

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
ZAVOD ZA NAFTNO INŽENJERSTVO

Simulacijska analiza istovremene proizvodnje geotermalne energije i skladištenja CO₂

Lejla Muhasilović

Zagreb, 2018

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za naftno inženjerstvo na Rudarsko-Geološko-Naftnom fakultetu pod vodstvom izv.prof. dr. sc. Domagoja Vulina i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2017/2018.

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Hipoteza i ciljevi rada	3
3. Metode i teorijske postavke.	5
3.1. Protočna i termička svojstva vode i ugljičnog dioksida.....	5
3.2. Petrofizikalna svojstva stijena i numerička simulacija protoka u stijeni.....	7
3.3. Karakteristike termodinamičkih ciklusa prikladnih za pretvorbu geotermalne energije u električnu	11
3.4. Eksergija sustava	13
3.5. Dubine i dimenzije pojedinih blokova u hidrodinamičkom poroznom sustavu	16
4. Rezultati i rasprava simulacijskih slučajeva	19
4.1. Proizvodnja geotermalne vode i reinjektiranje proizvedene vode.....	19
4.2. Usporedba baznog scenarija i izmijenjenog scenarija s područjem veće propusnosti zbog hidrauličkog frakturiranja na SM1	20
4.3. Analiza osjetljivosti	22
Analiza potencijala tlaka	26
4.4. Utiskivanje CO ₂ i istovremena proizvodnja geotermalnog fluida.....	30
4.5. Usporedba scenarija utiskivanja CO ₂ i izmijenjenog scenarija s područjem veće propusnosti zbog hidrauličkog frakturiranja	33
4.6. Popratni efekti u vidu uskladištenja CO ₂	34
4.7. Analiza eksergije sustava	36
Proizvodnja i utiskivanje vode.....	36
5. Zaključak.....	41
6. Reference.....	43
7. Dodatci.....	47
7.1. Grafički prilozi za određivanje dimenzija simulacijskog modela	47
8. Sažetak	50
9. Summary.....	51

Popis tablica:

Tablica 3.1 Izvor podataka	18
Tablica 4.1 Konstantne vrijednosti poroznosti i propusnosti u ležištu.....	19
Tablica 4.2 Propusnost i poroznost stijena unutar bloka ispod KPZ te iznad PPZ.....	23
Tablica 4.3 Utjecaj cijelog pornog volumena ležišta na pad tlaka.....	28
Tablica 4.4 Zaostali CO ₂ (10 ⁶ m ³ u 20 godina)	30
Tablica 4.5 Ukupno uskladišteni CO ₂ (m ³)	35
Tablica 4.6 Izračunate vrijednosti na ušću utisne bušotine u slučaju proizvodnje i utiskivanja vode.	37
Tablica 4.7 Ulazni parametri proizvodne bušotine za proračun eksergije.....	38
Tablica 4.8 Parametri fluida (vode) na utisnoj bušotini.....	38
Tablica 4.9 Utjecaj pothlađivanja temperature na eksergetsku snagu geotermalnog ležišta .	39
Tablica 4.10 Eksergetska snaga geotermalnog sustava s proizvodnjom CO ₂	39
Tablica 5.1 Popis slučajeva i pripadajući utjecaj	42

Popis slika

Slika 2.1. Shema cjelokupnog binarnog sustava proizvodnje i utiskivanja geofluida (slojna voda, CO ₂), utiskivanja dodatnog CO ₂ te sustava za proizvodnju električne energije korištenjem sekundarnog radnog fluida u organskom Rankineovom ciklusu.	4
Slika 3.1. Termičke vodljivosti za CO ₂ i H ₂ O u rasponu temperatura od 15 do 200°C i tlakova od 1·10 ⁵ Pa (1 bar) do 250·10 ⁵ Pa.....	6
Slika 3.2. Viskoznosti za CO ₂ i H ₂ O u rasponu temperatura od 15 do 200°C i tlakova od 1·10 ⁵ Pa (1 bar) do 250·10 ⁵ Pa.....	6
Slika 3.3. Dijagram temperature (T) i specifične entropije (s) na granici dvofaznog područja za nekoliko sekundarnih radnih fluida.....	12
Slika 3.4. Shematski prikaz radnih točaka i elemenata za primjenu ORC ciklusa pri proizvodnji električne energije, primjenjivo za niskoentalpijska geotermalna ležišta.	13
Slika 3.5. Protočni Z-model u geotermalnom ležištu Velika Ciglana (Čubrić, 2012)	17
Slika 3.6. Protočni Z-model u geotermalnom ležištu Velika Ciglana (Guzović i dr. 2010).....	17
Slika 4.1 Prikaz temperature u modelima (lijevo SM1, desno SM2)	20
Slika 4.2 usporedba sa (desno) i bez (lijevo) hidrauličkog frakturiranja SM1.....	21
Slika 4.3 Bazni slučaj simuliran u ležišnom simulatoru Eclipse	23
Slika 4.4 Prvi scenarij (S1, povećane poroznosti nepropusnih blokova) simuliran u ležišnom simulatoru Eclipse	23

