

PVT svojstva vodika i CO2 za usporedbu potencijala korištenja geotermalne energije

Findri, Karlo

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:456147>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Prije diplomski studij naftnog rudarstva

**PVT SVOJSTVA VODIKA I CO₂ ZA USPOREDBU POTENCIJALA
KORIŠTENJA GEOTERMALNE ENERGIJE**

Završni rad

Karlo Findri

N4438

Zagreb, 2024.

PVT SVOJSTVA VODIKA I CO₂ ZA USPOREDBU POTENCIJALA KORIŠTENJA
GEOTERMALNE ENERGIJE

Karlo Findri

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

Sažetak

Ovaj završni rad istražuje potencijale korištenja različitih geofluida u geotermalnim sustavima, s posebnim naglaskom na usporedbu vode, CO₂ i vodika. Rad analizira kako različiti fluidi utječu na prijenos topline u geotermalnim ležištima i njihovu potencijalnu primjenu u kontekstu rudarenja geotermalne energije. Napravljene su procjene učinkovitosti različitih geofluida u uvjetima visokih temperatura i različitih poroznosti stijena. Rezultati ukazuju kako pri implemenaciji vodika postoje izazovi, posebno u pogledu kompresije i prijenosa topline. CO₂ se pokazuje efikasnijim u smislu termodinamičkih i reoloških svojstava, dok voda, unatoč određenim ograničenjima, ostaje najpouzdaniji izbor za većinu situacija. Zaključak rada je da je potrebno dodatno istražiti mogućnosti primjene vodika u geotermalnim sustavima, uzimajući u obzir složene interakcije između fluida i stijene te ekonomske aspekte takvih sustava.

Ključne riječi: Geotermalna energija, geofluidi, vodik, CO₂, prijenos topline, rudarenje energije

Završni rad sadrži: 26 stranica, 1 tablicu, 11 slika, 26 referenci i 1 dodatak

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentor: Prof. dr. sc. Domagoj Vulin, RGNF

Pomagao pri izradi: Bojan Kuhar, dipl. ing. naft. rud., RGNF

Ocjenjivači: Prof. dr. sc. Domagoj Vulin, RGNF
Izv. prof. dr. sc. Vladislav Brkić, RGNF
Izv. prof. dr. sc. Borivoje Pašić, RGNF

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA	II
POPIS KORIŠTENIH KRATICA, OZNAKA I JEDINICA	III
1. UVOD	1
2. TEORIJSKA POZADINA.....	3
2.1. Poboljšani geotermalni sustavi	3
2.2. Skladištenje toplinske energije u geotermalnim ležištima.....	4
2.3. Korištenje različitih geofluida – utiskivanje CO ₂ u geotermalno ležište	4
2.4. Joule-Thompsonov efekt	6
3. ULAZNI PODATCI	9
4. REZULTATI	11
5. ZAKLJUČAK.....	20
6. REFERENCE	22
7. DODATCI	25

POPIS SLIKA

Slika 2-1 Projekti poboljšanih geotermalnih sustava u svijetu (Breede et al. 2013).....	4
Slika 2-2 Usporedba parametara (energije) geotermalnoga sustava s vodom i sustava s CO ₂ kao radnim fluidom (Vulin et al., 2020).....	6
Slika 2-3 Joule - Thomsonovi koeficijenti smjese vodika i metana (Li et al., 2021).....	8
Slika 4-1. Promjene temperature i izlazne teoretske snage u ležištu pri 150 °C	14
Slika 4-2. Promjene temperature i izlazne teoretske snage u ležištu pri 225 °C	15
Slika 4-3. Promjene temperature i izlazne teoretske snage u ležištu pri 300 °C	16
Slika 4-4 Konačna snaga, ovisno o fluidu i udaljenosti bušotina.....	17
Slika 4-5 Odnos poroznosti i konačne izlazne snage	18
Slika 4-6 Udaljenost bušotina povećava razliku u vremenu prodora hladne fronte.....	19
Slika 7-1 Detaljan uvid u odnos temperatura i konačne izlazne snage	25
Slika 7-2 Precijenjene količine uskladištenja do prodora.....	26

POPIS TABLICA

Tablica 4-1 Ulazni i rezultatni parametri.....	11
--	----

POPIS KORIŠTENIH KRATICA, OZNAKA I JEDINICA

Simbol	Značenje	Mjerna jedinica
HDR	eng. hot dry rock (suhe frakturirane stijene)	-
CPG	eng. CO ₂ plume geothermal (utilizacija)	-
EGR	eng. enhanced gas recovery	-
EGS	eng. enhanced geothermal systems	-
ORC	organic Rankine cycle	-
L	udaljenost utisne i proizvodne bušotine	m
h	debljina sloja	m
k	propusnost	mD
c_f	toplinski kapacitet formacije	J/kgK
c_r	toplinski kapacitet zrna	J/kgK
ρ_r	gustoća zrna	kg/m ³
ρ_w	gustoća geofluida pri ležišnom uvjetu	kg/m ³
ϕ	poroznost stijene	-
q_w	protok vode	m ³ /dan
A	protočna površina ležišta, uz uračunati površinski koeficijent obuhvata	m ²
A_r	površina definirana drenažnim radijusom	m ²
E_a	površinski koeficijent obuhvata	-
c_f	specifična toplina formacije	J/kgK
c_w	specifična toplina geofluida	J/kgK

q_w	brzina protjecanja na (uz pretpostavku 1:1 nadmještanja utiskivanjem)	m^3/s
t	vrijeme proizvodnje pri konstantnoj temperaturi	s
μ	viskoznost geofluida	Pa·s
ρ_f	gustoća formacije	kg/m^3
m_{skl}	skladišna masa	kg
q_r	brzina protjecanja	m^3/s

1. UVOD

Geotermalna energija u Europi može se smatrati bitnom energetsom uzdanicom, koja će idućih desetljeća pomoći u zamjeni ugljikovodika kao siguran, održiv i konstantan izvor energije. Otključavanje njenog punog potencijala uključuje nekoliko aspekata:

- zbog energetske gustoće geotermalne energije u proizvedenoj geotermalnoj vodi, potrebno je proizvoditi znatno većim brzinama protjecanja
- posljedično, geotermalni sustavi zahtijevaju analizu ležišno-inženjerskih parametara, što znači detaljni opis fluida koji protječu u geotermalnim sustavima, a zatim i detaljno razmatranje svojstava heterogene stijene – geotermalnog ležišta.
- u slučaju pretvorbe geotermalne u električnu energiju, najčešće se radi o sustavu utisne i proizvodne bušotine, pri čemu nakon određenog perioda dolazi do prodora hladne fronte do proizvodne bušotine, bitno manje temperature, a time i drugih radnih uvjeta za proizvodnu električne energije.
- ekonomski aspekti su u ovom slučaju nepovoljni, tako da uključivanje naprednih tehnologija, kombinacija održivih tehnologija predstavlja i interesantne mogućnosti financiranja (posebice u EU, jer su takvi koncepti ugrađeni u temeljne strategije razvoja).

U ovom radu, uspoređena su tri radna fluida – voda, CO₂ i H₂, a pošto su prirodna ležišta CO₂ i H₂ izuzetno rijetka, tj. razmatra se zasićivanje geotermalne strukture fluidima koji nisu primarno bili prisutni u ležištu, za takve radne geotermalne fluide usvojen je naziv: *geofluidi*, a iskorištavanje geotermalne energije se u tom slučaju može nazvati *rudarenjem termalne* energije (Brown et al., 2012, Tester et al., 1994, Armstrong ,1984). Također i postoji rasprava koja upućuje kako se izraz „rudarenje“ (tj. engl. *heat mining*) krivo upotrebljava, pošto se rudare samo oni izvori koje se ne može višestruko (obnovljivo) koristiti (Rybach, 2021).

Tako se analitički uspoređuje napredak hladne fronte iz utisne bušotine do proizvodne te smanjenje temperature proizvedenog geofluida u proizvodnoj bušotini, a sve uz motivaciju i hipotezu da se pokaže kako različiti geofluidi mogu pokazati bitno različite termalne interakcije sa stijenom, a time i predstavljati različite potencijale iskorištavanja geotermalnih struktura.

Usporedit će se potencijali koji leže u proizvodnji geotermalne energije, utilizaciji i trajnom skladištenju CO₂, a vodik je uključen kao fluid za koji se razmatra (privremeno, periodičko) skladištenje u geološkim formacijama, međutim uz vrlo limitirane podatke o termalnom utjecaju. Naime, pored velike pokretljivosti, a time i velike injektivnosti i proizvodnosti, kod vodika se može očekivati negativan Joule-Thomsonov efekt prilikom ekspanzije, što u svakom slučaju predstavlja interesantan detalj vezan uz ovakvu analitičku usporedbu.

