Konceptualni model eksploatacije geotermalne energije revitalizacijom napuštenih naftnih i plinskih bušotina u kontinentalnom dijelu Republike Hrvatske

Macenić, Marija

Doctoral thesis / Disertacija

2020

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:169:759252

Rights / Prava: Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

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







Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Marija Macenić

KONCEPTUALNI MODEL EKSPLOATACIJE GEOTERMALNE ENERGIJE REVITALIZACIJOM NAPUŠTENIH NAFTNIH I PLINSKIH BUŠOTINA U KONTINENTALNOM DIJELU REPUBLIKE HRVATSKE

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2020.

Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Marija Macenić

KONCEPTUALNI MODEL EKSPLOATACIJE GEOTERMALNE ENERGIJE REVITALIZACIJOM NAPUŠTENIH NAFTNIH I PLINSKIH BUŠOTINA U KONTINENTALNOM DIJELU REPUBLIKE HRVATSKE

DOKTORSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Tomislav Kurevija

Zagreb, 2020.



University of Zagreb

Faculty of Mining, Geology and Petroleum engineering

Marija Macenić

A CONCEPTUAL MODEL OF EXPLOITATION OF GEOTHERMAL ENERGY BY REVITALIZATION OF ABANDONED OIL AND GAS WELLS IN THE CONTINENTAL PART OF THE REPUBLIC OF CROATIA

DOCTORAL THESIS

Supervisor:

Associate Prof. Tomislav Kurevija, PhD

Zagreb, 2020.

Doktorski rad izrađen je na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.
Mentor: izv. prof. dr. sc. Tomislav Kurevija

Doktorski rad sadrži: 166 stranica teksta, 91 sliku i 17 tablica.

SAŽETAK

Na području kontinentalnog dijela Republike Hrvatske (RH) postoji značajan broj napuštenih bušotina, a s obzirom na predviđeno smanjenje pridobivanja nafte i plina, broj privremeno napuštenih bušotina će se u budućnosti povećavati. Kao alternativa skupom procesu napuštanja, privremeno napuštene bušotine je moguće revitalizirati ugradnjom dubokih koaksijalnih bušotinskih izmjenjivača topline i koristiti kao toplinski izvor. Koaksijalni bušotinski izmjenjivači sastoje se od vanjske (kolona zaštitnih cijevi) i unutarnje cijevi (tubing) kroz koji voda kao radni fluid cirkulira prstenastim prostorom i samim tubingom. Prijelaz toplinske energije sa stijenske mase na cirkulirajući fluid odvija se preko vanjske cijevi izmjenjivača, bez obzira na postavljeni smjer protjecanja. Analiza potencijala dostupne toplinske energije upotrebom dubokih izmjenjivača topline provedena je prema dva tipična načina potrebna na strani korisnika toplinske energije: konstantan i varijabilan. Konstantna opterećenja podrazumijevaju potrebu za toplinskom energijom u konstantnom iznosu kroz cijelu godinu rada. Varijabilna opterećenja su ovisna o vanjskim klimatskim uvjetima i prate potrebe za toplinskom energijom unutar sezone grijanja. Na strani korisnika dvije su mogućnosti korištenja toplinske energije: direktno (bušotinski izmjenjivač-pločasti izmjenjivač-korisnik) i pomoću dizalica topline (bušotinski izmjenjivač-pločasti izmjenjivač-dizalica topline-korisnik). Rezultati pokazuju povoljne vrijednosti dostupne toplinske energije za konstantna i varijabilna opterećenja kod oba slučaja korištenja toplinske energije na strani korisnika. S obziorm na to provedena je prva procjena dostupne toplinske energije za različite dubine, protoke i geotermalne gradijente korištenjem dubokih koaksijalnih bušotinskih izmjenjivača na području kontinentalne RH. Analiza protoka i pada tlaka u izmjenjivaču pokazala je da postoje ograničenja kod realnih sustava, na koje je prilikom projektiranja potrebno obratiti pozornost. Određen je faktor iskoristivosti (tzv. SPF faktor) dubokih bušotinskih izmjenjivača koji ukazuje na omjer uložene električne energije potrebne za rad cirkulacijske pumpe i dostupne toplinske energije iz bušotinskog izmjenjivača. Analiza odnosa SPF faktora i dostupne toplinske energije pokazuje da porastom SPF faktora raste i postotak uštede u odnosu na konvencionalne sustave. Da bi se utvrdila korisnost dubokih bušotinskih izmjenjivača izrađen je model ekonomske analize u odnosnu na klasični plinski energent. Prednost direktnog korištenja toplinske energije može se opravdati visokim iznosom uštede u odnosu na konvencionalni plinski sustav. Međutim, dostupna toplinska energija je niža u odnosu na sustav koji koristi dizalice topline. Korištenjem dizalica topline omogućena je veća energetska iskoristivost toplinske energije sadržane u cirkulirajućem fluidu. Analiza emisija

ugljikovog dioksida korištenjem dubokih izmjenjivača provedena je u usporedbi s tri konvencionalna energenta za grijanje. Usporedbom količina emisija CO_2 predloženog sustava i konvencionalnih energenata pokazalo se da su emisije kod konvencionalnih sustava 3 - 5,5 puta veće. Drugim riječima, revitalizacijom dubokih bušotina i korištenjem geotermalne energije može se ostvariti značajno smanjenje u emisijama stakleničkih plinova, poglavito ugljikovog dioksida, u odnosu na tipične energente koji se koriste na području kontinentalne RH. Kako je dugoročnom strategijom Europske unije i novom Strategijom energetskog razvitka Republike Hrvatske predviđeno smanjenje emisija stakleničkih plinova, povećanje energetske učinkovitosti i neovisnosti, revitalizacija napuštenih bušotina pruža jedno od rješenja u postizanju navedenih ciljeva.

Ključne riječi: geotermalna energija, revitalizacija napuštenih bušotina, duboki koaksijalni bušotinski izmjenjivač, dostupna toplinska energija, SPF faktor, smanjenje emisija CO_2

SUMMARY

In the continental part of Croatia there is a significant number of abandoned oil, gas and exploratory wells. With further decline in oil and gas production the number of temporary abandoned wells is expected to rise. As an alternative to an expensive process of abandoning the wells, they can be revitalized by converting them to deep coaxial borehole heat exchangers (DCHE) and use the geothermal heat contained in the rock as a heat source. Coaxial heat exchangers are comprised of outer (casing) and inner (tubing) pipes, through which the water, as a working fluid, is being circulated. The circulation of the working fluid is achevied through a circulation pump. The heat transfer from the source rock is through outer pipes onto the circulating fluid, regardles of the fluid direction. There are two main variants of using the available heat, with constant load or variable load. The constant heat load requires the same, constant amount of heat throughout the year. Variable loads are climate dependant, and are used within the heating season. When it comes to the technical options of heating systems there are also two possibilities – direct (borehole heat exchanger-plate heat exchanger-user) and with heat pumps (borehole heat exchanger-plate heat exchanger-heat pump-user). The results of constant and variable modelling (with both technical solutions) show very good potential in available heating energy when using DCHE. The first estimate was done in this work by alternating borehole depth, fluid flow and geothermal gradients. The analysis of the fluid flow and pressure drop in the DCHE showed some limitations for real systems. These limitations have to be taken into account when designing the entire system. In order to determine the efficiency of the deep borehole heat exchangers themselves, the so called SPF factor is determined, as a ratio of electricity (used for circulating pump) and available heating energy. The analysis showed that with the increase of the SPF there is an increase in savings when compared to gas, as a classic energy source. The advantage of direct heating is seen in higher percentage of savings, when compared to system with heat pump (lower operational cost). However, the use of heat pumps gives higher available heating energy. The analysis of the CO_2 emissions showed significat savings, when compared to three classic heating energy sources used in Croatia for heating purposes, from 3 up to 5,5 times. Therefore, by revitalizing deep wells and by using available geothermal energy significant savings of greenhouse gases, like CO_2 can be made.The longterm EU strategy, as well as new Integrated National Energy and Climate Plan for the Republic of Croatia, is set on reducing greenhouse gas emissions and increasing energy efficiency. The revitalization of temporarily abandoned oil and gas wells in

continental Croatia is one possibilty in achieveing these goals, and should be further investigated.

Keywords: geothermal energy, revitalization of abandoned wells, deep coaxial borehole heat exchanger, available heating energy, SPF factor, CO_2 emission reduction

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA 5
2.1. Pregled zakonskog i regulatornog okvira i smjernica za upravljanje geotermalnim resursima 12
3. MATEMATIČKI MODEL PRIJELAZA TOPLINSKE ENERGIJE 16
3.1. Linijski model prijelaza toplinske energije 20
3.1.1. Linijski izvor beskonačne duljine (*Infinite line source model - ILS*) 20
3.1.2. Linijski prijelaz konačne duljine (*Finite line source model - FLS*) 24
3.2. Cilindrični model prijelaza toplinske energije 30
3.3. Toplinski otpor bušotina 33
4. TOPLINSKA SVOJSTVA STIJENA I GEOLOŠKA OBILJEŽJA ISTRAŽIVANOG PROSTORA 40
4.1. Specifični toplinski kapacitet 40
4.2. Toplinska vodljivost 46
4.3. Toplinski difuzivitet 50
4.4. Geološka obilježja istraživanog područja 53
5. ODREĐIVANJE STATIČKE TEMPERATURE FORMACIJE I NOVA KARTA GEOTERMALNIH GRADIJENATA KONTINENTALNE RH 54
5.1. Metode određivanja statičke temperature stijenskih formacija 56
5.1.1. Hornerova metoda 57
5.1.2. Cooper-Jones metoda 60
5.1.3. Određivanje korekcije temperatura na području Panonskog bazena i nova karta geotermalnih gradijenata na području Panonskog bazena RH 63
6. POSTUPAK I MODEL REVITALIZACIJE NAPUŠTENIH NAFTNIH I PLINSKIH BUŠOTINA NA PRIMJERU BUŠOTINE PČELIĆ-1 LOCIRANE UNUTAR DRAVSKE DEPRESIJE 74
6.1. Tehnički opis postupka revitalizacije bušotina 74
6.2. Geološke značajke i termogeološki parametri na lokaciji bušotine Pčelić-1 80
6.3. Analiza i rezultati proračuna 82
6.3.1. Rezultati analitičke metode 83

6.3.2. Rezultati numeričke metode 97

7. KVANTIFIKACIJA TOPLINSKOG POTENCIJALA KONTINENTALNOG DIJELA RH PRIMJENOM DUBOKIH KOAKSIJALNIH BUŠOTINSKIH IZMJENJIVAČA TOPLINE 109

7.1. Određivanje dostupne toplinske energije upotrebom dubokih bušotinskih izmjenjivača topline 109

7.1.1. Rezultati određivanja toplinskih opterećenja iz dubokih bušotinskih izmjenjivača topline pri konstantnom opterećenju 111

7.1.2. Rezultati određivanja toplinskih opterećenja iz dubokih bušotinskih izmjenjivača topline pri varijabilnim opterećenjima 119

7.2. Tehnička ograničenja sustava – kriteriji za provođenje revitalizacije 127

7.3. Stupanj iskoristivosti dubokog koaksijalnog bušotinskog izmjenjivača - SPF 131

7.4. Tehno-ekonomska analiza korištenja dubokih bušotinskih izmjenjivača topline .. 138

7.5. Utjecaj na okoliš – emisije stakleničkih plinova 151

8. ZAKLJUČAK 155

9. LITERATURA 159

I POPIS SLIKA

II POPIS TABLICA

III POPIS KORIŠTENIH OZNAKA

1. UVOD

Geotermalna energija predstavlja stabilan i obnovljiv energetski izvor, koji može pokrivati i bazna opterećenja, za razliku od ostalih oblika obnovljivih izvora (npr. energija vjetra, Sunčeva energija, energija valova). Europska unija (EU) je 2009. godine usvojila programski paket 2020, kojim su regulirane obveze članica u pogledu klimatskih promjena i energetske neovisnosti. Programski paket, poznat kao 20-20-20, obvezuje članice na ispunjenje tri glavna cilja: smanjenje emisija stakleničkih plinova za 20% u odnosu na baznu godinu, povećanje udjela obnovljivih izvora na 20% od ukupnog, te povećanje energetske učinkovitosti za 20%. *Direktivom 2009/28/EZ* definirano je i regulirano poticanje upotrebe obnovljivih izvora energije. Nakon 2020. g. te nastavno na prvi, doći će do primjene energetskog paketa 2030, definiranog dokumentom Europske komisije iz 2014. g., *EUCO 169/14,* a detaljno objašnjenog u dokumentu *Green paper - A 2030 framework for climate and energy policies*. Njime su dani okviri zahtjeva za predstojeće razdoblje od 2020.g. do 2030. g., a u svrhu smanjenja emisija stakleničkih plinova i dodatnog povećanja energetske neovisnosti. Paketom je predviđeno daljnje smanjenje emisija stakleničkih plinova od najmanje 40%, povećanje udjela korištenja obnovljivih izvora na oko 32% te povećanje energetske učinkovitosti od oko 32,5%. Treći programski paket, čiji su okviri izrađeni za razdoblje 2030.-2050. g., predviđa smanjenje emisija i do 80%, a prema *Zelenom planu* EU bi trebala postati klimatski neutralna do 2050. g. Kako bi se ostvarili zadani ciljevi programskih paketa bit će, između ostalog, potrebna zamjena, trenutno najzastupljenijih, fosilnih goriva drugim energentima. Stoga se programskim paketima postepeno povećava udio energije dobivene iz obnovljivih izvora, a u svrhu promjene energetske bilance. Osim smanjenja emisija stakleničkih plinova koja bi se time ostvarila, korištenjem većeg udjela obnovljivih izvora smanjuje se energetska ovisnost, što je također jedan od glavnih ciljeva članica EU. U tu svrhu, potrebno je raditi na poticanju korištenja obnovljivih izvora energije, kao i na razvoju tehnologije i tehnike u tom području.

Za potrebe istraživanja lokacija i nalazišta geotermalne energije najčešće se koriste metode koje su dobro poznate i razvijene u naftnoj industriji. Od početnih, geofizičkih istraživanja, geološkog modeliranja ležišta pa sve do projektiranja sustava za pridobivanje i sabiranje geotermalnog fluida, tehnologija eksploatacije geotermalnih ležišta je preuzeta, te eventualno prilagođena, iz poznatih procesa i tehnologije iz naftne industrije. Zahvaljujući postignućima i napretku naftne industrije, otkriveno je mnoštvo potencijalnih nalazišta geotermalne energije. Najbolji primjer je otkriće vrućih suhih stijena te njihov potencijal u

iskorištavanju geotermalne energije bez proizvodnje geotermalnog fluida. Pojam vruće suhe stijene u literaturi je poznat kao *Hot Dry Rock* (HDR) ili *Enhanced Geothermal System* (EGS). Iskorištavanje vrućih suhih stijena temelji se na hidrauličkom frakturiranju, utiskivanju pothlađenog fluida u frakture, te pridobivanju zagrijanog fluida kroz eksploatacijsku bušotinu. Nakon što zagrijani fluid preda toplinu u površinskom sustavu, isti se hladi te se utiskuje natrag u ležište. Prvi takav projekt započeo je početkom 1970-ih, na lokaciji Fenton Hill u Sjedinjenim Američkim Državama, koji je uspješno proveden te se i dalje provode ispitivanja. Drugi najpoznatiji projekt, Soultz-sous-Forêts, nalazi se u Francuskoj, na području povišenog toplinskog toka. Da je takvo iskorištavanje, bez proizvodnje geotermalnog fluida moguće, pokazala je probna proizvodnja pripadajuće elektrane. Posljednjih godina u fokusu istraživača i naftno-plinske industrije je iskorištavanje geotermalne energije na područjima gdje se nalaze ležišta ugljikovodika. Neke od metoda su već u pokusnoj fazi, od kojih se izdvaja iskorištavanje geotermalnog fluida prilikom proizvodnje ugljikovodika, kod ležišta koja primjenjuju sekundarnu metodu povećanja iscrpka, odnosno zavodnjavanje. Generalno se iskorištavanje geotermalne energije može podijeliti u dvije kategorije, na direktne i indirektne metode iskorištavanja, ovisno o tome postoji li proizvodnja geotermalnog fluida. Osim klasične proizvodnje geotermalne vode, kod direktnog iskorištavanja mogu se izdvojiti dvije dodatne mogućnosti iskorištavanja toplinske energije: pridobivanje geotermalnog fluida uz pridobivanje ugljikovodika uslijed primjene sekundarne metode povećanja iscrpka nafte zavodnjavanjem, posebice kod starijih ležišta, te direktna proizvodnja iz vodonosnika. Indirektne metode se dijele u otvorene i zatvorene sustave, uz zajedničko obilježje cirkulacije radnog fluida. U otvoreni sustav se može svrstati iskorištavanje vrućih suhih stijena (EGS i HDR) dok se kod zatvorenog sustava radi o bušotinskim izmjenjivačima topline različitih tehničkih izvedbi. Posljednja metoda je predmet istraživanja ove doktorske disertacije, te će se razmatrati na primjeru korištenja dubokih koaksijalnih bušotinskih izmjenjivača topline.

Da bi se odredio potencijal korištenja geotermalne energije primjenom bilo koje od metoda koriste se karte geotermalnih gradijenata i toplinskog toka razmatranog područja. U slučaju Republike Hrvatske to područje je ograničeno na kontinentalni dio, odnosno na dio Panonskog bazena koji se nalazi u Republici Hrvatskoj. Prvi koji je opisao termogeološke parametre Panonskog bazena bio je Jelić, koji je u doktorskoj disertaciji (Jelić, 1979) stavio naglasak istraživanja na Savsku i Dravsku depresiju. Dobivene jednadžbe opisivale su termogeološke karakteristike obje depresije. Na temelju tog i kasnijih istraživanja, izrađena je karta geotermalnih gradijenata Republike Hrvatske. Na temelju karte može se zaključiti da je Panonski bazen pogodno područje za iskorištavanje geotermalne energije. Područje

kontinentalne Hrvatske relativno je dobro geološki istraženo. Tome je pridonijela izrada mnogobrojnih istraživačkih bušotina, čiji je cilj, osim geoloških povezivanja cjelina, bio da se prikupe podaci o potencijalnim rezervama ugljikovodika. Uz njih, izrađene su i mnogobrojne eksploatacijske i razradne bušotine, koje su također doprinijele stupnju istraženosti navedenog područja. Izrađeno ih je više od 4000 te su, osim geološkog diferenciranja i lociranja naftnih i plinskih ležišta, omogućile i određivanje dubokih vodonosnika. S obzirom na dugu tradiciju proizvodnje ugljikovodika na ovom području, znatan dio bušotina je danas likvidiran i/ili napušten. Privremeno napuštene bušotine moguće je prenamijeniti za iskorištavanje geotermalne energije. Metoda koja je u posljednje vrijeme sve više predmet istraživanja je revitaliziranje napuštenih bušotina, odgovarajućim remontnim radovima, s ciljem pridobivanja geotermalne energije. Pridobivanje se odvija indirektnom cirkulacijom radnog fluida upotrebom dubokog koaksijalnog izmjenjivača topline. Dosad provedena istraživanja ukazuju na realnu upotrebu tehnologije, koja je dobro znana u iskorištavanju plitke geotermalne energije. Kao najveća prednost ovakvog sustava se napominje moguća ušteda obzirom da se koriste već izrađene bušotine te povoljan utjecaj na okoliš koji bi daljnja upotreba imala. Zbog toga je, uz procjenu moguće pridobive energije (bilo toplinske bilo električne) potrebno uzeti u obzir i ekonomski aspekt procesa revitalizacije, odnosno remontne troškove.

Istraživanje koje je provedeno ovom disertacijom uključuje ponavljanje dijela istraživanja termogeoloških značajki Panonskog bazena, u cilju potvrde prethodnih istraživanja i izrade suvremenije karte geotermalnih gradijenata kao podloge potrebne za modeliranje. Da bi se preciznije odredili termogeološki parametri, obrađeni su podaci iz više od 150 bušotina. Uz podatke potrebne za izradu karte termogeoloških parametara, iz bušotinskog fonda odabrani su i ostali podaci potrebni za procjenu potencijala pridobivanja toplinske energije prenamjenom bušotina, poput geometrijskih karakteristika bušotina i litostratigrafskih jedinica. Također, s obzirom na zahtjeve o smanjenju količina emisija stakleničkih plinova potrebno je utvrditi količinu emisija CO_2 koje bi takav sustav producirao, kao i usporediti ih s emisijama koje bi nastale u slučaju korištenja klasičnih energetskih izvora.

Prema tome, cilj doktorske disertacije je utvrditi dostupne količine toplinske energije na području Panonskog bazena RH iskorištavanjem geotermalne energije pomoću revitaliziranih bušotina, definirati termogeološke i tehničke parametre potrebne za proračun te utvrditi ekonomsku isplativost u odnosu na korištenje standardnih energenata za potrebe grijanja. Uz to, potrebno je utvrditi smanjenje emisija ugljikovog dioksida korištenjem takvog sustava u odnosu na upotrebu klasičnih energenata za potrebe grijanja (prirodni plin, ukapljeni naftni plin (UNP) i loživo ulje ekstra lako (LUEL)). Prema tome, hipoteza rada glasi da je prenamjena

likvidiranih i napuštenih dubokih bušotina, na području Panonskog bazena tehnoekonomski pogodna za iskorištavanje geotermalne energije indirektnom cirkulacijom pomoću dubokih koaksijalnih izmjenjivača topline u već postojećim bušotinama. Uz to, prenamjenom bušotina i korištenjem geotermalne toplinske energije moguće je smanjiti emisije stakleničkih plinova, poglavito ugljikovog dioksida. Ove hipoteze u skladu su sa zahtjevima Europske direktive o smanjenju emisija ugljikovog dioksida i povećanju udjela obnovljivih izvora energije te spomenuta revitalizacija nudi relativno dostupno i brzo rješenje za ostvarenje kratkoročnih i dugoročnih ciljeva iste. Za područje Republike Hrvatske detaljno istraživanje potencijala izvedbe takvih sustava ne postoji. Iako kontinentalni dio RH ima potencijal za iskorištavanje geotermalne energije, veoma mali dio je i iskorišten. Revitalizacija nudi brzo i jeftinije rješenje za razliku od klasičnog načina iskorištavanja geotermalne energije. Primjenom ove tehnologije smanjili bi se budući troškovi likvidacije i napuštanja bušotina te bi se povećao udio obnovljivih izvora energije u hrvatskom energetskom miksu, čime bi se direktno utjecalo na smanjenje količina stakleničkih plinova. Uz proračun konduktivnog prijelaza toplinske energije kroz stijensku masu izrađen je model na temelju kojeg je odrađena analiza osjetljivosti podešavanjem termogeoloških parametara (toplinska vodljivost, toplinski difuzivitet, itd.). Na kraju je izrađen model povezivanja termogeoloških i energetskih parametara koji može poslužiti kao stručna podloga za daljnje istraživanje.

2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Prema Lundu i Boyd (2015) u svijetu je, do kraja 2014. g., instalirano ukupno 70 328,98 MW_t geotermalne energije za direktnu upotrebu. Prema istom izvještaju, ukupna iskorištena energija iz geotermalnih izvora iznosila je 587 786 TJ, što je povećanje od 38,7% u odnosu na izvještaj iz 2010. g. Prema podacima Eurostata, udio geotermalne energije u državama članicama Europske unije (EU-28) iznosi 3,2% od ukupnog udjela obnovljivih izvora energije (http://ec.europa.eu/eurostat, 2018a). Iz ovih podataka vidljivo je da bi se udio geotermalne energije mogao značajno povećati u energetskoj bilanci EU. Međutim, prepreka koja se najčešće javlja prilikom planiranja i izvedbe projekata kod sustava koji koriste duboku geotermalnu energiju su troškovi izrade bušotina, koji predstavljaju veći udio u ukupnim troškovima. Da bi se zaobišli visoki troškovi izrade novih bušotina, počele su se razmatrati metode koje uključuju iskorištavanje postojećih naftnih i plinskih bušotina kod ležišta u zreloj fazi pridobivanja. Istraživanja su pokazala da postoji potencijal korištenja toplinske, ali i proizvodnju električne energije, iz vode koja je nusprodukt u proizvodnji ugljikovodika. Provedena su i pokusna istraživanja (Johnson i Simon, 2009; Xin et al., 2012; Dahlheim i Pike, 2012) koja su bila zadovoljavajuća te se nastavljaju daljnja istraživanja (Ziabakhsh-Ganji et al., 2019). Također, istraživanje Ćubrića (1977) je ukazalo na potencijal korištenja geotermalne energije iz podinskih vodnosnika naftnih i plinskih ležišta, dok je istraživanje Limbergera i suradnika usmjerilo pozornost istraživanja na potencijal direktnog korištenja toplinske energije iz dubokih vodnosnosnika u svijetu (Limberger et al., 2018). Međutim, osim bušotina koje su još u upotrebi postoji veliki broj napuštenih i likvidiranih bušotina diljem svijeta. Prema studiji US Environmental Protection Agency (1987) samo u Sjedinjenima Američkim Državama (SAD) je broj napuštenih bušotina procijenjen na preko 1 milijun, te su navedene opasnosti koje takve bušotine mogu predstavljati za okoliš, poglavito za vodonosnike i izvore pitke vode. Najveća opasnost očitava se u izljevu zaostalih fluida u vodonosnike te ispuštanje metana, uslijed nekvalitetno postavljenih cementnih čepova, kao dio procesa likvidacije i napuštanja. Cementni čepovi mogu popustiti iz nekoliko razloga, a najčešći su nedovoljna gustoća cementne kaše, slom cementnog čepa zbog prevelikih naprezanja, gubitak cementa u slojeve i sl. (Bonett i Pafitis, 1996; Dusseault et al., 2000). Troškovi likvidacije i napuštanja mogu biti visoki, a variraju zavisno od lokacije, odnosno, nalazi li se bušotina na moru ili kopnu. U Ujedinjenom Kraljevstvu (UK), cijena likvidacije i napuštanja na moru može iznosi od 2 do 10 milijuna USD, zavisno od korištene tehnologije, za jednu bušotinu (Campbell i Smith, 2013).

S obzirom na visoke troškove napuštanja naftnih i plinskih bušotina (Joyce i Wirfs-Brock,2015) oni se pokušavaju smanjiti različitim tehnološkim i idejnim rješenjima (Campbell i Smith, 2013; Stokes, 2014; Fanailoo et al., 2017). Umjesto napuštanja postoji mogućnost revitalizacije takvih bušotina i njihovog korištenja u energetske svrhe. Time bi se u potpunosti izbjegli visoki troškovi likvidacije i napuštanja, osigurao bi se stalni monitoring uz nastavak korištenja bušotina, izbjegla bi se opasnost od zagađenja okoliša, te bi se povećao udio korištenja geotermalne energije u energetskoj bilanci.

Pregledom dosadašnjih istraživanja može se zaključiti da je posljednjih nekoliko godina u porastu zanimanje za prenamjenu i revitalizaciju napuštenih bušotina. One su prepoznate kao potencijalni izvor za iskorištavanje geotermalne energije. Nekoliko je prednosti takve prenamjene. Najistaknutija prednost se javlja u obliku smanjenih troškova izrade novih bušotina, od kojih je najveća stavka samo bušenje. Nekoliko je predloženih metoda za iskorištavanje velikog broja napuštenih bušotina. Jedna od mogućih metoda je prenamjena u tzv. poboljšani geotermalni sustav ili EGS (engl. *Enhanced Geothermal System*). Takav sustav zahtjeva izradu hidraulički frakturiranih pukotina između dvije bušotine, utisne i eksploatacijske. Tijekom prolaska hladnijeg fluida kroz pukotine, ostvaruje se prijenos toplinske energije između tople stijene i fluida. Zagrijani fluid se potom crpi preko eksploatacijske bušotine. Istraživanje Caulka i Tomac (2017) pokazalo je da postoji potencijal za takvo iskorištavanje geotermalne energije, uz napomenu da je potrebno dodatno istražiti utjecaj hidrauličkog frakturiranja u slabo konsolidiranim pješčenjacima kakvi izgrađuju njihovo istraživano područje. Zhang et al. (2008) prikazali su u svojem istraživanju mogućnost iskorištavanja energije iz već napuštenih ili uskoro napuštenih naftnih i plinskih bušotina. Sustav je nazvan iznimno poboljšani geotermalni sustav (engl. *Exceptional Enhanced Geothermal Systems* - EEGS), a temelji se na utiskivanju zraka u stara ležišta, oksidaciju te zapaljenje. Prije samog zraka, potrebno je utisnuti vodu. Nakon izgaranja, voda preuzima energiju nastalu gorenjem preostale nafte u ležištu. Pretpostavlja se da će se uz tako zagrijani geotermalni fluid proizvoditi i dio nafte. Autori naglašavaju da je korišten jednostavan proračun za procjenu pridobive količine energije, koji je moguće koristiti za početnu procjenu, te da je potrebno daljnje istraživanje metode. Sustav koji se najčešće predlaže za iskorištavanje geotermalne energije i revitalizaciju napuštenih bušotina temelji se na već dostupnim istraživanjima i tehnologiji iskorištavanja topline iz plitkih izvora geotermalne energije pomoću bušotinskih izmjenjivača topline. Takvi sustavi nazivaju se dubokim izmjenjivačima topline. U dosadašnjim istraživanjima dubokih izmjenjivača topline dani su proračuni, analitički ili numerički, kojima se procjenjuje potencijalna pridobiva energija.

S obzirom da ideja korištenja dubokih bušotina potječe iz iskorištavanja plitkih geotermalnih resursa, postoji nekoliko izvedbi izmjenjivača. Iako je U-sonda najčešće primjenjivani model izmjenjivača kod iskorištavanja geotermalne energije plitkih resursa, za duboke izmjenjivače većina dosadašnjih istraživanja temelji se na koaksijalnim izmjenjivačima, s obzirom na veću dodirnu površinu i manji pad tlaka u odnosu na U-sonde. Kohl et al. (2002) u svojem su radu prikazali rezultate mjerenja tijekom rada dubokog koaksijalnog izmjenjivača (2,3 km), koji se nalazi u Švicarskom Weggisu. Revitalizirana negativna bušotina puštena je u rad 1994. g. Mjerenja su provedena tijekom tri godine rada izmjenjivača, te se analizom praćenja temperatura ulaznog i izlaznog fluida došlo do zaključka da duboki izmjenjivač nije dovoljno iskorišten. Zaključak je izveden na temelju srednje temperature radnog fluida koji se vraća iz sustava u bušotinu, a koja je iznosila oko 40 °C. Kako bi se dobila nova projekcija za daljnje iskorištavanje toplinske energije izvedena je numerička simulacija rada izmjenjivača. Izrađeni su različiti modeli koji su opisivali prijelaz toplinske energije s matriksa stijene na izmjenjivač te prijelaz toplinske energije unutar samog izmjenjivača. Posebna pozornost je posvećena modeliranju prijelaza toplinske energije kroz izoliranu centralnu cijev. Rezultati analize mjerenih podataka kod različitih masenih protoka radnog fluida su pokazali da je sustav u mogućnosti dati više toplinske energije nego što je do tada korišteno. Za potrebe lokalnih stambenih i poslovnih objekata koristilo se manje od 20 W/m, dok se novim proračunima pokazalo da sustav može podržati iskorištavanje i do 85 W/m. Odnosno, postojala je mogućnost priključenja novih korisnika za potrebe grijanja i/ili pripremu potrošne tople vode. Uz bušotinu u Weggisu revitalizirana je i bušotina u gradu Weissbadu ugradnjom koaksijalnog izmjenjivača topline. Rad te revitalizirane bušotine praćen je uzastopce tijekom dvije godine (Kohl et al., 2000). Rezultati mjerenja pokazali su da bušotina ne proizvodi toplinske energije koliko je bilo predviđeno tijekom simulacija, uz zaključak je da je tome razlog nepotpuna cementacija vanjske kolone izmjenjivača. Osim revitaliziranih bušotina u Weggisu i Weissbaadu, revitalizirana je još jedna bušotina u Švicarskoj, i to na području Züricha, dubine 2,7 km (Link et al., 2015). U Aachenu (Njemačka) 2004. g. izrađena je bušotina u koju se trebao ugraditi duboki izmjenjivač topline. Bušotina se nalazi pored Sveučilišta u Aachenu, a namjena je bila za grijanje novo izgrađenog objekta za potrebe sveučilišta. Analiza prikupljenih podataka tijekom izrade i kasnijih simulacija pokazala je da bi izmjenjivač omogućio dovoljnu količinu energije za grijanje (Dijkshoorn et al., 2013). Međutim, s obzirom na visoku temperaturu izlaznog fluida, nije bilo moguće ostvariti hlađenje tijekom ljetnog perioda uz postojeći apsorpcijski sustav. Uz to, potencijal nije ostvariv s obzirom da je potrebna velika novčana investicija za potrebe izolacije tubinga te se od daljnjeg razvoja projekta

odustalo. Posljednji primjer izvedbe realnog sustava nalazi se u Kini. Testiranje sustava pokazalo je da je uz primjenu dizalica topline i koeficijent efikasnosti dizalice topline ili toplinski množitelj (engl. coefficient of performance – COP) od 6,4, moguće ostvariti 286 kW_t (Wang et al., 2017).

Dosadašnja istraživanja pokazala su da je upotrebom dubokih izmjenjivača, osim za pridobivanje toplinske energije, moguće ostvariti proizvodnju električne energije. Proizvodnja električne energije zavisna je od temperature fluida na ušću bušotine, međutim, istraživanja su pokazala da binarne elektrane mogu proizvoditi struju s temperaturom fluida i od 74 °C (Aneke et al., 2011). Osim što su ovakvi sustavi pogodni za direktno korištenje toplinske energije, prednost se očitava i u mogućem kaskadnom korištenju. Kaskadno korištenje toplinske energije pretpostavlja uzastopno korištenje toplinske energije u ciklusima, dok nije postignuta unaprijed određena minimalna temperatura fluida pogodna za korištenje, najčešće uz upotrebu dizalice topline. Nakon zadnjeg koraka iskorištavanja, ohlađeni fluid se vraća u cirkulacijski krug izmjenjivača. Do sada provedena istraživanja dubokih bušotinskih izmjenjivača pokazala su potencijal iskorištavanja toplinske energije uz pomoć raznih rashladnih sredstava kao i vode. Prednost vode kao radnog fluida vidljiva je u povoljnom i lako dostupnom mediju, kao i u činjenici da u slučaju propuštanja ne postoji opasnost od zagađenja podzemnih voda, tla i stijena. Korištenje ovakvih niskotemperaturnih sustava pogodno je za direktno grijanje stambenih i poslovnih objekata, grijanje potrošne tople vode, primjenu u balneologiji, agronomiji i sl. Jedna od mogućnosti primjene je i desalinizacija morske vode (Noorollahi et al., 2017).

Na temu procjene količina toplinske ili električne energije objavljeno je nekoliko radova, koji se temelje ili na numeričkom ili na analitičkom modelu prijelaza toplinske energije sa stijene na radni fluid. Kujawa et al. (2006) prikazali su numerički model prijelaza toplinske energije na primjeru tada još aktivne proizvodne naftne bušotine u Poljskoj, Jachowka K-2. Predviđena je prenamjena te bušotine po prestanku proizvodnje nafte. Za potrebe proračuna korišteni su poznati termogeološki parametri te lokacije. Pretpostavljena je upotreba koasijalnog izmjenjivača na način da radni fluid prilikom utiskivanja prolazi kroz prstenasti prostor te se zagrijani fluid vraća kroz tubing na površinu. Proračun je rađen za različite vrijednosti protoka i za tri slučaja izolacije tubinga, odnosno unutarnje cijevi (bez izolacije, djelomična izolacija i izolacija punom duljinom tubinga) te dvije vrste izolacije (zrak i poliuretanska pjena). Najveća količina pridobive toplinske energije dobivena je za slučaj kada je tubing izoliran cijelom duljinom, kao posljedica manjeg gubitka toplinske energije zagrijanog fluida na putu prema ušću bušotine. Templeton et al. (2014) razvili su model

prijenosa topline koji je uspoređen s analitičkim cilindričnim modelom te dva numerička modela predloženih od Kujawa et al. (2006) i Bu et al. (2012), na primjeru napuštene bušotine u Perzijskom zaljevu. Uspostavljeni model pokazao je veću točnost u odnosu na numeričke modele s kojima je uspoređen, što je pripisano određenim pojednostavljenjima koja su primijenjena u tim modelima. Ghoreishi-Madiseh et al. (2013) istraživali su primjenu U-sonde kao dubokog izmjenjivača te su uz model prijelaza toplinske energije zaključili da se utjecaj prirodne konvekcije, uzrokovane pojavom toka podzemne vode u poroznoj sredini, ne bi trebao zanemariti. Na temelju istraživanja zaključili su da je uz vrijednosti hidrauličke vodljivosti manje od 10^{-5} m/s dovoljno pretpostaviti isključivo konduktivni prijelaz toplinske energije, međutim kod većih vrijednosti poželjno je uračunati i konvektivni prijelaz toplinske energije.

Istraživanja koja su se zasnivala na modeliranju revitaliziranih dubokih bušotina korištenjem drugih radnih fluida, tj. rashladnih sredstava, su također dostupna. Iskorištavanje takvih sustava predviđeno je u najvećoj mjeri za proizvodnju električne energije, s obzirom na termodinamička svojstva fluida. Davis i Michaelides su 2009. g. predstavili rezultate simulacije kojom je određena količina pridobive energije iz napuštene naftne bušotine na području južnog Teksasa, SAD. Kao radni fluid upotrijebljen kod modeliranja izabran je izobutan te su u obzir uzeti geotermalni gradijenti i tehnički parametri same bušotine. Zaključili su da se ovakvim sustavom može proizvoditi između 2 i 3 MW električne energije. Cheng et al. (2013) su analizirali i predstavili rezultate numeričke simulacije eksploatacije toplinske energije prenamjenom napuštene naftne bušotine, dubine 6000 m, za proizvodnju električne energije. Za potrebe analize mijenjani su različiti parametri tijekom simulacija, poput toplinske vodljivosti, specifične topline i protoka fluida. Odabran je izobutan kao radni fluid, koji direktno ulazi i izlazi, kako u izmjenjivač, tako i u ORC elektranu. Simulacija je pokazala smanjenje temperature radnog fluida tijekom simulacije, uz postizanje stabilizacije nakon određenog vremena. Autori su zaključili da postoji optimalni protok radnog fluida kojim se omogućuje najveći prinos toplinske energije, a koji je specifičan za pojedino ležište i postrojenje. Također, primijetili su da je povećanjem vrijednosti toplinske vodljivosti ili smanjenjem protoka fluida moguće smanjiti vrijeme potrebno za uspostavu ustaljenog stanja prijelaza toplinske energije. Za razliku od toga, smanjenje ili povećanje vrijednosti toplinskog kapaciteta ležišta nije imalo utjecaj na postizanje ustaljenog stanja. Koristeći Rameyev izraz za opis prijelaza toplinske energije prilikom utiskivanja vrućeg fluida u ležište (Ramey, 1962), Cheng et al. (2014a) su predstavili rezultate modeliranja dubokog izmjenjivača koristeći R143a (trifluoroetan) kao radni fluid te promatrajući utjecaj debljine izolacije unutarnje cijevi i različitih protoka na izlaznu temperaturu fluida. Vidjelo se da se izlazna temperatura povećava

s većom debljinom izolacije. Debljina od 0,03 m izolacije dovoljna je da toplinski gubici između unutarnjeg i vanjskog fluida budu gotovo zanemarivi. Za istu debljinu izolacije primijećeno je da se s manjim protokom fluida ostvaruje veća razlika u izlaznoj temperaturi u odnosu na izlaznu temperaturu kada bi bila ostvarena savršena izolacija fluida. Odnosno, da bi se spriječio gubitak topline sa zagrijanog na ohlađeni fluid, poželjnije je ostvariti veće brzine protjecanja. Cheng et al. (2014b) usporedili su različite vrste fluida koji bi se mogli koristiti kao radni mediji. Iz simulacije je utvrđeno da R134a (tetrafluoretan) i R245fa (pentafluorpropan) daju povoljnije rezultate od R600 (butan), R600a (izobutan), propilen, R290 (propan) i R143a (trifluoretan). Također je uspoređena direktna upotreba geotermalnog fluida (engl. Direct power generation system - DPGS) i flash sustav (engl. Flashing power generation system - FPGS) za proizvodnju električne energije. Simulacija je pokazala da bušotine pliće od 3000 m nisu pogodne za upotrebu s obzirom na manje količine pridobivene električne energije. Za bušotine dubine veće od 3000 m i geotermalni gradijent viši od 0,04 °C/m, DPGS sustav je pokazao povoljnije rezultate od flash sustava. Za razliku od ostalih istraživanja koja su se bavila radnim medijima s nižom točkom vrelišta, Wight i Bennett (2015) su proučili upotrebu vode kao radnog fluida u sustavu koji bi omogućio proizvodnju električne energije pomoću organskog Rankineovog ciklusa (ORC) geotermalne binarne elektrane. Za potrebe istraživanja, analizirani su podaci prikupljeni iz 2500 bušotina na području Teksasa. Podaci su iskorišteni za dobivanje parametara potrebnih za modeliranje, a koji su uključivali podatke o temperaturama te parametre samih bušotina. Pomoću njih su izračunate vrijednosti geotermalnog gradijenta za pojedinu lokaciju, prijenosi topline u bušotini te bušotinski otpori. Za prosječan geotermalni gradijent od 0,0311 °C/m, dobivena izlazna temperatura fluida bila je 130 °C za bušotinu dubine 4200 m s protokom vode od 2,5 kg/s, čime bi dobivena snaga iznosila 109 kW. S povećanjem protoka fluida, bez promjene temperature vode, potrebna je veća duljina izmjenjivača. Promatrana je i potrošnja električne energije za pumpu, potrebna da cirkulira vodu u izmjenjivaču u odnosu na različite protoke. Zaključeno je da je energija potrebna za rad pumpe, za zadane protoke, puno manja nego moguća ostvarena snaga elektrane.

Analiza potencijalne uštede u odnosu na izradu nove geotermalne bušotine predstavljena je u studiji grupe autora (Bu et al., 2012). Procjena je pokazala 50% uštedu kod prenamjene u odnosu na cijenu izrade potpuno nove bušotine. Uz prikaz numeričkog modela koji opisuje prijenos topline, Ghoreishi-Madiseh et al. (2014) potvrdili su utjecaj različitih parametara na iskoristivost dubokih izmjenjivača, poput duljine izolacije tubinga, toplinske vodljivosti stijena, geotermalnog gradijenta i protoka radnog fluida kroz izmjenjivač. Također su zaključili da napuštene naftne i plinske bušotine mogu biti ekonomski isplative za

proizvodnju energije. Soldo i Alimonti (2015) prikazali su usporedbu dviju tehnologija za iskorištavanje geotermalne energije na naftnom polju u Italiji - direktno korištenje i upotreba izmjenjivača. Usporedba se temeljila na analizi zadanih kriterija, što je pokazalo da izmjenjivači imaju nešto bolju ocjenu. Međutim, naglašeno je da je potrebno obratiti pozornost i na kriterije i na dvije matrice pomoću kojih se odluka donosi: u osnovnoj matrici, gdje svi kriteriji teže jednako, bolje je ocijenjena tehnologija izmjenjivača. Druga predložena matrica razlikuje dvije težinske razine za četiri kriterija: (A) energija i cijena i (B) učinak na okoliš te održivost. U slučaju A direktna upotreba geotermalnog fluida ima prednost. Međutim, matrica B veću težinu dodjeljuje okolišnim čimbenicima, pri čemu upotreba izmjenjivača daje bolje rezultate. Sapinska-Sliwa et al. (2015) dali su pregled dosadašnjih istraživanja dubokih izmjenjivača topline s naglaskom na moguću primjenu na području Karpata. Naglasili su da je razlog nepostojanja takvih projekata najviše nedostatak regulatornog i pravnog okvira. Također predlažu uvođenje subvencija za izradu takvih sustava, da bi se skrenula pažnja i dao poticaj što većem broju revitalizacija.

Prema podacima EU, Republika Hrvatska je u 2017. g. koristila oko 28% energije iz obnovljivih izvora (hidroenergija, vjetar, solarna, biomasa, geotermalna). Međutim, od tih 28%, geotermalna energija je sudjelovala sa samo 0,1% (http://ec.europa.eu/eurostat/, 2018b). U Republici Hrvatskoj duboka geotermalna energija se najviše koristi u balneološke svrhe i manji dio za potrebe grijanja (REF). Puštanjem prve geotermalne ORC elektrane na području kontinentalne Hrvatske vidljivo je da postoji potencijal iskorištavanja i u te svrhe (Croatian Hydrocarbon Agency, 2020). Da bi se udio geotermalne energije povećao, potrebno je uz klasične načine iskorištavanja geotermalne energije razmatrati i nekonvencionalne pristupe. Poznato je da se na području Panonskog bazena, broj istražnih, razradnih i eksploatacijskih bušotina kreće oko 4 500 (INA d.d., 2017). S obzirom da je proizvodnja ugljikovodika u padu te se predviđa povećanje broja napuštenih bušotina, kao i da Panonski bazen karakterizira povoljan geotermalni gradijent, jedna od mogućnosti iskorištavanja napuštenih bušotina je revitalizacija te korištenje toplinske energije ugradnjom dubokih koaksijalnih bušotinskih izmjenjivača topline.

Na temelju dosadašnjih istraživanja, zaključeno je da na području Panonskog bazena postoji potencijal u iskorištavanju geotermalne energije revitalizacijom napuštenih bušotina. Za procjenu dostupne toplinske energije prenamjenom takvih bušotina potrebno je uspostaviti model koji opisuje prijenos topline sa stijenske mase na bušotinu i cirkulirajući fluid. Istraživanja su pokazala da je zatvoreni koaksijalni sustav izmjenjivača povoljniji te je on odabran kao sustav za daljnje istraživanje. Uz proračun prijelaza toplinske energije, potrebno

je istražiti utjecaj različitih parametara (toplinske vodljivosti, toplinskog difuziviteta i protoka) na pridobivanje toplinske energije na istraživanom području. Također, potrebno je skrenuti pažnju na, u Hrvatskoj trenutno nepostojeće, zakonske i regulatorne okvire koji su nužni za izradu i upravljanje ovakvim sustavima.

2.1. Pregled zakonskog i regulatornog okvira i smjernica za upravljanje geotermalnim resursima

Kao članica EU, RH ima obveze ispunjenja direktiva koje propisuju korištenje obnovljivih izvora energije, povećanje energetske učinkovitosti i energetske neovisnosti. U sklopu Direktive 2009/28/EC geotermalna energija definirana je kao „energija pohranjena u obliku topline ispod tvrde Zemljine površine.“ Prema navedenoj definiciji, izvori geotermalne energije mogu biti geotermalne vode kao i same stijenske formacije. S obzirom da je geotermalna energija jasno navedena kao jedan od obnovljivih izvora energije, na području EU su provedeni projekti od značaja za promicanje i korištenje geotermalne energije u energetske svrhe, čiji su najznačajniji rezultati opisani u nastavku.

Projekt GEODH (engl. Geothermal District Heating) izveden je u trajanju od dvije godine (2012.-2014.) sa ciljem promoviranja korištenja geotermalne energije kod centraliziranih sustava grijanja (GEODH, 2014). U projektu je naglašeno da postoji značajan geotermalni potencijal na području EU koji može biti iskorišten za rad centraliziranih sustava opskrbe toplinskom energijom te da taj potencijal nije iskorišten u dovoljnoj mjeri. U sklopu projekta dan je pregled pravnih i regulatornih praksi u 14 država članica EU. Tržišta tih 14 država podijeljena su prema razvijenosti korištenja geotermalne energije u centraliziranim toplinskim sustavima u tri grupe: zrela tržišta, tržišta u tranziciji i tržišta u razvoju. Zrela tržišta, koja čine Francuska i Njemačka, karakterizirana su transparentnim i dostupnim podacima o geotermalnom potencijalu, geološkim uvjetima nekog područja, jasno definiranim procedurama i opisima ishođenja potrebnih dozvola, te razrađenom i jasnom shemom o dostupnosti fondova koji potiču razvoj centraliziranih toplinskih sustava s većinski geotermalnom energijom kao izvorom na nacionalnoj i/ili regionalnoj razini. Sudionici na tržištu dobro su upoznati s pravno-regulatornim okvirima ovakvog načina uključivanja geotermalne energije u sustav, uz potporu nacionalnih i regionalnih/lokalnih tijela, te su definirani sustavi potpora i fondovi osiguranja investicija. Većina prepreka kod ovakvih tržišta odnosi se na dugotrajnost i zahtjevnost administrativnih postupaka, nedostatak kvalificiranih stručnjaka te, u slučaju Njemačke, nedostatak osiguranja investicije za pojedine slučajeve.

Tržišta u tranziciji (poput Danske, Italije, Mađarske, itd.) karakterizirana su zadovoljavajućim stupnjem pristupa potrebnim početnim informacijama za procjenu resursa, jasno definiranim vlasništvom, uz često postojanje financijskih potpora investitorima i korisnicima sustava. Međutim, tržišta u tranziciji imaju naglašenijih problema s dugotrajnošću i zahtjevnošću administrativnih postupaka kod pribavljanja potrebnih odobrenja i dozvola, prilikom čega u većem broju država nedostaju jasne pravne i regulatorne odredbe korištenja i eksploatacije resursa, posebice u centraliziranim sustavima. Često se javlja nedostatak potpora nacionalnih i regionalnih tijela, sustavi potpora za investitore i korisnike su djelomično razvijeni, nedostaju kvalificirani stručnjaci, strategija eksploatacije, korištenja i upravljanja cjelokupnog sustava je slabo razvijena ili nepostojeća i sl. Tržišta u razvoju (poput Bugarske, Češke, Slovenije, itd.) karakterizira težak pristup podacima o potencijalima ili njihov nedostatak, strategije regionalnog i lokalnog razvoja su u postupcima opsežne nadopune ili razvoja. Prepreke koje se javljaju kod tržišta u razvoju su najčešće regulirane ili povlaštene tržišne cijene plina te nedostatak pravnog i regulatornog okvira, čime je otežano poslovanje na svim razinama. Nadalje, rijetko su dostupni zaštitni mehanizmi investicije kao i razni potporni fondovi, što odbija potencijalne investitore. Uz to su administrativni postupci izrazito dugotrajni, kompleksni, nejasni, a često i financijski zahtjevni. Na temelju analize tržišta i iskustva pojedinih država dane su smjernice koje bi države članice mogle implementirati i olakšati upravljanje i korištenje geotermalnih resursa. Preporuka je uspostava jasno definiranog pravno-regulatornog okvira, omogućavanje dostupnosti podatka o potencijalu i geološkim karakteristikama za provedbu predinvesticijskih studija i izrada energetske strategije na nacionalnoj i regionalnoj razini s naglaskom na korištenje geotermalne energije umjesto fosilnih goriva. Uz to, predviđeno je izjednačavanje sustava poticaja za sve oblike obnovljivih izvora energije (tzv. engl. level playing field) uz ukidanje reguliranih cijena plina. Potrebno je izraditi kvalitetne sustave poticaja kako bi se privukli investitori, što je posebno važno s obzirom na visoke troškove tijekom izrade geotermalnih bušotina, kao i definirati neki od sustava osiguranja investicije.

Projekt GTR-H (engl. GeoThermal Regulation – Heat) usporedio je pravne, regulatorne i ekonomske okvire razvijenih tržišta toplinskom energijom iz geotermalnih resursa Francuske i Njemačke s tržištima kod kojih je iskorištavanje takve energije na nižim razinama. Preporuke proizašle iz ovog projekta odnose se na jasno definiranje geotermalne energije i povezanih tehnologija, jasno definiranje vlasništva nad mineralnim resursom kao i nedvosmislen postupak pribavljanja potrebnih dozvola za istraživanje i eksploataciju, kao i određivanje prioriteta iskorištavanja u slučaju pojave drugih resursa (npr. pitka voda). Preporuka je da se odluke i

administrativne procedure za manje i plitke sustave uključe u nadležnost tijela lokalne samouprave, te na taj način rasterete tijela na državnoj razini, koja se mogu tada više posvetiti zahtjevnijim projektima. Između ostalog, savjetuje se minimalna naknada ili koncesija za korištenje geotermalnog resursa, kao i uspostava financijskih olakšica u vidu poreznog rasterećenja, manjih kamatnih stopa, sustava poticanja i slično. Potrebno je razmotriti i uspostavu tijela, npr. fonda, čiji bi glavni zadatak bio prikupljanje podataka o instaliranim sustavima, bilo da su oni plitki ili duboki, davanje preporuka za standardiziranje postupka izrade cjelokupnih sustava, edukacija, praćenje i davanje mišljenja na pravni, regulatorni i ekonomski okvir područja, te cjelokupno praćenje geotermalnih resursa i povezanih sustava.

GEOELEC (engl. Geothermal Electricity) je projekt koji je bio fokusiran na korištenje geotermalnih resursa za proizvodnju električne energije. Jedan od ciljeva projekta je bila identifikacija potencijalnih područja za razvoj i korištenje geotermalnih elektrana kao i njihov energetski i ekonomski potencijal za 2020., 2030. i 2050. godinu. Osim klasične proizvodnje ležišnog fluida, projekt je obuhvatio i izradu poboljšanih geotermalnih sustava (EGS) na temelju pozitivnih iskustva EGS projekata na području EU (npr. Soultz-sous-Forêts, Francuska). Kao jedno od najvećih prepreka identificirani su visoki inicijalni troškovi prilikom izrade bušotina, koji mogu iznositi i do 70% ukupnih troškova projekta, uz visoki stupanj rizika u slučaju da bušotine ne ispune zadatak. Stoga su dane preporuke i smjernice koje bi osigurale ravnopravnost električne energije iz geotermalnih resursa na tržištu. One se odnose, kao i u slučaju toplinske energije, na poticajne mehanizme u vidu sufinanciranja, potpora, tarifa, smanjenja poreza i osiguranja investicija na nacionalnim razinama pojedinih članica. Uz to, dane su pravno-regulatorne smjernice koje imaju za cilj pružiti jednoznačno određena pravila i postupke, što će olakšati privlačenje daljnjih investicija. Naglasak je stavljen i na osiguravanje stručnjaka iz područja korištenja geotermalnih resursa, u svakom aspektu, od istražnih radova do puštanja elektrana u pogon i njihovog održavanja. Procijenjeno je da bi implementacija preporuka pozitivno djelovala i na tržište rada, otvaranjem novih radnih mjesta i unutar naftno-rudarske struke.

Najznačajniji prijedlog GEOFAR projekta (Geothermal Finance and Awarness in European Regions) je uspostava sustava za otklanjanje i upravljanje rizicima (GeoRiMi – engl. Geothermal Risk Mitigation system) koji se javljaju kod projekata već u ranim fazama, vezanih uz geotermalne resurse. Predložena financijska rješenja prošla su nekoliko razina ekonomskih i financijskih provjera od strane neovisnih stručnjaka.

U Republici Hrvatskoj korištenje geotermalnih voda u energetske svrhe definirano je Zakonom o rudarstvu (NN 94/13; NN 115/18) i Zakonom o istraživanju i eksploataciji

ugljikovodika (NN 52/18), dok je upotreba mineralnih i geotermalnih voda u ljekovite i balneološke svrhe propisana Zakonom o vodama (NN 153/09; NN 46/18). Prema Zakonu o istraživanju i eksploataciji ugljikovodika, geotermalne vode su u vlasništvu RH, te je za njihovo korištenje potrebno pribaviti zakonima propisane dozvole (dozvola za istraživanje geotermalnih voda; dozvola za eksploataciju; dozvola za pridobivanje geotermalnih voda, ugovor o eksploataciji geotermalnih voda, itd.) od nadležnih državnih, regulatornih i/ili tijela regionalne i lokalne samouprave. Kako su u Zakonu o istraživanju i eksploataciji ugljikovodika definirane isključivo geotermalne vode kao nositelji akumulirane topline koja se može koristiti u energetske svrhe, vidljivo je da je, s obzirom na porast istraživanja i zainteresiranosti u korištenju dubokih izmjenjivača topline, potrebna preciznija definicija geotermalne energije i njezinog korištenja. Pravno-regulatorne odredbe za iskorištavanje geotermalne energije vezane su uz eksploataciju ugljikovodika ili voda (u slučaju kada se ona ne koristi u energetske svrhe). U narednim razdobljima primjene energetskih paketa očekuje se porast korištenja obnovljivih izvora energije, među kojima geotermalni resursi imaju važnu ulogu. Porast korištenja obnovljivih izvora energije vezan je uz Direktivu 2009/28/EC i programske klimatske i energetske pakete 2030 i 2050.

S obzirom na navedeno, može se zaključiti da je je potrebno revidirati trenutne pravne i regulatorne odredbe vezane uz istraživanje, eksploataciju, korištenje i upravljanje tim resursom, a kako bi se omogućilo njegovo iskorištavanje u RH u što većoj mjeri. Kao dobra podloga mogu se koristiti stečena znanja iz prethodno opisanih EU projekata, a čija svrha je upravo bila da se odrede smjernice na razini EU, na temelju dobrih poslovnih praksi pojedinih tržišta. Kako je poznato da je većina trenutnih ležišta ugljikovodika na području kontinentalne RH u zadnjim stadijima pridobivanja, geotermalni resursi bi mogli biti i važna gospodarska djelatnost, sa stanovišta zapošljavanja. S obzirom na sličnosti između procesa pridobivanja ugljikovodika i geotermalne energije, pravovremenim razvojem naftno-rudarske struke u navedenom području, moguće je uspostaviti visok stupanj razvoja ovog važnog energetskog izvora.

3. MATEMATIČKI MODEL PRIJELAZA TOPLINSKE ENERGIJE

Glavne postavke matematičkog modela koji opisuje konduktivni prijelaz toplinske energije dao je Fourier, u svojem radu *Theorie analytique de la Chaleur*, objavljenom 1822. godine. Matematički izraz poznat je i kao Fourierov zakon ili diferencijalna jednadžba toplinske difuzije, čiji su principi preuzeti prilikom rješavanja problema protoka fluida kroz poroznu sredinu (Darcyjev zakon) ili prolaza električne energije kroz električni vodič (Ohmov zakon). Analogno Fourierovom zakonu, Darcyjev zakon jednadžbom difuzije opisuje protok nestlačivog fluida u poroznoj sredini. Prvotno je model primijenjen u hidrogeologiji, za opis protoka vode, međutim kasnije je Muskat prilagodio Darcyjevu jednadžbu da za opis višefaznog protoka vode, nafte i plina. Fourierov zakon dakle, analogan je opisu Darcyjevog zakona, koji se u naftnoj industriji često koristi prilikom izvođenja hidrodinamičkih mjerenja. Postoji nekoliko modela koji opisuju prijelaz toplinske energije, odnosno rješenja diferencijalne jednadžbe toplinske difuzije, u zavisnosti od različitosti geometrijskih sustava za koji se razmatra prijelaz toplinske energije te različitih graničnih i početnih uvjeta. Matematički opis prijelaza toplinske energije temelji se na principu zakona očuvanja energije koji pretpostavlja da je brzina akumulacije topline jednaka razlici toplinske energije koja ulazi i izlazi iz sustava, te se bilanca toplinske energije u sustavu može izraziti kao:

Promjena (povećanje ili smanjenje) količine toplinske energije = (ulazna toplinska energija– izlazna toplinska energija) + akumulacija

Fourierov zakon u homogenoj i izotropnoj sredini pokazuje da je konduktivni prijelaz toplinske energije proporcionalan negativnom gradijentu temperature, te glasi:

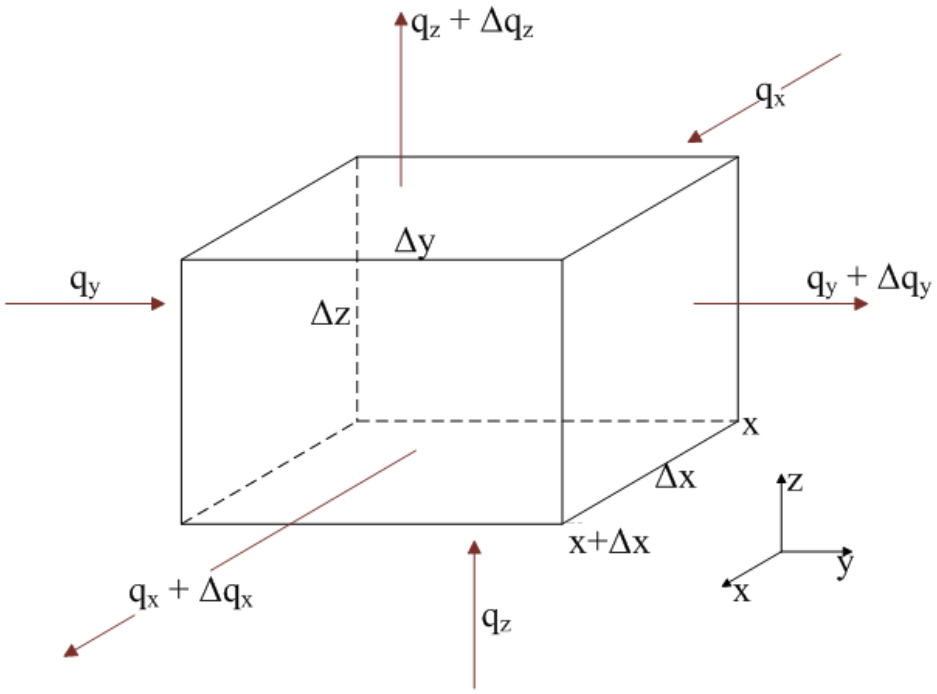
$$q = -\lambda \cdot \nabla \mathrm{T} \tag{3-1}$$

gdje q označava gustoću prijelaza toplinske energije (W/m^2), negativni predznak označava smjer kretanja iz područja više temperature u područje niže temperature, a λ (W/m°C) predstavlja toplinsku vodljivost, veličinu koja opisuje sposobnost nekog materijala da provodi toplinu. Da bi se došlo do rješenja jednadžbe prijelaza toplinske energije uzima se u obzir tzv. kontrolni volumen. Kontrolni volumen definiran je koordinatnim sustavom u kojem se nalazi, a dva najčešća su Kartezijev (pravokutni) i radijalni (cilindrični) koordinatni sustav.

Promatrajući pravokutni koordinatni sustav (Slika 3.1.), jednadžba (3-1) može se izraziti za svaki od smjerova zasebno:

$$q_x = -\lambda \frac{dT}{dx};\quad q_y = -\lambda \frac{dT}{dy};\quad q_z = -\lambda \frac{dT}{dz} \tag{3-2}$$

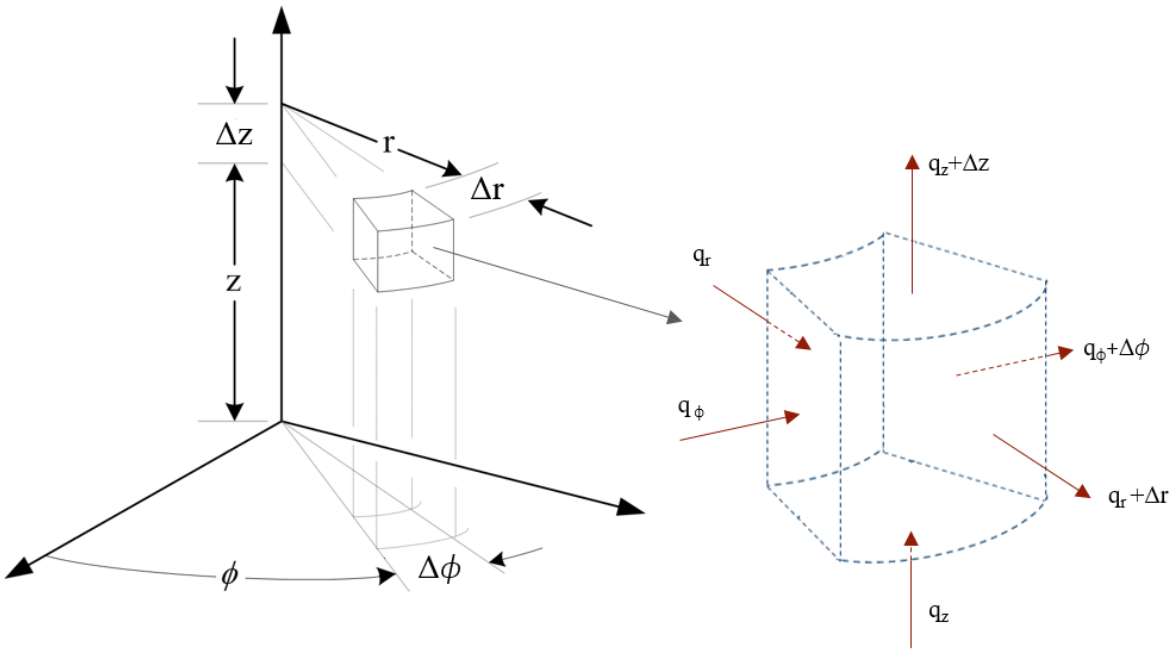
gdje indeksi x, y i z označavaju smjer prijelaza toplinske energije.



Slika 3.1*. Prikaz prijelaza toplinske energije u kontrolnom volumenu u Kartezijevom koordinatnom sustavu*

U slučaju da se promatra cilindrični koordinatni sustav, odnosno radijalni prijelaz toplinske energije (Slika 3.2.), Fourierova jednadžba postaje:

$$q_r = -\lambda_r \nabla T \tag{3-3}$$



***Slika 3.2**. Prikaz prijelaza toplinske energije u kontrolnom volumenu u cilindričnom koordinantnom sustavu*

Da bi se došlo do rješenja diferencijalne jednadžbe difuzije, potrebno je poznavati početne i granične uvjete koji opisuju zadani problem. Uz jednadžbu difuzije, potrebno je uvesti i jednadžbu kontinuiteta, odnosno jednadžbu očuvanja energije. Ako se promatra kontrolni volumen u Kartezijevom koordinatnom sustavu, prijelaz toplinske energije kroz jediničnu površinu u jednom smjeru, npr. smjeru osi x, može se izraziti kao $q_x \Delta z \Delta y$, dok prijelaz toplinske energije na izlazu iz elementa, također u smjeru osi x, glasi $(q_x + \Delta q_x)\Delta y \Delta z$. Prema tome, razlika ulazne i izlazne količine prijelaza toplinske energije iznosi: $-\Delta q_x \Delta y \Delta z$, čime se dolazi do izraza:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot q_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \cdot q_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \cdot q_z) = -\rho c \frac{\partial T}{\partial t} \tag{3-4}$$

Odnosno u cilindričnom koordinatnom sustavu:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r \cdot \rho \cdot q_r) = -\rho c \frac{\partial T}{\partial t} \tag{3-5}$$

gdje ρc predstavlja specifičnu volumnu toplinu (J/m^3°C). Uvrštavanjem izraza (3-2) u jednadžbu (3-4), dolazi se do opće jednadžbe prijelaza toplinske energije u pravokutnom koordinatnom sustavu:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right)=-\rho c\frac{\partial T}{\partial t} \tag{3-6}$$

Odnosno, za slučaj radijalnog prijelaza:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda\frac{\partial T}{\partial r}\right)=\rho c\frac{\partial T}{\partial t} \tag{3-7}$$

Izrazi (3-4) i (3-5) predstavljaju opće izraze diferencijalne jednadžbe toplinske difuzije, u odnosu na pravokutni i cilindrični koordinatni sustav. S obzirom da se sustav smatra homogenim, vrijednost toplinske vodljivosti se uzima kao srednja vrijednost. Daljnjim rješavanje jednadžbe (3-6), dolazi se do konačnog izraza:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}=\frac{\lambda}{\rho c}\frac{\partial T}{\partial t} \tag{3-8}$$

Odnosno, u radijalnom sustavu:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right)=\frac{\lambda}{\rho c}\frac{\partial T}{\partial t} \tag{3-9}$$

Omjer toplinske vodljivosti i specifične volumne topline, $\frac{\lambda}{\rho c}$, Kelvin je opisao kao toplinski difuzivitet, koji se obično označava s α, te ima dimenziju (m^2/s).

Za opisivanje modela konduktivnog prijelaza toplinske energije dva su glavna pristupa - analitički i numerički. Konduktivni prijenos topline najčešće se izražava parcijalnom diferencijalnom jednadžbom, koja se temelji na Fourierovom zakonu toplinske kondukcije (Ingersoll i Zobel, 1913):

$$\alpha\left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right]=\frac{\partial T}{\partial t} \tag{3-10}$$

Jednadžba (3-10) opisuje toplinsku kondukciju u pravokutnom koordinatnom sustavu, a poznata je i pod nazivom jednadžba toplinske difuzije. Ista jednadžba izražena za cilindrični koordinatni sustav glasi:

$$\alpha\left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right]=\frac{\partial T}{\partial t} \tag{3-11}$$

U oba slučaja do rješenja jednadžbe toplinske kondukcije dolazi se upotrebom početnih i graničnih uvjeta za pojedini slučaj.

Dva su glavna modela, odnosno analitička rješenja jednadžbe toplinske difuzije: linijski i cilindrični. Rješenja tih modela daju nešto različite vrijednosti, zavisno od graničnih uvjeta koji se primjenjuju. Linijski model prijelaza toplinske energije razmatra dva slučaja, zavisno od promatranja vertikalne komponente, tj.duljine. Kod oba modela mogu se koristiti cilindrične koordinate, uz uvjet da se izraz $\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2}$ ne uzima u obzir prilikom rješavanja jednadžbe. Kako su predmet ove disertacije napuštene duboke istraživačke ili naftne/plinske bušotine koje su međusobno vrlo udaljene, nije se razmatrao utjecaj interferencije između bušotina. Uz analitička rješenja linijskog prijelaza toplinske energije, mnogi su autori predložili i numeričke modele linijskog i cilindričnog prijelaza toplinske energije prilikom razmatranja korištenja dubokih koaksijalnih bušotinskih izmjenjivača topline (Kujawa et al., 2006; Davis i Michaelides, 2009; Bu et al., 2012; Cheng et al., 2013; Dijkshoorn et al. 2013, Templeton et al., 2014, Ghoreishi-Madiseh et al., 2014;)

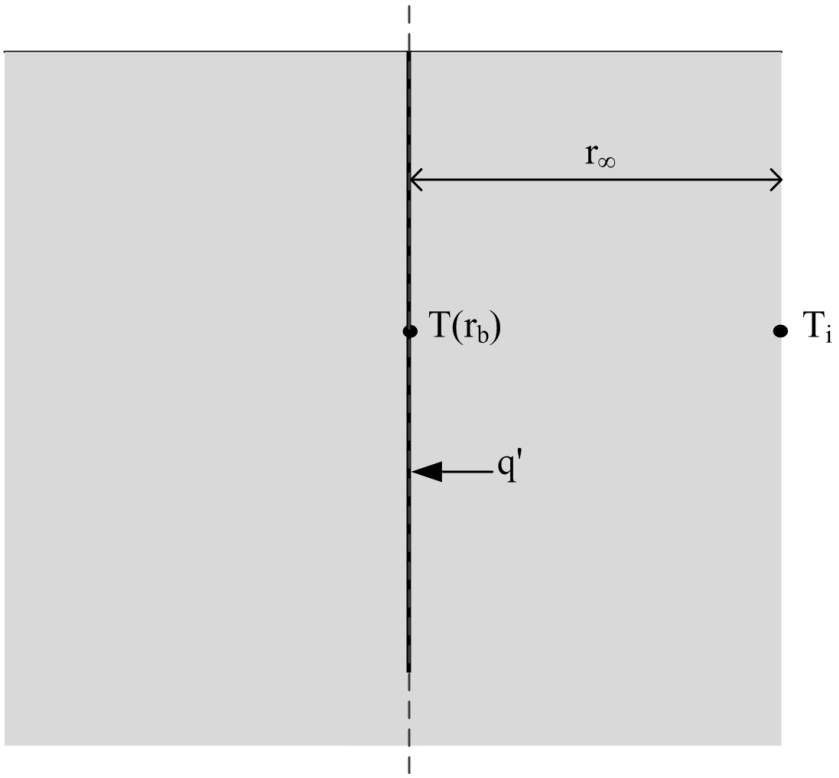
3.1. Linijski model prijelaza toplinske energije

Kod linijskog modela prijelaza toplinske energije osnovna je pretpostavka da je bušotinski izmjenjivač smješten u beskonačnom, izotropnom poroznom mediju konstantne debljine. Dva najpoznatija analitička rješenja su linijski model koji ne uzima u obzir prijelaz toplinske energije u smjeru osi z i drugi koji za potrebe proračuna uzima u obzir i tu varijablu. Najpoznatije analitičko rješenje linijskog prijelaza dali su Carslaw i Jaeger (1959).

3.1.1. Linijski izvor beskonačne duljine (*Infinite line source model - ILS*)

Carslaw i Jaeger (1959) prikazali su rješenje linijskog prijelaza toplinske energije za slučaj toplinskog izvora u nekom mediju. S obzirom na nižu temperaturu stijenke bušotine od medija/formacije u kojem se nalazi, ostvaruje se toplinska kondukcija ili provođenje. Model pretpostavlja da je bušotina beskonačno dugačka linija koja se nalazi u homogenom i izotropnom mediju (engl. *infinite line source model, ILS*) uz konstantan toplinski tok. Kako je promjer bušotine u odnosu na pretpostavku beskonačne dubine bušotine zanemariv, geometrijski se poistovjećuje s beskonačno dugačkom linijom (Slika 3.3). Linijski model

opisuje promjenu temperature u funkciji vremena i polumjera bušotine tijekom prijelaza toplinske energije. Uz pretpostavku cilindričnog koordinatnog sustava, zanemaruje se vertikalna komponenta, tj. vrijedi $\partial^2 T / \partial z^2 = 0$. Drugim riječima, promatra se prijelaz toplinske energije samo u radijalnom smjeru.



Slika 3.3. *Skica linijskog izvora beskonačne duljine (ILS)*

S obzirom da je promjer bušotine relativno mali u odnosu na duljinu izmjenjivača, moguća su određena pojednostavljenja. Pretpostavlja se da je početna temperatura medija u vremenu $t = 0$, odnosno prije uspostave toplinskog toka između bušotinskog izmjenjivača i stijene:

$$T(r,t) = T(r,0) = T_i \tag{3-12}$$

S obzirom na pretpostavku homogenog i izotropnog medija, temperaturno polje na bilo kojoj udaljenosti, r, od bušotine je simetrično u svim smjerovima. Uzevši u obzir granične uvjete, dolazi se do rješenja parcijalne diferencijalne jednadžbe:

$$\Delta T = \frac{q'}{2\pi\lambda}\left(-\frac{1}{2}Ei(u)\right) \tag{3-13}$$

Gdje je u varijabla, koja se definira kao:

$$u = \frac{r^2}{4\alpha t} \tag{3-14}$$

Kod eksploatacije toplinske energije iz stijene ili tla, temperatura na stijenci bušotine ($r = r_b$) se može odrediti pomoću modificirane jednadžbe (3-13):

$$T(r_b,t) = T_i - \frac{q'}{2\pi\lambda}\left(\frac{1}{2}Ei\left(\frac{r_b^2}{4\alpha t}\right)\right) \text{ ili } T(r_b,t) = T_i - \frac{q'}{4\pi\lambda}\left(Ei\left(\frac{r_b^2}{4\alpha t}\right)\right) \tag{3-15}$$

U jednadžbama (3-13) i (3-15) Ei predstavlja eksponencijalni integral, čije rješenje glasi:

$$-Ei(-x) = \int_x^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \tag{3-16}$$

U slučaju kada vrijedi da je $x < 0,02$ (Matthews i Russell, 1967; Lee, 1982), s greškom manjom od 0,6%, eksponencijalni integral se može pojednostaviti i izraziti kao:

$$-E_i(-x) \cong -\ln(e^{\gamma}x) = \ln\left(\frac{1}{x}\right) - \gamma = \ln\left(\frac{1}{x}\right) - 0,5772 \tag{3-17}$$

Gdje γ predstavlja Eulerovu konstantu koja iznosi 0,5772. Kada vrijedi da je $(4\alpha t / r^2) > 50$ za slučaj pridobivanja toplinske energije, jednadžba (3-15) se može izraziti kao:

$$\begin{aligned} T(r,t) &= T_i + \frac{q'}{4\pi\lambda}\left(\ln\left(\frac{e^{\gamma}r_b^2}{4\alpha t}\right)\right) \\ &= T_i + \frac{q'}{2\pi\lambda}\left(\ln\frac{r_b^2}{4\alpha t} + 0,5772\right) = T_i + \frac{q'}{4\pi\lambda}\left(\ln\frac{r_b^2}{\alpha t} - 0,80907\right) \end{aligned} \tag{3-18}$$

Drugi član desne strane jednadžbe pokazuje da je promjena temperature na stijenci bušotine zavisnosti od logaritma vremena.

