 1995)

6.2 Dimenzioniranje koaksijalnog izmjenjivača topline GHX programskim paketom

Zbog visoke cijene prirodnog plina za poduzetništvo, veliki broj poduzeća odlučuje se uložiti novac u ugradnju alternativnih sustava grijanja. Bušotina Savica-1 nalazi se u blizini poslovne zone stoga postoji nekolicina objekata koji bi mogli iskoristiti njezin toplinski potencijal te na taj način dugoročno smanjiti troškove grijanja. Najveća potražnja za toplinskom energijom je od listopada do ožujka te su prosinac i siječanj najhladniji mjeseci u sezoni grijanja. Stoga ti mjeseci zahtijevaju isporuku najveće količine toplinske energije. Uzimajući u obzir ograničene mogućnosti ove bušotine odabrano je varijabilno opterećenje koje omogućava oporavak stijenske mase u ljetnim mjesecima.

Korištenjem programskog paketa GHX (Chiasson, 2016) cilj je bio pronaći odgovarajući protok i promjer unutarnje cijevi kako bi se što efikasnije ekstrahirala toplina iz formacija. Na temelju podataka prikupljenih na području grada Zagreba pretpostavljene su pojedine konstante prilikom računalnih simulacija. Srednja vrijednost prosječne toplinske vodljivosti sloja procijenjena je na 2,5 W/mK na temelju poznatih vrijednosti najbližih bušotina. S obzirom da srednja vrijednost toplinske vodljivosti bušotine Sava-1 iznosi 2,64 W/mK (Kovačić, 2007), ova pretpostavka je razumna. Također, uvrštena je vrijednost srednjeg specifičnog volumnog toplinskog kapaciteta u vrijednosti 2,771 J/(m³°C) koja je specifična za područje Zagreba.

S obzirom da je GHX ograničen na samo jednu vrijednost promjera unutarnje i vanjske cijevi, za potrebe proračuna korištene se ekvivalentne (težinske vrijednosti) vrijednosti promjera prema jednadžbi (6-3):

$$\frac{l_e}{(D_{ef})^5} = \frac{l_1}{(D_1)^5} + \frac{l_2}{(D_2)^5} + \frac{l_n}{(D_n)^5} \quad (6-3)$$

$$l_{ef} = l_1 + l_2 \quad (6-4)$$

Gdje su:

l_1 - duljina prve cijevi (m)

l_2 – duljina druge cijevi (m)

l_n – duljina n-te cijevi (m)

l_{ef} – ekvivalentna duljina dviju cijevi (m)

D_1 – promjer prve cijevi (m)

D_2 – promjer druge cijevi (m)

D_n – promjer n-te cijevi (m)

D_{ef} – ekvivalentni promjer dviju cijevi (m)

Na temelju poznatih vrijednosti vanjskog promjera, klase čelika i nominalne težine određen je unutarnji promjer vanjskih cijevi. Ekvivalentna duljina vanjske cijevi je 1744 m s obzirom da do te dubine postoji već ugrađena zaštitna cijev te bi se do te dubine moglo ugraditi tubing i paker za potrebe cirkulacije fluida nosača topline. Ekvivalentni unutarnji promjer vanjske cijevi izračunat je uvrštavanjem dimenzija unutarnjih promjera zasebnih cijevi u Jednadžbu (6-3) te iznosi 0,1749 m. Na isti način definiran je ekvivalentni vanjski promjer vanjske cijevi koji iznosi 0,1906 m. Tablica 6-2. prikazuje ekvivalentne dimenzije zaštitne cijevi do dubine 1744,5 m.

Tablica 6-2. Ekvivalentne dimenzije zaštitnih cijevi do dubine 1744,5 m i 2202,2 m

DO DUBINE 1774,5 m			DO DUBINE 2202,2 m		
Db	0,2324	m	Db	0,19339	m
De	0,19059	m	De	0,16992	m
de	0,17486	m	de	0,15096	m

Razmatrana je ugradnja BHE do dubine 2022,2 m. Kod proračuna ekvivalentnih promjera cijevi do dubine 2202,2 pretpostavljena je ugradnja kolone lajnera od 5 1/2"

(0,1397 m) s obzirom da je promjer nezacijevljenog dijela bušotine 0,1524 m. Tablica 6-2. također prikazuje ekvivalentne promjere cijevi i bušotine ovog scenarija. Korištenjem GHX programskog paketa provjereni su potencijali ekstrakcije topline oba sustava.

Prilikom proračuna pada tlaka u cjevovodu potrebno je definirati vrstu materijala cijevi. Materijal vanjskih cijevi bušotinskog izmjenjivača topline je poznat s obzirom da su postojeće zaštitne cijevi iskoristive u tu svrhu. Materijal i dimenzije unutarnjih cijev potrebno je dimenzionirati. Dimenzija unutarnje cijevi bušotinskog izmjenjivača topline može biti jedinstvena cijelom dužinom kanala bušotine ili se može razlikovati u skladu s prostornim ograničenjima. Radi dubine ugradnje i visoke temperature sloja metalne cijevi bolje su rješenje od polietilenskih cijevi koje se uglavnom koriste za plitku geotermalnu. Stoga, korištenje proizvodnih čeličnih cijevi, u naftnoj struci poznatih pod imenom "tubing", nudi se kao najjeftinije rješenje. Tubinzi koje se uglavnom koriste kod proizvodnje nafte i plina imaju raspon vanjskog promjera od 0,0254 m (1") do 0,127 m (5"). S obzirom da najmanji unutarnji promjer zacijevljenog dijela iznosi 0,171 m postoji mogućnost ugradnje tubinga promjera 0,127 m do dubine 1744,5 m. No kako bi se iskoristila cijela bušotina potrebno je razmotriti ugradnju kolone lajnera u nezacijevljeni dio kanala bušotine, ali i procijeniti isplativost s obzirom da bi dodatni zahvati povećali ukupne troškove te kompleksnost projekta.

Uvrštavanje svih standardnih promjera tubinga u GHX program dokazalo je da pri konstantnom protoku manji unutarnji promjeri unutarnje cijevi rezultiraju većim izlaznim temperaturama. Ipak, kako bi sustav bio učinkovit potrebno je minimizirati pad tlaka u sustavu. Središnje cijevi manjeg promjera imaju znatno veći pad tlaka o širih cijevi. Dok veći vanjski promjeri središnje cijevi smanjuju prstenasti prostor što također rezultira povećanjem pada tlaka u izlaznom dijelu sustava. Stoga, izbor dimenzija tubinga bio je sužen na cijevi s najmanjom debljinom stijenke. Dimenzija tubinga vanjskog promjera 0,114 m i unutarnjeg 0,104 m imala je najmanji pad tlaka kod scenarija ugradnje bušotinskog izmjenjivača topline do 1744,5 m, a vanjski promjer 0,101 m i unutarnji 0,09 m kod scenarija ugradnje do dubine 2202,2 m. Pregled padova tlaka pri različitim protocima prikazan je u Tablici 6-3.