Slika 4.5 Prikaz najplićeg i najdubljeg proslojka u modelu i širenja temperature nakon 1, 10, 20 i 30 godina za bazni scenarij.	25
Slika 4.6 Prikaz najplićeg i najdubljeg proslojka u modelu i širenja temperature nakon 1, 10, 20 i 30 godina za scenarij 1. U ostalim scenarijima razlike su minimalne.	26
Slika 4.7 Pad tlaka u baznom scenariju nakon 10 godina	26
Slika 4.8 Korelacija udjela pornog volumena u produktivnim intervalima i vremena do određenog pada tlaka.....	28
Slika 4.9 Tlak u KPZ i PPZ (bazni scenarij) nakon 1 godine te 10, 20 i 30 godina.	29
Slika 4.10 Promjena tlaka u proizvodnoj bušotini za svaki simulacijski scenarij.	30
Slika 4.11 Proizvodnja vode	31
Slika 4.12 Zasićenje plinom nakon 1 god obzirom na propusnost (4 slučaja - gore SM1 , dolje SM2, s lijeve strane bazni, s desne strane povećana propusnost).....	31
Slika 4.13 Temperatura nakon 20 godina obzirom na propusnost (4 slučaja - gore SM1 , dolje SM2, s lijeve strane bazni, s desne strane povećana propusnost).....	32
Slika 4.14 Zasićenje plinom nakon 1 godine i 15 godina sa (desno) i bez (lijevo) frakturiranja	33
Slika 4.15 Temperatura nakon 5 i 20 godina u slučajevima sa (desno) i bez (lijevo) frakturiranja (SM1)	34
Slika 4.16 Količina utisnutog, proizvedenog i uskladištenog CO ₂	35
Slika 4.17 Interpolirane vrijednosti gustoća i viskoznosti CO ₂ korištene za proračun pada tlaka u proizvodnoj bušotini.....	37
Slika 4.18 Interpolirane vrijednosti gustoća i viskoznosti CO ₂ korištene za proračun pada tlaka u utisnoj bušotini.....	37
Slika 4.19 Usporedba eksergetske snage na temelju najpovoljnijih simulacijskih slučajeva proizvodnje vode i CO ₂ iz geotermalnog ležišta	40
Slika 7.1 Strukturno tj. tektonsko rješenje geotermijskog ležišta Velika Ciglena (Čubrić, 2012)	47
Slika 7.2 Uzdužni profil s bušotinama VC-1 i VC-1a (Čubrić, 2012). Plavom strelicom označena je dubina na kojoj bušotina VC-1a probija rasjed.	47
Slika 7.3 Uzdužni profil s bušotinama VC-1 i VC-1a (Guzović i dr., 2010).....	48
Slika 7.4 Tri scenarija (prvi red – scenarij 1, drugi – scenarij 2 i treći – scenarij 3) i tlak u PPZ i KPZ nakon jedne i nakon deset godina.	49