Da bi se odredila temperatura fluida u izmjenjivaču potrebno je poznavati vrijednosti bušotinskih otpora. Otpor koji bušotina pruža prijelazu toplinske energije s medija naziva se skin. Pojam je analogan pojmu skin u naftnoj industriji, gdje predstavlja bezdimenzijsku vrijednost koja opisuje oštećenje pribušotinske zone. U sustavu gdje se promatra prijelaz toplinske energije, skin se definira kao:

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

Gdje $R_b \cdot q'$ predstavlja bušotinski otpor prijelazu toplinske energije. Odnosno, ΔT_{skin} opisuje otpor koji se mora svladati da bi se uspostavio prijelaz toplinske energije između formacije i izmjenjivača. Pri tome se koeficijent s definira kao (Kurevija et al., 2018):

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

Prema tome, krajnji izraz za određivanje prosječne temperature radnog fluida kod eksploatacije toplinske energije glasi:

$$T_f(t) = T_i + \frac{q'}{2\pi\lambda}\left(\frac{1}{2}Ei\left(\frac{e^{\gamma} r_b^2}{4\alpha t}\right)\right) - \Delta T_{skin} \tag{3-21}$$

Kako je već istaknuto, γ predstavlja Eulerovu konstantu te se izraz (3-21) može predstaviti kao:

$$T_f(t) = T_i + \frac{q'}{4\pi\lambda}\left(\ln\frac{r_b^2}{\alpha t} - 0{,}80907\right) - s\left(\frac{q'}{2\pi\lambda}\right) = T_i + \frac{q'}{4\pi\lambda}\left(\ln\frac{r_b^2}{\alpha t} - 0{,}80907 - 2s\right) \tag{3-22}$$

Jednadžbe (3-21), odnosno (3-22), daju rješenje temperature fluida u bušotinskom izmjenjivaču za slučaj konstantnog opterećenja sustava, odnosno toplinskog pulsa. Drugim riječima, opisuje rad bušotinskog izmjenjivača koji radi uz jednako opterećenje u svakom trenutku korištenja. Međutim, u stvarnosti većina upotrebe toplinske energije zavisi od klimatskih parametara lokacije gdje se sustav nalazi. Odnosno, opterećenje ili korištenje toplinske energije zavisit će od klimatskih parametara (temperature zraka) koji variraju tijekom godine. Takve potrebe korištenja sustava bušotinskog izmjenjivača nazivaju se varijabilnim opterećenjima. Da bi se riješio problem varijabilnog opterećenja, odnosno različitih toplinskih pulseva tj. opterećenja, primjenjuje se princip superpozicije. Postupak superpozicije zasniva se na superponiranju različitih iznosa toplinskih opterećenja jednog na drugi. Tako za slučaj dva različita toplinska pulsa jednadžba (3-18) glasi:

$$T_f(t) = T_i - \frac{q_1'}{2\pi\lambda}\left(\frac{1}{2}Ei\left(\frac{r_b^2}{4\alpha t_1}\right)\right) - \frac{q_2'}{2\pi\lambda}\left(\frac{1}{2}Ei\left(\frac{r_b^2}{4\alpha (t_2 - t_1)}\right)\right) + \Delta T_{skin_2} \tag{3-23}$$

Preporuka je da se ILS koristi za vrijednosti kada je Fourierov broj veći od 20 (Ingersoll i Plass, 1948). Fourierov broj, F_o, opisuje konduktivni prijelaz toplinske energije kroz stijensku formaciju i definiran je kao:

$$F_o = \frac{\alpha t}{r_b^2} \tag{3-24}$$

3.1.2. Linijski prijelaz konačne duljine (*Finite line source model - FLS*)

Za razliku od prethodnog rješenja, u ovom se slučaju uzima u obzir komponenta $\partial^2 T / \partial z^2$ u jednadžbi difuzije, odnosno promatra se prava, konačna, duljina izmjenjivača. Ovaj model se najčešće koristiti kada granični uvjeti nisu ostvareni za upotrebu prethodnog linijskog modela (duži vremenski period i kraće bušotine). Početni uvjeti za rješavanje jednadžbe difuzije glase:

$$T(r,z,t) = T(r,z,0) = T_i \tag{3-25}$$

Na temelju početnih i graničnih uvjeta, Claesson i Eskilson (1987) su došli do rješenja za određivanje temperature na stijenci bušotine, $r = r_b$, pomoću takozvane g –funkcije:

$$T(r_b,t) = T_i - \frac{q'}{2\pi\lambda} g\left(\frac{t}{t_s}, \frac{r}{H}\right) \tag{3-26}$$

g-funkcija se definira kao :

$$g\left(\frac{t}{t_s}, \frac{r}{H}\right) = \begin{cases} \ln\left(\frac{H}{2r}\right) & , t > t_s \\ \ln\left(\frac{H}{2r}\right) + \frac{1}{2}\ln\left(\frac{t}{t_s}\right) & , \frac{5r^2}{\alpha} < t < t_s \end{cases} \tag{3-27}$$

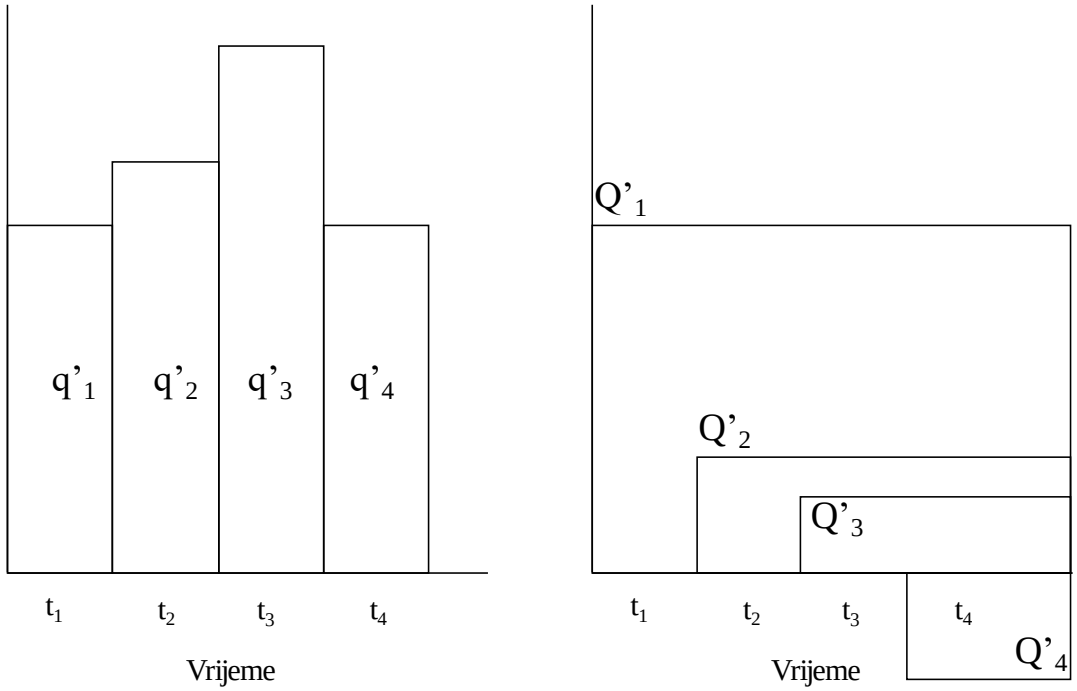
Gdje H predstavlja dubinu ugradnje bušotinskog izmjenjivača (m), a t_s (s) vrijeme u kojem je postignuto ustaljeno stanje prijelaza toplinske energije, koje se računa iz izraza:

$$t_s = \frac{H^2}{9\alpha} \tag{3-28}$$

Prosječna temperatura fluida u izmjenjivaču definira se kao:

$$T_f(t) = T_i - \frac{q'}{2\pi\lambda} g\left(\frac{t}{t_s}, \frac{r}{H}\right) + \Delta T_{skin} \tag{3-29}$$

Rješavanjem izraza (3-29) dobiva se rezultat prosječne temperature fluida koji se nalazi unutar koaksijalnog izmjenjivača za konstantni jedinični prijelaz toplinske energije. Odnosno, ovakvo rješenje može se primijeniti u procjeni temperaturnog odziva bušotinskog izmjenjivača u slučaju konstantnih toplinskih opterećenja tijekom rada sustava. Na temelju dobivenih rezultata, vidljiv je pad temperature radnog fluida tijekom određenog vremena, za koje se pretpostavlja rad sustava. U stvarnosti takvi slučajevi su rijetki i koriste se tek kod određenih industrijskih procesa. Od posebnog je interesa odrediti temperaturni odziv u slučaju varijabilnih toplinskih opterećenja. U tom slučaju toplinska opterećenja podložna su promjenama na godišnjoj, mjesečnoj, dnevnoj i satnoj razini, a zavise od vanjskih klimatskih uvjeta. Za potrebe modeliranja prilikom takvog načina iskorištavanja dubokih bušotina za potrebe grijanja, potrebno je odrediti temperaturni odziv radnog fluida izmjenjivača tijekom radnog vijeka sustava. Temperaturni odziv će, prema tome, biti zavisan i od promjene toplinskih opterećenja tijekom vremena, odnosno potrebno je za određeni vremenski raspon primijeniti potrebno toplinsko opterećenje, $q_i^{'}$. Za potrebe proračuna koristi se načelo superpozicije. Načelo superpozicije temelji se na činjenici da zbroj pojedinih temperaturnih odziva, koji zavise od narinutog toplinskog opterećenja, rezultira krajnjim rješenjem. Chiasson (2016) je opisao primjenu načela superpozicije za nekoliko različitih toplinskih opterećenja (Slika 3.4.). Ono se temelji na superponiranju svakog toplinskog pulsa (toplinskog opterećenja) na prethodni, prilikom čega se prvi toplinski puls primjenjuje na ukupni vremenski interval, $q_1^{'} = Q_1^{'}$. Sljedeći toplinski puls se superponira na prethodni, tj. $Q_2^{'} = q_2^{'} - q_1^{'}$ i tako dalje.



Slika 3.4. *Shematski prikaz primjene načela superpozicije kod različitih toplinskih opterećenja (prema: Chiasson, 2016).*

Opća jednadžba za određivanje temperaturnog polja uz pomoć načela superpozicije, izražava se kao:

$$\Delta T(r,t) = \frac{1}{2\pi\lambda}\sum_{i=1}^{n}\left(\left(q_i^{'} - q_{i-1}^{'}\right) g_i\right) \tag{3-30}$$

te bi za slučaj tri različita toplinska opterećenja, $q_1^{'} > q_2^{'} > q_3^{'}$, izraz za određivanje prosječne temperature radnog fluida unutar izmjenjivača glasio:

- prvo vremensko razdoblje:

$$T_f(t) = T_i - \left[\left(\frac{q_1^{'}}{2\pi\lambda}\right)\cdot g_{t_1}\right] - \Delta T_{skin1} \tag{3-31}$$

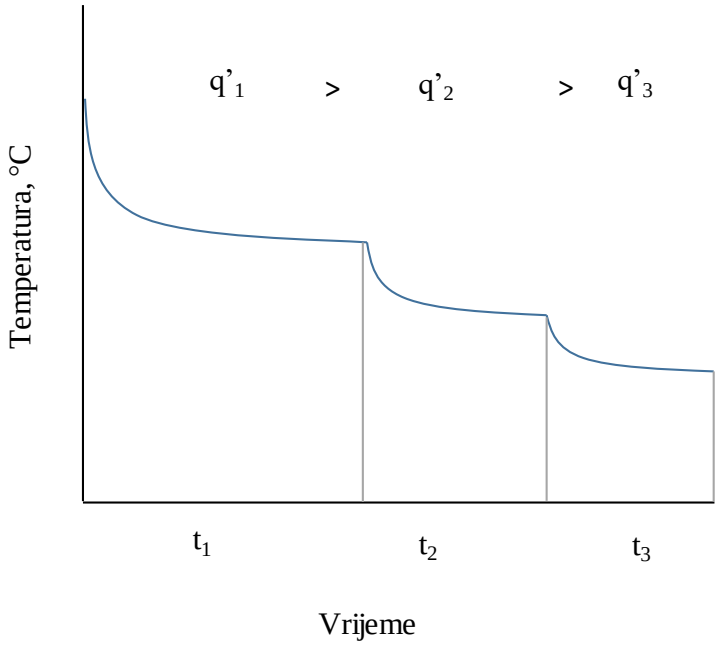
- drugo vremensko razdoblje, $q_1^{'} > q_2^{'}$:

$$T_f(t) = T_i - \left(\frac{1}{2\pi\lambda}\right)\left[\left(q_1^{'}\cdot g_{t_1}\right) + \left(-q_2^{'} + q_1^{'}\right)\cdot g_{t_2-t_1}\right] - \Delta T_{skin2} \tag{3-32}$$

- treće vremensko razdoblje, $q_1^{'} > q_2^{'} > q_3^{'}$:

$$T_f(t) = T_i - \left(\frac{1}{2\pi\lambda}\right)\left[\left(q_1^{'} \cdot g_{t_1}\right) + \left(\left(-q_2^{'} + q_1^{'}\right) \cdot g_{t_2 - t_1}\right) + \left(\left(-q_3^{'} + q_2^{'}\right) \cdot g_{t_3 - t_2}\right)\right] - \Delta T_{skin3} \quad (3\text{-}33)$$

Shematski prikaz izgleda rješenja jednadžbi od (3-31) do (3-33) dani su na slici 3.5.

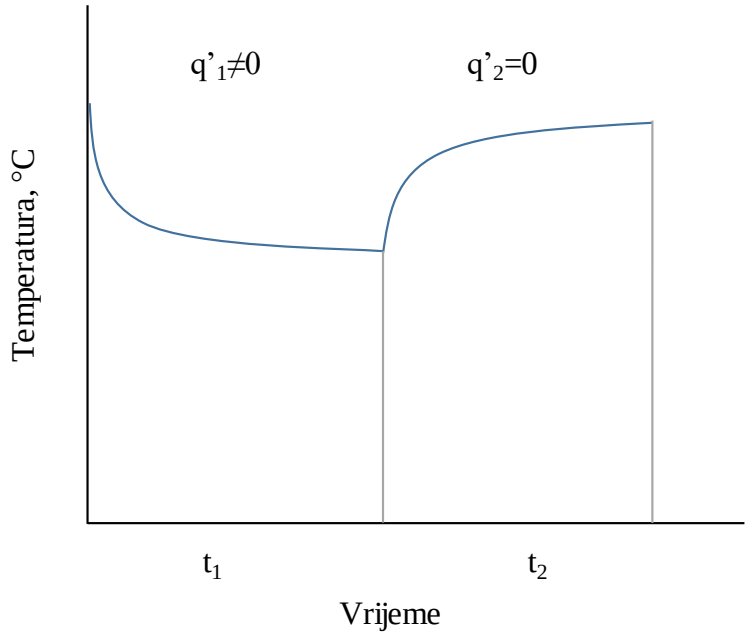


Slika 3.5. *Shematski prikaz temperaturnog odziva fluida u bušotinskom izmjenjivaču u slučaju* $q_1^{'} > q_2^{'} > q_3^{'}$.

Kod realnih sustava i varijabilnog korištenja dubokih izmjenjivača topline, kod pojedinih vremenskih razdoblja, kao što su ljetni mjeseci, sustav se ne koristi te dolazi do toplinskog oporavka stijenske formacije. U tom slučaju potrebno je prilagoditi primjenu načela superpozicije i jednadžbe (3-30) tako da odražava nedostatak toplinskog opterećenja. Na primjeru dva različita toplinska opterećenja (Slika 3.6.), gdje vrijedi da je $q_1^{'} \neq 0$, a $q_2^{'} = 0$, proračun temperaturnog odaziva bi glasio:

- prvo vremensko razdoblje, $q_1^{'} \neq 0$ jednako je izrazu 3-31
- drugo vremensko razdoblje, $q_2^{'} = 0$:

$$T_f(t) = T_i - \left(\frac{1}{2\pi\lambda}\right)\left[\left(q_1^{'} \cdot g_{t_1}\right) - \left(-q_2^{'} + q_1^{'}\right) \cdot g_{t_2 - t_1}\right] \quad (3\text{-}34)$$



Slika 3.6. *Shematski prikaz temperaturnog odziva fluida u bušotinskom izmjenjivaču u slučaju* $q_1^{'} \neq 0 \; i \; q_2^{'} = 0$.

Nadalje, razvijeno je i rješenje koje uzima u obzir da se bušotinski izmjenjivač može naći u takvim uvjetima da postoji konvektivni utjecaj uslijed protjecanja podzemne vode. Istraživanje Eskilsona (1987) je pokazalo da utjecaj protoka podzemne vode nema izražen učinak na prijelaz toplinske energije prema bušotinskom izmjenjivaču kada izraz, koji se može opisati kao bezdimenzijski Pecletov broj kod protoka fluida, ima vrijednost manju od 1:

$$\frac{H \, \rho_w \, c_w \, q_{gw}}{2 \, \lambda} < 1 \tag{3-35}$$

Rješenje se temelji na korištenju bezdimenzijskog vremena, τ, i bezdimenzijskog protoka podzemne vode, h:

$$\tau = \frac{4 \, \alpha \, t}{H^2} \tag{3-36}$$

$$h = \frac{H \, \rho_w \, c_w \, q_{gw}}{2 \, \lambda_{eff}} \tag{3-37}$$

gdje ρ_w predstavlja gustoću podzemne vode (kg/m^3), c_w specifični toplinski kapacitet podzemne vode (J/kg °C), q_{gw} Darcyjeva brzina protoka podzemne vode (m^3/m^2 s), dok λ_{eff}

predstavlja efektivnu toplinsku vodljivost. Efektivna toplinska vodljivost predstavlja toplinsku vodljivost sustava stijena+voda u porama, a računa se kao:

$$\lambda_{eff} = \lambda_w \phi + \lambda_s (1-\phi) \tag{3-38}$$

Prema tome, g-funkcija koja opisuje konvektivni utjecaj protoka podzemne vode glasi:

$$g_{gw}(\tau, h) = \frac{h^2 \tau}{8}\left(1 - \sqrt{\frac{4\tau}{9\alpha}}\right) \text{ , uz uvjete } \tau < 1,\ h < 1 \tag{3-39}$$

Odnosno, kod izraženog protjecanja podzemne vode u blizini bušotinskog izmjenjivača, g-funkcija poprima oblik:

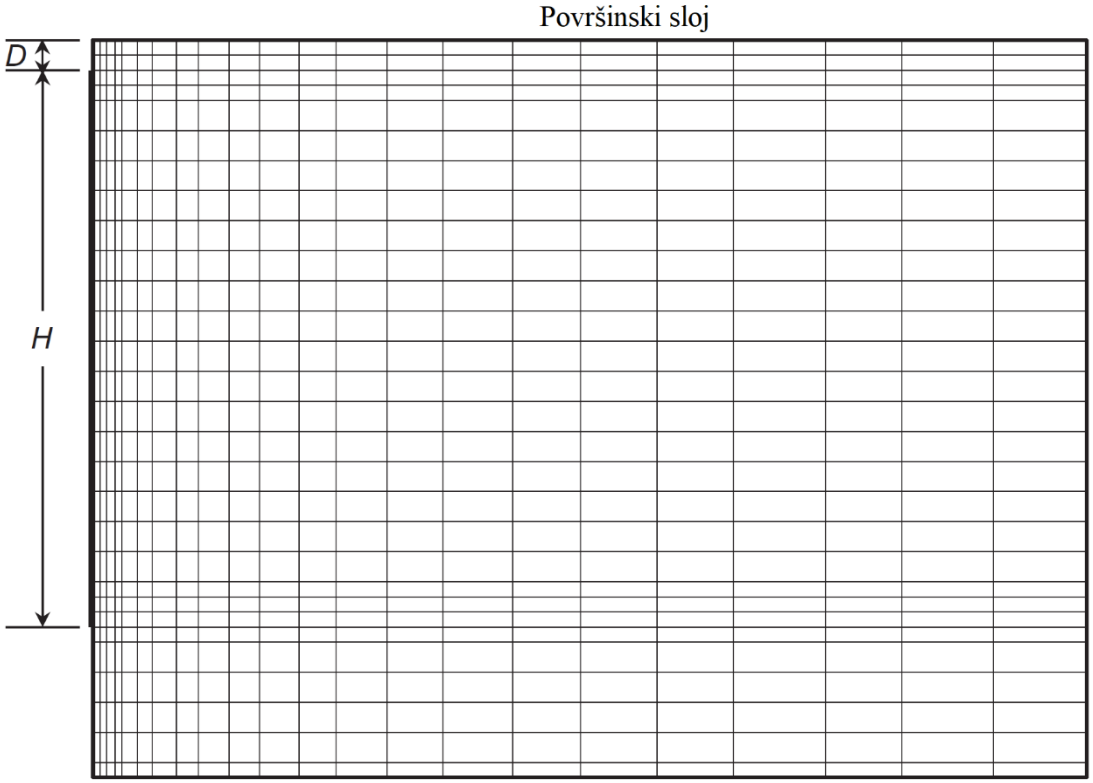
$$g_{tot} = g\left(\frac{t}{t_s}, \frac{r}{H}\right) - g_{gw}(\tau, h) \tag{3-40}$$

Prosječna temperatura na stijenci bušotine tada iznosi:

$$T(r_b, t) = T_i - \frac{q'}{2\pi\lambda} g_{tot} \tag{3-41}$$

Kako bi se odredila prosječna temperatura fluida koji se nalazi u izmjenjivaču potrebno je uzeti u obzir i bušotinske otpore, kao što je slučaj i kod linijskih modela.

Uz analitičko rješenje, Eskilson (1987) je predstavio i numeričko rješenje ovog modela. Odabran je dvodimenzionalni model konačnih razlika u radijalno-osnom sustavu, koji bušotinu i stijensku formaciju opisuje što vjernije postavljanjem modela u mrežu s određenim rubnim i početnim uvjetima. Veličina mrežnih elemenata je varijabilna, kako je prikazano na slici 3.7. Granični, tj. rubni uvjeti su takvi da nema toplinskog toka, osim pravom duljinom osi bušotine, H, te da je početni uvjet za temperaturu nula. Na temelju ulaznog parametra konstantnog toplinskog toka duž osi bušotine, računa se temperatura na stijenci bušotine, za različita vremena. Uz to analizirana je zavisnost postavljenih mrežnih elemenata u odnosu na točnost rezultata proračuna.



Slika 3.7. *Veličina elemenata mreže (prema: Chiasson, 2016)*

3.2.Cilindrični model prijelaza toplinske energije

Cilindrični model prijelaza toplinske energije (engl. *infinite cylindrical source model - ICS*), kao i linijski modeli, opisuje prijelaz toplinske energije kroz konduktivnu sredinu uz konstantan toplinski tok. Kod cilindričnog modela, bušotinski izmjenjivač je predstavljen kao cilindar beskonačne duljine, te se izraz (3-11) može pojednostavniti:

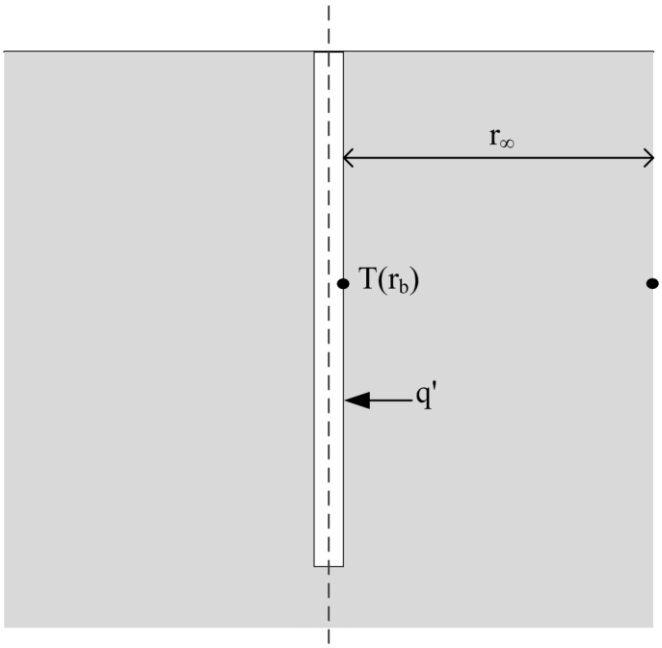
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right] \tag{3-41}$$

Model pretpostavlja da se duboki bušotinski izmjenjivač nalazi u beskonačnoj, homogenoj i izotropnoj stijenskoj formaciji bez utjecaja protoka podzemne vode. Postoji nekoliko rješenja cilindričnog modela, a kao i u slučaju linijskog modela, ona zavise od korištenih početnih i graničnih uvjeta, uz dva ograničavajuća čimbenika:

(1) toplinski kapacitet bušotinskog sustava je zanemaren, što ograničava upotrebu rješenja za početno vrijeme rada sustava;

(2) pretpostavlja se da je cilindar beskonačne duljine, odnosno zanemarena je prava (konačna) duljina bušotinskog izmjenjivača.

Za razliku od ILS-a, granični uvjeti cilindričnog modela pretpostavljaju prijelaz toplinske energije na stijenci cilindra koji je okružen stijenskom formacijom (Slika 3.8.).



Slika 3.8. *Skica cilindričnog modela prijelaza toplinske energije*

Uz jednadžbu 3-34 i pripadajući uvjet $r_b < r < \infty$, jednadžbe koje opisuju temperaturno polje između stijenke bušotine i stijenske formacije su (Sarbu i Sebarchievici, 2014):

$$\begin{aligned} &-2\pi r_b \lambda \frac{\partial T}{\partial t} = q' \\ &T - T_i = 0 \end{aligned} \quad \text{uz uvjete:} \quad \begin{aligned} &r = r_b,\ t > 0 \\ &t = 0,\ r > r_b \end{aligned} \tag{3-42}$$

Rješavajući za temperaturu na stijenci cilindra, odnosno bušotine, analitičko rješenje glasi (Carslaw i Jaeger, 1959):

$$T(r_b, t) = T_i + \frac{q'}{\lambda} G(F_o, p) \tag{3-43}$$

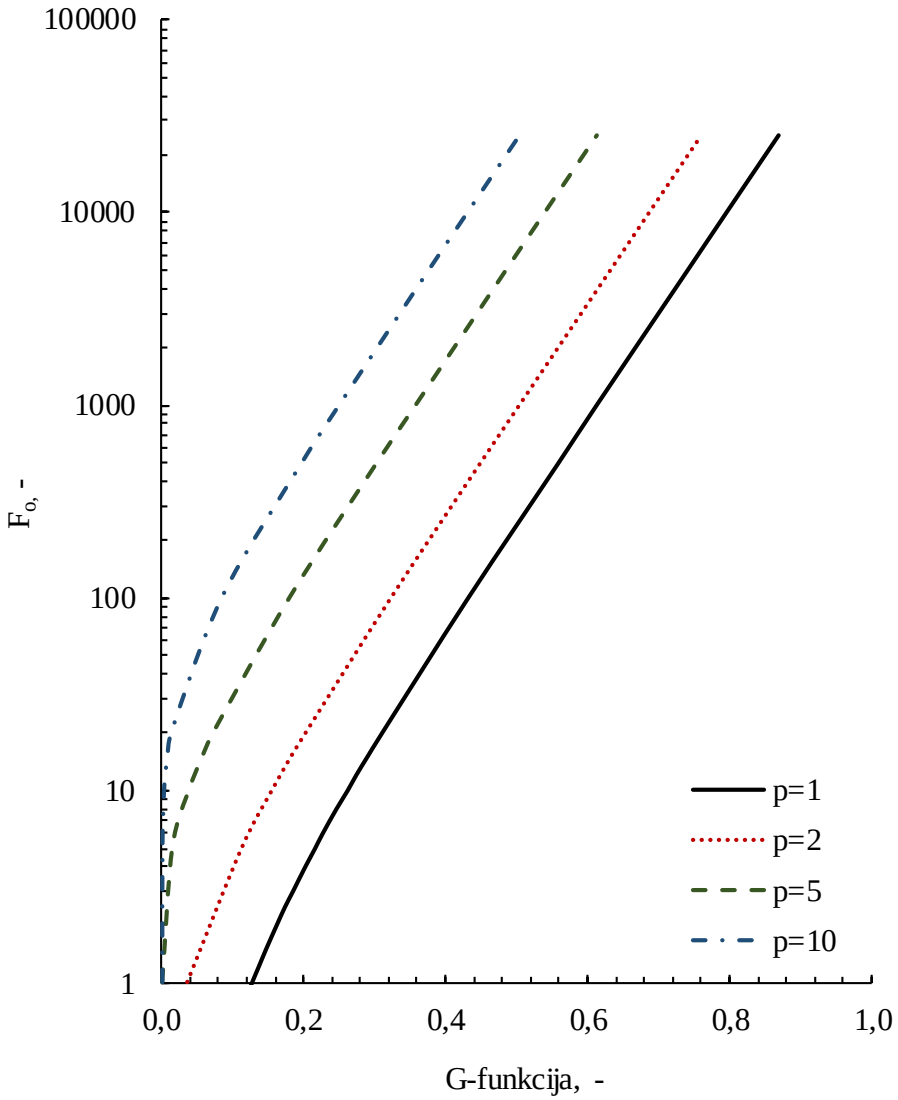
gdje je $G(F_o, p)$ G-funkcija (nije jednaka Eskilsonovoj g-funkciji) koja ovisi o Fourierovom broju F_o i faktoru p koji predstavlja omjer radijusa za koji se računa temperatura, r i radijusa bušotine, r_b ($p = r/r_b$). Analitičko rješenje G-funkcije glasi:

$$G(F_o, p) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\left(\beta^2 F_o\right)} - 1}{J_1^2(\beta) + Y_1^2(\beta)} \frac{\left[J_0(p\beta) Y_1(\beta) - J_1(\beta) Y_0(p\beta) \right]}{\beta^2} d\beta \tag{3-44}$$

U slučaju jediničnog omjera radijusa ($p=1$) promatra se temperaturni odaziv na stijenci bušotine, te ako je Fourierov broj u rasponu od $0{,}1 < F_o < 10^6$ jednadžba (3-44) može se opisati krivuljom (Bernier, 2001):

$$G(F_o,1) = 10^{-0{,}89129+0{,}36081\times\log_{10}(F_o)-0{,}05508\times\log_{10}^2(F_o)+0{,}00359617\times\log_{10}^3(F_o)} \quad (3\text{-}45)$$

Tipični odnos Fourierovog broja i G-funkcije, za različite vrijednosti omjera radijusa, p, dali su Ingersoll et al. (1954), te su rezultati vidljivi na Slici 3.9.



Slika 3.9. *Prikaz odnosa bezdimenzijske G-funkcije i Fourierovog broja, za različite vrijednosti bezdimenzijskog parametra* p *(Ingersoll et al., 1954)*

Za izračun prosječne temperature fluida u izmjenjivaču potrebno je uzeti u obzir i efektivne bušotinske otpore, kao što je slučaj i kod linijskih modela prijelaza toplinske energije:

$$T_f(t) = T_0 + \frac{q'}{\lambda} G(F_o, p) + \Delta T_{skin} \tag{3-46}$$

3.3. Toplinski otpor bušotina

Uz određivanje temperature na stijenci cilindra, odnosno bušotine, za određivanje temeprature fluida potrebno je u obzir uzeti i bušotinske toplinske otpore, kao što je već definirano izrazom 3-19. Kod korištenja plitkih geotermalnih izmjenjivača topline, cijevi koje se polažu u tlo izrađene su najčešće od polietilena visoke gustoće (HDPE ili PEHD cijevi). Međutim, kod korištenja dubokih izmjenjivača, posebice kod napuštenih bušotina, pretpostavlja se korištenje cijevi koje su uobičajene u naftnoj industriji. Takve cijevi su obično izrađene od čelika, koji u usporedbi s HDPE cijevima ima značajno više vrijednosti toplinske vodljivosti. Iz tablice 3.1. vidljive su tipične vrijednosti toplinske vodljivosti raznih materijala. S obzirom da se cijevi za zaštitne kolone i proizvodne cijevi (tubing) proizvode najčešće od čelika ili neke od legura čelika, te ako se usporedi s tipičnim vrijednostima stijenskih formacija, vidljivo je da čelične cijevi dubokog bušotinskog izmjenjivača neće uzrokovati značajne bušotinske otpore.

Tablica 3.1. Usporedba prosječnih vrijednosti toplinskih vodljivosti različitih materijala (Chiasson, 2016; Incropera et al., 2007; Borović et al., 2019)

Materijal	Toplinska vodljivost, W/m °C
HDPE[1]	0,4
PVC[1]	0,14
Crno željezo[1]	69
Čelik, čisti[2]	60,5
Razne legure čelika[2]	37,7-63,9
Nehrđajući čelik[2]	13,4-15,1
Glina[1]	0,5-1,7
Pijesak[1]	0,7-2,5
Karbonati[1,3]	2,4-7
Pješčenjaci[1]	2,1-3,5
Šejl[1]	1,4-2,1

[1]Chiasson, 2016 [2]Incropera et al., 2007, [3]Borović et al., 2019

Na učinkovitost prijelaza toplinske energije sa stijenske formacije na bušotinski radni fluid utječe ukupni koeficijent prijelaza toplinske energije, U , koji je u funkciji ukupnog toplinskog otpora. Kod bušotinskih izmjenjivača, ukupni bušotinski toplinski otpor odnosi se na konduktivnu i konvektivnu komponentu. Konduktivna komponenta odnosi se na otpor uzrokovan stijenkama bušotinskih cijevi, dok se konvektivna komponenta odnosi na konvektivni otpor uslijed protjecanja fluida. Proračun potrebnih toplinskih otpora za koaksijalne izmjenjivače slijedi metodu opisanu u Chiasson (2016) i Hellström (1991). S obzirom na to da duboki koaksijalni izmjenjivači, u usporedbi s klasičnim izmjenjivačima topline U izvedbe (1U ili 2U), pokazuju manje vrijednosti bušotinskih toplinskih otpora i manje padove tlaka u cijevima uz veće vrijednosti masenog protoka bušotinskog radnog fluida (Holmberg, 2016), upravo su oni odabrani kao sustav bušotinskih izmjenjivača koji se mogu koristiti prilikom procesa revitalizacije bušotina. Koaskijalni izmjenjivači su izvedeni na način da se unutarnja cijev nalazi u vanjskoj cijevi, a protok fluida se ostvaruje kroz unutarnju cijev i prstenasti prostor između vanjske i unutarnje cijevi (Slika 3.10.). S obzirom na geometrijski raspored, bušotinski toplinski otpori kod koaksijalnih izmjenjivača se mogu podijeliti u dva glavna dijela:

a. otpor prijelazu toplinske energije između unutarnjeg i vanjskog kanala protjecanja radnog fluida
b. otpor između vanjskog kanala protjecanja radnog fluida i stijenke bušotine.

Otpor koji se javlja između unutarnjeg i vanjskog kanala protjecanja fluida čine:

a.1. toplinski otpor uslijed konvekcije između fluida koji se nalazi u unutarnjem kanalu i unutarnje stijenke unutarnje cijevi koaksijalnog izmjenjivača;

a.2. toplinski otpor konduktivnog prijelaza toplinske energije kroz stijenku unutarnje cijevi koaksijalnog izmjenjivača;

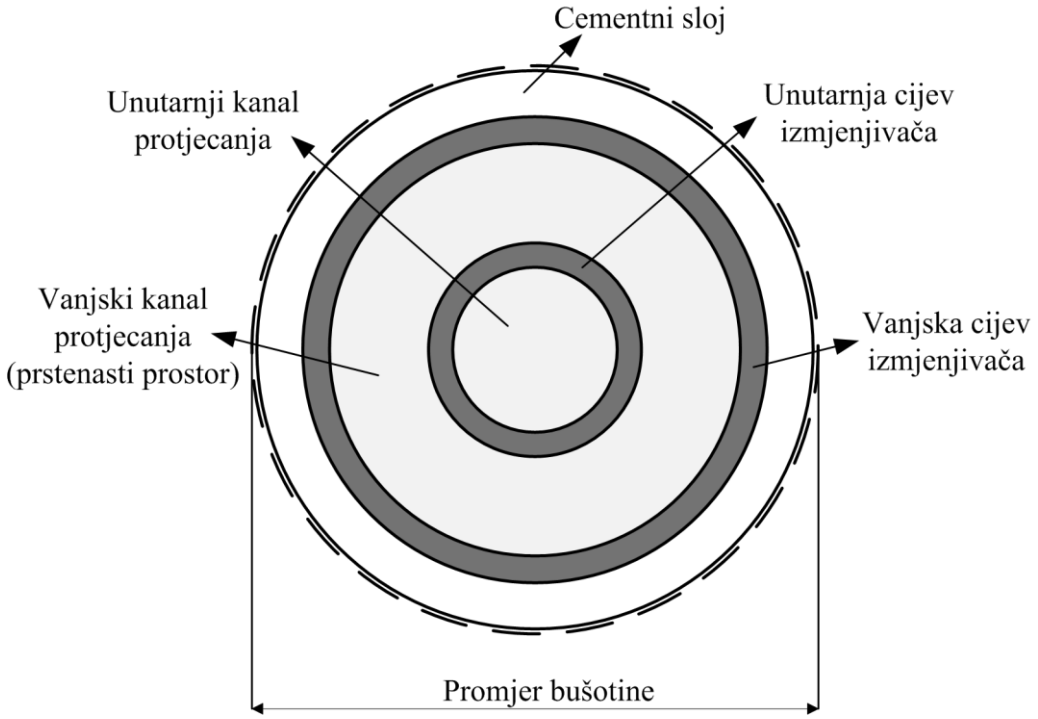
a.3. toplinski otpor uslijed konvekcije između vanjske stijenke unutarnje cijevi izmjenjivača i radnog fluida koji se nalazi u vanjskom kanalu protjecanja, tj. prstenastom prostoru.

Otpor između vanjskog kanala protjecanja fluida i stijenke bušotine čine:

b.1. toplinski otpor uslijed konvekcije između fluida koji se nalazi u vanjskom kanalu protjecanja i unutarnje stijenke vanjske cijevi koaksijalnog izmjenjivača;

b.2. toplinski otpor konduktivnog prijelaza toplinske energije kroz stijenku vanjske cijevi koaksijalnog izmjenjivača;

b.3. toplinski otpor uslijed konduktivnog prijelaza toplinske energije kroz cementni sloj, koji se nalazi između stijenke vanjske cijevi izmjenjivača i stijenske formacije.



Slika 3.10. *Shematski prikaz koaksijalnog izmjenjivača (prema Chiasson, 2016)*

Izraz za toplinski bušotinski otpor glasi:

$$R_b^{'} = R_{sf}^{'} + \frac{1}{3}\frac{1}{R_a^{'}}\left(\frac{H}{C}\right)^2 \tag{3-47}$$

gdje $R_a^{'}$ predstavlja zbroj konvektivnih toplinskih otpora između unutarnjeg i vanjskog kanala protjecanja te otpora između vanjskog kanala protjecanja i stijenke bušotine (°Cm/W), H dubinu bušotine (m), C toplinski kapacitet fluida (W/°C), dok $R_{sf}^{'}$ predstavlja otpor koji je Hellström (1991) definirao kao:

$$R_{sf}^{'} = \frac{1}{2\pi\lambda}\left[\frac{\lambda}{\lambda_c}\left[\left(1+\xi\pi r_p\right)^2 \ln\left(\frac{r_b}{r_p}\right) - \xi\pi\left(1+\xi\pi r_p\right)^2\left(r_b^2 - r_p^2\right) + \frac{1}{4}\left(\xi\pi r_b^2\right)^2 - \frac{1}{4}\left(\xi\pi r_p^2\right)^2\right]\right] + R_p^{'} \tag{3-48}$$

gdje je r_b polumjer bušotine (m), r_p polumjer cijevi za koju se računa (m), dok je faktor ξ definiran kao:

$$\xi = \frac{1}{\left(r_b^2 - r_p^2\right)} \tag{3-49}$$

Opći izraz za ukupni bušotinski otpor cijevi, $R_{p,total}$, se može predstaviti kao:

$$R_{p,total} = \frac{1}{2\pi r_{p,in} L h_{in}} + \frac{1}{2\pi\lambda_p L} \ln\left(\frac{r_{p,out}}{r_{p,in}}\right) \tag{3-50}$$

gdje se L odnosi na duljinu (m), λ_p na toplinsku vodljivost cijevi (W/m°C), indeks p_{in} na unutarnji radijus cijevi, a indeks p_{out} na vanjski radijus cijevi. Jednadžba (3-50) izražena je kao omjer ukupne površine cijevi u odnosu na površinu unutarnjeg promjera cijevi. Uobičajeno je, međutim, koristiti bušotinske otpore u jedinici duljine, $R_p^{'}$:

$$R_p^{'} = \frac{1}{\pi D_{p,in} h_{in}} + \frac{\ln\left(\frac{D_{p,out}}{D_{p,in}}\right)}{2\pi\lambda_p} \tag{3-51}$$

gdje h predstavlja koeficijent prijelaza topline ili koeficijent konvekcije (W/m^2°C) i definiran je kao:

$$h = \frac{Nu\lambda_f}{D_{p,in}} \tag{3-52}$$

gdje Nu predstavlja Nusseltov broj, λ_f toplinsku vodljivost fluida i $D_{p,in}$ unutarnji promjer cijevi. Bezdimenzijski Nusseltov broj opisuje omjer konduktivnog i konvektivnog prijelaza toplinske energije, i za opći slučaj glasi:

$$Nu = \frac{hL}{\lambda_f} \tag{3-53}$$

U slučaju laminarnog protjecanja fluida Nusseltov broj se može smatrati konstantom, pri uvjetima ustaljenog prijelaza toplinske energije, te iznosi 4,36. Kod turbulentnog protjecanja, tj. za slučajeve kada je Reynoldsov broj veći od ≈2300, Nusseltov broj je u funkciji Reynoldsovog i Prandtlovog broja. Iako postoji veći broj korelacija za izračun Nusseltovog broja za uvjete turbulentnog protjecanja, najčešće se koristi korelacija Gnielinski (1976) koja vrijedi za raspon Prandtlovog broja od 0,5 do 2000 i raspon Reynoldsovog broja od 3000 do $5\cdot10^6$:

$$Nu = \frac{\frac{f}{8}-(\mathrm{Re}-1000)\mathrm{Pr}}{1+12,7\left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\mathrm{Pr}^{\frac{2}{3}}-1\right)} \quad (3\text{-}54)$$

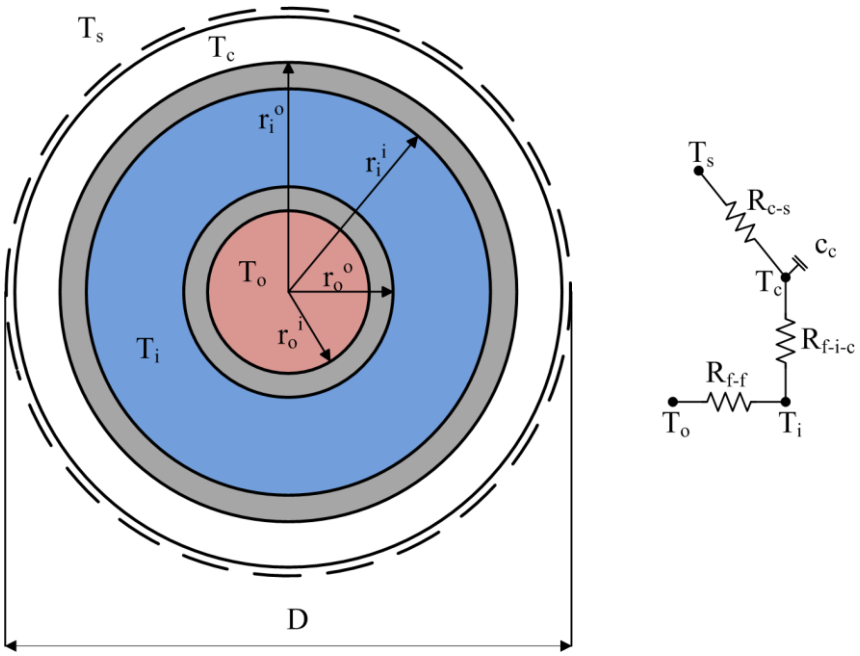
gdje f predstavlja Moodyev koeficijent trenja. Za glatke cijevi i za raspon vrijednosti Reynoldsovog broja $3000 < \mathrm{Re} < 10^7$ Moodyev faktor trenja se može korelirati izrazom Petukhova (1970):

$$f = (0,790 \ln \mathrm{Re} - 1,64)^{-2} \quad (3\text{-}55)$$

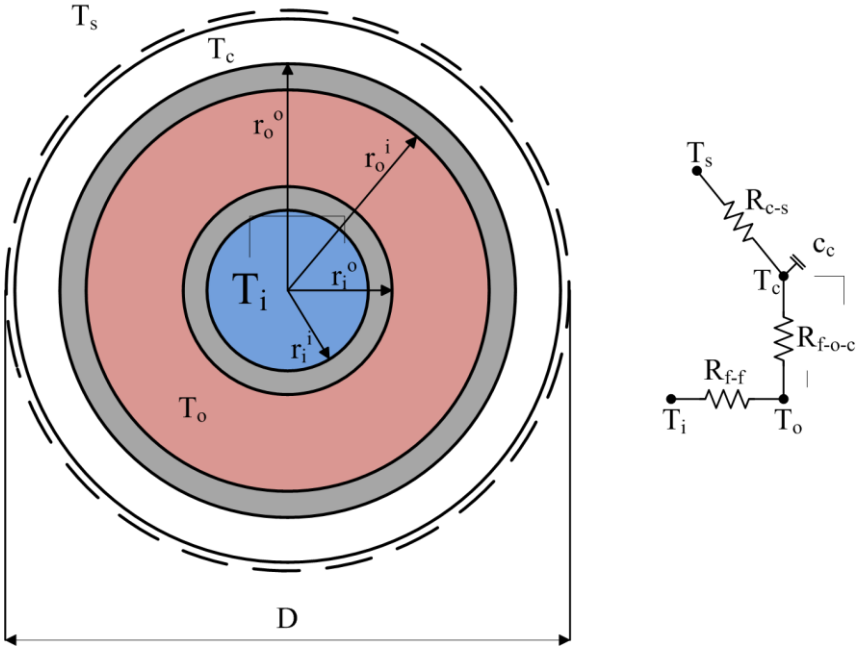
Kod koaksijalnog izmjenjivača dvije su mogućnosti protjecanja radnog fluida. One zavise od izbora smjera protjecanja pothlađenog i zagrijanog radnog fluida. Te mogućnosti se svode na sljedeće konfiguracije protjecanja:

I. CXA – pothlađeni fluid se utiskuje kroz prstenasti prostor (vanjski kanal protjecanja), dok zagrijani fluid protječe kroz unutarnju cijev izmjenjivača (unutarnji kanal protjecanja);
II. CXC - pothlađeni fluid se utiskuje kroz unutarnju cijev izmjenjivača (unutarnji kanal protjecanja), dok zagrijani fluid protječe kroz prstenasti prostor (vanjski kanal protjecanja).

Odabir konfiguracije protjecanja radnog fluida zavisi od proračuna toplinskih otpora bušotine, kako je prikazano na slici 3.11. Za CXA konfiguraciju i slici 3.12. za CXC konfiguraciju. Na slikama indeksi i i o predstavljaju smjer protjecanja pothlađenog i zagrijanog fluida, dok eksponenti i i o predstavljaju unutarnju i vanjsku cijev. Oznaka s odnosi se na stijensku formaciju, c na cement i f na radni fluid. Tako npr. oznaka r_i^o kod konfiguracije CXA predstavlja polumjer vanjske stijenke vanjske cijevi izmjenjivača (o) u slučaju kada se kroz unutarnji kanal protjecanja utiskuje pothlađeni fluid (i).



Slika 3.11. *Raspored proračuna toplinskih otpora kod CXA konfiguracije protjecanja (prema Al-Khoury, 2011)*



Slika 3.12. *Raspored proračuna toplinskih otpora kod CXC konfiguracije protjecanja (prema Al-Khoury, 2011)*

Istraživanje korištenja dubokih koaksijalnih izmjenjivača pokazalo je da za relativno manje dubine konfiguracija kanala protjecanja nema značajnu ulogu, te da će ostvareno toplinsko opterećenje, a posljedično i izlazna temperatura radnog fluida, biti gotovo jednaka u oba slučaja konfiguracije protjecanja (Holmberg, 2016). Međutim, isto istraživanje je ukazalo

da će za bušotine većih dubina CXA konfiguracija dati povoljniji rezultat. Gubici topline između cijevi izmjenjivača i prema formaciji u plićim dijelovima bušotine moguće je ograničiti korištenjem izolacije ili postavljanjem cijevi s niskim vrijednostima toplinskih vodljivosti (npr. PVC, vakuum izolirani tubing i sl.).

4. TOPLINSKA SVOJSTVA STIJENA I GEOLOŠKA OBILJEŽJA ISTRAŽIVANOG PROSTORA

Kako bi se procijenila dostupna toplinska energija sadržana u stijenama, potrebno je poznavati toplinska svojstva stijena. Ta svojstva su specifični toplinski kapacitet, toplinska vodljivost i toplinski difuzivitet. Poznavanje tih svojstava važno je u primjeni kod metoda za povećanje iscrpka nafte (engl. *Enhanced Oil Recovery - EOR*), projektiranja podzemnih skladišta toplinske energije i podzemnih odlagališta radioaktivnog otpada te projektiranja korištenja geotermalnih resursa. Iako se smatra da je kondukcija najvažniji oblik prijelaza toplinske energije, u slučaju prisustva ležišnih fluida u obzir je potrebno uzeti i konkvekciju. Toplinska svojstva najviše zavise od temperature i smatraju se konstantama.

4.1. Specifični toplinski kapacitet

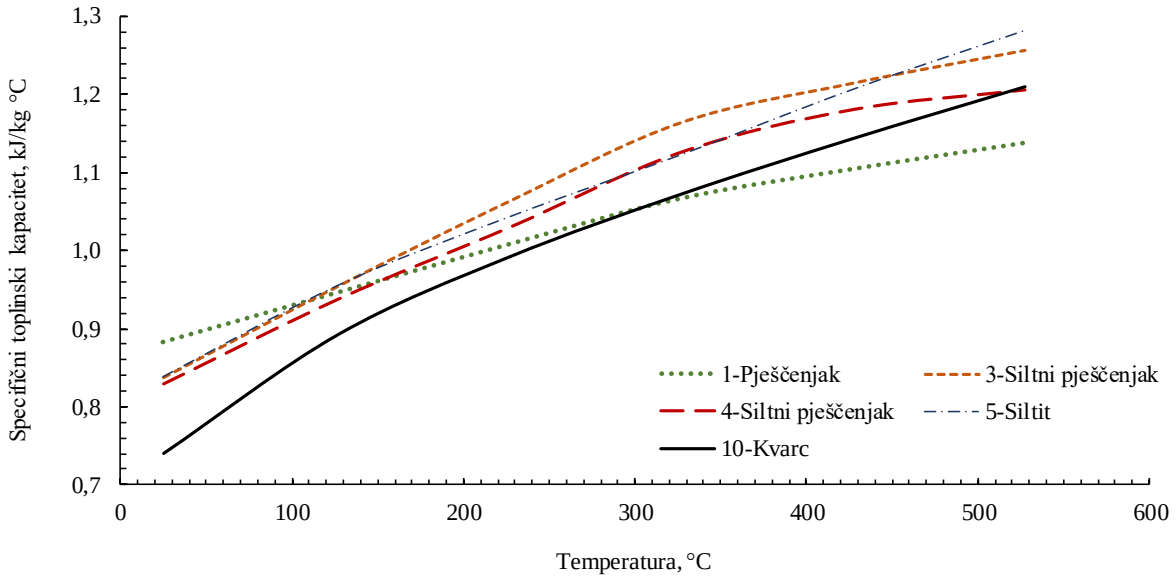
Specifični toplinski kapacitet ili specifična toplina definira se kao sposobnost materijala da sadrži toplinu, odnosno kao toplina koja je potrebna da se jediničnoj masi tvari povisi temperatura za jedan stupanj pri standardnim uvjetima. U slučaju vode, specifična toplina iznosi 4,184 kJ/kg°C. Za stijene iznosi oko ¼ iznosa specifične topline vode. Porastom temperature raste i vrijednost specifične topline, ali do 30%, i to unutar širokog temperaturnog raspona (Somerton, 1992). Umnožak specifične topline i gustoće daje obujamsku specifičnu toplinu. Mjerenjem toplinskog sadržaja kalorimetrom određuje se vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta ili se određuje na temelju dostupnih korelacija.

Mjerenjem sadržaja topline u odnosu na referentnu temperaturu (20 °C) pojedinih uzoraka raznih vrsta stijena, može se na temelju nagiba krivulje odrediti specifični toplinski kapacitet. U tablici 4.1. dani su podaci o vrsti stijena na kojima su rađena mjerenja specifičnog toplinskog kapaciteta.

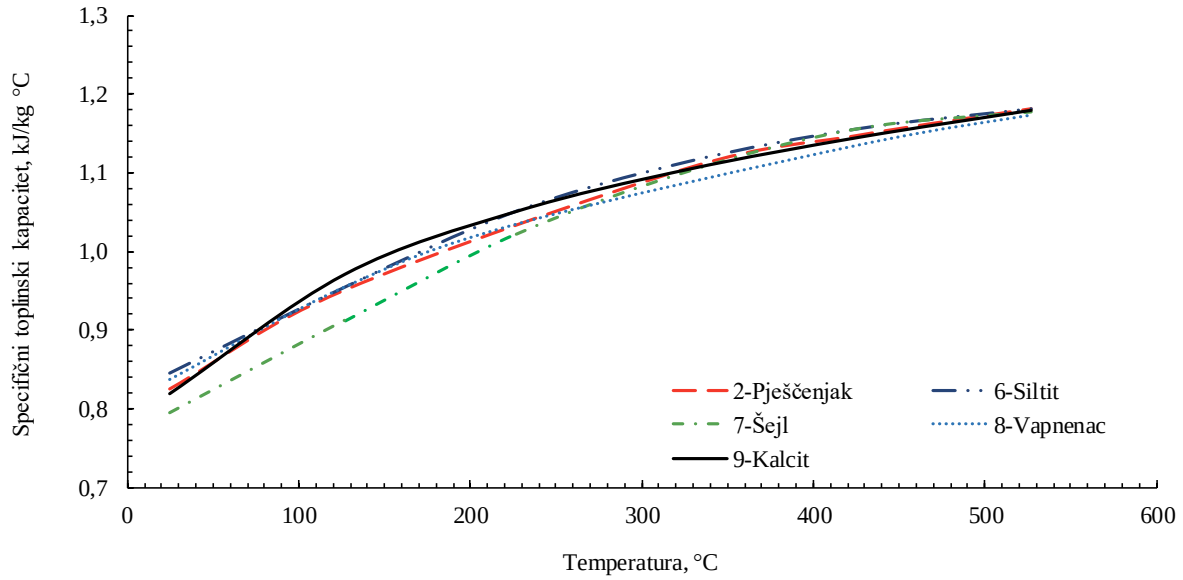
Tablica 4.1. Vrste stijena na kojima su rađena mjerenja specifičnog toplinskog kapaciteta te pripadajuće vrijednosti poroznosti i sadržaja kvarca (Somerton, 1992)

Uzorak	Opis	Poroznost	Sadržaj kvarca,%
1-Pješčenjak	Dobro konsolidirani; srednje zrnati	0,20	80
2-Pješčenjak	Slabo konsolidirani; loša sortiranost	0,27	40
3-Siltni pješčenjak	Slabo konsolidirani; loša sortiranost	0,21	20
4-Siltni pješčenjak	Srednja tvrdoća; loša sortiranost	0,23	20
5-Siltit	Srednja tvrdoća; frakturirani	0,30	20
6-Siltit	Tvrdi	0,20	25
7-Šejl	Nekonsolidirani; sitnozrnati	0,07	40
8-Vapnenac	Nekonsolidirani; krupnozrnati	0,19	-

Na temelju podataka mjerenja predstavljenih uzoraka (Tablica 4.1.) konstruirane su krivulje specifičnog toplinskog kapaciteta, mjereno pri temperaturama od 25 do 530 °C, prikazane na slikama 4.1. i 4.2.



Slika 4.1. Odnos specifičnog toplinskog kapaciteta pojedinih stijena u odnosu na porast temperature (Somerton, 1992)



Slika 4.2. *Odnos specifičnog toplinskog kapaciteta pojedinih stijena u odnosu na porast temperature (Somerton, 1992)*

Krivulje prikazane punim linijama (10 na slici 4.1. i 9 na slici 4.2.) dobivene su iz podataka o entalpiji za kvarc i kalcit prema dostupnim korelacijama Kelleyja (1960):

$$c_{CaCO_3} = 0,4183 \cdot (24,98 + 0,00524 \cdot T - 6,20 \cdot 10^5 T^{-2}) \quad (4\text{-}1)$$

$$c_{SiO_2} = 0,06968 \cdot (11,22 + 0,0082 \cdot T - 2,70 \cdot 10^5 T^{-2}) \quad (4\text{-}2)$$

gdje je c specifični toplinski kapacitet (kJ/kg°C), dok se vrijednost temperature, T, unosi u (K). Koeficijenti 0,4183 i 0,06698 služe za pretvorbu iz mjerne jedinice cal/molK u kJ/kg°C. Kako je vapnenac stijena većinski izgrađena od kalcita, vidljivo je da krivulja vapnenca relativno dobro prati krivulju kalcita. Također, stijene s većim udjelom kvarca imaju krivulje sličnije krivulji kvarca. Kod ostalih uzoraka, zaključeno je da je toplinski kapacitet u funkciji omjera silicija i aluminija (Somerton, 1992.).

Prema Koppovom zakonu, entalpija neke smjese jednaka je zbroju entalpija pojedinih komponenti. Prema tome, moguće je odrediti specifičnu toplinu znajući vrijednosti za svaku od komponenti koje grade stijene, izražene kao oksidi. Kelley (1960) je na temelju mjerenih podataka sadržaja topline pojedinih komponenti u stijenama odredio korelacije za određivanje entalpije i specifične topline u odnosu na temperaturu:

$$\Delta h = AT + BT^2 + CT^{-1} - D \quad (4\text{-}3)$$

$$c = A + 2BT - CT^{-2} \quad (4\text{-}4)$$

gdje je Δh (h_T-$h_{298,15}$) entalpija sustava u odnosu na baznu entalpiju određenu pri temperaturi od 25 °C (cal/g), T je temperatura (K), dok su A, B, C i D konstante određene za pojedine okside (Tablica 4.2.).

Tablica 4.2. Vrijednosti konstantni A-D za okside za određivanje specifične topline (Kelley, 1960)

Oksid	A	B	C	D
SiO_2	0,1867	$6{,}82\cdot10^{-5}$	$4{,}49\cdot10^{3}$	76,8
Al_2O_3	0,2696	$1{,}38\cdot10^{-5}$	$8{,}22\cdot10^{3}$	109,2
Fe_2O_3	0,1559	$6{,}17\cdot10^{-5}$	$2{,}36\cdot10^{3}$	59,9
CaO	0,2081	$9{,}63\cdot10^{-6}$	$2{,}78\cdot10^{3}$	72,2
K_2O	0,2533	$4{,}36\cdot10^{-5}$	0	79,4
$(CO_2)_c$	0,3025	$4{,}73\cdot10^{-5}$	$1{,}05\cdot10^{3}$	129,7
$(H_2O)_c$	0,1589	$3{,}91\cdot10^{-4}$	$-8{,}22\cdot10^{3}$	54,5

U slučaju zasićenih stijena, može se primijeniti ista zakonitost – toplina sadržana u stijeni može se izračunati zbrajanjem vrijednosti pojedinih komponenti u odnosu na maseni udio. Prema tome, vrijednost ukupne obujamske specifične topline, uz prisustvo više različitih fluida, dana je izrazom:

$$\rho_b c_b = (1-\phi)\rho_s c_s + \phi\left(S_1\rho_1 c_1 + S_2\rho_2 c_2 + \ldots + S_n\rho_n c_n\right) \tag{4-5}$$

gdje $\rho_b c_b$ predstavlja ukupnu volumnu specifičnu toplinu (J/m^3°C); ϕ poroznost, ρ_s gustoću matriksa (kg/m^3), $\rho_{1,\ldots,n}$ gustoću pojedinih fluida (kg/m^3), c_s specifični toplinski kapacitet matriksa stijene (J/kg°C), $c_{1,\ldots,n}$ specifični toplinski kapacitet pojedinog fluida (J/kg°C), $S_{1,\ldots,n}$ zasićenje fluidom (dio cijelog). U slučaju tipičnog naftnog ležišta, ukupna obujamska specifična toplina može se prema tome izraziti kao:

$$\rho_b c_b = (1-\phi)\rho_s c_s + \phi\left(S_w\rho_w c_w + S_o\rho_o c_o\right) \tag{4-6}$$

gdje indeks w predstavlja vodu, o naftu, a s matriks stijene. U većini slučajeva plinske komponente se zanemaruju zbog niskih vrijednosti gustoće i specifičnog toplinskog kapaciteta. Da bi se dobila prava vrijednost ukupne specifične topline, potrebno je odrediti svojstva fluida pri ležišnim uvjetima tlaka i temperature.

Na temelju slika 4.1. i 4.2. može se odrediti korelacija između specifičnog toplinskog kapaciteta i temperature te za slučaj pješčenjaka glasi:

$$c_{ss} = 0{,}108 T^{\,0{,}155} \tag{4-7}$$

gdje c_{ss} predstavlja specifični toplinski kapacitet pješčenjaka izražen u (cal/g°C), a T temperaturu (°C). Greška prilikom određivanja izrazom (4-7) iznosi ±3% za temperaturni raspon 25-530 °C, dok za niže temperature iznosi ±7%. Gomaa je 1973. godine predstavio opći izraz za određivanje specifičnog toplinskog kapaciteta zasićenih pješčenjaka, prilikom čega je potrebno obratiti pozornost na temperaturu pri kojoj se određuju pojedina svojstva fluida. Za vodu se može koristiti Holmanova korelacija (1976) za određivanje gustoće:

$$\rho_w = \frac{\rho_{w20}}{1+(T-20)\beta_w} \tag{4-8}$$

gdje je ρ_{w20} gustoća vode pri 20 °C, T temperatura (°C), a β_w koeficijent toplinskog širenja za vodu:

$$\beta_w = 2{,}115\times10^{-4} + 1{,}32\times10^{-6}T + 1{,}09\times10^{-8}T^2 \tag{4-9}$$

Sličnu korelaciju dao je Standing (1977) za naftu:

$$\rho_o = \frac{\rho_{o20}}{1+(T-20)\beta_o} \tag{4-10}$$

gdje toplinski koeficijent širenja, β_o, za naftu glasi:

$$\beta_o = 4{,}42\times10^{-4} + 0{,}103\,°API \quad \text{uz} \qquad °API = \frac{141{,}5}{G_o - 131{,}5} \tag{4-11}$$

gdje G_o predstavlja relativnu gustoću nafte pri 20 °C. Gustoća matriksa stijene, ρ_s dana je izrazom:

$$\rho_s = \frac{\rho_{20}}{1+(T-20)\beta_s} \tag{4-12}$$

Za pješčenjake je ustanovljena vrijednost koeficijenta širenja, β_{ss} (Somerton i Selim, 1961):

$$\beta_{ss} = 0{,}5\times10^{-4}\,T^{-1} \tag{4-13}$$

Uz pretpostavku srednje gustoće zrna matriksa od 2,65 g/cm^3, jednadžba (4-12) postaje:

$$\rho_{ss} = \frac{2,65}{1+0,5\times10^{-4}\left(T-20\right)} \tag{4-14}$$

Kombinacijom izraza (4-7) i (4-14) dolazi se do ukupne obujamske specifične topline za pješčenjake:

$$\rho_{ss}c_{ss} = \frac{0,286T^{0,155}}{1+0,5\times10^{-4}(T-20)} \tag{4-15}$$

Promjenu specifičnog toplinskog kapaciteta s temperaturom za naftu dao je Gambill (1957):

$$c_o = \frac{0,389+0,81\times10^{-3}\,T}{G_o^{0,5}} \tag{4-16}$$

Promjena specifične topline vode zavisi od temperature i gustoće vode. Definira se pomoću dva izraza, u zavisnosti od temperaturnog raspona. Za temperaturni raspon $20°C \le T \le 290°C$ vrijedi izraz:

$$\rho_w c_w = 1,10145 - 0,44\times10^{-3}\,T \tag{4-17}$$

Za raspon $290°C \le T \le 373°C$ upotrebljava se izraz:

$$\rho_w c_w = 0,885e^{-\left[0,00481(T-290)+0,000234(T-290)^2\right]} \tag{4-18}$$

Prema tome, za temperaturni raspon između 20 i 290 °C, izraz za određivanje ukupne volumne specifične topline glasi:

$$\begin{aligned}\rho_b c_b &= (1-\phi)(0,49+0,00091T-8\times10^{-7}\,T^2)\\ &\quad+\phi\left[S_o(0,389+0,00044T)+S_w(1,1045-0,00044T)\right]\end{aligned} \tag{4-19}$$

dok za stijenske formacije pri temperaturama između 290 i 373°C glasi:

$$\begin{aligned}\rho_{b_{ss}} c_{b_{ss}} &= (1-\phi)(0,49+0,00091T-8\times10^{-7}\,T^2)\\ &\quad+\phi\left[S_o(0,389+0,00044T)+0,885S_w e^{-\left[0,00481(T-290)+0,000234(T-290)^2\right]}\right]\end{aligned} \tag{4-20}$$

Navedeni izrazi vrijede za pješčenjake zasićene naftom i vodom koje su u tekućoj fazi. S obzirom na veoma niske vrijednosti, utjecaj plinske faze se zanemaruje.

4.2. Toplinska vodljivost

Toplinska vodljivost svojstvo je nekog materijala i definira se kao sposobnost materijala da provodi toplinu. Definirana je Fourierovim zakonom provođenja ili kondukcije koji je opisan jednadžbom 3-1. U slučaju kristalinskih stijena toplinska vodljivost pada s porastom temperature. Općenito, što je veća vrijednost toplinske vodljivosti stijene, to će doći do većeg pada vrijednosti s porastom temperature. Stijene većinom izgrađene od amorfnih ili slabo kristaliziranih minerala imaju niže vrijednosti toplinske vodljivosti, te se može dogoditi porast toplinske vodljivosti s porastom temperature. Osim temperature, na toplinsku vodljivost mogu utjecati i naprezanja. Pokazalo se da povećanjem naprezanja raste i toplinska vodljivost uslijed boljeg kontakta između pojedinih zrna i povećanja ukupne gustoće stijene. Kod slabo konsolidiranih stijena s porastom naprezanja dolazi do značajnog porasta toplinske vodljivosti, dok u slučaju dobro konsolidiranih stijena porast naprezanja neće uzrokovati značajne promjene. Kod zasićenih stijena, porastom pornog tlaka, uz konstantne vrijednosti vanjskih naprezanja, smanjuje se vrijednost efektivnog naprezanja te vrijednost toplinske vodljivost pada. Vrijedi i obrnuto – smanjenje tlaka pornog fluida uzrokuje porast vrijednosti toplinske vodljivosti uslijed povećanja efektivnih naprezanja.

Osim temperature i naprezanja na vrijednost toplinske vodljivosti utječe i stupanj zasićenja tekućom fazom ležišnih stijena, posebice kod visoko poroznih stijena. Primjerice, nekonsolidirani pijesci, zasićeni vodom, mogu imati vrijednosti toplinske vodljivosti i do 3-4 puta više od suhog uzorka. Dakle, na ukupnu toplinsku vodljivost zasićene stijene utječe toplinska vodljivost suhe stijene, toplinska vodljivost tekuće faze te fizikalna svojstva stijene. Koliko će toplinska vodljivost zasićene stijene biti viša od vodljivosti suhe stijene zavisi od pornog prostora (raspored, broj, vrsta pora) i toplinske vodljivosti same tekuće faze.

Toplinska vodljivost suhih stijena zavisi od gustoće, poroznosti, veličine i oblika zrna, stupnja cementacije i mineralnog sastava. Gustoća i poroznost se mogu lako odrediti, za razliku od ostalih nabrojenih svojstava. Zato se koriste podaci o propusnosti i faktoru formacije, koji su zavisni od veličine i oblika zrna i stupnja cementacije. Podaci o mineralnom sastavu obično nisu dostupni, ali u slučaju da jesu, ponderirana aritmetička sredina (težinski prosjek) vrijednosti toplinske vodljivosti matriksa se može upotrijebiti u korelacijama. Od petrogenih

minerala najvišu vrijednost ima kvarc (Tablica 4.3.). Stoga se, znajući udio kvarca u stijeni, može odrediti približna vrijednost toplinske vodljivosti.

Tablica 4.3. Tipične vrijednosti toplinske vodljivosti različitih minerala (Somerton, 1992)

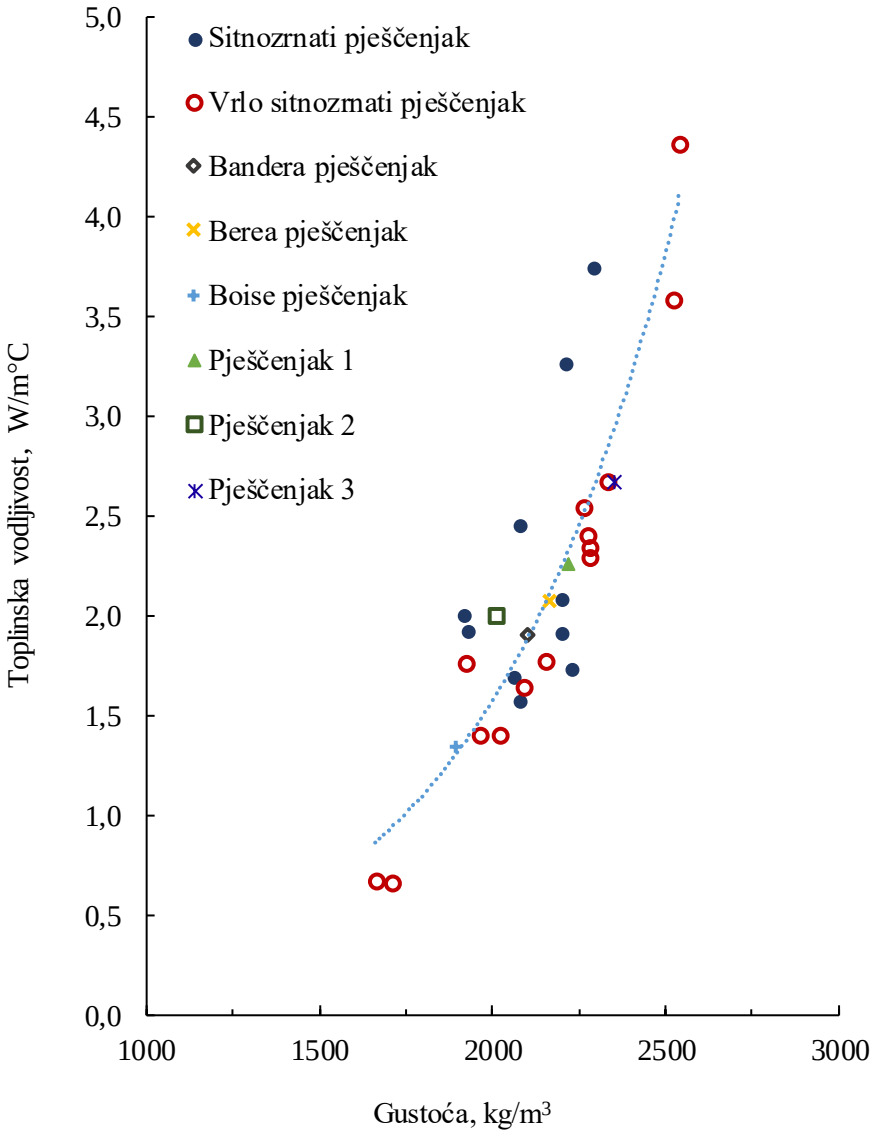
Mineral	**Toplinska vodljivost, W/m°C**
Kvarc	7,70
Ortoklas	2,32
Plagioklas	2,15
Kalcit	3,60
Muskovit	2,21
Klorit	4,91
Hornblenda	3,08
Epidolit	2,61
Biotit	2,34

Dvije su glavne grupe metoda mjerenja toplinske vodljivosti – metode ustaljenog i poluustaljenog stanja prijelaza toplinske energije. Kod metoda ustaljenog stanja toplinska vodljivost određuje se direktno. Nedostatak metode očituje se u vremenu provođenja ispitivanja, s obzirom da je potrebno uspostavljanje ustaljenog prijelaza toplinske energije. Prednost metode je u većoj točnosti rezultata. Metode koje koriste poluustaljeno stanje zapravo mjere toplinski difuzivitet, pomoću čije vrijednosti je moguće izračunati toplinsku vodljivost. Prednost ove metode je u vremenu izvođenja mjerenja. Nedostatak se očituje u manjoj točnosti rezultata i potrebi poznavanja vrijednosti gustoća i specifične topline.

Na temelju nekoliko različitih uzoraka pješčenjaka (Slika 4.3.), regresijom je dobivena korelacija (Anand, 1971):

$$\lambda = \frac{\rho_b^4}{9,56 \cdot 10^{-3}} \quad (4\text{-}21)$$

gdje je ρ_b gustoća stijenske formacije (g/cm^3).