2. TEORIJSKA POZADINA

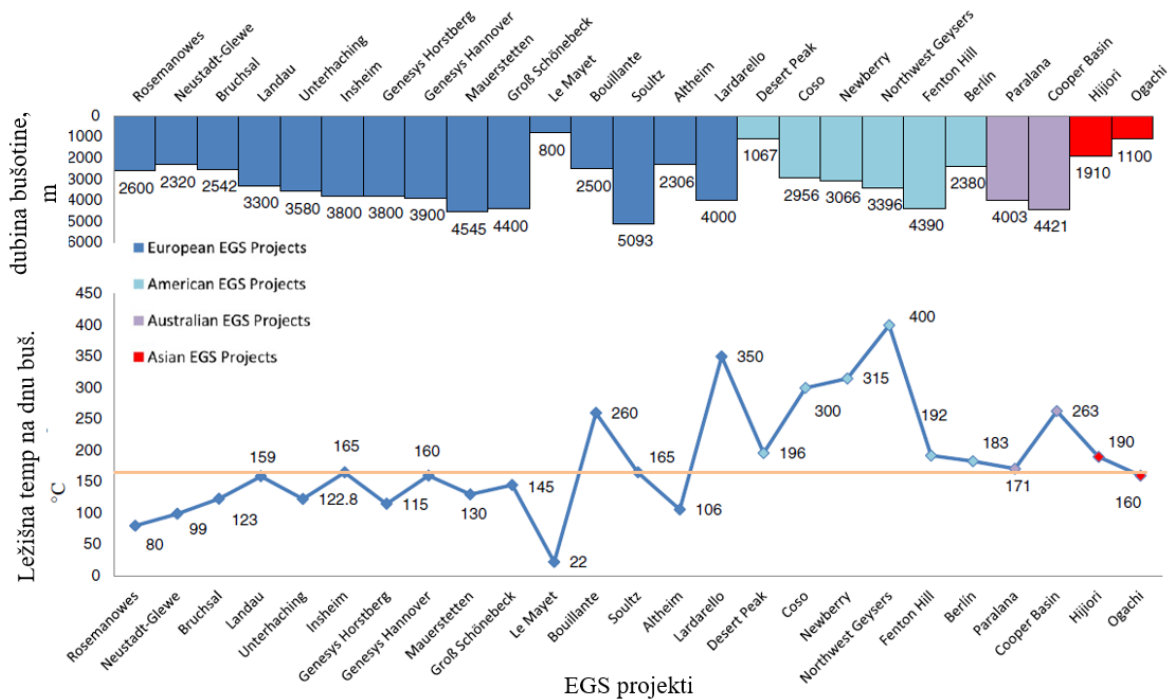
Sadržaj energije geotermalnih fluida po jedinici volumena je nekoliko redova veličine niži od sadržaja nafte. Posljedično, postizanje značajnih brzina proizvodnje (protjecanja) zahtijeva inovativne pristupe. Jedan od načina postizanja povoljnog omjera volumetrijske brzine protjecanja i proizvedene energije je povećanje proizvodnosti bušotine hidrauličkim frakturiranjem. Drugi, nekonvencionalni koncepti odnose se na:

- Proizvodnju iz suhих, frakturiranih stijena (engl. *Hot Dry Rock*, HDR) - HDR uključuje stvaranje uvjeta unutar nepropusne kristalinske (temeljne) stijene, što često uključuje izradu horizontalnih bušotina i hidrauličko frakturiranje
- Skladištenje toplinske energije u podzemlju (geotermalnim strukturama)
- Rudarenje geotermalne energije, tj. korištenje drugog fluida kao radnog geotermalnog fluida, umjesto (slojne) vode, uz potencijalne popratne koristi (utilizacija, engl. *CO₂ Plume Geothermal*, CPG)

2.1. Poboljšani geotermalni sustavi

Razvoj poboljšanih geotermalnih sustava (engl. *Enhanced Geothermal Systems*, EGS) iz koncepta vruće suhe stijene (engl. *Hot Dry Rock*) bio je značajan napredak u proizvodnji geotermalne energije (Breede et al., 2013). Projekt Fenton Hill u Novom Meksiku, SAD, dao je ključnu studiju slučaja u ovom području, pokazujući stvaranje poboljšanih geotermalnih ležišta i potencijal za njihov dugoročni tj. održivi rad. Međutim, još uvijek postoje izazovi u dubokom istraživanju geotermalne energije, osobito u mehanici i inženjerstvu stijena (Zhang and Zhao, 2020). Pionirski projekt Fenton Hill pružio je vrijedna iskustva u stvaranju, projektiranju i radu podzemnih sustava za proizvodnju geotermalne energije.

Poboljšani geotermalni sustavi se razmatraju u širokom spektru izvedbi desetljećima (Tenzer, 2001) i mnogi su provedeni makar kao pilot projekti s različitim stupnjevima uspješnosti (Slika 2-1).



Slika 2-1 Projekti poboljšanih geotermalnih sustava u svijetu (Breede et al. 2013)

2.2. Skladištenje toplinske energije u geotermalnim ležištima

Višak energije vjetra i sunca u obliku tople vode ili pare se pohranjuje u geotermalnoj strukturi te se ponovo dovodi na površinu kada postoji potreba (potražnja), a energija vjetra i sunca nisu dostupne. Ovako uskladištena energija se može dalje pretvoriti u električnu energiju. U kontekstu geotermalne energije, projekt PUSH-IT koji financira EU ima za cilj povećati potencijal geotermalne energije uvođenjem i demonstracijom inovativnih rješenja za pohranu topline na visokim temperaturama koja se mogu prilagoditi različitim vrstama ponude/potražnje i geološkim uvjetima (Technische Universiteit Delft, 2022). Provedeno je numeričko istraživanje kombiniranog skladištenja i ekstrakcije topline u dubokim geotermalnim ležištima. Studija je pokazala da pohranjivanje vode od 90 °C na dubini od 2500 m može imati (toplinsku) efikasnost 67 % (Major et al., 2018).

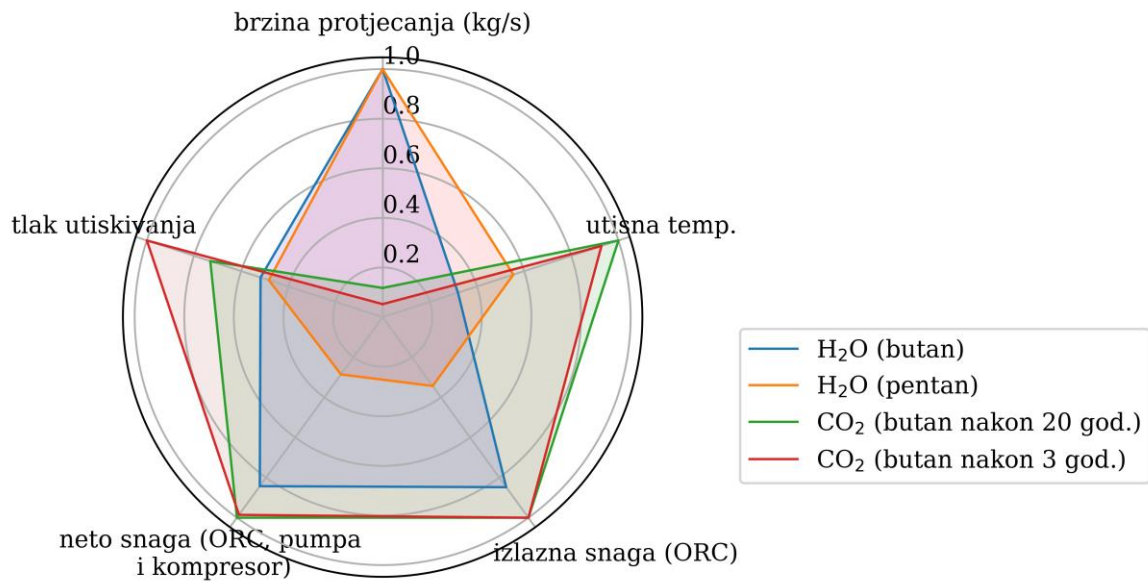
2.3. Korištenje različitih geofluida – utiskivanje CO₂ u geotermalno ležište

U posljednje vrijeme velika je popularnost tzv. CO₂ zasićenih geotermalnih sustava (*engl. CO₂ Plume Geothermal Systems*, CPG). CPG se može u neku ruku svrstati i pod EGS

sustave (Xu et al., 2015, Avanthi Isaka et al., 2019), ali zbog mogućnosti utilizacije CO₂, u posljednje vrijeme se nalazi kao zasebno razmatran koncept (Antoneas and Koronaki, 2024, Esteves et al., 2019). Radi se o korištenju mobilnosti CO₂, koji uz veću mobilnost od vode, još uvijek ima manju viskoznost te se u većini analiza pokazuje da je ovakav sustav u teoriji efikasniji od sustava utisnih i proizvodnih bušotina s vodom.

Kako bi se utvrdile značajke geotermalnih sustava zasnovanih na CO₂, posebno tehnologija sustava CPG-a, prikazat će se kratak pregled temeljnih operacija s geotermalnoga ležišta. Proizvodnja geotermalne energije ovisi o izvlačenju toplinske energije iz podzemlja Zemlje. Iskorištavanje geotermičkog rezervoara može biti ekonomski profitabilno u smislu topline. Zbog nekoliko geomorfoloških i drugih svojstava i parametara stijena, kao što su lokacija, dubina, toplinska masa i protok, radna temperatura geotermalnog postrojenja varira. Stoga se za proizvodnju električne energije iz geotermalnih izvora mogu razlikovati tri glavne tehnologije: brza para, suha para i binarni ciklus, koji se koristi za geotermalne izvore s nižim temperaturama. U ovom je slučaju uobičajeno da se radi o proizvodnji električne energije iz geotermalnih izvora. U binarnom ciklusu, potreban je drugi radni fluid za pokretanje krugova napajanja. Najčešće tekućine za su propan, butan, pentan i amonijak. Geotermalni sustavi obično koriste ubrizganu "hladnu" vodu za transport topline iz podzemlja na površinu, gdje se pretvara u električnu energiju putem turbina i generatora. Dvostruki ciklus djeluje u dvije odvojene petlje: geotermalna petlja uključuje apsorpciju topline iz vruće stijene, koja se zatim prenosi na isparavač. Ovaj proces dovodi do transformacije sekundarne radne tekućine u zasićenu paru putem razmjene topline. S druge strane, u slučaju da se proizvodnja električne energije u turbini ne pokreće, proizvodnja električne energije u generatoru može biti ograničena na proizvodnju električne energije u turbini. Geotermalni sustavi djeluju kroz kontinuiranu cirkulaciju mase i toplinske tekućine (Adams et al., 2015).

Za Republiku Hrvatsku, objavljena je usporedba rada geotermalnog polja Velika Ciglena, i rudarenja toplinske energije utilizacijom CO₂ kao geofluida (Vulin et al., 2020), u kojoj je integrirano uspoređen cijeli sustav i tijek energije – od padova tlaka i temperature u bušotini, preko efikasnosti izmjenjivača i elektrane (engl. *Organic Rankine Cycle*, ORC) pa do utroška energije za pumpu i/ili kompresor na utisnoj bušotini (Slika 2-2). Analiza ležišta je rađena pomoću numeričkog 3D simulatora.