Tablica 6-3. Padovi tlaka odabranih tubinga

		DUBINA 1744,5 m		DUBINA 2202,2 m	
		OD (m)	ID (m)	OD (m)	ID (m)
		0,114	0,104	0,101	0,09
Q = 150 l/min	$\Delta p_{pp.}$	0,16		0,49	
	Δp_O	0,19		0,5	
	$\Delta p_{pp.+\Delta p_O}$	0,35		0,99	
Q = 200 l/min	$\Delta p_{pp.}$	0,27		0,83	
	Δp_O	0,32		0,86	
	$\Delta p_{pp.+\Delta p_O}$	0,59		1,69	
Q = 250 l/min	$\Delta p_{pp.}$	0,41		1,26	
	Δp_O	0,49		1,32	
	$\Delta p_{pp.+\Delta p_O}$	0,9		2,58	
Q = 300 l/min	$\Delta p_{pp.}$	0,57		1,72	
	Δp_O	0,69		1,86	
	$\Delta p_{pp.+\Delta p_O}$	1,26		3,58	
Q = 350 l/min	$\Delta p_{pp.}$	0,75		2,38	
	Δp_O	0,93		2,5	
	$\Delta p_{pp.+\Delta p_O}$	1,68		4,88	
Q = 400 l/min	$\Delta p_{pp.}$	0,98		3,06	
	Δp_O	1,2		3,24	
	$\Delta p_{pp.+\Delta p_O}$	2,18		6,3	
Q = 450 l/min	$\Delta p_{pp.}$	1,21		3,71	
	Δp_O	1,5		4,06	
	$\Delta p_{pp.+\Delta p_O}$	2,71		7,77	
Q = 500 l/min	$\Delta p_{pp.}$	1,48		4,69	
	Δp_O	1,84		4,98	
	$\Delta p_{pp.+\Delta p_O}$	3,32		9,67	
Q = 550 l/min	$\Delta p_{pp.}$	1,79		5,44	
	Δp_O	2,21		5,99	
	$\Delta p_{pp.+\Delta p_O}$	4		11,43	
Q = 600 l/min	$\Delta p_{pp.}$	2,12		6,43	
	Δp_O	2,61		7,1	
	$\Delta p_{pp.+\Delta p_O}$	4,73		13,53	
Q = 650 l/min	$\Delta p_{pp.}$	2,46		7,51	
	Δp_O	3,05		8,3	
	$\Delta p_{pp.+\Delta p_O}$	5,51		15,81	
Q = 700 l/min	$\Delta p_{pp.}$	2,8		8,96	
	Δp_O	3,52		9,59	
	$\Delta p_{pp.+\Delta p_O}$	6,32		18,55	

Na temelju prikazanih rezultata, u scenariju ugradnje bušotinskog izmjenjivača topline do dubine 1744,5 m ne bi trebalo biti problema s padom tlaka čak ni pri većim protocima. U drugom scenariju veći padovi tlaka očituju se pri većim protocima. Stoga, protoke u ovom scenariju trebalo bi ograničiti na vrijednost koje odgovaraju padu tlaka manjem od 10 bar.

Kako bi se odredio optimalni sustav bušotinskog izmjenjivača topline odabrane promjere tubinga ispitivalo se pri različitim protocima. Cilj je bio odrediti protok koji bi omogućio najveću moguću vršnu snagu sustava, a da pritom zadovoljava postavljene uvjete.

Metodom pokušaja i pogreške birani su protoci koji bi zadovoljili tri različita scenarija, a da pritom razlika temperatura izlaznog i ulaznog fluida ne padne ispod 5 °C.

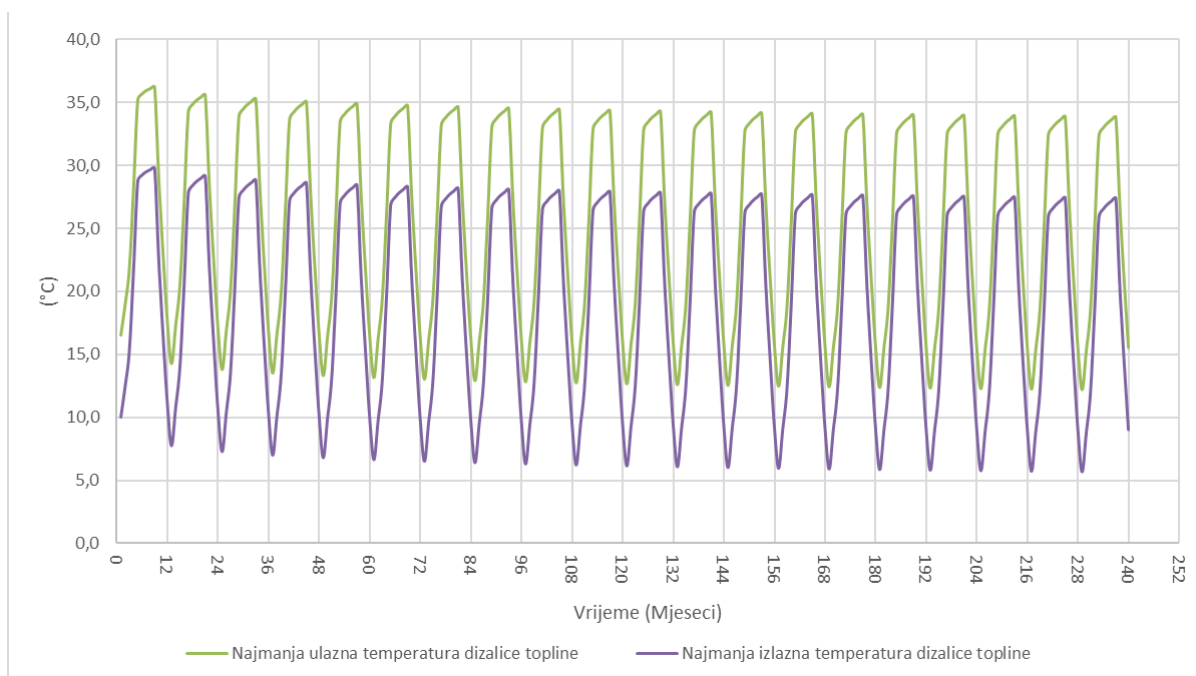
Prvi scenarij zahtjeva da u periodu od dvadeset godina ulazna temperatura radnog fluida ne padne ispod 5 °C kako bi se izbjeglo znatnije pothlađivanje sloja. Drugi zahtjeva održavanje ulazne temperature radnog fluida iznad 10 °C u istom vremenskom periodu kako bi se minimiziralo negativno djelovanje bušotinskog izmjenjivača topline na okolne stijene. Protoci koji su zadovoljili prvi scenarij označeni su žutom bojom te zelenom ukoliko zadovoljavaju uvjete drugog scenarija (Tablica 6-4.). U trećem scenariju tražio se protok koji bi osigurao izlaznu temperaturu radnog fluida iznad 25 °C u najhladnijem mjesecu projektiranog životnog ciklusa. Temperatura vode iznad od 25 °C smatra se dovoljnom za zagrijavanje prostora podnim grijanjem.

Tablica 6-4. Najniže izlazne i ulazne temperature oba scenarija u periodu od 20 godina

DUBINA 1744,5 m											
VRŠNA SNAGA	q (L/MIN)	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
	q (L/s)	4,17	5,00	5,83	6,67	7,50	8,33	9,17	10,00	10,83	11,67
250	ΔT	14,32	11,93	10,23	8,95	7,96	7,16	6,51	5,97	5,509	5,113
	T _{iz,min}	3,56	6,64	8,61	9,90	10,91	11,63	12,18	12,62	12,97	13,26
	T _{u,min}	-10,76	-5,29	-1,62	0,95	2,95	4,47	5,67	6,65	7,46	8,15
200	ΔT	11,46	9,55	8,18	7,16	6,36	5,73	5,21	4,77	4,41	4,09
	T _{iz,min}	10,25	12,71	14,29	15,36	16,13	16,71	17,15	17,50	17,78	18,01
	T _{u,min}	-1,21	3,16	6,11	8,20	9,77	10,98	11,94	12,73	13,37	13,92
150	ΔT	8,59	7,16	6,14	5,37	4,77	4,30	3,91	3,58	3,31	3,07
	T _{iz,min}	16,94	18,78	19,96	20,77	21,35	21,78	22,11	22,37	22,58	22,76
	T _{u,min}	8,35	11,62	13,82	15,40	16,58	17,48	18,20	18,79	19,27	19,69