***Slika 4.3**. Grafički prikaz određivanja korelacije toplinske vodljivosti u odnosu na gustoću (Somerton, 1992)*

Iako toplinska vodljivost nije direktno povezana s poroznošću, na odabranim uzorcima dobivena je empirijska korelacija između gustoće i poroznosti:

$$\rho_b = 2,65 \cdot 10^{-3}(1-\phi) \qquad (4\text{-}22)$$

Supstitucijom u izraz (4-21) dobije se relacija koja, u ovom slučaju, povezuje toplinsku vodljivost i poroznost:

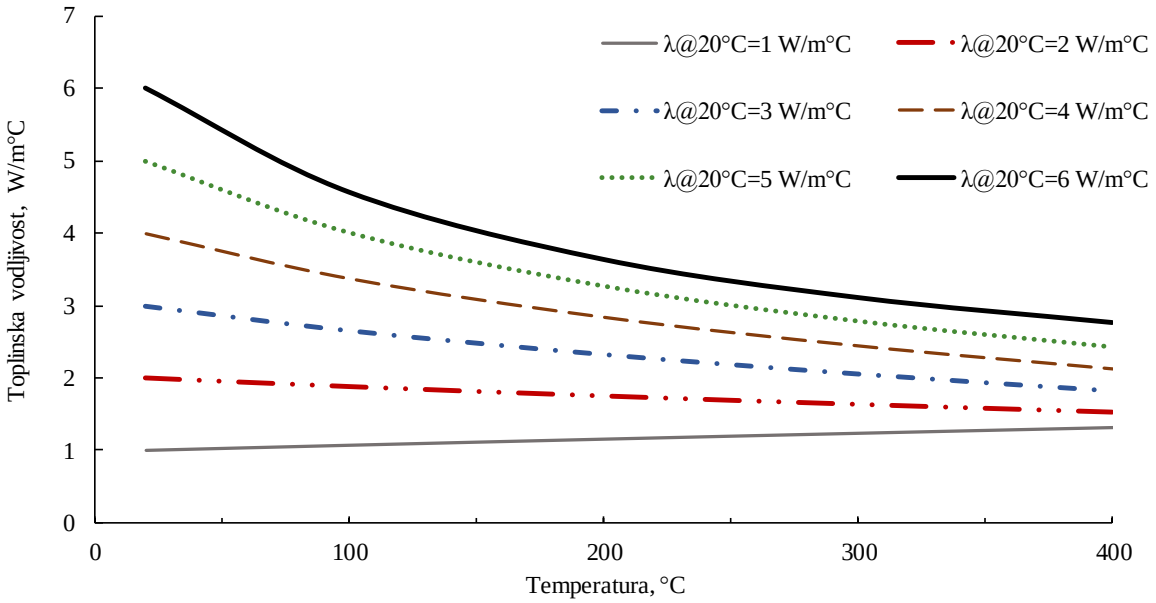
$$\lambda = 5,16(1-\phi)^4 \qquad (4\text{-}23)$$

Kod većine materijala kristalinske strukture vrijednost toplinske vodljivosti pada s porastom temperature. Smatra se da varira obrnuto proporcionalno u odnosu na temperaturu. Međutim, kod materijala izgrađenih od tvari kristalinske i amorfne strukture toplinska vodljivost ne varira u potpunosti obrnuto proporcionalno u odnosu na temperaturu. Kod pojedinih materijala može doći i do blagog porasta vrijednosti s porastom temperature. Na temelju mjerenih podataka nekoliko pješčenjaka Tikhomirov (1968) je predstavio korelaciju toplinske vodljivosti i temperature. Usporedbom rezultata dobivenih Tikhomirovljevom korelacijom i mjerenih podataka pokazano je veće odstupanje. Na temelju tih eksperimentalnih podataka ustanovljena je, na temelju Tikhomirovljevog izraza, korelacija između temperature i toplinske vodljivost (Somerton, 1992):

$$. \lambda_T = \lambda_{20°C} - 0,001(T - 293)\cdot(\lambda_{20°C} - 1,38)\cdot\left[\lambda_{20°C}(0,0018T)^{-0,25\,\lambda_{20°C}} + 1,28\right]\lambda_{20°C}{}^{-0,64}. \quad (4\text{-}25)$$

gdje je λ_T toplinska vodljivost pri nekoj temperaturi (W/m°C), T temperatura (K) te $\lambda_{20°C}$ toplinska vodljivost stijene pri 20°C. Promjena toplinske vodljivosti s promjenom osnovne vrijednosti pri 20°C, opisana jednadžbom (4-25), prikazana je na slici 4.4. Za stijene koje imaju niže vrijednosti toplinske vodljivosti pri 20°C, promjena vodljivosti s promjenom temperature je gotovo linearna te se može koristiti pojednostavljeni oblik korelacije za stijene vodljivosti niže od 2,5 W/m°C (Somerton, 1992):

$$\lambda_T = \lambda_{20°C} - 2,3\cdot10^{-3}(T - 293)\cdot(\lambda_{20°C} - 1,38) \quad (4\text{-}26)$$



Slika 4.4. *Promjena toplinske vodljivosti porastom temperature, za različite vrijednosti pri početnom mjerenju vodljivosti pri 20°C (Somerton, 1992)*

Tikhomirovljeva korelacija vrijedi za suhe stijene, ali se može primijeniti i za fluidom zasićene pješčenjake. Toplinska svojstva nekih tekućina mogu uzrokovati određena temperaturna odstupanja primjenom izraza (4-25), posebice kod poroznijih stijena. Također, moguća su odstupanja uslijed fazne promjene fluida.

4.3. Toplinski difuzivitet

Toplinski difuzivitet je svojstvo materijala koje opisuje brzinu promjene temperature uslijed neustaljenih uvjeta kondukcijom, odnosno sposobnost materijala da provodi toplinu u odnosu na sposobnost da je zadrži. Poznavanje vrijednosti toplinskog difuziviteta sustava stijena/fluid važno kod neustaljenog stanja prijelaza toplinske energije prilikom grijanja ili hlađenja. Jednadžba koja opisuje prijelaz toplinske energije kod neustaljenog stanja glasi:

$$\nabla(\lambda \nabla T) = \rho_b c_b \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4\text{-}27)$$

Ako se pretpostavi da se prijelaz toplinske energije odvija u homogenom i izotropnom čvrstom mediju, izraz (4-27) postaje:

$$\nabla^2 T = \left(\frac{\rho_b c_b}{\lambda} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4\text{-}28)$$

gdje α predstavlja toplinski difuzivitet (m^2/s), koji se definira kao omjer toplinske vodljivosti i obujamske specifične topline: $\alpha = \lambda / c\rho$.

Toplinska vodljivost nezavisna je od temperature samo u slučaju materijala koji imaju izrazito niske vrijednosti. I specifična toplina i ukupna gustoća su izrazito zavisne od temperature. Prema tome, može se zaključiti da je toplinska difuzivnost izrazito povezana s promjenom temperature. Toplinski difuzivitet može se odrediti mjerenjem prilikom uspostave neustaljenog prijelaza toplinske energije ili izračunati ako su poznate vrijednosti toplinske vodljivosti, gustoće i specifične topline nekog materijala. Somerton i Boozer (1961) razvili su metodu mjerenja toplinskog difuziviteta na suhim uzorcima stijena, prilikom čega je raspon temperatura kojima su stijene bile izložene iznosio od 150 do 1000 °C. Metoda se sastojala od grijanja valjkastog uzorka pri konstantnoj snazi grijača smještenog na vanjskoj stijenci uzorka. Tijekom zagrijavanja uzorka mjerene su temperature na stijenci i u središtu uzorka. S obzirom da je temperatura na obodu linearna funkcija vremena (konstantna snaga grijača), a razlika između temperature na obodu i u središtu je neznatna, toplinski difuzivitet se može izraziti i kao funkcija vremena:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha(t)\nabla^2 T \tag{4-29}$$

Ako se primjeni relacija $\partial\delta = \alpha(t)\,dt$, izraz (4-29) postaje:

$$\frac{\partial T}{\partial \delta} = \nabla^2 T \tag{4-30}$$

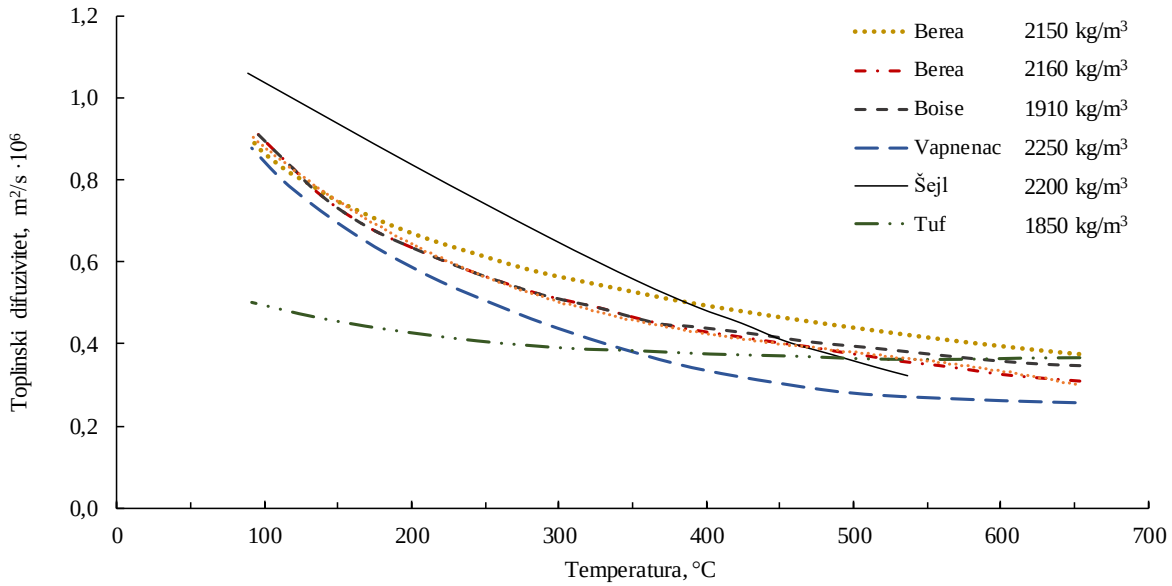
Rješenje izraza (4-30) se sastoji od dva člana koji opisuju neustaljeno stanje - jedan opisuje proces prilikom početka grijanja uzorka, dok drugi opisuje zavisnost toplinskog difuziviteta od temperature (Boozer, 1959). Pojednostavljeni izraz, s obzirom na početne i granične uvjete, glasi

$$\alpha = \frac{r^2 h}{4\Delta T} \tag{4-31}$$

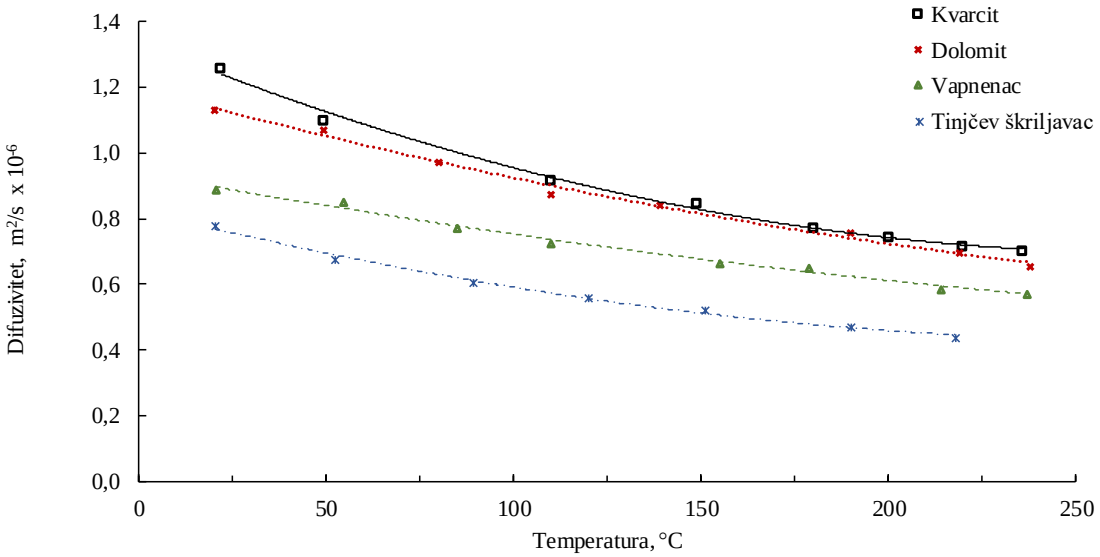
gdje je α predstavlja toplinski difuzivitet (m^2/s), r polumjer uzorka (m), h promjena temperature na vanjskom obodu (°C/s) i ΔT razlika temperatura na stijenci i u središtu uzorka (°C).

Većina ostalih metoda za određivanje toplinskog difuziviteta vezana je uz mjerenje toplinske vodljivosti, te određivanja zakonitosti za određivanje difuziviteta. Mjerenje

toplinskog difuziviteta u stijenama koje su zasićene fluidima teže je, s obzirom na to da postoji mogućnost uspostave konvektivnog prijelaza toplinske energije, te će izmjerene vrijednosti biti više nego što bi bile kod mjerenja suhog uzorka. Na slici 4.5. prikazani su rezultati mjerenja na različitim stijenskim uzorcima, dok su na slici 4.6. prikazane vrijednosti toplinskog difuziviteta za različite vrste stijena.



Slika 4.5. *Promjena vrijednosti toplinskog difuziviteta s promjenom temperature za različite vrste stijena (Somerton, 1992)*



Slika 4.6*. Rezultati mjerenja toplinskog difuziviteta na uzorcima u rasponu od 20-250 °C (Somerton, 1992)*

4.4. Geološka obilježja istraživanog područja

Republika Hrvatska je geološki podijeljena na dvije glavne regije – Panonski bazen i Dinaride Od te dvije regije, poznato je da Panonski bazen ima potencijal za iskorištavanje geotermalne energije (Jelić, 1979; Jelić et al. 2000.; Jelić et al., 2005). Općenito, Panonski bazen većinski je nizinsko područje, omeđeno Karpatima, Dinaridima i Alpama, te izgrađeno od magmatskih, metamorfnih i sedimentnih stijena, raspona starosti od pretkambrija do kvartara. Dio Panonskog bazena koji se nalazi na području Republike Hrvatske pokriva područje od oko 30000 km^2, te je formiran tijekom neogena. Postanak neogenskih naslaga može se podijeliti u tri megaciklusa (Velić et al., 2002). Naslage prvog megaciklusa su donjomiocenske i srednjomicenske starosti te su litološki veoma heterogene. Ipak, većinom ih tvore klastične sedimentne stijene raznovrsnog sastava (breče, konglomerati, pješčenjaci, gline itd.) te karbonati (vapnenci i vapnenački pješčenjaci). Naslage drugog megaciklusa su gornjomiocenske starosti te su karakterizirane izmjenom pješčenjaka i lapora. Posljednji, treći megaciklus, je pliocensko-kvartarne starosti, a karakteriziraju ga naslage glina, pijeska, šljunka te mjestimice naslage lignita. Iz radova Jelić et al. (2005) i Velić et al. (2012) zaključeno je kako sedimenti kvartarne i tercijarne starosti prekrivaju kristalinsko temeljeno gorje ili stijene mezozojske starosti.

Hrvatski dio Panonskog bazena dijeli se na četiri glavne depresije – Savsku, Dravsku, Mursku te Slavonsko-srijemsku (Slika 5.3.; granice depresija prema: Velić et al., 2012; Malvić, 2016), gdje se nalaze poznata ležišta ugljikovodika u RH. Na tom području identificirano je približno 950 istražnih bušotina (Velić et al., 2002). Geološke interpretacije Dravske depresije pokazale su da neogenske i kvartarne naslage mogu doseći dubine i do 7000 m, kod Savske i Murske do 5500 m, dok kod Slavonsko-srijemske depresije do 4000 m (Saftić et al., 2003).

5. ODREĐIVANJE STATIČKE TEMPERATURE FORMACIJE I NOVA KARTA GEOTERMALNIH GRADIJENATA KONTINENTALNE RH

Promatrajući vrijednosti temperatura pripovršinskog dijela Zemljine kore i dubljih dijelova vidljivo je da temperatura raste s povećanjem dubine. Takva raspodjela temperaturnih vrijednosti moguća je uslijed stvaranja topline unutar Zemljine jezgre i plašta, raspadom radioaktivnih elemenata i prijenosom topline do kore. Unutar Zemljine kore, pretpostavlja se da se prijenos topline većinski odvija kondukcijom - procesom koji je opisan Fourierovim zakonom, uz pretpostavku da je toplinska vodljivost materijala konstanta:

$$\dot{Q} = \lambda \cdot A \cdot \left(\frac{dT}{dz} \right) \tag{5-1}$$

Gdje $\dot{Q}$ predstavlja toplinski tok (W/m^2), λ toplinsku vodljivost stijenske formacije (W/m°C), A poprečnu površinu, okomitu na smjer toplinskog toka (m^2) i $\frac{dT}{dz}$ vertikalni temperaturni gradijent (°C/m). Promjena temperature s dubinom, $\frac{dT}{dz}$, naziva se još i geotermalni gradijent te se, uzimajući u obzir kao granice površinu i neku dubinu, dolazi do izraza:

$$\int_{T_s}^{T_f} dT = g_T \int_0^D dz \tag{5-2}$$

Rješenje integrala glasi:

$$T_f = T_s + g_T \cdot D \tag{5-3}$$

gdje je T_f temperatura formacije (°C), T_s temperatura na površini (°C), g_T geotermalni gradijent (°C/m) i D dubina (m). Varijacija temperature zavisi i od toplinskih svojstvava stijena, odnosno toplinske vodljivosti pojedinih slojeva. Međutim, uvriježeno je pojednostavljenje, navedeno izrazom (5.3), da je promjena temperature s dubinom linearna. Prema navedenom izrazu, dovoljno je poznavati temperaturu na nekoj dubini da bi se mogao odrediti geotermalni gradijent, s obzirom da je vrijednost temperature na površini većinom dostupan podatak. Podatke o temperaturi na površini na nekoj lokaciji najčešće prikupljaju i

pohranjuju meteorološki zavodi. Za određivanje geotermalnog gradijenta potrebno je, dakle, poznavati temperaturu na površini i temperaturu na nekoj dubini. Određivanjem geotermalnog gradijenta za neku lokaciju moguće je izračunati temperaturu formacije na bilo kojoj dubini. Ovakvo određivanje temperature formacije smatra se najjednostavnijom metodom.

Prilikom bušenja vrše se pojedina geofizička i karotažna mjerenja u izrađenom kanalu bušotine. Mjerenje temperature unutar bušotine obavlja se ili tijekom bušenja (engl. *Measure While Drilling*, MWD) ili nakon prestanka bušenja. Mjerenje temperature u bušotini, u većini slučajeva, odvija se ili maksimalnim termometrom ili karotažom temperature (Bassiouni, 1994; Rider, 2000; Serra, 1984). Određivanje temperature na dnu kanala bušotine u naftnom inženjerstvu važno je s obzirom na to da porast temperature isplake utječe na njezina svojstva, kao npr. viskoznost, gustoću itd.

Karotaža temperature podrazumijeva kontinuirano bilježenje temperature isplake. Preporuka je da se karotaža temperature odvija na način da se bilježi temperatura pomoću termometra na vrhu sonde tijekom spuštanja sonde kroz bušotinu, da se izbjegnu poremećaji isplake uslijed pomicanja žice i same sonde (Serra, 1984). Sonda koja se koristi kod temperaturne karotaže sadrži platinastu žicu te mjeri promjenu otpora s promjenom temperature. Karotaža temperature korisna je kod određivanja vrha cementa iza zaštitnih kolona, pojave plina u bušotini, identifikacije kanala vode ili plina iza zaštitnih kolona i sl. uslijed pojave temperaturnih anomalija kod navedenih pojava (Bassiouni, 1994). Osim mjerenja same temperature, ovom karotažom moguće je zabilježiti i promjene temperaturnog gradijenta u odnosu na dubinu, uslijed različitih toplinskih vodljivosti formacija, te se takav zapis naziva diferencijalna karotaža temperature (Bassiouni, 1994). Diferencijalnom karotažom temperature moguće je odrediti toplinsku vodljivost pojedinih slojeva formacije. Karotaža temperature izvodi se rjeđe od drugih metoda karotaže, dok interpretacija ovisi o kvaliteti izvođenja mjerenja. Pomoću karotaže temperature moguće je odrediti na kojoj dubini postoji npr. dotok slojnog fluida ili gubitak isplake, s obzirom da su kod takvih intervala jasno vidljive temperaturne anomalije (Rider, 2000).

Maksimalni termometar najčešće je korištena metoda izmjere temperature nakon završetka izrade dijela kanala bušotine. Tako izmjerena temperatura naziva se još i temperatura na dnu bušotine (engl. *Bottom hole temperature – BHT*), te se često označava s T_{bh}. Mjerni instrument sastoji se od kapilare u kojoj se nalazi živa kao radni fluid te cijevi u kojoj se smješta kapilara. Termometar mjeri maksimalnu temperaturu, otkuda dolazi i sam naziv. Pogreške prilikom mjerenja su moguće i najčešće se odnose na nedovoljno čekanje na uspostavu temperaturne

ravnoteže između žive i medija u kojem se mjeri, spuštanje razine žive u kapilari uslijed izraženih vibracija mjernog instrumenta, što može uzrokovati očitanje nižih vrijednosti, dok je mjerenje vrijednosti viših od stvarnih moguće kod ležišta povišenog tlaka (Bassiouni, 1994). Mjerenja maksimalnim termometrom mogu se provoditi kao samostalna mjerenja u nezacijevljenom kanalu bušotine ili se instrument može smjestiti na neki od drugih instrumenata predviđenih za neku od karotaža bušotine (gamma, elektrokarotaža i sl.), da se smanji vrijeme provođenja mjerenja (Bassiouni, 1994; Serra, 1984). Većina mjernih instrumenata izvedena je na način da izdrže temperature oko 200 °C (Rider, 2000).

5.1.Metode određivanja statičke temperature stijenskih formacija

Mjerenje temperature isplake u bušotini daje približnu vrijednosti temperature formacije. To je posljedica cirkulacije hladnije isplake tijekom izrade bušotine. Da bi se što točnije odredilo toplinska svojstva stijena, potrebno je odrediti točnu statičku temperaturu formacije. Statička temperatura formacije je ona vrijednost koju stijenska formacija ima prije izrade bušotine, prije nego je nastupila temperaturna neravnoteža. Trenutnom tehnologijom nije moguće direktno izmjeriti statičku ili neporemećenu temperaturu stijena (engl. *Virgin Rock Temperature* - VRT), te se ona određuje posredno korekcijama izmjerene temperature bušotinskog fluida ili izračunom temperature na nekoj dubini pomoću geotermalnog gradijenta. Postoji nekoliko metoda korekcije izmjerenih temperatura, od kojih je najpoznatija Hornerova metoda. Hermanrud et al. (1990) ocijenili su točnost i odstupanje pojedinih, tada postojećih metoda, određivanja statičke temperature formacije, na 18 izmjera temperatura, provedenih na naftnom polju Oseberg, na različitim dubinama. Provedene su 22 različite korekcije na navedenim podacima, te su se rezultati usporedili međusobno kao i s rezultatima provedenih ispitivanja bušotine kroz bušaće šipke (engl. *drill stem test* – DST). Temperatura određena DST mjerenjima često se smatra najbližoma statičkoj temperaturi (Hermanrud et al., 1990; Beardsmore i Cull, 2001; Zare-Reisabadi et al., 2015). Istraživanje je pokazalo da metode koje uzimaju u obzir svojstva bušaćeg fluida i svojstva okolne stijene imaju manja odstupanja od jednostavnijih metoda, s manje proračunskih parametara. Metode koje se temelje na linijskom modelu prijelaza toplinske energije i koje ne uzimaju u obzir vrijeme cirkulacije isplake pokazuju korigirane vrijednosti temperatura niže od 5 do 10°C. Nijedna od korištenih metoda korekcije na podacima dobivenima nekom od karotažnih metoda nije iskazala pravu statičku temperaturu, tj. T_{VRT}. Istaknuto je, također, da su odstupanja u proračunima najčešće uzrokovana sistemskim greškama. Ako su one prepoznate na vrijeme i uzete u obzir, točnost

pojedinih metoda korekcije se povećava (Hermanrud et al., 1990). Na temelju navedene studije odabrane su dvije metode korekcije temperatura te su primijenjene na podacima mjerenja temperatura na području Panonskog bazena. Odabrane metode su Hornerova, kao najčešće korištena metoda, te Cooper-Jones metoda, čiji su rezultati bliži rezultatima DST mjerenja.

5.1.1. Hornerova metoda

Tijekom izrade bušotine, isplaka prolazi kroz bušaće šipke prema dlijetu, nakon toga prolazi kroz otvore na dlijetu te pri povratku na površinu kroz prstenasti prostor hladi bušaću krunu i iznosi nabušene čestice. Tijekom uzlaznog protjecanja kroz prstenasti prostor, ostvaruje se prijenos topline između toplije stijene i hladnije isplake, prilikom čega dolazi do zagrijavanja isplake uslijed temperaturne razlike. Isplaka se zagrijava protjecanjem kroz prstenasti prostor, od dna bušotine pa sve do dubine na kojoj je isplaka više temperature nego okolna formacija. Na toj dubini prijelaz toplinske energije odvija se u smjeru od toplije isplake prema hladnijoj stijenskoj formaciji. Dostizanjem projektirane dubine, započinje proces čišćenja bušotine, odnosno iznošenja krhotina, cirkulacijom isplake. Nakon što su krhotine iznesene, bušaći alat se izvlači, a mjerni uređaji se spuštaju na dno bušotine. Temperatura isplake nakon cirkulacije, T_f je niža od temperature okolne formacije (Bassiouni, 1994). S obzirom da maksimalni termometar bilježi temperaturu isplake, primjenjuju se različite korekcije za određivanje statičke temperature formacije. Najpoznatija metoda temperaturne korekcije je tzv. Hornerova metoda, temeljena na Hornerovoj metodi analize testa porasta tlaka, tijekom izvođenja DST mjerenja, što je često korištena metoda u analizi hidrodinamičkih mjerenja u naftnom inženjerstvu, za određivanje granica i propusnosti ležišta (Horner, 1951). U oba slučaja, primijenjena je jednadžba difuziviteta, koja opisuje promjenu temperature, odnosno tlaka, s vremenom. Hornerovu metodu za određivanje statičke temperature formacije prvi su prilagodili Lachenbruch i Brewer (1959). Korekcija uzima u obzir vrijeme proteklo od završetka cirkulacije do trenutka u kojem je mjerni instrument spušten na dno bušotine, Δt i vrijeme trajanja cirkulacije isplake, t_c. Slično kao i kod analize porasta tlaka, u odnos se stavljaju vrijednosti izmjerene temperature na dnu bušotine te vrijednosti omjera vremena Δt i t_c:

$$T_{bh} = T_{VRT} + C \times \ln\left[\frac{\Delta t + t_c}{\Delta t}\right] \tag{5-4}$$

Grafo-analitički postupak određivanja statičke temperature sastoji se od ucrtavanja rezultata mjerenja temperature na dnu bušotine, T_{bh} (°C) na ordinatu, dok se na apscisu unose rezultati prirodnog logaritma omjera vremena $\frac{\Delta t + t_c}{\Delta t}$. Pravac kroz tako ucrtane vrijednosti za istu dubinu, rezultira očitanjem vrijednosti statičke temperature, T_{VRT}, kao odsječak na ordinati u trenutku $\ln\left[\frac{\Delta t + t_c}{\Delta t}\right] = 0$ (Lachenbruch i Brewer,1959; Dowdle i Cobb, 1975; Beardsmore, 2001). Konstanta C predstavlja nagib pravca, a ovisi o jediničnom prijelazu toplinske energije, q' (W/m) i toplinskoj vodljivosti formacije, λ (W/m°C):

$$C = \frac{q'}{4\pi\lambda} \tag{5-5}$$

Analiza točnosti i odstupanja (Hermarud et al., 1990) pokazala je da se jednostavnom Hornerovom metodom učestalo javljaju niže vrijednosti statičke temperature, u odnosu na metode koje u obzir uzimaju više proračunskih parametara. Točnost Hornerove metode ovisi o točnosti očitanja temperature na dnu bušotine, te određivanja vremena cirkulacije isplake i vremena proteklog od zaustavljanja cirkulacije i izvođenja mjerenja (Beardsmore, 2001). Greške u mjerenju temperature na dnu se mogu javiti uslijed pojave izražene konvekcije, s obzirom na to da žica na kojoj se nalazi instrument može poremetiti isplaku u mirujućem položaju. Čak i manji trzaji uzrokuju pomicanje fluida, pa zabilježena temperatura može biti nekoliko stupnjeva različita. Najveći problemi javljaju se kod određivanja vremena trajanja cirkulacije isplake, s obzirom da nije vrijednost koja se uobičajeno bilježi u bušaćim zapisnicima ili zapisnicima karotaže (Bassiouni, 1994). U slučaju da ti podaci nisu dostupni, najčešće se mogu procijeniti i odrediti kao vrijeme potrebno za jedan ili dva potpuna ciklusa cirkulacije isplake cijelom duljinom bušotine. Međutim, ustanovljeno je da sve dok se vrijednost t_c odredi unutar prihvatljivih i realnih granica, utjecaj parametra t_c na završni rezultat proračuna je minimalan (Bassiouni, 1994). Također, Hermanrud et al. (1990) su predložili empirijsku korelaciju, na temelju opažanja, za određivanje parametra t_c:

$$t_c = \frac{1,3 + D}{1,3 - 0,091 \times D} \tag{5-6}$$

Gdje je D prava dubina (km) mjerena od kupole radne šipke (engl. *kelly bushing*). Međutim, ova procjena temelji se na iskustvenim mjerenjima, te je preporuka da se koristi isključivo ako nema druge metode određivanja vremena cirkulacije.

Roux et al. (1982) predstavili su korekciju Hornerove metode, koja se može koristiti za slučaj kada je omjer vremena cirkulacije isplake i vrijeme stajanja isplake veći od 1/3 ($t_c/\Delta t > 1/3$). Prema navedenom istraživanju, u slučaju vrijednosti za koje vrijedi da je $t_c/\Delta t < 1/3$, korekcija Hornerovom metodom daje prihvatljive vrijednosti statičke temperature formacije. Odstupanje od prave vrijednosti statičke temperature proračunato Hornerovom metodom raste povećavanjem vrijednosti omjera $t_c/\Delta t$. U tom slučaju može se primijeniti metoda dodatne korekcije Hornerove metode za koju je potrebno odrediti bezdimenzijski parametar T_D. On ovisi o bezdimenzijskom vremenu t_D (jednadžba (5-7) i setovima parametara a,b,c,d,e,f određenih na temelju iskustvenih spoznaja (Tablica 5.1).

$$t_D = 3600 \cdot \frac{\alpha \cdot t_c}{r_w^2} \tag{5-7}$$

$$T_D = a + \left(b \cdot t_D\right) + \left(c \cdot t_D^{1/2}\right) + \left(d \cdot t_D^{1/3}\right) + \left(e \cdot t_D^{1/4}\right) + \left(f \cdot t_D^{1/5}\right) \tag{5-8}$$

Tablica 5.1. Prikaz vrijednosti parametara potrebnih za korekciju Roux et al. (1982)

(Δt+tc)/Δt	a	b	c	d	e	f
1,25-2	0,4874	0,0027	-0,2862	1,4077	-0,7836	0,7732
2-5	0,2516	-0,0072	0,365	-0,0001	-3,4989	3,1534
5-10	2,3502	0,0024	-0,0609	4,7833	-5,9058	0,0365

Nakon izračuna bezdimenzijskog parametra, moguće je korigirati rezultat temperature dobivene Hornerovom metodom. Za izračun je potreban podatak o izračunatoj temperaturi pomoću Hornerove metode i pripadajući nagib krivulje:

$$T_{Roux} = T_{Horner} - \left(2,303 \cdot m \cdot T_D\right) \tag{5-9}$$

gdje je m nagib Hornerove krivulje, T_{Horner} statička temperatura formacije određena Hornerovom metodom, T_D bezdimenzijski parametar te faktor 2,303 koji predstavlja faktor pretvorbe prirodnog logaritma u opći logaritam ($\ln(x) = 2,303\log(x)$).

Dowdle i Cobb (1975) naglašavaju da Hornerova metoda za određivanje statičke temperature pokazuje značajna odstupanja u slučajevima kada je vrijeme cirkulacije isplake, t_c dugotrajno. Kako je temperaturni gradijent u bušotini u funkciji vremena, on nije konstantan, tj. mijenja se u vremenu. Kada bi se promatralo Hornerovo bezdimenzijsko vrijeme u odnosu na bezdimenzijsku temperaturu, u polulogariatmskom dijagramu, primijetilo bi se da se krivulja može aproksimirati pravcem u tek određenom rasponu. Kako raste vrijeme cirkulacije, mijenjao bi se nagib krivulje, što ukazuje i na povećanje odstupanja od prave vrijednosti temperature formacije. To znači da će korekcija Hornerovom metodom dati značajno manju vrijednost rezultata od prave vrijednosti. Ako se cirkulacija odvija u standardnim vremenskim rasponima, Hornerova metoda daje dobru aproksimaciju statičke temperature formacije (Dowdl i Cobb, 1975; Roux et al., 1982; Beardsmore, 2001).

5.1.2. Cooper-Jones metoda

Dok se Hornerova metoda korekcije temelji se na modelu linijskog prijelaza toplinske energije, grafo-analitička Cooper-Jones metoda koristi model cilindričnog prijelaza toplinske energije kao osnovu za određivanje statičke temperature formacije (Cooper i Jones, 1959). Konduktivni prijelaz toplinske energije u cilindričnom sustavu opisao je Jaeger (1956). Cooper i Jones (1959) su zaključili da se metoda može primijeniti i za određivanje statičke temperature formacije, poznavanjem svojstava kako formacije tako i isplake, u relativno kratkom vremenskom periodu nakon što je bušenje završeno. S obzirom da je promjer bušotine u odnosu na duljinu bušotine poprilično manji, i uz pretpostavku da je bušotina odmah ispunjena hladnijim bušaćim fluidom dolazi do prijelaza toplinske energije s okolne formacije. Prijelaz toplinske energije na dnu bušotine odvija se radijalno, prema stjenkama bušotine te s formacije koja se nalazi ispod dna bušotine. S obzirom da se mjerenja ne odvijaju na samom dnu bušotine, nego neposredno iznad, pokazalo se da radijalni prijelaz toplinske energije ima najveći značaj (Blackwell, 1956; Cooper i Jones, 1959). Iako izrada bušotine i cirkulacija isplake tijekom izrade uzrokuju tzv. temperaturnu neravnotežu, sama cirkulacija bušaćeg fluida ima značajniji utjecaj. U slučaju relativno brzog završetka bušenja, formacija koja se nalazi u neposrednoj blizini dna bušotine ne prolazi kroz značajniju promjenu temperature uslijed izlaganja hladnijoj isplaci. Prema tome, Bullard (1947) je istaknuo da će temperaturna ravnoteža između isplake i formacije nastupiti brže, tj. fluid će brže postići statičku temperaturu formacije, što je i opisano

modelom linijskog prijelaza toplinske energije. Copper i Jones su potvrdili Bullardova istraživanja uz upotrebu cilindričnog modela uz korištenje bezdimenzijskih parametara:

$$\alpha_1 = 2\frac{\rho c}{\rho_f c_f} \tag{5-10}$$

$$\tau_1 = \frac{\lambda \Delta t}{\rho c r_w^2} \tag{5-11}$$

$$n = \frac{T_{bh} - T_f}{T_{VRT} - T_f} \tag{5-12}$$

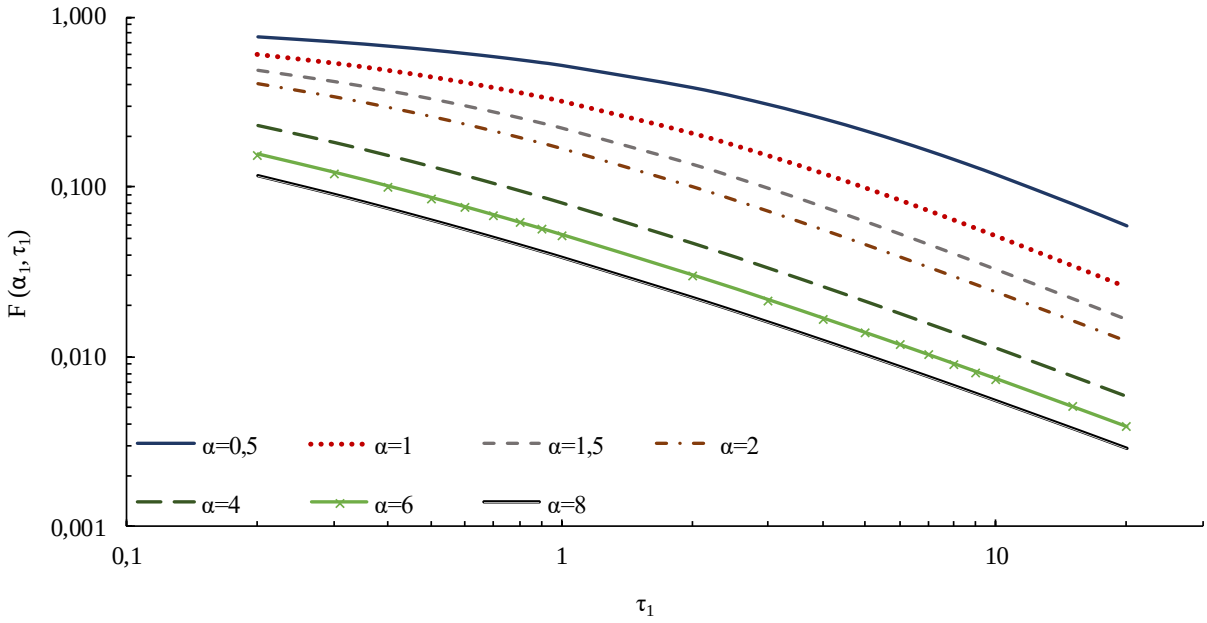
gdje ρc predstavlja volumnu specifičnu toplinu formacije (J/m^3°C), $\rho_f c_f$ volumnu specifičnu toplinu fluida, tj. isplake (J/m^3°C), i T_f temperaturu fluida, tj. isplake (°C). Radijalni prijelaz toplinske energije u cilindru opisao je Jaeger (1956), uz pretpostavku da su bušotinski otpori zanemareni te da ne postoji prijelaz toplinske energije uzduž osi cilindra:

$$\frac{T_{bh} - T_{VRT}}{T_f - T_{VRT}} = F(\alpha_1, \tau_1) \tag{5-13}$$

Bezdimenzijski parametar $F(\alpha_1, \tau_1)$ definiran je kao:

$$F\left(\alpha_1, \tau_1\right) = \frac{4\alpha_1}{\pi^2} \int_0^\infty \frac{\exp\left(-\tau_1 u^2\right)}{u\left\{\left[uJ_0(u) - \alpha_1 J_1(u)\right]^2 + \left[uY_0(u) - \alpha_1 Y_1(u)\right]^2\right\}} \tag{5-14}$$

gdje su $J_N(u)$ i $Y_N(u)$ Besselove funkcije N-tog reda prve i druge vrste. Vrijednosti funkcije $F\left(\alpha_1, \tau_1\right)$ dao je Jaeger (1956). Slika 5.1. prikazuje odnos parametra $F\left(\alpha_1, \tau_1\right)$ i bezdimenzijskog vremena τ_1, za određene vrijednosti parametra α_1 na temelju rezultata proračuna jednadžbom (5-14).



Slika 5.1. *Prikaz vrijednosti odnosa funkcije* $F(\alpha_1,\tau_1)$ *i bezdimenzijskog vremena, za pojedine vrijednosti parametra* α_1

Porast temperature hladnijeg medija tijekom vremena može se promatrati i preko relacije (5-12) s obzirom da se s porastom vremena omjer temperatura približava jedinici. Izraz (5-12) može se zapisati i kao:

$$n=\frac{T_{bh}-T_f}{T_{VRT}-T_f}=1-\frac{T_{bh}-T_{VRT}}{T_f-T_{VRT}}=1-F(\alpha_1,\tau_1) \tag{5-15}$$

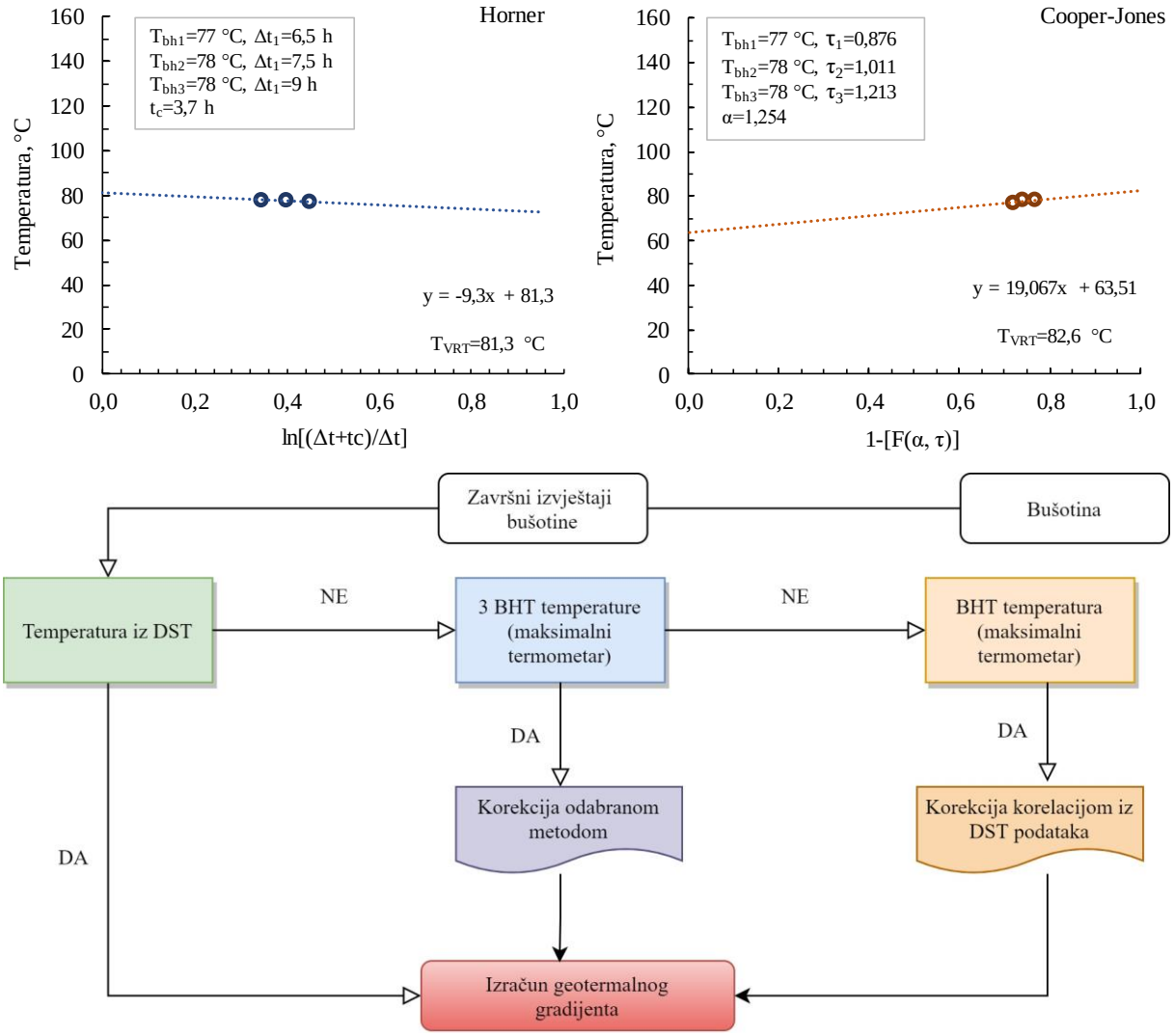
Kombinacijom izraza (5-13) i (5-15) dolazi se do krajnjeg izraza za temperaturu na dnu bušotine:

$$T_{C-J}=\left(T_{VRT}-T_f\right)\times\left[1-F\left(\alpha_1,\tau_1\right)\right]+T_f \tag{5-16}$$

Ucrtavanjem dobivenih vrijednosti izmjerenih podataka o temperaturi, T_{bh} u odnosu na parametar $\left[1-F\left(\alpha_1,\tau_1\right)\right]$ vidljivo je da se radi o linearnoj zavisnosti. Prema tome, odsječak na ordinati daje vrijednost temperature isplake, T_f, dok je nagib krivulje određen kao $m=T_{VRT}-T_f$. Utvrđivanjem vrijednosti nagiba krivulje, m i odsječka na y-osi, T_f dobiva se vrijednost statičke temperature formacije:

$$T_{VRT}=m+T_f \tag{5-17}$$

Slika 5.2. prikazuje primjer određivanja statičke temperature za Hornerovu i Cooper-Jones metodu za bušotinu Hrvatsko zagorje-1 i postupak određivanja geotermalnog gradijenta na temelju dostupnih podataka. Za usporedbu, temperatura izmjerena DST metodom na 2370 m iznosila je 102 °C.

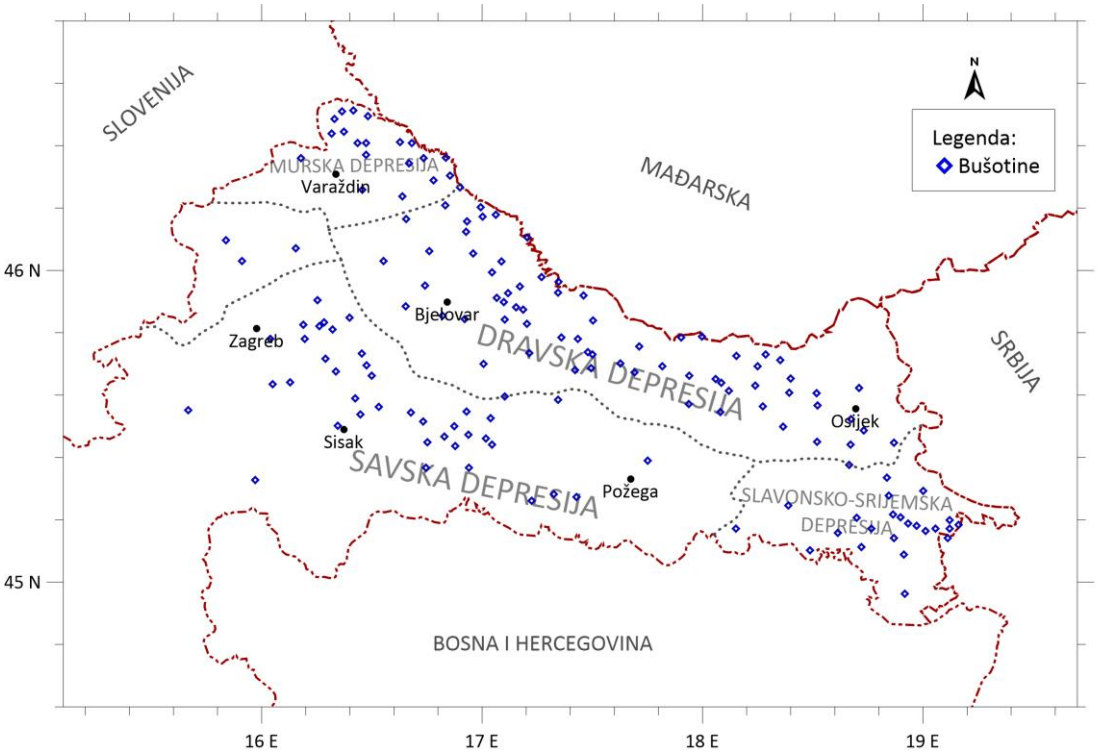


Slika 5.2. *Primjer određivanja statičke temperature metodom Horner i Cooper-Jones za bušotinu Hrvatsko zagorje-1 na dubini 2595 m (za usporedbu T_{DST} @ 2370 m=102 °C) i postupak određivanja geotermalnog gradijenta*

5.1.3. Određivanje korekcije temperatura na području Panonskog bazena i nova karta geotermalnih gradijenata na području Panonskog bazena RH

Prva istraživanja geotermalnog potencijala na području Republike Hrvatske iznio je Jelić (1979). Istraživanje se temeljilo, većim dijelom, na podacima dobivenima tijekom ili

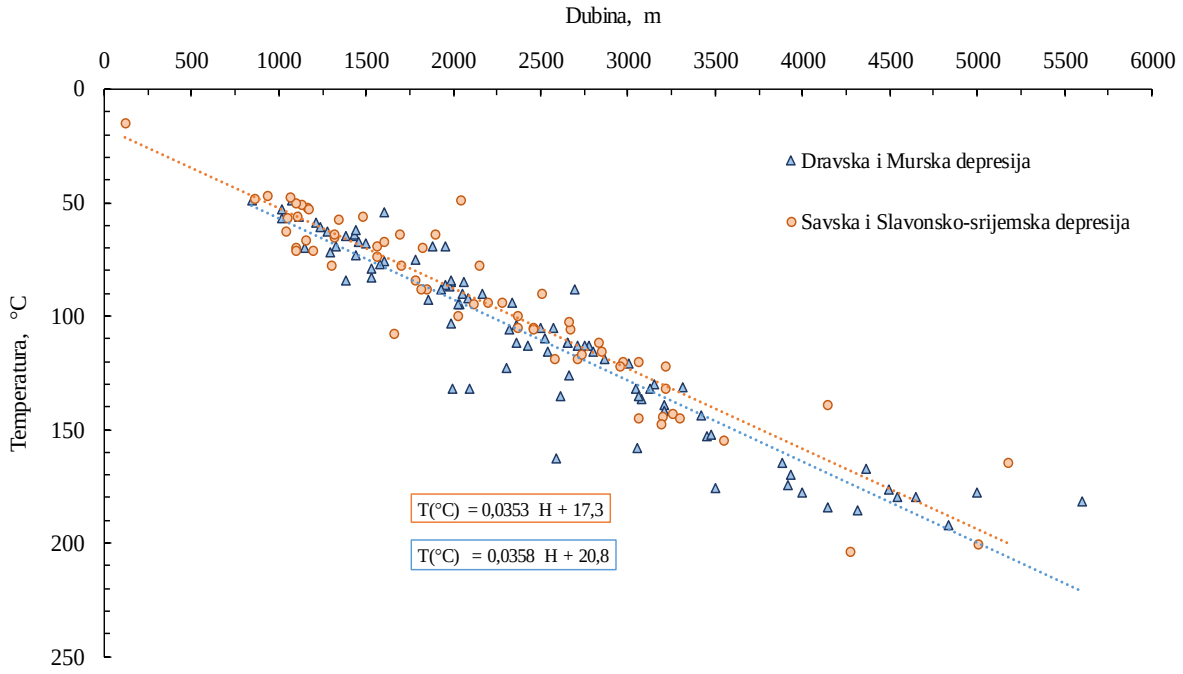
nakon izrade dubokih istražnih ili proizvodnih bušotina koje su se nalazile na području Savske i Dravske depresije dok se manji dio podataka odnosio na podatke iz plitkih bušotina. Nastavkom istraživanja i proširenjem na cijelu Republiku Hrvatsku 1995.g. objavljena je prva karta geotermalnih gradijenata kao i procjena toplinskog toka (Jelić et al., 1995). Digitalnu verziju navedenih karata nije bilo moguće pronaći i zbog loše rezolucije verzije objavljene u časopisu uočena je potreba za izradu nove, digitalne karte geotermalnih gradijenata. Stoga su za potvrdu prijašnjih istraživanja i kreiranja nove digitalne karte odabrane 154 bušotine, prikazane na slici 5.3., dok je popis odabranih dan u Prilogu 1.



Slika 5.3. *Prikaz lokacija odabranih bušotina za kreiranje karte geotermalnog gradijenta*

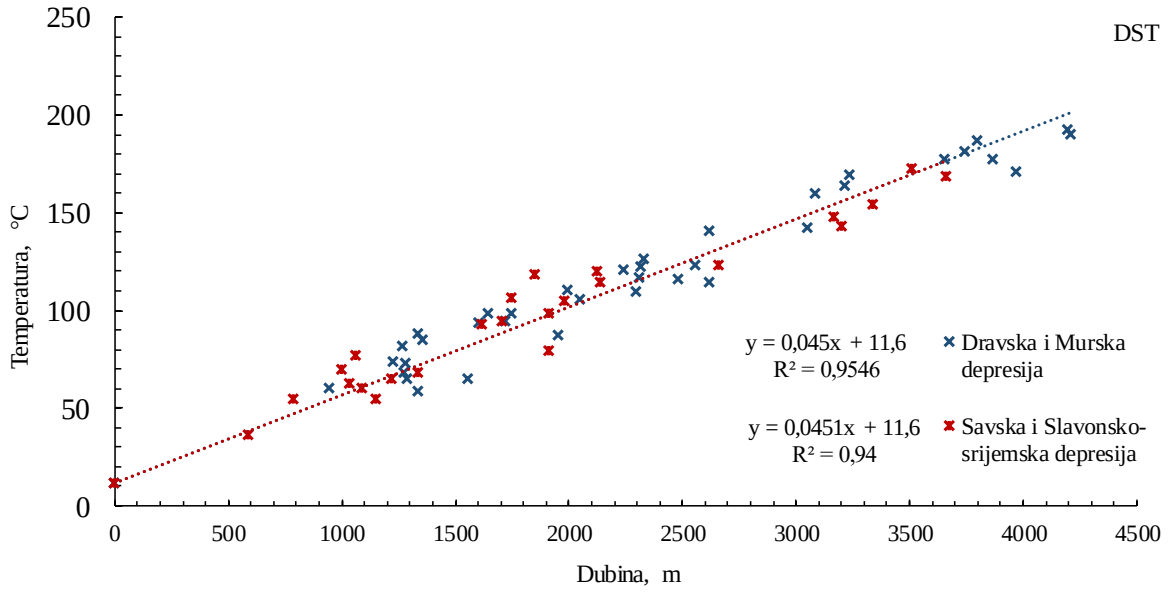
Za potrebe izrade ove disertacije pristupilo se bušotinskom arhivu dostupnom kod Hrvatskog geološkog instituta (HGI), s odobrenjem Ministarstva gospodarstva, poduzetništva i obrta (Bušotinski arhiv). Bušotinski arhiv je sadržan u pdf formatu, te su izuzeti podaci dostupni iz geoloških izvješća nakon završetka izrade bušotine, zatim zapisnika o DST ispitivanju, kao i tzv. EKD zapisnika (dokumentacija elektrokarotaže). Podaci koji su izuzeti odnose se na ime bušotine, godinu izrade, lokaciju bušotine, parametre bušotine (dubina, promjeri bušenja, promjeri ugrađenih zaštitnih cijevi) i termogeološke parametre (litostratigrafski podaci i temperatura, bez obzira na korištenu metodu mjerenja). Bušotine su odabrane na način da pokrivaju što veći dio kontinentalne Hrvatske, da su dubine veće od 800 m te da zapisnici sadrže

navedene podatke u što većem opsegu. Većina od odabrane 154 bušotine pripada u kategoriju „suhih“ bušotina, te su kategorizirane kao istraživačke bušotine i većina ima status privremeno napuštenih u navedenim zapisnicima. Manji dio se odnosi na proizvodne bušotine koje, u većini slučajeva, trenutno imaju status ili mjernih ili likvidiranih. Za svaku od bušotina zabilježene su vrijednosti temperatura mjerene maksimalnim termometrom na dnu, vidljivo na slici 5.4. Zbog jednostavnosti prikaza, bušotine su raspoređene u dvije glavne skupine – Dravska i Murska depresija te Savska i Slavonsko-srijemska.

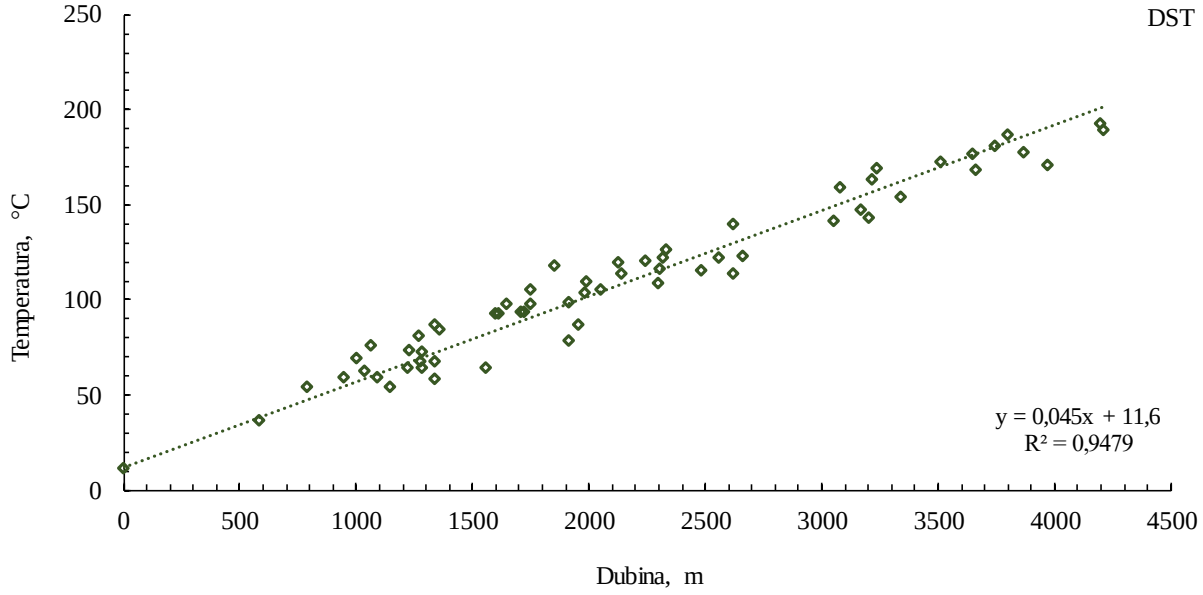


Slika 5.4. *Temperature mjerene na dnu bušotina maksimalnim termometrom*

Od navedene 154 bušotine, 61 bušotina je sadržavala podatke o DST testiranjima. Kod bušotina koje su imale zabilježene više od jednog mjerenja na različitim dubinama, podaci su usrednjeni s obzirom na dubinu i na zabilježenu vrijednost temperature u svrhu dobivanja jedne vrijednosti po bušotini. DST mjerenja koja nisu zadovoljila osnovne uvjete dobro izvedenog DST mjerenja su odbačena. Od ukupnog broja zabilježenih DST mjerenja, 61 bušotina sadržavala je upotrebljive DST podatke. Prikupljeni podaci prikazani su na slici 5.5., razvrstani prema navedene dvije skupine. Za svaki set podataka određena je zavisnost temperature od dubine, te je vidljivo da su one gotovo jednake. Slijedom toga, izrađena je jedinstvena korelacija, kao što je vidljivo na slici 5.6.



Slika 5.5. *Podaci DST mjerenja temperature za Dravsku i Mursku depresiju te Savsku i Slavonsko-srijemsku depresiju*



Slika 5.6. *Objedinjeni podaci DST mjerenja temperature za kontinentalni dio RH*

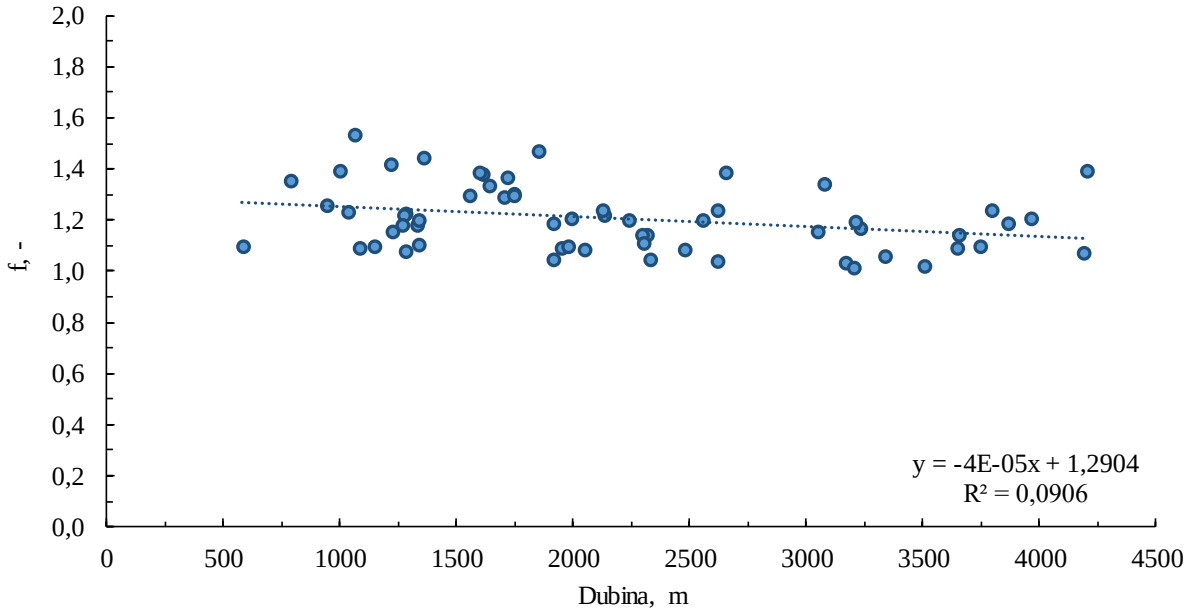
Uspoređene su vrijednosti geotermalnih gradijenata, izračunatih na temelju izraza 5-3, na 61 bušotini, pomoću podataka dobivenih mjerenjem temperature maksimalnim termometrom i onih dobivenim pomoću DST-a. Kao srednja površinska temperatura uzeta je vrijednost od 11,6 °C za kontinentalnu Hrvatsku (Jelić, 1979). Njihov odnos može se predstaviti bezdimenzijskim faktorom korekcije, koji predstavlja omjer ovih dviju vrijednosti, odnosno

veličinu koja pokazuje za koliko je vrijednost dobivena DST mjerenjima veća od one dobivene maksimalnim termometrom:

$$f = \frac{g_{T\,DST}}{g_{T\,BH}} \quad (5\text{-}17)$$

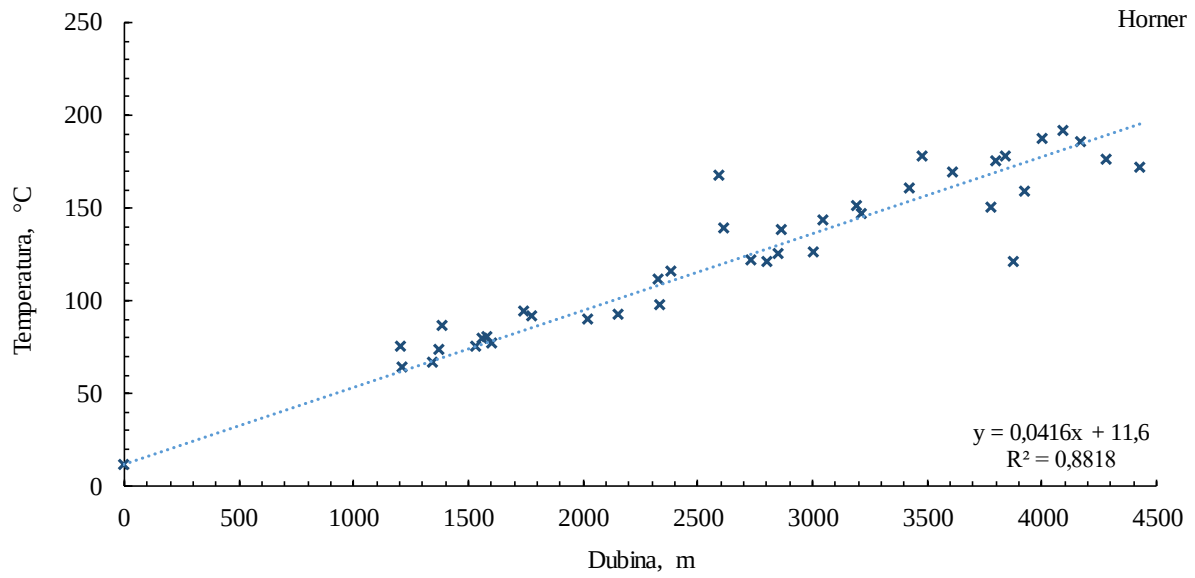
Vrijednosti dobivene ovom korelacijom prikazane su na slici 5.7., te je vidljivo da se može uspostaviti linearna korelacija između bezdimenzijskog korekcijskog faktora, f i dubine:

$$f = -0,00004 \cdot D + 1,2904 \quad (5\text{-}18)$$

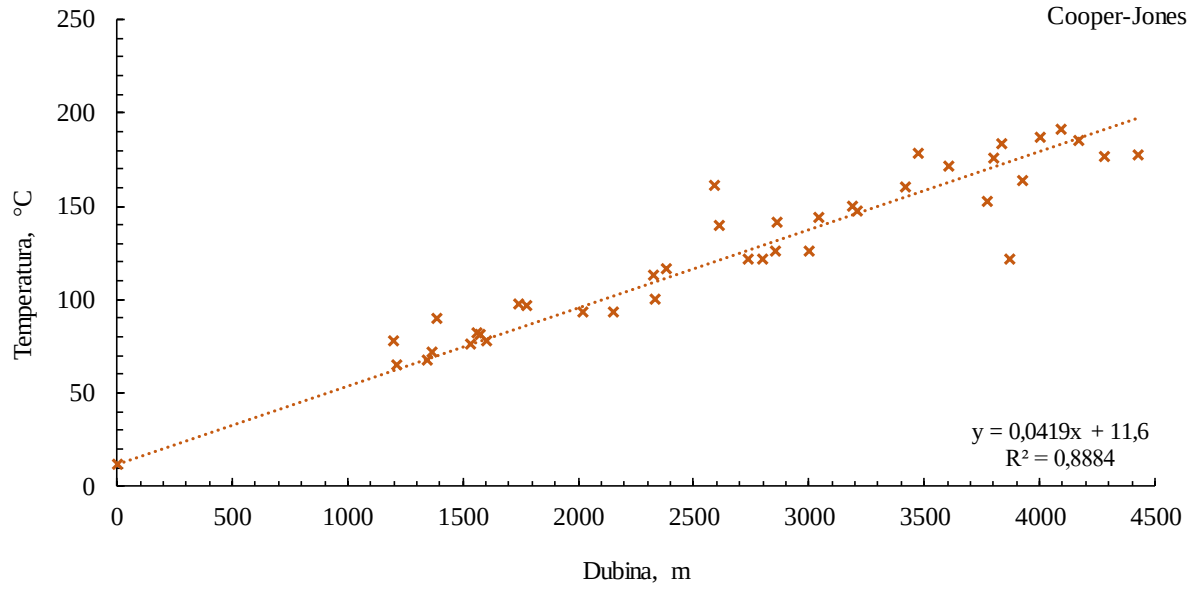


Slika 5.7. *Prikaz odnosa bezdimenzijskog korekcijskog fatkora, f, i dubine iz podataka o DST mjerenjima temperature*

Isti postupak proveden je na 39 bušotina koje su sadržavale barem tri mjerenja na određenoj dubini maksimalnim termometrom. Ti podaci su korigirani metodom Hornera i Cooper-Jonesa, a rezultati su vidljivi na slikama 5.8. i 5.9.



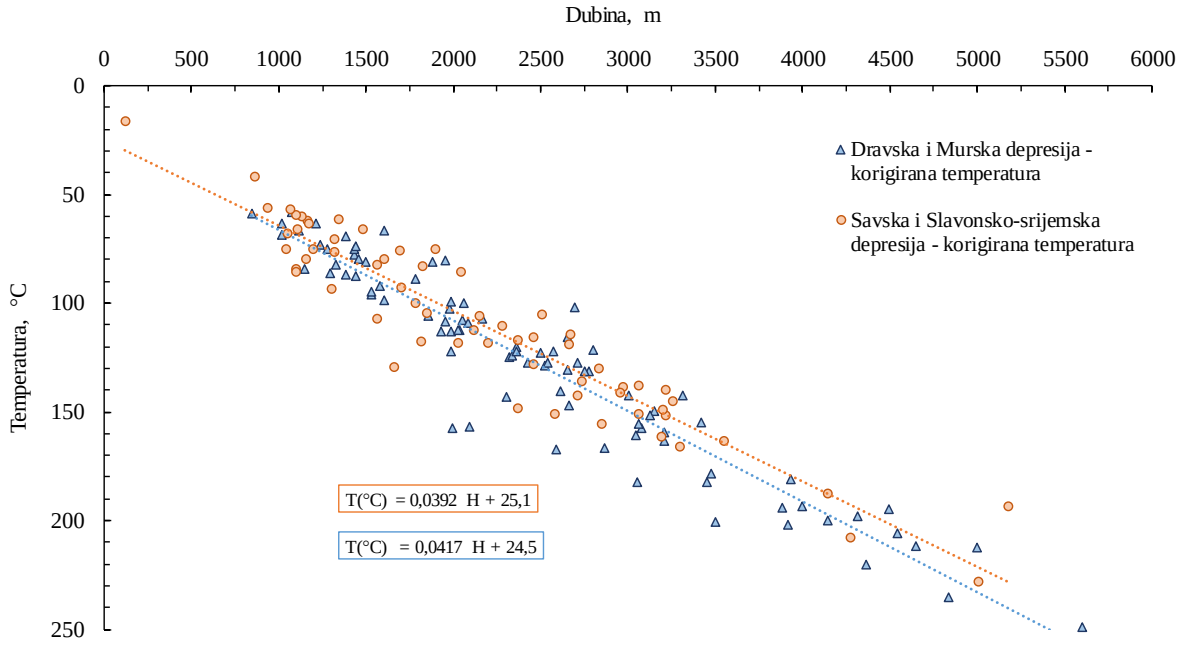
Slika 5.8. *Korigirane vrijednosti temperatura na dubini bušotina pomoću Hornerove metode*



Slika 5.9. *Korigirane vrijednosti temperatura na dubini bušotina pomoću Cooper-Jones metode*

S obzirom na gotovo jednake rezultate, za daljnju analizu koristila se Hornerova metoda na 39 bušotina. Iako Hornerova metoda sadrži određenu grešku jer ne uzima u obzir svojstva stijena i isplake te pokazuje nešto niže vrijednosti od onih dobivenih DST-om, iz ranije navedene literature moguće je zaključiti da će tako određena temperatura dati rezultate više od onih jednom direktno izmjerenih maksimalnim termometrom. Zbog toga su vrijednosti dobivene Hornerovom metodom uzete u obzir kao konzervativne, što ukazuje na mogućnost i

nešto viših vrijednosti. Prema tome, za 100 bušotina poznate su vrijednosti statičkih temperatura na određenoj dubini, te su, uz poznavanje srednje površinske temperature za kontinentalnu Hrvatsku, određne vrijednosti geotermalnog gradijenta. Za ostale 54 bušotine u obzir je uzet bezdimenzionalni korekcijski faktor f, pomoću kojeg su korigirane temperature za te 54 bušotine na njihovoj pripadajućoj dubini. Nakon toga, određen je geotermalni gradijent, uz korištenje standardnog postupka. Tako određene temperature prikazane su na slici 5.10., te su zbog razlikovanja grupirane u dvije glavne skupine, kao i na slici 5.4.

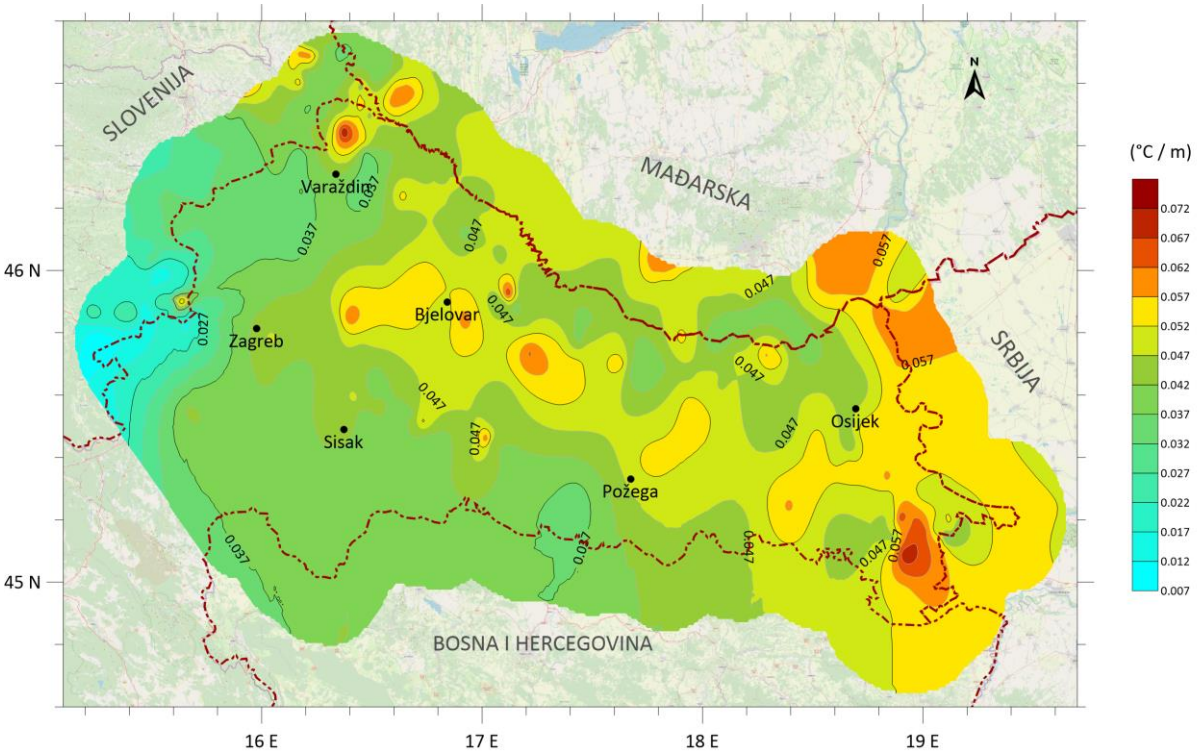


Slika 5.10. *Pregled mjerenih podataka temperature u bušotinama na području Dravske i Savske depresije nakon korekcije temperatura*

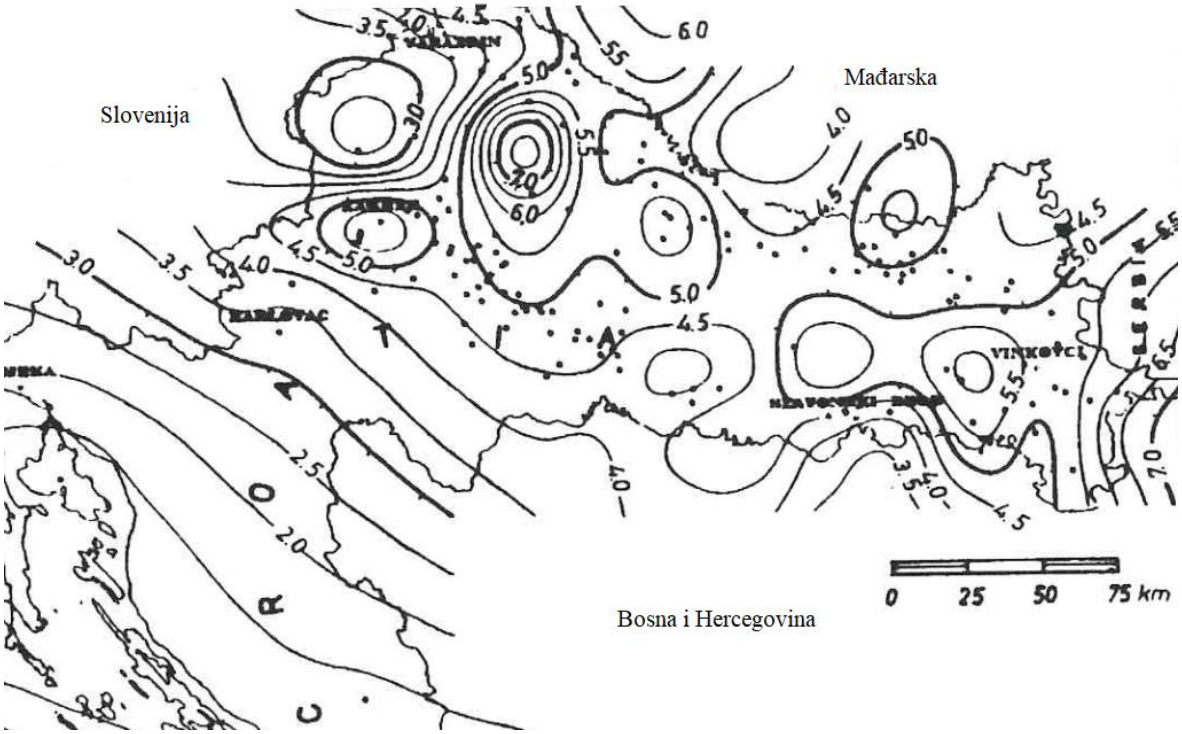
Na temelju novo izračunatih vrijednosti geotermalnog gradijenta za 154 bušotine, izrađena je nova geotermalna karta kontinentalne Hrvatske. S obzirom da su dobiveni točkasti podaci, pomoću odabrane geostatističke metode Kriginga vrijednosti su interpolirane za ostatak područja. Kriging je tehnika određivanja najbolje linearne procjene sa minimalnom varijancom, a može se primijeniti na točku, ali i na blok (Wellmer, 2012). To je često korištena statistička metoda procjene i interpolacijska metoda, a osim interpolirane karte daje i kartu pogrešaka sa standardnim pogreškama procjene. Osnovni postupak geostatističke interpolacije, koristeći običan Kriging (OK) temelji se na određivanju vrijednosti na nemjerenim točkama mreže pomoću jednostavnog linearnog težinskog prosjeka mjerenih točaka u susjedstvu, gdje je optimalna težina određena iz modela variograma. Za određenu točku mreže vrijedi:

$$z_p = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i z_i \tag{5-19}$$

gdje je λ_i težinski koeficijent za svaku lokaciju i, z_i okolne poznate vrijednosti (kontrolne točke), a z_p vrijednost procijenjena Krigingom. U Krigingu te težine mogu biti negativne ili pozitivne. Interpolacija je provedena u programu Golden Surfer. Slika 5.11. prikazuje rezultate interpolacije, odnosno novu kartu geotermalnih gradijenata. Za usporedbu, na slici 5.12. prikazana je prva karta geotermalnih gradijenata (Jelić et al. 1995).