Slika 2-2 Usporedba parametara (energije) geotermalnoga sustava s vodom i sustava s CO₂ kao radnim fluidom (Vulin et al., 2020)

2.4. Joule-Thompsonov efekt

Joule-Thomsonov (JT) efekt je pojava koja se opaža kada se realni plin širi iz područja visokog tlaka u područje niskog tlaka uz konstantnu entalpiju (bez izmjene topline s okolinom) pri čemu se plin može ohladiti ili zagrijati, ovisno o svojstvima plina. JT efekt se kod većine plinova povezuje s procesom hlađenja prolazom kroz suženje, tako da je JT efekt ključan za procese ukapljivanja i hlađenja, posebno u proizvodnji ukapljenog prirodnog plina (LNG). Joule-Thomsonov koeficijent (μ) kvantificira učinak hlađenja ili zagrijavanja tijekom ekspanzije.

Definira se kao brzina promjene temperature (T , K) u odnosu na tlak (p , Pa) pri konstantnoj entalpiji (H , J):

$$\mu = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_H \quad (1)$$

Joule-Thomsonov (JT) efekt opisuje temperaturnu promjenu plina ili tekućine kada se prođu kroz ventil, porozni čep ili pukotinu dok se zadržavaju izolirani tako da nema izmjene topline s okolinom. Na sobnoj temperaturi, svi plinovi osim vodika, helija i neona hlade se takvom ekspanzijom. Vodik i helij će doživjeti učinak zagrijavanja pri ekspanziji u

uvjetima blizu sobne temperature i tlaka, što znači da imaju negativan JT koeficijent. To se često naziva "Joule-Thomsonovo zagrijavanje" vodika.

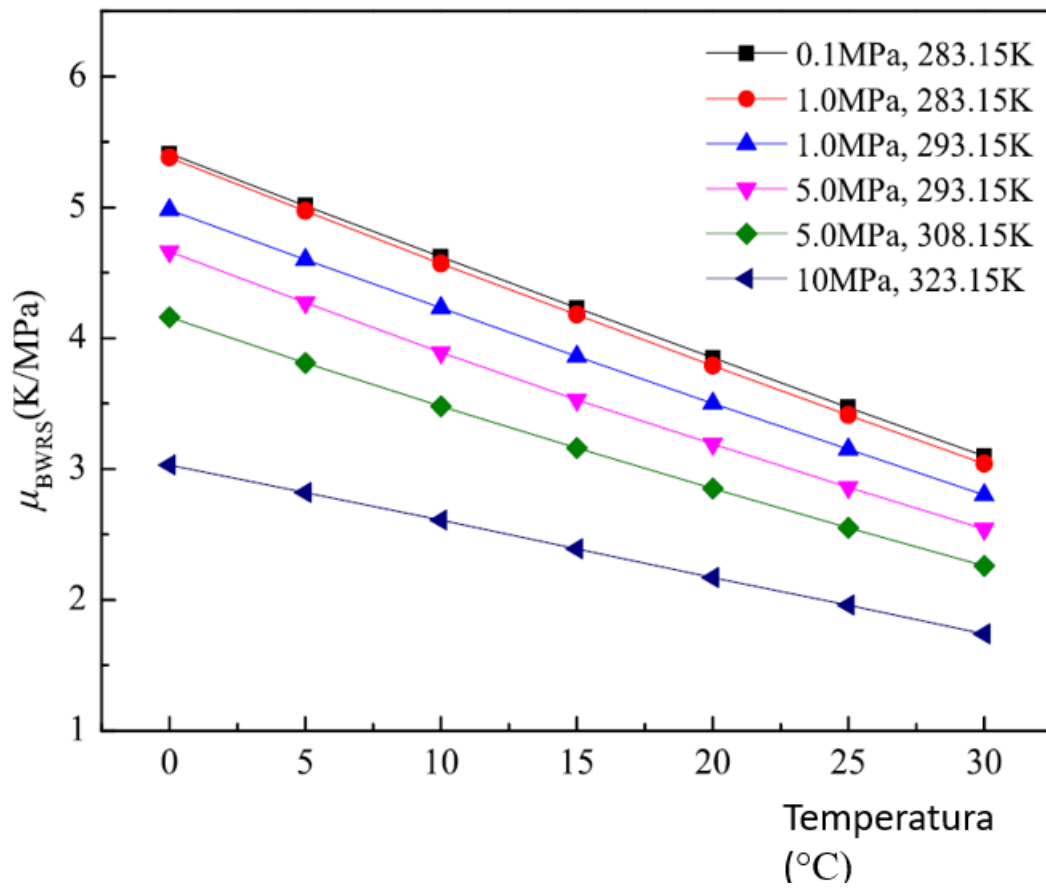
JT koeficijenti za vodik, vodu/paru i CO₂ mogu se značajno razlikovati jer su međumolekularne sile, specifični toplinski kapaciteti i koeficijenti toplinske ekspanzije ovih tvari različiti.

U slučaju vode, treba uzeti u obzir da voda s porastom dubine, a time i tlaka najčešće u ležištu spada u područje temperatura i tlakova kapljevine. Međutim, kako je u slojnoj vodi najčešće otopljen plin (u području Panonskog bazena najčešće CO₂ i metan), najvjerojatnije se JT efekte može interpretirati iz mjerenja u bušotini. Učinak hlađenja zbog CO₂ u proizvodnoj geotermalnoj bušotina je opisan u literaturi. Međutim, također postoji i JT učinak grijanja vode (Cinar et al., 2017), te je stoga gubitak topline kondukcijom dominantan gubitak za sve situacije (Phuoc et al., 2019).

Joule-Thomsonov (JT) efekt razmatran je kod utiskivanja CO₂. Oldenburg (Oldenburg, 2007) ne očekuje se da će JT hlađenje stvoriti značajne probleme pri utiskivanju superkritičnog CO₂ za poboljšanje iscrpka plina (engl. *Enhanced Gas Recovery*, EGR). Nečistoće u CO₂ utječu i na prostorni opseg zone oko bušotine u kojoj je inducirano JT hlađenje (Ziabakhsh-Ganji and Kooi, 2014) - Povećano hlađenje uzrokuju O₂, N₂ i CH₄ u kombinaciji s utiskivanjem pod stalnim tlakom, dok je kod utiskivanja konstantnom brzinom hlađenje minimalno ili ga nema. Ugljični dioksid se razmatra skladištiti u iscrpljenim ležištima ugljikovodika. Niski tlakovi mogu uzrokovati JT hlađenje, što dovodi do stvaranja CO₂ i/ili CH₄ hidrata i neučinkovitog ubrizgavanja. Pokazalo se kako analitičko rješenje pruža jednostavan i pristupačan uvid u ovaj efekt i olakšava sveobuhvatnu analizu osjetljivosti parametara (Mathias et al., 2010). Vezano uz proizvodnju, učinak hlađenja za dane p-T uvjete na ulazu te poznati izlazni tlak nakon prigušnice može biti veći za binarnu smjesu nego za oba njena sastojka.

Na ideju da se razmotri termalna svojstva vodika u ležišnim uvjetima došlo se proučavanjem umješavanja vodika u prirodni plin. Naime, aktualni su koncepti i istražuje se aspekte miješanja vodika u postojeće cjevovode prirodnog plina. Međutim, ovo miješanje utječe na JT koeficijent ukupne smjese plinova na sljedeći način: kada se vodik pomiješa s prirodnim plinom, JT koeficijent smjese pada s povećanjem sadržaja vodika. Iako tako vodik može smanjiti rizik od blokade ventila na cjevovodu hidratima, ovaj efekt se ne smatra uvijek

povoljnijim. Istraživači su sastavili bazu podataka JT koeficijenata za smjese metana i vodika pri različitim tlakovima i temperaturama (Slika 2-3).



Slika 2-3 Joule - Thomsonovi koeficijenti smjese vodika i metana (Li et al., 2021)

3. ULAZNI PODATCI

Analiza u ovom radu sagledava odnos generalnih ležišnih te utisno/proizvodnih parametara te korištenje različitih geofluida za rudarenje toplinske energije iz dubokih geoloških formacija.

Pošto je analiza naprednih geotermalnih sustava (engl. *enhanced geothermal systems*, EGS) složen proces u kojem velik izazov predstavlja usklađivanje bušotinskih efekata izmjene topline i gubitaka tlaka, detalja izmjenjivača i binarne elektrane (za koju je pretpostavka da radi po *Organic Rankine Cycle procesu*, ORC), i najbitnije, velikog broja parametara koji utječu na protjecanje tj. konvekciju i kondukciju toplinske energije te posljedično raspodjelu temperatura geofluida, u radu je korišten niz pretpostavki.

Za protjecanje u ležištu i izmjenu temperature korišten je *in-house* python modul izrađen u sklopu projekta ESCOM (Vulin et al., 2016). U analizi su uzeti samo osnovni petrofizikalni parametri. Tako je npr. zanemarena relativna propusnost, difuzno miješanje, kapilarni i gravitacijski efekti u sloju, promjena viskoznosti fluida između utisne i proizvodne bušotine itd.