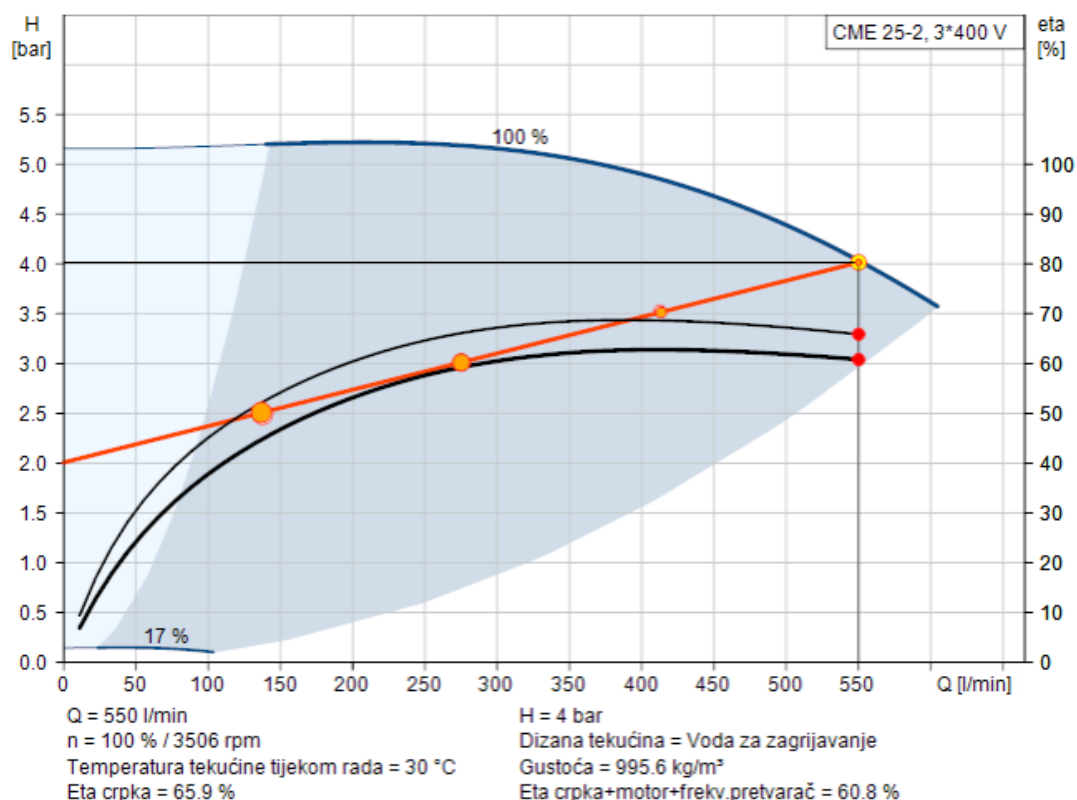
DUBINA 2202,2 m											
VRŠNA SNAGA	q (L/min)	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
	q (L/s)	4,17	5,00	5,83	6,67	7,50	8,33	9,17	10,00	10,83	11,67
350	ΔT	20,05	16,71	14,32	12,53	11,14	10,02	9,11	8,35	7,71	7,16
	Tiz,min	-3,34	3,61	8,01	10,98	13,10	14,67	15,86	16,79	17,54	18,15
	Tu,min	-23,39	-13,10	-6,31	-1,55	1,96	4,65	6,75	8,44	9,83	10,99
300	ΔT	17,18	14,32	12,27	10,74	9,55	8,59	7,81	7,16	6,61	6,14
	Tiz,min	4,00	9,95	13,72	16,27	18,09	19,43	20,45	21,25	21,90	22,42
	Tu,min	-13,18	-4,37	1,45	5,53	8,54	10,84	12,64	14,09	15,29	16,28
250	ΔT	14,32	11,93	10,23	8,95	7,96	7,16	6,51	5,97	5,51	5,11
	Tiz,min	11,33	16,29	19,43	21,56	23,07	24,19	25,04	25,71	26,25	26,68
	Tu,min	-2,99	4,36	9,20	12,61	15,11	17,03	18,53	19,74	20,74	21,57

Rezultati simulacija GHX programa dokazali su da oba scenarija imaju ograničenja zbog kojeg su nužne tehnološke kompenzacije. U prvom scenariju nužna je ugradnja dizalice topline s obzirom da izlazne temperature radnog fluida nisu dostatne za direktno grijanje. Ugradnjom bušotinskog izmjenjivača topline do dubine od 1744,5 m mogao bi se instalirati sustav vršne snage 250 kW pri protocima iznad 550 l/min. Slika 6-4. prikazuje kretanje temperatura fluida bušotinskog izmjenjivača topline.



Slika 6-4. Mjesečne temperature radnog fluida BHE (1744 m) pri protoku 550 l/min i vršnoj snazi grijanja od 250 kW

S obzirom da kod ove konfiguracije bušotinskog izmjenjivača topline padovi tlaka nisu izraženi čak ni pri većim protocima, ugradnjom cirkulacijske pumpe snage 7,5 kW ovaj sustav je izvediv (Slika 6-5.). Za odabir odgovarajuće cirkulacijske pumpe korištena je stranica proizvođača cirkulacijskih pumpi Grundfos.

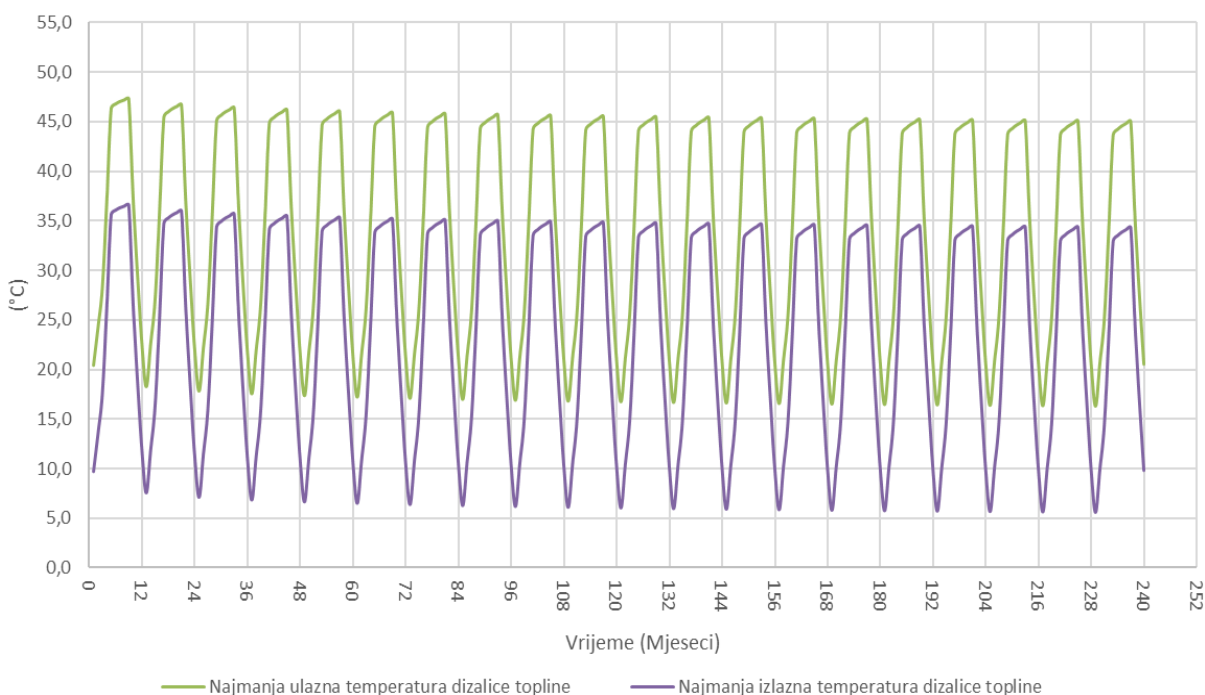


Slika 6-5. Izvedba izabrane cirkulacijske pumpe CME 25-2 za dubinu ugradnje BHE do 1744 m (Grundfos, 2024.)

Kataloški naziv odabrane pumpe je CME 25-2, a cijena joj iznosi 7949 EUR. Odabrana pumpa ističe se energetsom učinkovitošću s obzirom da joj je ukupna Eta 60,8%. Godišnji utrošak energije ove pumpe je 15 805 kWh, a pretpostavljeni troškovi petnaestogodišnjeg životnog ciklusa odabrane pumpe iznose 64 771 EUR.