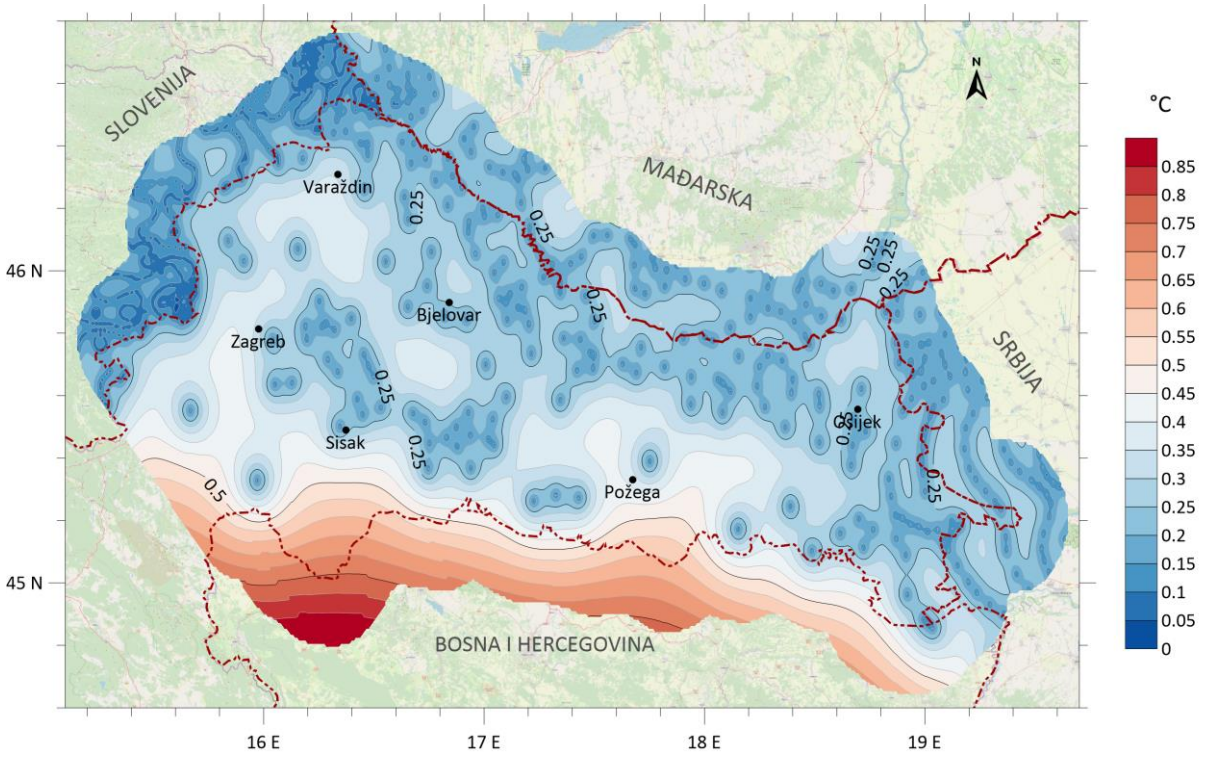
Slika 5.11. *Nova karta geotermalnih gradijenata na području kontinentalne Hrvatske*



Slika 5.12. *Prva geotermalna karta RH na području Panonskog bazena (Jelić et al., 1995)*

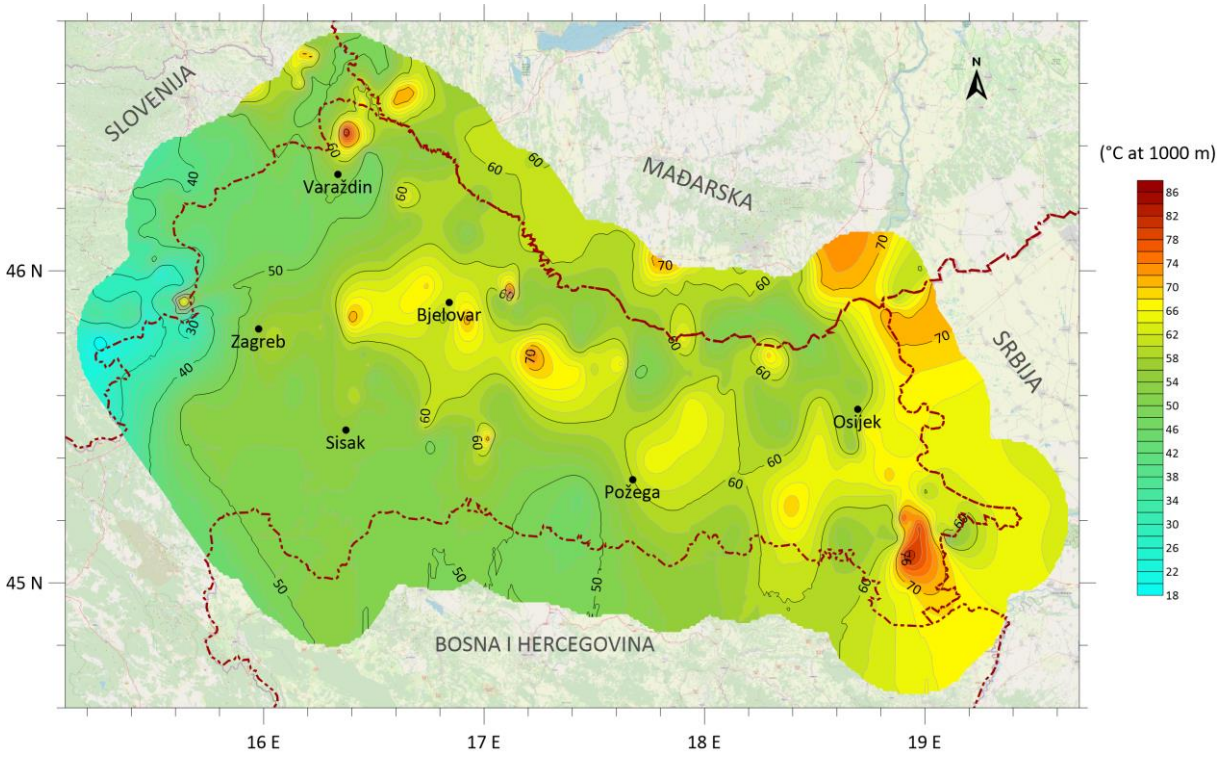
Kako bi se metodom Kriginga što bolje interpolirali podaci u pograničnim područjima, izdvojeni su dostupni podaci o temperaturama, te su izračunati geotermalni gradijenti za susjedne države, Sloveniju, Mađarsku i Srbiju (EGIP GeoZS Geothermal Map, Schellschmidt et al., 2002; Geothermal Atlas of Vojvodina, 2010). Na slici 5.13. prikazana su izračunata standardna odstupanja modela. Vidljivo je da se odstupanja povećavaju prema Bosi i Hercegovini, što je posljedica nedostatka podataka iz tog područja.

Usporedbom nove i prve geotermalne karte Panonskog područja RH može se zaključiti da postoji relativno dobro slaganje, uz relativno mala odstupanja u pojedinim područjima. Povoljne geotermalne karakteristike Panonskog bazena pripisuju se relativno plitkom smještaju Mohorovičićevog diskontinuiteta na oko 30 km dubine (Jelić et al., 1995). Geotermalne anomalije, prisutne na nekoliko lokacija, mogu se pripisati izraženim toplinskim tokovima uslijed konvektivnih strujanja, te su već ta područja prepoznata kao dobre potencijalne lokacije za iskorištavanje geotermalnih resursa, npr. Velika Ciglena, Kutnjak-Lunjkovec, Draškovec i sl.

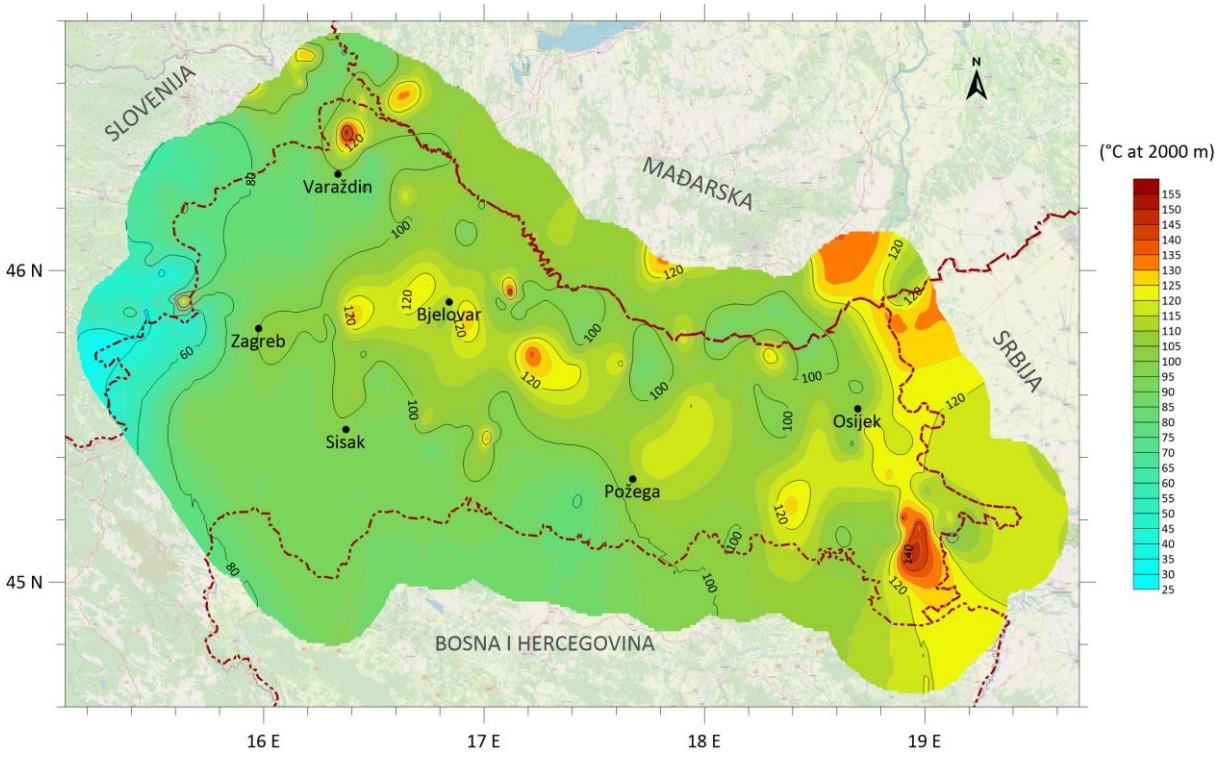


Slika 5.13. *Standardno odstupanje temperatura na 1000 m*

Pomoću dobivenih geotermalnih gradijenata proračunate su vrijednosti temperatura na 1000 i 2000 m dubine, vidljivo na slikama 5.14. i 5.15. Ovakve karte dobre su za inicijalnu procjenu potencijala iskorištavanja geotermalne energije nekog područja. Karta temperatura na dubini od 1000 m izrađena je u svrhu definiranja iskorištavanja geotermalne energije za direktnu upotrebu kod npr. centralnih toplinskih sustava, balneologije, poljoprivrede, industrijskih procesa i sl. Karta temperatura na dubini od 2000 m izrađena je u svrhu definiranja lokacija pogodnih za moguće iskorištavanje geotermalne energije za proizvodnju električne energije.



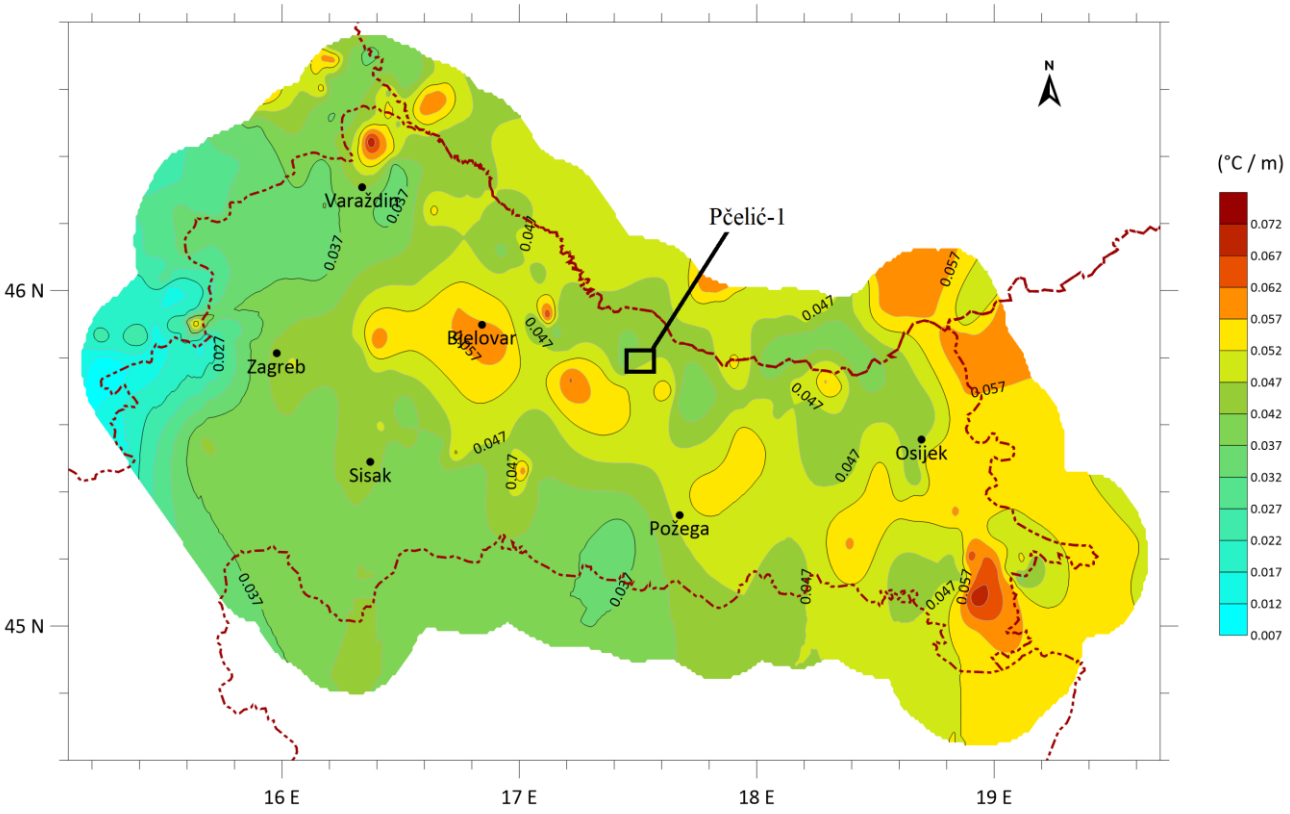
Slika 5.14. *Karta temperatura na 1000 m dubine za područje kontinentalne Hrvatske, na temelju nove karte geotermalnih gradijenata.*



Slika 5.15. *Karta temperatura na 2000 m dubine za područje kontinentalne Hrvatske, na temelju nove karte geotermalnih gradijenata.*

6. POSTUPAK I MODEL REVITALIZACIJE NAPUŠTENIH NAFTNIH I PLINSKIH BUŠOTINA NA PRIMJERU BUŠOTINE PČELIĆ-1 LOCIRANE UNUTAR DRAVSKE DEPRESIJE

Na primjeru jedne bušotine Pčelić-1, locirane unutar Dravske depresije (Slika 6.1.), opisan je postupak revitalizacije napuštenih bušotina, odabir i određivanje potrebnih parametara te određivanje dostupne toplinske energije upotrebom dubokih izmjenjivača topline.



Slika 6.1. *Lokacija bušotine Pčelić-1*

6.1. Tehnički opis postupka revitalizacije bušotina

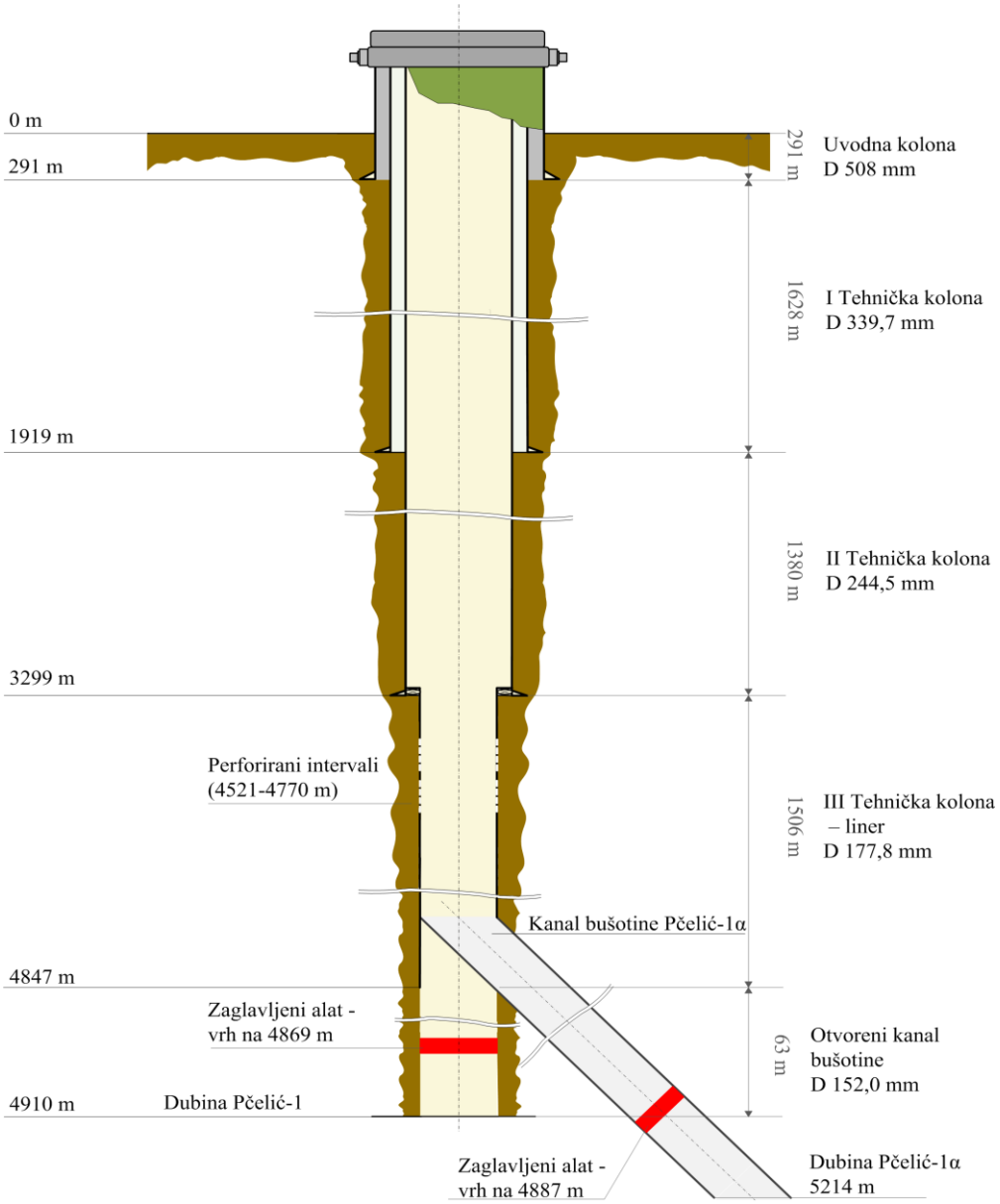
Privremeno napuštene bušotine podrazumijevaju one bušotine koje više ne ispunjavaju svoju svrhu (npr. pridobivanje ležišnog fluida). Privremeno napuštanje bušotina podrazumijeva ugušenje bušotine (ako je pod tlakom) ili ugradnju cementnog (ili mehaničkog) čepa na dno bušotine, da se spriječi komunikacija u oba smjera. Likvidirane bušotine podrazumijevaju one bušotine u kojima je na nekoliko različitih dubina ugrađeno nekoliko cementinih čepova, da se

spriječi pojava komunikacije slojnih fluida, s površinom ili postojećim vodonosnicima, te su im kolone zaštitnih cijevi odrazane na cca 2 m od površine tla. S obzirom na navedeno privremeno napuštene bušotine mogu biti potencijalni kandidati za revitalizaciju, ne i likvidirane. Revitalizacija privremeno napuštenih naftnih i plinskih bušotina za korištenje izmjenjivača topline sastoji se od nekoliko koraka. Nakon odabira bušotine, potrebno je odrediti njezine konstrukcijske parametre, prvenstveno promjere i dubine ugradnje pojedinih nizova zaštitnih cijevi. Potom se izvode remontni radovi na odabranoj bušotini. U bušotinu se spušta radni niz kojim se obavlja cirkulacija fluida, postavljanje čepova te čišćenje proizvodne kolone zaštitnih cijevi. Za bušotinski izmjenjivač odabrana je ugradnja pakera na dnu, kako bi se bušotina zatvorila i izolirala od eventualnog pritoka fluida iz slojeva i istjecanja radnog fluida iz bušotine. Nakon toga potrebno je iscrpiti eventualni zaostali ležišni fluid, očistiti zaštitne kolone od eventualnih nečistoća (npr. kamenac i sl.) te se provodi provjera mehaničkog i hidrauličkog integriteta kanala bušotine. Nakon toga pristupa se ugradnji savitljivog tubinga ili tubinga (kolona uzlaznih cijevi) koji je, iako zatvoren na dnu, perforiran čime je omogućen nesmetani protok. Ugradnja tubinga zatvorenog na dnu odabrana je kao povoljniji konstrukcijski segment u ovom slučaju, s obzirom da bi ugradnjom cirkulacijske alatke došlo do još većeg pada tlaka, što s hidrauličkog stanovišta nije povoljna opcija. Odabir načina na koji će se izvesti pojedina ugradnja dubokog izmjenjivača topline zavisi od pojedine bušotine i njenih konstrukcijskih karakteristika. Ukoliko hidraulički proračun pokaže da je protočna površina adekvatna (npr. pri manjim dubinama) moguća je upotreba cirkulacijske alatke umjesto ugrađivanja tubinga zatvorenog na dnu.

Kolone zaštitnih cijevi predstavljaju vanjsku cijev, dok (savitljivi) tubing predstavlja unutarnju cijev dubokog koaksijalnog bušotinskog izmjenjivača topline. Najčešća primjena u naftnoj industriji za savitljivi tubing je kao radni niz, kojim se obavljaju radovi na održavanju bušotina (npr. ispiranje, dobušivanje i sl.), a koristi se i kao proizvodna, uzlazna kolona. Na tržištu je dostupan najviše do 0,127 m (5“) vanjskog promjera. Za projekte relativno plićih naftnih i plinskih bušotina, do otprilike 2000 m, korištenje ovakve uzlazne kolone je optimalno sa stanovišta pada tlaka i nužnog protoka, no za projekte većih dubine (>2000m) nužno je razmotriti i korištenje klasičnih navojnih kolona do 0,152 m (6“) čiji unutrašnji promjer je drugačiji nego kod savitljivog tubinga. Razlog razmatranja ovakve primjene jest u činjenici da se pri cirkulaciji fluida u koaksijalnom sustavu veći dio pada tlaka odnosi na unutrašnju cijev. Kako bi se pad tlaka sveo na najmanju moguću mjeru, radi uštede energije za pogon cirkulacijske pumpe i investicijskih troškova, potrebno je napraviti analizu jediničnog pada tlaka za različite kombinacije promjera unutrašnje cijevi i zaštitne kolone kao vanjske cijevi.

Općenito, karakteristike bušotina, odnosno njene konstrukcijske značajke, mogu se pronaći u bušotinskim dnevnicima ili završnim izvještajima.

Prema izvještaju Rezultata geološkog praćenja (INA-Naftaplin, 1990) tijekom izrade, bušotina Pčelić-1 je završena 1989. godine. Završna dubina glavnog kanala iznosi 4915 m. Bušotina je opremljena sljedećim kolonama zaštitnih cijevi: uvodna (duljine 291 m, nominalnog vanjskog promjera 0,508 m), I. tehnička (duljine 1919 m, nominalnog vanjskog promjera 0,3397 m), II. tehnička (duljine 3299 m, nominalnog vanjskog promjera 0,2445 m) i lajner (engl. *liner*) (duljine 1506 m, nominalnog vanjskog promjera 0,1778 m). Otvoreni kanal bušotine izrađen je od 4847 do 4910 m(duljina 63 m, promjer 0,152 m). Na dubini od 4910 m došlo je do loma i zaglave alata tijekom bušenja, te se nakon pokušaja oslobađanja zaglavljenog alata pristupilo izradi novog kanala bušotine iznad cementnog čepa, Pčelić-1α. Bušenje novog kanala bušotine obustavljeno je na dubini od 5214 m. Iako je ispitivanje oba kanala pokazalo da raskriveni slojevi imaju dobru propusnost, testiranjem se utvrdila zasićenost slojnom vodom, ali ne i ugljikovodicima. Zbog toga se odustalo od izrade još jednog kanala bušotine, Pčelić-1β, nakon čega je bušotina primijenila status iz istraživačke u utisnu, a kasnije je i napuštena (INA d.d., 1999). Perforacije u kanalu Pčelić-1 nalaze se na intervalu od 4519 do 4772 m. Tijekom testiranja bušotine izmjerena je temperatura DST-om od 206,2 °C na dubini od 4772 m. Uzevši u obzir izmjerenu temperaturu na toj dubini i poznajući vrijednost srednje godišnje temperature na površini, može se zaključiti da geotermalni gradijent, pod pretpostavkom linearne distribucije, iznosi 0,041 °C/m. Na slici 6.2. prikazan je presjek profila bušotine Pčelić-1 i Pčelić-1α zajedno s odgovarajućim geometrijskim parametrima.



Slika 6.2. *Prikaz stanja nakon izvedbe bušotine Pčelić-1 i 1α (nije u mjerilu)*

Za postupak revitalizacije potrebno je utvrditi dubine ugradnje posljednje kolone zaštitnih cijevi da bi se utvrdila dubina ugradnje pakera te bušotinskog izmjenjivača topline, odnosno njegove unutarnje cijevi. S obzirom na dubinu otvorenog intervala, pretpostavljena je ugradnja pakera na 4500 m, čime je bušotina zatvorena i izolirana od okolnih stijena. Nakon toga slijedi uklanjanje zaostalih fluida, provjera stanja zaštitnih cijevi, njihovo čišćenje te ugradnja unutarnje cijevi ili tubinga. Kako je Pčelić-1 izrazito duboka bušotina, promjeri zaštitnih cijevi su različiti u sekcijama 0-3299 m i od 3299-4500 m. Shodno tome, odabrana je opcija ugradnje tubinga različitih promjera za prvi i drugi segment (korištenjem redukcijske spojnice), kako je navedeno u tablici 6.1. i prikazano na slici 6.3. S obzirom na odabranu metodu

izolacije vakuumom, potrebna je ugradnja još jednog seta cijevi promjera nešto većeg od odabranog promjera tubinga (u tablici 6.1. navedeno kao tubing - izolacija).

Tablica 6.1. Parametri dubokog izmjenjivača topline bušotine Pčelić-1

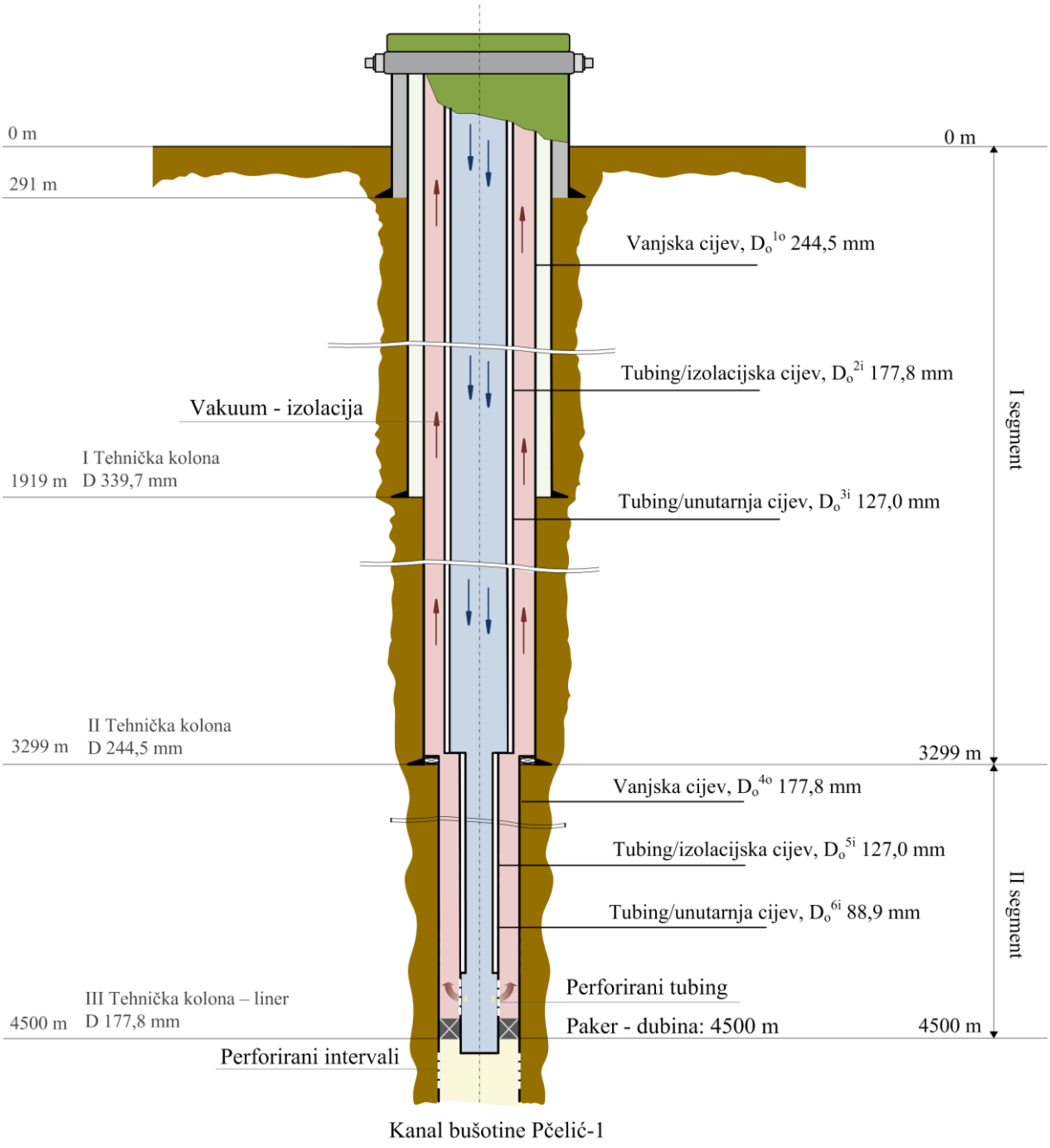
Parametri bušotine		Vrijednost	Mj. jedinica
II tehnička kolona (0-3299 m)	D_o^{1o}	244,5	mm
II tehnička kolona (0-3299 m)	D_i^{1o}	216,0	mm
Tubing – izolacija (II teh.kol.) (0-3299 m)*	D_o^{2i}	177,8	mm
Tubing – izolacija (II teh.kol.) (0-3299 m)*	D_i^{2i}	152,0	mm
Tubing (II teh. kol.) (0-3299 m)	D_o^{3i}	127,0	mm
Tubing (II teh. kol.) (0-3299 m)	D_i^{3i}	116,0	mm
III tehnička kolona (3299-4500)	D_o^{4o}	177,8	mm
III tehnička kolona (3299-4500)	D_i^{4o}	152,0	mm
Tubing – izolacija (III teh.kol.) (3299-4500 m)*	D_o^{5i}	127,0	mm
Tubing – izolacija (III teh.kol.) (3299-4500 m)*	D_i^{5i}	116,0	mm
Tubing (III teh. kol.) (3299-4500 m)	D_o^{6i}	88,9	mm
Tubing (III teh. kol.) (3299-4500 m)	D_i^{6i}	79,8	mm
Dubina izmjenjivača	H	4500,0	m
Toplinska vodljivost cementa	λ_c	2,30	W/m °C

**izolacija se ostvaruje vakuumom između cijevi tubing-izolacija i tubing, za određeni segment*

Odabrani smjer protoka je utiskivanje pothlađenog fluida kroz unutarnju cijev, tj. tubing, dok se zagrijani fluid vraća na površinu kroz prstenasti prostor bušotinskog izmjenjivača topline. Na taj način omogućen je maksimalni prijelaz toplinske energije na samom dnu izmjenjivača (najviša vrijednost temperature i toplinskog toka). Također, ako se primjene rezultati istraživanja izolacije tubinga (Morita et al., 1985; Morita et al., 1992; Kujawa et al., 2006; Davis i Michaelides, 2009; Cheng et al., 2014a; Ghoreishi-Madiseh et al., 2014), moguće je gubitak topline sa zagrijanog fluida u prstenastom prostoru na pothlađeni fluid u tubingu svesti na minimum. Za rad eksperimentalnog dubokog izmjenjivača na bušotini HGP-A ugrađen je izolirani tubing ekvivalentne toplinske vodljivosti od 0,06 W/m°C (Morita et al., 1985). Za potrebe dubokog izmjenjivača u Weggisu, pomoću vakuum pumpe ostvarena je ekvivalentna toplinska vodljivost tubinga od 0,09 W/m°C (Kohl et al., 2002). Najniža vrijednost za vakuum izolirane cijevi je 0,01 W/m°C, dok se 0,1 W/m°C smatra dobrom

izolacijom (Śliwa et al., 2017), što predstavlja i vrijednost usvojenu za analizu slučaja Pčelić-1., kao i metodu izolacije vakuumom.

Slika 6.3. prikazuje stanje bušotine Pčelić-1 nakon izvedbe koaksijalnog izmjenjivača topline uz označen smjer protoka pothlađenog i zagrijanog radnog fluida. Radni fluid koji je izabran za ovu analizu slučaja je voda, s parametrima gustoće, viskoznosti, toplinske vodljivosti i specifične topline pri standardnim uvjetima.



Slika 6.3. *Prikaz stanja nakon izvedbe bušotinskog izmjenjivača s vakuum izolacijom na bušotini Pčelić-1 (nije u mjerilu)*

Unos parametara u programski paket GHX ograničen je na po jednu vrijednost promjera vanjske i unutarnje cijevi bušotinskog izmjenjivača. Kako je Pčelić-1 podijeljena u dvije sekcije, svaka s različitim promjerima vanjskih i unutarnjih cijevi, za potrebe proračuna izračunati su njihove ponderirane aritmetičke sredine u odnosu na duljinu sekcija te su vrijednosti dane u Tablici 6.2.

Tablica 6.2. Vrijednosti parametara bušotinskog izmjenjivača s izoliranim tubinogm, u vrijednosti težinskog prosjeka

Parametri bušotine		Vrijednost	Mj. jedinica
Vanjski promjer – vanjska cijev (tež. prosjek)	D_o^o	226,7	mm
Unutarnji promjer – vanjska cijev (tež. prosjek)	D_o^i	198,2	mm
Vanjski promjer – unutarnja cijev* (tež. prosjek)	D_i^i	146,2	mm
Unutarnji promjer – unutarnja cijev (tež. prosjek)	D_i^o	116,3	mm
Promjer bušotine (tež. prosjek)	D_b	250,0	mm

*vanjska cijev za izolaciju

6.2. Geološke značajke i termogeološki parametri na lokaciji bušotine Pčelić-1

Istražna bušotina Pčelić-1 smještena je na području Dravske depresije, u blizini Virovitice. Geološke interpretacije Dravske depresije pokazale su da neogenske i kvartarne naslage mogu doseći dubine i do 7000 m (Saftić et al., 2003). Prema dnevniku bušenja i geološkom izvješću za navedenu lokaciju, dostupno iz arhiva bušotina, utvrđene su Lonja, Bilogorska, Kloštar Ivanić, Ivanić Grad i Moslavačka Gora formacije (INA-Naftaplin, 1990). U Tablici 6.3. dan je sažeti litostratigrafski opis za Pčelić-1.

Tablica 6.3. Litostratigrafski opis bušotine Pčelić-1 (INA-Naftaplin, 1990)

Dubina, m	Formacija	Opis
0-339	Lonja	Pjeskovita, plastična glina (do 100%) i krupnozrni, kvarcni šljunak različite granulacije (do 90%). Pojava ugljena.
339-910	Bilogorska	Mekana pjeskovita glina
910-1260	Bilogorska	Laporovita glina (do 100%) i sitnozrni, slabovezani pješčenjak (do 20%)
1260-1582	Bilogorska	Mekani do tvrdi glinoviti lapor (do 90%) i slabo do srednjevezani kvarc tinjčasti pješčenjak (do 80%)
1582-1760	Kloštar Ivanić	Mekani do tvrdi glinoviti lapor (do 90%) i slabo do srednjevezani kvarc tinjčasti pješčenjak (do 80%)
1760-2144	Bilogorska	Mekani do tvrdi glinoviti lapor (do 90%) i slabo do srednjevezani kvarc tinjčasti pješčenjak (do 80%)
2144-2380	Kloštar Ivanić	Srednjetvrdi do tvrdi, mjestimice pjeskoviti lapor s tanjim proslojcima srednjetvrdog kvarc tinjčastog pješčenjaka (do 40%)
2380-3036	Kloštar Ivanić	Sitnozrnati, srednje do slabovezani kvarc tinjčasti pješčenjak (do 90%) i srednjetvrdi do tvrdi, pjeskoviti, mjestimice siltozni lapor (do 80%)
3036-3977	Ivanić Grad	Sitno do krupnozrnati, srednje do dobrovezani kvarc tinjčasti pješčenjak (do 100%) i srednjetvrdi do tvrdi sitnozrnati lapor (do 70%)
3977-4525	Moslavačka Gora	Sitno do srednjezrnati, dobrovezani kvarc tinjčasti pješčenjak (do 90%) i siltozni lapor (do 70%)
4525-4835	Moslavačka Gora	Izmijenjeni bazalt-andezit
4835-4910	Moslavačka Gora	Dolomitne breče

Prema dostupnim podacima o mjerenjima tijekom izrade bušotine, temperatura na 4772 m iznosila je 206,2 C. Uz korištenje srednje temperature zraka za kontinentalnu Hrvatsku od 11,6 °C izračunat je geotermalni gradijent od 0,041°C/m, pomoću kojeg je određena temperatura na svakih 100 m duljine bušotinskog izmjenjivača. Za određivanje ostalih termogeoloških parametara korištene su Jelićeve korelacije (Jelić, 1979). S obzirom da kod određivanja korelacije za toplinsku vodljivost nisu bile korištene relativno plitke bušotine, postoji određena greška u korelaciji. Da bi se donekle korigirala navedena greška,

pretpostavljena je minimalna vrijednost za pliće slojeve od 1,7 W/m °C, što pokazuju vrijednosti mjerenja na plitkim izmjenjivačima topline (Kurevija et al. 2012; Soldo et al., 2016). Nakon toga je određena toplinska vodljivost pomoću korelacija za Dravsku i Savsku depresiju (Jelić, 1979) na dubini od 100 m. Kako su obje vrijednosti manje od pretpostavljenih 1,7 W/m °C, izračunate su razlike izračunatih i pretpostavljene vrijednosti u iznosu od 0,623 W/m °C za Dravsku depresiju i 0,693 W/m °C za Savsku depresiju. Vrijednosti za ostale dubine, u koracima od 100 m, uvećane su za te vrijednosti, zavisno od lokacije. Primjenom ove metode dobivene su realnije vrijednosti promjene toplinske vodljivosti s dubinom. Nakon toga određena je srednja temperatura po dužini bušotine, kao težinski prosjek svih temperatura s obzirom na utjecaj toplinske vodljivosti, do dubine ugradnje izmjenjivača, također u koracima po 100 m. Dobiveni rezultati prikazani su u Tablici 6.4., te su korišteni u daljnjoj analizi kao ulazni parametri bušotine. Navedene korekcije nisu korištene pri inicijalnoj analizi, zbog čega vrijednosti parametara donekle odstupaju od prvotnih.

Tablica 6.4. Termogeološki parametri na lokaciji bušotine Pčelić-1

Termogeološki parametri		Vrijednost	Mj. jedinica
Specifična obujamska toplina (prosjek)	ρc	2437,58	kJ/m^3°C
Toplinska vodljivost (prosjek)	λ_g	2,67	W/m°C
Geotermalni gradijent	g_T	0,041	°C/m
Temperatura, srednja (tež.prosjek)	$T_{tež}$	113,9	°C

6.3.Analiza i rezultati proračuna

Potrebne količine energije, odnosno toplinske potrebe, određuju se prema potrebama korisnika u odnosu na potrebnu temperaturu za određeni stambeni ili radni prostor. Toplinske i rashladne potrebe objekta mogu se proračunati raznim komercijalnim programima u zavisnosti od projektirane temperature, gubitaka koje ostvaruje objekt i dr., prilikom čega je potrebno obratiti pozornost na adekvatno projektiranje u skladu s *Direktivom 2010/31/EU o energetskoj učinkovitosti zgrada* (2010), Zakonom o energetskoj učinkovitosti (NN, 127/14) i *Tehničkim propisom o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama* (NN, 128/15). Sustavi za grijanje koji direktno koriste zagrijani fluid imaju temperaturni raspon između 35 i 60 °C (npr. podno grijanje, ventilokonvektori, niskotemperaturni radijatori i sl.) uz korištenje tehničkih pločatih izmjenjivača kao međusustava za prijenos topline s izvora, tj. bušotinskog izmjenjivača. Za fluide čija temperatura je niža, postoji mogućnost upotrebe dizalice topline za

dodatno povišenje temperature radnog fluida. Također, postoji i mogućnost kaskadnog iskorištavanja toplinske energije. U ovisnosti o potrebama korisnika, toplinska opterećenja mogu se okarakterizirati kao konstantna i varijabilna. Pri tome su konstanta toplinska opterećenja karakterizirana kao konstantno korištenje toplinske energije kroz godinu u jednakom iznosu. Primjena se može naći u industriji, npr. za potrebe procesa sušenja, u akvakulturi, balneologiji, u staklenicima i sl. Ovakvi procesi u praksi nisu česti te je mogućnost korištenja konstantnog opterećenja rjeđa. Varijabilna opterećenja zavise primarno od klimatskih uvjeta lokacije koji se javljaju kroz godinu, te su s obzirom na to promjenjiva. Na području Panonskog dijela RH, u praksi je uobičajeno razdoblje korištenja toplinske energije za potrebe grijanja od rujna do svibnja, pod toplinskim opterećenjima u zavisnosti od vanjske temperature. Ovakva vrsta potrebe za toplinskom energije veže se uz direktno grijanje nekog prostora, najčešće stambenog ili poslovnog i uz neke industrijske procese, poput uzgoja raznih kultura u staklenicima, akvakulture i sl.

6.3.1. Rezultati analitičke metode

Inicijalno istraživanje revitalizacije napuštenih bušotina pokazalo je određeni potencijal iskorištavanja toplinske energije korištenjem dubokih izmjenjivača (Macenić i Kurevija, 2018). Navedena analiza pokazala je mogućnost iskorištavanja od 200 do 400 kW_t u režimu konstantnog opterećenja kroz cijelu godinu, u rasponu četiri različite vrijednosti protoka od 5 do 12,5 l/s. Kada se govori o iskorištavanju toplinske energije, ono će zavisiti od sustava grijanja koji je instaliran u objekt od interesa. S obzirom na regulative koje propisuju korištenje niskoenergetskih sustava i njihove karakteristike, uobičajeno je korištenje tri temperaturna režima ili razreda (Banks, 2012):

a. 45-55 °C (do 60°C) kod upotrebe niskotemperatunih radijatora
b. 30-45°C kod upotrebe sustava podnog grijanja
c. 25-30°C kod upotrebe ventilokonvektora.

Rezultati temperaturnog odaiva s navedenim opterećenjima i protocima ukazuju na mogućnost direktnog iskorištavanja upotrebom pločastih izmjenjivača topline, za temperaturne razrede iznad 35 °C (ventilokonvektori, podno grijanje, niskotemperaturni radijatori) kao i korištenje dizalica topline za temperaturne odazive do 10 °C. Za varijabilna opterećenja vrijednosti dostupne toplinske energije kretale su se u rasponu od 280 MWh_t, za slučaj iskorištavanja pod pretpostavkom najvišeg temperaturnog razreda (60 °C) i najnižeg protoka od 5 l/s, pa sve do 1750 MWh_t, pod pretpostavkom najnižeg temperaturnog razreda (10 °C) i

najviše vrijednosti protoka od 12,5 l/s (Macenić i Kurevija, 2018). Kako je za potrebe proračuna pretpostavljeno da unutarnja cijev izmjenjivača nije izolirana, dolazi do značajne izmjene topline između toplijeg fluida u vanjskom kanalu i hladnijeg fluida u unutarnjom kanalu protjecanja, čime se dio toplinske energije gubi. Navedene vrijednosti se stoga mogu smatrati konzervativnim procjenama. Slijedom toga, pristupilo se daljnjem modeliranju uz pretpostavku izoliranosti unutarnje cijevi, tj. tubinga, preko parametra toplinske vodljivosti u iznosu od 0,1 W/m °C. Rezultati su pokazali da je izolacijom tubinga moguće pridobiti veće količine energije od onih dobivenih inicijalnom analizom za neizolirani tubing. Zbog toga su prilagođene i vrijednosti pretpostavljenih protoka, s obzirom na povećanje dostupne toplinske energije uslijed manjih bušotinskih otpora zbog izolacije tubinga, te su promatrani temperaturni odazivi za 10, 20 i 30 l/s. Za modeliranje je korišten programski paket GHX 2016, kojeg je razvio Chiasson (2016), a koji se temelji na primjeni Eskilsonovog modela prijelaza toplinske energije između stijene i bušotinskog izmjenjivača pomoću g-funkcija, odnosno FLS model. U oba slučaja toplinskih opterećenja, konstantnog i varijabilnog, pretpostavljeno vrijeme rada sustava iznosi 20 godina, što je uobičajena praksa kod projektiranja realnih sustava.

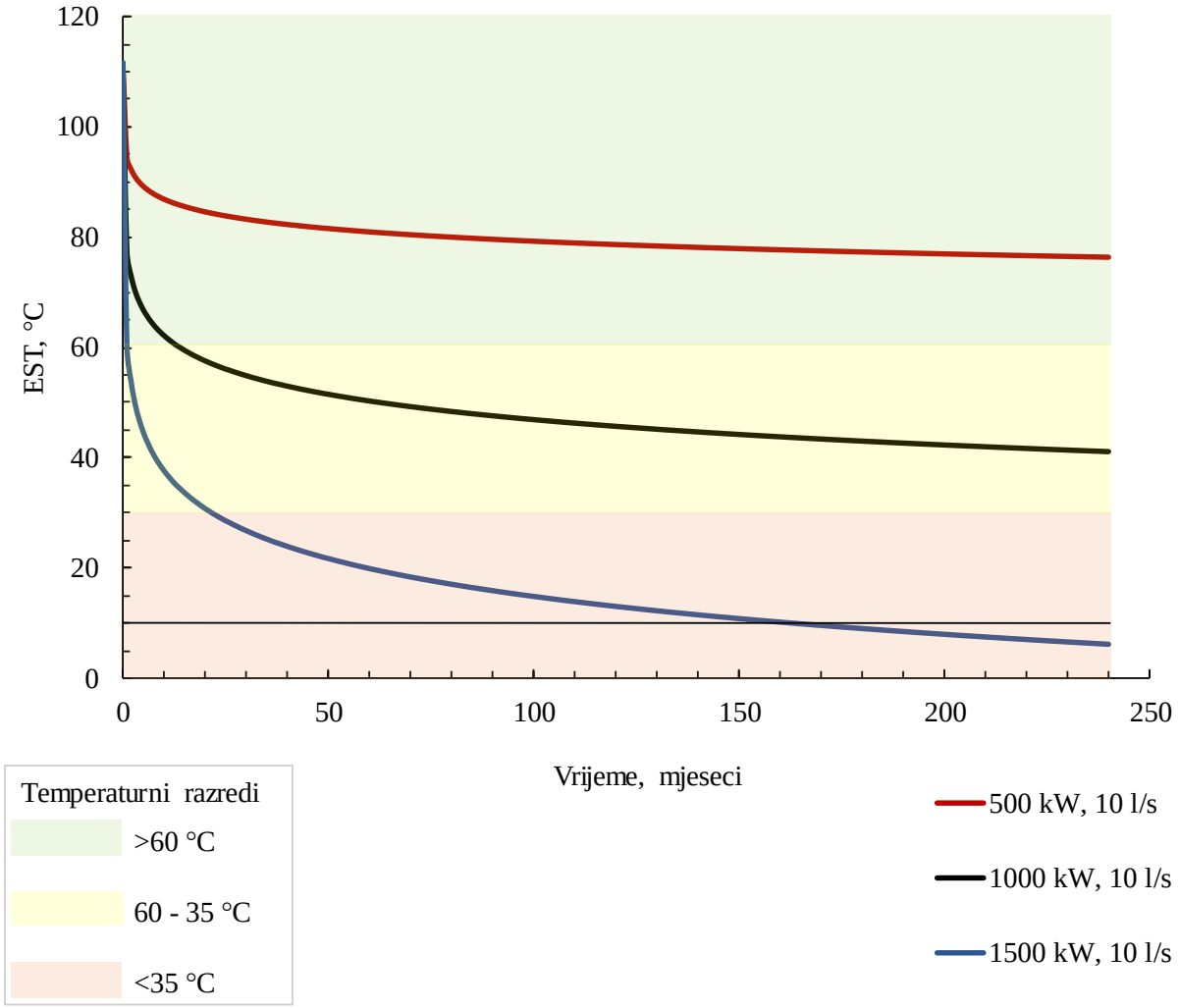
6.3.1.1. Modeliranje sustava s konstantnim toplinskim opterećenjem

Za slučaj konstantnog toplinskog opterećenja sustava bila su zadana tri različita toplinska opterećenja od 500, 1000 i 1500 kW. Rezultati proračuna u GHX programskom paketu prikazani su na slikama 6.4.-6.6. Kao i u prvotnoj analizi, na temelju mogućnosti površinskih sustava za grijanje i odgovarajućih temperaturnih režima pri kojima se koriste, određena su tri temperaturna razreda: iznad 60 °C za niskotemperaturne radijatore (zeleno područje), 35-60 °C za ventilokonvektore i podno grijanje (žuto područje) i manje od 35 °C kod korištenja dizalice topline (crveno područje). S obzirom da je kao radni fluid u bušotinskom izmjenjivaču određena voda, nije poželjno da se temperatura fluida snizi do 0 °C, čime bi došlo do smrzavanja radnog medija. Zbog toga je kao minimalna granica određena temperatura od 10 °C. U slučaju odabira drugog radnog medija, poput smjese glikola i vode, donja temperaturna granica mogla bi biti niža. Ovaj slučaj nije razmatran s obzirom na to da bi korištenje smjese vode i glikola povisilo troškove revitalizacije. Kako je program temeljen na analitičkom rješenju jednadžbe toplinske difuzije, vrijednosti temperaturnog odziva na strani bušotinskog izmjenjivača su prosječne vrijednosti temperature fluida u izmjenjivaču, a ne izlazne i ulazne vrijednosti na ušću. Međutim, koristeći opće poznatu relaciju za određivanje toplinske snage:

$$Q = \dot{m} \times c_p \times \left(T_{in} - T_{out}\right) \quad (6\text{-}1)$$

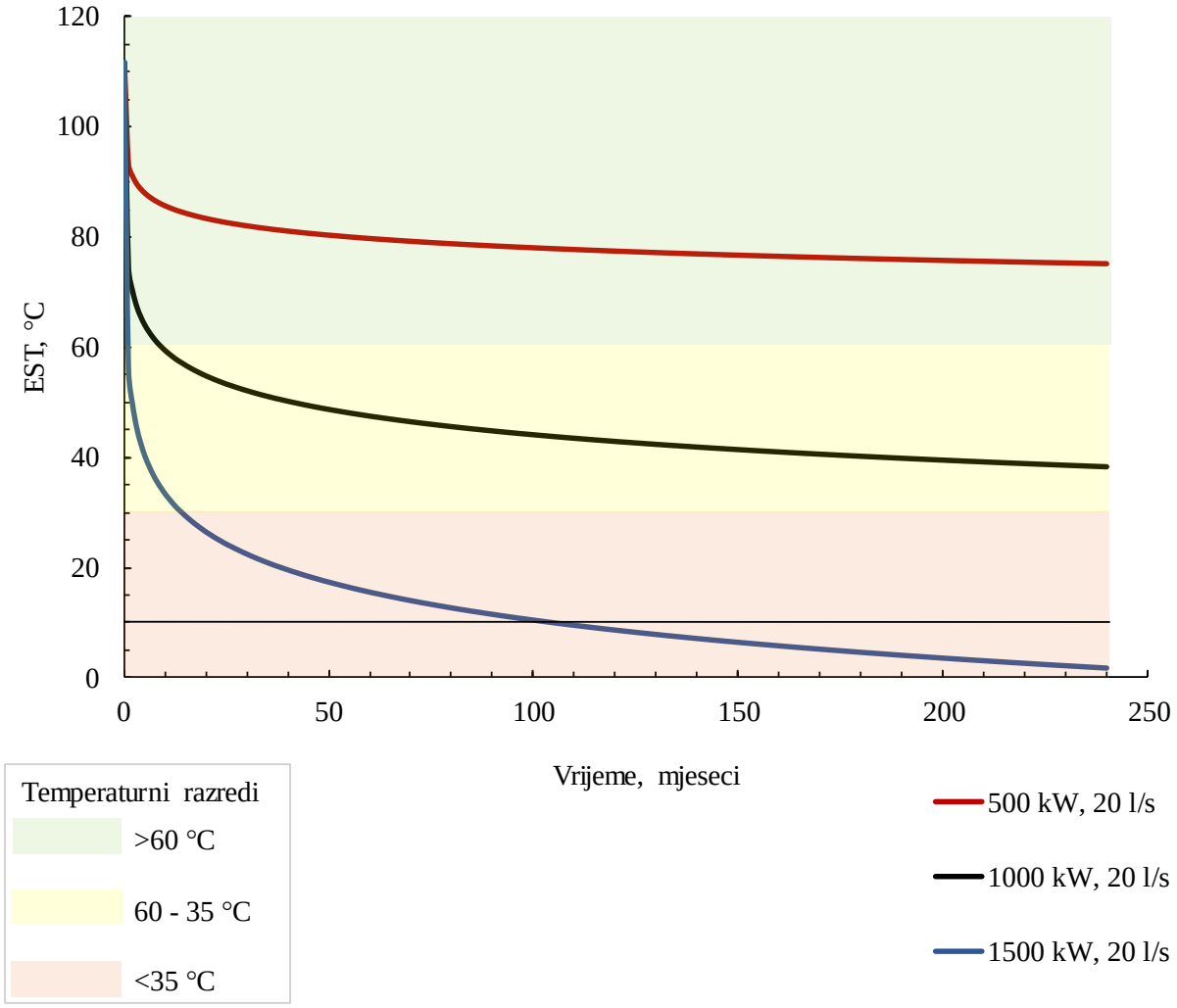
gdje Q predstavlja toplinsku snagu (kW_t) dobivenu radom bušotinskog izmjenjivača, $\dot{m}$ maseni protok radnog fluida (kg/s), c_p specifični toplinski kapacitet radnog fluida (kJ/kg°C), T_{in} (engl. *entering source temperature, EST*) temperaturu radnog fluida na ulazu u pločasti izmjenjivač ili dizalicu topline (°C) te T_{out} (engl. *leaving source temperature, LST*) temperaturu radnog fluida na izlazu iz pločastog izmjenjivača ili dizalice topline (°C). Relacija za izračun prosječne temperature fluida, T_f (°C) također je poznata:

$$T_f = \frac{T_{in} - T_{out}}{2} \quad (6\text{-}2)$$



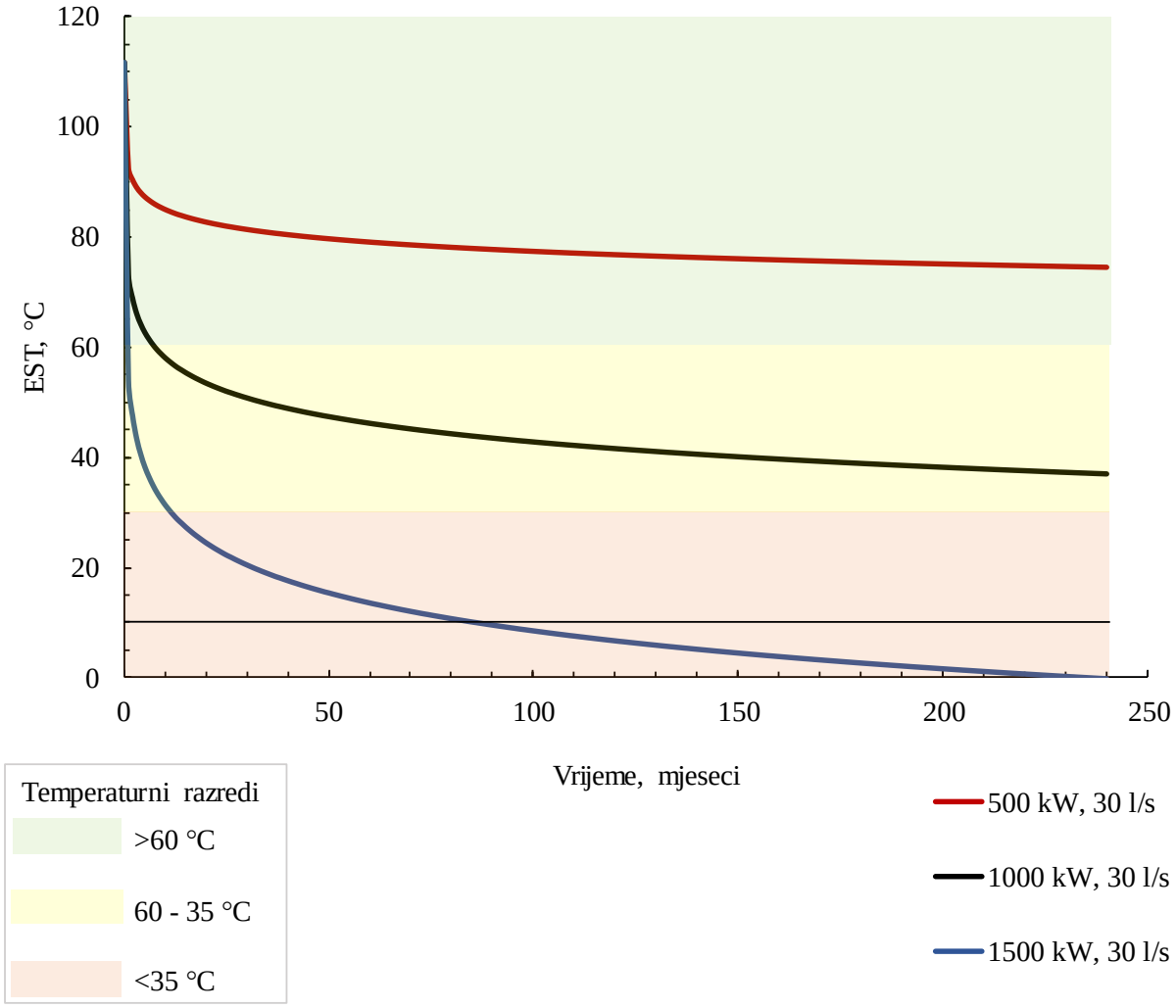
Slika 6.4. *Vrijednosti temperature na izlazu iz bušotinskog izmjenjivača (EST) za različita opterećenja pri protoku od 10 l/s na bušotini Pčelić-1*

Iz dijagrama na slici 6.4. vidljivo je da je najviša ostvarena temperatura za slučaj najmanjeg toplinskog opterećenja (500 kW_t), te da je u tom slučaju pad temperature kroz 20 godina rada sustava najmanji, u odnosu na veća toplinska opterećenja. Odnosno, može se zaključiti da je gotovo postignuto ustaljeno stanje prijelaza toplinske energije tijekom predviđenog koninuiranog iskorištavanja. Navedenim opterećenjem ostvaren je uvjet za najviši temperaturni razred (>60 °C), tijekom čitavog vremena korištenja, čime se može zaključiti da bi sustav direktno isporučivao potrebnu temperaturu fluida od 60°C na izmjenjivač. Toplinsko opterećenje od 1000 kW_t zadovoljava uvjet srednjeg temperaturnog razreda (60-35 °C), odnosno temperaturni odaziv na strani zagrijanog fluida iz bušotinskog izmjenjivača (EST) pokazuje da bi se EST održavao konstatnim iznad 35 °C. Najveći pad temperature primijeti se kod najvećeg pretpostavljenog opterećenja od 1500 kW_t. Također je vidljivo da minimalni uvjet od 10 °C nije zadovoljen kroz čitavih 20 godina rada sustava, odnosno nakon oko 13 godina rada sustava EST će pasti ispod dozvoljenih 10 °C. Međutim, kako temperaturni odziv ne pada ispod 0 °C, pretpostavljeno toplinsko opterećenje bi bilo ostvarivo dodavanjem glikola, čime bi se poboljšale karakteristike radnog fluida ili određenim smanjenjem toplinskog opterećenja. Smanjenje toplinskog opterećenja u ovom slučaju ne bi bilo značajno da se zadovolji uvjet EST≥10°C kod nižeg temperaturnog razreda.



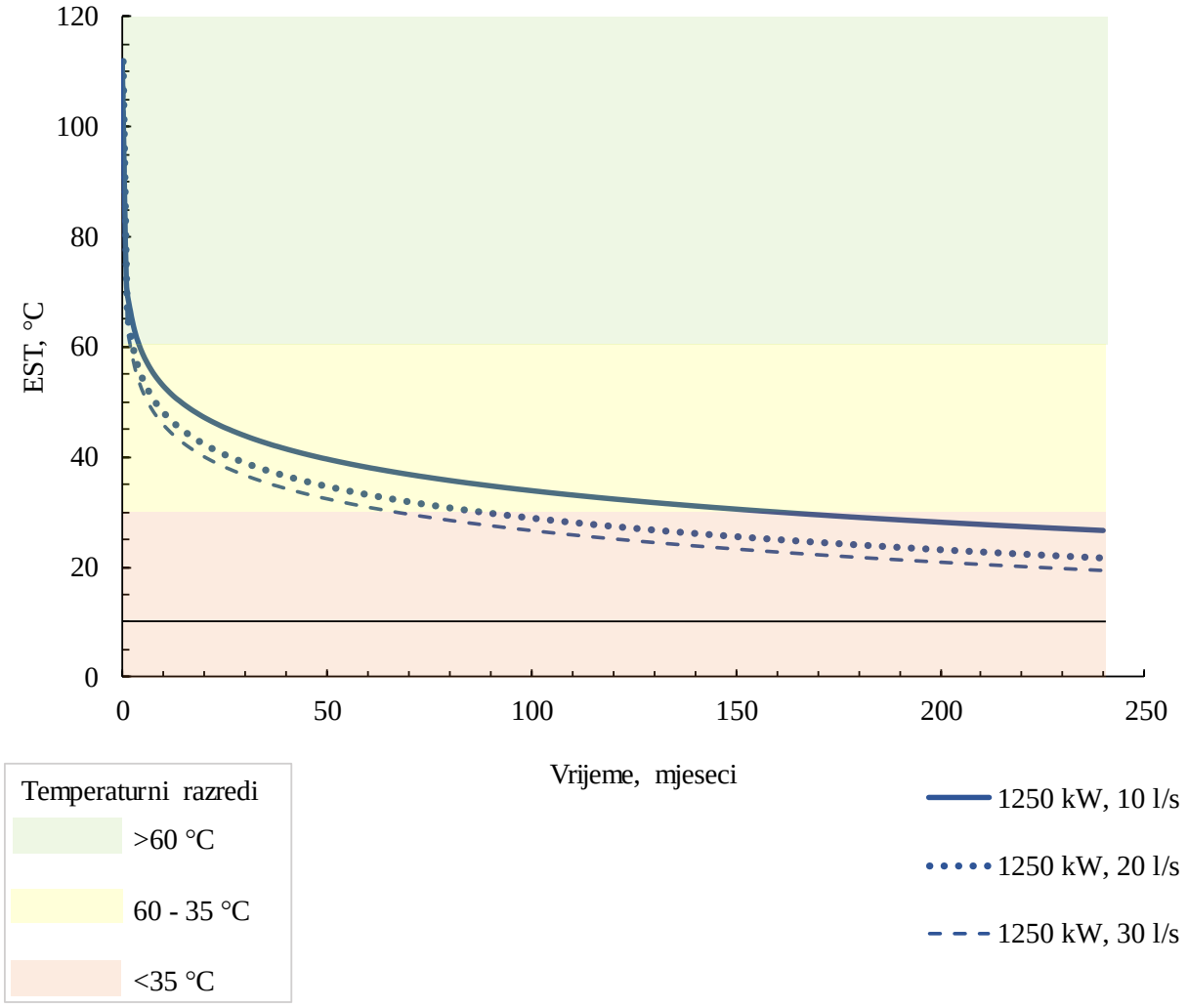
Slika 6.5. *Vrijednosti temperature na izlazu iz bušotinskog izmjenjivača (EST) za različita opterećenja pri protoku od 20 l/s na bušotini Pčelić-1*

Kao u i prethodnom slučaju, iz dijagrama na slici 6.5. vidljivo je da je najviša ostvarena temperatura za slučaj najmanjeg toplinskog opterećenja (500 kW_t) i pri provećanju protoka na 20 l/s te da je unutar 20 godina gotovo postignuto ustaljeno stanje prijelaza toplinske energije. Dvostrukim povećanjem toplinskog opterećenja pri navedenom povećanom protoku vidljivo je da se temperaturni odziv nalazi unutar granica srednjeg teperaturnog režima. Pri najvećem toplinskom opterećenju od 1500 kW_t, kao i za manji protok, temperaturni odaziv pokazuje pad temperature ispod minimalne vrijednosti od EST 10 °C. Kod protoka od 20 l/s vremenski raspon unutar kojeg se temperaturni odaziv zadržava iznad 10 °C iznosi oko 9 godina.



***Slika 6.6**. Vrijednosti temperature na izlazu iz bušotinskog izmjenjivača (EST) za različita opterećenja pri protoku od 30 l/s na bušotini Pčelić-1*

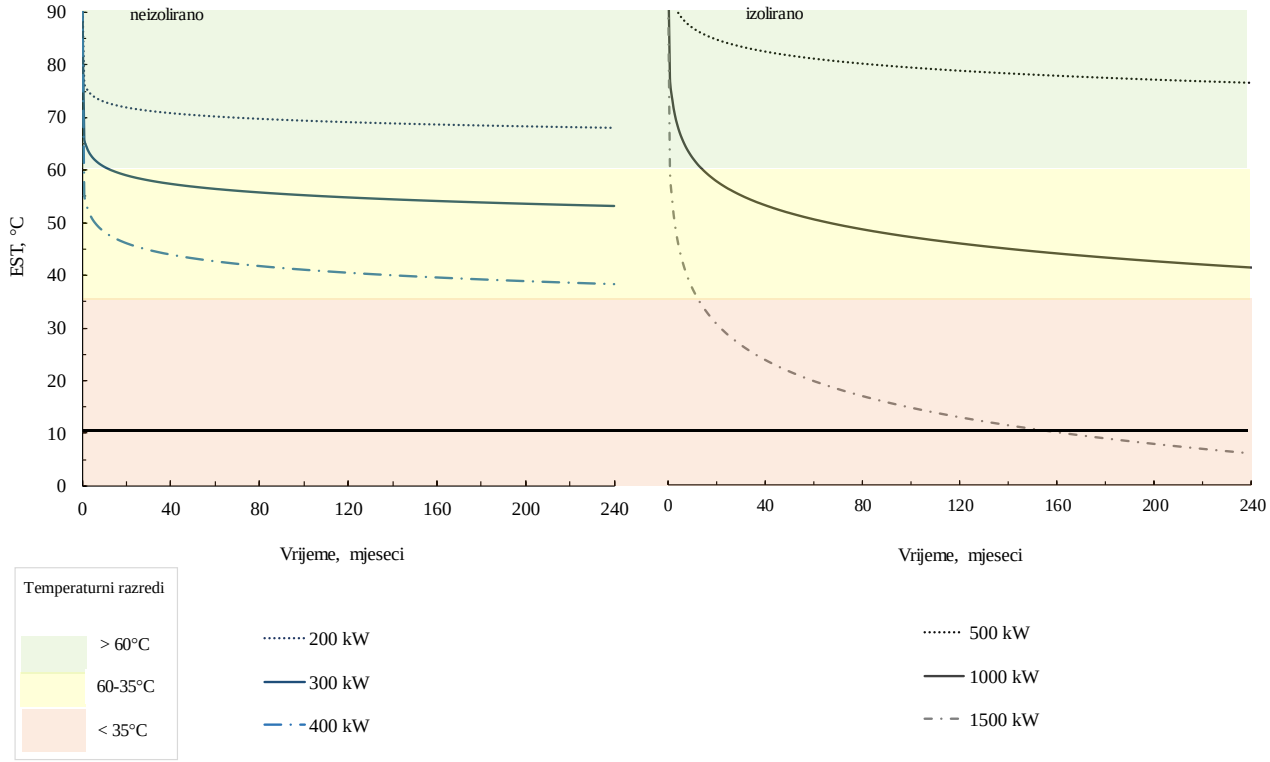
Na slici 6.6. prikazani su rezultati temperaturnih odziva pri dodatnom povećanju vrijednosti protoka na 30 l/s. U usporedbi s prethodnim rezultatima za opterećenja od 500 i 1000 kW_t vidljivo je da su profili temperaturnih odaziva slični, te su zadržani u najvišem i srednjem temperaturnom razredu. Kod najvećeg toplinskog opterećenja vremesnki raspon u kojem se EST nalazi iznad 10 °C ograničen je na oko 7 godina.Iz dijagrama je vidljivo da uvjet od 1500 kW_t toplinskog opterećenja, za bilo koji od pretpostavljenih protoka nije zadovoljio uvjet minimalne temperature fluida na izlazu iz bušotinskog izmjenjivača (EST) od 10 °C, te da se povećanjem protoka vremenski raspon u kojem se ostvaruje zadani EST smanjuje. U slučaju smanjenja toplinskog opterećenja od 1500 kW_t na 1250 kW_t, za sva tri uvjeta protoka fluida, vidljivo je da je uvjet minimalne temperature od 10°C zadovoljen (Slika 6.7.). Prema tome, jedna od mogućnosti ispunjenja uvjeta temperaturnog razreda svakako je podešavanjem narinute toplinske snage.



***Slika 6.7**. Vrijednosti temperature na izlazu iz bušotinskog izmjenjivača (EST) za toplinsko opterećenje od 1250 kW$_t$ pri različitim protocima (10, 20 i 30 l/s) na bušotini Pčelić-1*

U usporedbi s rezultatima simulacije u slučaju kada je pretpostavljeno da tubing nije izoliran vidljiva je razlika u dostupnoj količini energije i temperaturnim odzivima. Za primjer su uspoređeni rezultati kod protoka od 10 l/s i prikazani na slici 6.8. Tako su rezultati analize kod neizoliranog tubinga pokazali da je moguće iskorištavanje od 200 kW$_t$ u prvom temperaturnom razredu, direktnim korištenjem pomoću niskotemperaturnih radijatora, dok je 300 i 400 kW$_t$ moguće pridobiti u slučaju korištenja sustava ventilokonvektora ili podnog grijanja, tj. u drugom temperaturnom režimu. Svakako je moguća i upotreba korištenjem dizalica topline, te bi u tom slučaju dostupna toplinska snaga bila i veća od 400 kW$_t$. U slučaju kod izolacije tubinga, vidljivo je da je moguće ostvariti više toplinske vrijednosti i to od 500 kW$_t$, u prvom temperaturnom režimu, uz više vrijednosti temperaturnog odaziva. Za sustave u drugom razredu temperaturnih režima moguće je ostvariti oko 1000 kW$_t$, dok je u slučaju korištenja dizalica toplina moguće ostvariti nešto manje od 1500 kW$_t$, s obzirom da pri 1500

kW_t dolazi do temperaturnog odaziva ispod predviđenih EST 10°C između 10. i 20. godine rada izmjenjivača.