U ovakve pretpostavke, definirani su ostali parametri za analizu:

Udaljenost utisne i proizvodne bušotine: $L = 200, 400, 800, 1600$ m

debljina sloja: $h = 200$ m

propusnost: $k = 100$ mD

tip geofluida: H_2O, CO_2, H_2

toplinski kapacitet formacije: $c_f = 1200$ J/kg K , računato iz

$$c_f = \rho_r \cdot c_r \cdot (1 - \phi) + \rho_w \cdot c_w \cdot \phi / \rho_f \quad (3 - 1)$$

pri čemu su:

c_r - toplinski kapacitet zrna, 950 J/kg·K

ρ_r - gustoća zrna, 2700 kg/m³

ρ_w - gustoća geofluida pri ležišnom uvjetu, kg/m³

ϕ – poroznost stijene (dio jedinice), u ovom slučaju 0,2

$q_w = 10000$ m³/dan = 0,115741 m³/s

Računalni kod razvijen u projektu ESCOM, koristi princip toplinske difuzije hladne fronte u ležište uz generalne pretpostavke površinskog obuhvata, koji se pak odnosi na pretpostavku radijalnog širenja hladne fronte od utisne bušotine. Uz takvu pretpostavku, pojednostavljeni su ležišno-inženjerski aspekti protjecanja, tj. naglasak je na termalnim promjenama između utisne i proizvodne bušotine. U momentu kad dolazi do prodora fluida do proizvodne bušotine, radius širenja fronte utisnutog fluida jednak je $r = L$ i tada je drenažna površina jednaka umnošku površine unutar drenažnog radijusa i površinskog koeficijenta obuhvata:

$$A = A_r \cdot E_a \quad (3 - 2)$$

Moment prodora se onda računa iz:

$$t_{bt} = A \cdot h \cdot c_f \cdot \frac{\rho_f}{q_w \cdot c_w \cdot \rho_w} \quad (3 - 3)$$

A pošto se u ovoj analizi razmatraju geofluidi različiti od vode, računa se i količina fluida uskladišteno do prodora u proizvodnu bušotinu:

$$W = t_{bt} \cdot q_w \quad (3 - 4)$$

A - protočna površina ležišta, uz uračunati površinski koeficijent obuhvata, m^2

A_r - površina definirana drenažnim radijusom, m^2

E_a - površinski koeficijent obuhvata (u ovom radu uzeto, E_a)

c_f - specifična toplina formacije, J/kg K

c_w - specifična toplina geofluida, J/kg K

h - efektivna debljina sloja, m

q_w - volumna brzina protjecanja na (uz pretpostavku 1:1 nadomještanja utiskivanjem), rm^3/s

t_{bt} - vrijeme proizvodnje pri konstantnoj temperaturi, s

μ - viskoznost geofluida, Pa·s

ρ_f - gustoća formacije, kg/m^3

4. REZULTATI

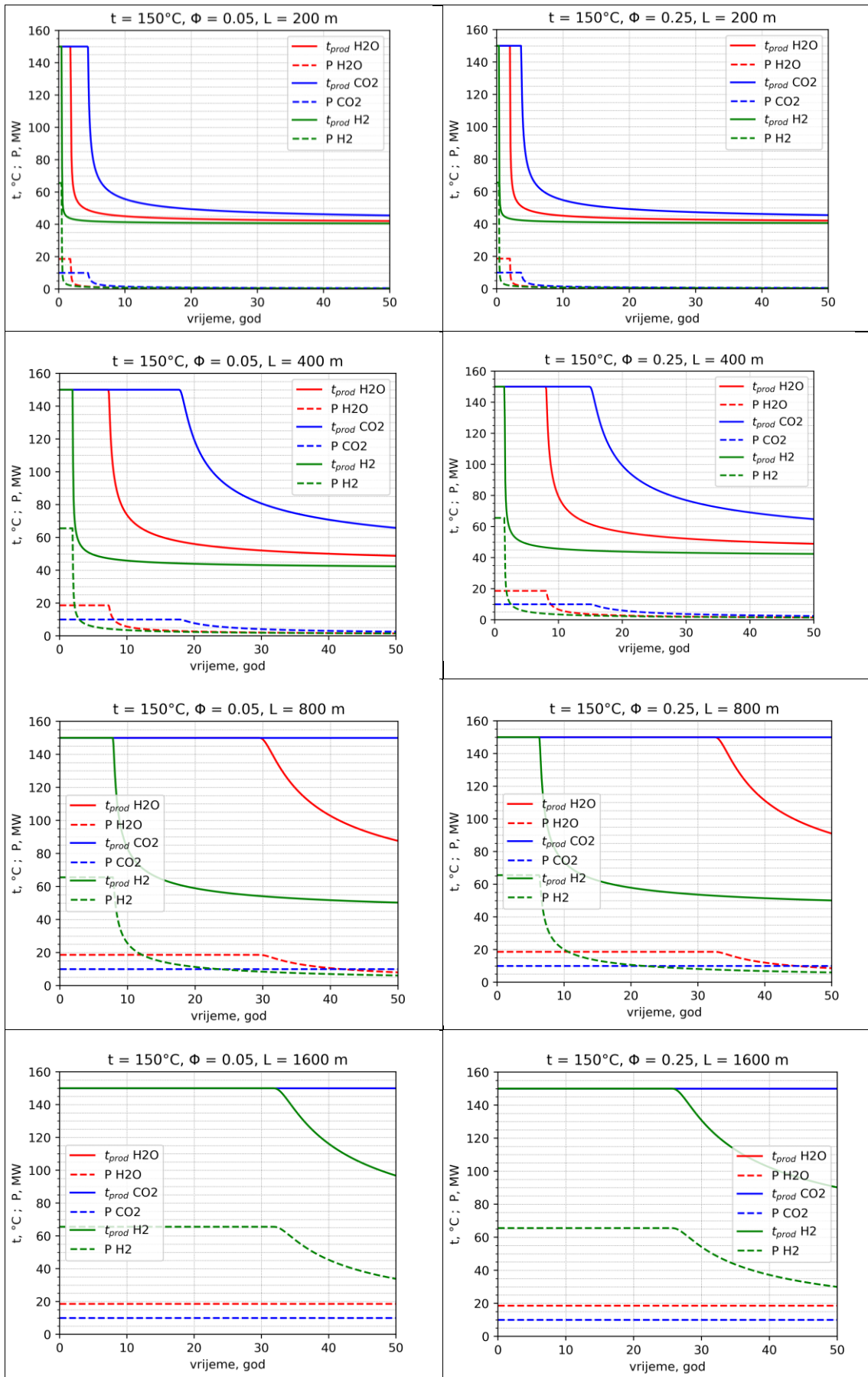
Uzevši u obzir sve testirane parametre rezultate se najpreglednije moglo pokazati tablično (Tablica 4-1) i dijagramima promjene temperature proizvedenog geofluida i, posljedično, promjene izlazne teoretske snage sustava (Slika 4-1, Slika 4-2, Slika 4-3).

Tablica 4-1 Ulazni i rezultatni parametri

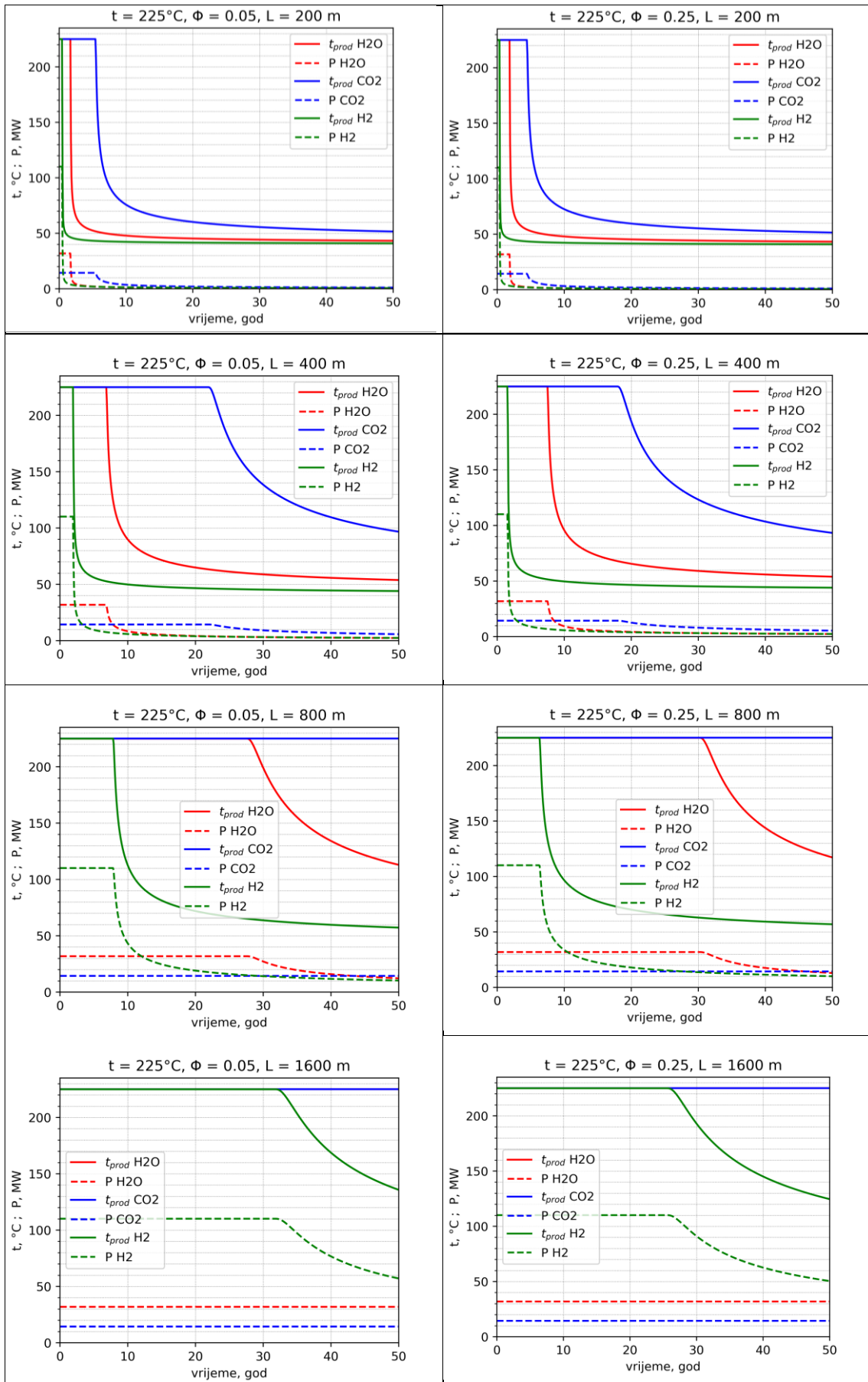
	fluid	L	$t_{lež}$	ϕ	ρ	μ	h	c	faza	m_{skl}	t_{bt}	q_r
		m	°C		kg/m ³	Pa·s	J/kg	J/kg·K		Mt	god	m ³ /s
0	H ₂ O	200	150	0,05	927,7	1.88E-04	644449	4249	kaplj.	6,62	1,81	0,12
1	CO ₂	200	150	0,05	327,1	2.96E-05	523192	1640	superkr.	16,05	4,39	0,35
2	H ₂	200	150	0,05	10,5	1.15E-05	5872697	14683	superkr.	1,78	0,49	11,03
3	H ₂ O	400	150	0,05	927,7	1.88E-04	644449	4249	kaplj.	26,49	7,25	0,12
4	CO ₂	400	150	0,05	327,1	2.96E-05	523192	1640	superkr.	64,19	17,57	0,35
5	H ₂	400	150	0,05	10,5	1.15E-05	5872697	14683	superkr.	7,11	1,95	11,03
6	H ₂ O	800	150	0,05	927,7	1.88E-04	644449	4249	kaplj.	105,95	29,01	0,12
7	CO ₂	800	150	0,05	327,1	2.96E-05	523192	1640	superkr.	256,76	70,30	0,35
8	H ₂	800	150	0,05	10,5	1.15E-05	5872697	14683	superkr.	28,45	7,79	11,03
9	H ₂ O	1600	150	0,05	927,7	1.88E-04	644449	4249	kaplj.	423,79	116,03	0,12
10	CO ₂	1600	150	0,05	327,1	2.96E-05	523192	1640	superkr.	1027,05	281,19	0,35
11	H ₂	1600	150	0,05	10,5	1.15E-05	5872697	14683	superkr.	113,81	31,16	11,03
12	H ₂ O	200	150	0,25	927,7	1.88E-04	644449	4249	kaplj.	7,31	2,00	0,12
13	CO ₂	200	150	0,25	327,1	2.96E-05	523192	1640	superkr.	13,40	3,67	0,35
14	H ₂	200	150	0,25	10,5	1.15E-05	5872697	14683	superkr.	1,43	0,39	11,03
15	H ₂ O	400	150	0,25	927,7	1.88E-04	644449	4249	kaplj.	29,26	8,01	0,12
16	CO ₂	400	150	0,25	327,1	2.96E-05	523192	1640	superkr.	53,62	14,68	0,35
17	H ₂	400	150	0,25	10,5	1.15E-05	5872697	14683	superkr.	5,71	1,56	11,03
18	H ₂ O	800	150	0,25	927,7	1.88E-04	644449	4249	kaplj.	117,02	32,04	0,12
19	CO ₂	800	150	0,25	327,1	2.96E-05	523192	1640	superkr.	214,48	58,72	0,35
20	H ₂	800	150	0,25	10,5	1.15E-05	5872697	14683	superkr.	22,84	6,25	11,03
21	H ₂ O	1600	150	0,25	927,7	1.88E-04	644449	4249	kaplj.	468,09	128,15	0,12
22	CO ₂	1600	150	0,25	327,1	2.96E-05	523192	1640	superkr.	857,91	234,88	0,35
23	H ₂	1600	150	0,25	10,5	1.15E-05	5872697	14683	superkr.	91,36	25,01	11,03