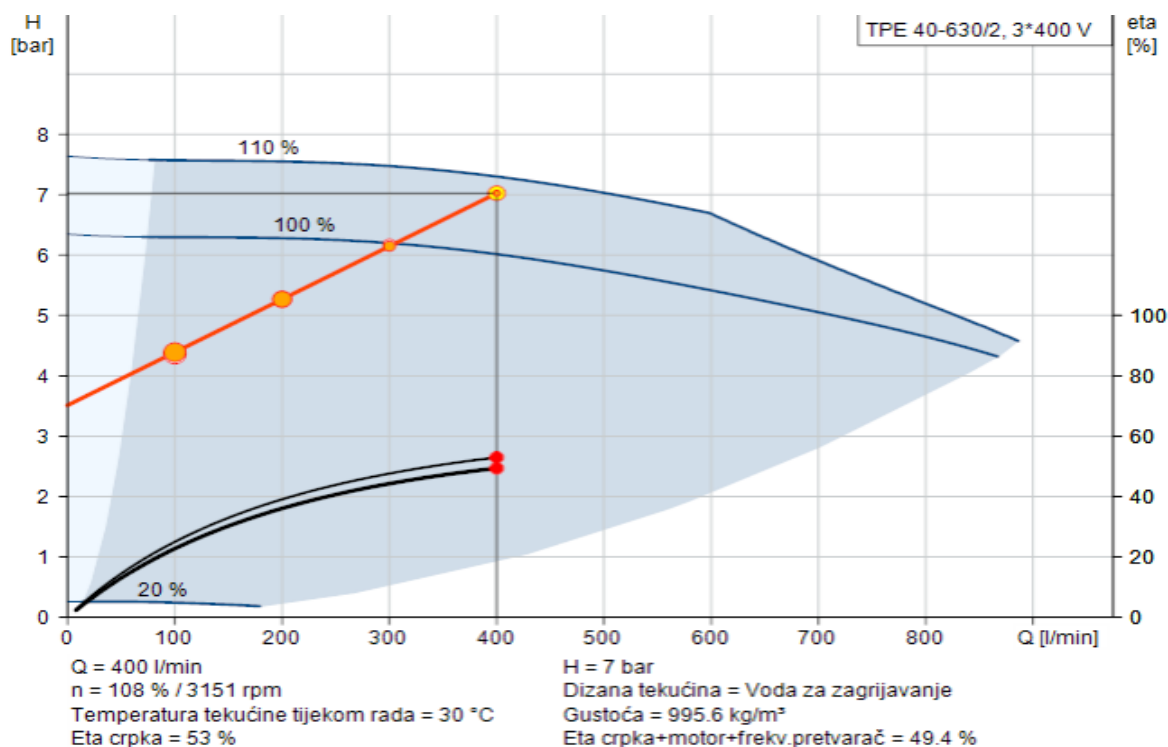
Pad tlaka pri protoku od 700 l/min iznosi manje od 7 bar. Stoga postoji mogućnost ugradnje snažnije cirkulacijske pumpe. Ugradnja cirkulacijske pumpe snage motora 11 kW spriječila bi pad temperature radnog fluida ispod 10 °C na ulaznoj strani bušotinskog izmjenjivača topline. S obzirom da je cilj smanjiti troškove grijanja, ugradnja snažnije pumpe nije dobar izbor jer su njena cijena (10 781 EUR), ali i trošak životnog ciklusa (170 407 EUR) značajno veći u odnosu na prvu pumpu.

U scenariju bušotinskog izmjenjivača topline od 2202,2 m nije moguće ostvariti velike protoke zbog malog promjera posljednjih 458 m kanala bušotine. Pad tlaka koji bi nastao pri protocima iznad 500 l/min nije savladivi za većinu komercijalnih cirkulacijskih pumpi. Stoga, ova konfiguracija se također ne bi mogla direktno koristiti za grijanje prostora u najhladnijim mjesecima. Protok od 400 l/min te vršna snaga od 300 kW zadovoljavaju uvjet održavanja temperature radnog fluida u periodu od dvadeset godina iznad 5 °C. Slika 6-6. prikazuje kretanje najmanjih mjesečnih temperatura ovog sustava prije i nakon izlaska iz dizalice topline u razdoblju od dvadeset godina.



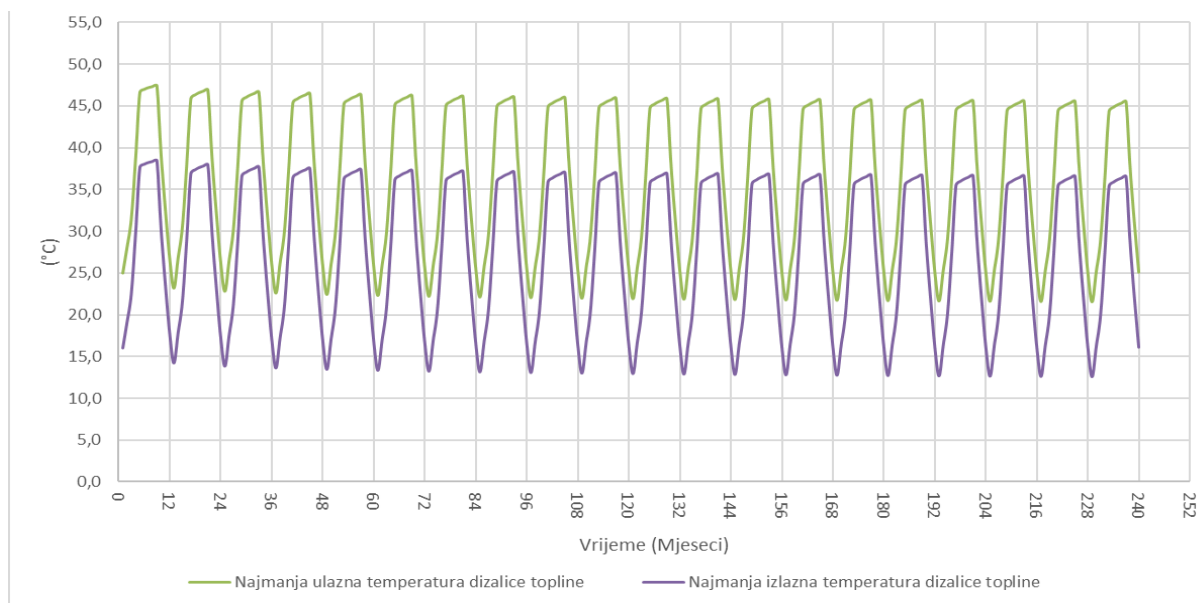
Slika 6-6. Mjesečne temperature radnog fluida BHE (2202 m) pri protoku 400 l/min i vršnoj snazi grijanja od 300 kW

Cirkulacijska pumpa TPE 40-630/2 pri protoku od 400 l/min i padu tlaka od 7 bar može ostvariti vršnu snagu od 300 kW te joj je cijena 9636 EUR. Trošak njenog petnaestogodišnjeg životnog ciklusa procijenjen na 125 396 EUR, a godišnji utrošak energije na 32 199 kWh. Njena izvedba prikazana je na Slici 6-7.