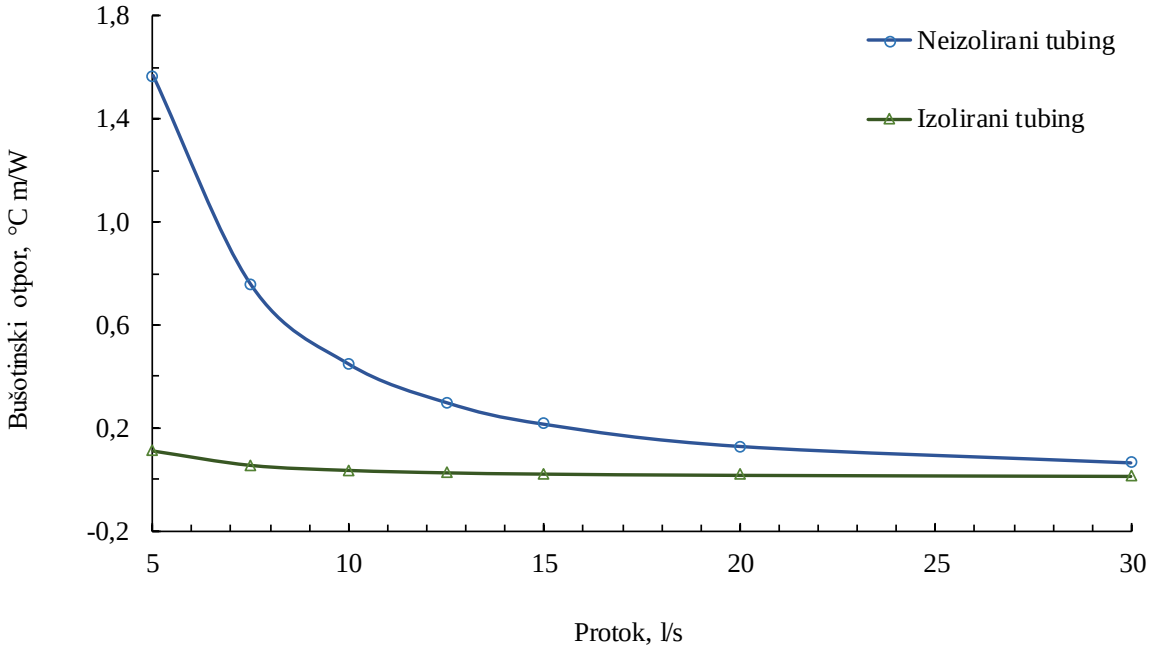


Slika 6.8. *Usporedba temperaturnog odaziva bušotinskog koaksijalnog izmjenjivača pri protoku od 10 l/s, za slučaj neizoliranog i izoliranog tubinga*

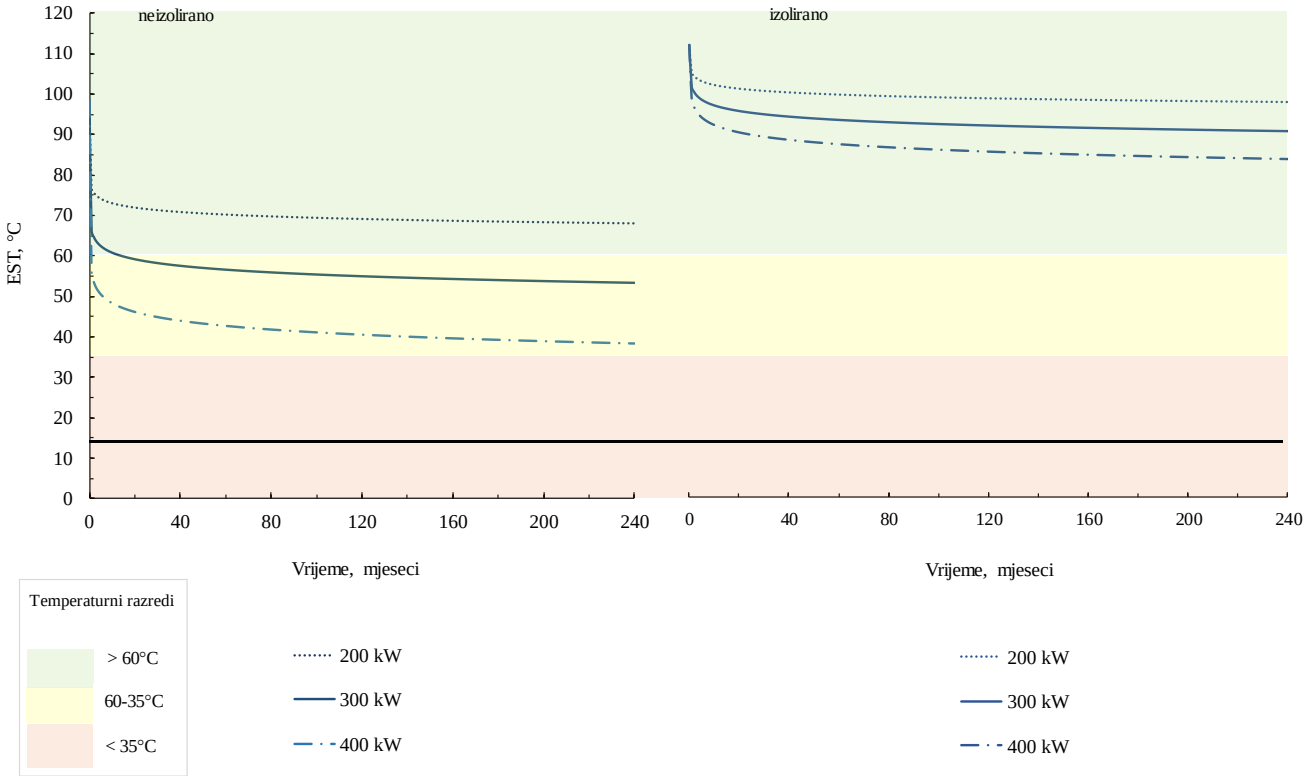
Iz dijagrama je također vidljivo da se ustaljeno stanje prijelaza toplinske energije prije postiže kod nižih vrijednosti toplinskih opterećenja, za razliku od viših vrijednosti. Posebno je izraženo to kod najvišeg opterećenja od 1500 kW_t, gdje je uspostavljeno poluustaljeno stanje prijelaza toplinske energije unutar 20 godina rada sustava. Iako je postizanje potpuno ustaljenog stanja prijelaza toplinske energije kod viših vrijednosti opterećenja vremenski zahtjevnije, temperaturni odzivi pokazuju da je rad sustava osiguran do kraja projektnog razdoblja od 20 godina, pri konstantnim opterećenjima.

Usporedba rezultata kod sustava koji ima izolirani i neizolirani tubing jasno ukazuje na utjecaj bušotinskih otpora kod projektiranja bušotinskih izmjenjivača topline. U slučaju neizoliranog tubinga vrijednost bušotinskog otpora, pri protoku od 10 l/s, iznosi 0,449 m°C/W, dok je kod izoliranog tubinga ta vrijednost 0,038 m°C/W (Slika 6.9.). Koliko ta razlika utječe na temperaturni odziv bušotinskog izmjenjivača vidljivo je na slici 6.10., gdje su dani rezultati EST za jednaka toplinska opterećenja pri protoku od 10 l/s. Vidljivo je da se s izolacijom tubinga postižu više vrijednosti temperaturnog odziva, te da je postignuto ustaljeno stanje

prijelaza toplinske energije u kraćem vremenskom razdoblju nego kod slučaja kada je tubing neizoliran cijelom duljinom.

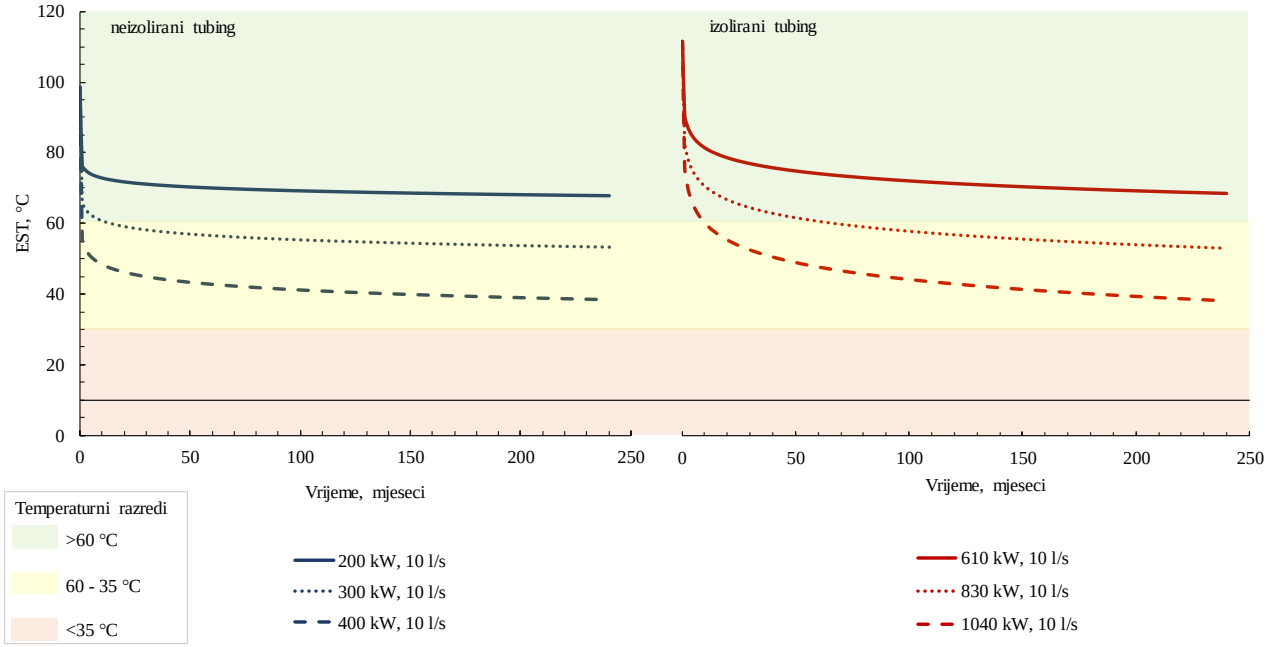


Slika 6.9. *Prikaz vrijedosti bušotinskih otpora za različite protoke kod primjene neizoliranog i izoliranog tubinga*



Slika 6.10. *Usporedba temperaturnog odaziva bušotinskog izmjenjivača pri protoku od 10 l/s, pri jednakim opterećenjima, za slučaj neizoliranog i izoliranog tubinga*

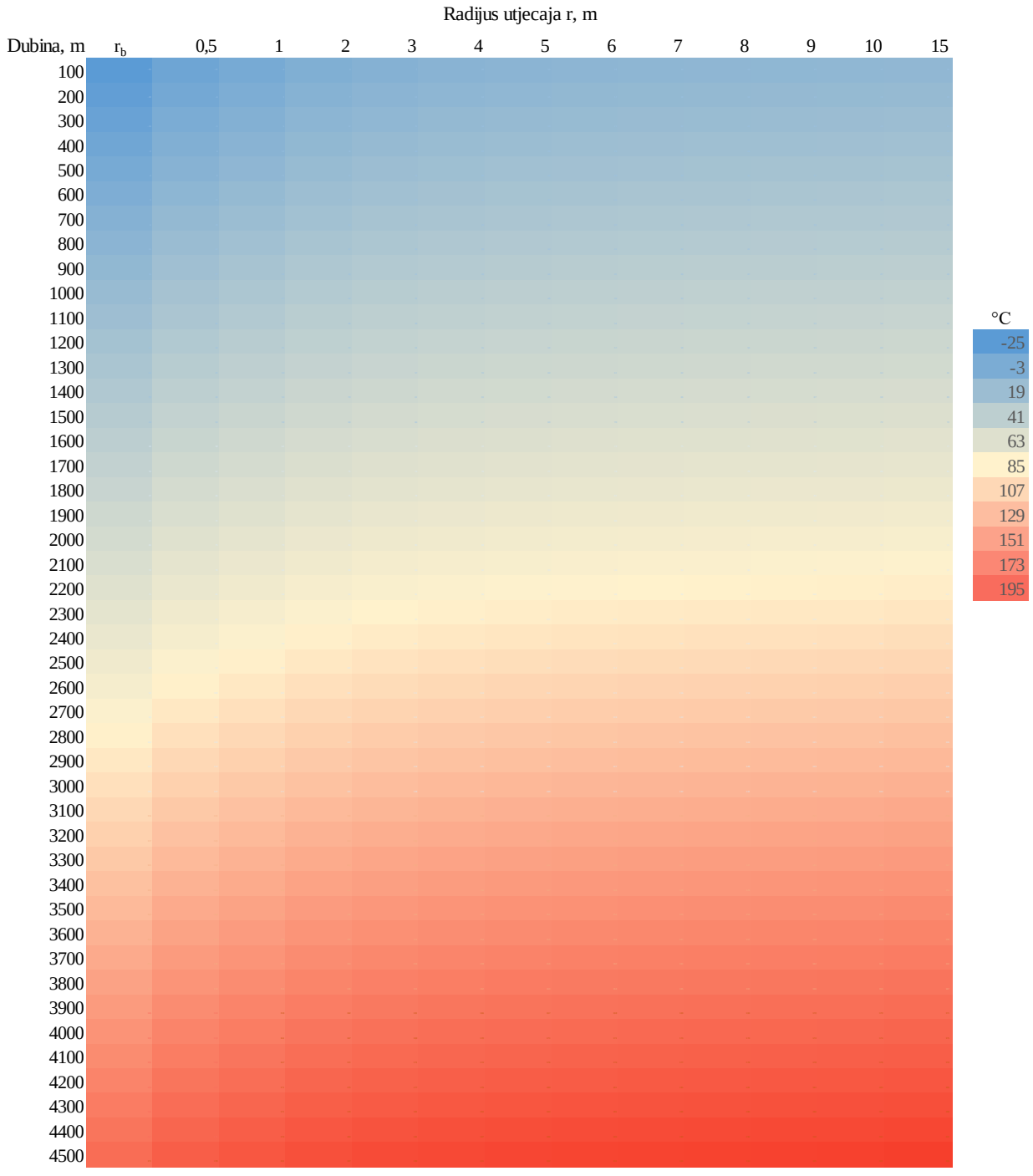
Za određivanje odnosa toplinskih opterećenja kod jednakih temperaturnih odziva, proveden je proračun za slučaj izoliranog tubinga na način da je vrijednost EST u posljednjem mjesecu rada bušotinskog izmjenjivača unutar 1°C razlike, u usporedbi s rezultatima EST za toplinska opterećenja od 200, 300 i 400 kW_t kod neizoliranog tubinga i za protok od 10 l/s. Na taj način postignuta su toplinska opterećenja od 610, 830 i 1040 kW_t kod upotrebe izoliranog tubinga (Slika 6.11.). Prema tome, upotrebom izolacije mogu se ostvariti toplinska opterećenja veća i do 3 puta nego kod dubokog bušotinskog izmjenjivača bez izolacije tubinga.



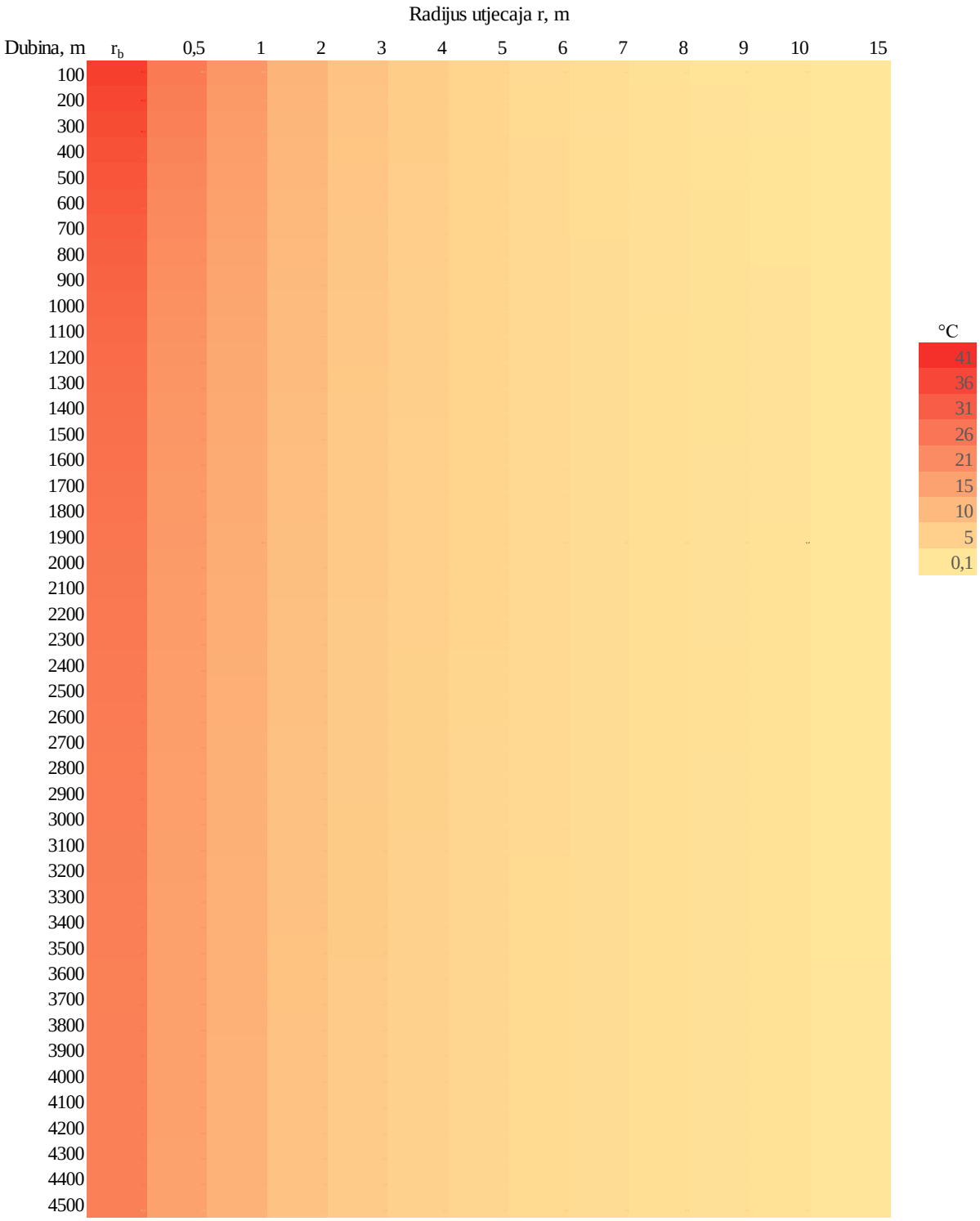
Slika 6.11. *Usporedba toplinskih opterećenja za neizolirani i izolirani tubing, pri protoku od 10 l/s, za jednaki temperaturni odziv u zadnjoj godini rada bušotinskog izmjenjivača*

Pomoću ILS metode izračunate su vrijednosti temperaturnog odaziva, počevši od stijenke kanala bušotine do udaljenosti od 15 m. Promatra se utjecaj eksploatacije toplinske energije bušotinskim izmjenjivačem dubine 4500 m, odnosno radijalno širenje toplinske fronte. Rezultati kod konstantnog opterećenja od 500 kW_t , što iznosi 111 W po jediničnoj dužini izmjenjivača, vidljivi su na slici 6.12. Vidljivo je da se s povećanjem udaljenosti od stijenke kanala bušotine vrijednosti temperatura približavaju statičkim vrijednostima. U svrhu potvrde, izračunate su razlike između statičke vrijednosti temperatura i temperatura na određenoj udaljenosti i dubini tijekom eksploatacije toplinske energije. Rezultati su prikazani na slici 6.13. te je vidljivo da se udaljavanjem od stijenke kanala bušotine postižu statičke vrijednosti temperatura. Na udaljenosti od 15 m, razlike između statičke temperature i temperature ostvarene uslijed iskorištavanja toplinske energije su gotovo zanemarive, s obzirom da iznose

od 0,07°C u najplićem dijelu do 0,3 °C na dnu bušotine. Također, može se zaključiti da se najveći dio prijelaza toplinske energije odvija u gornjim slojevima, s obzirom na najveću razliku temperatura.



***Slika 6.12**. Promjena temperature za bušotinu Pčelić-1 prilikom konstantnog toplinskog opterećenja od 500 kW_t u radijusu do 15 m.*



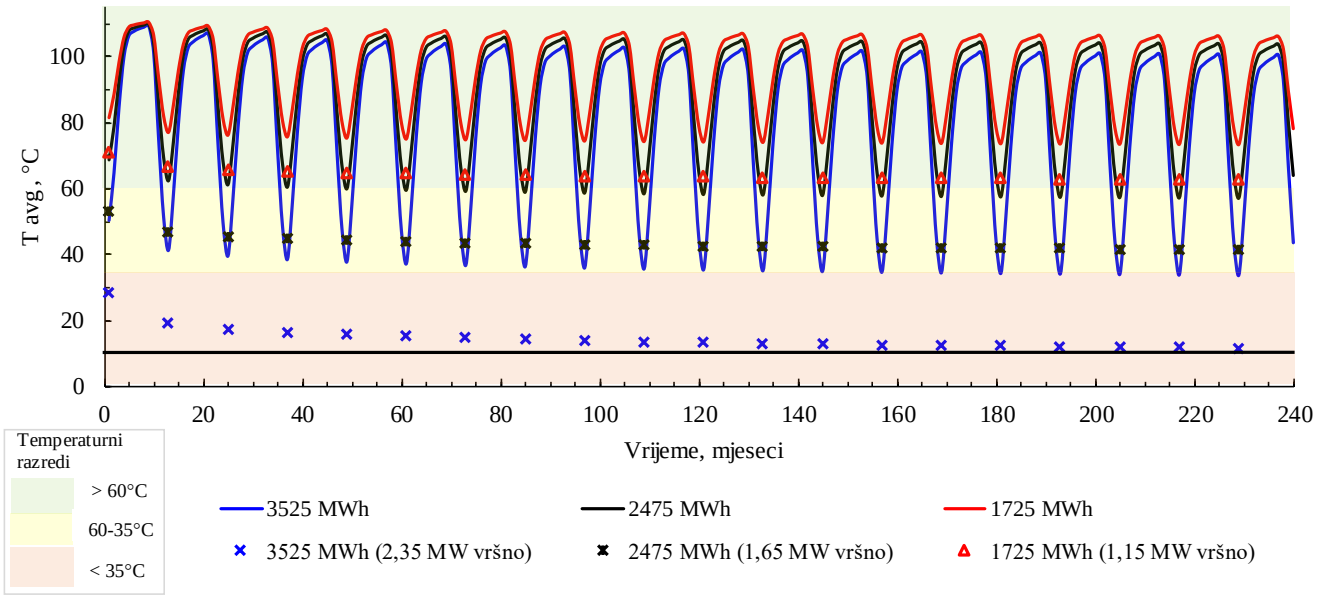
***Slika 6.13**. Razlike između statičke vrijednosti temperatura i temperatura tijekom rada bušotinskog izmjenjivača na određenoj dubini i udaljenosti od kanala bušotine*

6.3.1.2. Modeliranje sustava s varijabilnim toplinskim opterećenjem

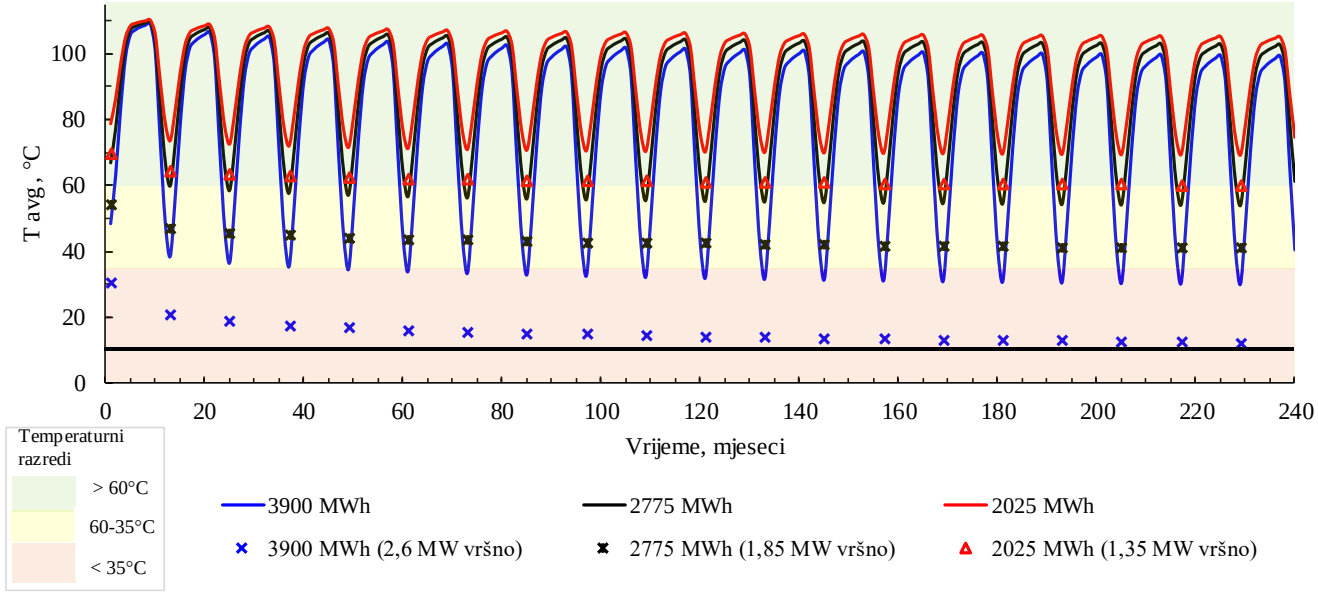
Kod varijabilnog, sezonskog opterećenja pretpostavljene su toplinske potrebe korisnika u skladu s klimatskim parametrima, odnosno tijekom sezone grijanja (listopad-travanj). Simulacija za 20 godina rada sustava je izvedena na način da su zadovoljene vršne potrošnje za najhladnije dane u godini, čije vrijednosti odgovaraju postavljenim graničnim vrijednostima temperature fluida, te u odnosu na tri prethodno navedena različita protoka. Kod projektiranja sustava za varijabilna opterećenja, uobičajeno je odrediti ukupan broj sati rada sustava u zavisnosti od klimatskih uvjeta područja. Za područje kontinentalne Hrvatske za potrebe grijanja u praksi se uzima 1500 radnih sati (tzv. *full load hours – FLH*). S obzirom da su energetske potrebe tijekom zimskih mjeseci različite po mjesecima (najviše potrebe su izražene u najhladnijim mjesecima) napravljena je raspodjela prema prosječnim klimatskim parametrima za kontinentalni dio. Radi pojednostavljenja, kao tipična raspodjela uzeta je u obzir raspodjela pojave srednje temperature zraka za zagrebačko područje od listopada do travnja i postotak u kojem dolazi do vršnog opterećenja, kako je prikazano u Tablici 6.5. Na slici 6.14. prikazani su rezultati temperaturnog odaziva za protok od 10 l/s, na slici 6.15. za protok od 20 l/s te na slici 6.16. za maksimalni protok od 30 l/s.

Tablica 6.5. Srednja temperatura zraka za zagrebačko područje od rujna do svibnja

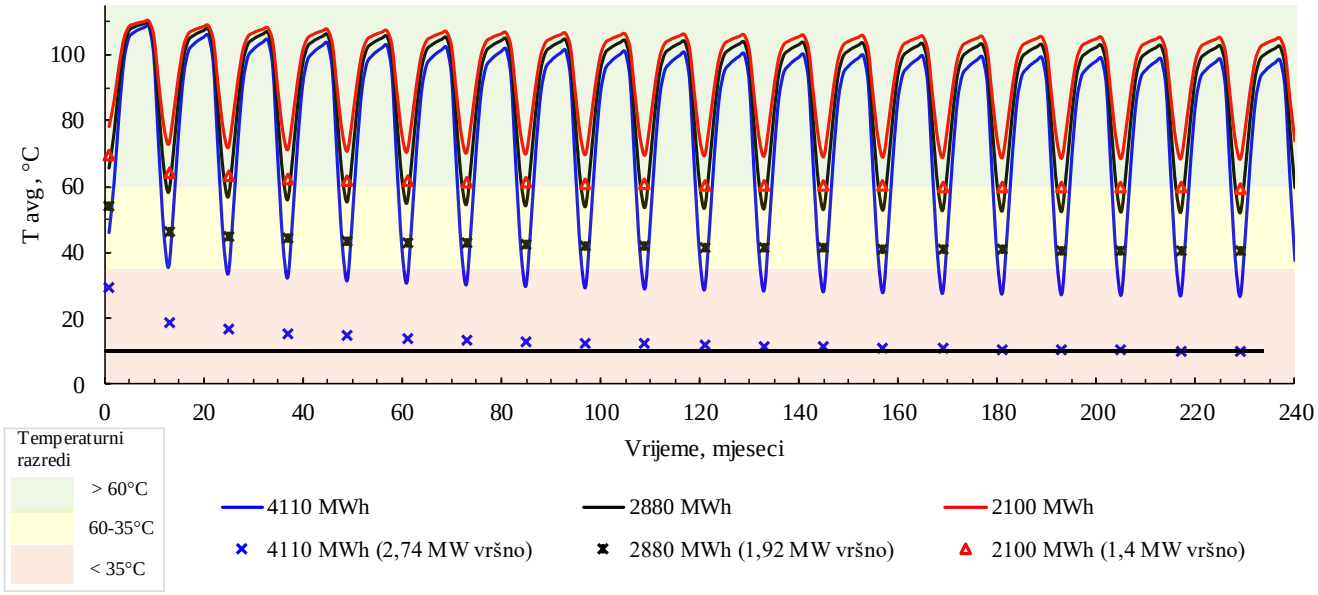
Mjesec	**Srednja temperatura zraka, °C**	**%**
Listopad	10,5	0,038
Studeni	5,3	0,15
Prosinac	0,9	0,25
Siječanj	0,8	0,28
Veljača	1,9	0,17
Ožujak	5,9	0,09
Travanj	10,6	0,020



Slika 6.14. *Temperaturni odziv i dostupna količina toplinske energije za varijabilno toplinsko opterećenje pri protoku od 10 l/s*



Slika 6.15. *Temperaturni odziv i dostupna količina toplinske energije za varijabilno toplinsko opterećenje pri protoku od 20 l/s*



Slika 6.16. *Temperaturni odziv i dostupna količina toplinske energije za varijabilno toplinsko opterećenje pri protoku od 30 l/s*

U sva tri slučaja protoka i za sva tri temperaturna razreda iz dijagrama je vidljivo da je postignut ustaljeni prijelaz toplinske energije unutar 20 godina rada sustava. Dostupna toplinska energija za varijabilna opterećenja za protok od 10 l/s se kreću od 1725 MWh_t u prvom toplinskom režimu, pa do 3525 MWh_t u slučaju korištenja dizalice topline. Kod protoka od 20 l/s, te vrijednosti se kreću od minimalnih 2025 MWh_t pa do 3900 MWh_t. Očekivano, kod najvećeg protoka, od 30 l/s, te vrijednosti rastu do 2100 MWh_t za najviši temperaturni razred pa sve do 4110 MWh_t za najniži temperaturni razred. Rezultati kod pretpostavljenog neizoliranog tubinga, za npr. protok od 10 l/s, iznose 620 MWh (0,52 MW vršno) za najviši temperaturni razred, 1030 MWh (0,86 MW vršno) za srednji temperaturni razred i 1460 MWh (1,2 MW vršno). U usporedbi s rezultatima kod pretpostavljenog izoliranog tubinga, vidljivo je da je dostupna toplinska energija oko 2,5 puta veća nego kod upotrebe neizoliranog tubinga. Navedeno se može objasniti dodatnom uspostavom prijelaza toplinske energije između zagrijanog i pothlađenog cirkulirajućeg fluida, kod ugradnje neizoliranog tubinga, tj. pojave termalnog *kratkog spoja* (engl. *short circuit*), odnosno gubitka topline.

6.3.2. Rezultati numeričke metode

Za numeričku analizu rada dubokog bušotinskog izmjenjivača koristio se FEFLOW® 7.2 software. Licencu je omogućila suradnja sa Sveučilištem u Bologni. Program je prvotno

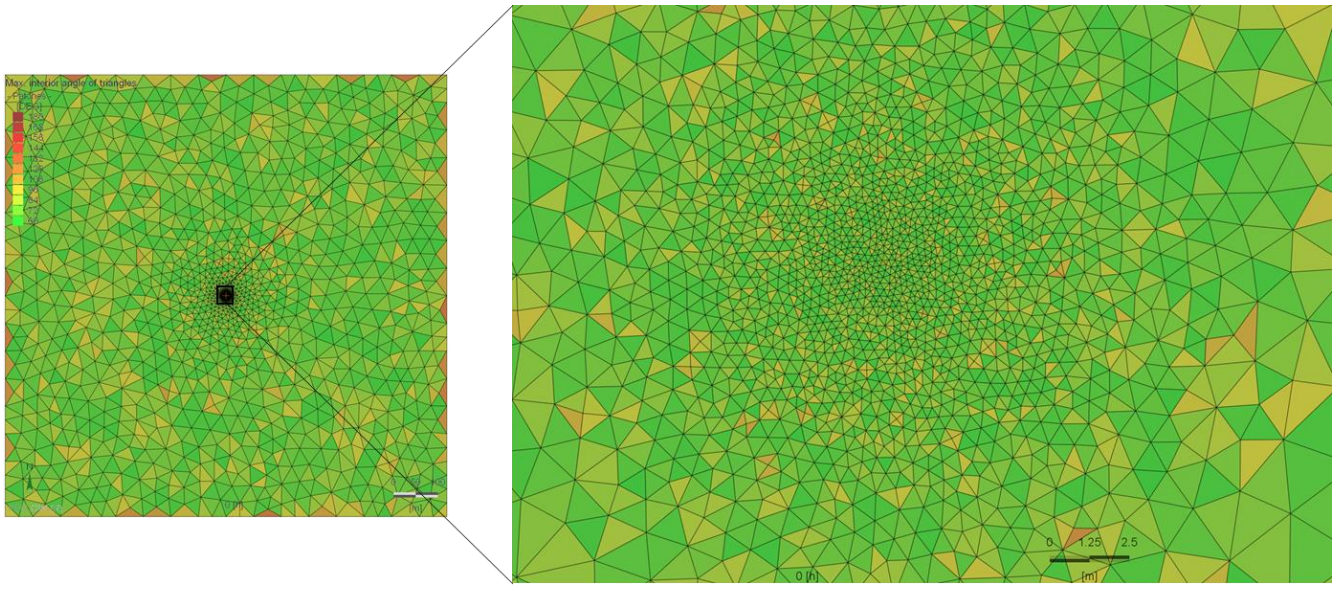
zamišljen i namijenjen numeričkom modeliranju protoka podzemne vode i općenito protoku kroz poroznu sredinu (Diersch, 2014). Korišteni program prikladan je za rješavanje problema i modeliranje protoka, masene bilance i prijelaza toplinske energije u poroznoj sredini kao i površinskog protoka. FEFLOW je baziran na numeričkoj metodi konačnih elemenata (engl. *Finite Element Method,* FEM) koja se koristi se za rješavanje parcijalnih diferencijalnih jednadžbi. Metoda konačnih elemenata zasniva se na podjeli modela na konačan broj elemenata što se naziva diskretizacija. Svaki od elementa je povezan sa susjednim elementom putem dvaju ili više čvorova ili površine. Rezultantni algoritam FEM-a se može izraziti u obliku matrice za jedan generični element, za bilo koji granični uvjet, nakon čega je moguće skup generičnih elemenata izraziti u globalnoj matrici (Diersch, 2014). Prednost korištenja metode konačnih elemenata očitava se u mogućnosti rješavanja zadanog problema i za tijela ili površine nepravilnih oblika. Ova metoda zahtijeva definiranje graničnih uvjeta, da bi se moglo pristupiti rješavanju određenog problema. Prilikom modeliranja rada bušotinskih izmjenjivača konduktivno-konvektivni procesi prijelaza toplinske energije unutar stijene postavljaju se u spregu s prijelazom toplinske energije koji se odvija između ležišne stijene i izmjenjivača sa svim njegovim elementima (cementna zona, cijevi i radni fluid u izmjenjivaču) Numerički model u FEFLOW-u rješava probleme očuvanja mase, momenta fluida i toplinske energije stijene i fluida prema općem izrazu (Diersch, 2014):

$$\frac{\partial(\rho\psi)}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho\psi v) + \nabla\cdot j = \rho F \tag{6-3}$$

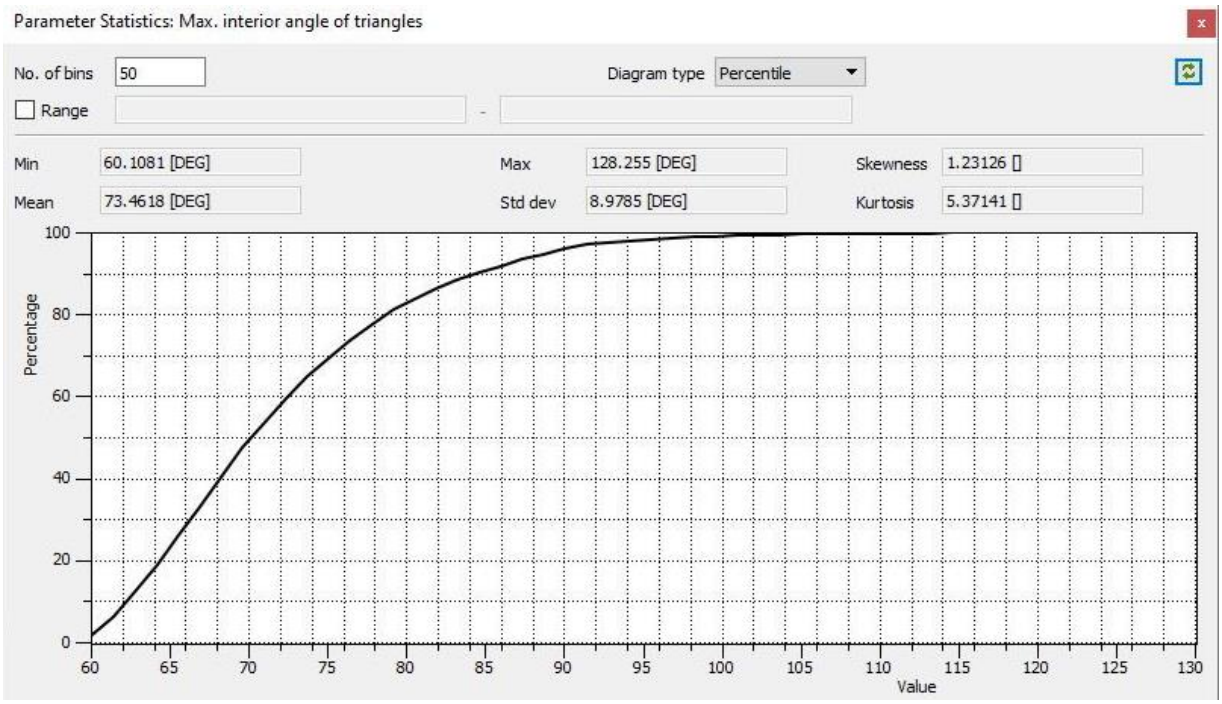
Model za simulaciju u FEFLOW-u postavljen je u dimenzijama 1000x1000 m. Duljina modela u smjeru z-osi iznosi 4600 m, uz podjelu po duljini od 100 m da bi se moglo pridružiti granične i početne uvjete u skladu s promjenama po dubini, kao što su temperatura, toplinska vodljivost i specifična obujamska toplina. Nakon određivanja dimenzija i podjele modela na jednake dijelove do krajnje dubine, potrebno je diskretizirati prostor modela. Diskretizacija se obavlja pomoću generatora mreže elemenata (engl. *mesh*), te su u ovom slučaju odabrani trokuti kao osnovni oblik, s pripadajućim čvorovima, na osnovnoj površini u 2D sustavu. Mreža je generirana uz najveću gradaciju čvorova u centru modela (engl. *point gradation*), uz dodatno rafiniranje definiranjem maksimalne udaljenosti između dva čvora neposredno uz lokaciju određene strukture. Na taj način pokušava se postići čim ravnomjernija tranzicija između elemenata. Takva pristup generiranju mreže rezultira većim brojem pravilnih elemenata, ali i boljom stabilnosti modela (feflow.info). Centar modela je izabran kao područje gdje je potrebna što manja udaljenost između čvorova, odnosno što više elemenata, s obzirom da se u centru

postavlja bušotinski izmjenjivač. S približavanjem vanjskim rubovima modela udaljenosti između čvorova se povećavaju, kako je vidljivo na slici 6.17., što je zadovoljavajuće s obzirom da se ne očekuje utjecaj rada izmjenjivača veći od 20ak m u radijusu.

Prije postavljanja dubokog izmjenjivača topline u model i definiranja graničnih i početnih uvjeta, potrebno je utvrditi kvalitetu generirane mreže, odnosno da li je potrebno njeno dodatno rafiniranje. Dva su kriterija za provjeru ovog uvjeta – Delaunayev kriterij i maksimalni unutarnji kut trokuta. Sa stanovišta 2D plohe, Delaunayeva triangulacija podrazumijeva da se nijedna od točaka koje čine trokut ne nalazi unutar opisane kružnice trokuta. Kriterij maksimalnog unutarnjeg kuta trokuta služi za provjeru broja tupokutih trokuta, s obzirom na to da proračun u točakama takvih trokuta može dati manje točne rezultate (FEFLOW Documentation). Provjera po oba kriterija za početno generiranu mrežu nije pokazala zadovoljavajuće rezultate maksimalnog kuta, te se pristupilo rafiniranju mreže, nakon čega se ustanovilo da je Delaunayev kriterij zadovoljen i da je tek oko 4% od ukupnog broja trokuta koji imaju kut veći od 90°, kao što je vidljivo na slici 6.18. Dodatnim rafiniranjem mreže nije postignut manji broj tupokutih trokuta te se smatra da je mreža zadovoljavajuća nakon jednog ciklusa rafiniranja. Model je diskretiziran uz generirana 2935 čvora, uz najveći broj čvorova unutar 20 m od centra, gdje se i očekuju najveći utjecaji eksploatacije toplinske energije iz okolnih stijena u vidu promjene temperature.



Slika 6.17. *Izgled rafinirane mreže uz prikaz zadovoljavanja kriterija maksimalnog unutarnjeg kuta*

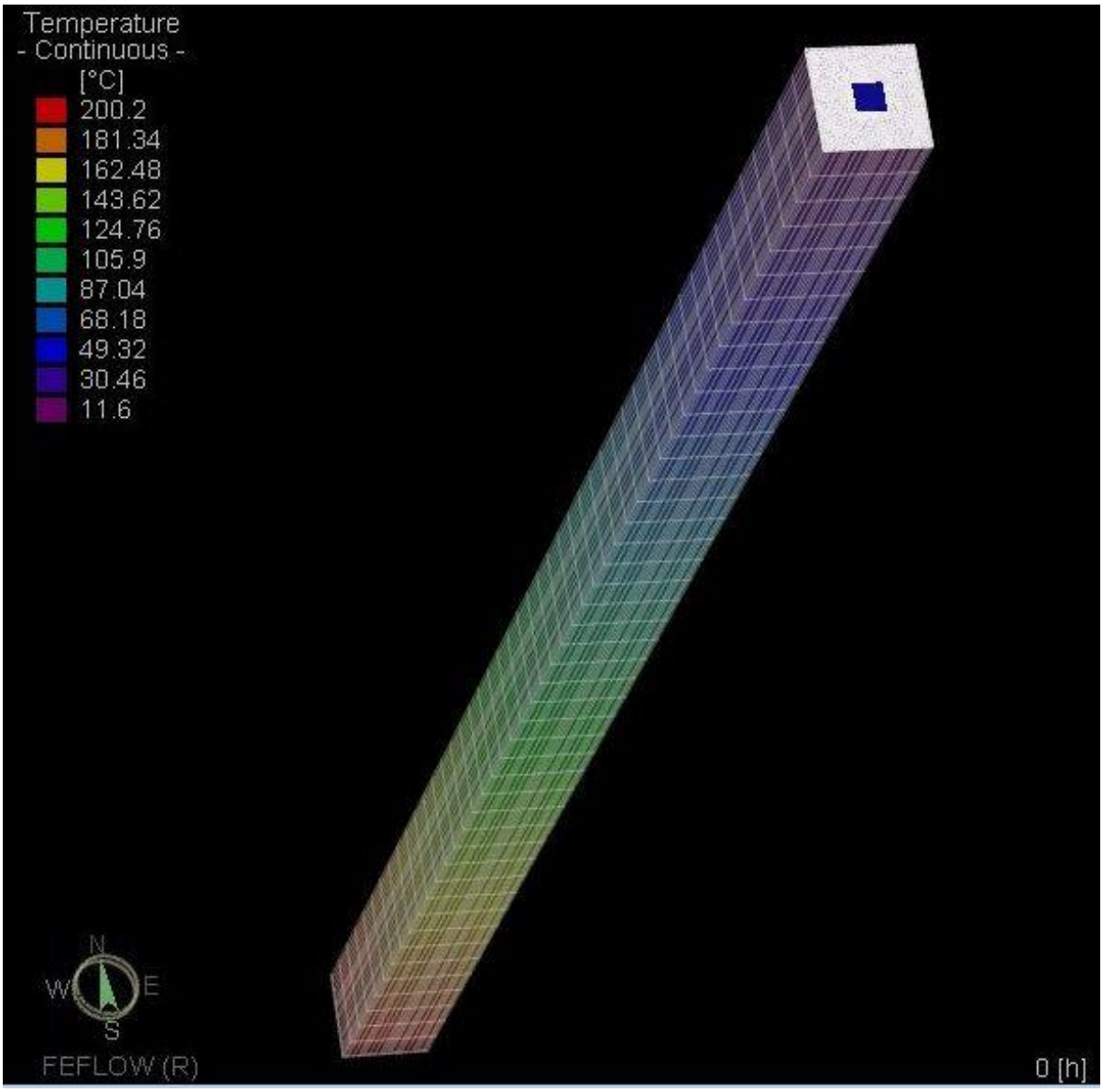


Slika 6.18. *Kriterij maksimalnog unutarnjeg kuta trokuta, nakon rafiniranja mreže*

Da bi se izgradio 3D model, početna 2D ploha se zajedno s mrežom čvorova i pripadajućim elementima trokuta translatira u smjeru z-osi na slojeve, koji se u ovom slučaju stavljaju na svakih 100 m, do 4600 m dubine. Time su stvoreni prizmatični 3D elementi koji opisuju model.

S obzirom na pretpostavku da se radi o napuštenim i suhim bušotinama, glavni način prijelaza toplinske energije je kondukcija, te se pretpostavlja da podzemni vodonosnici nisu prisutni te da nema protoka fluida kroz stijensku masu. Da bi navedeni uvjet bio ostvaren cijelom duljinom modela vrijednost potencijala, kao granični uvjet, postavljena je na 0. Uz to, pretpostavljeno je da model cijelom duljinom nije zasićen podzemnom vodom, odnosno da je prisutan konduktivni prijelaz toplinske energije. Nakon toga, pridružene su vrijednosti graničnih i početnih uvjeta statičkih temperatura koje su izračunate pomoću ranije određenog geotermalnog gradijenta, za svakih 100 m dubine. Također potrebno je dodijeliti vrijednosti količina toplinske energije sadržane u stijeni, izražene preko specifične volumne topline, kao i toplinske vodljivosti, a koji su određeni pomoću Jelićevih korelacija za Dravsku depresiju i uz korekcije kako je ranije opisno, također u razmaku za svakih 100 m. Na slici 6.18. prikazan je 3D model za temperaturno polje u početnom, statičkom stanju. I na kraju, postavlja se duboki bušotinski izmjenjivač, u centar modela, u koaksijalnoj izvedbi uz utiskivanje pothlađenog fluida kroz prstenasti prostor. Ostale karakteristike izmjenjivača jednake su kao i kod analitičkog modela. Za opis procesa prijelaza toplinske energije unutar bušotinskog

izmjenjivača dostupne su dvije metode proračuna – numerička (Al-Khoury et al., 2011) na bazi neustaljenog stanja prijelaza toplinske energije i analitička (Eskilson, 1987) bazirana na pretpostavci polu-ustaljenog stanja. Korištenje numeričke metode preporučuje se pri analizi kratkoročnog rada izmjenjivača (npr. unutar nekoliko sati), posebice pri uvjetima česte izmjene vrijednosti temperature utisnog fluida. Za uvjete dugoročnog rada izmjenjivača, s povremenim izmjenama toplinskih opterećenja, preporučuje se odabir analitičke metode, koja daje relativno točne rezultate, ali s manjim vremenskim opterećenjem sustava (proračun traje kraće, s gotovo jednakim rezultatima – unutar prihvatljivih granica) (FEFLOW® Manual; Diersch, 2014). S obzirom da se u ovom slučaju radi o konstantom opterećenju kroz šest mjeseci rada izmjenjivača, odabrana je analitička metoda proračuna za prijelaz toplinske energije unutar izmjenjivača kako bi postupak simulacije trajao kraće.

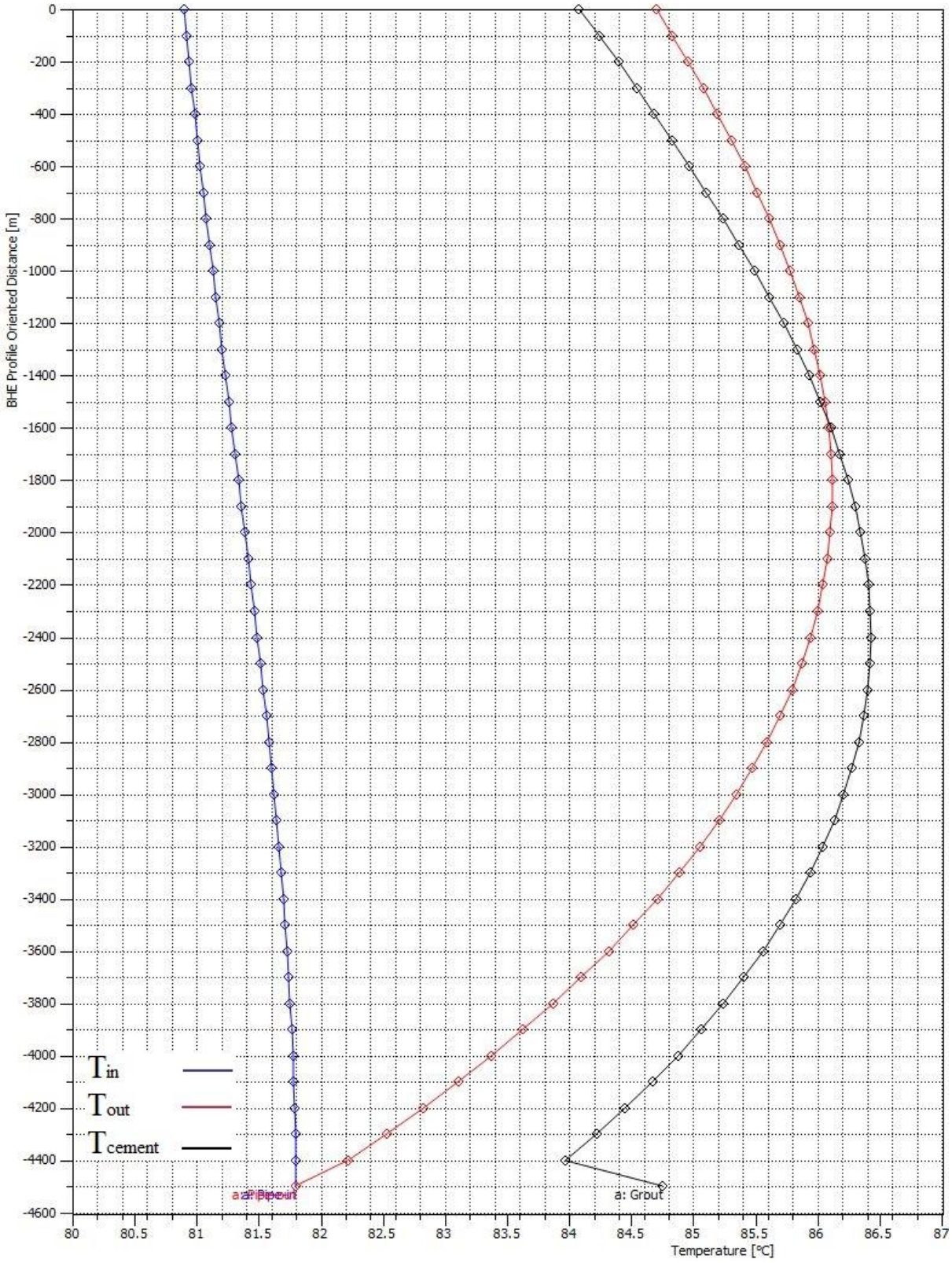


Slika 6.18. *Prikaz postavljenog 3D modela i raspored statičke temperature u FEFLOW® programu (slika zaslona)*

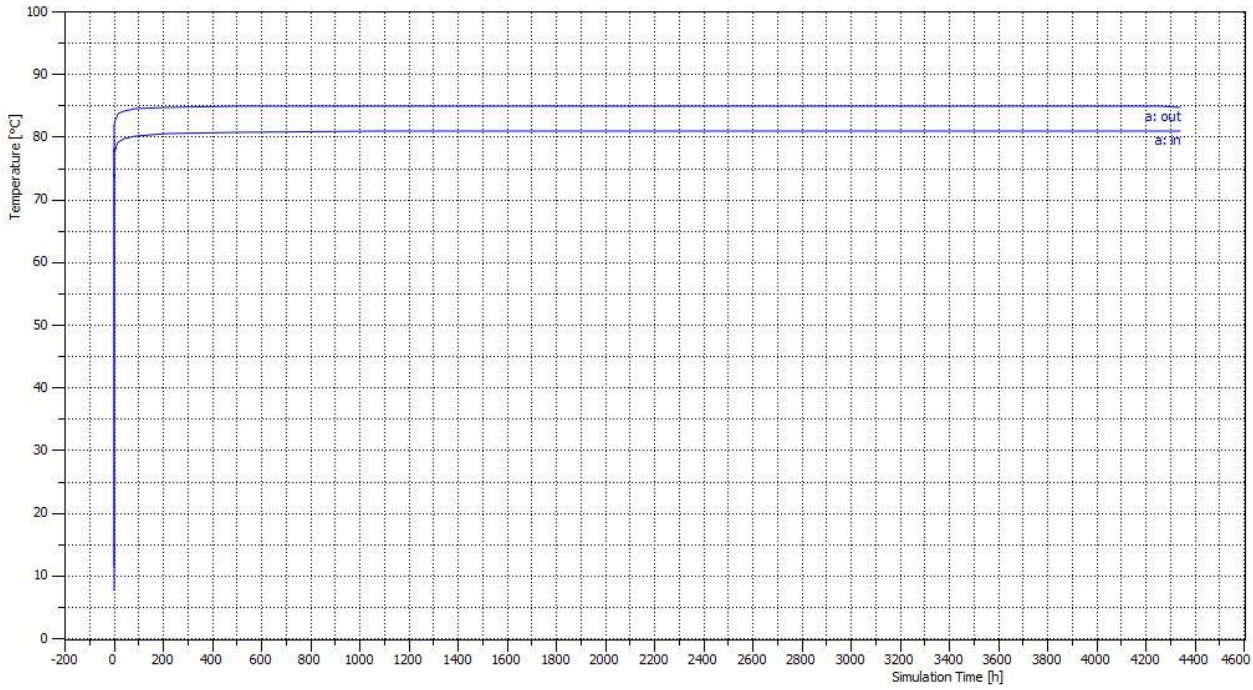
Nakon unosa parametara koji opisuju stanje stijenske mase u početnom stanju, potrebno je definirati tzv. problemski razred (engl. *problem class*), koji predstavlja setove definiranja numeričkog proračuna. Definiran je proračun za prijenos mase i toplinske energije u neustaljenom stanju kroz šest mjeseci rada izmjenjivača (≈4300 h), uz toleranciju greške od 0,01 i maksimalni broj iteracija po vremenskom koraku od 100. Početno vrijeme simulacije je 0, dok je inicijalna duljina vremenskog koraka u kojem se računa odaziv bušotinskog izmjenjivača 0,001 h, uz automatsku kontrolu koraka. Automatska kontrola vremenskog koraka jedna je od mogućnosti diskretizacije modela u vremenu tijekom simulacije te podrazumijeva automatsko utvrđivanje odgovarajućeg trajanja koraka na temelju promjena u primarnim

varijablama, poput promjene potencijala i temperature, između pojedinih vremenskih koraka. Na taj način osigurano je optimalno vrijeme trajanja simulacije, za razliku od fiksno zadanih koraka (konstantni ili varijabilni) (FEFLOW®, Manual).

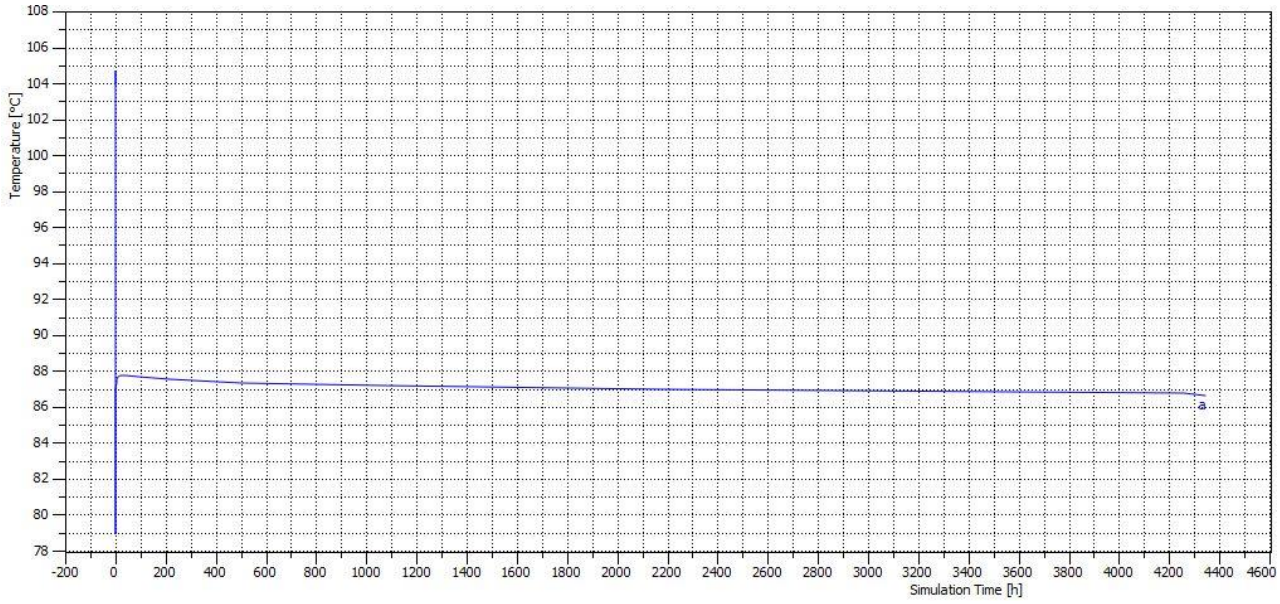
Rezultati numeričke analize prikazani su na slikama 6.19. – 6.21., za slučaj toplinskog opterećenja od 500 kW, uz protok vode od 30 l/s i pretpostavku izoliranog tubinga na način da je zadana toplinska vodljivost od 0,1 W/m°C. Vidljiva je raspodjela temperatura po dubini izmjenjivača u prstenastom prostoru i tubingu na slici 6.19. Prikazana temperaturna distribucija ukazuje na učinkovitost primjene izoliranog tubinga, s obzirom da ne dolazi do izmjene topline između zagrijanog fluida u proizvodnom, prstenastom prostoru (T_{out}) i pothlađenog fluida koji se utiskuje kroz tubing (T_{in}). Prvotna procjena analitičkom metodom dostupne toplinske energije stoga ukazuje na pojavu gubitka toplinske energije uslijed pojave termalnog kratkog spoja (prijelaz toplinske energije sa zagrijanog fluida na pothlađeni fluid tijekom protjecanja) i prijelaza toplinske energije sa zagrijanog fluida na okolne stijene na određenoj dubini. Na slici 6.20. vidljiva je promjena temperature na ulazu (T_{in}=80,8 °C) i izlazu (T_{out}=84,7 °C) izmjenjivača, te na slici 6.21. promjena prosječne temperature duž izmjenjivača tijekom 4300 h kontinuiranog rada. Vidljivo je da se ustaljeni prijelaz toplinske energije postiže unutar prvih 600 h rada bušotinskog izmjenjivača.



Slika 6.19. *Rezultati simulacije rada bušotinskog izmjenjivača s konstantnim opterećenjem (500 kW) i protokom radnog fluida (30 l/s) tijekom šest mjeseci - raspodjela temperature fluida u tubingu (in) i prstenastom prostoru (out) na kraju simulacije*

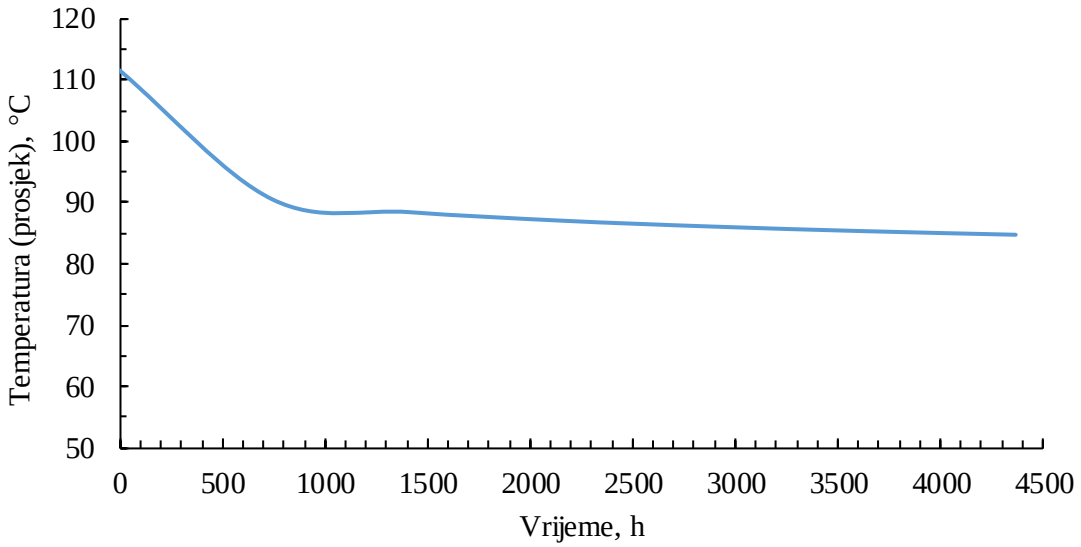


Slika 6.20. *Rezultati simulacije rada bušotinskog izmjenjivača s konstantnim opterećenjem (500 kW) i protokom radnog fluida (30 l/s) tijekom šest mjeseci - temperaturni odziv na izlazu i ulazu bušotinskog izmjenjivača*



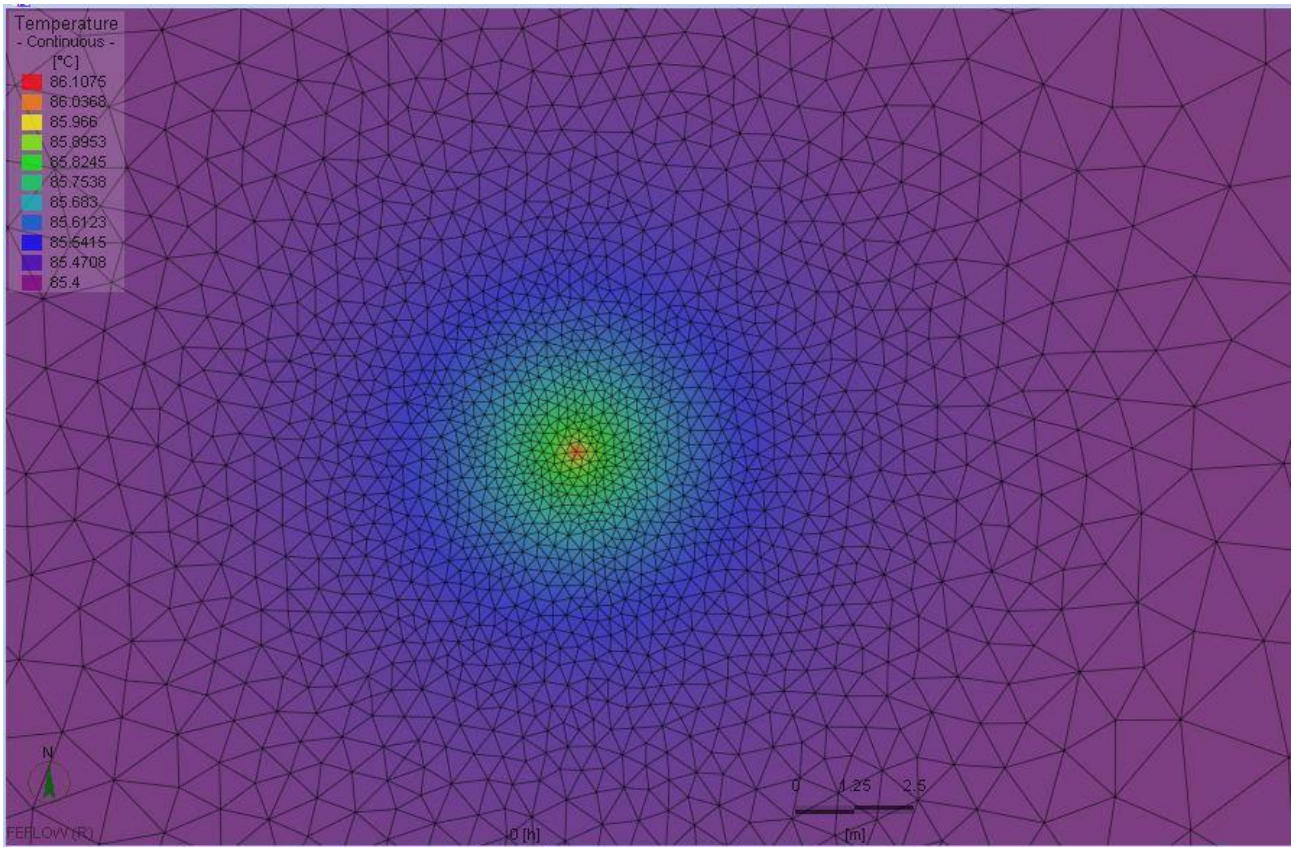
Slika 6.21. *Rezultati simulacije rada bušotinskog izmjenjivača s konstantnim opterećenjem (500 kW) i protokom radnog fluida (30 l/s) tijekom šest mjeseci - prosječna temperatura bušotinskog izmjenjivača*

Za usporedbu, na slici 6.22., prikazani su rezultati istog proračuna koristeći FLS linijski analitički model. Vidljivo je da se rezultati analitičkog modela relativno dobro slažu s numeričkim rezultatima, pri inicijalnom vremenskom koraku od 0,001 h.



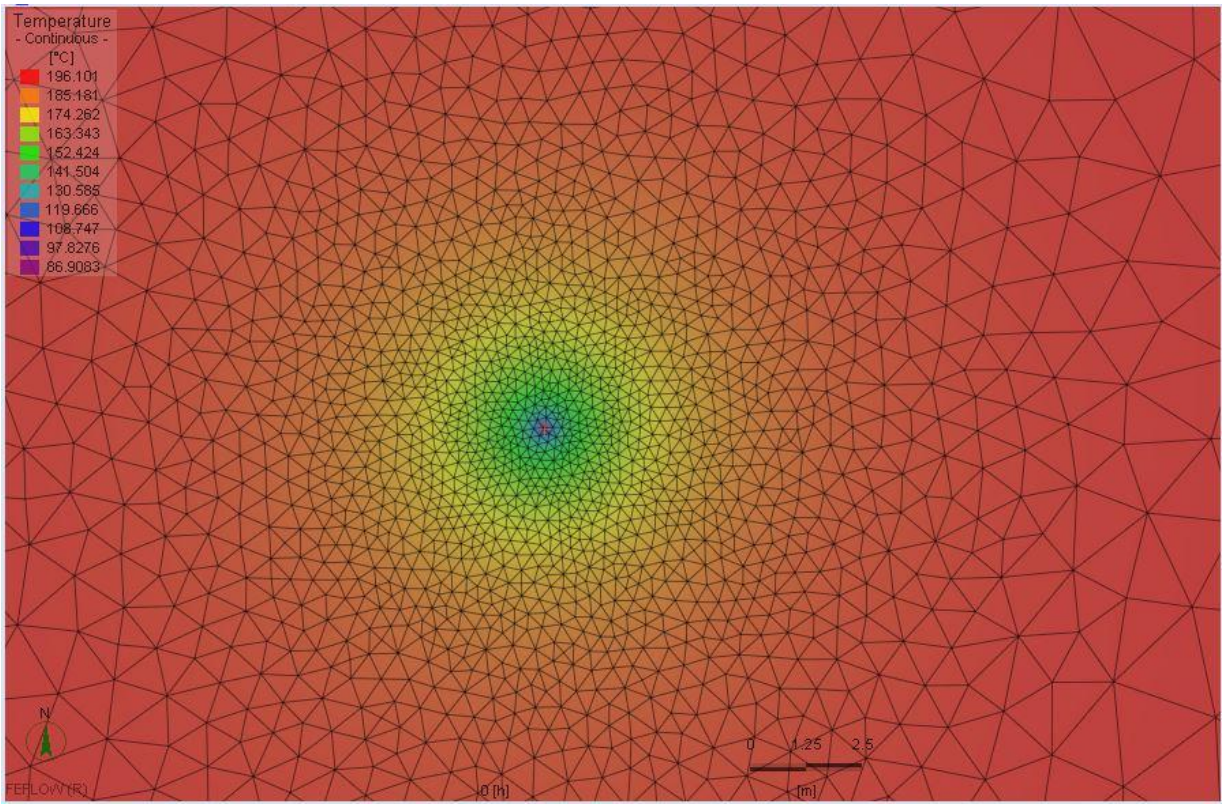
Slika 6.22. *Rezultati temperaturnog odziva (prosječna temperatura) dobivenog pomoću analitičkog modela linijskog izvora konačne duljine (FLS) rada bušotinskog izmjenjivača pri istim radnim uvjetima*

Numeričkim modeliranjem dobiveni su rezultati radijalnog širenja toplinske fronte, na presjecima po dubini za svakih 100 m. S obzirom da su dimenzije modela tlocrtno bile 1x1 km, prikazani rezultati su uvećani da se jasnije vidi utjecaj temperaturnog polja. Za primjer su prikazani rezultati na dubini od 1800 m na slici 6.23. i na dnu bušotinskog izmjenjivača (4500 m) na slici 6.24.



Slika 6.23. *Prikaz širenja toplinske fronte na dubini 1800 m (slika zaslona)*

Iz slike 6.21. vidljiv je radijus širenja toplinske fronte na dubini od 1800 m. Može se primijetiti da je na navedenoj dubini vrijednost temperature najveća unutar izmjenjivača, uzrokovano protjecanjem zagrijanog fluida iz donjih slojeva. Međutim, kako je statička temperatura na 1800 m niža nego temperatura zagrijanog fluida, dolazi do prijelaza toplinske energije iz izmjenjivača na okolne stijene, odnosno poroznu sredinu. Usporedbom s rezultatima prikazanima na slici 6.17., vrijednosti temperature duž prstenastog prostora ukazuju da se prijelaz topline na stijensku masu odvija od otprilike 1900 m do vrha izmjenjivača. Tijekom vremena rada sustava, temperatura stijenske mase u gornjim dijelovima izmjenjivača s vremenom će rasti, te će temperaturna razlika između zagrijanog fluida u prstenastom prostoru i okolne stijene biti sve manja. Slijedom navedenog, toplinska energija koja će se „izgubiti“ u gornjim slojevima biti sve manja, te će se postizati ustaljeno stanje prijelaza toplinske energije.



Slika 6.24. *Prikaz širenja toplinske fronte na dubini 4500 m (slika zaslona)*

Za razliku od smjera prijelaza toplinske energije na dubini od 1800 m, na dnu izmjenjivača dolazi do prijelaza toplinske energije od stijenske mase na utisnuti pothlađeni fluid. Navedeno je vidljivo na slici 6.24. s obzirom na vrijednosti temperature unutar granice utjecaja širenja toplinske fronte. Utvrđeni polumjer širenja toplinske fronte je unutar 20 m. Iza polumjera od 20 m nije utvrđena promjena od statičkih vrijednosti temperature, što je u skladu s vrijednostima izračunatima pomoću analitičke metode ILS, kao što je prikazano na slici 6.12.

7. KVANTIFIKACIJA TOPLINSKOG POTENCIJALA KONTINENTALNOG DIJELA RH PRIMJENOM DUBOKIH KOAKSIJALNIH BUŠOTINSKIH IZMJENJIVAČA TOPLINE

Na području kontinentalnog dijela Republike Hrvatske izrađeno je oko 4000 naftnih, plinskih i istražnih bušotina. Dio tih bušotina je napušten, a s obzirom na predviđeni pad proizvodnje može se očekivati porast njihovog broja. Na temelju nove karte geotermalnih gradijenata i karte temperatura na 1000 i 2000 m vidljivo je da postoji potencijal za prenamjenu napuštenih bušotina i njihovo korištenje u energetske svrhe. Na primjeru bušotine Pčelić-1 dan je primjer modeliranja pri različitim uvjetima protoka. Međutim, za određivanje potencijala pojedine bušotine potrebno je u obzir uzeti različite termogeološke i geometrijske parametre koji su prisutni na pojedinom području i kod pojedine bušotine. Zbog toga se kod određivanja potencijala pristupilo određivanju toplinskih opterećenja pri različitim dubinama bušotine tipičnog promjera, pri različitim uvjetima protjecanja te za odabrane iznose geotermalnog gradijenta. Simulacija je izvedena u programskom paketu GHX. Međutim, za pravilno određivanje modela cjelokupnog sustava, potrebno je u obzir uzeti i hidrauličke parametre, odnosno rad cirkulacijske pumpe potrebne za cirkulaciju fluida unutar bušotinskog izmjenjivača. Rad, odnosno potrošnja električne energije potrebne za rad, cirkulacijske pumpe određen je padom tlaka u unutarnjoj i vanjskoj cijevi izmjenjivača. U slučaju korištenja dizalica topline u obzir je potrebno uzeti i energiju potrebnu za rad dizalice. S obzirom na različite parametre određeni su uvjeti pri kojima realni sustav ima optimalan rad, te su prikazani koraci potrebni prilikom projektiranja revitalizacije ugradnjom dubokih koaksijalnih izmjenjivača topline.