	fluid	L	$t_{lež}$	ϕ	ρ	μ	h	c	faza	m_{skl}	t_{bt}	q_r
24	H ₂ O	200	225	0,05	848,8	1.23E-04	971694	4520	kaplj.	6,21	1,70	0,14
25	CO ₂	200	225	0,05	236,7	2.91E-05	631640	1326	superkr.	19,75	5,41	0,49
26	H ₂	200	225	0,05	9,0	1.28E-05	6972299	14643	superkr.	1,78	0,49	12,83
27	H ₂ O	400	225	0,05	848,8	1.23E-04	971694	4520	kaplj.	24,85	6,80	0,14
28	CO ₂	400	225	0,05	236,7	2.91E-05	631640	1326	superkr.	79,01	21,63	0,49
29	H ₂	400	225	0,05	9,0	1.28E-05	6972299	14643	superkr.	7,13	1,95	12,83
30	H ₂ O	800	225	0,05	848,8	1.23E-04	971694	4520	kaplj.	99,38	27,21	0,14
31	CO ₂	800	225	0,05	236,7	2.91E-05	631640	1326	superkr.	316,02	86,52	0,49
32	H ₂	800	225	0,05	9,0	1.28E-05	6972299	14643	superkr.	28,52	7,81	12,83
33	H ₂ O	1600	225	0,05	848,8	1.23E-04	971694	4520	kaplj.	397,53	108,84	0,14
34	CO ₂	1600	225	0,05	236,7	2.91E-05	631640	1326	superkr.	1264,08	346,09	0,49
35	H ₂	1600	225	0,05	9,0	1.28E-05	6972299	14643	superkr.	114,07	31,23	12,83
36	H ₂ O	200	225	0,25	848,8	1.23E-04	971694	4520	kaplj.	6,81	1,87	0,14
37	CO ₂	200	225	0,25	236,7	2.91E-05	631640	1326	superkr.	16,13	4,41	0,49
38	H ₂	200	225	0,25	9,0	1.28E-05	6972299	14643	superkr.	1,43	0,39	12,83
39	H ₂ O	400	225	0,25	848,8	1.23E-04	971694	4520	kaplj.	27,25	7,46	0,14
40	CO ₂	400	225	0,25	236,7	2.91E-05	631640	1326	superkr.	64,50	17,66	0,49
41	H ₂	400	225	0,25	9,0	1.28E-05	6972299	14643	superkr.	5,71	1,56	12,83
42	H ₂ O	800	225	0,25	848,8	1.23E-04	971694	4520	kaplj.	109,00	29,84	0,14
43	CO ₂	800	225	0,25	236,7	2.91E-05	631640	1326	superkr.	258,01	70,64	0,49
44	H ₂	800	225	0,25	9,0	1.28E-05	6972299	14643	superkr.	22,84	6,25	12,83
45	H ₂ O	1600	225	0,25	848,8	1.23E-04	971694	4520	kaplj.	436,00	119,37	0,14
46	CO ₂	1600	225	0,25	236,7	2.91E-05	631640	1326	superkr.	1032,02	282,55	0,49
47	H ₂	1600	225	0,25	9,0	1.28E-05	6972299	14643	superkr.	91,35	25,01	12,83
48	H ₂ O	200	300	0,05	734,7	9.01E-05	1334371	5316	kaplj.	5,29	1,45	0,16
49	CO ₂	200	300	0,05	191,9	3.07E-05	727454	1246	superkr.	21,00	5,75	0,60
50	H ₂	200	300	0,05	7,9	1.41E-05	8069824	14629	superkr.	1,78	0,49	14,62
51	H ₂ O	400	300	0,05	734,7	9.01E-05	1334371	5316	kaplj.	21,15	5,79	0,16
52	CO ₂	400	300	0,05	191,9	3.07E-05	727454	1246	superkr.	84,00	23,00	0,60
53	H ₂	400	300	0,05	7,9	1.41E-05	8069824	14629	superkr.	7,13	1,95	14,62
54	H ₂ O	800	300	0,05	734,7	9.01E-05	1334371	5316	kaplj.	84,61	23,17	0,16
55	CO ₂	800	300	0,05	191,9	3.07E-05	727454	1246	superkr.	336,00	91,99	0,60
56	H ₂	800	300	0,05	7,9	1.41E-05	8069824	14629	superkr.	28,54	7,81	14,62
57	H ₂ O	1600	300	0,05	734,7	9.01E-05	1334371	5316	kaplj.	338,45	92,66	0,16
58	CO ₂	1600	300	0,05	191,9	3.07E-05	727454	1246	superkr.	1343,99	367,97	0,60