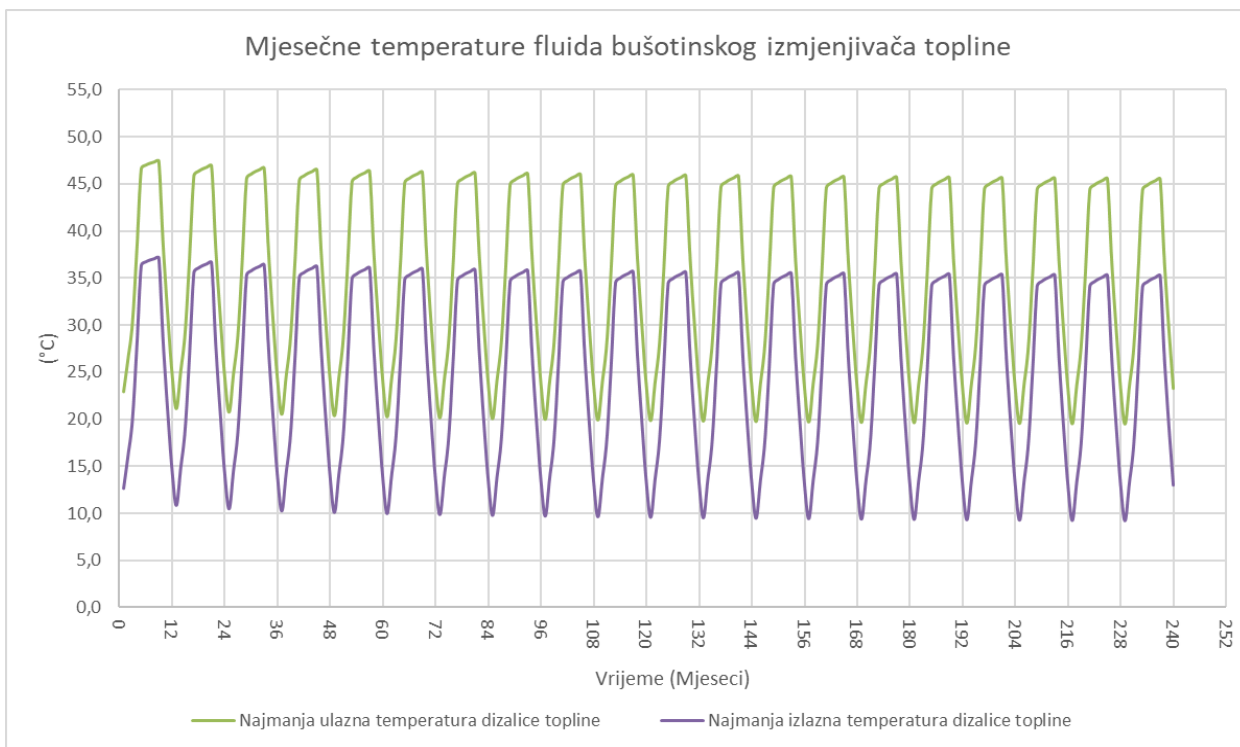
Slika 6-7. Izvedba cirkulacijske pumpe TPE 40-630 (Grundfos, 2024.)

Korištenjem ove cirkulacijske pumpe za ostvarivanje vršne snage od 250 kW temperatura radnog fluida nakon izlaska iz dizalice topline iznosi više od $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Stoga, utjecaj ulaznog fluida na toplinu okolnih stijena ne bi bio značajan. Slika 6-8. prikazuje kretanje ulazne i izlazne temperature radnog fluida kroz period od dvadeset godina u tom slučaju.



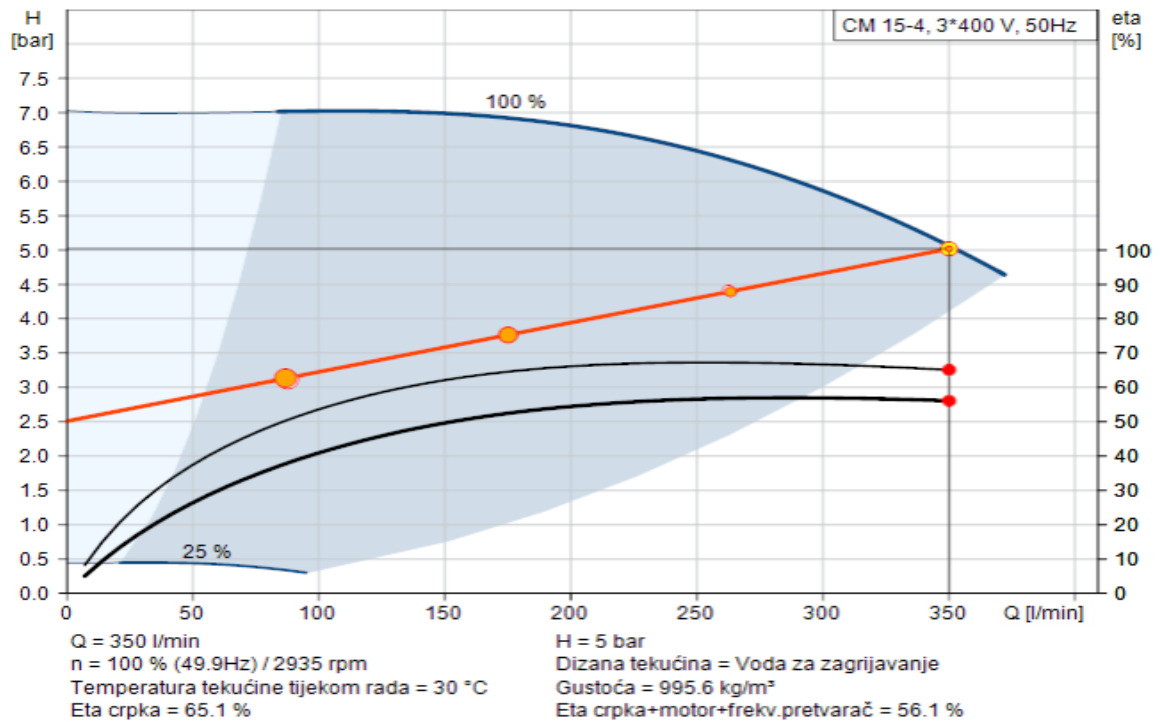
Slika 6-8. Mjesečne temperature radnog fluida BHE (2202 m) pri protoku 400 l/min i vršnoj snazi grijanja od 250 kW

Pri vrijednostima protoka od 350 l/min i instaliranoj vršnoj snazi od 250 kW najmanja temperatura vode na ulazu u bušotinski izmjenjivač topline iznosi 9,2 °C. Slika 6-9. prikazuje kretanje mjesečnih temperatura radnog fluida pri navedenim parametrima.



Slika 6-9. Mjesečne temperature radnog fluida BHE (2202 m) pri protoku 350 l/min i vršnoj snazi grijanja od 250 kW

Za rad sustava pri protoku od 350 l/min te padu tlaka od 5 bar iskoristiva je pumpa snage motora 5,5 kW i ukupne učinkovitosti 56,1%. Kataloški naziv ove pumpe je CM 15-4, a njena izvedba prikazana je na Slici 6-10.



Slika 6-10. Izvedba cirkulacijske pumpe CM 15-4 (Grundfos, 2024.)

Ova pumpa jeftinija je od ranije navedenih. Cijena joj je 3036 EUR, a troškovi petnaestogodišnjeg životnog ciklusa 54 047 EUR. Njen nedostatak je što nije iskoristiva za veće protoke koji bi osigurali više energije. Odabirom ove pumpe sustav bi bio ograničen na protoke do 350 l/min.

7. UTJECAJ NA OKOLIŠ

Stavljanje bušotine van pogona zadatak je koji zahtijeva pažljivu provedbu. Pogrešno provođenje likvidacije bušotine može dovesti do katastrofalnih posljedica. Unatoč pažljivom začepjenju bušotine, kvarovi se i dalje događaju i očekuje se da će i dalje postojati. Zbog toga je funkcijska prenamjena napuštenih bušotina atraktivna. Prednost revitalizacije bušotine su konstantni prihodi od proizvodnje energije te konstantna kontrola utjecaja na okoliš.