7.1. Određivanje dostupne toplinske energije upotrebom dubokih bušotinskih izmjenjivača topline

Modeliranje prinosa toplinske energije korištenje dubokih bušotinskih koaksijalnih izmjenjivača topline (engl. deep pokazalo je da postoji potencijal revitalizacije napuštenih naftnih, plinskih i istražnih bušotina na području Panonskog bazena, na primjeru jedne duboke bušotine. Pregledom bušotinskog fonda utvrđeno je da u prosjeku dubine bušotina dosežu do 4000 m. Iznimno su na određenim područjima izrađene istraživačke bušotine, dubina većih od 4000 m, kao npr. Pčelić-1, Hrvatsko zagorje-1 i sl. Pregledom bušotinskog fonda za potrebe izrade nove karte geotermalnih gradijenta ustanovljeno je da se dubina većine odabranih

bušotina kreće od 1000 do 4000 m, a tek manji broj njih je dubina većih od 4000 m. Na odabranim bušotinama iz bušotinskog fonda ustanovljeni su i tipični promjeri II. tehničke kolone od 244,5 mm. Nešto manji broj bušotina je opremljen na način da je u dijelu bušotine ugrađena i III. tehnička kolona, najčešće promjera 177,8 mm. Zbog toga je, za potrebe određivanja dostupne toplinske energije na području Panonskog bazena RH, kao tipična vrijednost promjera II. tehničke kolone odabrana vrijednost od 244,5 mm dok je tipični promjer bušotine u tom slučaju 311 mm. Za potrebe analize dostupne toplinske energije radom dubokih koaksijalnih izmjenjivača odabrane dubine kreću se u rasponu od 1500 do 4000 m, uz korak od 500 m. Iz karte geotermalnih gradijenta (Slika 5.10.) vidljivo je da vrijednosti variraju od minimalnih 0,030 °C/m pa sve do maksimalnih 0,074 °C/m. Zbog toga su za potrebe određivanja dostupne toplinske energije odabrani geotermalni gradijenti u rasponu od 0,034 – 0,050 °C/m, kao oni koji se najčešće javljaju na području Panonskog bazena, u proizvoljnim koracima po 0,004°C/m. Osim dubine i geotermalnog gradijenta analiza, je rađena i za promjenu vrijednosti protoka, u rasponu od 10 l/s do 30 l/s, po koracima od 5 l/s, za svaki od slučajeva geotermalnog gradijenta i dubine. Navedene promjene parametara primijenjene su i kod modeliranja slučaja konstantnog i varijabilnog toplinskog opterećenja. Kako je modeliranje na primjeru bušotine Pčelić-1 pokazalo povoljnije rezultate pod pretpostavkom izoliranog tubinga, isto je pretpostavljeno i za naredne slučajeve. Pretpostavljena je izvedba izolacije na način da je postavljena cijev u cijevi, dok se izolacija postiže stvaranjem vakuuma u međuprostoru pomoću pumpe. Termogeološki parametri su uzeti u obzir kao prosjek po cijeloj duljini bušotine, za svaku od pretpostavljenih dubina, dok su parametri bušotine i izoliranog bušotinskog izmjenjivača dani u tablici 7.2.

Tablica 7.1. Geometrijski parametri tipičnog bušotinskog koaksijalnog izmjenjivača

Parametri bušotine		**Vrijednost**	**Mj. jedinica**
Vanjska cijev – vanjski promjer	D_o^{1o}	244,5	mm
Vanjska cijev – unutarnji promjer	D_i^{1o}	216,8	mm
Unutarnja cijev –vanjski promjer*	D_o^{2i}	178,0	mm
Unutarnja cijev –unutarnji promjer*	D_o^{2o}	152,0	mm
Unutarnja cijev –vanjski promjer**	D_i^{3i}	127,0	mm
Unutarnja cijev –unutarnji promjer**	D_o^{3i}	116,0	mm
Promjer bušotine	D_b	311,0	mm
Toplinska vodljivost cementa	λ_c	2,30	W/m°C

*vanjska cijev za održavanje izolacije

**unutarnja cijev za održavanje izolacije – protok fluida

Za cirkulaciju radnog fluida u bušotini potreban je rad cirkulacijske pumpe. Njezin rad zavisi od ukupnog pada tlaka u bušotini, odnosno otpora protjecanju koje fluid mora svladati. Za navedene uvjete protjecanja fluida u koaksijalnom bušotinskom izmjenjivaču topline, dakle pri različitim dubinama i iznosima protoka, izračunati su iznosi pada tlaka u unutarnjoj i vanjskoj cijevi, s obzirom na različite promjere. Za izračun je korištena uobičajena Darcy-Weisbach relacija (White, 1994), pri uvjetima hrapavosti površine cijevi tipične za obrađene čelične cijevi od 0,035 mm, te pri uvjetima gustoće i viskoznosti određene za vodu pri standardnim uvjetima (Tablica 7.3.) pa su navedene vrijednosti uzete kao konstanta. U realnim uvjetima svojstva vode se mijenjaju s porastom temperature, odnosno protjecanjem kroz bušotinski izmjenjivač. Chen i suradnici proveli su analizu utjecaja promjene svojstava vode s temperaturom na ušću i pri dnu bušotine dubine 2600 m, te su ustanovili da promjena toplinskih svojstava vode pridonosi razlici od 0,9% kod koeficijenta otpornosti za utisnuti i proizvedeni fluid. Navedena razlika rezultira promjenom od 1,8% kod izračuna bušotinskog otpora, te se za potrebe proračuna mogu uzeti navedene fiksne vrijednosti (Chen et al., 2019).

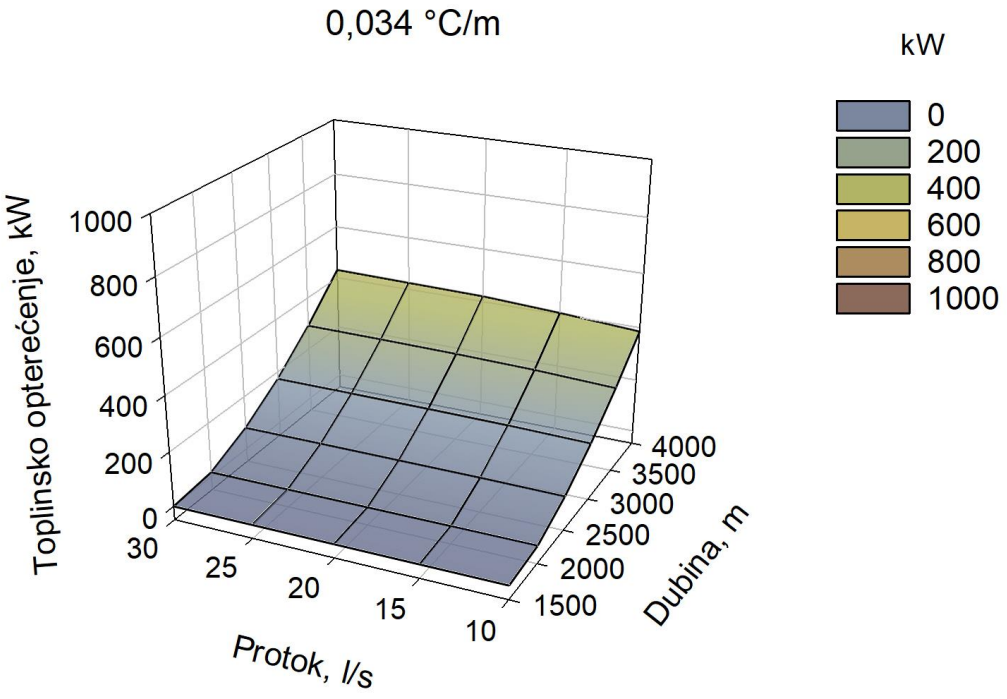
Tablica 7.2. Parametri fluida u bušotinskom koaksijalnom izmjenjivaču

Parametri fluida u bušotinskom izmjenjivaču		Vrijednost	Mj. jedinica
Toplinska vodljivost vode	λ_f	0,59	W/m°C
Obujamska specifična toplina	ρc_f	216,8	mm
Vanjski promjer – unutarnja cijev*	D_i^i	178,0	mm
Promjer bušotine	D_b	311,0	mm
Toplinska vodljivost cementa	λ_c	2,30	W/m°C

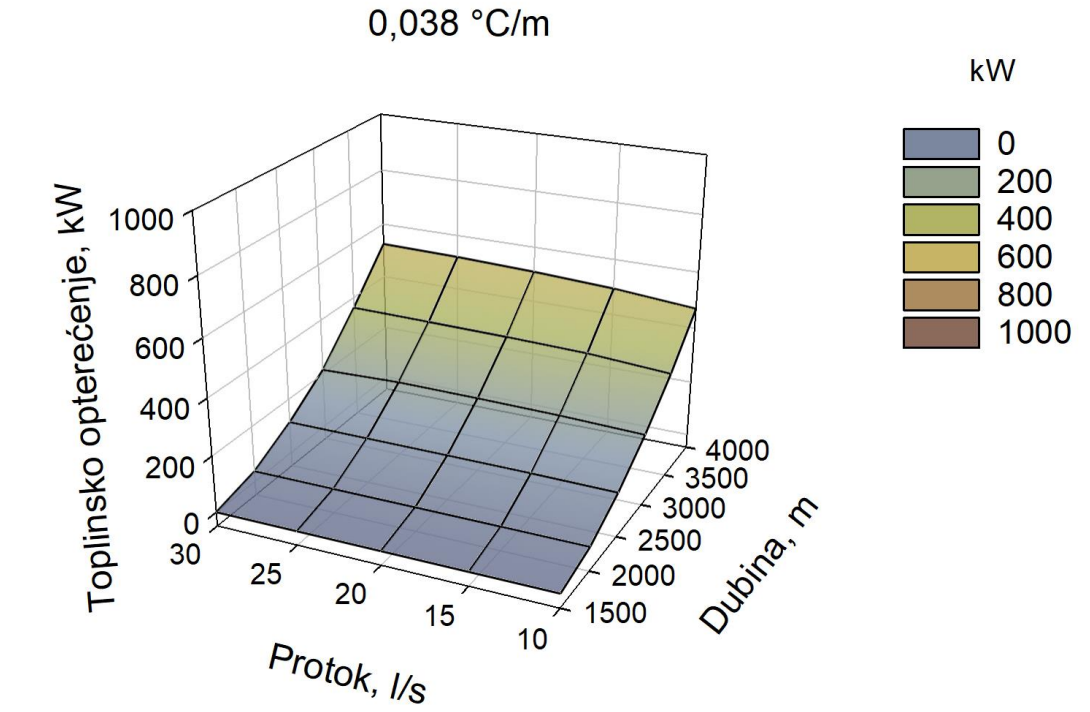
7.1.1. Rezultati određivanja toplinskih opterećenja iz dubokih bušotinskih izmjenjivača topline pri konstantnom opterećenju

Kod određivanja toplinskog prinosa dubokih bušotinskih izmjenjivača topline pri konstantnim opterećenjima zadaje se toplinsko opterećenje (kW_t) u jednakom iznosu za svaki mjesec kroz 20 godina rada izmjenjivača. Na slikama 7.1.-7.5., prikazani su rezultati i iznosi toplinskih prinosa, iskazani kao toplinsko opterećenje (kW_t). Za određivanje dostupnog prinosa

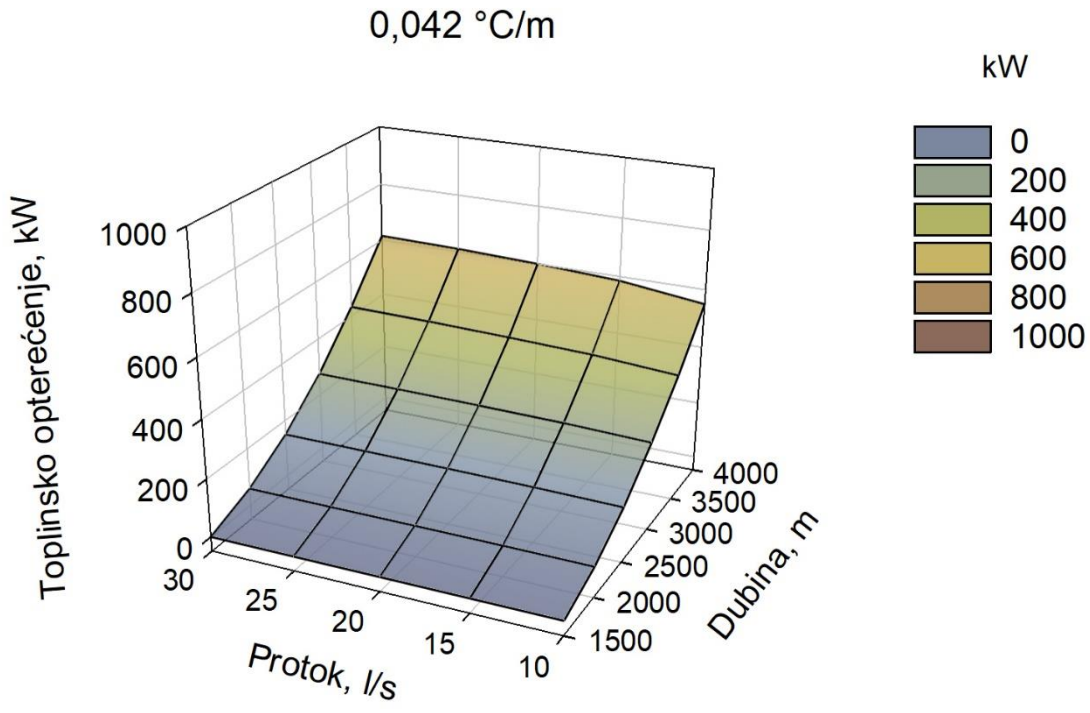
bušotinskog izmjenjivača pretpostavljena su dva tipična rada sustava za opskrbu toplinskom energijom – direktno grijanje ili upotreba dizalica topline. Kod direktnog sustava grijanja objekata, toplina sadržana u radnom fluidu izmjenjivača prenosi se na radni fluid na strani potrošača pomoću pločastih izmjenjivača topline. Kod direktnog sustava grijanja koji koristi npr. ventilokonvektore ili niskotemperaturne radijatore, mogu se pretpostaviti radni uvjeti LST/ELT 45/40. U skladu s navedenim, tražena su toplinska opterećenja pri kojima temperatura fluida bušotinskog izmjenjivača na izlazu iz pločastog izmjenjivača (tj. pothlađeni ulazni fluid u izmjenjivač) nije manja od 45 °C. S obzirom da programski paket GHX računa srednje temperature fluida u izmjenjivaču, izlazna i ulazna temperatura izračunaju se koristeći relaciju 6-2.



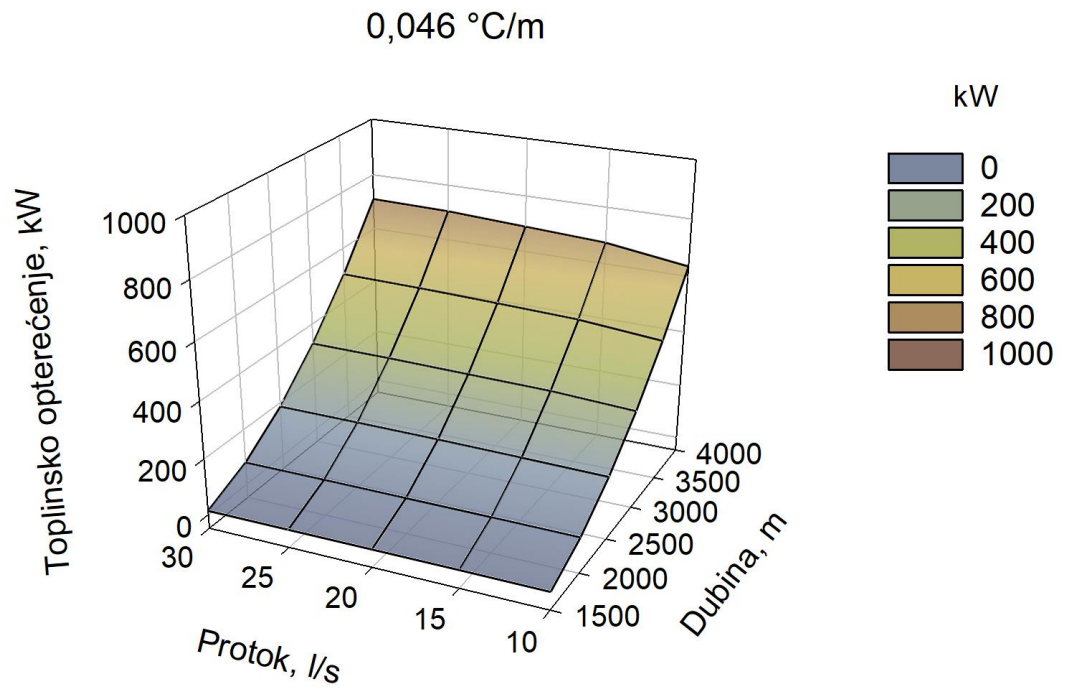
Slika 7.1. *Rezultati dostupnih toplinskih opterećenja pri konstantnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim LST do 45 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,034 °C/m, za različite uvjete dubine i protoka*



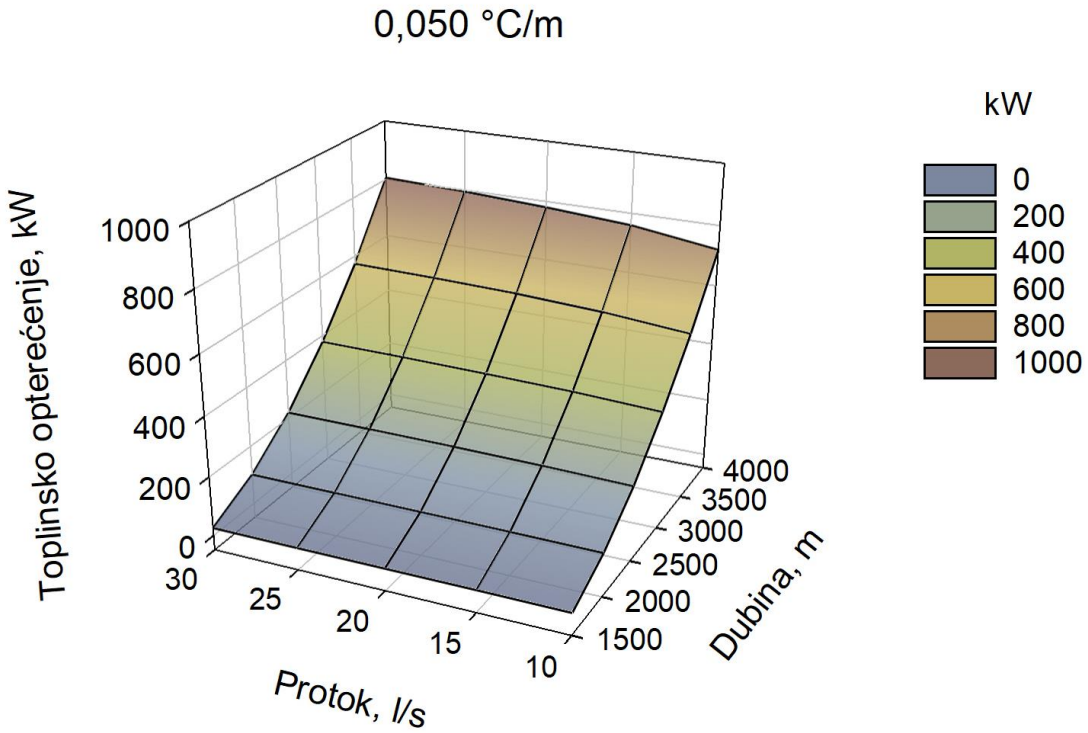
Slika 7.2. *Rezultati dostupnih toplinskih opterećenja pri konstantnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim LST do 45 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,038 °C/m za različite uvjete dubine i protoka*



Slika 7.3. *Rezultati dostupnih toplinskih opterećenja pri konstantnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim LST do 45 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,042 °C/m za različite uvjete dubine i protoka*

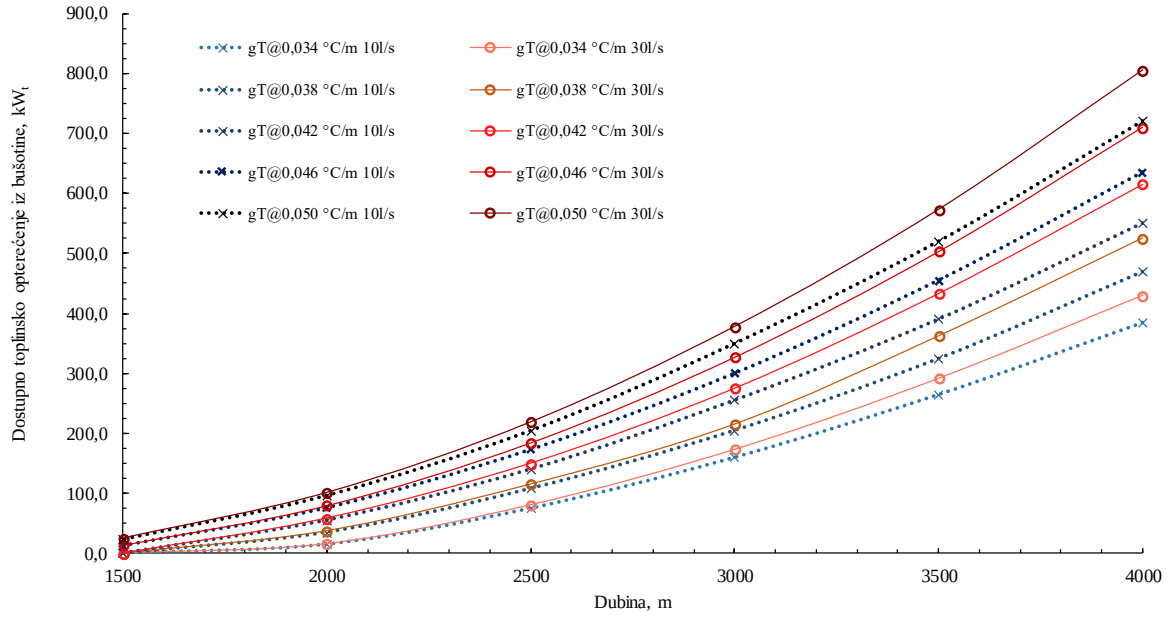


Slika 7.4. *Rezultati dostupnih toplinskih opterećenja pri konstantnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim LST do 45 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,046 °C/m za različite uvjete dubine i protoka*



Slika 7.5. *Rezultati dostupnih toplinskih opterećenja pri konstantnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim LST do 45 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,050 °C/m za različite uvjete dubine i protoka*

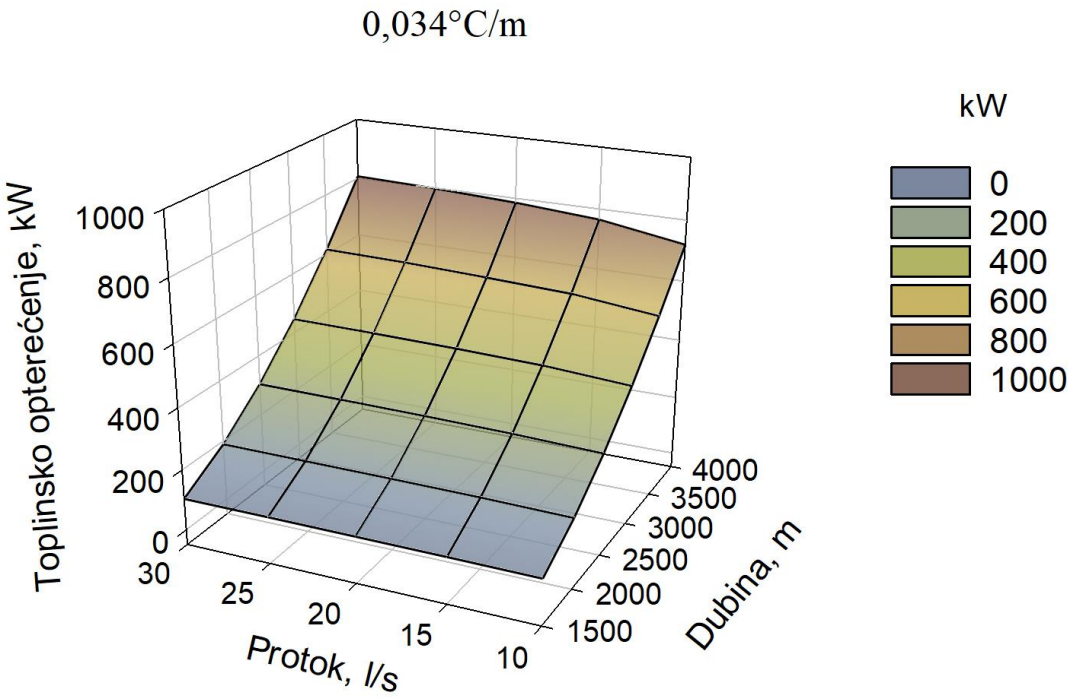
Dijagrami prikazuju promjenu dostupnog toplinskog opterećenja za zadani geotermalni gradijent pri promjenama protoka i dubine u skladu s tablicom 7.1. Iz dijagrama je vidljivo da pod zadanim uvjetima dostupno toplinsko opterećenje raste s porastom gradijenta, protoka i dubine. Potrebno je naglasiti da u uvjetima dubine 1500 m, pri nižim geotermalnim gradijentima od 0,034 °C/m, 0,038 °C/m i 0,042 °C/m nisu ostvarene temperature pogodne za rad sustava pri pretpostavljenim uvjetima temperature rada sustava, te su ti podaci iskazani kao nule. Tako je kod gradijenta od 0,034 °C/m, dubine od 2000 m i protoka od 10 l/s dostupno toplinsko opterećenje u iznosu od tek 15 kW_t. Pri istim uvjetima gradijenta i protoka, ali pri dubini od 4000 m, dostupno toplinsko opterećenje raste na 385 kW_t. Za slučaj odabranog najvišeg gradijenta od 0,050 °C/m, pri najmanjoj dubini od 1500 m i protoku od 10 l/s, dostupno toplinsko opterećenje iznosi 24 kW_t, dok pri istim uvjetima protoka i gradijenta, ali pri dubini od 4000 m, dostupno opterećenje raste do 720 kW_t. Za usporedbu, pri istom gradijentu i dubini od 4000 m, ali pri maksimalnom protoku od 30 l/s, dostupno toplinsko opterećenje raste do 805 kW_t. Na slici 7.6. prikazani su odnosi dostupnih toplinskih opterećenja za minimalnu i maksimalnu vrijednost protoka pri različitim vrijednostima geotermalnog gradijenta i dubina.



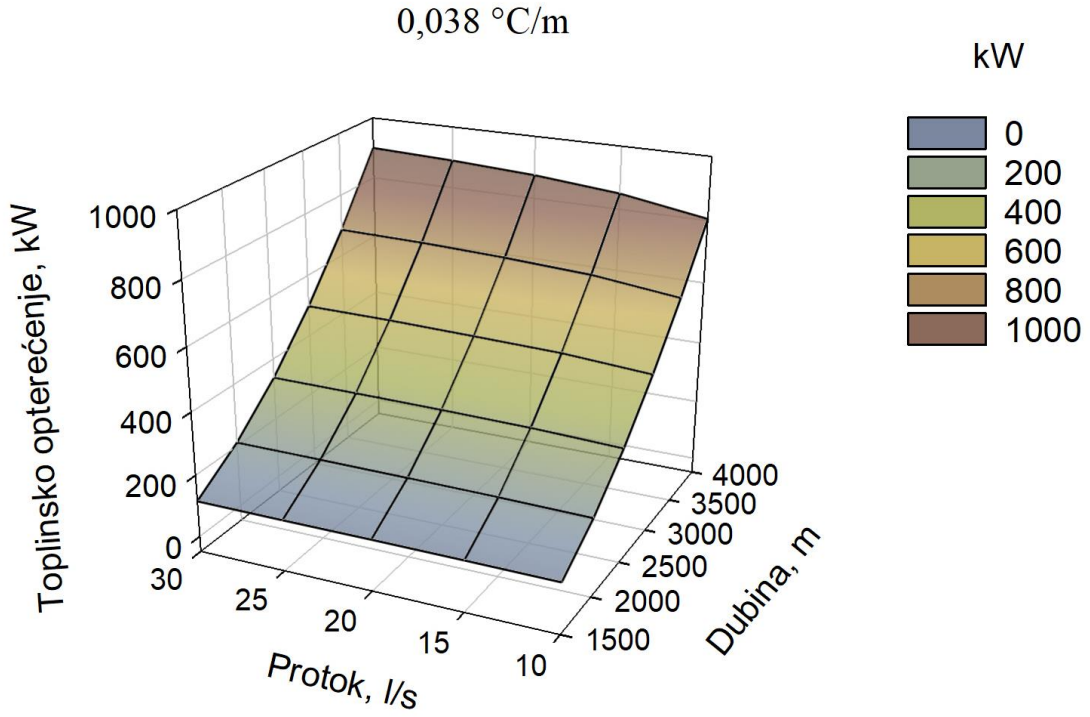
Slika 7.6. *Usporedba vrijednosti dostupnih toplinskih opterećenja pri konstantnom režimu rada za direktnu upotrebu za minimalnu i maksimalnu vrijednost protoka, pri LST 45 °C*

Kao druga mogućnost javlja se korištenje dizalica topline, koje zahtijevaju rad pri nižim temperaturnim režimima. Za ovaj slučaj pretpostavljena je vrijednost od LST od 10 °C. Kao što je već navedeno, pretpostavlja se rad sustava ujednačeno kroz cijelu godinu, unutar 20 godina.

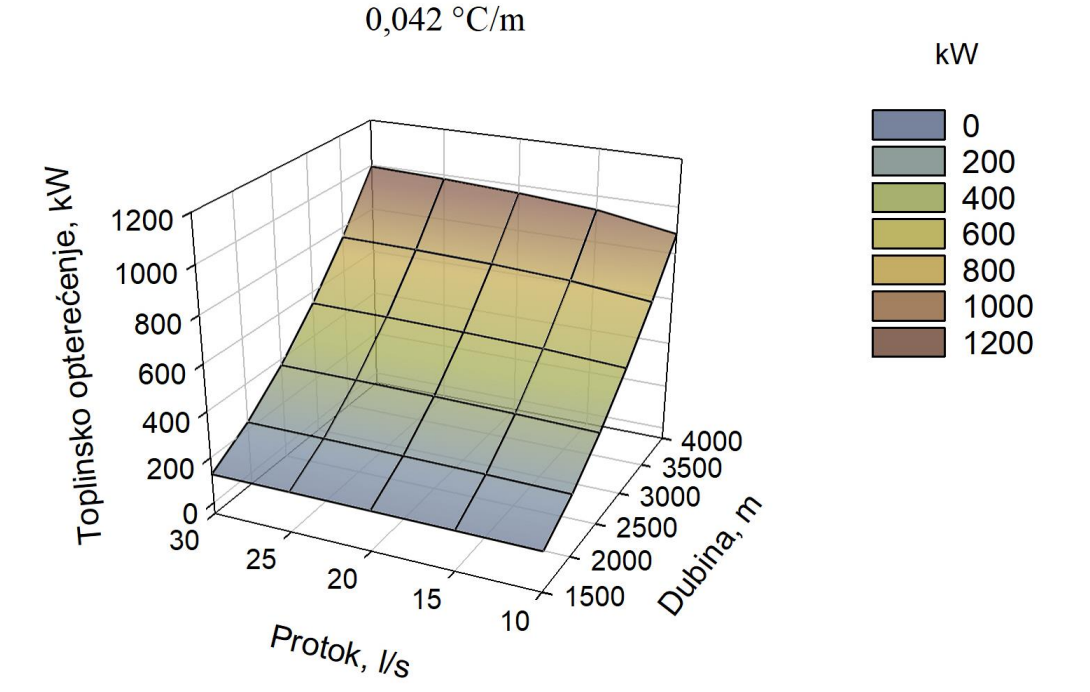
Zbog ograničenja izvedbe sustava i u ovom slučaju potrebno je ugraditi pločasti izmjenjivač topline prije ulaza u dizalicu topline. Procjena je izvedena za različite vrijednosti dubina, protoka i geotermalnog gradijenta, kao i za prethodni slučaj toplinskih opterećenja, te su rezultati prikazani na slikama 7.7. – 7.11.



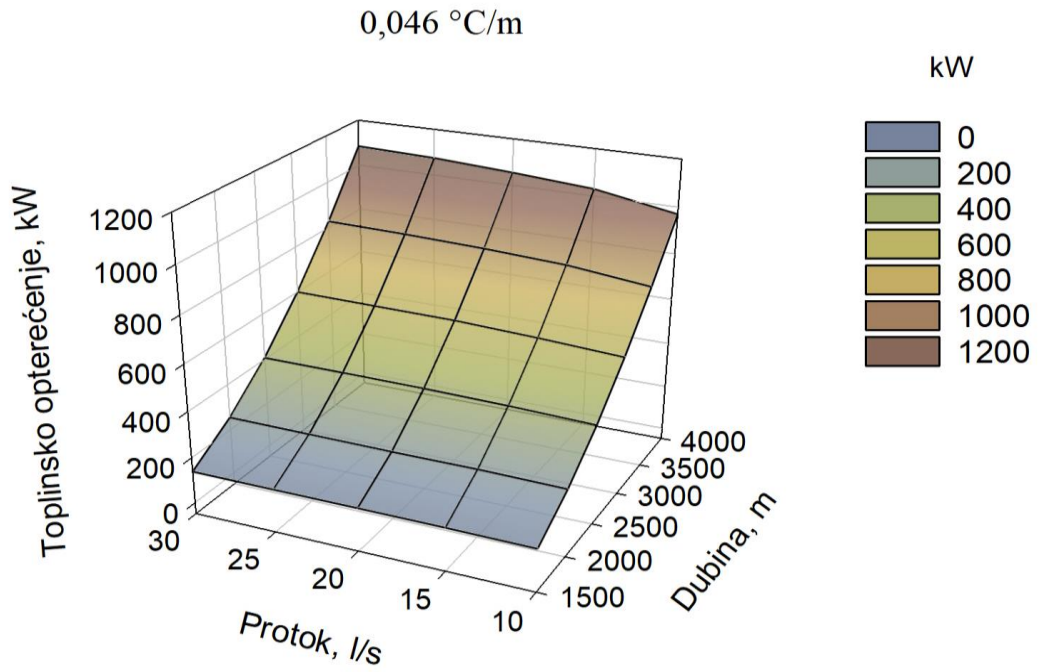
Slika 7.7. *Rezultati dostupnih toplinskih opterećenja pri konstantnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim LST do 10 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,034 °C/m za različite uvjete dubine i protoka*



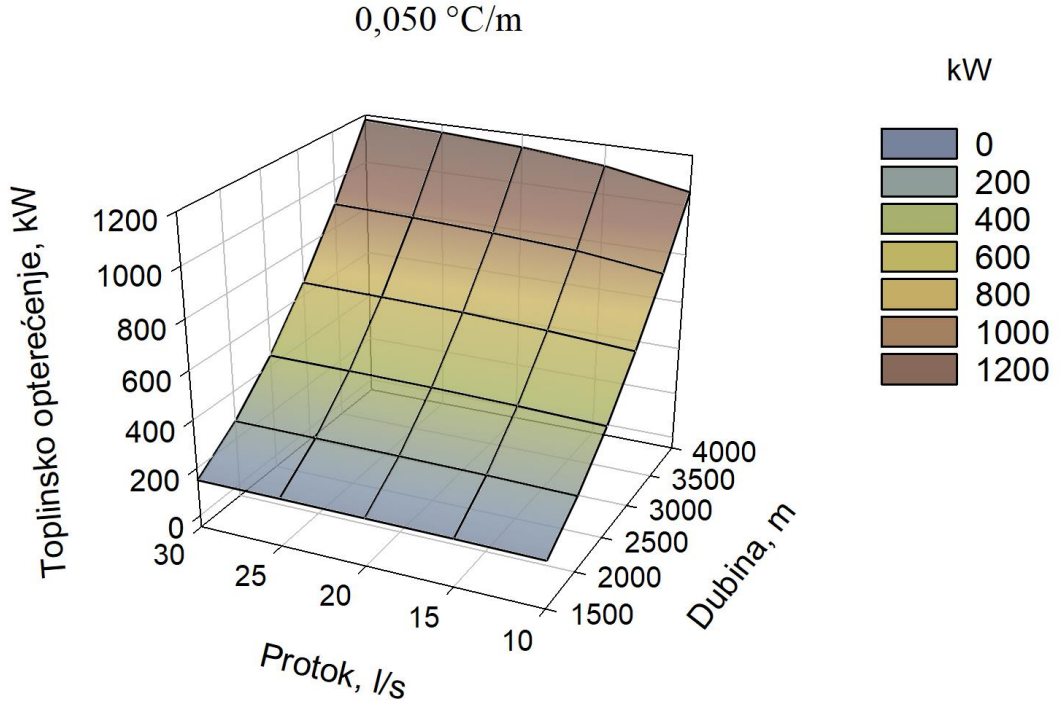
Slika 7.8. *Rezultati dostupnih toplinskih opterećenja pri konstantnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim LST do 10 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,038 °C/m za različite uvjete dubine i protoka*



Slika 7.9. *Rezultati dostupnih toplinskih opterećenja pri konstantnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim LST do 10 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,042 °C/m za različite uvjete dubine i protoka*



Slika 7.10. *Rezultati dostupnih toplinskih opterećenja pri konstantnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim LST do 10 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,046 °C/m za različite uvjete dubine i protoka*

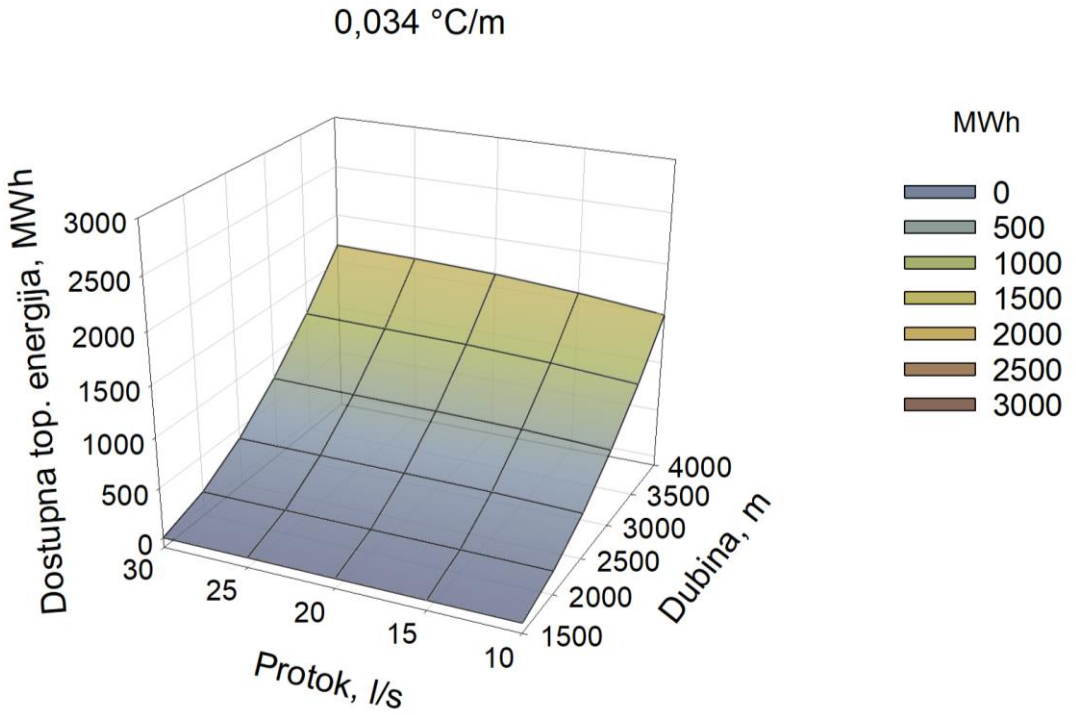


Slika 7.11. *Rezultati dostupnih toplinskih opterećenja pri konstantnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim LST do 10 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,050 °C/m za različite uvjete dubine i protoka*

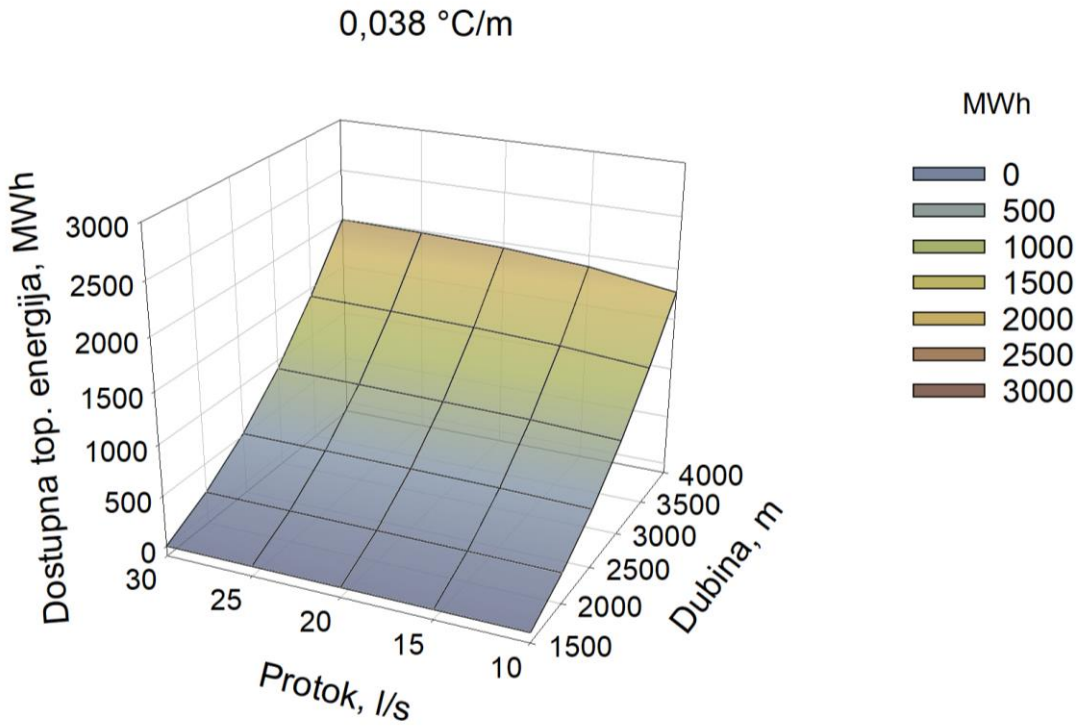
Kako se radi o sustavu s dizalicama topline, uvjet temperaturnog režima je niži. U ovom slučaju, pretpostavljena je temperatura povrata pothlađenog fluida LST od 10 °C. Kao i kod prethodnog slučaja temperaturnog režima, iz dijagrama je vidljivo da se dostupna toplinska opterećenja mijenjaju s promjenom protoka, dubine bušotinskog izmjenjivača i geotermalnog gradijenta. S rastom vrijednosti protoka, dubine i geotermalnog gradijenta raste i dostupno toplinsko opterećenje. Za razliku od višeg temperaturnog režima, kod nižeg režima ostvarene temperature kod dubine od 1500 m su dovoljne da se zadovolji potrebni uvjet. Tako je kod dubine od 1500 m, protoka od 10 l/s i najnižeg odabranog gradijenta od 0,034°C/m moguće ostvariti oko 100 kW_t dok je kod istih uvjeta dubine i protoka, ali uz vrijednost gradijenta 0,050 °C/m taj iznos oko 145 kW_t. Kod najveće odabrane dubine od 4000 m vrijednosti toplinskih opterećenja za jednake uvjete protoka i geotermalnog gradijenta se kreću od 720 do 1055 kW_t. Najviše toplinsko opterećenje ostvareno je kod najvećeg protoka, najveće dubine i najviše odabrane vrijednosti geotermalnog gradijenta, u iznosu od oko 1180 kW_t.

7.1.2. Rezultati određivanja toplinskih opterećenja iz dubokih bušotinskih izmjenjivača topline pri varijabilnim opterećenjima

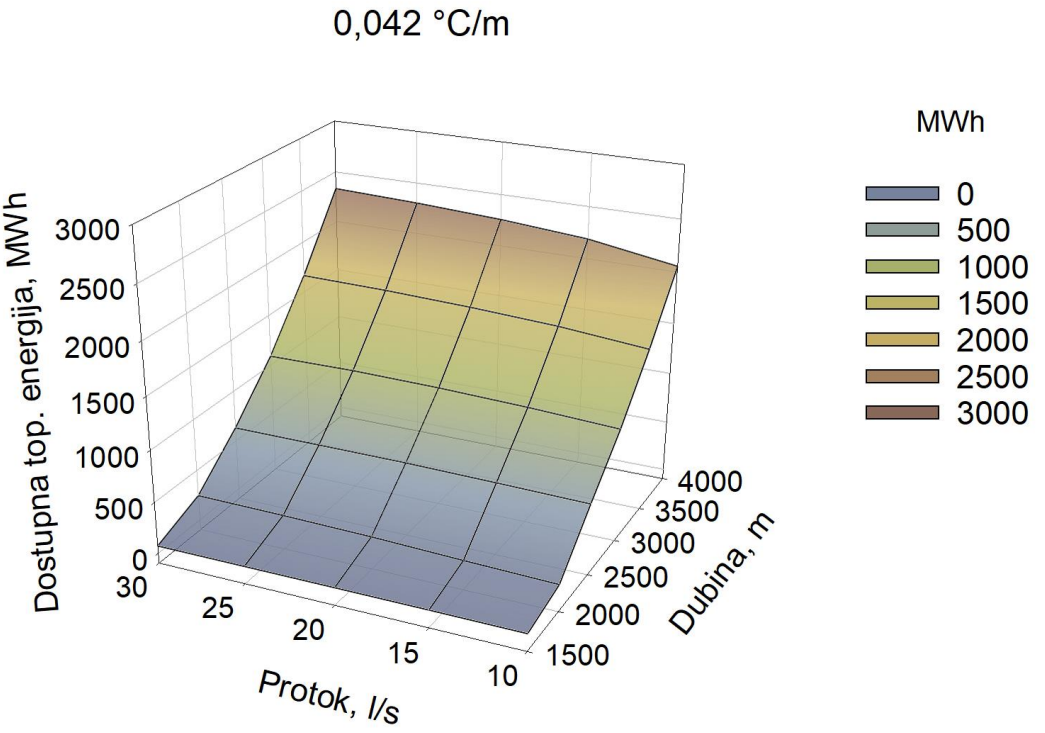
Kao i kod primjera na bušotini Pčelić-1, druga, i u realnosti češća, mogućnost korištenja dubokih bušotinskih izmjenjivača je varijabilna, odnosno sezonska. Ona zavisi od klimatskih parametara, odnosno sezone grijanja. Klimatski parametri, te broj sati rada sustava, pretpostavljeni su isto kao i kod bušotine Pčelić-1, odnosno 1500 h. Kao i kod konstantnih opterećenja, razmatrala su se dva slučaja temperaturnih režima za rad sustava unutar 20 godina: viši, kod kojeg je srednja temperatura u izmjenjivaču 40 °C i niži sa srednjom temperaturom od 10 °C. Kao i kod konstantnog opterećenja, dobiveni su rezultati pri promjenama protoka od 10-30 l/s (uz korak od 5 l/s), dubine od 1500 – 4000 m (korak od 500 m) i kod različitih geotermalnih gradijenata, od 0,034 do 0,050 °C/m (uz korak od 0,004 °C/m). Na slikama 7.12-7.16. vidljivi su rezultati za viši temperaturni razred, dok su na slikama 7.17.-7.21. vidljivi rezultati dostupne toplinske energije kod nižeg temperaturnog razreda.



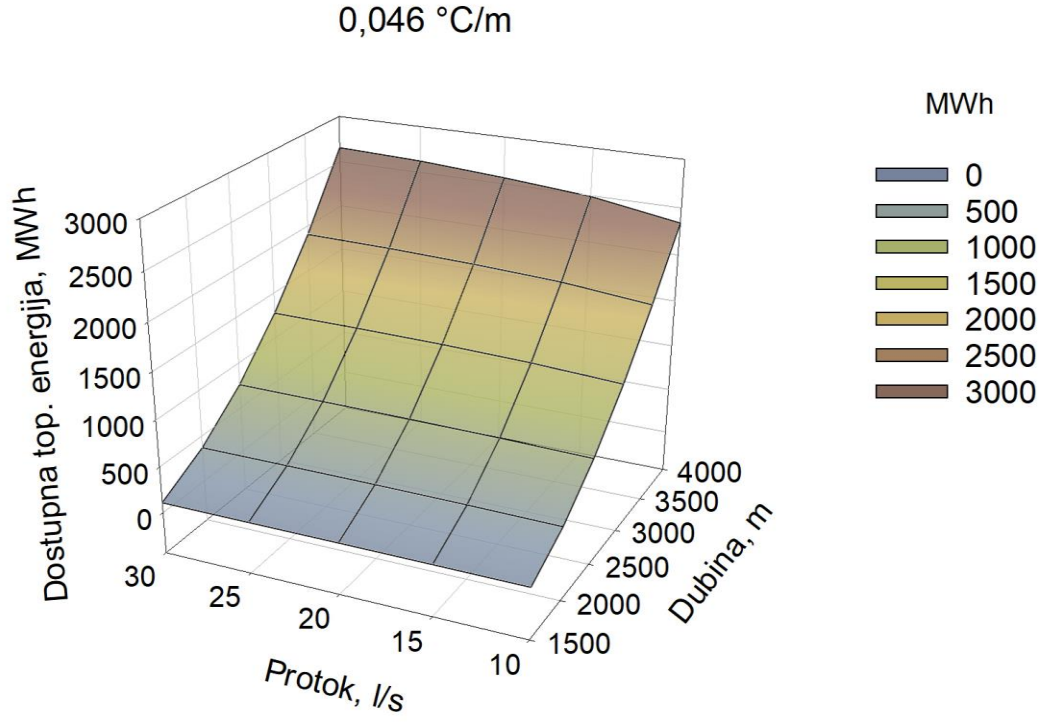
Slika 7.12. *Rezultati dostupne toplinske energije pri varijabilnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim 40 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,034 °C/m za različite uvjete dubine i protoka*



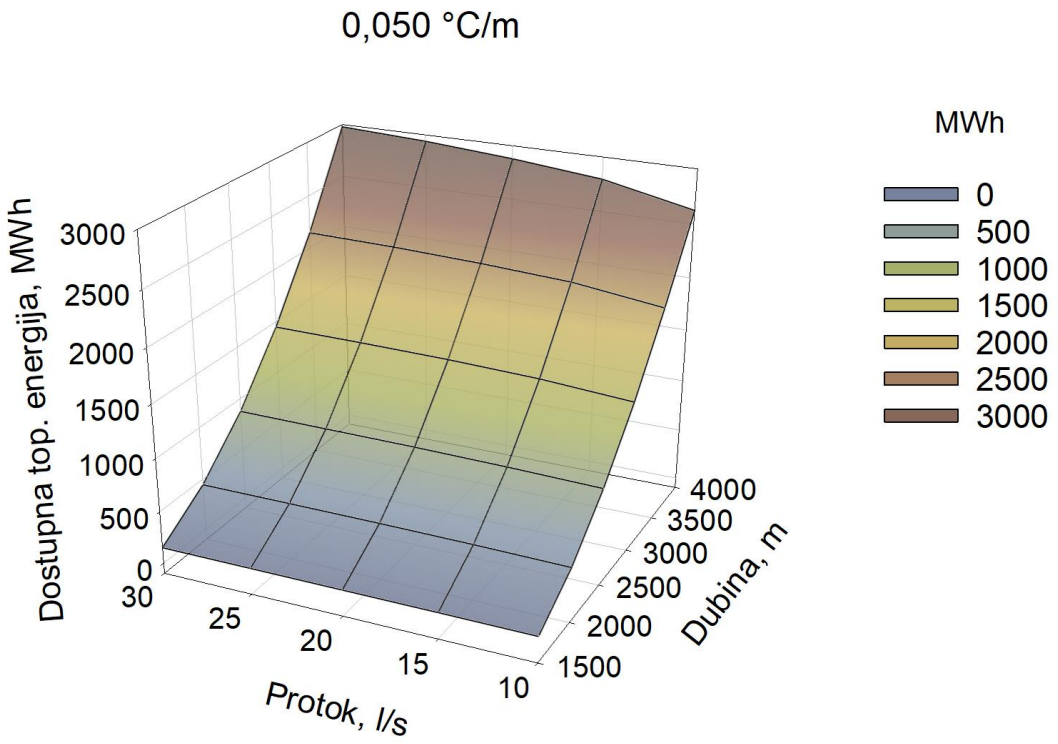
Slika 7.13. *Rezultati dostupne toplinske energije pri varijabilnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim 40 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,038 °C/m za različite uvjete dubine i protoka*



Slika 7.14. *Rezultati dostupne toplinske energije pri varijabilnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim 40 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,042 °C/m za različite uvjete dubine i protoka*



Slika 7.15. *Rezultati dostupne toplinske energije pri varijabilnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim 40 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,046 °C/m za različite uvjete dubine i protoka*

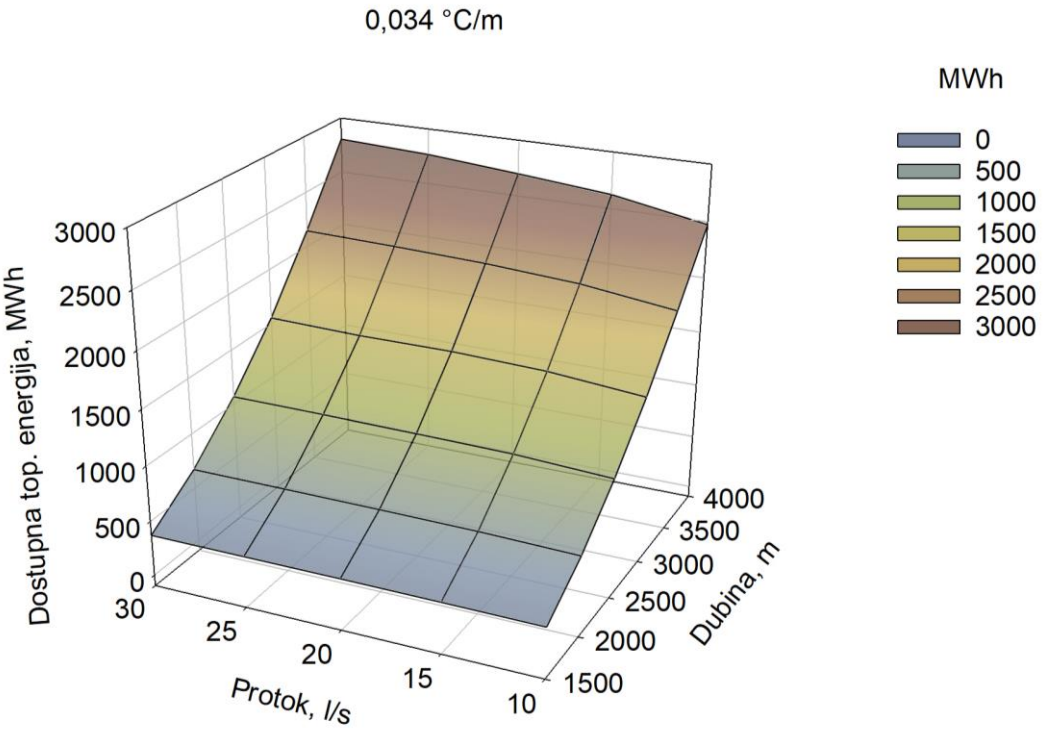


Slika 7.16. *Rezultati dostupne toplinske energije pri varijabilnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim 40 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,050 °C/m za različite uvjete dubine i protoka*

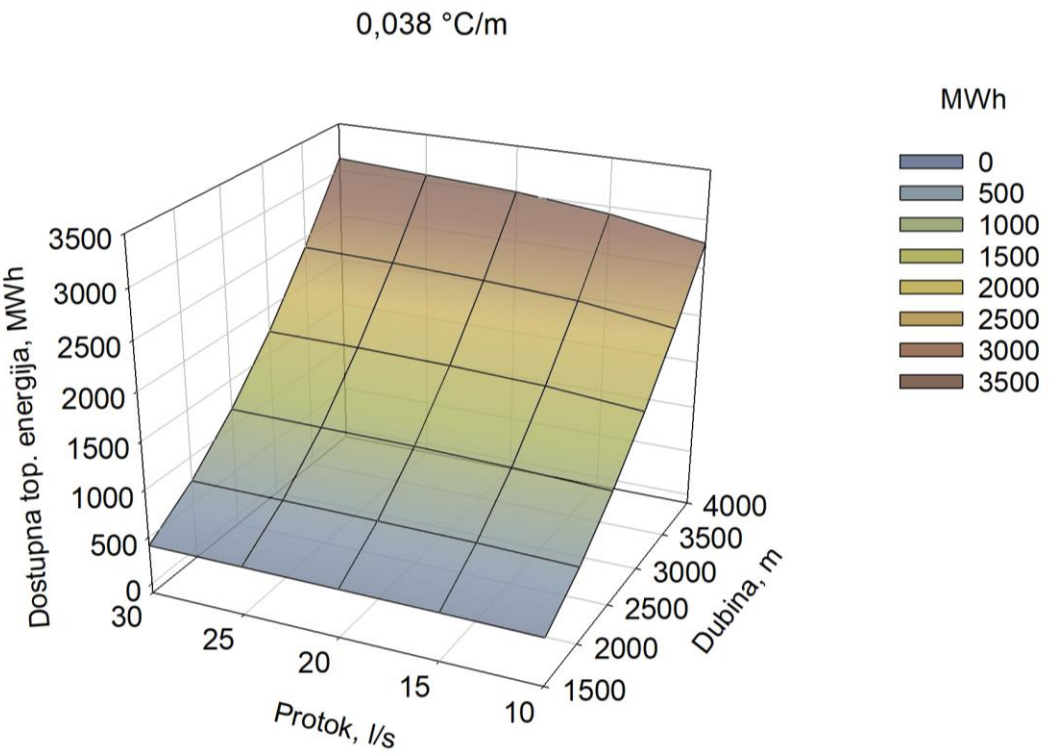
Kako se kod varijabilnih opterećenja sustav ne koristi kroz ljetni period, u tim mjesecima dolazi do tzv. oporavka. Modeliranje bušotine Pčelić-1 pokazalo je da se u tim periodama temperatura stijenske mase oko bušotinskog izmjenjivača približava vrijednostima statičke temperature. Stoga će na početku svake sezone grijanja sustav imati na raspolaganju veće količine toplinske energije, nego u slučaju kontinuiranog opterećenja. U slučaju dostupne bušotine na dubini od 1500 m i kod nižih geotermalnih gradijenata od 0,034 i 0,038 °C/m, ostvarene temperature nisu pogodne za direktno iskorištavanje toplinske energije pa su te vrijednosti prikazane kao 0, kao i u slučaju odabira višeg temperaturnog razreda i kontinuiranog opterećenja. Najmanji iznos dostupne toplinske energije se ostvaruje na toj dubini kod nešto višeg geotermalnog gradijenta, od 0,042 °C/m i protoka od 10 l/s, u iznosu od 68 MWh_t. Pri istim uvjetima gradijenta i dubine, a povećanjem protoka na 30 l/s, dostupna količina neznatno raste te iznosi 72 MWh_t. Pri najvećem odabranom gradijentu (0,050 °C/m), protoku od 10 l/s i istoj dubini (1500 m), dostupna količina energije iznosi 146 MWh_t, dok s povećanjem protoka na 30 l/s toplinska energija raste do 152 MWh_t. Kod najveće odabrane dubine od 4000 m, najmanjeg odabranog gradijenta od 0,034 l/s i protoka od 10 l/s dostupna toplinska energija iznosi oko 1490 MWh_t, dok se povećanjem protoka na 30 l/s taj iznos povećava do 1680 MWh_t. Kod odabranog najvećeg gradijenta od 0,050 °C/m, protoka od 10 l/s te pri navedenoj odabranoj

najvećoj dubini, dostupna toplinska energija iznosi oko 2620 MWh_t, dok se povećanjem protoka na 30 l/s taj iznos povećava do oko 2980 MWh_t.

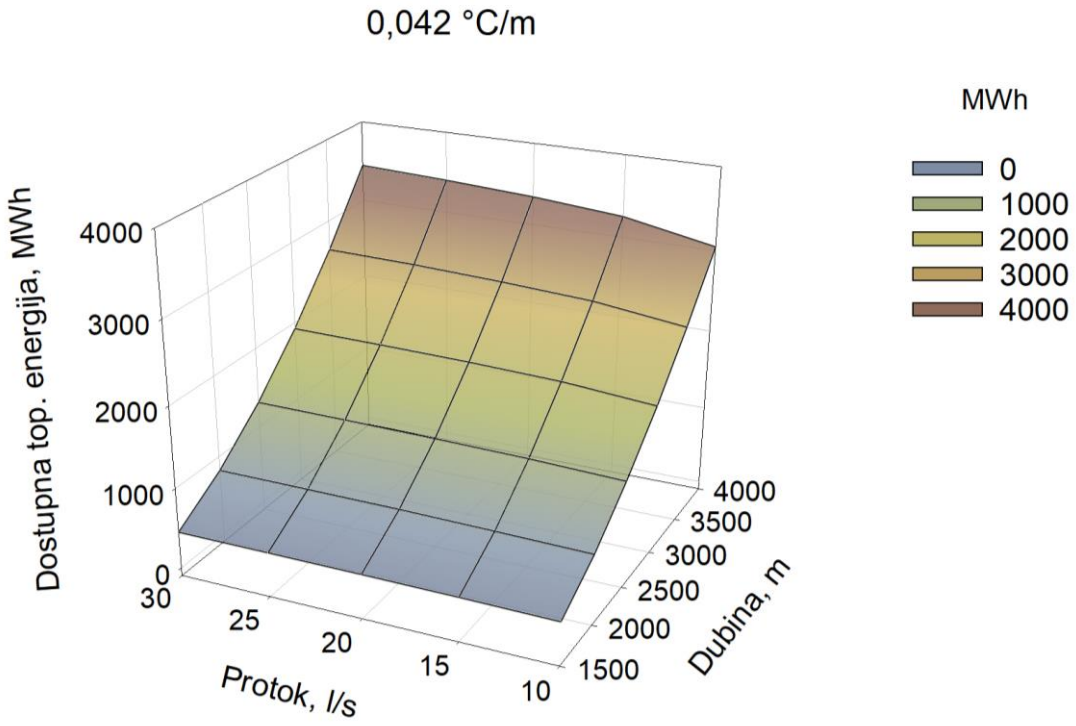
Odabirom nižeg temperaturnog režima, pri čemu je kao uvjet ispunjena srednja temperatura fluida u bušotinskom izmjenjivaču od 10°C pri vršnoj snazi, i korištenjem dizalica topline, dostupna toplinska energija će biti viša u odnosu na direktni sustav i viši temperaturni režim, te su rezultati vidljivi na slikama 7.17.-7.21.



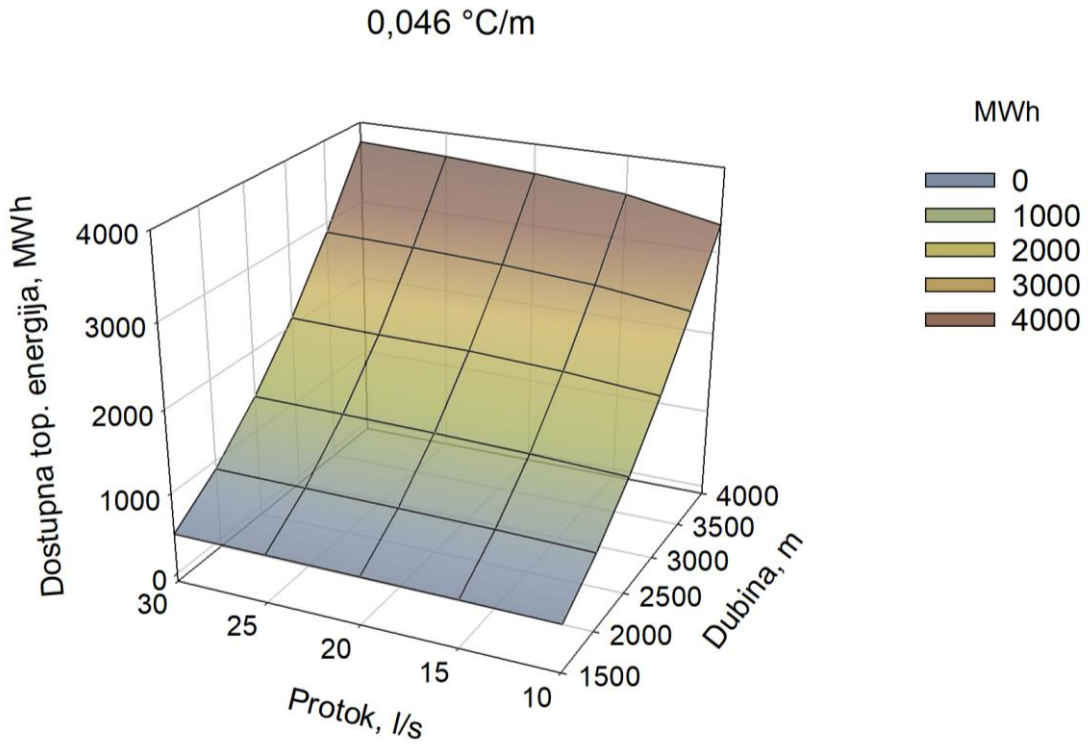
Slika 7.17. *Rezultati dostupne toplinske energije pri varijabilnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim 10 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,034 °C/m za različite uvjete dubine i protoka*



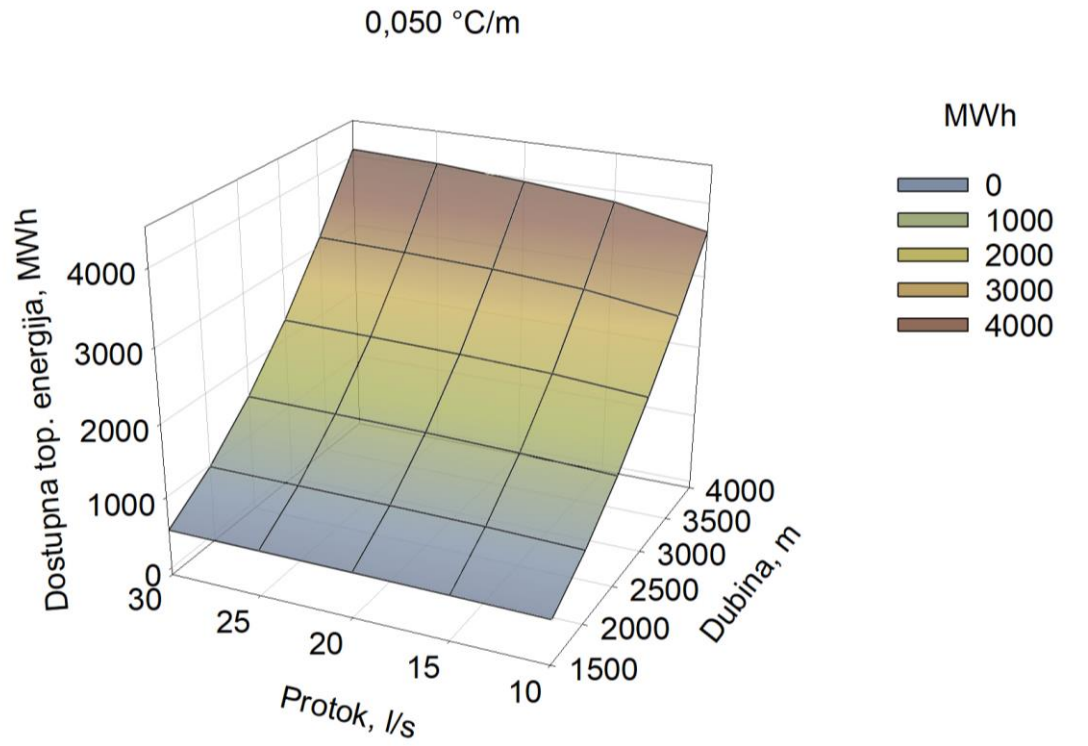
Slika 7.18. *Rezultati dostupne toplinske energije pri varijabilnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim 10 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,038 °C/m za različite uvjete dubine i protoka*



Slika 7.19. *Rezultati dostupne toplinske energije pri varijabilnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim 10 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,042 °C/m za različite uvjete dubine i protoka*



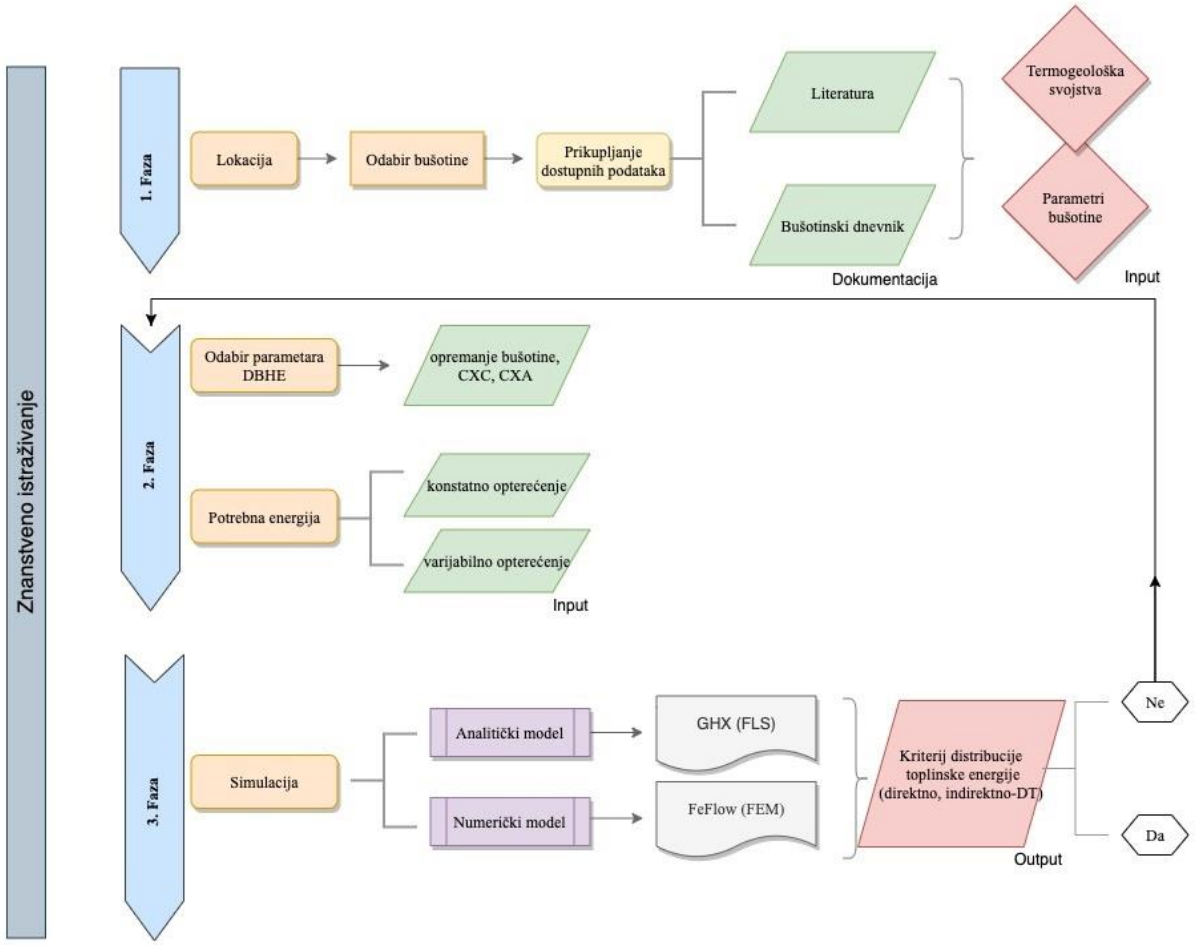
Slika 7.20. *Rezultati dostupne toplinske energije pri varijabilnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim 10 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,046 °C/m za različite uvjete dubine i protoka*



Slika 7.21. *Rezultati dostupne toplinske energije pri varijabilnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim 10 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,050 °C/m za različite uvjete dubine i protoka*

Dostupna toplinska energija ostvaruje najveće iznose pri nižem temperaturnom režimu sustava, odnosno pri korištenju dizalica topline. Temperature ostvarene na dubini od 1500 m, i prethodno spomenuta dva niža gradijenta, dovoljne su za iskorištavanje dostupne toplinske energije u ovom slučaju, te pri odabranom najnižem gradijentu i najmanjem protoku moguće je pridobiti 360 MWh_t. Povećanjem protoka na 30 l/s taj iznos se poveća do 373 MWh_t. Dostupna toplinska energija pri najvećem odabranog gradijentu od 0,050 °C/m, dubini 1500 m i protoku od 10 l/s iznosi 518 MWh_t, dok se taj iznos poveća na 539 MWh_t za povećani protok od 30 l/s. Povećanjem dubine na 4000 m moguće je ostvariti od 2475 MWh_t pri najniže odabranom gradijentu i protoku od 10 l/s, što raste do 2805 MWh_t pri povećanju protoka na 30 l/s. Najviši iznos dostupne toplinske energije ostvaruje se kod odabranog gradijenta od 0,050 °C/m i 30 l/s od 4095 MWh_t, te pada do 3615 MWh_t, pri padu protoka na 10 l/s. Na područjima gdje geotermalni gradijent prelazi odabranu najvišu vrijednost mogu se očekivati i više vrijednosti dostupne toplinske energije od ovdje prikazanih.

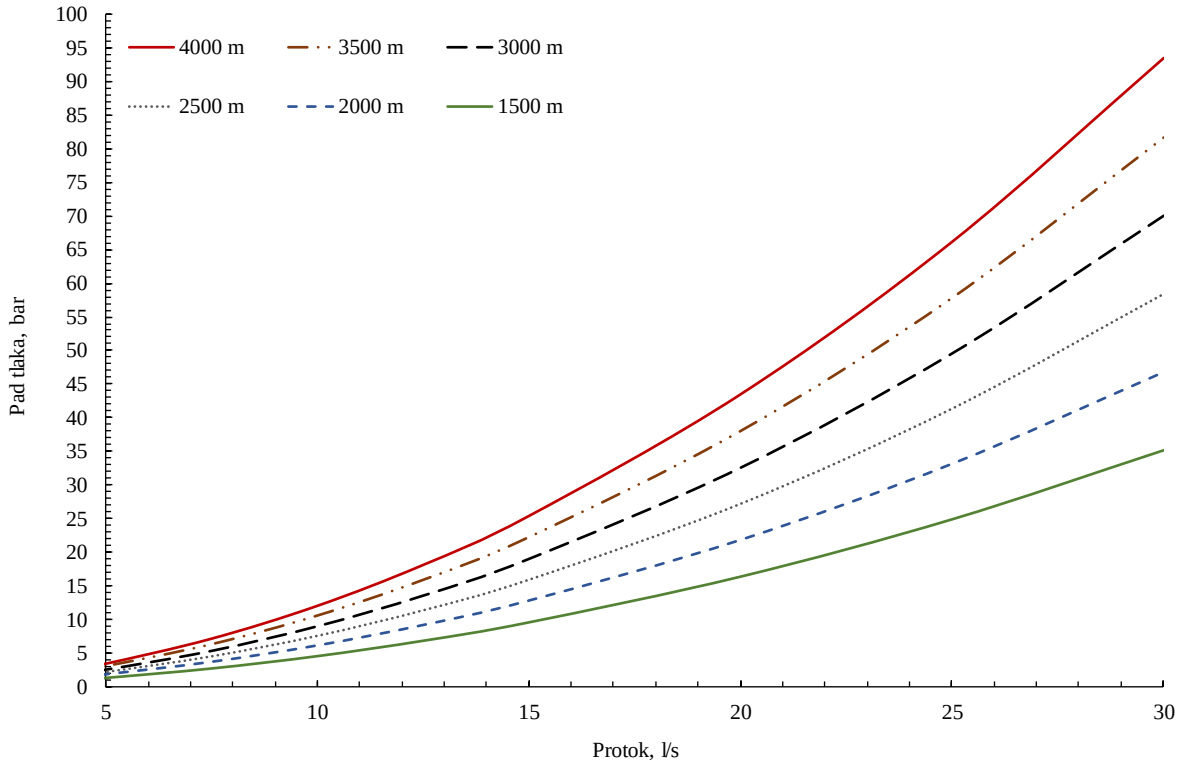
Na temelju primjera revitalizacije na jednoj bušotini i proračuna dostupne toplinske energije za različite parametre dubine, protoka i geotermalnog gradijenta, izrađen je model postupka kao osnova za buduće procjene dostupne toplinske energije korištenjem dubokih bušotinskih izmjenjivača topline (Slika 7.22.).