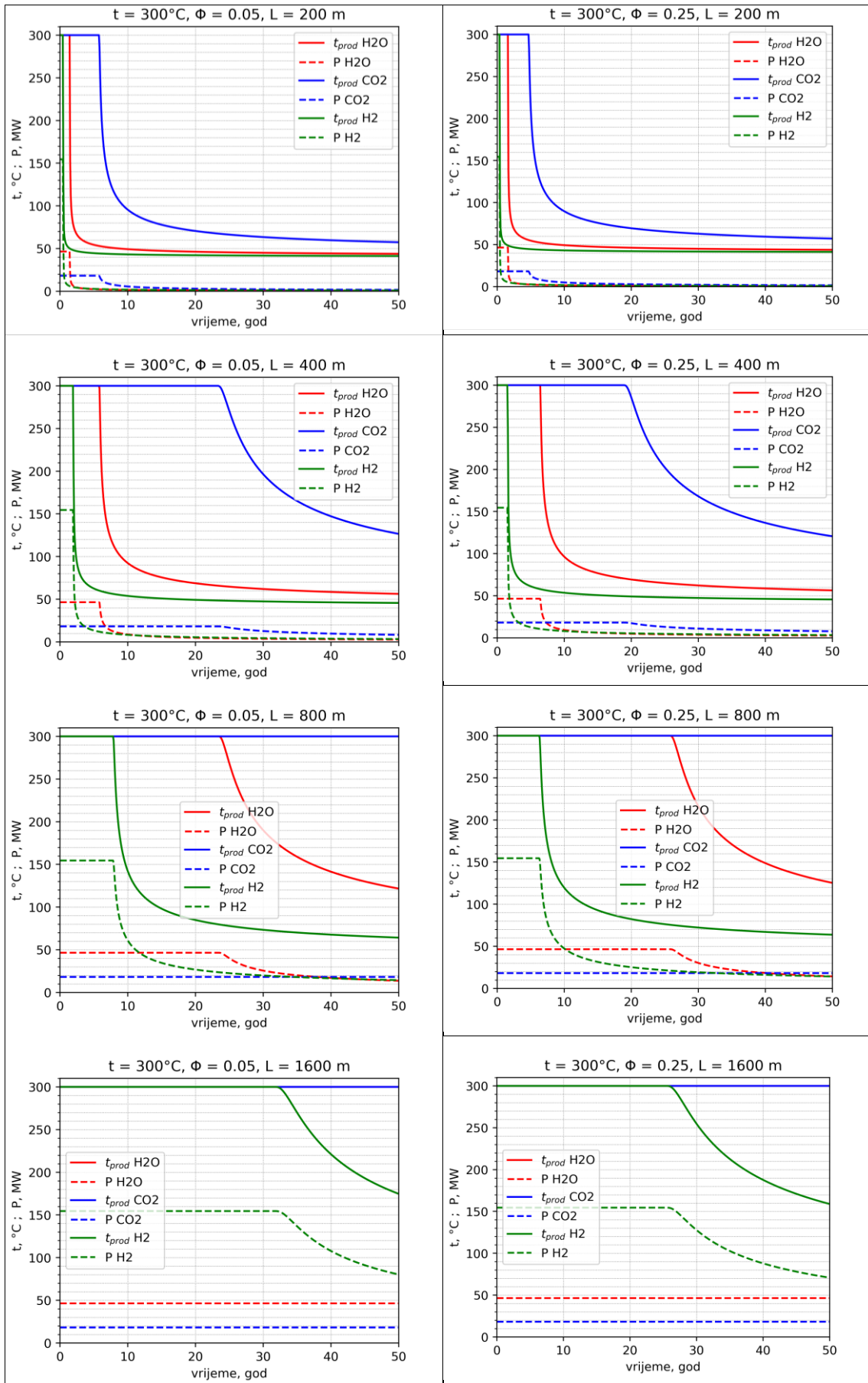
	fluid	<i>L</i>	<i>t_{lež}</i>	ϕ	ρ	μ	<i>h</i>	<i>c</i>	faza	<i>m_{skl}</i>	<i>t_{bt}</i>	<i>q_r</i>
59	H ₂	1600	300	0,05	7,9	1.41E-05	8069824	14629	superkr.	114,14	31,25	14,62
60	H ₂ O	200	300	0,25	734,7	9.01E-05	1334371	5316	kaplj.	5,83	1,60	0,16
61	CO ₂	200	300	0,25	191,9	3.07E-05	727454	1246	superkr.	17,01	4,66	0,60
62	H ₂	200	300	0,25	7,9	1.41E-05	8069824	14629	superkr.	1,43	0,39	14,62
63	H ₂ O	400	300	0,25	734,7	9.01E-05	1334371	5316	kaplj.	23,31	6,38	0,16
64	CO ₂	400	300	0,25	191,9	3.07E-05	727454	1246	superkr.	68,04	18,63	0,60
65	H ₂	400	300	0,25	7,9	1.41E-05	8069824	14629	superkr.	5,70	1,56	14,62
66	H ₂ O	800	300	0,25	734,7	9.01E-05	1334371	5316	kaplj.	93,23	25,53	0,16
67	CO ₂	800	300	0,25	191,9	3.07E-05	727454	1246	superkr.	272,17	74,52	0,60
68	H ₂	800	300	0,25	7,9	1.41E-05	8069824	14629	superkr.	22,81	6,25	14,62
69	H ₂ O	1600	300	0,25	734,7	9.01E-05	1334371	5316	kaplj.	372,94	102,11	0,16
70	CO ₂	1600	300	0,25	191,9	3.07E-05	727454	1246	superkr.	1088,66	298,06	0,60
71	H ₂	1600	300	0,25	7,9	1.41E-05	8069824	14629	superkr.	91,25	24,98	14,62



Slika 4-1. Promjene temperature i izlazne teoretske snage u ležištu pri 150 °C



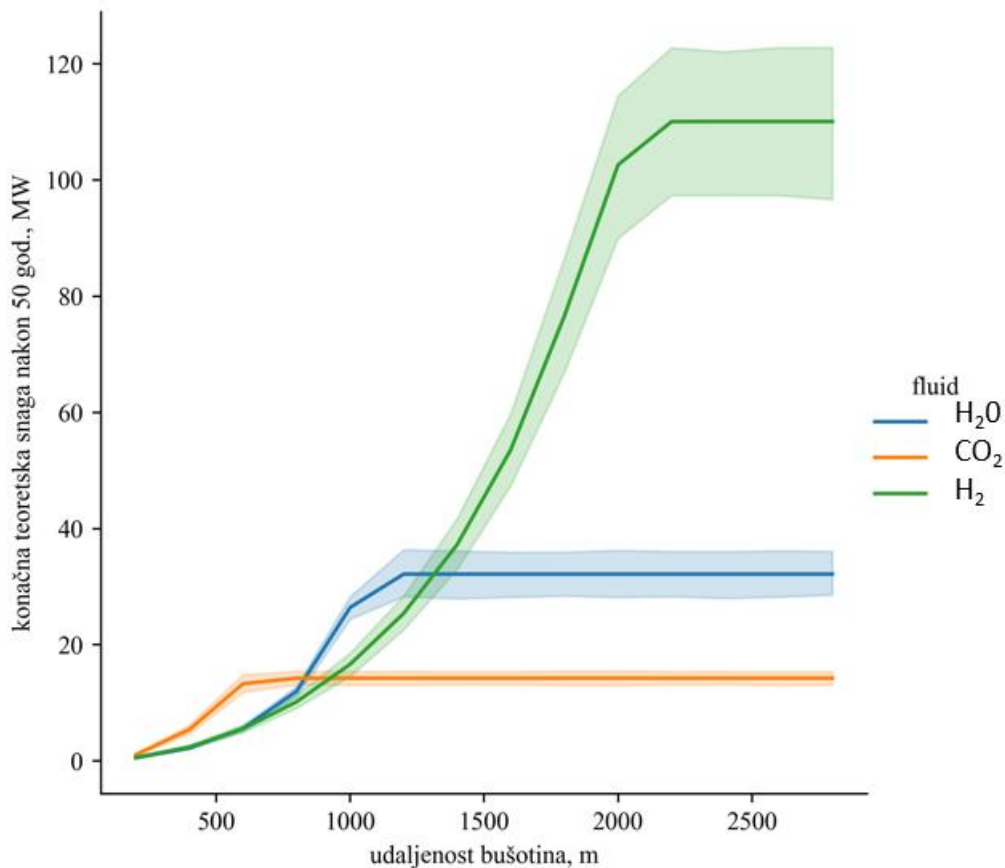
Slika 4-2. Promjene temperature i izlazne teoretske snage u ležištu pri 225 °C



Slika 4-3. Promjene temperature i izlazne teoretske snage u ležištu pri 300°C

Očito je kako svaki fluid svojim transportnim i termalnim svojstvima donosi drugačiji rezultat u smislu prijenosa topline u svakom slučaju ležišta (Slika 4-4). Stoga se broj analiza povećao, kako bi se mogli izvući općeniti zaključci. Set proračuna napravljen je petljama u petlji (ugnježđivanjem petlji) za sljedeći set podataka (ostali podatci ostaju isti):

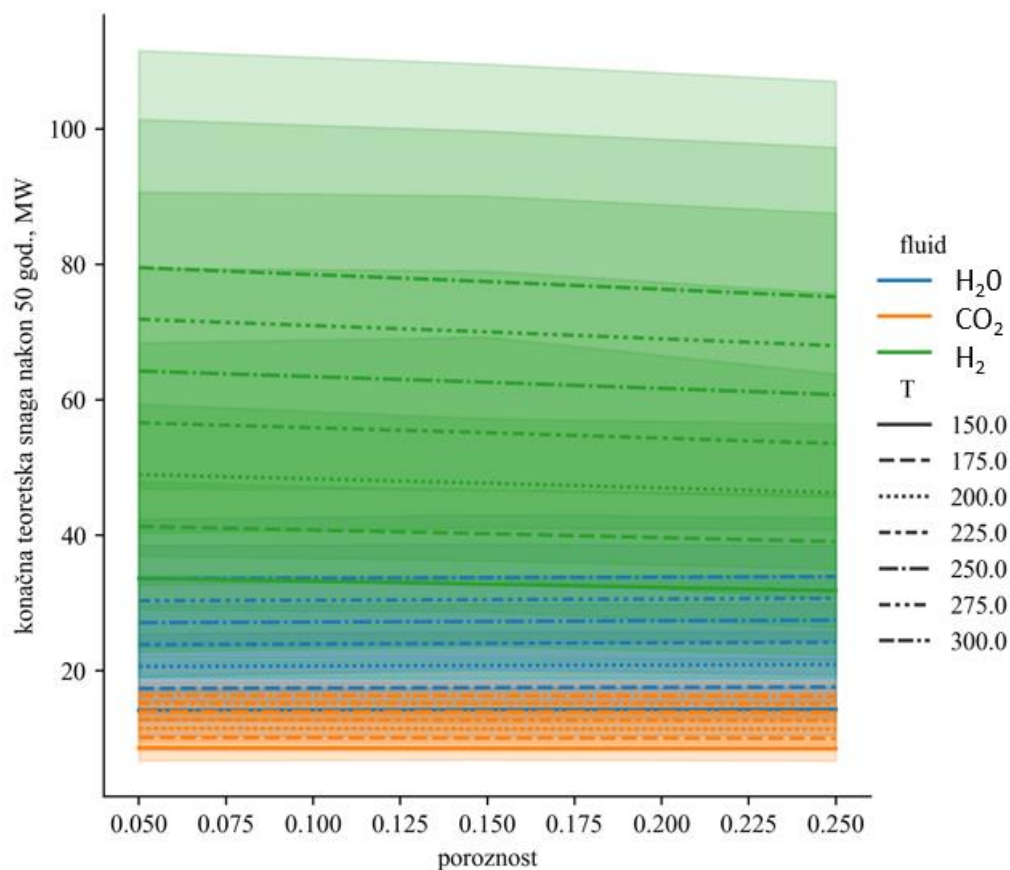
- udaljenost bušotina od 200 do 3000 m (u koracima po 200)
- još jedna vrijednost poroznosti (sada se računalo s $\phi = 0,05; 0,15$ i $0,25$)
- temperature od 150 do 300 °C, ali u koracima po 25.