Popis korištenih oznaka i jedinica

Oznaka	Opis	Jedinica
\dot{m}	- maseni protok	(kg/s)
d	- promjer cijevi	(m)
dp	- diferencijalni tlak u pumpi	(Pa)
e	- hrapavost	
f	- faktor trenja	
f_p	- udio početnog tlaka	
h_{inj}	- specifična entalpija u utisnoj bušotini	(kJ/kg)
h_{prod}	- specifična entalpija u proizvodnoj bušotini	(kJ/kg)
k	- propusnost	(1mD=9.869233e-16m ²)
m	- omjer volumena pora Z-modela i cijelog volumena ležišta	
p	- tlak na dnu bušotine	(Pa)
P	- snaga	(W)
$p(t)$	- pad tlaka u vremenu	(bar=10 ⁵ Pa)
p_{dno}	- tlak na dnu bušotine	(Pa)
p_i	- početni tlak	(bar=10 ⁵ Pa)
p_R	- tlak u ležištu	(bar=10 ⁵ Pa)
q	- volumni protok	(m ³ /s)
Q	- toplina	(J)
q_1	- protok	(m ³ /dan)
Q_{uk}	- ukupna proizvodnja	(m ³)
Re	- Reynoldsov broj	
s	- entropija	(J/Kmol)
S_g	- zasićenje plinom	(% volumena pora)
S_{inj}	- specifična entropija u utisnoj bušotini	(kJ/kgK)
S_{prod}	- specifična entropija u proizvodnoj bušotini	(kJ/kgK)
S_w	- zasićenje vodom	(% volumena pora)
T	- temperatura fluida ili ležišta	(°C)
t	- vrijeme	(dan, sat, godina, sekunda)
U	- unutarnja energija	(J)
V	- volumen	(m ³)
v	- brzina kretanja fluida	(m/s)
W	- rad	(J)
Δp_t	- pad tlaka radi trenja	(Pa)

Δz	- dubinski interval	(m)
ρ	- gustoća fluida	(kg/m ³)
$\rho g \Delta z$	- pad tlaka	(Pa)
ψ	- eksergija, eksergetska snaga	(J, MW)

Popis kratica

AIM	- adaptivna implicitna metoda (engl. <i>Adaptive implicit method</i>)
CCS	- hvatanje i skladištenje CO ₂ (engl. <i>Carbon Capture and Storage</i>)
CPG	- geotermalni sustav s dijelom zasićenim s CO ₂ , tj. tzv. oblakom CO ₂ (engl. <i>CO₂ plume geothermal system</i>).
DEA	- organski kemijski spoj dietanolamin (engl. <i>diethanolamine</i>)
ECBM	- metoda pridobivanja plina utiskivanjem CO ₂ u ležište ugljena (engl. <i>Enhanced coal bed methane</i>)
EGS	- sustav koji koristi CO ₂ kao radni fluid u korištenju geotermalne energije (engl. <i>engineered geothermal systems</i> ili <i>enhanced geothermal systems</i>)
EOR	- tercijarne metode pridobivanja ugljikovodika (engl. <i>Enhanced Oil Recovery</i>)
FIM	- potpuno implicitna metoda (engl. <i>Fully Implicit Method</i>)
GOE	- efekt orijentacije mreže (engl. <i>Grid Orientation Effect</i>)
IAPWS	- internacionalna organizacija za svojstva vode i vodene pare (engl. <i>The International Association for the Properties of Water and Steam</i>)
IMPES	- metoda implicitnog tlaka i eksplicitnog zasićenja (engl. <i>Implicit pressure explicit saturation</i>)
IPR	- indikatorske krivulja o performansu pribušotinske zone (engl. <i>inflow performance relationship</i>)
JS (EOS)	- jednadžba stanja (engl. <i>Equation of state</i>)
KPZ	- krovinska propusna zona
MDEA	- organski kemijski spoj metil dietanolamin (engl. <i>methyl diethanolamine</i>)
MEA	- organski kemijski spoj monoetanolamin (engl. <i>monoethanolamine</i>)
ORC	- organski Rankine-ov cklus (engl. <i>Organic Rankine Cycle</i>)
PPZ	- podinska propusna zona
PR	- Peng-Robinson jednadžba stanja
RPZ	- rasjedna propusna zona
SAFT	-teorija statistički povezanih tekućina (engl. <i>The Statistical Association Fluid Theory</i>)
SCAL	- specijalna analiza jezgre (engl. <i>Special Core Analysis</i>)
SM1	- statički model 1
SM2	- statički model 2
SRK	- Soave-Redlich-Kwong jednadžba stanja
VC1	- bušotina Velika Ciglena 1
VC1a	- bušotina Velika Ciglena 1a
VLP	- indikatorska krivulja o performansu bušotine (engl. <i>vertical lift performance</i>)

1. Uvod

Posljednjih godina, u svijetu je aktualna tema hvatanja i skladištenja CO₂ u geološke formacije. Ovaj koncept ima brojne prednosti u izoliranoj primjeni, poput smanjenja emisija CO₂, direktno hvatanjem plina iz procesnih postrojenja ili ponovnim utiskivanjem proizvedenog CO₂ iz pojedinih naftnih proizvodnih polja sa visokim udjelom CO₂ i sl. Izdvajanje CO₂ iz zraka tj. ispušnih plinova odvija se procesima adsorpcije, absorpcije ili pomoću membrane. Metoda absorpcije (engl. *carbon scrubbing*) trenutno je dominantna tehnika hvatanja CO₂ (Xu i dr., 2009.) . Za absorpciju se koristi organske spojeve amina (npr. monoethalonamine-MEA, DEA, MDEA), čije otopine vežu CO₂ na niskim temperaturama.