Smatra se da napuštene naftne bušotine ispuštaju velike količine metana. Nažalost, o takvim emisijama u mnogim zemljama ne vodi službena evidencija (Kang i sur., 2014). King i Valencia (2014) naglašavaju da starije napuštene bušotine predstavljaju veći rizik za curenje od novih. Riddick i sur. (2019) zaključili su da količine emisija ponajviše ovise o geološkim uvjetima, starosti bušotine, količinama prirodnog plina te ispravnosti pridržavanja propisa. Stoga, rasponi emisija napuštenih bušotina variraju od 0,0018 g/sat do 48 g/sat. Prosječne emisije metana začepjenih napuštenih bušotina iznose oko 1.6 g/sat, a nezačepjenih oko 11 g/sat. Prema njima emisije iz aktivnih bušotina su veće nego iz napuštenih ukoliko su svi zahtjevi i protokoli zadovoljeni. S obzirom da veliki broj napuštenih bušotina ne zadovoljava većinu zahtjeva, opasnost od onečišćenja okoliša je postojana te su nužna adekvatna rješenja kako bi se opasnosti otklonile.

Geotermalnu energiju smatra se ekološki prihvatljivom, no istraživanja prije puštanja u proizvodnju imaju utjecaj na okoliš (Bošnjaković i sur., 2019). Izrada nove geotermalne bušotine pretpostavlja prekomjernu proizvodnju geotermalnih tekućina, veliku potrošnju vode, stvaranje i odlaganje otpada, emisije plinova, deformacije tla te vizualno i zvučno onečišćenje na površini. . Za izradu vertikalne bušotine u prosjeku se koristi oko 291 tisuće litara vode za bušenje i 1,17 milijuna litara vode za hidrauličko frakturiranje. Dok je za bušenja horizontalne bušotine potrebno je oko 492 tisuće litara vode te 10,2 milijuna litara vode za hidrauličko frakturiranje (Goodwin i sur., 2012). Ipak, vrijednosti potrošnje vode i emisija stakleničkih plinova teško je procijeniti zbog specifičnosti svakog projekta.

Procesi bušenja mogu uzrokovati poremećaje u ležištu koji mogu potaknuti migraciju nafte te potencijalno zagađenje podzemnih voda. Također, konstantna proizvodnja slojnog fluida smanjuje tlak u rezervoaru čak i kad se povratno utiskuje, što povećava rizik od

slijeganja tla te potencijalno povećanje seizmičke aktivnosti uslijed ubrizgavanja fluida (Voosen, 2018). Dodatni nedostatak sustava otvorene cirkulacije, kao što su sustavi suhe i brze pare, su emisije sumporovodika, ugljičnog dioksida, metana, amonijaka, vodika, bora i drugih plinova. (Yilmaz i Kaptan, 2017) Ipak, emisije su znatno manje nego kod sustava grijanja ili proizvodnje električne energije iz fosilnih goriva. Prema Bloomfieldu i sur. (2003) prosječne emisije geotermalnih elektrana su 91 g/kWh što je oko 6,5 puta manje od plinskih binarnih elektrana. Sustavi zatvorene cirkulacije smatraju se ekološki neutralnom tehnologijom s obzirom da svojom hermetičnošću reduciraju curenje stakleničkih plinova.

8. ZAKLJUČAK

Revitalizacija bušotine Savica-1 ugradnjom bušotinskih izmjenjivača topline nudi izvor toplinske energije koji može zadovoljiti toplinske potrebe srednje velikih objekata. Nažalost, izlazna temperatura radnog fluida ne može se direktno koristiti za zagrijavanje prostora. Ipak, u kombinaciji s dizalicom topline može poslužiti kao izvor topline koji bi značajno smanjio potrošnju električne energije.

Bušotina Savica-1 ispostavila se kao bušotina nedovoljno velikog promjera za ekstrakciju većih količina toplinske energije. Njena konfiguracija onemogućava ugradnju većih dimenzija tubinga što rezultira značajnim padom tlaka pri većim protocima. Značajni padovi tlaka potencijalan su problem drugog scenarija, odnosno ugradnje sustava bušotinskog izmjenjivača topline do dubine 2202 m. Bušotinski izmjenjivač topline duljine 1744,5 m ispostavio se boljom opcijom zbog manjih kapitalnih ulaganja te manjih padova tlaka što povećava učinkovitost cjelokupnog sustava..

Pretpostavka je da bi se ugradnjom plastične cijevi niske toplinske vodljivosti ili duple cijevi s vakuumom spriječio gubitak toplinske energije uslijed cirkulacije te da bi to rezultiralo višim temperaturama radnog fluida na izlazu iz bušotinskog izmjenjivača topline. Nažalost, konvencionalne plastične cijevi se pri višim temperaturama rastapaju zbog čega je njihova ugradnja ograničena na male dubine bušotina, odnosno temperature ispod 60°C,

Cijene cirkulacijskih pumpi vrlo su raznolike. Iako bi ugradnja jače cirkulacijske pumpe omogućila veće protoke, a time i više izlazne temperature radnog fluida, to bi rezultiralo većom potrošnjom energije unatoč većem padu tlaka u sustavu. Također, jače cirkulacijske pumpe su skuplje te ih je skuplje održavati. S obzirom da je cilj ostvariti sustav što veće energetske učinkovitosti ovo nije optimalno rješenje. Ugradnja jače cirkulacijske pumpe neće rezultirati puno većim temperaturama na izlazu iz bušotine niti većom efikasnošću sustava. Stoga, zaključak je da se financijski, ali i tehnološki ne isplati ugrađivati novu kolonu linera u nezacijevljeni dio kanala bušotine. Odnosno, izolacija nezacijevljenog dijela kanala bušotine te ugradnja bušotinskog izmjenjivača topline do dubine 1744,5 m jednostavnije je i jeftinije rješenje.

9. LITERATURA

1. ASTM INTERNATIONAL. 2004. ASTM C1113-99: Standard Test Method for Thermal Conductivity of Refractories by Hot Wire (Platinum Resistance Thermometer Technique).
2. ASTM INTERNATIONAL. 2004. ASTM C177-04: Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus.
3. ASTM INTERNATIONAL. 2004. ASTM C518-04: Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus.
4. ASTM INTERNATIONAL. 2004. ASTM E1225-04 Standard Test Method for Thermal Conductivity of Solids by Means of the Guarded-Comparative-Longitudinal Heat Flow Technique. West Conshohocken.
5. ASTM INTERNATIONAL. 2008. ASTM D5334-08: Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure.
6. ASTOLFI, M., ROMANO, M.C., BOMBARDA, P., MACCHI, E. 2014. Binary ORC (organic Rankine cycles) power plants for the exploitation of medium-low temperature geothermal sources part B: Techno-economic optimization. *Energy*, 66, 435–446.
7. BANDOS, T. V., MONTERO, Á., FERNÁNDEZ DE CÓRDOBA, P., & URCHUEGUÍA, J. F. 2011. Improving parameter estimates obtained from thermal response tests: effect of ambient air temperature variations. *Geothermics*, 40(2), 136–143. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2011.02.003>
8. BANKS, D. 2012. *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling*. Hoboken: Wiley.
9. BARBIER, E. 2002. Geothermal energy technology and current status: an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6, 3–65.
10. BLOOMFIELD, K.K., MOORE, J.N., AND NEILSON, JR., R.M. 2003. Geothermal Energy Reduces Greenhouse Gases, *Climate Change Research*, March/April, 77–79
11. BOHLING, G.C., BUTLER, J.J. JR. 2010. Inherent limitations of hydraulic tomography. *Groundwater*, 48(6), 809–824. doi: 10.1111/j.1745-6584.2010.00757.x.