Slika 7.22. *Model za procjenu dostupne toplinske energije*

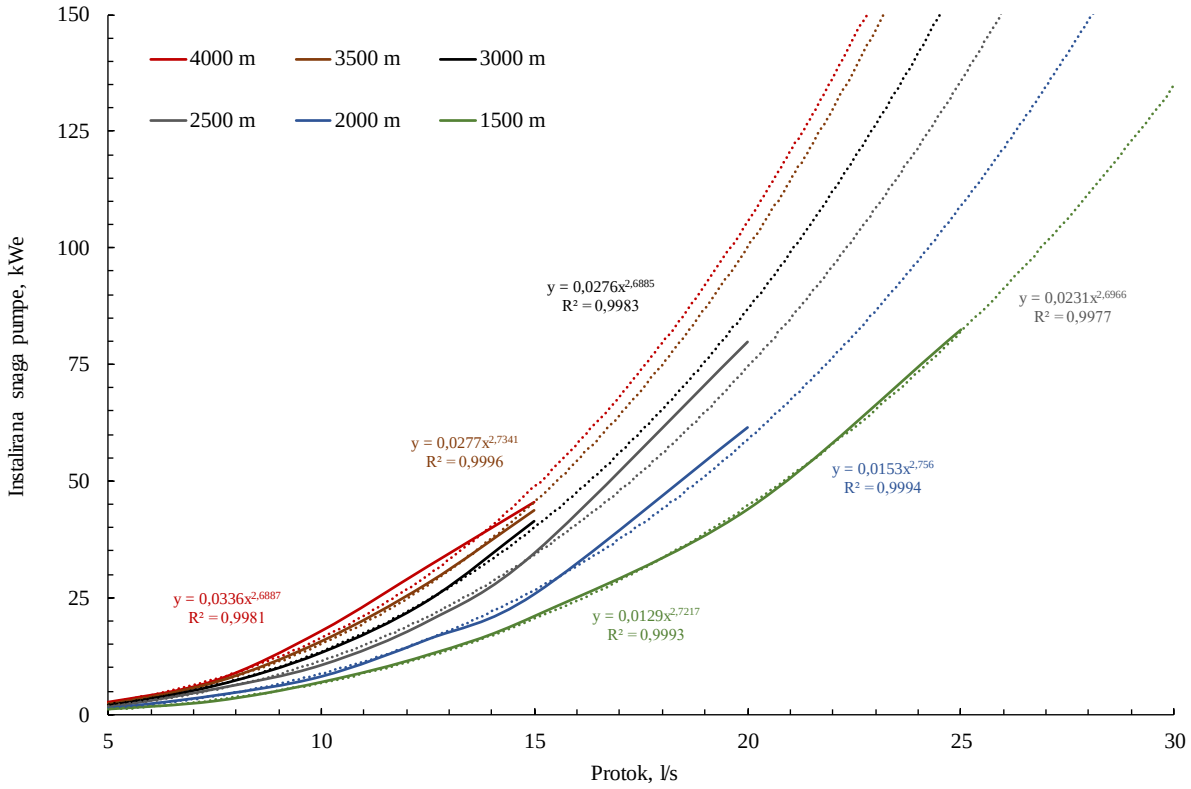
7.2. Tehnička ograničenja sustava – kriteriji za provođenje revitalizacije

Pad tlaka određen je za vrijednosti protoka od 5 do 30 l/s pri dubinama od 1500 do 4000 m u koracima od 500 m, za tipični bušotinski koaksijalni izmjenjivač geometrijskih karakteristika prikazanih tablicom 7.2. Na slici 7.23. prikazana je promjena pada tlaka u odnosu na zadani protok, od 5 do 30 l/s, pri pojedinoj dubini, te je vidljivo da porastom protoka rastu i vrijednosti pada tlaka pri svakoj od pretpostavljenih dubina.



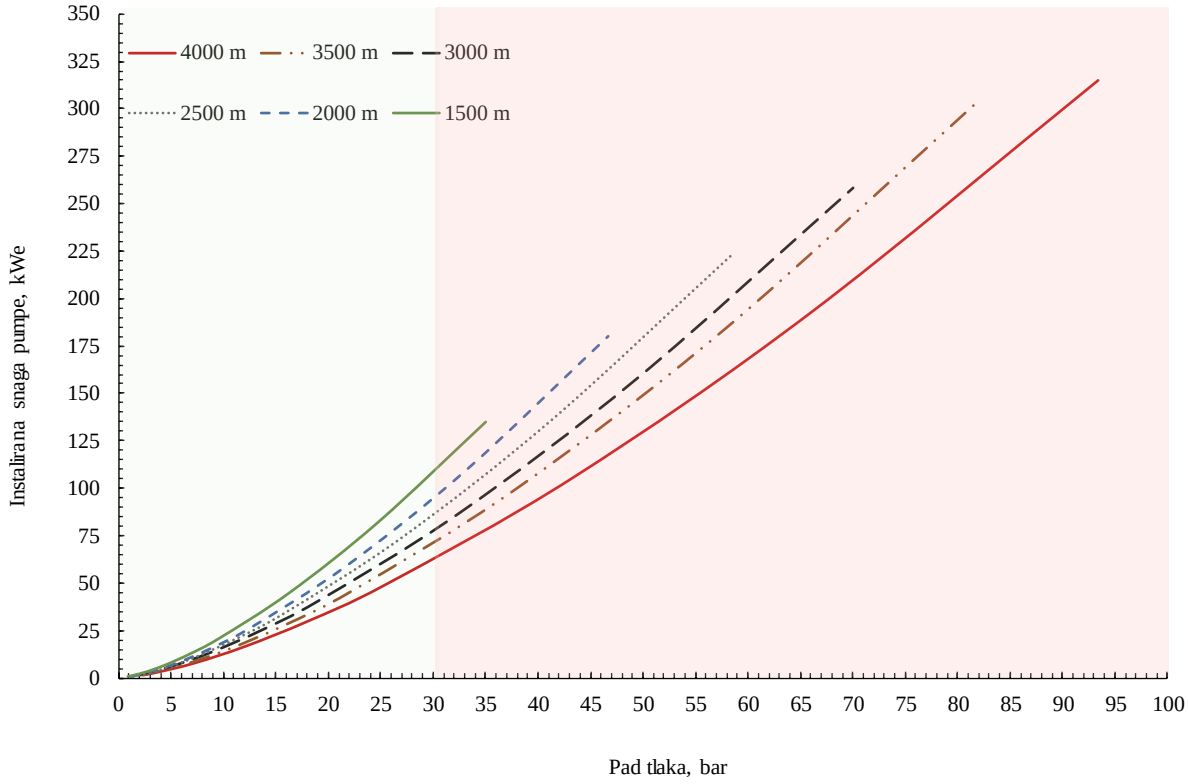
Slika 7.23. *Prikaz promjene pada tlaka u tipičnom bušotinskom koaksijalnom izmjenjivaču u odnosu na različite protoke za pojedine dubine bušotina*

Određivanje snage cirkulacijske pumpe, odnosno potrošnja električne energije, vezana je uz protok i pad tlaka. Tipične vrijednosti potrošnje cirkulacijske pumpe određene su pomoću aplikacije za dimenzioniranje pumpi, proizvođača Grundfos (dostupno na: www.grundfos.com), za vrijednosti protoka i pada tlaka prikazanih na slici 7.23. Dobivene vrijednosti instalirane snage pumpe, odnosno potrošnja električne energije za pojedini uvjet, prikazane su na slici 7.24. Prema ponudi odabranog proizvođača utvrđeno je da se trenutno na tržištu ne nude cirkulacijske pumpe koje mogu svladati padove tlaka veće od 30 bara. Zbog toga su na temelju dostupnih vrijednosti odabrane korelacije koje dobro opisuju realne vrijednosti instalirane snage i protoka za pojedinu dubinu za one vrijednosti gdje je pad tlaka veći od 30 bara (Slika 7.25.).



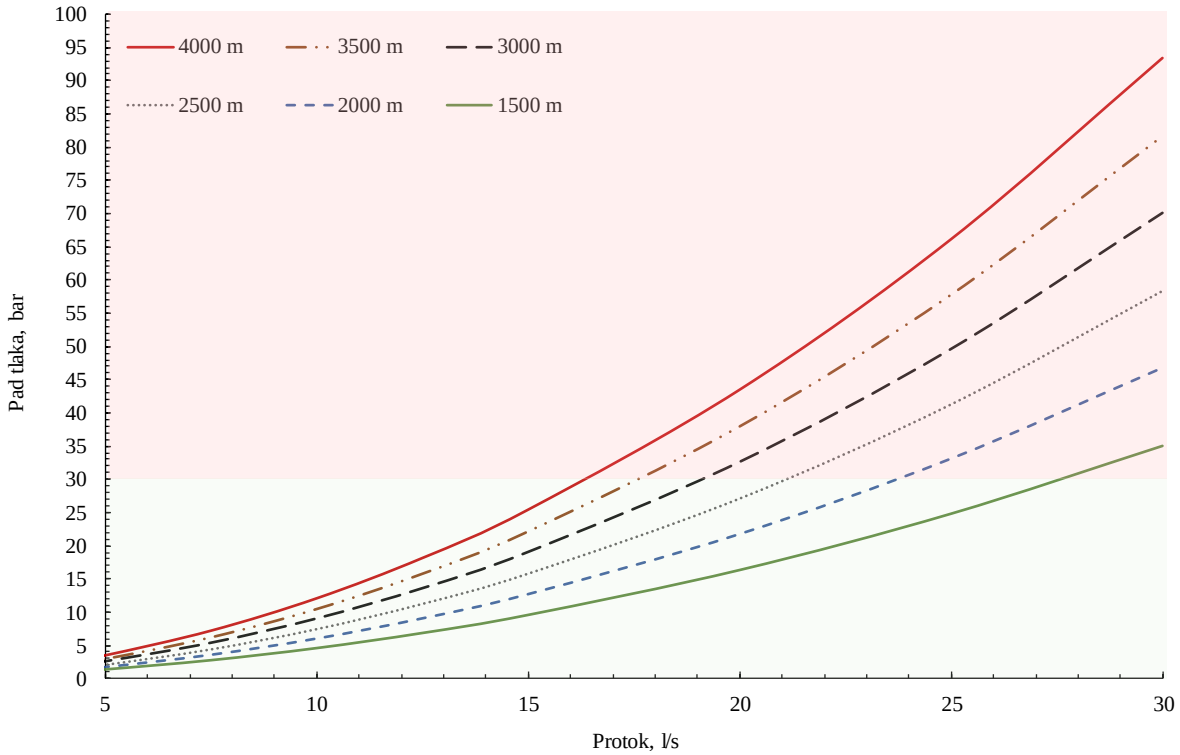
Slika 7.24. *Prikaz odnosa protoka i snage pumpe, u tipičnom bušotinskom koaksijalnom izmjenjivaču, za pojedine dubine bušotina uz pripadajuće korelacije*

Na temelju korelacija prikazanih na slici 7.24., koje opisuju promjene snage pumpe s promjenom protoka, te izračunatih vrijednosti pada tlaka, konstruiran je dijagram koji opisuje odnos potrošnje električne energije potrebne za rad pumpe (snaga pumpe) i pada tlaka (Slika 7.25.).



Slika 7.25. *Odnos instalirane snage cirkulacijske pumpe u odnosu na pad tlaka za pojedinu dubinu bušotinskog izmjenjivača*

Iz dijagrama 7.25. može se zaključiti da povećanjem vrijednosti pada tlaka raste potrebna instalirana snaga pumpe za cirkulaciju vode u bušotinskom izmjenjivaču. Iz ponude odabranog proizvođača cirkulacijskih pumpi vidljivo je da je za korištenje dubokih bušotinskih izmjenjivača potrebno uzeti u obzir činjenicu da komercijalno dostupne pumpe ne rade s padom tlaka većim od 30 bara. Navedeno ograničenje je uzeto u obzir te je područje primjene na dijagramu 7.9. označeno zelenom bojom. Vidljivo je da je najveća moguća potrošnja pumpe pri navedenom uvjetu od 30 bara, oko 100 kW_e, pri dubini od 1500 m. Primjenom istog kriterija za dijagram za odnos pada tlaka i protoka (Slika 7.26.) vidljivo je pri kojim dubinama i za koje protoke postoje ograničenja korištenja komercijalno dostupnih cirkulacijskih pumpi. Navedeno je potrebno uzeti u obzir kao jedan od kriterija procjene isplativosti revitalizacije dubokih bušotina prilikom projektiranja.



Slika 7.26. *Kriterij odabira bušotina pogodnih za revitalizaciju prema uvjetu pada tlaka manjeg od 30 bara, za pojedine odabrane dubine (zeleno područje)*

7.3. Stupanj iskoristivosti dubokog koaksijalnog bušotinskog izmjenjivača - SPF

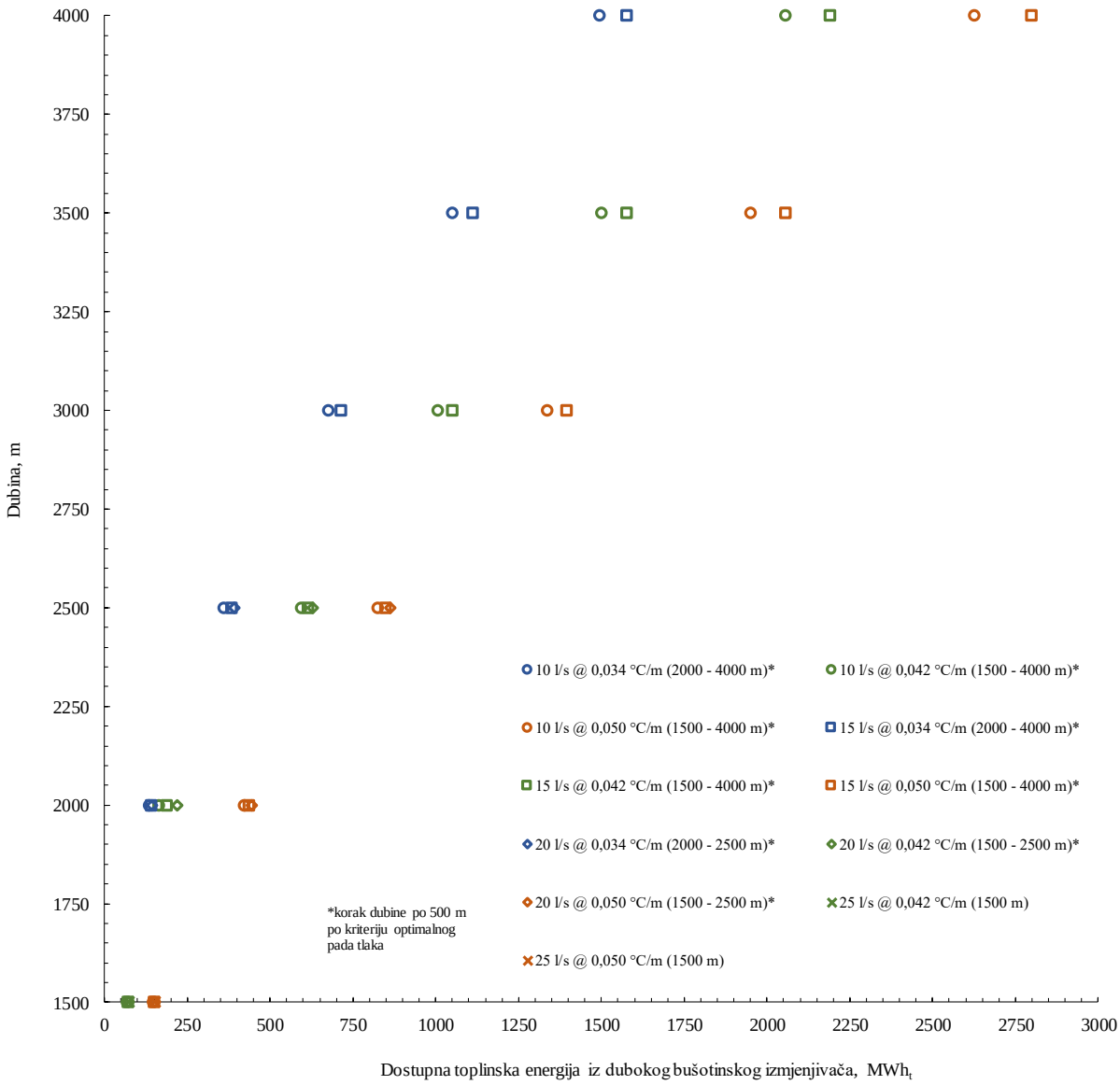
S obzirom na to da je varijabilno korištenje toplinske energije učestalije u praksi, odabrani su rezultati određivanja dostupne toplinske energije u sezonskoj varijanti, za dva temperaturna režima, za određivanje faktora iskoristivosti na strani bušotinskog izmjenjivača (DCHE). Faktor iskoristivosti definira se omjerom dostupne toplinske energije i uložene električne energije potrebne za rad cirkulacijske pumpe, tzv. SPF faktor (engl. *seasonal performance factor*, SPF). S obzirom da je pri određivanju dostupne toplinske energije pri varijabilnom opterećenju pretpostavljano vrijeme rada sustava od FLH=1500 h, isto je uzeto u obzir i pri proračunu potrošnje električne energije za cirkulacijsku pumpu. Postupak proračuna prikazan je u tablici 7.3., na primjeru višeg temperaturnog režima, pri protoku od 15 l/s, geotermalnom gradijentu od 0,034 °C/m i pri prethodno odabranim dubinama od 4000 do 1500 m.

Tablica 7.3 Primjer određivanja SPF faktora, pri uvjetu protoka od 15 l/s, geotermalnog gradijenta 0,034 °C/m za različite dubine, pri višem temperaturnom razredu

	Tehnički i ekonomski parametri							
1	Geotermalni gradijent	°C/m	0,034					
2	Protok fluida	l/s	15					
3	FLH	h	1500					
4	Iskoristivost plinskog bojlera	d.j.	0,85					
5	Cijena plina – kućanstva	kn/kWh	0,295					
6	Cijena plina – industrija	kn/kWh	0,235					
7	Dubina DCHE* - bušotina	m	4000	3500	3000	2500	2000	1500
8	Dostupna toplinska energija - DCHE - bušotina	MWh_t	1575	1110	713	383	140	0
9	Vršna snaga	kW_t	1050	740	475	255	93	0
10	Pad tlaka	bar	25,36	22,19	19,02	15,85	12,68	9,51
11	Cirkulacijska pumpa - instalirana snaga	kW_e	45,4	46,5	41,5	32,0	25,8	21,0
	SPF							
Cirkulacijska pumpa								
12	Godišnja potrošnja električne energije @1500 FLH (*3*9*)	kWh_e	68100	69705	62310	47925	38760	0
13	SPF (*10÷6*)	-	23	17	11	8	4	0

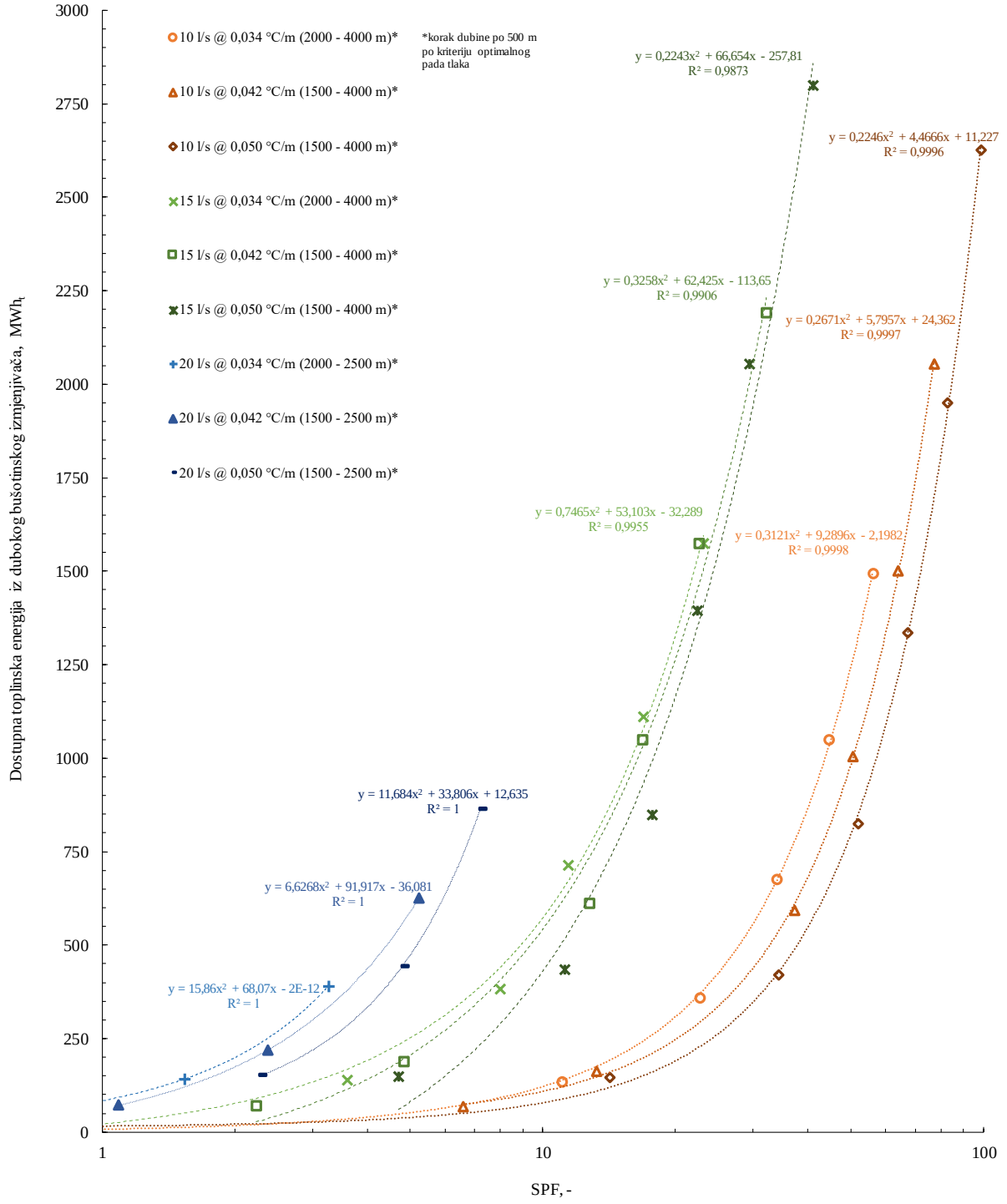
**DCHE - duboki koaskijalni bušotinski izmjenjivač topline*

Iz tablice 7.3. vidljivo je da s porastom dubine raste i padom tlaka raste potrošnja električne energije potrebna za cirkulaciju fluida kroz bušotinski izmjenjivač. Također raste i vrijednost SPF faktora, što proizlazi iz činjenice da s porastom dubine raste i dostupna toplinska energija. Iako je pri većim dubinama potrebno uložiti više energije za cirkulaciju fluida, dostupna toplinska energija je dovoljno većih vrijednosti da se ostvari bolji faktor iskoristivosti bušotinskog izmjenjivača. Prikazana metoda primijenjena je i za ostale varijante (poglavlje 7.1.2.) izmjene protoka, dubine i geotermalnog gradijenta. Zbog jednostavnosti prikaza rezultata izdvojeni su rezultati dostupne toplinske energije za viši temperaturni razred za vrijednosti geotermalnog gradijenta od 0,034 °C/m, 0,042 °C/m te 0,050 °C/m, za protoke od 10-25 l/s, u koracima po 5 l/s, za prethodno odabrane dubine. Slika 7.27. služi za inicijalnu procjenu dostupne toplinske energije pri odabranim vrijednostima geotermalnog gradijenta, za određeni protok i dubinu bušotinskog izmjenjivača kod višeg temperaturnog razreda.



Slika 7.27. *Dostupna toplinska energija za varijabilno toplinsko opterećenje za tri odabrana geotermalna gradijenta (0,034 °C/m, 0,042 °C/m i 0,050 °C/m), pri različitim protocima i dubinama bušotinskog izmjenjivača kod višeg temperaturnog razreda*

Kako je prethodno utvrđeno kod realnih sustava, s hidrauličkog stanovišta, pad tlaka ne bi trebao biti veći od 30 bara, s obzirom na komercijalno dostupne modele cirkulacijskih pumpi. Uslijed navedenog ograničenja, a prema slikama 7.25. i 7.26., izdvojeni su slučajevi na slici 7.27., koji zadovoljavaju takav uvjet, iako su SPF faktori pozitivne vrijednosti. Time su potpuno isključeni rezultati kod najvećeg odabranog protoka od 30 l/s. Za ostale slučajeve je stoga na slici navedeno za koji raspon dubina vrijedi da je pad tlaka manji od traženih 30 bara. Za navedene odabrane vrijednosti izračunate su vrijednosti SPF faktora, te su rezultati prikazani na slici 7.28.

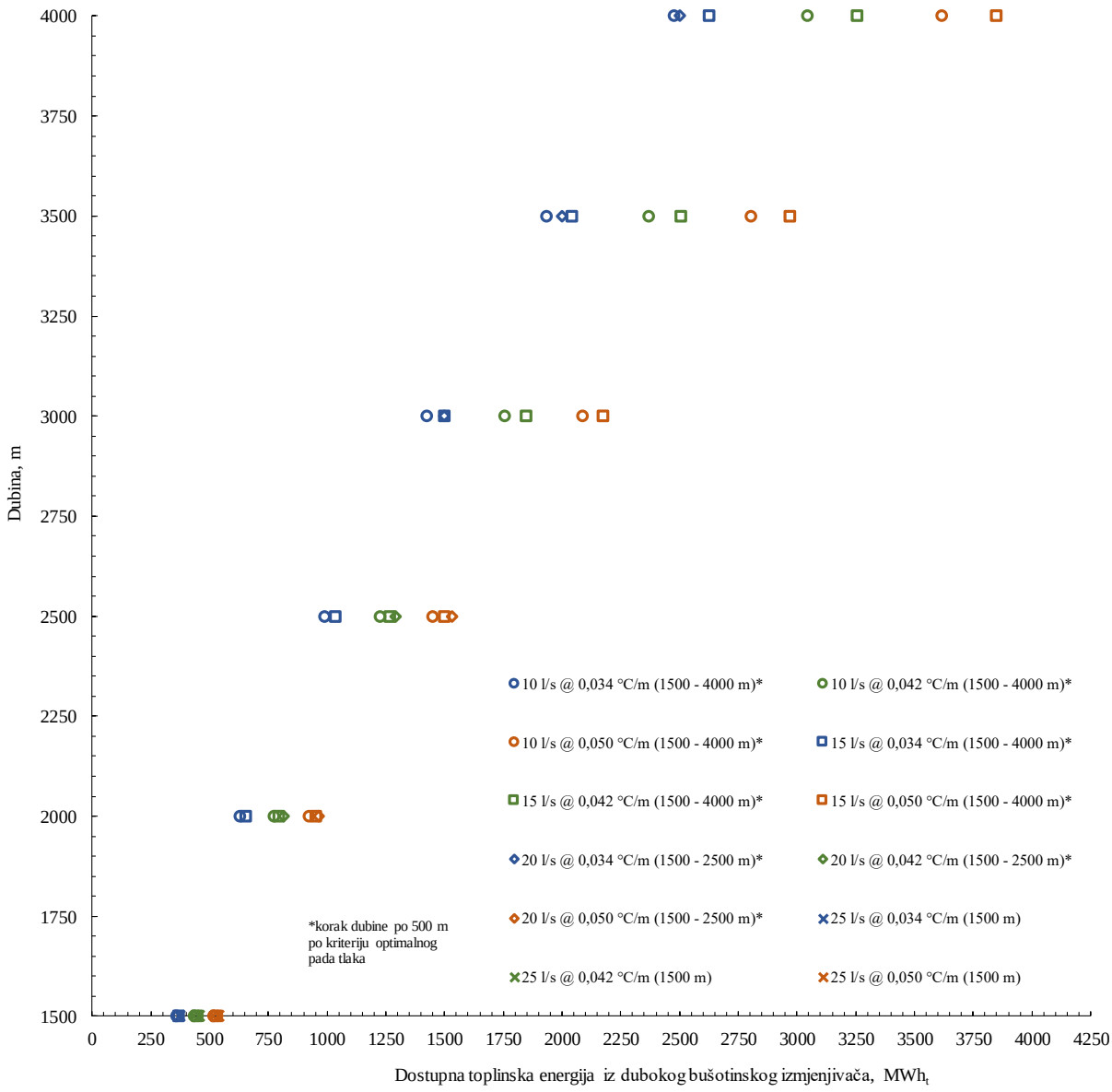


Slika 7.28. *Prikaz odnosa SPF faktora i dostupne toplinske energije iz dubokog bušotinskog izmjenjivača, za viši temperaturni razred kod varijabilnog opterećenja*

Uz prikazane odnose može se ustanoviti inicijalna procjena faktora iskoristivosti, ili SPF faktora, dubokog bušotinskog izmjenjivača za navedene uvjete geotermalnog gradijenta i protoka, poznajući dostupnu toplinsku energiju (Slika 7.12. – 7.16. i Slika 7.27.). Vidljivo je da se za pojedini uvjet geotermalnog gradijenta i protoka, odnos dostupne toplinske energije i SPF

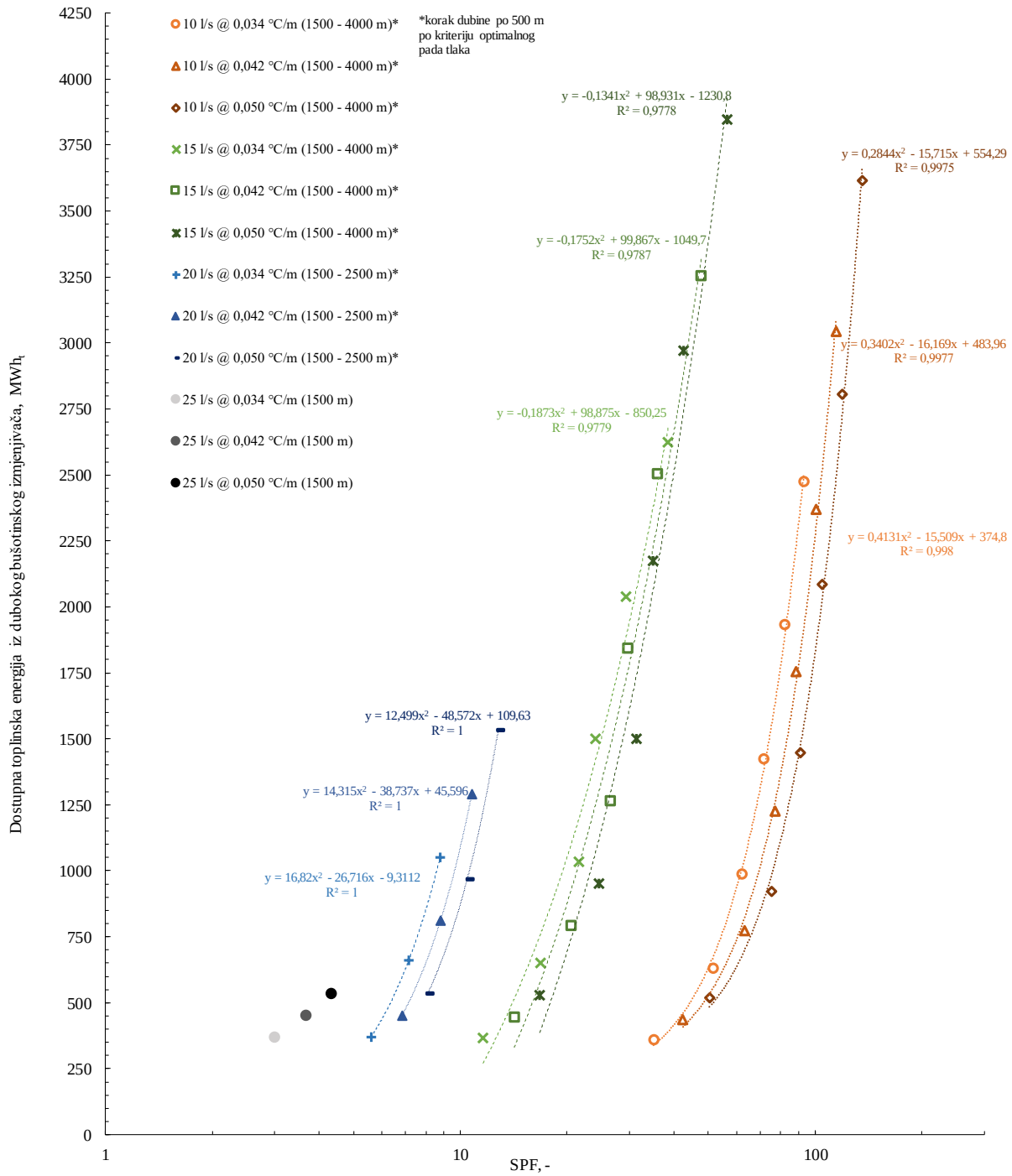
faktora može opisati pripadajućim polinomskim krivuljama drugog reda. Iako je u svim slučajevima SPF faktor imao pozitivne vrijednosti, osim kod onih gdje je temperatura na dubini bila manja od projektirane temperature, odbačeni su oni slučajevi kod kojih je pad tlaka iznosio više od 30 bara, slijedeći uvjet iz slika 7.25. ili 7.26. Također, nisu prikazani rezultati za protok od 25 l/s, s obzirom da uvjet pada tlaka zadovoljava jedino najmanja dubina od 1500 m, a omjer dostupne toplinske energije i potrebne električne energije za rad cirkulacijske pumpe je manji od 1, iako su rezultati pozitivni.

Isti postupak proveden je za slučaj nižeg temperaturnog razreda pri varijabilnom opterećenju, uz korištenje dizalica topline. Odabrani uvjeti su jednaki kao i kod višeg temperaturnog razreda. Kako je iz Slika 7.17.-7.21. vidljivo da je dostupna toplinska energija viših vrijednosti, to su i očekivane vrijednosti SPF faktora više. Naime, za rad cirkulacijske pumpe potrebno je utrošiti jednaku količinu električne energije kao i kod višeg temperaturnog razreda, međutim, dostupno je više toplinske energije. Tako će npr. pri višem temperaturnom razredu, protoku od 10 l/s, dubini bušotinskog izmjenjivača od 4000 m i geotermalnom gradijentu od 0,050 °C SPF faktor iznositi 41, dok će kod nižeg temperaturnog razreda, pri istim uvjetima iznositi 136, odnosno oko tri puta više. Slika 7.29. prikazuje dostupnu toplinsku energiju za odabrane parametre dubine izmjenjivača, protoka i geotermalnog gradijenta u svrhu jednostavnog očitanja. Bez obzira na temperaturni režim, hidraulički uvjeti su isti i kod višeg i kod nižeg režima. Stoga su, kao i u slučaju višeg temperaturnog razreda, prikazani odabrani rezultati dostupne toplinske energije u skladu sa zadanim uvjetom prema slikama 7.25. i 7.26., tj. za one slučajeve gdje je pad tlaka manji od 30 bara.



Slika 7.29. *Dostupna toplinska energija za varijabilno toplinsko opterećenje za tri odabrana geotermalna gradijenta (0,034 °C/m, 0,042 °C/m i 0,050 °C/m), pri različitim protocima i dubinama bušotinskog izmjenjivača kod nižeg temperaturnog razreda*

Na slici 7.30. prikazani su odnosi dostupne toplinske energije za odabrane parametre i pripadajući SPF faktori za odabrane slučajeve pri nižem temperaturnom razredu.



Slika 7.30. *Prikaz odnosa SPF faktora i dostupne toplinske energije iz dubokog bušotinskog izmjenjivača, za niži temperaturni razred kod varijabilnog opterećenja*

Usporedbom vrijednosti SPF faktora za oba temperaturna režima, vidljivo je da se više vrijednosti ostvaruju kod sustava s nižim temperaturnim režimom. Navedeno je posljedica veće dostupne energije kod nižih temperaturnih razreda, dok električna energija potrebna za rad cirkulacijske pumpe ostaje na istoj razini. Također, s obzirom na ostvarene temperature, vidljivo je da je raste i broj slučajeva kod kojih je sustav iskoristiv, s obzirom na veličine

geotermalnog gradijenta i uz postavljeni uvjet pada tlaka. Kako sa smanjenjem dubine pada dostupna toplinska energija, tako se smanjuje i broj slučajeva kod kojih je SPF faktor pozitivan. Tako je kod nižeg razreda ostvarivo iskorištavanje revitaliziranih bušotina do 25 l/s i to pri najvećoj dubini od 4000 m. Međutim, broj takvih slučajeva je ograničen na jedan, te nije moguće korelaciju između SPF faktora i dostupne toplinske energije. Kod ostala tri slučaja nižih protoka utvrđeno je da se odnosi između SPF i dostupne toplinske energije mogu opisati polinomima drugog reda, te su oni vidljivi na samom dijagramu.

7.4.Tehno-ekonomska analiza korištenja dubokih bušotinskih izmjenjivača topline

U poglavlju 7.1. određena je teoretski dostupna toplinska energija za geometrijski tipičnu bušotinu izrađenu na području kontinentalne Hrvatske, pri različitim odabranim uvjetima protoka, dubine i geotermalnog gradijenta te u slučaju dvije vrste toplinskog opterećenja, konstantno i varijabilno. Prema dostupnim dijagramima vidljivo je da su razine toplinske energije dostupne korištenjem dubokih koaskijalnih bušotinskih izmjenjivača topline (engl. (Deep Coaxial Heat Exchanger, DCHE) i više nego dovoljne za primjenu u realnim sustavima grijanja. Pregledom lokacija bušotina, može se zaključiti da se manji broj nalazi u urbanim prostorima, gdje bi se one mogle koristiti u centralnim sustavima grijanja. Veći broj nalazi se na ili u neposrednoj blizini poljoprivrednih površina i rubnim dijelovima manjih, ponegdje i većih naselja. Iz navedenog aspekta revitalizirane naftne i plinske napuštene bušotine pogodne su za iskorištavanje u poljoprivrednom sektoru za grijanje stakleničkih prostora, u industrijskim zonama za grijanje radnih prostora (npr. hala), te općenito za grijanje poslovnih i stambenih objekata. U većini slučajeva toplinska energija koristi se sezonski, u skladu s klimatskim parametrima nekog područja. Tehno-ekonomska analiza dana je stoga na primjeru varijabilnog toplinskog opterećenja, za viši i niži toplinski režim, u skladu s rezultatima proračuna dostupnih količina toplinske energije iz prethodnog potpoglavlja. Na primjeru dva različita slučaja temperaturnog režima dana je osnova postavljanja tehno-ekonomskog modela koja se odnosi na godišnje troškove energenata, odnosno njihovu usporedbu. Prilikom uspostave modela uvedena su neka pojednostavljenja. Objekti koji kao primarnu energiju koriste revitalizirane bušotine trebali bi se nalaziti u relativnoj blizini bušotine, kako bi se što više ograničio gubitak topline na vanjskoj infrastukturi (cijevi polaza i povrata od ušća bušotinskog izmjenjivača do pločastog izmjenjivača, te cijevi polaza i povrata od pločastog izmjenjivača do korisnika). Gubitak toplinske energije se može ograničiti postavljanjem izoliranih cjevovoda s obzirom da je projektiranje svakog sustava individualizirano, odnosno potrebna duljina cijevi za vanjski

sustav nije fiksna. Tehno-ekonomska analiza je stoga rađena pod pretpostavkom da gubitaka toplinske energije u termo-tehničkom površinskom sustavu nema. Troškovi kapitalnih investicija nisu razmatrani zbog specifičnosti njihova izvođenja potrebnih za svaku bušotinu na individualnoj osnovi. Drugim riječima, kako se remontni radovi (u slučaju revitalizacije uključuju uklanjanje postojeće opreme, crpljenje zaostalog fluida, čišćenje bušotine, pregled stanja zaštitnih kolona, ugradnju tubing kolone itd.) moraju prilagoditi individualnom slučaju, analiza kapitalnih troškova nije provedena. Prema trenutno važećoj legislativi korištenje dubokih izmjenjivača topline nije prepoznato kao jedna od metoda iskorištavanja geotermalne energije (Zakon o rudarstvu (NN 56/13) i Zakon o istraživanju i eksploataciji ugljikovodika (NN 52/18)). Zbog toga nije moguće razmatrati dodatne troškove, npr. koncesijske naknade i sl.

S obzirom na navedeno, tehno-ekonomski model je izrađen za procjenu godišnjih troškova električne energije koji nastaju radom cirkulacijske pumpe, uz rad dizalica topline ako se radi o nižem temperaturnom razredu. Prema kriteriju optimalnog pada tlaka, izabran je slučaj protoka od 15 l/s i geotermalni gradijent od 0,034 °C/m, za koji je prikazan proces proračuna za viši (Tablica 7.5.) i niži temperaturni razred (Tablica 7.6.). Broj radnih sati (FLH) definiran je kao tipičan za kontinentalnu Hrvatsku, u iznosu od 1500 h. Navedene cijene plina su srednja vrijednost za 2019. g. (GP Zagreb, 2020) za kućanstva, dok je srednja cijena plina, bez PDV-a, za poduzetništvo preuzeta iz podataka Eurostata za 2019. g.(Natural gas price statistics, 2020). Potrošnja električne energije za kućanstva određena je na bazi vremena rada sustava (FLH), potrebne za rad cirkulacijske pumpe kod višeg temperaturnog razreda, u dvotarfinom sustavu (2/3 od ukupnog iznosa pripada u visokotarifni razred, VT, dok se 1/3 odnosi na niskotarifni razred, NT). Za određivanje cijene električne energije korišten je HEP kalkulator (https://hepi.hep.hr), za bijeli tarifni sustav. Za potrebe industrije preuzeta je prosječna cijena električne energije, bez uključenog PDV-a, za poduzetnike prema statističkim podacima Eurostata za 2019. g. (Electricity price statistics/hr, 2020). Da bi plinski sustav isporučio količinu toplinske energije dostupnu iz bušotinskog izmjenjivača topline, potrebno je u obzir uzeti iskoristivost plinskog kotla, te su na temelju izračunate potrebne energije plinskog sustava izračunate cijene plina za kućanstva i industriju prema srednjim cijenama plina za 2019.g.

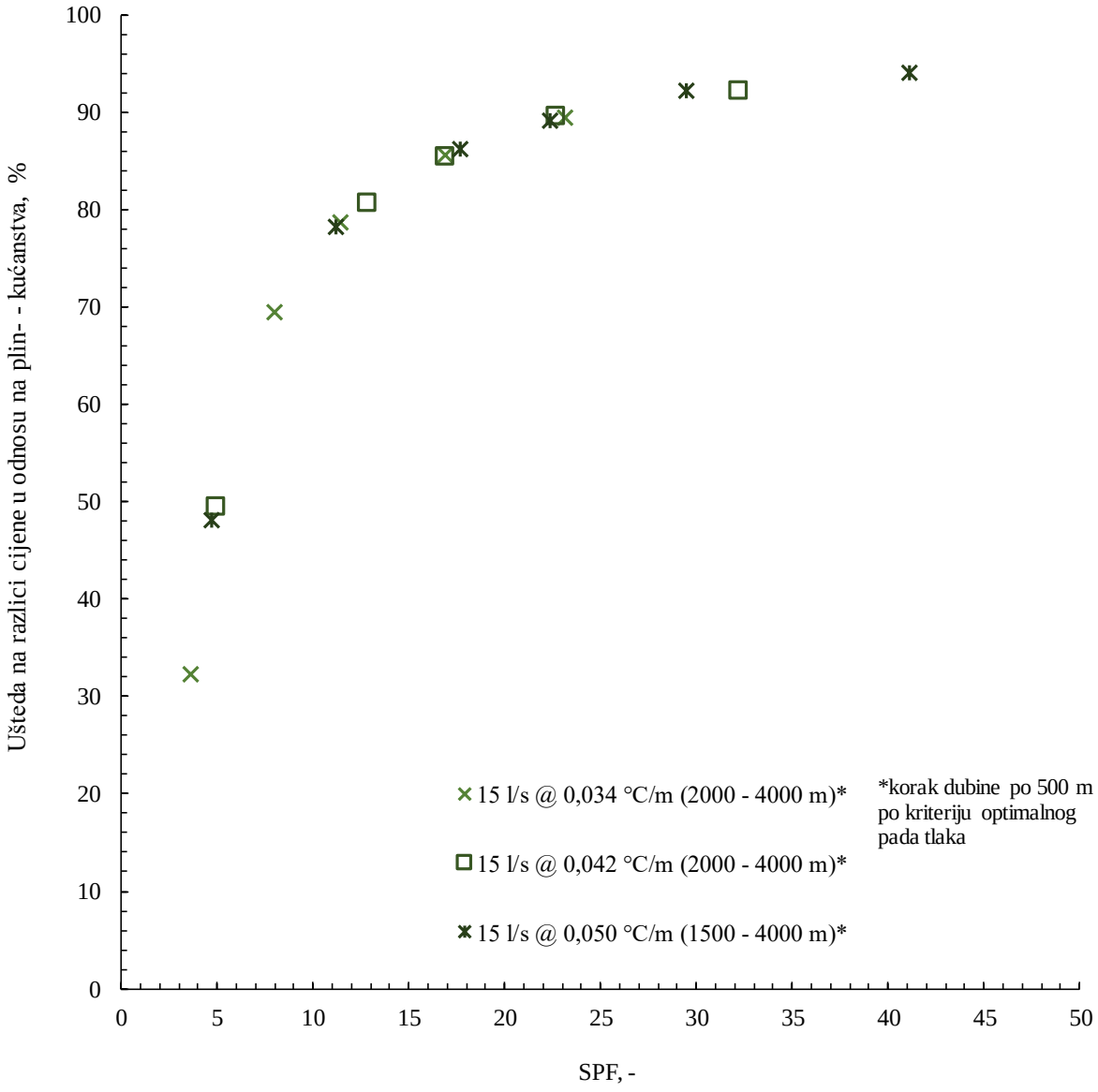
Tablica 7.4. Tehno-ekonomska analiza sustava rada dubokog izmjenjivača topline za primjer višeg temeraturnog razreda

Tehnički i ekonomski parametri								
1	Geotermalni gradijent	°C/m	0,034					
2	Protok fluida	l/s	15					
3	FLH	h	1500					
4	Iskoristivost plinskog bojlera	d.j.	0,85					
5	Cijena plina – kućanstva (PDV uključen)	kn/kWh	0,310					
6	Cijena plina – industrija (PDV isključen)	kn/kWh	0,223					
7	Cijena el.energije – industrija (PDV isključen)	kn/kWh	0,770					
8	Dubina DCHE* - bušotina	m	4000	3500	3000	2500	2000	1500
9	Dostupna toplinska energija - DCHE - bušotina	MWh_t	1575	1110	713	383	140	0
10	Vršna snaga	MW_t	1,05	0,74	0,48	0,26	0,09	0
11	Pad tlaka	bar	25,36	22,19	19,02	15,85	12,68	9,51
12	Cirkulacijska pumpa - instalirana snaga	MW_e	0,045	0,046	0,042	0,032	0,026	0,021
SPF, ekonomski paramateri, troškovi energije i uštede								
Godišnji trošak rada dubokog koaksijalnog bušotinskog izmjenjivača topline								
Potrošnja električne energije za rad cirkulacijske pumpe i SPF								
13	Godišnja potrošnja električne energije @1500 FLH (*3*12*)	MWh_e	68,10	65,78	62,31	47,93	38,76	-
14	SPF (*9÷13*)	-	23	17	11	8	4	-
Ukupni godišnji troškovi DCHE – cirkulacijska pumpa - kućanstvo								
15	Godišnja potrošnja električne energije - visokotarifni udio (VT) (*13**(2/3))	MWh_e	45,40	43,85	41,54	31,95	25,84	-
16	Godišnja potrošnja električne energije - niskotarifni udio (NT) (*13**(1/3))	MWh_e	22,70	21,93	20,77	15,98	12,92	-
17	Godišnja cijena električne energije – HEP bijeli dvotarifni (PDV uključen)	kn/god	60362	61779	55250	42549	34457	-
18	Cijena po jedinici energije (PDV uključen) ((*17÷13)* ÷1000)	kn/kWh_e	0,886	0,886	0,887	0,888	0,889	-
Ukupni godišnji troškovi DCHE – cirkulacijska pumpa - industrija								
19	Godišnja cijena električne energije (PDV isključen) ((*13*7)**1000)	kn/god	52437	50647	47979	36902	29845	-
Godišnji trošak konvencionalnog plinskog sustava								
20	Potrebna energija plinskog sustava @η=0,85 (*9÷4*)	MWh_t	1853	1306	838	450	164	-

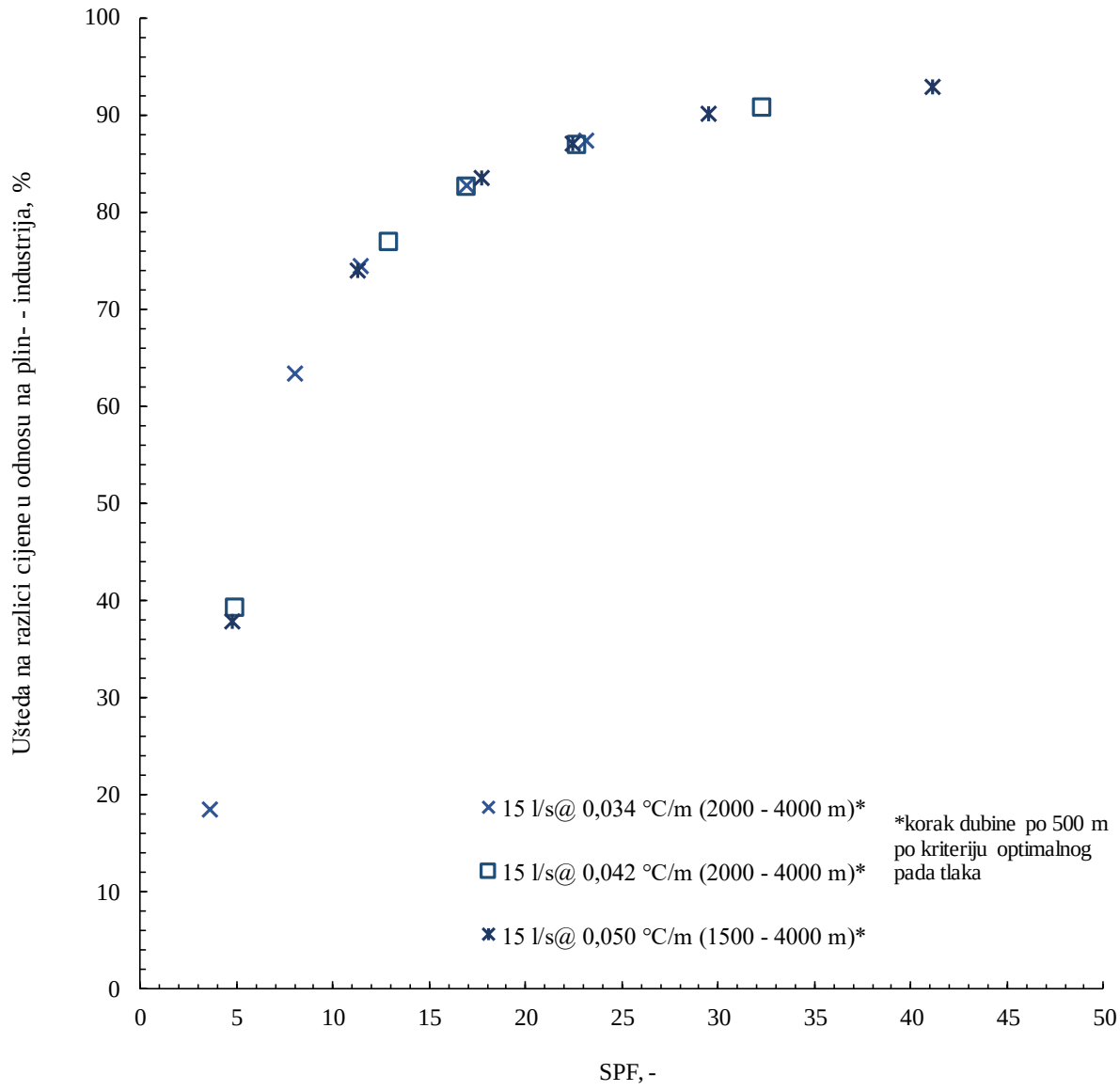
21	Godišnja cijena plina - kućanstvo (PDV uključen) (*5*20*)	kn/god	574412	404824	259853	139500	50876	-
22	Godišnja cijena plina - industrija (PDV isključen) (*6*20*)	kn/god	413206	291212	186926	100350	36598	-
Ušteda na razlici u cijeni u odnosu na konvencionalni plinski sustav								
23	Ušteda – kućanstvo (1-(*17÷21*))*100	%	89,5	85,6	78,7	69,5	32,3	-
24	Ušteda– industrija (1-(*19÷22*))*100	%	87,3	82,6	74,3	63,2	18,5	-

**DCHE* - duboki koaskijalni bušotinski izmjenjivač topline

Iz tablice 7.5. vidljivo je da je se značajne uštede u odnosu na konvencionalni sutav ostvaruje kod najvećih dubina, odnosno da su smanjenjem dubine i smanjenjem dostupne topline uštede manje. Posebno je naglašeno kod industrijskih cijena plina, s obzirom na nižu cijenu plina. Prikazani proračun proveden je i za geotermalne gradijente od 0,042 i 0,050 °C/m. Zbog jednostavnosti prikaza, rezultati za kućanstva su prikazani na slici 7.31., a za industriju na slici 7.32. Na dijagramu je vidljivo da se povećanjem SPF faktora povećava i iznos uštede korištenjem dubokih izmjenjivača u odnosu na konvencionalni plinski sustav.



***Slika 7.31**. Prikaz uštede korištenjem dubokih koaksijalnih bušotinskih izmjenjivača topline u odnosu na plin za kućanstva, pri višem temperaturnom razredu u odnosu na SPF faktor.*



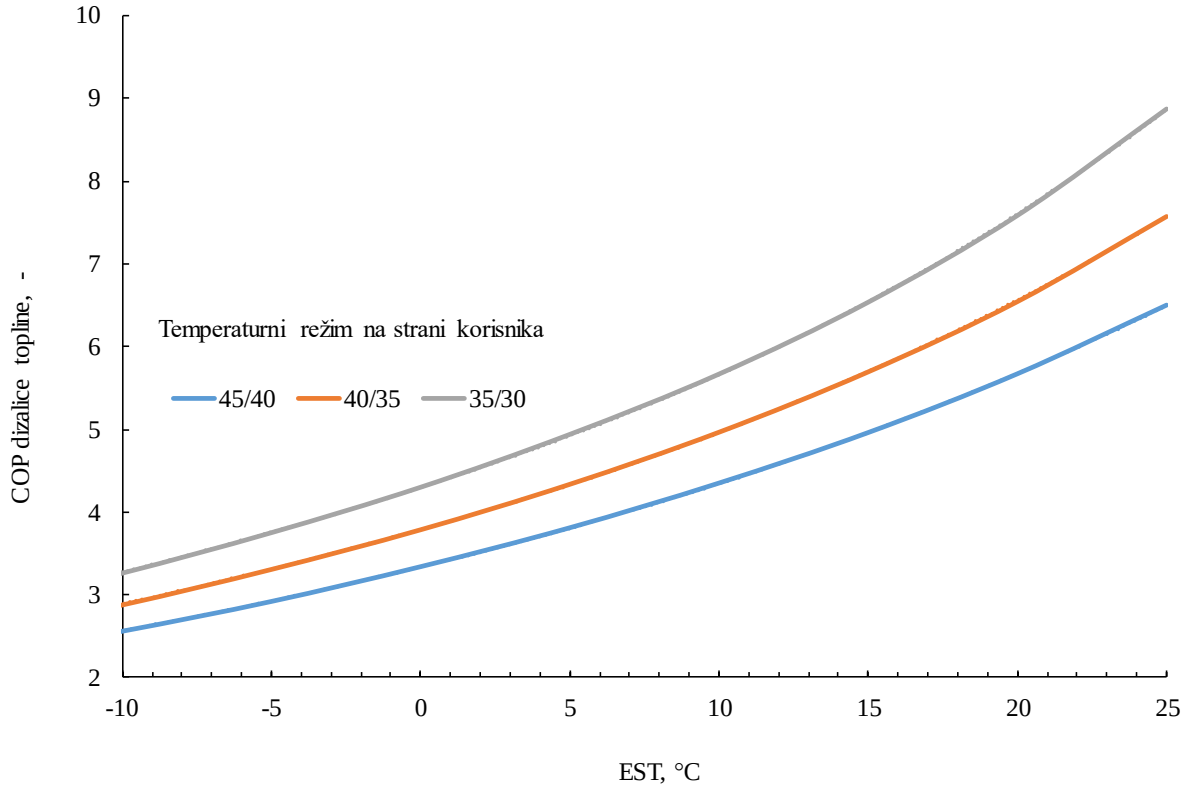
***Slika 7.32**. Prikaz uštede korištenjem dubokih koaksijalnih bušotinskih izmjenjivača topline u odnosu na plin za industriju, pri višem temperaturnom razredu u odnosu na SPF faktor.*

Kod analize uštede za niži temperaturni razred, potrebno je uzeti u obzir i potrošnju dizalice topline. Tehnička izvedba podrazumijeva sustav duboki bušotinski izmjenjivač-pločasti izmjenjivač-dizalica topline-korisnik. Za slučaj geotermalnog gradijenta od 0,034 °C/m, protoka od 15 l/s i kod dubine izmjenjivača od 4000 m, vršno opterećenje iznosi 1750 kW_t. Kako je u zadnjoj godini u vršnoj potrošnji srednja temperatura fluida bušotinskog izmjenjivača 10,6 °C, prema relaciji (6-2), temperatura na ulazu u dizalicu topline iznosi oko 25 °C, a na izlazu oko -3,8 °C. Da se spriječi smrzavanje pothlađenog fluida u povratu moguće je korištenje manje količine glikola. S obzirom na visoku ulaznu temperaturu moguće je kaskadno korištenje toplinske energije pomoću nekoliko jedinica dizalica topline. Tako bi u

npr. u ovom slučaju bilo potrebno šest jedinica od kojih bi svaka radila s razlikom temperature od 5 °C na ulazu i izlazu (EST i LST). Početna dizalica imala bi tako režim 25/20, dok bi posljednja bila u režimu 0/-5 °C. Izračun potrošnje električne energije za rad dizalice topline zavisi od toplinskog množitelja, odnosno koeficijenta efikasnosti dizalice topline (engl. coefficient of performance - COP), pojedinog modela dizalice za određene radne uvjete temperatura na strani toplinskog izvora i korisnika. Model promjene COP-a napravljen je prema tehničkim obilježjima renomiranog europskog proizvođača dizalica topline. Na slici 7.32. prikazani su odnosi toplinskog množitelja i temperature na strani toplinskog izvora (EST) za tri različita temperaturna režima na strani korisnika. Prema navedenom dijagramu određeni su toplinski množitelji za svaku dizalicu topline u kaskadi, za pojedini slučaj. Jednaki radni uvjeti se u tom slučaju ostvaruju optimiranjem protoka prema svakoj dizalici. Na temelju očitanog toplinskog množitelja za svaku od dizalica u kaskadnom sustavu, određene su vrijednosti rada kompresora dizalice, te ukupna toplinska snaga. U režimu grijanja električna energija potrebna za rad kompresora prelazi u korisnu toplinu, određenu izrazom (7-1):

$$Q_{uk} = Q_{geo} + \frac{Q_{geo}}{COP - 1} \quad (7\text{-}1)$$

gdje je Q_{uk} ukupna isporučena toplinska energija korisniku (kW_t), Q_{geo} toplinska energija iz bušotinskog izmjenjivača topline (kW_t), i COP toplinski množitelj.



***Slika 7.33**. Vrijednosti toplinskog množitelja u odnosu na EST za tri različita temperaturna režima na strani korisnika*

U tablici 7.6. na primjeru je prikazano određivanje električne energije potrebne za rad dizalica topline, u kaskadnom sustavu za šest jedinica, pri temperaturnom režimu 40/35 °C na strani korisnika.

Tablica 7.5. Primjer određivanja energije potrebne za rad šest dizalica topline u kaskadnom načinu rada

Q_{geo} , kW_t	Temp.režim, °C	COP HP	Q_{uk}, kWt
291,7	25/20	7,51	336,5
291,7	20/15	6,53	344,4
291,7	15/10	5,69	353,9
291,7	10/5	4,96	365,3
291,7	5/0	4,33	379,2
291,7	0/-5	3,79	396,3
∑1750			∑2175,6
		Q_{el}, kW_e	425,6
		Q_{el}, kWh_e@1500 FLH	638431

Proračun troškova korištenja dubokih izmjenjivača topline za niži temperaturni razred dalje slijedi isti princip kao i kod višeg temperaturnog razreda. Za proračunatu električnu energiju se, kao i kod potrošnje cirkulacijske pumpe, dijeli prema dvotarfinom sustavu u omjeru 2/3 za visokotarfini sustav i 1/3 za niskotarifni. Primjer cjelovitog proračuna, uključujući i uštede u odnosu na konvencionalni plinski sustav dan je u tablici 7.7. Proračun uštede izrađen je, kao i u prethodnom slučaju, s cijenama za kućanstva i industriju. Za usporedbu proračun je proveden za tri različita geotermalna gradijenta, za svaki od tri različita temperaturna režima (na strani korisnika) pri protoku od 15 l/s. Dobiveni rezultati uštede u odnosu na konvencionalni plinski sustav prikazani su na slikama 7.33. za kućanstva i 7.34. za industriju. Dobivene uštede prikazane su u odnosu na SPF faktor, koji ovisi o dostupnoj toplinskoj energiji i dubini bušotine, odnosno o termogeološkim karakteristikama stijenske mase i hidrauličkim karakteristikama bušotinskog izmjenjivača.

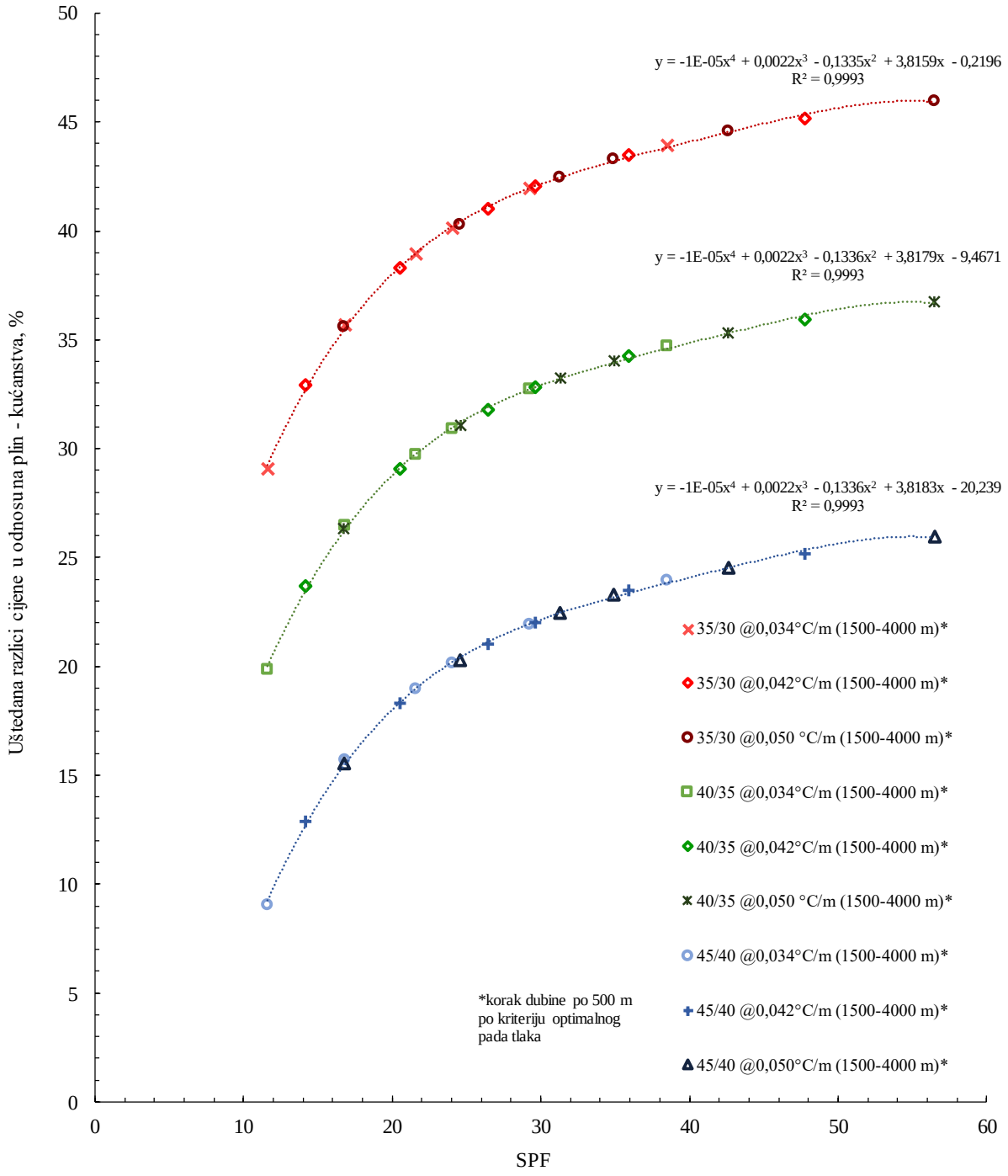
Tablica 7.6. Tehno-ekonomska analiza sustava rada dubokog izmjenjivača topline za primjer nižeg temperaturnog razreda i kaskadnog korištenja dizalica topline za temperaturni režim 40/35 na strani korisnika

Tehnički i ekonomski parametri								
1	Geotermalni gradijent	°C/m	0,034					
2	Protok fluida	l/s	15					
3	FLH	h	1500					
4	Iskoristivost plinskog bojlera	d.j.	0,85					
5	Cijena plina – kućanstva	kn/kWh	0,310					
6	Cijena plina – industrija	kn/kWh	0,223					
7	Cijena el.energije – industrija (PDV isključen)	kn/kWh	0,770					
8	Dubina DCHE* - bušotina	m	4000	3500	3000	2500	2000	1500
9	Dostupna toplinska energija - DCHE - bušotina	MWh_t	2625	2040	1500	1035	653	366
10	Vršna snaga	MW_t	1,75	1,360	1,0	0,69	0,44	0,24
11	Pad tlaka	bar	25,36	22,19	19,02	15,85	12,68	9,51
12	Cirkulacijska pumpa - instalirana snaga	MW_e	0,045	0,046	0,042	0,032	0,026	0,021
SPF, ekonomski paramateri, troškovi energije i uštede								
Godišnji trošak rada dubokog koaksijalnog bušotinskog izmjenjivača topline								
Potrošnja električne energije za rad cirkulacijske pumpe i SPF								
13	Godišnja potrošnja električne energije @1500 FLH (*3*12*)	MWh_e	68,10	65,78	62,31	47,93	38,76	31,53
14	SPF (*9÷13*)	-	39	29	24	22	17	12
Ukupni godišnji troškovi DCHE – cirkulacijska pumpa - kućanstvo								
15	Godišnja potrošnja električne energije - visokotarifni udio (VT) (*13**(2/3))	MWh_e	45,40	43,85	41,54	31,95	25,84	21,02
16	Godišnja potrošnja električne energije - niskotarifni udio (NT) (*13**(1/3))	MWh_e	22,70	21,93	20,77	15,98	12,92	10,51
17	Godišnja cijena električne energije – HEP bijeli dvotarifni (PDV uključen)	kn/god	60362	61779	55250	42549	34457	28074
18	Cijena po jedinici energije (PDV uključen) ((*17÷13)* ÷1000)	kn/kWh_e	0,886	0,886	0,887	0,888	0,889	0,890
Ukupni godišnji troškovi DCHE – dizalica topline - kućanstvo								
19	Ukupna toplinska snaga @COP (Slika 7.30.) @ 40/35°C na strani korisnika	MWt	2,18	1,69	1,24	0,86	0,54	0,30
20	Potrošnja električne energije– kompresor dizalice (*19-10)*	MWe	0,43	0,33	0,24	0,17	0,11	0,06
21	Godišnja potrošnja električne energije @1500 FLH (*20*3*)	MWh_e	638,43	496,15	364,82	251,72	158,70	89,02
22	Godišnja potrošnja električne energije - visokotarifni udio (VT) (*21**(2/3)	MWh_e	425,62	330,77	243,21	167,82	105,80	59,34

23	Godišnja potrošnja električne energije - niskotarifni udio (NT) (*21**(1/3)	MWh_e	212,81	165,38	121,61	83,91	52,90	29,67
24	Godišnja cijena el.en. – HEP bijeli dvotarifni (PDV uključen)	kn/god	563911	438292	322336	222485	140350	78829
25	Cijena po jedinici energije (PDV uključen) ((*17÷13)* ÷1000)	kn/kWh_e	0,883	0,883	0,884	0,884	0,885	0,886
Ukupni godišnji troškovi DCHE – cirkulacijska pumpa i dizalice topline - kućanstvo								
23	Cijena el. energije ukupno (PDV uključen) (*17+24*)	kn/god	624273	500071	377586	265034	174807	106903
Ukupni godišnji troškovi DCHE – cirkulacijska pumpa i dizalice topline- industrija								
	Godišnja cijena električne energije (PDV isključen) ((*13+21)*7*)	kn/god	544029	435710	328889	230730	152041	92820
Godišnji trošak plinskog sustava								
24	Potrebna energija plinskog sustava @η=0,85 (9÷*4*)	MWh_t	3088	2400	1765	1218	768	431
25	Godišnja cijena plina - kućanstvo (PDV uključen) (*5**24*)	kn/god	956195	743100	546397	377014	237683	133321
26	Cijena - industrija (PDV uključen) (*6**24*)	kn/god	687920	534612	393097	271237	170997	95916
Ušteda na razlici u cijeni u odnosu na konvecionalni plinski sustav								
27	Ušteda – kućanstvo (1-(*23÷25*))*100	%	34,7	32,7	30,9	29,7	26,5	19,8
28	Ušteda – industrija (100-(*23÷26*))*100	%	20,9	18,5	16,3	14,9	11,1	3,2

**DCHE* - duboki koaskijalni bušotinski izmjenjivač topline

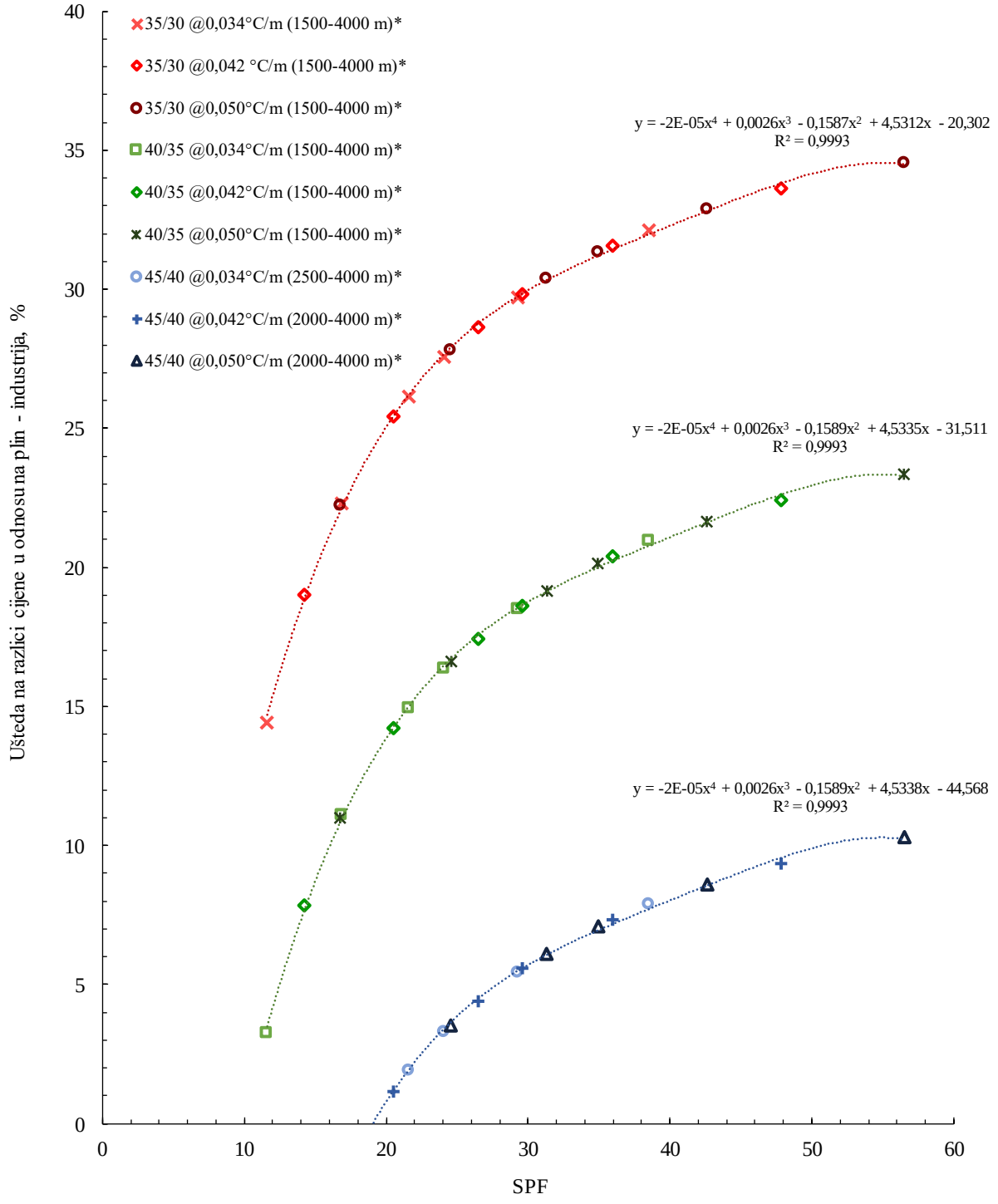
.



Slika 7.34. *Prikaz rezultata uštede plina korištenjem dubokih koaksijalnih izmjenjivača topline, pri nižem temperaturnom razredu u odnosu na SPF faktor, za kućanstva*

Iz dijagrama na slici 7.33. vidljivo je da se odnos između SPF faktora i financijske uštede u odnosu na konvencionalni plinski sustav može povezati polinomom 4. stupnja, za svaki od temperaturnih režima pri različitim vrijednostima geotermalnog gradijenta. Vidljivo je da porastom SPF faktora raste i postotak uštede u odnosu na konvencionalne sustave. Prednost direktnog korištenja toplinske energije (bušotinski izmjenjivač-pločasti izmjenjivač-korisnik)

može se opravdati visokim iznosom uštede u odnosu na konvencionalni plinski sustav. Međutim, dostupna toplinska energija je niža u odnosu na sustav koji koristi dizalice topline. Korištenjem dizalica topline omogućena je veća energetska iskoristivost toplinske energije sadržane u cirkulirajućem fluidu, vidljivo u višim vrijednostima dostupne toplinske energije.