Membrane i procesi adsorpcije se još istražuju za takvu primjenu. Hvatanje CO₂ prema McDonald i dr. (2015), iznosi oko 2/3 čitavog troška hvatanja i skladištenja (engl. *Carbon Capture and Storage, CCS*), te se smatra skupom tehnologijom. Međutim, odnos cijena hvatanja, transporta i konačnog skladištenja ovisi i o primjenjivim tehnologijama transporta i skladištenja.

Za CO₂ se razmatra utiskivanje u podzemne strukture poput akvifera, ležišta metana (uz popratno izdvajanje metana zbog više puta manjeg koeficijenta sorpcije od CO₂, engl. *Enhanced Coalbed Methane, ECBM*), iscrpljena ležišta, kao dio procesa dodatnog pridobivanja nafte tercijskim metodama (engl. *Enhanced Oil Recovery, EOR*). itd. Takve strukture zahtijevaju određena svojstva kako bi se utisnuti plin uspješno zarobio, ali o svojstvima stijena ovisi i tehnička izvedivost utiskivanja, pri čemu se u znanstvenim publikacijama često zanemaruju količine CO₂ koje uopće mogu biti utisnute u jednu bušotinu u nekom vremenskom razdoblju.

Zbog utiskivanja velike količine CO₂ u ležište dolazi do naglog povećanja tlaka u pribušotinskoj zoni (Vulin i dr. 2017, Tran i dr. 2010, Pekot i dr. 2011) te je neophodno, uz procjene kapaciteta skladištenja, procijeniti injektivnost, tj. kapacitet utiskivanja. Idejno, u ovom radu je razmatrana istovremena proizvodnja vode u smislu oslobađanja dijela volumena pora, kako tlak ne bi dosegao tlak frakturiranja stijene, te kako bi bilo moguće isplativo utiskivanje CO₂ u podzemlje. Pri tome, proizvedeni fluidi, zbog dubine formacije i geotermalnog gradijenta, preuzimaju određenu količinu topline koju je moguće iskoristiti za proizvodnju energije.

Višestruki učinak od utiskivanja fluida, očituje se na smanjenju emisije CO₂ njegovim skladištenjem, ali i iskorištavanjem geotermalne energije očituje se kao negativan otisak ugljika (engl. *negative carbon footprint*).

U Republici Hrvatskoj, postoji potencijal proizvodnje geotermalne energije, međutim potrebno je optimizirati odnos ležišnih uvjeta (dubina, geomehanička i petrofizikalna svojstva stijena, vrste prisutnih fluida) i tehničkih uvjeta (površinski sustav za obradu fluida i proizvodnju električne energije te iskorištavanje niskotemperaturne energije u balneološke i rekreacijske svrhe) te ekonomskih limita.

Uvjeti utiskivanja pothlađenog fluida posebno utječu na procjenu rizika kapitalnih ulaganja, pri čemu je centralni problem pothlađivanje podzemne formacije i moguće smanjenje proizvodnje toplinske energije. Drugi problem, u slučaju ograničenih geotermalnih vodonosnika predstavlja pad ležišne energije, tj. tlaka, pri čemu se protoci vode na površini mogu smanjiti ispod granice isplativosti.

Također, u naftnim, plinskim, ali i geotermalnim (Šiljković, 1995.) ležištima u RH, često se može naći velik udio ugljičnog dioksida, što predstavlja dodatnu prepreku i trošak u procesu na površini.

Pruess (2006) je radio analizu korištenja geotermalne energije iz raspucanih kristalinskih stijena s CO₂ kao radnim utisnim fluidom i ustanovio kako je proizvodnja toplinske energije oko 50% veća nego kod utiskivanja vode kao radnog fluida. Randolph i Saar (2011) su također ustanovili višestruku korist u vidu istovremenog skladištenja CO₂ zaostalog u vodonosniku i proizvodnje geotermalne energije.