12. BOŠNJAKOVIĆ, M., STOJKOV, M. I JURJEVIĆ, M. 2019. Environmental Impact of Geothermal Power Plants. *Tehnički vjesnik*, 26 (5), 1515-1522. <https://doi.org/10.17559/TV-20180829122640>
13. BOUDENNE, A., IBOS, L., GEHIN, E. AND CANDAU, Y. 2004. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 37, 132-139.
14. BRISTOW K.L., KLUITENBERG G.J., HORTON R. 1994. Measurement of soil thermal properties with a dual-probe heat-pulse technique. *Soil Sci Soc Am J* 58(5):1288–1294.
15. BROUYÈRE, S., CARABIN, G., DASSARGUES, A. 2004. Climate change impacts on groundwater resources: modelled deficits in a chalky aquifer, Geer basin, Belgium. *Hydrology Journal*, 12(2), 123–134.
16. BUTLER, J. JR, HEALEY, J., MCCALL, W., GARNETT, E., LOHEIDE, S. 2002. Hydraulic tests with direct-push equipment. *Ground Water*, 40, 25–36. doi: 10.1111/j.1745-6584.2002.tb02488.x.
17. CARSLAW, H. S., & JAEGER, J. C. 1986. *Conduction of Heat in Solids*. Clarendon Press, Oxford.
18. CHIASSON, A.D. 2016. *Geothermal Heat Pump and Heat Engine Systems: Theory and Practice*. New York, USA: Wiley.
19. CLARKE B.G., AGAB A., NICHOLSON D. 2008. Model specification to determine thermal conductivity of soils. *Proc Inst Civ Eng Geotech Eng* 161(3):161–168.
20. DIERSCH, H.J.G., BAUER, D., HEIDEMANN, W., RÜHAAK, W., SCHÄTZL, P. 2011. Finite element modeling of borehole heat exchanger systems: Part 1. Fundamentals. *Computers & Geosciences*, 37(8), 1122–1135. doi: 10.1016/j.cageo.2010.08.003.
21. ENGELHARDT, I., PROMMER, H., MOORE, C., SCHULZ, M., SCHÜTH, C., TERNES, T. A. 2013. Suitability of temperature, hydraulic heads, and acesulfame to quantify wastewater-related fluxes in the hyporheic and riparian zone. *Water Resources Research*. doi: 10.1029/2012WR012604.
22. ESKILSON, P. 1986. *Superposition borehole model, manual for computer code*. Lund, Sweden: Department of Mathematical Physics, University of Lund.
23. EUROPSKA KOMISIJA. 2022. *Komunikacija komisije europskom parlamentu, europskom vijeću, vijeću, europskom gospodarskom i socijalnom odboru i odboru regija: REPowerEU: zajedničko europsko djelovanje za povoljniju, sigurniju i održiviju energiju*. Strasbourg. <https://data.europa.eu/doi/10.2775/076377>

24. EVANS, K., DEICHMANN, N., HEINRICH, C. 2011. "Deep geothermal energy." Abstract Volume 9th Swiss Geoscience Meeting.
25. FETTING, C. 2020. "The European Green Deal", ESDN Report, December 2020, ESDN Office, Vienna
26. GAO, L., ZHAO, J., AN, Q., WANG, J., LIU, X. 2017b. A review on system performance studies of aquifer thermal energy storage. *Energy Procedia*, 142, 3537–3545. doi: 10.1016/j.egypro.2017.12.242.
27. GARCÍA GIL, A., GARRIDO SCHNEIDER, E. A., MEJÍAS MORENO, M., & SANTAMARTA CEREZAL, J. C. 2022. *Shallow Geothermal Energy: Theory and Application*. Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-92258-0>
28. GEISER, B., HILPERT, M., MARSH, B. 2016. "Geothermal: The Marginalization of Earth's Largest and Greenest Energy Source." In: *Proceedings of the 43rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, CA.
29. GEOTEHNIKA – ZAGREB. 1986. Izvještaj o izvedbi i ispitivanju istražno – eksploatacijske bušotine Savica-1 na termalnu vodu, Zagreb
30. GOODWIN, S., CARLSON, K., DOUGLAS, C., & KNOX, K. 2012. Life Cycle Analysis of Water Use and Intensity of Oil and Gas Recovery in Wattenberg Field, Colo. *Oil and Gas Journal*, 110(5), 48-59.
31. HOCHSTEIN, M. 1988. Assessment and modelling of geothermal reservoirs (small utilization schemes). *Geothermics*, 17, 15–49.
32. IEA, 2023. *CO₂ Emissions in 2022*, IEA Publications, Paris
33. INA – NAFTAPLIN, 1981. DST izvještaj – Savica-1, Zagreb
34. JELIĆ, K., KEVRIĆ, I. & KRASIĆ, O. 1995. Temperatura i toplinski tok u tlu Hrvatske. U: Vlahović, I., Velić, I. & Šparica, M. (ur.): 1. hrvatski geološki kongres, 18-21. 10. 1995., Zbornik radova, 1, 245–249, Zagreb.
35. JELIĆ, K.; KEVRIĆ, I. 1997. Plitka geotermalna energija u Hrvatskoj, 6. forum Hrvatskog energetskeg društva , Zagreb : Hrvatsko energetskeg društvo, pp. 181-190
36. KANG, M., KANNO, C.M., REID, M.C., ZHANG, X., MAUZERALL, D.L., CELIA, M.A., CHEN, Y., ONSTOTT, T.C. 2014. Direct measurements of methane emissions from abandoned oil and gas wells in Pennsylvania. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111, 18173–18177.
37. KING, G.E., VALENCIA, R.L. 2014. Environmental risk and well integrity of plugged and abandoned wells. In: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*.

- Society of Petroleum Engineers, Amsterdam, The Netherlands.
<https://doi.org/10.2118/170949-MS>.
38. KOVAČIĆ, M. 2007. Odnosi toplinske provodljivosti stratigrafskih jedinica iz šireg područja Zagreba. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 19 (1), 27-33.
 39. KUREVIJA, T., MACENIĆ, M., BOROVIĆ, S. 2017. Impact of grout thermal conductivity on the long-term efficiency of the ground-source heat pump system. *Sustainable Cities and Society*, 31, 1–11.
 40. LIM, K. B., LEE, C. H., LEE, S. H., & SOUNG, N. W. 2006. An Experimental Study on the Thermal Performance Measurement of Vertical Borehole Heat Exchanger (BHE). *Journal of KSME*, 30(8), 764-771.
 41. LUO, J., ROHN, J., XIANG, W., BAYER, M., PRIESS, A., WILKMANN, L., STEGER, H., & ZORN, R. 2015. Experimental investigation of a borehole field by enhanced geothermal response test and numerical analysis of performance of the borehole heat exchangers. *Energy*, 84, 473-484.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.013>
 42. MACENIĆ, M. 2020. Konceptualni model eksploatacije geotermalne energije revitalizacijom napuštenih naftnih i plinskih bušotina u kontinentalnom dijelu Republike Hrvatske : doktorski rad (Disertacija). Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
 43. MCCOY-WEST, A., MILICICH, S., ROBINSON, T., BIGNALL, G., HARVEY, C. 2011. Geothermal resources in the Pacific Islands: the potential of power generation to benefit indigenous communities. In: *Proceedings of the Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*.
 44. MENDRINOS, D., KATSANTONIS, S., KARYTSAS, C. 2016. Pipe materials for borehole heat exchangers. Presented at the European Geothermal Congress 2016 (EGC2016), Strasbourg, France.
 45. MILLER, R.L. 1980. Chemistry and Materials in Geothermal Systems, Geothermal Scaling and Corrosion. In: Casper, L.A., Pinchback, T.R. (Eds.), *ASTM STP 717*, 3-9. American Society for Testing and Materials.
 46. MOECK, I.S. 2014. Catalog of geothermal play types based on geologic controls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 867–882.
 47. MORGENSEN, P. 1983. Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storage. In *Proceedings of the International Conference on Surface Heat Transfer in Theory and Practice* (pp. 652–657). Stockholm.