Slika 4-4 Konačna snaga, ovisno o fluidu i udaljenosti bušotina

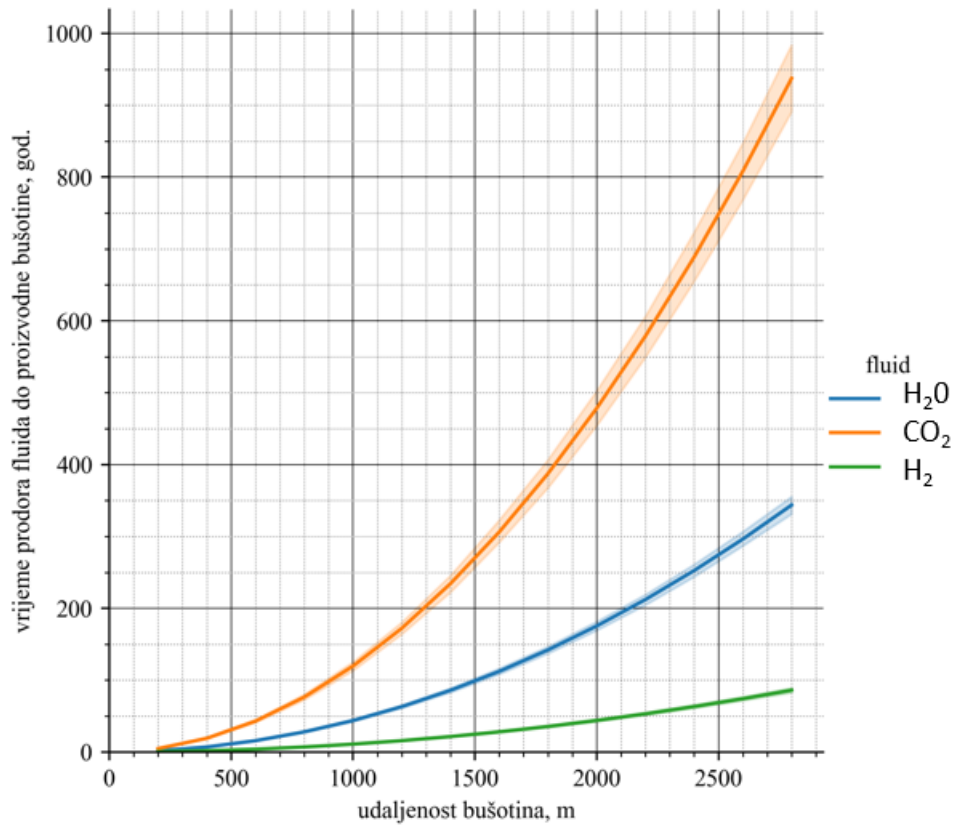
Slika 4-4 pokazuje široki raspon parametara u analizi. Interval pouzdanosti određen je korištenjem Seaborn Python modula (Waskom, 2021).

Također se može zaključiti kako je rudarenje geotermalne energije vodikom teško može pouzdano predvidjeti, i kako poroznost ne mijenja bitno trend ovih linija (Slika 4-5).



Slika 4-5 Odnos poroznosti i konačne izlazne snage

Iako kod svih fluida nije bitno skladištenje, posebice u slučaju CO₂, već se ukazalo na mogućnost utilizacije CO₂ za rudarenje geotermalne energije (Cui et al., 2018; Esteves et al., 2019; Norouzi et al., 2023; Ogland-Hand et al., 2022; Schifflechner et al., 2022; Vulin et al., 2020) i već su dokazane prednosti CO₂ u smislu termodinamičkih i reoloških svojstava. Zbog dotične kombinacije svojstava, zanimljivi su podatci o vremenu prodora i do tog momenta uskladištenog fluida između utisne i proizvodne bušotine (Slika 4-6).



Slika 4-6 Udaljenost bušotina povećava razliku u vremenu prodora hladne fronte

5. ZAKLJUČAK

U radu je provedena analiza osjetljivosti na (udaljenost bušotina, poroznost, te dubina koja utječe na ulaznu temperaturu, tlak, viskoznost i gustoću utiskivanog fluida), kako bi se omogućio uvid u odnos ponašanja fluida (voda, vodik i CO₂) u interakciji sa stijenom, te njihov potencijal za rudarenje geotermalne energije.

Potrebno je uočiti limite analize, a to su:

1. korištenje jednadžbe koja zanemaruje protočna svojstva, tj. ciljano striktno proračunavanje pada temperature u proizvodnoj bušotini. Pri tome je zanemarena promjena reoloških i termičkih svojstava fluida između dvije bušotine.
2. kako se ne koriste parametri propusnosti za procjenu napretka fronte utiskivanog fluida, rezultati govore samo o napretku hladne fronte; može se zaključiti da hladna fronta napreduje sporije od samog utisnutog fluida, tj. fluid se ipak kroz ležište zagrijava i postoji (pozitivna) razlika u vremenu prodora utisnutog fluida i dolaska hladnije fronte.
3. Nisu razmatrane različite temperature utiskivanja iz razloga što bi tada rad premašio okvir završnog rada.
4. Proračuni proizvedene energije daju perspektivne rezultate za vodik i za CO₂, tj. za svaki geofluid ovisno o razmaku bušotina i temperaturi ležišta. Međutim, treba uzeti u obzir kako nije računat potrebna energija kompresije/pumpe za utisnu bušotinu.
5. Upravo zanemareni otpori, tj. padovi tlaka u bušotini, a dalje u odnosu bušotine i ležišta (VLP-IPR odnos) mogu dovesti do krivih zaključaka. Energija potrebna za kompresiju zahtijeva proračun u malim koracima dubine utisne bušotine, kako bi se precizno ustanovile izentropske promjene svojstava utisnutog fluida. Zatim, ta ista veća energija daje manji stupac utisnutog fluida u bušotini od vode, tako da je potreban sigurno mnogo veći tlak nakon kompresora, nego što je potreban kod pumpe za vodu, što dodatno povećava razliku u energiji za utiskivanje plinova. S druge strane, njihova manja viskoznost uzrokuje puno veću injektivnost i mobilnost u sloju. Proračuni brzine napredovanja mase utisnutog fluida pokazali bi sigurno povoljna svojstva CO₂ i H₂, ali isto tako i generalno slabiji prijenos topline sa stijene na fluid. Također, prijenos s fluida na izmjenjivač u ORC postrojenju vjerojatno bi bio uvijek lošiji u slučaju vodika, a zatim CO₂ u odnosu na slojnu vodu.
6. Ovakve analize složene su upotrebom softvera, jer zahtijevaju integraciju sustava bušotina – ležište – ORC, stoga analitički pristup nije u svim aspektima inferioran –

analitički je moguće provesti analizu puno većeg broja parametara, ali je potrebno i pažljivo uzimanje pretpostavki i pažljiv odabir analitičkih metoda i jednadžbi kako bi analiza imala smisla.

Pored kritičnog sagledavanja analize, moguće je donijeti sljedeće zaključke:

1. Veliki razmak bušotina povoljnije djeluje na prijenos topline pomoću vodika. Zanimljivo je da je voda u tom slučaju efikasnija od CO₂.
2. Veća poroznost davat će slabije performanse geofluida u smislu preuzimanja/prenošenja toplinske energije od ležišta. Ovdje treba upozoriti da je manja poroznost najčešće u korelaciji s manjom propusnosti, tako da bi nadogradnja analize bila promatrati odnos propusnosti i poroznosti te izlazne snage i energije.
3. Hladna fronta CO₂ najčešće najsporiје stiže do proizvodne bušotine. Može se zaključiti da je do momenta prodora hladne fronte CO₂ već dugo vremena u recirkulaciji od proizvodne preko utisne bušotine.
4. Voda generalno, u najviše situacija, kroz cijeli promatrani vijek, daje najveću izlaznu snagu.
5. Vodik, kao nosioc energije budućnosti, pokazuje se dugoročno kao vrlo interesantna opcija. Primjena geoloških formacija za skladištenje vodika već je detektirana. Ovakav toplinski efekt je interesantan posebice za nadoknadu energije potrošene tijekom kompresije vodika za njegovo skladištenje. Moguće je da bi vodik mogao povoljno funkcionirati u kontekstu koji se može povezati s tzv. huff and puff metodama. To bi istina uključivalo jednu bušotinu, naglo utiskivanje, a zatim „ispuhavanje“ iste bušotine s vodikom pri znatno većoj temperaturi.
6. Bušotinski efekti hlađenja plinova mogu biti vrlo izraženi, stoga je potrebno detaljno sagledati gubitke topline u proizvodnoj bušotini.