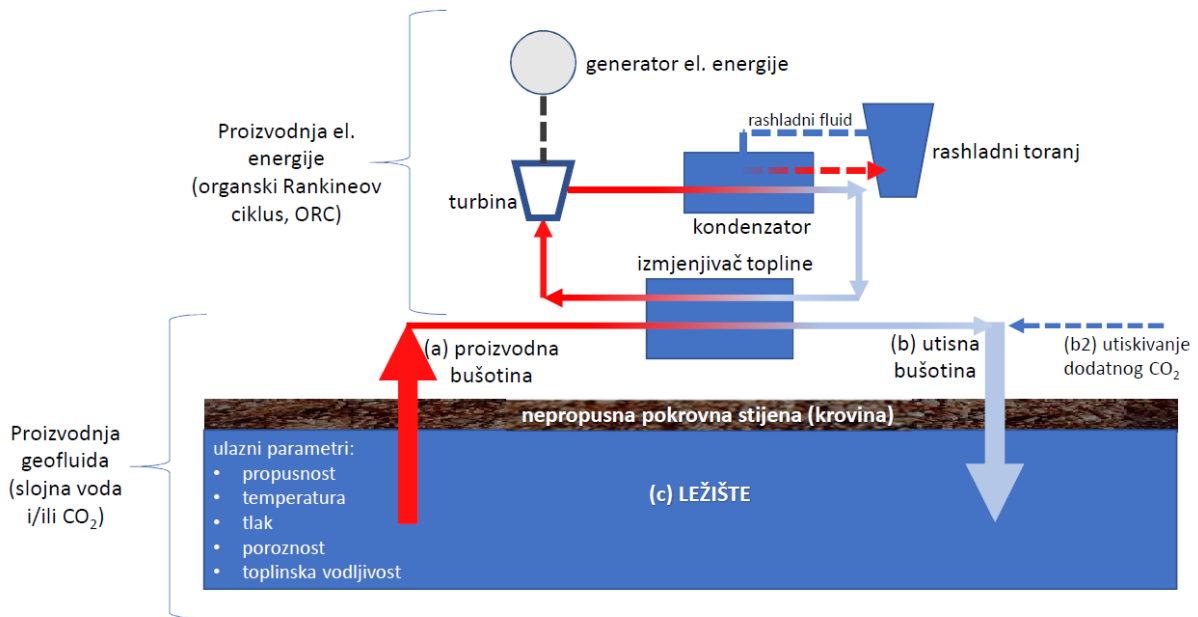
2. Hipoteza i ciljevi rada

Simulacijska analiza se fokusira na:

1. utjecaj veličine ležišta, uvjeta u ležištu i uvjeta utiskivanja (hladnog) fluida na pad tlaka i temperature fluida na proizvodnoj bušotini u periodu proizvodnje geotermalne energije tj. vode.
2. analizu ukupne efikasnosti utiskivanja CO₂ kako bi služio kao geotermalni fluid (geofluid). Ukoliko se koristi CO₂ kao radni fluid, zbog povoljnog odnosa gravitacijskih sila, viskoznosti i toplinske vodljivosti CO₂, moguće je trajno uskladištiti dio CO₂, održati visok tlak u vodonosniku i proizvoditi zagrijani CO₂ na proizvodnoj bušotini, gdje bi se koristio za proizvodnju električne (i toplinske) energije.

Pri tome hipoteza glasi: moguće je pronaći optimalan uvjet utiskivanja CO₂ pri kojem će istovremeno skladištenje CO₂ i proizvodnja fluida dati najpovoljniji odnos proizvedene geotermalne energije i energije potrebne za skladištenje CO₂. U svrhu dokazivanja hipoteze postavljeno je dva glavna slučaja u cjelokupnoj analizi (Slika 2.1):

1. bazni slučaj proizvodnje geotermalne vode iz tipskog geotermalnog ležišta s parametrima vezanim uz perspektivna područja za proizvodnju geotermalne energije u Republici Hrvatskoj (nema utiskivanja CO₂).
2. slučaj utiskivanja CO₂ i proizvodnje geofluida (CO₂, geotermalna voda):
 - a. za slučaj uvjeta u ležištu u kojima dolazi do primarno proizvodnje geotermalne vode, detektirat će se da li postoje optimalna svojstva ležišta pri kojim bi bila ostvariva planirana proizvodnja vode
 - b. za slučaj uvjeta pri kojim dolazi do značajnog pridobivanja CO₂ na proizvodnoj bušotini prati se istovremena korist od uskladištene količine CO₂ i proizvodnje geotermalne energije iz proizvedenog CO₂.