48. NOACK, V., CHERUBINI, Y., SCHECK-WENDEROTH, M., LEWERENZ, B., HÖDING, T., SIMON, A., MOECK, I. 2010. Assessment of the present-day thermal field (NE German Basin)—inferences from 3D modelling. *Chemie Der Erde-Geochemistry*, 70, 47–62.
49. PEHME, P.E., PARKER, B.L., CHERRY, J.A., MOLSON, J.W., GREENHOUSE, J.P. 2013. Enhanced detection of hydraulically active fractures by temperature profiling in lined heated bedrock boreholes. *Journal of Hydrology*, 484, 1–15.
50. POULSEN, S. E., & ALBERDI-PAGOLA, M. 2015. Interpretation of ongoing thermal response tests of vertical (BHE) borehole heat exchangers with predictive uncertainty based stopping criterion. *Energy*, 88, 157–167. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.133>
51. RAYMOND, J., LAMARCHE, L. 2013. Simulation of thermal response tests in a layered subsurface. *Applied Energy*, 109, 293–301.
52. RAYMOND, J., THERRIEN, R. 2008. Low-temperature geothermal potential of the flooded Gaspé Mines, Quebec, Canada. *Geothermics*, 37(2), 189–210.
53. RAYMOND, J., THERRIEN, R., GOSSELIN, L., LEFEBVRE, R. 2011a. Numerical analysis of thermal response tests with a groundwater flow and heat transfer model. *Renewable Energy*, 36(1), 315–324. doi: 10.1016/j.renene.2010.06.044.
54. RAYMOND, J., THERRIEN, R., GOSSELIN, L., LEFEBVRE, R. 2011b. A review of thermal response test analysis using pumping test concepts. *Groundwater*, 49(6), 932–945.
55. REED, M.J. (Ed.). 1983. Assessment of low-temperature geothermal resources of the United States.
56. RIDDICK, S., MAUZERALL, D.L., CELIA, M.A., KANG, M., BRESSLER, K., CHU, C., GUM, C. 2019. Measuring methane emissions from abandoned and active oil and gas wells in West Virginia. *Science of The Total Environment*, 651, 1849–1856. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.082.
57. SANNER, B., HELLSTRÖM, G., SPITLER, J., GEHLIN, S. 2005. Thermal response test—current status and worldwide application. In: *World Geothermal Congress, Antalya, Turkey*, pp. 1436–1445.
58. SAUTY, J.P., GRINGARTEN, A.C., MENJOZ, A., LANDEL, P.A. 1982. Sensible energy storage in aquifers: 1. Theoretical study. *Water Resources Research*, 18(2), 245–252. doi: 10.1029/WR018i002p00245.

59. SHONDER, J.A., BECK, J.V. 1999. Determining effective soil formation properties from field data using a parameter estimation technique. *ASHRAE Transactions*, 105, 458–466.
60. SIGNORELLI, S., BASSETTI, S., PAHUD, D., KOHL, T. 2007. Numerical evaluation of thermal response tests. *Geothermics*, 36(2), 141–166. doi: 10.1016/j.geothermics.2006.10.006
61. SONI, S.K., PANDEY, M., BARTARIA, V.N. 2016. Experimental analysis of a direct expansion ground coupled heat exchange system for space cooling requirements. *Energy and Buildings*, 119, 85–92. doi: 10.1016/j.enbuild.2016.03.026. Vrh obrasca
62. STAUFFER, F., BAYER, P., BLUM, P., GIRALDO, N.M., KINZELBACH, W. 2013. *Thermal Use of Shallow Groundwater*. London: Taylor & Francis.
63. SUI, D., WIKTORSKI, E., RØKSLAND, M., BASMOEN, T.A. 2018. Review and investigations on geothermal energy extraction from abandoned petroleum wells. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13202-018-0535-3>
64. TEMPLETON, J. 2013. Abandoned petroleum wells as sustainable/renewable sources of geothermal energy. Master thesis, Department of Mining and Materials Engineering, McGill University, Canada.
65. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. 2010. *VDI-Heat Atlas*, 2nd Edition. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
66. VIEIRA, A., ALBERDI-PAGOLA, M., CHRISTODOULIDES, P., JAVED, S., LOVERIDG, F., ET AL. 2017. Characterisation of ground thermal and thermo-mechanical behaviour for shallow geothermal energy applications. *Energies*, 10(12), 2044. doi: 10.3390/en10122044.
67. VOGT, T., SCHNEIDER, P., HAHN-WOERNLE, L., CIRPKA, O.A. 2010. Estimation of seepage rates in a losing stream by means of fiber-optic high-resolution vertical temperature profiling. *Journal of Hydrology*, 380(1), 154–164.
68. VOOSSEN, P. 2018. Second-largest earthquake in modern South Korean history tied to geothermal plant. *Science*. doi: 10.1126/science.aau0040.
69. WAGNER, R., & CLAUSER, C. 2005. Evaluating thermal response tests using parameter estimation for thermal conductivity and thermal capacity. *Journal of Geophysical Engineering*, 2(4), 349–356. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/2/4/s08>

70. WAGNER, R., ROHNER, E. 2008. Improvements of thermal response tests for geothermal heat pumps. IEA heat pump conference, Zürich, Switzerland.
71. WAGNER, V., BAYER, P., KÜBERT, M., BLUM, P. 2012. Numerical sensitivity study of thermal response tests. *Renewable Energy*, 41, 245–253.
72. WAGNER, V., LI, T., BAYER, P., ET AL. 2014. Thermal tracer testing in a sedimentary aquifer: field experiment (Lauswiesen, Germany) and numerical simulation. *Hydrogeology Journal*, 22, 175–187. doi: 10.1007/s10040-013-1059-z.
73. WITTE, H.J.L. 2001. Geothermal response test with heat extraction and heat injection: examples of application in research and design of geothermal ground heat exchangers. European workshop on geothermal response tests, Lausanne, Switzerland.
74. WITTE, H.J.L., VAN GELDER, A.J. 2006. Geothermal response tests using controlled multipower level heating and cooling pulses (MPL-HCP): quantifying ground water effects on heat transport around a borehole heat exchanger. In: *Proceedings of the tenth international conference on thermal energy storage*, New Jersey, USA.
75. WU, X., POPE, G.A., SHOOK, G.M., SRINIVASAN, S. 2008. Prediction of enthalpy production from fractured geothermal reservoirs using partitioning tracers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(5), 1453–1466. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.06.023.
76. WYPYCH, G. 2016. *Handbook of Polymers*, 2nd Edition. Toronto: ChemTec Publishing.
77. YAVUZTURK, C., CHIASSON, A.D. 2002. Performance analysis of U-tube, concentric tube, and standing column well ground heat exchangers using a system simulation approach. *ASHRAE Transactions*, 108, 925–938.
78. YAVUZTURK, C., SPITLER, J.D. 1999. Short time step response factor model for vertical ground loop heat exchangers. *ASHRAE Transactions*, 105(2), 475–485.
79. YILMAZ, E., KAPTAN, M.A. 2017. Environmental impact of geothermal power plants in Aydın, Turkey. *E3S Web Conference*, 19, 02028. doi: 10.1051/e3sconf/20171902028.
80. ZHAO, X., & YE, L. 2011. *Composites*, B42, 33, 926.
81. ZIMMERMANN, G., BRANDT, W., 2008. Results of stimulation treatments at the geothermal research wells in Groß Schönebeck, Germany.

INTERNETSKI IZVORI:

1. GRUNDFOS D.O.O. 2024, Product selection. URL: <https://www.grundfos.com/>

IZJAVA

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno na temelju znanja stečenih na
Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.*

Edis Sušić



KLASA: 602-01/24-01/23
URBROJ: 251-70-12-24-2
U Zagrebu, 14.02.2024.

Edis Sušić, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/24-01/23, URBROJ: 251-70-12-24-1 od 05.02.2024. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

REVITALIZACIJA ISTRAŽNE BUŠOTINE SAVICA-1 UGRADNJOM KOAKSIJALNOG IZMJENJIVAČA TOPLINE

Za mentora ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada prof. dr. sc. Tomislav Kurevija nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i komentoricu dr. sc. Marija Macenić.

Mentor:

(potpis)

prof. dr. sc. Tomislav Kurevija

(titula, ime i prezime)

Predsjednica povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

(potpis)

izv. prof. dr. sc. Karolina
Novak Mavar

(titula, ime i prezime)

(potpis)

dr. sc. Marija Macenić

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

izv. prof. dr. sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)