6. REFERENCE

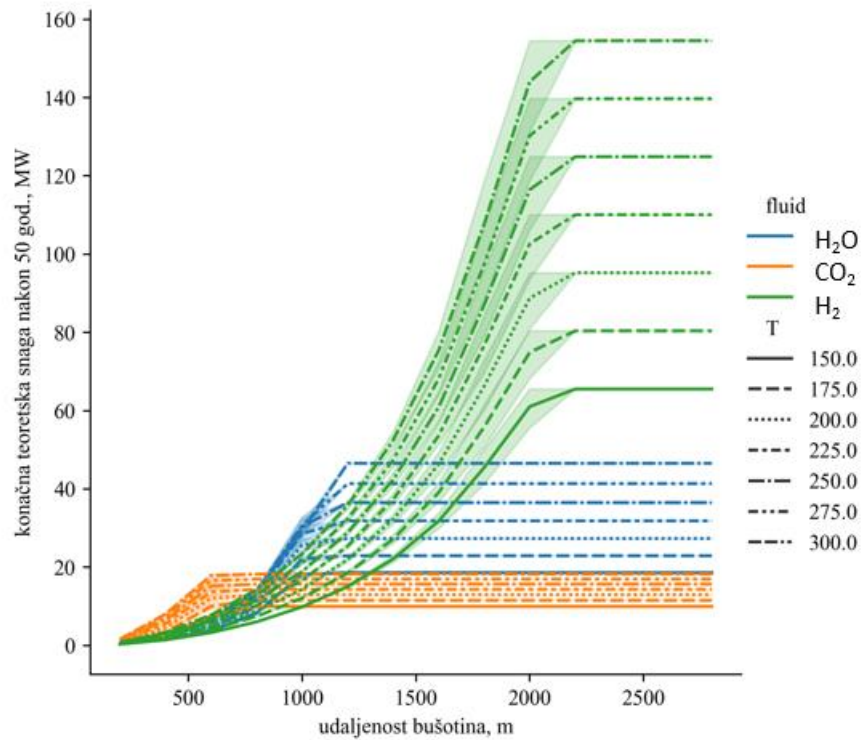
1. ANTONEAS, G. and KORONAKI, I. (2024) 'Geothermal Solutions for Urban Energy Challenges: A Focus on CO₂ Plume Geothermal Systems'. *Energies* 2024, Vol. 17, Page 294 [online] 17 (2), 294. available from <<https://www.mdpi.com/1996-1073/17/2/294/htm>> [27 February 2024]
2. ARMSTRONG, R.L. (1984) 'The Role of Heat in the Development of Energy and Mineral Resources in the Northern Basin and Range Province'. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 65 (45)
3. AVANTHI ISAKA, B.L., RANJITH, P.G., and RATHNAWEERA, T.D. (2019) 'The Use of Super-Critical Carbon Dioxide as the Working Fluid in Enhanced Geothermal Systems (EGSs): A Review Study'. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 36
4. BREEDE, K., DZEBISASHVILI, K., LIU, X., and FALCONE, G. (2013) 'A Systematic Review of Enhanced (or Engineered) Geothermal Systems: Past, Present and Future'. in *Geothermal Energy*. vol. 1 (1)
5. BROWN, D.W., DUCHANE, D. V., HEIKEN, G., HRISCU, V.T., and KRON, A. (2012) 'Mining the Earth's Heat: Hot Dry Rock Geothermal Energy'. *Mining the Earth's Heat: Hot Dry Rock Geothermal Energy* 1–657
6. CINAR, M., PALABIYIK, Y., and ONUR, M. (2017) 'Correlations for Joule-Thomson Coefficients of Geothermal Waters Containing CO₂'. 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University Stanford University (2)
7. CUI, G., REN, S., RUI, Z., EZEKIEL, J., ZHANG, L., and WANG, H. (2018) 'The Influence of Complicated Fluid-Rock Interactions on the Geothermal Exploitation in the CO₂ Plume Geothermal System'. *Applied Energy* 227
8. ESTEVES, A.F., SANTOS, F.M., and MAGALHAES PIRES, J.C. (2019) 'Carbon Dioxide as Geothermal Working Fluid: An Overview'. in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. vol. 114
9. LI, J., SU, Y., YU, B., WANG, P., and SUN, D. (2021) 'Influences of Hydrogen Blending on the Joule-Thomson Coefficient of Natural Gas'. *ACS Omega* 6 (26)
10. MAJOR, M., POULSEN, S.E., and BALLING, N. (2018) 'A Numerical Investigation of Combined Heat Storage and Extraction in Deep Geothermal Reservoirs'. *Geothermal Energy* 6 (1)
11. MATHIAS, S.A., GLUVAS, J.G., OLDENBURG, C.M., and TSANG, C.F. (2010) 'Analytical Solution for Joule-Thomson Cooling during CO₂ Geo-Sequestration in Depleted Oil and Gas Reservoirs'. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 4 (5)

12. NOROUZI, A.M., POURANIAN, F., RABBANI, A., FOWLER, N., GLUYAS, J., NIASAR, V., EZEKIEL, J., and BABAEI, M. (2023) 'CO₂-Plume Geothermal: Power Net Generation from 3D Fluvial Aquifers'. *Applied Energy* 332
13. OGLAND-HAND, J.D., ADAMS, B.M., BENNET, J.A., and MIDDLETON, R.S. (2022) 'A Geospatial Cost Comparison of CO₂ Plume Geothermal (CPG) Power and Geologic CO₂ Storage'. *Frontiers in Energy Research* 10
14. OLDENBURG, C.M. (2007) 'Joule-Thomson Cooling Due to CO₂ Injection into Natural Gas Reservoirs'. *Energy Conversion and Management* 48 (6)
15. PHUOC, T.X., MASSOUDI, M., WANG, P., and MCKOY, M.L. (2019) 'Heat Losses Associated with the Upward Flow of Air, Water, CO₂ in Geothermal Production Wells'. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 132
16. RYBACH, L. (2021) 'Geothermal Sustainability or Heat Mining?' *International Journal of Terrestrial Heat Flow and Applications* 4 (1)
17. SCHIFFLECHNER, C., WIELAND, C., and SPLIETHOFF, H. (2022) 'CO₂ Plume Geothermal (CPG) Systems for Combined Heat and Power Production: An Evaluation of Various Plant Configurations'. *Journal of Thermal Science* 31 (5)
18. TENZER, H. (2001) 'Development of Hot Dry Rock Technology'. in *International Summer School on Direct Application of Geothermal Technology* [online] 14. available from https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/ISS/2003Germany/III/2_1.ten.pdf
19. TESTER, J.W., HERZOG, H.J., CHEN, Z., POTTER, R.M., and FRANK, M.G. (1994) 'Prospects for Universal Geothermal Energy from Heat Mining'. *Science & Global Security* 5 (1)
20. VULIN, D., PERKOVIĆ, L., MACENIĆ, M., JUKIĆ, L., KARASALIHović SEDLAR, D., SAFTIĆ, B., ARNAUT, M., LEKIĆ, A. (2016) ESCOM (Evaluation System for CO₂ Mitigation / Evaluacijski Sustav Za Ublažavanje CO₂) [online] available from <http://www.hrzz.hr/default.aspx?id=78&pid=4642&rok=2016-06> [7 April 2019]
21. VULIN, D., MUHASILOVIĆ, L., and ARNAUT, M. (2020) 'Possibilities for CCUS in Medium Temperature Geothermal Reservoir'. *Energy* 200
22. WASKOM, M.L. (2021) 'Seaborn: Statistical Data Visualization'. *Journal of Open Source Software* [online] 6 (60), 3021. available from <https://joss.theoj.org/papers/10.21105/joss.03021> [29 September 2021]
23. XU, R., ZHANG, L., ZHANG, F., and JIANG, P. (2015) 'A Review on Heat Transfer and Energy Conversion in the Enhanced Geothermal Systems with Water/CO₂ as Working Fluid'. *International Journal of Energy Research* 39 (13)

24. ZHANG, Y. and ZHAO, G.F. (2020) 'A Global Review of Deep Geothermal Energy Exploration: From a View of Rock Mechanics and Engineering'. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources* 6 (1)
25. ZIABAKHS-GANJI, Z. and KOOI, H. (2014) 'Sensitivity of Joule-Thomson Cooling to Impure CO₂ Injection in Depleted Gas Reservoirs'. *Applied Energy* 113
26. Technische Universiteit Delft, 2022 Demonstrating improved efficiency and integration of underground heat storage systems, EU Horizon Europe projekt, <https://cordis.europa.eu/project/id/101096566>, pristup (28. veljače 2024.)

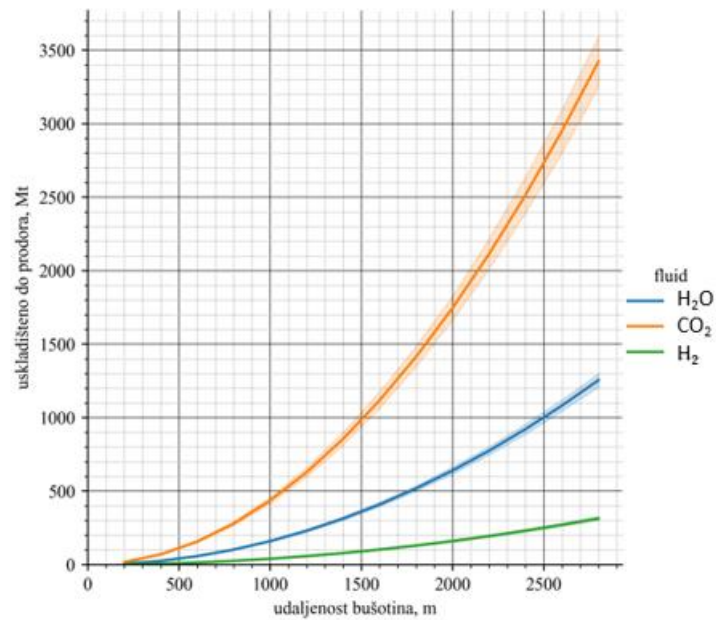
7. DODATCI

Slika 7-1 u dodatku pokazuje kako su minimumi i maksimumi intervala pouzdanosti ponajviše određeni ležišnom temperaturom (minimalna temperatura daje manje izlazne snage, a veća veće), ali da oni ne mijenjaju puno općeniti trend ponašanja svakog fluida.



Slika 7-1 Detaljan uvid u odnos temperatura i konačne izlazne snage

Na temelju vremena prodora, pokušalo se ustanoviti i količinu uskladištenog CO₂ (isto tako i vode i vodika), međutim rezultat daleko precjenjuje moguću količinu utisnutog CO₂ prije nego isti prodre do proizvodne bušotine (Slika 7-2), nakon čega slijedi period reinjektiranja (kraj „skladištenja“, početak utilizacije).



Slika 7-2 Precijenjene količine uskladištenja do prodora

IZJAVA

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

Karlo Findri

Karlo Findri



KLASA: 602-01/24-01/70
URBROJ: 251-70-12-24-2
U Zagrebu, 11. 9. 2024.

Karlo Findri, student

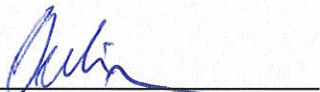
RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/24-01/70, URBROJ: 251-70-12-24-1 od 10.05.2024. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

PVT SVOJSTVA VODIKA I CO₂ ZA USPOREDBU POTENCIJALA KORIŠTENJA GEOTERMALNE ENERGIJE

Za mentora ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada Prof. dr. sc. Domagoj Vulin nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentor:

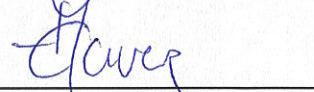


(potpis)

Prof. dr. sc. Domagoj Vulin

(titula, ime i prezime)

Predsjednica povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

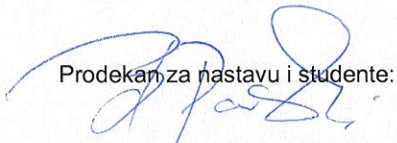


(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Karolina
Novak Mavar

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:



(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)