Slika 7.35. Prikaz rezultata uštede plina korištenjem dubokih koaksijalnih izmjenjivača topline, pri nižem temperaturnom razredu u odnosu na SPF faktor, za industriju

Na slici 7.34. dani su rezultati proračuna uštede za industriju. Kao što je vidljivo, uštede su manje nego kod kućanstva. Rezultat je to činjenice da su cijene plina po kWh_t manje nego za kućanstva. Međutim, trend porasta uštede u odnosu na porast SPF faktora je i dalje vidljiv.

Pomoću navedenih odnosa mogu se dati inicijalne procjene financijske uštede na godišnjoj razini, poznajući osnovne informacije o dubini bušotinskog izmjenjivača, željenom protoku i lokalnim termogeološkim karakteristikama, koje će pomoći prilikom odluke o korištenju napuštenih bušotina u energetske svrhe.

7.5.Utjecaj na okoliš – emisije stakleničkih plinova

Strateški ciljevi Europske unije predviđaju smanjenje emisije stakleničkih plinova do 40%, povećanje energetske učinkovitosti i udjela obnovljivih izvora energije do 32% te osiguranje veće energetske neovisnosti do 2030. g. U dugoročnim ciljevima, do 2050. g., predviđeno je smanjenje emisija stakleničkih plinova od 80-95%. Da bi se navedeni ciljevi ostvarili, u RH je potrebno razmotriti dostupne obnovljive izvore energije. Revitalizacija i korištenje toplinske energije iz napuštenih bušotina svakako je jedan od izvora koji mogu doprinijeti navedenim strateškim ciljevima. Korištenje dubokih izmjenjivača emisije stakleničkih plinova, poglavito CO_2, svedeno je na najmanju moguću mjeru, s obzirom da fluid cirkulira u zatvorenom sustavu. Emisije ugljikovog dioksida se, prema tome, svode na emisije uslijed korištenja električne energije potrebne za rad cirkulacijske pumpe i dizalica topline. Kako bi se utvrdilo jesu li za dostupnu toplinsku energiju iz bušotinskog izmjenjivača emisije CO_2 manje ili veće u odnosu na tri različita konvencionalna sustava grijanja – prirodni plin (PP), ukapljeni naftni plin (UNP) i loživo ulje ekstra lako (LUEL) korištena je Tier 1 metoda, izrađena od strane IPCC-a (IPCC, 2006). Tier 1 metoda je najjednostavnija od tri preporučene metode, odnosno procjene emisija ovise o potrošnji određenog goriva i emisijskog faktora stakleničkog plina za koji se radi analiza:

$$Emisija_{GHG} = Potrošnja_{Gorivo} * Emisijski\ \ faktor_{GHG} \quad (7\text{-}2)$$

Emisijski faktori karakteristični su za pojedinu državu, te su srednje vrijednosti za RH dane u dokumentu Faktori primarne energije i emisija CO_2, dostupno na stranicama Ministarstva graditeljstva i prostornog uređenja (https://mgipu.gov.hr).

Na temelju poznavanja iznosa električne energije potrebne za rad bušotinskog izmjenjivača izračunate su emisije CO_2. Također, za usporedbu su izdvojeni emisijski faktori za PP, UNP i LUEL. Za određivanje količina goriva za konvencionalne sustave, u obzir je uzeta dostupna

toplinska energija korištenjem dubokog bušotinskog izmjenjivača te uvećana za učin kotla sustava koji se primjenjuje. Vrijednosti učina su tipične srednje vrijednosti za tu vrstu sustava. Primjer proračuna dan je u tablici 7.7., za uvjete prikazane u tablici 7.6.

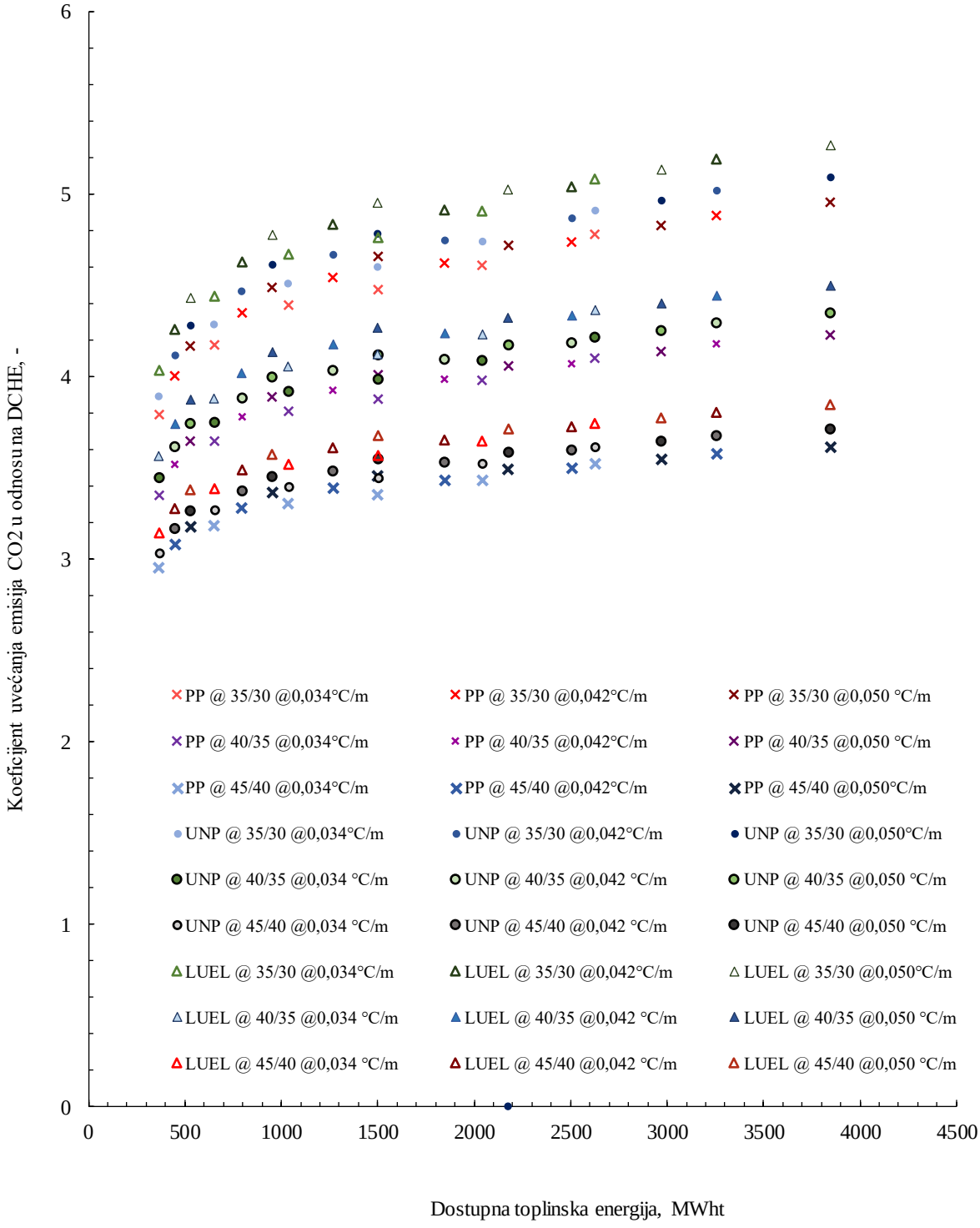
Tablica 7.7. Primjer proračuna emisija CO_2 za različite sustave grijanja, na primjeru režima 40/35 na strani korisnika

	Energetski izvor	Emisijski faktor	
1	Električna energija – DCHE sustav	234,81	kg CO_2/MWh
2	Prirodni plin	220,2	kg CO_2/MWh
3	Ukapljeni naftni plin (UNP)	260,88	kg CO_2/MWh
4	Loživo ulje Ekstra lako (LUEL)	299,57	kg CO_2/MWh

	Izračun emisija CO_2						
5	Dubina	4000	3500	3000	2500	2000	1500
6	DCHE – električna energija, MWh_e	606,5	488,1	370,0	260,2	172,6	106,6
7	Emisije CO_2, t	142,4	114,6	86,9	61,1	40,5	25,0
8	Prirodni plin, MWh_t, @η=0,85	3088	2400	1765	1218	768	431
9	Emisije CO_2, t	680,0	528,5	388,6	268,1	169,0	94,8
10	Koeficijent uvećanja emisija,- (*8*÷*6*)	4,77	4,61	4,47	4,39	4,17	3,79
11	UNP, MWh_t, @η=0,98	2679	2082	1531	1056	666	373
12	Emisije CO_2, t	698,8	543,1	399,3	275,5	173,7	97,4
13	Koeficijent uvećanja emisija,- (11÷*6*)	4,91	4,74	4,60	4,51	4,29	3,89
14	LUEL, MWh_t, @η=0,92	2415	1876,8	1380	952,2	600,3	336,72
15	Emisije CO_2, t	723,5	562,2	413,4	285,3	179,8	100,9
16	Koeficijent uvećanja emisija,- (14÷*6*)	5,08	4,91	4,76	4,67	4,44	4,03

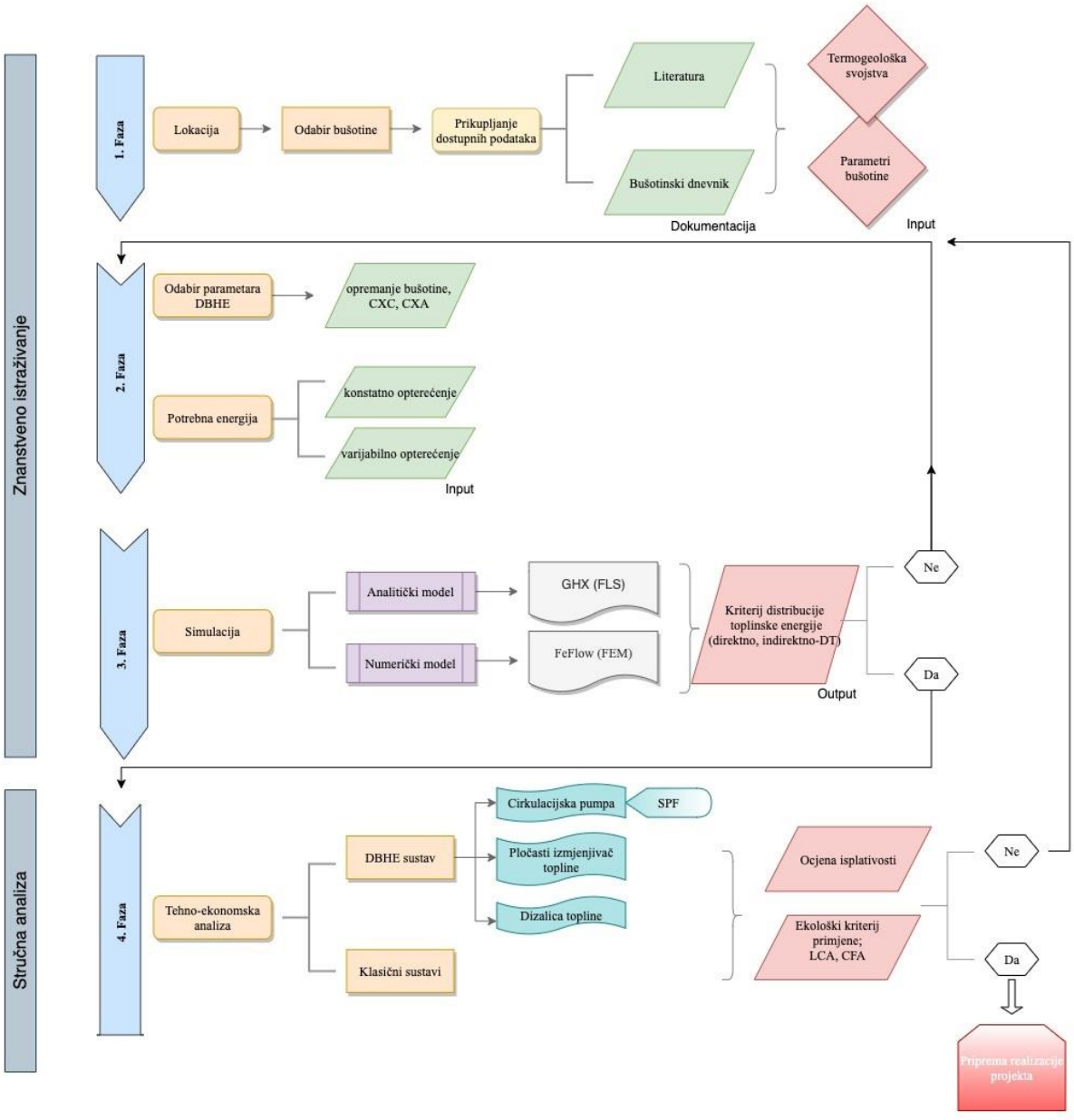
Navedeni proračun primijenjen je za slučajeve prikazane na slici 7.32. Da bi se emisije CO_2 predloženog sustava iskorištavanja toplinske energije dubokim bušotinskim izmjenjivačima usporedile s emisijama triju konvencionalnih sustava, svedeni su na bezdimenzionalne omjere u odnosu na utrošenu električnu energiju potrebnu za rad cirkulacijske pumpe i dizalica topline. Objedinjeni rezultati za tri različita temperaturna režima na strani korisnika za tri različita geotermalna gradijenta, prikazani su na slici 7.34. Vidljivo je su emisije CO_2 i od oko 3 do oko 5,5 puta veće kod konvencionalnih sustava. Također, porastom dostupne toplinske energije

rastu i omjeri emisija pojedinog klasičnog sustava u odnosu na DCHE. Odnosno, potvrđena je pretpostavka da se revitalizacijom dubokih bušotina mogu ostvariti značajne uštede u emisijama stakleničkih plinova, poglavito ugljikovog dioksida, u odnosu na tipične sustave koji se koriste na području kontinentalne RH.



Slika 7.36. *Koeficijenti emisija ugljikovog dioksida iskazani kao omjeri u odnosu na emisije proizašle korištenjem električne energije potrebne za rad dubokog bušotinskog izmjenjivača, na primjeru protoka od 15 l/s i različitim geotermalnim gradijentima*

Model za procjenu dostupne toplinske energije može se proširiti ako se uključi i tehno-ekonomska analiza. Također potrebno je uzeti u obzir i ekološki kriterij utjecaja na okoliš, odnosno proširiti model analizom životnog ciklusa (engl. *life cycle assessment,* LCA) kao i detaljnijim izračunom tzv.ugljičnog otiska (eng. *carbon footprint analysis,*CFA). U tom slučaju potpuni model za procjenu isplativosti revitalizacije napuštenih istražnih, naftnih i plinskih bušotina poprima proces prikazan na slici 7.36.



Slika 7.37. *Potpuni model za procjenu isplativosti revitalizacije napuštenih bušotina*

8. ZAKLJUČAK

U narednih nekoliko godina slijedi tranzicijski period prema proizvodnji i korištenju električne i toplinske energije iz obnovljivih izvora energije. Iz EU energetskih i klimatskih strategija i novih energetskih analiza za RH vidljivo je da se u određenoj mjeri računa i na energiju dostupnu iz geotermalnih izvora. U predviđanjima se iskorištavanje tih izvora u najvećoj mjeri svodi na korištenje klasičnih sustava za za proizvodnju električne energije ili korištenje toplinske energije. Većina projekcija ne uzima u obzir i mogućnost proizvodnje toplinske i električne energije korištenjem geotermalne topline dostupne revitaliziranjem napuštenih naftnih, plinskih i istražnih bušotina. U RH još nije provedeno sustavno istraživanje potencijala dostupne geotermalne energije korištenjem revitaliziranih napuštenih bušotina. Stoga su ciljevi ovog istraživanja definirani kvantifikacijom potencijala geotermalne energije kontinetnalnog dijela RH korištenjem revitaliziranih bušotina dubokim izmjenjivačima topline i izradom konceptualnog modela povezivanjem termogeoloških karakteristika stijenske mase, tehničkih parametara bušotine i narinute toplinske snage. Također, prepoznata je potreba za izradom nove karte geotermalnih gradijenata. Nova karta izrađena je na temelju podataka izdvojenih za 154 bušotine.

Na primjeru bušotine Pčelić-1 opisan je postupak revitalizacije napuštenih bušotina i ugradnje dubokog koaksijalnog bušotinskog izmjenjivača topline. Za proračun korišteni su geometrijski paramteri dubokog izmjenjivača, termogeološke karakteristike stijenske mase, određene pripadajućim korelacijama uz proizvoljno odabrane iznose narinute toplinske snage, za vremensko razdoblje od 20 godina. S obzirom na korištenje programskog paketa GHX, detaljno je opisana analitička metoda linijskog izvora konačne duljine FLS. Promatrani su temperaturni odzivi za dva slučaja korištenja dubokih izmjenjivača prema potrebama korisnika, konstantno i varijabilno, i za tri različita temperaturna razreda, zavisno od izvedenog termo-tehničkog sustava. Kod konstantnog opterećenja proizvoljno su odabrane narinute toplinske snage od 500, 1000 i 1500 kW_t. Rezultati temperaturnih odziva su pokazali da narinute toplinske snage 500 i 1000 kW_t zadovoljavaju uvjete pripadajućeg temperaturnog režima, uz uspostavu ustaljenog stanja prijelaza toplinske energije, kod sva tri odabrana protoka (10, 20 i 30 l/s). Temperaturni odzivi toplinskog opterećenja od 1500 kW_t pokazali su da nije zadovoljen ni uvjet najnižeg temperaturnog razreda (EST>10°C) za bilo koji od protoka. Smanjenjem toplinskog opterećenja na 1250 kW_t navedni uvjet je zadovoljen. Usporedbom rezultata temperaturnih odziva koristeći neizolirani tubing (pri 200, 300 i 400 kW_t i kod protoka od 10

l/s) i izolirani tubing pokazalo se da je izoliranjem unutarnje cijevi izmjenjivača dostupno i do tri puta više toplinske energije. Kako bi se ustanovio radijus širenja toplinske fronte korišten je model linijskog izvora beskonačne duljine (ILS) te je utvrđeno kako na udaljenosti od 15 m dolazi do promjene temeprature manje od 1°C duž presjeka. Navedeno je potvrđeno numeričkim modelom, gdje je uočeno da su vrijednosti statičke temeprature vidljive na udaljenosti 20 m od osi kanala bušotine. Rezultati modeliranja kod varijabilnog toplinskog opterećenja, uz proizvoljne uvjete protoka od 10, 20 i 30 l/s pokazali su da je u svim slučajevima toplinskih opterećenja uspostavljeno ustaljeno stanje prijelaza toplinske energije unutar 20 godina rada sustava. Kako se kod varijabilnih opterećenja bušotinski izmjenjivač ne koristi tijekom ljetnih mjeseci dolazi do toplinskog oporavka stijenske mase, tj. temperatura stijena oko bušotinskog izmjenjivača približava se statičkim vrijednostima. Također, ustaljeno stanje prijelaza toplinske energije održava se do kraja rada sustava. Ovisno o temperaturnom režimu dostupna toplinska energija u ovom načinu iskorištavanja kreće se od minimalnih 1725 MWh_t (1,15 MW_t vršno) kod protoka od 10 l/s i najvišeg temperaturnog režima pa do 4110 MWh_t (2,74 MW_t vršno) kod protoka od 30 l/s i najnižeg temperaturnog režima, pri 1500 radnih sati (FLH).

Kvantificiranje potencijala korištenja geotermalne energije korištenjem revitaliziranih bušotina izraženo je utvrđenim toplinskim opterećenjima za odabrane različite dubine (od 1500 do 4000 m, korak od 500 m) geometrijski tipične bušotine. Pretpostavljena je upotreba izoliranog tubinga na temelju rezultata primjera bušotine Pčelić-1, te su za svaku dubinu mijenjani parametri protjecanja (od 10 do 30 l/s, korak od 5 l/s) i geotermalni gradijenti (od 0,034 do 0,050 °C/m, korak od 0,04 °C), uz korištenje ponderirane aritmetičke sredine za pojedini termogeološki parametar (toplinska vodljivost i specifična volumna toplina). Odabrana su dva temperaturna režima, viši (LST/ELT 45/40) i niži (LST/ELT 10/5). Za konstantno opterećenje, kod višeg temperaturnog režima, ostvarena dostupna toplinska snaga se nalazi između minimalnih 13 kW_t (pri 0,046 °C/m, dubini 1500 m i protoku 10 l/s) do 805 kW_t (pri 0,050 °C, dubini 4000 m i protoku 30 l/s). Kod višeg temperaturnog razreda, geotermalnih gradijenata nižih od 0,046 °C/m i dubine od 1500 m ostvarene temperature nisu dovoljne za rad sustava. U slučaju nižeg temperaturnog režima vrijednosti dostupne toplinske snage nalaze se između 100 kW_t (pri 0,034 °C/m, dubini 1500 m i protoku 10 l/s) i 1180 kW_t (pri 0,050 °C, dubini 4000 m i protoku 30 l/s). Korištenjem dizalica topline pri nižem temperaturnom režimu moguće je iskoristiti i niže temperature dostupne na manjim dubinama, pri nižem geotermalnom gradijentu i nižem protoku. Dostupna toplinska energija kod varijabilnih opterećenja pri FLH 1500 sati, za viši temperaturni razred, uočena je od 68 MWh_t (pri 0,042 °C, dubini 1500 m i

protoku 10 l/s) sve do 2980 MWh_t (pri 0,050 °C, dubini 4000 m i protoku 30 l/s). Iz dijagrama je vidljivo da je kod nižeg temeraturnog režima dostupno više toplinske energije, u usporedbi s višim režimom. Konkretno, dostupna toplinska energija ide od minimalnih 360 MWh_t (pri 0,034 °C, dubini 1500 m i protoku 10 l/s) do preko 4000 (pri 0,050 °C, dubini 4000 m i protoku 30 l/s). Prema novoj karti geotermalnih gradijenata i prema dobivenim rezultatima modeliranja dostupnih količina toplinske energije potvrđena je hipoteza istraživanja da su uslijed povišenog geotermalnog gradijenta napuštene bušotine pogodne za iskorištavanje geotermalne energije pomoću dubokih koaksijalnih izmjenjivača topline. Iz navedenog i prema dostupnim istraživanjima ostvaren je i znanstveni doprinos uspostave konceptualnog modela pridobivanja toplinske energije povezivanjem tehničkih geometrijskih parametara dubokih koaksijalnih izmjenjivača topline i termogeoločkih parametara.

Kao kriterij za provođenje revitalizacije, s hidrauličkog stanovišta, prepoznato je tehničko ograničenje da nema komercijalno dostupnih cirkulacijskih pumpi koje rade s padom tlaka većim od 30 bara. Utvrđen je kriterij odabira bušotina pogodnih za preces revitalizacije ugradnjom DCHE prema uvjetu pada tlaka manjeg od 30 bara pri odabranim protocima i dubinama. Kao drugi kriterij utvrđen je faktor iskoristivosti bušotinskog izmjenjivača, tj.SPF faktor, koji pokazuje omjer dostupne toplinske energije i uložene električne energije potrebne za rad cirkulacijske pumpe. Istraživanje je pokazalo da je SPF direktno ovisan od dubini i padu tlaka, ali i dostupnoj toplinskoj energiji. Iako se porastom dubine, za istu vrijednost protoka, povećava potrošnja električne energije, uslijed porasta pada tlaka, SPF raste zbog povećanja dostupne toplinske energije. Međutim, za jednaku dubinu i variranjem protoka, pokazalo se da SPF pada porastom pada tlaka, odnosno porastom vrijednosti protoka. Kod projektiranja realnih sustava potrebno je utvrditi SPF kako bi se što povoljnije zadovoljili uvjeti potrebne toplinske energije.

Usporedba cijena potrošnje električne energije, za odabrani primjer protoka od 15 l/s, potrebne za rad sustava bušotinskog izmjenjivača topline i klasičnog plinskog sustava, pokazala je da postoje ekonomske uštede na godišnjoj razini. Kod višeg temperaturnog režima uštede na razlici između cijena kreću se između 30 i 95% za kućanstva te između 18 i 93% za industriju. Manja ušteda za industriju proizlazi iz više cijene energenata. Kod nižeg temperaturnog režima uštede su manje uslijed povećane potrošnje električne energije potrebne za rad kako cirkulacijske pumpe tako i dizalice topline. Zbog toga se uštede nalaze u rasponu od oko 10 do oko 50% za kućanstva te od minimalnih 3 do oko 35% za industriju. Prednost korištenja sustava s dizalicama toplina očituje se u većoj dostupnoj toplinskoj energiji. Za isti primjer pokazane su moguće uštede u emisijama stakleničkih plnova, poglavito CO_2, korištenjem revitaliziranih

bušotina u iznosu od 3 do 5,5 više u usporedbi s upotrebom konvecionalnih energenata za grijanje. Postavljanjem modela ekonomskih ušteda korištenjem ovog sustava i usporedbom emisija ugljikovog dioksida korištenjem dubokih izmjenjivača u odnosu na klasične energente ispunjeni su očekivani znanstveni doprinosi rada. Također, dobiveni rezultati potvrdili su hipotezu istraživanja da je moguće na ekonomski opravdan način, smanjiti emisije stakleničkih plinova te ostvariti povećanje udjela obnovljivih izvora energije.

Prijedlog budućih istraživanja:

- Uslijed povišenog geotermalnog gradijenta na kontinentalnom dijelu RH postoji značajan potencijal korištenja geotermalne energije revitalizacijom napuštenih bušotina, kao što je pokazano kvantifikacijom dostupne toplinske energije. Budućim istraživanjima moguće je proširiti model s odabirom drugačijih tehničkih geometrijskih parametara izmjenjivača, s ciljem odabira povoljnijeg sustava. Također, moguće je usmjeriti istraživanje na efikasnost površinskog sustava, odabirom različitih temperaturnih režima na strani pločastog izmjenjivača i dizalica topline.
- Uključivanjem kapitalnih i operativnih troškova te analizom vremena povrata ulaganja u sustav koji koristi duboke koaksijalne izmjenjivače topline moguća je proširiti tehno-ekonomsku analizu.

9. LITERATURA

Alimonti, C. & Soldo, E., 2016. Study of geothermal power generation from a very deep oil well with a wellbore heat exchanger. Renewable energy, 86, pp.292-301.

Al-Khoury, R., 2011. Computational modeling of shallow geothermal systems. CRC press.

Aneke, M., Agnew, B., & Underwood, C., 2011. Performance analysis of the Chena binary geothermal power plant. Applied Thermal Engineering, 31(10), pp. 1825-1832.

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

Bassiouni, Z., 1994. Theory, measurement, and interpretation of well logs (Vol. 4). Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME, Society of Petroleum Engineers.

Beardsmore, G.R., & Cull, J.P., 2001. Crustal heat flow: a guide to measurement and modelling. Cambridge University Press.

Bernier, M.A., 2001. Ground-coupled heat pump system simulation/Discussion. ASHRAE transactions, 107, p.605.

Blackwell, J.H., 1956. The axial-flow error in the thermal-conductivity probe. Canadian Journal of Physics, 34(4), pp.412-417.

Bonett, A., & Pafitis, D., 1996. Getting to the root of gas migration. Oilfield Review, 8(1), pp. 36-49.

Bu, X., Ma, W., & Li, H., 2012. Geothermal energy production utilizing abandoned oil and gas wells. Renewable energy, 41, pp. 80-85.

Bullard, E.C., 1947. The time necessary for a bore hole to attain temperature equilibrium. Geophysical Journal International, 5, pp.127-130.

Bušotinska arhiva. Ministarstvo gospodarstva, poduzetništva i obrta.

Campbell, K., & Smith, R., 2013. Permanent Well Abandonment. Society of Petroleum Engineers, 9(3), pp. 25-27. doi:10.2118/0313-025-TWA

Carslaw, H. S., & Jaeger, J. C., 1959. Conduction of heat in solids. Oxford: Clarendon Press.

Caulk, R. A., & Tomac, I., 2017. Reuse of abandoned oil and gas wells for geothermal energy production. Renewable Energy, 112, pp. 388-397.

Chen, C., Shao, H., Naumov, D., Kong, Y., Tu, K. & Kolditz, O., 2019. Numerical investigation on the performance, sustainability, and efficiency of the deep borehole heat exchanger system for building heating. Geothermal Energy, 7(1), pp.1-26. doi:10.1186/s40517-019-0133-8

Cheng, W. L., Li, T. T., Nian, Y. L., & Wang, C. L., 2013. Studies on geothermal power generation using abandoned oil wells. Energy, 59, pp. 248-254.

Cheng, W. L., Li, T. T., Nian, Y. L., & Xie, K., 2014a. An Analysis of Insulation of Abandoned Oil Wells Reused for Geothermal Power Generation. Energy Procedia, 61, pp. 607-610.

Cheng, W. L., Li, T. T., Nian, Y. L., & Xie, K., 2014b. Evaluation of working fluids for geothermal power generation from abandoned oil wells. Applied Energy, 118, pp. 238-245.

Chiasson, A.D., 2016. Geothermal heat pump and heat engine systems: Theory and practice. John Wiley & Sons.

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

Cooper, L.R. & Jones, C., 1959. The determination of virgin strata temperatures from observations in deep survey boreholes. Geophysical Journal International, 2(2), pp.116-131.

Ćubrić, S., 1977. Recovery of geothermal energy from oil reservoir aquifers. Society of Petroleum Engineers.

Dahlheim, R. & Pike, W.J., 2012. Generating Electricity From Produced Water. Journal of Petroleum Technology, 64(12), pp.30-33.

Davis, A. P., & Michaelides, E. E., 2009. Geothermal power production from abandoned oil wells. Energy, 34(7), pp. 866-872.

Direktiva 2010/31/EU Europskog Parlamenta i Vijeća o energetskoj učinkovitosti zgrada. 2010. Službeni list Europske unije L153/13, pp.124-146.

Diersch, H.J.G., 2014. FEFLOW: finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media. Springer Science & Business Media.

Dijkshoorn, L., Speer, S. & Pechnig, R., 2013. Measurements and design calculations for a deep coaxial borehole heat exchanger in Aachen, Germany. International Journal of Geophysics.

Dowdle, W.L. & Cobb, W.M., 1975. Static formation temperature from well logs-an empirical method. Journal of Petroleum Technology, 27(11), pp.1-326.

Dusseault, M. B., Gray, M. N., & Nawrocki, P. A., 2000. Why oil wells leak: cement behavior and long-term consequences. In International Oil and Gas Conference and Exhibition in China. Society of Petroleum Engineers.

Eskilson, P., 1987. Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. Doktorska disertacija. Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden.

Fanailoo, P., Buchmiller, D., Ouyang, S., & Allen, E., 2017. Risk Based Approach to Well Plugging & Abandoning-Reducing Costs While Verifying Risk. In Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference.

FEFLOW® help. Dokumentacija dostupna uz program FEFLOW® URL: http://www.feflow.info/html/help/default.htm?turl=HTMLDocuments%2Freference%2Fparameters%2Fboundaryconditions%2Fheattransport%2Fheat_transfer_bc.htm (6.8.2019)

Gambill, W., 1957. You can predict heat capacities. Chem. Engr., June, 1957: 243-248.

Ghoreishi-Madiseh, S. A., Hassani, F. P., & Al-Khawaja, M. J., 2013. A novel technique for extraction of geothermal energy from abandoned oil wells. U: World renewable energy forum.

Ghoreishi-Madiseh, S. A., Templeton, J., Hassani, F., Al-Khawaja, M. J., & Aflaki, E., 2014. Geothermal Energy Extraction from Decommissioned Petroleum Wells. In ISRM International Symposium-8th Asian Rock Mechanics Symposium. International Society for Rock Mechanics.

Gnielinski, V., 1976. New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow. Int. Chem. Eng., 16(2), pp.359-368.

Gomaa, E. E. M., 1973. Thermal behavior of partially liquid saturated porous media. Doktorska disertacija, University of California, Berkeley.

Hellström, G.A.J., 1991. Ground heat storage: Thermal analyses of duct storage systems. I. Theory. Lund University, Sweden

Hermanrud, C., Cao, S., & Lerche, I. 1990. Estimates of virgin rock temperature derived from BHT measurements: bias and error. Geophysics, 55(7), 924-931.

Holman, J. 1976. Heat Transfer. 4th Edition, McGraw-Hill. New York, SAD.

Holmberg, H., 2016. Transient Heat Transfer in Boreholes with Application to Non-Grouted Borehole Heat Exchangers and Closed Loop Engineered Geothermal Systems. disertacija. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norveška.

Horner, D.R., 1951. Pressure build-up in wells. In: 3rd World petroleum congress. World Petroleum Congress.

INA-Naftaplin, 1990. Rezultati geološkog praćenja istražne bušotine Pčelić-1 (Pče-1) i Pčelić-1 alfa (Pče-1 alfa). Zagreb (pristup u HGI, odobreno od strane Ministarstva)

INA d. d., 1999. Pojednostavljeni rudarski project izrade re-entry kanala ϕ149,23 mm (5 7/8'') bušotine Pčelić-1β (Pče-1β). Zagreb (pristup u HGI, odobreno od strane Ministarstva)

Incropera, F.P., Lavine, A.S., Bergman, T.L. & DeWitt, D.P., 2007. Fundamentals of heat and mass transfer. Wiley & Sons, USA.

Ingersoll, L.R., Plass, H. J., 1948. Theory of the ground pipe heat source for the heat pump. Heating Piping and Air Conditioning, 20, pp.119-122.

Ingersoll, L. R., & Zobel, O. J., 1913. An introduction to the mathematical theory of heat conduction. Ginn and Company, Boston, USA.

Ingersoll, L., Zobel, O.J. & Ingersoll, A.C., 1954. Heat Conduction: With Engineering Geological And Other Applications. Oxford And IBH Publishing Co.; New Delhi, India.

IPCC, 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

Jaeger, J.C., 1956. Conduction of heat in an infinite region bounded internally by a circular cylinder of a perfect conductor. Australian Journal of Physics, 9(2), pp.167-179.

Jelić, K., 1979. Termičke osobine sedimantacionog kompleksa jugozapadnog dijela Panonskog bazena. Doktorska disertacija Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

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.

Johnson, L. & Simon, D.L., 2009, February. Electrical power from an oil production waste stream. In PROCEEDINGS of Thirty-Forth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California.

Joyce, S. & Wirfs-Brock, J. 2015. The rising cost of cleaning up after oil and gas. Inside Energy. URL: *http://insideenergy.org/2015/10/01/the-rising-cost-of-cleaning-up-after-oil-and-gas/* (20.02.2018.)

Kelley, K. K., 1960. High-temperature heat-content, heat-capacity, and entropy data for the elements and inorganic compounds. US Bureau of Mines Bull., 584, p.232.

Kohl, T., Salton, M., & Rybach, L., 2000. Data analysis of the deep borehole heat exchanger plant Weissbad (Switzerland). In Proc. World Geothermal Congress (pp. 3459-3464).

Kohl, T., Brenni, R., & Eugster, W., 2002. System performance of a deep borehole heat exchanger. Geothermics, 31(6), pp. 687-708.

Kujawa, T., Nowak, W., & Stachel, A. A., 2006. Utilization of existing deep geological wells for acquisitions of geothermal energy. Energy, 31(5), pp. 650-664.

Kurevija, T., Vulin, D. & Krapec, V. 2012. Effect of borehole array geometry and thermal interferences on geothermal heat pump system. Energy Conversion and Management, 60, 134-142.

Kurevija, T., Strpić, K. & Koščak-Kolin, S., 2018. Applying petroleum the pressure buildup well test procedure on thermal response test—A novel method for analyzing temperature recovery period. Energies, 11(2), p.366.

Lachenbruch, A.H. & Brewer, M.C., 1959. Dissipation of the temperature effect of drilling a well in Arctic Alaska (No. 1083). US Government Printing Office.

Lee, J., Well Testing. Richardson, Texas; Society of Petroleum Engineers of AIME, SPE: 1982

Limberger, J., Boxem, T., Pluymaekers, M., Bruhn, D., Manzella, A., Calcagno, P., Beekman, F., Cloetingh, S. & van Wees, J.D., 2018. Geothermal energy in deep aquifers: A global assessment of the resource base for direct heat utilization. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, pp.961-975.

Link, K., Rybach, L., Imhasly, S., & Wyss, R., 2015. Geothermal Energy in Switzerland – Country Update. Proceedings World Geothermal Congress 2015

Lund, J. W. & Boyd, T. L., 2015. Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwide Review. Proceedings World Geothermal Congress 2015.

Macenić, M. & Kurevija, T., 2018. Revitalization of abandoned oil and gas wells for a geothermal heat exploitation by means of closed circulation: Case study of the deep dry well Pčelić-1. Interpretation, 6(1), pp.SB1-SB9.

Malvić, T., 2016. Regional turbidites and turbiditic environments developed during Neogene and Quaternary in Croatia. Materials and Geoenvironment, 63(1), pp.39-54.

Matthews, C.S., & Russell D.G, Pressure Buildup and Flow Tests in Wells. Dallas, USA: Society of petroleum engineers of AIME; 1967.

Morita, K., Matsubayashi, O., & Kusunoki, K., 1985. Down-hole coaxial heat exchanger using insulated inner pipe for maximum heat extraction. Geothermal Resources Council Trans., 9(1), pp. 45-50.

Morita, K., Bollmeier, W.S. & Mizogami, H., 1992. An experiment to prove the concept of the downhole coaxial heat exchanger (DCHE) in Hawaii. Geothermal Resources Council Transactions, 16, pp.9-16.

Narodne novine (NN) 56/13, 2013. Zakon o rudarstvu

Narodne novine (NN) 52/18, 2018. Zakon o istraživanju i eksploataciji ugljikovodika

Narodne novine (NN) 127/14, 2014. Zakon o energetskoj učinkovitosti.

Narodne novine (NN) 128/15, 2015. Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije I toplinskoj zaštiti u zgradama. pp.14-46.

Noorollahi, Y., Taghipoor, S., & Sajadi, B., 2017. Geothermal sea water desalination system (GSWDS) using abandoned oil/gas wells. Geothermics, 67, pp. 66-75.

Ramey Jr, H. J., 1962. Wellbore heat transmission. Journal of petroleum Technology, 14(04), pp. 427-435.

Rider, M. H. 2000. The geological interpretation of well logs. Sutherland, Scotland: Rider-French Consulting, Ltd.

Saftić, B., Velić, J., Sztanó, O., Juhász, G. & Ivković, Ž., 2003. Tertiary subsurface facies, source rocks and hydrocarbon reservoirs in the SW part of the Pannonian Basin (Northern Croatia and South-Western Hungary). Geologia Croatica, 56(1), pp. 101-122.

Sarbu, I. & Sebarchievici, C., 2014. General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings. Energy and buildings, 70, pp.441-454.

Sapinska-Sliwa, A., Rosen, M. A., Gonet, A., & Sliwa, T., 2015. Deep Borehole Heat Exchangers: A Conceptual Review. In Proceedings of the World Geothermal Congress (pp. 1-11).

Schellschmidt, R. Hurter S, Förster A, & Huenges E. 2002. Atlas of geothermal resources in Europe. Brussels: Office for Official Publications of the European Communities;

Serra, O., 1984. Developments in Petroleum Science (A15) Fundamentals of Well-Log Interpretation (Vol 1): The Acquisition of Logging Data. Elsevier, Amsterdam, Nizozemska.

Śliwa, T., Kruszewski, M., Assadi, M. & Sapińska-Śliwa, A., 2017. The application of Vacuum Insulated Tubing in Deep Borehole Heat Exchangers. AGH Drilling, Oil, Gas, 34(2), pp.597-617.

Soldo, E., & Alimonti, C., 2015. From an Oilfield to a Geothermal One: Use of a Selection Matrix to Choose Between Two Extraction Technologies. In Proceedings, World Geothermal Congress, Melbourne (pp. 19-25).

Soldo, V., Boban, L. & Borović, S., 2016. Vertical distribution of shallow ground thermal properties in different geological settings in Croatia. Renewable energy, 99, 1202-1212.

Somerton, W. H., 1992. Thermal properties and temperature-related behavior of rock/fluid systems (Vol. 37). Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, Nizozemska.

Somerton, W., & Selim, M., 1961. Additional thermal data for porous rocks - thermal expansion and heat of reaction. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/1613-G

Standing, M., 1977. Volumetric and Phase Behavior of Oil Field Hydrocarbon Systems. Society of petroleum engineers of AIME.

Stokes, A. W., 2014. Decommissioning Costs Can Be Reduced. In Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference.

Templeton, J. D., Ghoreishi-Madiseh, S. A., Hassani, F., & Al-Khawaja, M. J., 2014. Abandoned petroleum wells as sustainable sources of geothermal energy. Energy, 70, pp. 366-373.

US Environmental Protection Agency, 1987. Management of Wastes from the Exploration, Development, and Production of Crude Oil, Natural Gas, and Geothermal Energy. Office of

Solid Waste and Emergency Response, Washington, D.C. EPA/530-SWE-88-003. URL: https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=20012D4P.PDF (30.08.2017)

Velić, J., Weisser, M., Saftić, B., Vrbanac, B., & Ivković, Ž., 2002. Petroleum-geological characteristics and exploration level of the three Neogene depositional megacycles in the Croatian part of the Pannonian Basin. Nafta, 55, 11–23.

Velić, J., Malvić, T., Cvetković, M. & Vrbanac, B., 2012. Reservoir geology, hydrocarbon reserves and production in the Croatian part of the Pannonian Basin System. Geologia Croatica, 65/1, 91-101.

Wellmer, F. W. 2012. Statistical evaluations in exploration for mineral deposits. Springer Science & Business Media.

Wang, Z., Wang, F., Liu, J., Ma, Z., Han, E. & Song, M., 2017. Field test and numerical investigation on the heat transfer characteristics and optimal design of the heat exchangers of a deep borehole ground source heat pump system. Energy Conversion and Management, 153, 603-615.

White, F. M. 1994. Fluid mechanics, 3rd ed., Mc-Graw Hill, New York.

Wight, N. M., & Bennett, N. S., 2015. Geothermal energy from abandoned oil and gas wells using water in combination with a closed wellbore. Applied Thermal Engineering, 89, pp. 908-915.

Xin, S., Liang, H., Hu, B. & Li, K., 2012, January. Electrical power generation from low temperature co-produced geothermal resources at Huabei oilfield. In Proceedings of the thirty-seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, CA, USA (Vol. 30).

Zare-Reisabadi, M., Kamali, M.R., Mohammadnia, M. & Shabani, F., 2015. Estimation of true formation temperature from well logs for basin modeling in Persian Gulf. Journal of Petroleum Science and Engineering, 125, pp.13-22.

Zhang, L., Yuan, J., Liang, H., & Li, K., 2008. Energy from abandoned oil and gas reservoirs. In SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.

Ziabakhsh-Ganji, Z., Nick, H.M. & Bruhn, D.F., 2019. Investigation of the synergy potential of oil and geothermal energy from a fluvial oil reservoir. Journal of Petroleum Science and Engineering, 181.

Mrežni izvori:

http://ec.europa.eu/eurostat/web/environmental-data-centre-on-natural-resources/natural-resources/energy-resources/geothermal-energy (15.3.2018.a)

https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics/hr (15.3.2018.b)

Croatian Hydrocarbon Agency, 2020. Geothermal energy in Croatia, URL: https://www.azu.hr/media/1793/geothermal-energy-in-croatia_booklet.pdf (11.2.2020.)

Electricity price statistics/hr. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/pdfscache/64912.pdf (15.2.2020.)

EGIP GeoZS Geothermal Map, URL: https://biotit.geo-zs.si/gis/rest/services/EGIP/EGIP_geothermal_map/MapServer (15.11.2019.)

FEFLOW Documentation URL: http://www.feflow.info/html/help72/feflow/09_Parameters/Auxiliary_Data/max_interior_angle.html (17.7.2019.)

GEODH, 2014. Developing geothermal district heating in Europe. http://geodh.eu/wp-content/uploads/2012/07/GeoDH-Report-2014_web.pdf (25.7.2019.)

GEODH, 2013. Reports on Evaluation of Market Barriers for Geothermal District Heating in Europe. http://geodh.eu/wp-content/uploads/2014/11/FINALGeoDH-Report-D-3-3-Evaluation-market-barriers.pdf (25.7.2019.)

GEOELEC, Towards more geothermal electricity generation in Europe. http://www.geoelec.eu/wp-content/uploads/2014/01/GEOELEC-report-web.pdf (20.7.2019.)

GEOFAR, https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/en/projects/geofar (20.7.2019.)

Geothermal Atlas of Vojvodina, 2010. URL: http://www.psemr.vojvodina.gov.rs/images/Studije/Geotermalna-energija/Geotermalni_atlas_AP_Vojvodine.pdf (15.11.2019.)

GP Zagreb. URL: http://www.gpz-opskrba.hr/useful-information/natural-gas-price/zagreb-public-gas-supply-service-gas-prices-from-1-april-2019-to-31-december-2019/1542 (15.2.2020.)

Grundfos. URL: https://product-selection.grundfos.com/front-page.html?qcid=735484292

HEP kalkulator. https://hepi.hep.hr/mobile/kalkulator.aspx (14.2.2020.)

Natural gas price statistics. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Natural_gas_price_statistics#Natural_gas_prices_for_non-household_consumers (14.2.2020.)

https://mgipu.gov.hr/UserDocsImages/dokumenti/EnergetskaUcinkovitost/meteoroloski_podaci/FAKTORI_primarne_energije.pdf) (10.2.2020.)

I POPIS SLIKA

Slika 3.1. Prikaz prijelaza toplinske energije u kontrolnom volumenu u Kartezijevom koordinatnom sustavu 17

Slika 3.2. Prikaz prijelaza toplinske energije u kontrolnom volumenu u cilindričnom koordinantnom sustavu 18

Slika 3.3. Skica linijskog izvora beskonačne duljine (ILS) 21

Slika 3.4. Shematski prikaz primjene načela superpozicije kod različitih toplinskih opterećenja 26

Slika 3.5. Shematski prikaz temperaturnog odziva fluida u bušotinskom izmjenjivaču u slučaju $q_1^{'} > q_2^{'} > q_3^{'}$. 27

Slika 3.6. Shematski prikaz temperaturnog odziva fluida u bušotinskom izmjenjivaču u slučaju $q_1^{'} \neq 0$ i $q_2^{'} = 0$. 28

Slika 3.7. Veličina elemenata mreže 30

Slika 3.8. Skica cilindričnog modela prijelaza toplinske energije 31

Slika 3.9. Prikaz odnosa bezdimenzijske G-funkcije i Fourierovog broja, za različite vrijednosti bezdimenzijskog parametra p 32

Slika 3.10. Shematski prikaz koaksijalnog izmjenjivača 35

Slika 3.11. Raspored proračuna toplinskih otpora kod CXA konfiguracije protjecanja 38

Slika 3.12. Raspored proračuna toplinskih otpora kod CXC konfiguracije protjecanja 38

Slika 4.2. Odnos specifičnog toplinskog kapaciteta pojedinih stijena u odnosu na porast temperature 42

Slika 4.3. Grafički prikaz određivanja korelacije toplinske vodljivosti u odnosu na gustoću . 48

Slika 4.4. Promjena toplinske vodljivosti porastom temperature, za različite vrijednosti pri početnom mjerenju vodljivosti pri 20°C 50

Slika 4.5. Promjena vrijednosti toplinskog difuziviteta s promjenom temperature za različite vrste stijena 52

Slika 4.6. Rezultati mjerenja toplinskog difuziviteta na uzorcima u rasponu od 20-250 °C ... 52

Slika 5.1. Prikaz vrijednosti odnosa funkcije $F(\alpha_1, \tau_1)$ i bezdimenzijskog vremena, za pojedine vrijednosti parametra α_1 62

Slika 5.2. Primjer određivanja statičke temperature metodom Horner i Cooper-Jones za bušotinu Hrvatsko zagorje-1 na dubini 2595 m (za usporedbu T_{DST} @ 2370 m=102 °C) i postupak određivanja geotermalnog gradijenta 63

Slika 5.3. Prikaz lokacija odabranih bušotina za kreiranje karte geotermalnog gradijenta 64

Slika 5.4. Temperature mjerene na dnu bušotina maksimalnim termometrom 65

Slika 5.5. Podaci DST mjerenja temperature za Dravsku i Mursku depresiju te Savsku i Slavonsko-srijemsku depresiju 66

Slika 5.6. Objedinjeni podaci DST mjerenja temperature za kontinentalni dio RH 66

Slika 5.7. Prikaz odnosa bezdimenzijskog korekcijskog fatkora, f, i dubine iz podataka o DST mjerenjima temperature 67

Slika 5.8. Korigirane vrijednosti temperatura na dubini bušotina pomoću Hornerove metode….. 68

Slika 5.9. Korigirane vrijednosti temperatura na dubini bušotina pomoću Cooper-Jones metode… 68

Slika 5.10. Pregled mjerenih podataka temperature u bušotinama na području Dravske i Savske depresije nakon korekcije temperatura 69

Slika 5.11. Nova karta geotermalnih gradijenata na području kontinentalne Hrvatske 70

Slika 5.12. Prva geotermalna karta RH na području Panonskog bazena 71

Slika 5.13. Standardno odstupanje temperatura na 1000 m 72

Slika 5.14. Karta temperatura na 1000 m dubine za područje kontinentalne Hrvatske, na temelju nove karte geotermalnih gradijenata. 73

Slika 5.15. Karta temperatura na 2000 m dubine za područje kontinentalne Hrvatske, na temelju nove karte geotermalnih gradijenata. 73

Slika 6.1. Lokacija bušotine Pčelić-1 74

Slika 6.2. Prikaz stanja nakon izvedbe bušotine Pčelić-1 i 1α 77

Slika 6.3. Prikaz stanja nakon izvedbe bušotinskog izmjenjivača s vakuum izolacijom na bušotini Pčelić-1 79

Slika 6.4. Vrijednosti temperature na izlazu iz bušotinskog izmjenjivača (EST) za različita opterećenja pri protoku od 10 l/s na bušotini Pčelić-1 85

Slika 6.5. Vrijednosti temperature na izlazu iz bušotinskog izmjenjivača (EST) za različita opterećenja pri protoku od 20 l/s na bušotini Pčelić-1 87

Slika 6.6. Vrijednosti temperature na izlazu iz bušotinskog izmjenjivača (EST) za različita opterećenja pri protoku od 30 l/s na bušotini Pčelić-1 88

Slika 6.7. Vrijednosti temperature na izlazu iz bušotinskog izmjenjivača (EST) za toplinsko opterećenje od 1250 kW_t pri različitim protocima (10, 20 i 30 l/s) na bušotini Pčelić-1 89

Slika 6.8. Usporedba temperaturnog odaziva bušotinskog koaksijalnog izmjenjivača pri protoku od 10 l/s, za slučaj neizoliranog i izoliranog tubinga 90

Slika 6.9. Prikaz vrijedosti bušotinskih otpora za različite protoke kod primjene neizoliranog i izoliranog tubinga 91

Slika 6.10. Usporedba temperaturnog odaziva bušotinskog izmjenjivača pri protoku od 10 l/s, pri jednakim opterećenjima, za slučaj neizoliranog i izoliranog tubinga 91

Slika 6.11. Usporedba toplinskih opterećenja za neizolirani i izolirani tubing, pri protoku od 10 l/s, za jednaki temperaturni odziv u zadnjoj godini rada bušotinskog izmjenjivača 92

Slika 6.12. Promjena temperature za bušotinu Pčelić-1 prilikom konstantnog toplinskog opterećenja od 500 kW_t u radijusu do 15 m. 93

Slika 6.13. Razlike između statičke vrijednosti temperatura i temperatura tijekom rada bušotinskog izmjenjivača na određenoj dubini i udaljenosti od kanala bušotine 94

Slika 6.14. Temperaturni odziv i dostupna količina toplinske energije za varijabilno toplinsko opterećenje pri protoku od 10 l/s 96

Slika 6.15. Temperaturni odziv i dostupna količina toplinske energije za varijabilno toplinsko opterećenje pri protoku od 20 l/s 96

Slika 6.16. Temperaturni odziv i dostupna količina toplinske energije za varijabilno toplinsko opterećenje pri protoku od 30 l/s 97

Slika 6.17. Izgled rafinirane mreže uz prikaz zadovoljavanja kriterija maksimalnog unutarnjeg kuta... 99

Slika 6.18. Kriterij maksimalnog unutarnjeg kuta trokuta, nakon rafiniranja mreže 100

Slika 6.18. Prikaz postavljenog 3D modela i raspored statičke temperature u FEFLOW® programu 102

Slika 6.19. Rezultati simulacije rada bušotinskog izmjenjivača s konstantnim opterećenjem (500 kW) i protokom radnog fluida (30 l/s) tijekom šest mjeseci - raspodjela temperature fluida u tubingu (in) i prstenastom prostoru (out) na kraju simulacije 104

Slika 6.20. Rezultati simulacije rada bušotinskog izmjenjivača s konstantnim opterećenjem (500 kW) i protokom radnog fluida (30 l/s) tijekom šest mjeseci - temperaturni odziv na izlazu i ulazu bušotinskog izmjenjivača 105

Slika 6.21. Rezultati simulacije rada bušotinskog izmjenjivača s konstantnim opterećenjem (500 kW) i protokom radnog fluida (30 l/s) tijekom šest mjeseci - prosječna temperatura bušotinskog izmjenjivača 105

Slika 6.22. Rezultati temperaturnog odziva (prosječna temperatura) dobivenog pomoću analitičkog modela linijskog izvora konačne duljine (FLS) rada bušotinskog izmjenjivača pri istim radnim uvjetima 106

Slika 6.23. Prikaz širenja toplinske fronte na dubini 1800 m 107

Slika 6.24. Prikaz širenja toplinske fronte na dubini 4500 m 108

Slika 7.1. Rezultati dostupnih toplinskih opterećenja pri konstantnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim LST do 45 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,034 °C/m, za različite uvjete dubine i protoka 112

Slika 7.2. Rezultati dostupnih toplinskih opterećenja pri konstantnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim LST do 45 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,038 °C/m za različite uvjete dubine i protoka 113

Slika 7.3. Rezultati dostupnih toplinskih opterećenja pri konstantnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim LST do 45 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,042 °C/m za različite uvjete dubine i protoka 113

Slika 7.4. Rezultati dostupnih toplinskih opterećenja pri konstantnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim LST do 45 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,046 °C/m za različite uvjete dubine i protoka 114

Slika 7.5. Rezultati dostupnih toplinskih opterećenja pri konstantnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim LST do 45 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,050 °C/m za različite uvjete dubine i protoka 114

Slika 7.6. Usporedba vrijednosti dostupnih toplinskih opterećenja pri konstantnom režimu rada za direktnu upotrebu za minimalnu i maksimalnu vrijednost protoka, pri LST 45 °C 115

Slika 7.7. Rezultati dostupnih toplinskih opterećenja pri konstantnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim LST do 10 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,034 °C/m za različite uvjete dubine i protoka 116

Slika 7.8. Rezultati dostupnih toplinskih opterećenja pri konstantnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim LST do 10 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,038 °C/m za različite uvjete dubine i protoka 117

Slika 7.9. Rezultati dostupnih toplinskih opterećenja pri konstantnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim LST do 10 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,042 °C/m za različite uvjete dubine i protoka 117

Slika 7.10. Rezultati dostupnih toplinskih opterećenja pri konstantnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim LST do 10 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,046 °C/m za različite uvjete dubine i protoka 118

Slika 7.11. Rezultati dostupnih toplinskih opterećenja pri konstantnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim LST do 10 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,050 °C/m za različite uvjete dubine i protoka 118

Slika 7.12. Rezultati dostupne toplinske energije pri varijabilnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim 40 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,034 °C/m za različite uvjete dubine i protoka 120

Slika 7.13. Rezultati dostupne toplinske energije pri varijabilnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim 40 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,038 °C/m za različite uvjete dubine i protoka 120

Slika 7.14. Rezultati dostupne toplinske energije pri varijabilnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim 40 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,042 °C/m za različite uvjete dubine i protoka 121

Slika 7.15. Rezultati dostupne toplinske energije pri varijabilnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim 40 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,046 °C/m za različite uvjete dubine i protoka 121

Slika 7.16. Rezultati dostupne toplinske energije pri varijabilnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim 40 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,050 °C/m za različite uvjete dubine i protoka 122

Slika 7.17. Rezultati dostupne toplinske energije pri varijabilnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim 10 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,034 °C/m za različite uvjete dubine i protoka 123

Slika 7.18. Rezultati dostupne toplinske energije pri varijabilnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim 10 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,038 °C/m za različite uvjete dubine i protoka 124

Slika 7.19. Rezultati dostupne toplinske energije pri varijabilnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim 10 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,042 °C/m za različite uvjete dubine i protoka 124

Slika 7.20. Rezultati dostupne toplinske energije pri varijabilnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim 10 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,046 °C/m za različite uvjete dubine i protoka 125

Slika 7.21. Rezultati dostupne toplinske energije pri varijabilnim toplinskim opterećenjima za temperaturni režim 10 °C kod upotrebe izoliranog tubinga, pri geotermalnom gradijentu 0,050 °C/m za različite uvjete dubine i protoka 125

Slika 7.22. Model za procjenu dostupne toplinske energije 127

Slika 7.23. Prikaz promjene pada tlaka u tipičnom bušotinskom koaksijalnom izmjenjivaču u odnosu na različite protoke za pojedine dubine bušotina 128

Slika 7.24. Prikaz odnosa protoka i snage pumpe, u tipičnom bušotinskom koaksijalnom izmjenjivaču, za pojedine dubine bušotina uz pripadajuće korelacije 129

Slika 7.25. Odnos instalirane snage cirkulacijske pumpe u odnosu na pad tlaka za pojedinu dubinu bušotinskog izmjenjivača 130

Slika 7.26. Kriterij odabira bušotina pogodnih za revitalizaciju prema uvjetu pada tlaka manjeg od 30 bara, za pojedine odabrane dubine (zeleno područje) 131

Slika 7.27. Dostupna toplinska energija za varijabilno toplinsko opterećenje za tri odabrana geotermalna gradijenta (0,034 °C/m, 0,042 °C/m i 0,050 °C/m), pri različitim protocima i dubinama bušotinskog izmjenjivača kod višeg temperaturnog razreda 133

Slika 7.28. Prikaz odnosa SPF faktora i dostupne toplinske energije iz dubokog bušotinskog izmjenjivača, za viši temperaturni razred kod varijabilnog opterećenja 134

Slika 7.29. Dostupna toplinska energija za varijabilno toplinsko opterećenje za tri odabrana geotermalna gradijenta (0,034 °C/m, 0,042 °C/m i 0,050 °C/m), pri različitim protocima i dubinama bušotinskog izmjenjivača kod nižeg temperaturnog razreda 136

Slika 7.30. Prikaz odnosa SPF faktora i dostupne toplinske energije iz dubokog bušotinskog izmjenjivača, za niži temperaturni razred kod varijabilnog opterećenja 137

Slika 7.31. Prikaz uštede korištenjem dubokih koaksijalnih bušotinskih izmjenjivača topline u odnosu na plin za kućanstva, pri višem temperaturnom razredu u odnosu na SPF faktor. 142

Slika 7.32. Prikaz uštede korištenjem dubokih koaksijalnih bušotinskih izmjenjivača topline u odnosu na plin za industriju, pri višem temperaturnom razredu u odnosu na SPF faktor. 143

Slika 7.33. Vrijednosti toplinskog množitelja u odnosu na EST za tri različita temperaturna režima na strani korisnika 145

Slika 7.34. Prikaz rezultata uštede plina korištenjem dubokih koaksijalnih izmjenjivača topline, pri nižem temperaturnom razredu u odnosu na SPF faktor, za kućanstva 149

Slika 7.36. Koeficijenti emisija ugljikovog dioksida iskazani kao omjeri u odnosu na emisije proizašle korištenjem električne energije potrebne za rad dubokog bušotinskog izmjenjivača, na primjeru protoka od 15 l/s i različitim geotermalnim gradijentima 153

Slika 7.37. Potpuni model za procjenu isplativosti revitalizacije napuštenih bušotina 1534

II POPIS TABLICA

Tablica 3.1. Usporedba prosječnih vrijednosti toplinskih vodljivosti različitih materijala..... 33

Tablica 4.1. Vrste stijena na kojima su rađena mjerenja specifičnog toplinskog kapaciteta te pripadajuće vrijednosti poroznosti i sadržaja kvarca 41

Tablica 4.2. Vrijednosti konstantni A-D za okside za određivanje specifične topline..... 43

Tablica 4.3. Tipične vrijednosti toplinske vodljivosti različitih minerala..... 47

Tablica 5.1. Prikaz vrijednosti parametara potrebnih za korekciju Roux et al. (1982)..... 59

Tablica 6.1. Parametri dubokog izmjenjivača topline bušotine Pčelić-1 78

Tablica 6.2. Vrijednosti parametara bušotinskog izmjenjivača s izoliranim tubinogm, u vrijednosti težinskog prosjeka..... 80

Tablica 6.3. Litostratigrafski opis bušotine Pčelić-1..... 81

Tablica 6.4. Termogeološki parametri na lokaciji bušotine Pčelić-1 82

Tablica 6.5. Srednja temperatura zraka za zagrebačko područje od rujna do svibnja 95

Tablica 7.1. Geometrijski parametri tipičnog bušotinskog koaksijalnog izmjenjivača 110

Tablica 7.2. Parametri fluida u bušotinskom koaksijalnom izmjenjivaču 111

Tablica 7.3 Primjer određivanja SPF faktora, pri uvjetu protoka od 15 l/s, geotermalnog gradijenta 0,034 °C/m za različite dubine, pri višem temperaturnom razredu..... 132

Tablica 7.4. Tehno-ekonomska analiza sustava rada dubokog izmjenjivača topline za primjer višeg temeraturnog razreda 140

Tablica 7.5. Primjer određivanja energije potrebne za rad šest dizalica topline u kaskadnom načinu rada 145

Tablica 7.6. Tehno-ekonomska analiza sustava rada dubokog izmjenjivača topline za primjer nižeg temperaturnog razreda i kaskadnog korištenja dizalica topline za temperaturni režim 40/35 na strani korisnika 147

Tablica 7.7. Primjer proračuna emisija CO_2 za različite sustave grijanja, na primjeru režima 40/35 na strani korisnika 152

III POPIS KORIŠTENIH OZNAKA

A	poprečna površina	m^2
C	konstanta	
c	specifični toplinski kapacitet	J/kg°C
c_p	specifični toplinski kapacitet radnog fluida	J/kg°C
c_{ss}	specifični toplinski kapacitet pješčenjaka	J/kg°C
c_o	specifični toplinski kapacitet nafte	J/kg°C
c_w	specifični toplinski kapacitet vode	J/kg°C
D_b	promjer bušotine	mm
D_o^o	vanjska cijev – vanjski promjer	mm
D_i^o	vanjska cijev – unutarnji promjer	mm
D_o^i	unutarnja cijev – vanjski promjer	mm
D_i^i	unutarnja cijev – unutarnji promjer	mm
$D_{p,in}$	unutarnji promjer cijevi	m
Ei	eksponencijalni integral	
F_o	Fourierov broj	
f	Moodyev koeficijent trenja	
f	bezdimenzijski faktor korekcije geotermalnog gradijenta	
G	G funkcija	
g	Eskilsonova g-funkcija	
g_T	geotermalni gradijent	°C/m
g_{tot}	ukupna vrijednost g-funkcije	
g_w	g-funkcija koja opisuje konvektivni utjecaj protoka podzemne vode	
H, D	dubina	m
h	entalpija; bezdimenzijski protok	J/kg; -
$J_N(u)$	Besselova funkcija N-tog reda prve vrste	
m	nagib krivulje	
$\dot{m}$	maseni protok	kg/s

Nu	Nusseltov broj	
n	bezdimenzijski parametar	
Pe	Pecletov broj	
p	omjer radijusa r i r_b	
Q	prosječna vrijednost prijenosa toplinske energije	W
$\dot{Q}$	toplinski tok	W/m^2
q'	jedinični prijelaz toplinske energije	W/m
q_{gw}	Darcyjeva brzina protoka podzemne vode	(m^3/m^2 s)
R_b	ekvivalentni toplinski otpor bušotine	°Cm/W
$R_a^{'}$	zbroj konvektivnih toplinskih otpora	°Cm/W
Re	Reynoldsov broj	
r	radijus	m
r_b	radijus stijenke bušotine	m
$S_{1,\ldots,n}$	zasićenje fluidom	d.j.
s	skin faktor	
SPF	faktor iskoristivosti dubokog bušotinskog izmjenjivača	
T	temperatura	°C
$T(r_b,t)$		°C
T_{bh}	temperatura na dnu bušotine	°C
T_{C-J}	temperatura formacije određena Cooper-Jones metodom	°C
T_f	temperatura fluida	°C
T_{Horner}	temperatura formacije određena Hornerovom metodom	°C
$T_{in}(EST)$	temperatura fluida na ulazu u pločasti izmjenjivač	°C
$T_{out}(LST)$	temperatura fluida na izlazu iz pločastog izmjenjivača	°C
T_s	temperatura na površini	°C
T_{VRT}	statička temperatura stijenske mase	°C
t	vrijeme	s
t_c	vrijeme cirkulacije isplake	s
t_s	vrijeme u kojem je postignut ustaljeni prijelaz toplinske energije	s

t_D	bezdimenzijsko vrijeme	
u	integracijska varijabla	
X	Ingersollova bezdimenzionalna varijabla	
Y	modificirana Besselova funkcija	
$Y_N(u)$	Besselova funkcija N-tog reda prve vrste	
α	toplinski difuzivitet	m^2/s
α_1	bezdimenzijski parametar	
β	integracijska varijabla	
β_w	koeficijent toplinskog širenja vode	
β_o	koeficijent toplinskog širenja nafte	
ΔT_{skin}	porast/pad temperature uslijed skin efekta	°C
Δt	vrijeme od završetka cirkulacije	s
γ	Eulerova konstanta	
ϕ	poroznost stijena	d.j.
λ	toplinska vodljivost	W/m°C
λ_c	toplinska vodljivost cementa	W/m°C
λ_{eff}	efektivna toplinska vodljivost	W/m°C
λ_f	toplinska vodljivost fluida	W/m°C
λ_s	toplinska vodljivost stijene	W/m°C
ρ	gustoća	kg/m^3
ρ_b	gustoća stijenske formacije	kg/m^3
ρ_o	gustoća nafte	kg/m^3
ρ_w	gustoća vode	kg/m^3
ρ_s	gustoća matriksa stijene	kg/m^3
ρ_{ss}	gustoća matriksa pješčenjaka	kg/m^3
$\rho_{1,\ldots,n}$	gustoća pojedinog fluida	kg/m^3
ρc	specifična volumna toplina	$J/m^3°C$
$\rho_b c_b$	ukupna volumna specifična toplina	$J/m^3°C$
τ	bezdimenzijsko vrijeme	

τ_1 bezdimenzijski parametar

ŽIVOTOPIS

Autorica je rođena 28. srpnja 1985. godine u Zaboku. Osnovnu školu završila je u Konjščini, a opću gimnaziju u Zaboku. Diplomirala je na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, smjer Geotehnika. Od 1. kolovoza 2014. godine zaposlena je kao asistentica na Rudarsko-geološko-naftnom (RGN) fakultetu, a te je godine upisala i Poslijediplomski doktorski studij na istom fakultetu. Tijekom poslijediplomskog studija usavršavala se na tečaju *Geothermal Reservoir Engineering Short Course*, u trajanju od 5 dana, organiziranom od strane International Geothermal Association (IGA) Academy (Bochum, Njemačka).

Trenutno sudjeluje u izvođenju vježbi iz kolegija Iskorištavanje geotermijskih ležišta, Primijenjena termogeologija te Iskorištavanje podzemnih voda.

Do sada je sudjelovala na projektu u sklopu HRZZ Programa poticanja istraživačkih i razvojnih aktivnosti u području klimatskih promjena „Evaluacijski sustav za ublažavanje CO_2 – ESCOM“ u periodu od travnja 2017., do travnja 2019. Sudjelovala je na projektima Sveučilišne potpore: „Istraživanje geotermalnog potencijala rudarskih objekata u Istarskoj županiji u svrhu grijanja i hlađenja dizalicama topline“, „Istraživanje geotermalnog potencijala rudarskih objekata u Istarskoj županiji u svrhu grijanja i hlađenja dizalicama topline“, i dr.

POPIS OBJAVLJENIH RADOVA

Kurevija, T., Kalantar, A., Macenić, M., Hranić, J. (2019): Investigation of Steady-State Heat Extraction Rates for Different Borehole Heat Exchanger Configurations from the Aspect of Implementation of New TurboCollector™ Pipe System Design, Energies, 12(8), 1-17.

Lekić, A., Jukić, L., Arnaut, M., Macenić, M. (2019): Simulation of CO2 injection in a depleted gas reservoir: A case study for Upper Miocene sandstone, Northern Croatia, Rudarsko-geološko-naftni zbornik., 34(1), 139-149.

Macenić, M., Kurevija, T. (2018): Revitalization of abandoned oil and gas wells for a geothermal heat exploitation by means of closed circulation – case study of deep dry well "Pčelić-1", Interpretation, 6(1), SB1-SB9.

Vulin, D., Saftić, B., Macenić, M. (2018): Estimate of dynamic change of fluid saturation during CO2 injection — Case study of a regional aquifer in Croatia, Interpretation, 6(1); 51-SB64.

Kapuralić, J., Posavec, K., Kurevija, T., Macenić, M. (2018): Identification of river Sava temperature influence on groundwater temperature of the Zagreb and Samobor-Zaprešić aquifer as a part of shallow geothermal potential, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 33, 5, 59-69

Kurevija, T., Macenić, M., Strpić, K. (2018): Steady-state heat rejection rates for a coaxial borehole heat exchanger during passive and active cooling determined with the novel step thermal response test method, Rudarsko-geološko-naftni zbornik. 33(2), 1-15.

Macenić, M., Kurevija, T., Kapuralić, J. (2018): Heat pump system efficiency comparison of different renewable energy sources – A family house case study in Zagreb city area. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 33(5), 13-25.

Macenić, M., Kurevija, T., Strpić, K. (2018): Systematic review of research and utilization of shallow geothermal energy in Croatia, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 33(5), 37-46.

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.

Briševac, Z., Kujundžić, T., Macenić, M. (2017): Estimation of uniaxial compressive and tensile strength of rock material from gypsum deposits in Knin area. Tehnički vjesnik, 24(3), 855-861.

Kurevija, T., Macenić, M., Borović, S. (2016): Impact of borehole cement-bentonite grout thermal conductivities on a long-term ground-source heat pump efficiency, U: Andrej Kitanovski and Alojz Poredoš (ur.): ECOS 2016 - The 29th International conference on efficiency, cost, optimization, simulation and environmental impact of energy systems, 19.-23.6.2016., Zbornik radova, Ljubljana.

Kurevija, T., Kapuralić; J., Macenić, M. (2016): Comparing seasonal performance factor of different heat pump systems for residential HVAC in the Dfb climate area of Croatia, U: Andrej Kitanovski and Alojz Poredoš (ur.): ECOS 2016 - The 29th International conference on

efficiency, cost, optimization, simulation and environmental impact of energy systems, 19.-23.6.2016., Zbornik radova, Ljubljana.

Kurevija, T., Vulin, D., Macenić, M. (2014): Impact of geothermal gradient on ground source heat pump system modeling, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 28(1), 39-45.

Kujundžić, T., Korman, T., Macenić, M. (2012): State of the art of drilling large diameter boreholes for deposition of high level waste and spent nuclear fuel, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 24, 49-59.

Prilog 1. Popis korištenih bušotina za novu kartu geotermalnih gradijenta

Br.	Bušotina
1	Andrilovec-1
2	Antin-1
3	Antunovac-1
4	Bačkovica-1
5	Bakić-1
6	Bankovci-1
7	Banov Dol-1
8	Banova Jaruga-1
9	Banje Selo-1α
10	Batina-1
11	Beničanci-47 Alfa
12	Benkovica-1
13	Bilogora-126
14	Bilogora-4
15	Bilogora-79
16	Bilogora-97
17	Bokšić Sjever-1
18	Breza-1
19	Brežnica-1
20	Brodišće-1
21	Bujavica-10
22	Cabuna-14
23	Cerje-1
24	Cerna-1
25	Ciglenica-1
26	Cremušina-2
27	Crnac Zapad-1
28	Crnac-9
29	Čakovec-1
30	Čamagajevci-4
31	Čeralije-1
32	Černec-1
33	Čukovec-1
34	Darda-1
35	Dežanovac-1
36	Donja Bukovica-1
37	Donja Jelenska-1
38	Dopsin-1
39	Draškovec-1
40	Dravica-1
41	Dubranec-3
42	Duga Greda-1
43	Duga Međa-1
44	Dugo Selo-1 Istok
45	Đeletovci-18
46	Đeletovci-1Zapad
47	Đeletovci-23 Alfa
48	Đeletovci-49
49	Đurđenovac-1
50	Ernestinovo-1
51	Fančev Mlin-1
52	Farkaševac-1
53	Ferdinandovac-15
54	Gabajeva Greda-1
55	Garčin-1
56	Gojlo-1 Sjever
57	Gola-1 Duboka
58	Goričan-1
59	Gornja Gračenica-2
60	Gospođica-2 Alfa
61	Gotalovo-1
62	Grubišno polje-3
63	Helena-1
64	Hlebine-2
65	Hodošan-1
66	Hrvatsko Zagorje-1
67	Ilača-13
68	Ilača-14
69	Ivanovci-1
70	Janja Lipa-7
71	Johovec-3
72	Karaš šuma-1
73	Karlovac-2
74	Kloštar-8
75	Kopčevec-1
76	Koprivnica-1
77	Korenovo-1
78	Koška-1
79	Kotoriba-3
80	Krapinske Toplice-1
81	Križ-146
82	Križevčanka-1
83	Lacići-1Sjever
84	Legrad-5
85	Lekenik-1
86	Leščan-2

Br.	Bušotina
87	Lipovljani Duboka-1
88	Lončaruša-1
89	Lonja-1
90	Lopatinec-1
91	Ludbreg-3
92	Mačkovec-1
93	Madarinci-1
94	Martin-1
95	Međurić-2
96	Mičetinac-1 Istok
97	Mihovljani-1
98	Miljanovićevo-1
99	Miokovićevo-1
100	Moslavina Podravska-1
101	Mramor Brdo-5
102	Mursko Središće-5
103	Nova Gradiška-3
104	Nuštar-1
105	Okrugljača-1
106	Okučani-1
107	Osijek-1
108	Otok-1
109	Patkovac-1
110	Pavlovac-1
111	Peklenica-1
112	Pepelana-10
113	Pepelana-9
114	Peteranec-4
115	Petrijevci-1
116	Piškorevci-1
117	Pitomača-6
118	Podravski Podgajci-1
119	Privlaka-6
120	Radosavci-1
121	Ranislavlje-1
122	Rešetari-3
123	Rezovačke Krčevine-1
124	Rovišće-1
125	Savica-1
126	Sedlarica-10
127	Sikirevci-1
128	Sisak-1
129	Stari Gradac-1 Zapad

Br.	Bušotina
130	Stari Gradac-6
131	Strmec Podravski-1
132	Subotica-5
133	Šoderica-1
134	Tekić-1
135	Topolovac-1
136	Topusko Batinova Kosa-1
137	Torjanski Rid-1
138	Tovarnik-1
139	Tovarnik-2
140	Uljanik-1
141	Valpovo-1Zapad
142	Varaždin-1
143	Veliki otok-8
144	Vera-1
145	Vinkovci-1
146	Vinkovci-3
147	Virovitica-2
148	Vrbanja-1
149	Vrbovec-4
150	Vučkovec-1
151	Vukanovec-2
152	Vukovar-7
153	Zabok-1
154	Županja-3