Slika 2.1. Shema cjelokupnog binarnog sustava proizvodnje i utiskivanja geofluida (slojna voda, CO₂), utiskivanja dodatnog CO₂ te sustava za proizvodnju električne energije korištenjem sekundarnog radnog fluida u organskom Rankineovom ciklusu.

Unutar svakog od navedenih slučajeva variralo se parametre ležišta, tj. dimenzije i dubine modela (koji određuju temperaturu i tlak). Razmotreni su utjecaji okolnih nepropusnih stijena te propusnost, toplinska vodljivost i drugi parametri koji bi mogli utjecati na uvjete tj. dinamiku proizvodnje i utiskivanja fluida. Varijacije parametara biti su povezive s publiciranim podacima za geotermalno ležište Velika Ciglena, te se modeli u ovom radu mogu smatrati prvim dinamičkim numerički modelima geotermalnog ležišta u Republici Hrvatskoj.

3. Metode i teorijske postavke.

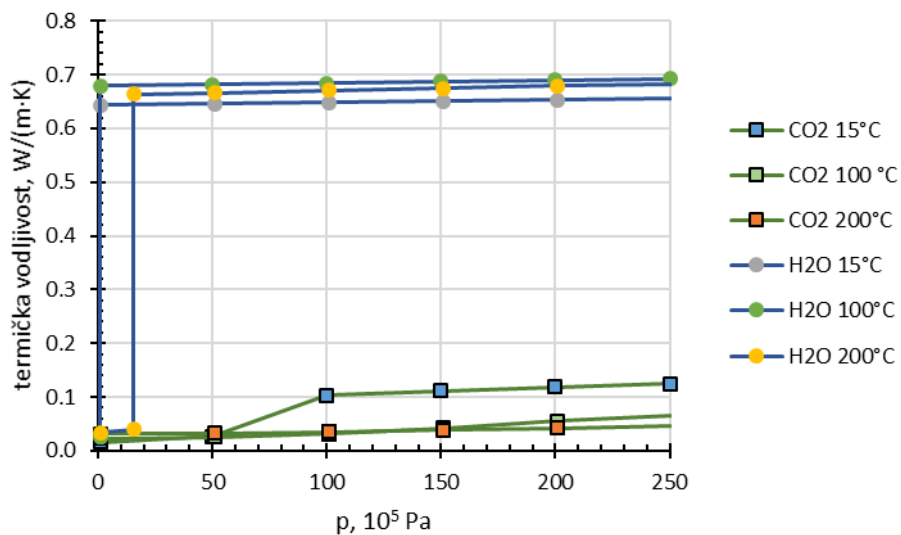
3.1. Protočna i termička svojstva vode i ugljičnog dioksida.

Parametri koji određuju protočna svojstva čistih tvari i smjesa (viskoznost, gustoća, međupovršinska napetost) mogu se precizno definirati korištenjem kubične jednadžbe stanja (JS, engl. Equation of State, EOS), poput Peng-Robinsonove (PR, 1976), Soave-Redlich-Kwongove (SRK, Soave, 1972) i jednadžbi stanja fluida pomoću teorije statistički povezanih tekućina (engl. The Statistical Associating Fluid Theory, SAFT, Chapman et al., 1989; Gross i Sadowski, 2001). Nakon podešavanja parametara JS, prema podacima iz preciznih laboratorijskih analiza, moguće je vrlo precizno računati termodinamička svojstva fluida u svim uvjetima sastava, tlakova i temperatura (PTx) u ležištu. Zbog njihove široke primjenjivosti, takve jednadžbe su implementirane u komercijalnim numeričkim simulatorima protoka u ležištima nafte i plina, geotermalnim ležištima ili pak u procesnim simulacijskim softverima kojim se može simulirati i optimirati termodinamičke cikluse.

Za viskoznost vode, precizne podatke se može pridobiti na temelju podataka objavljenim u Kestin et al. (1984), gdje se nalaze koeficijenti za jednadžbe u funkciji temperature i gustoće, temeljene na Helmholtzovoj slobodnoj energiji. Detaljan opis postupka izračuna parametara potrebnih za proračune protoka i prijenosa topline (među njima viskoznost, entalpija i termička vodljivost) te analize pogrešaka u različitim područjima temperatura i tlakova dali su Wagner i Pruß (2002).

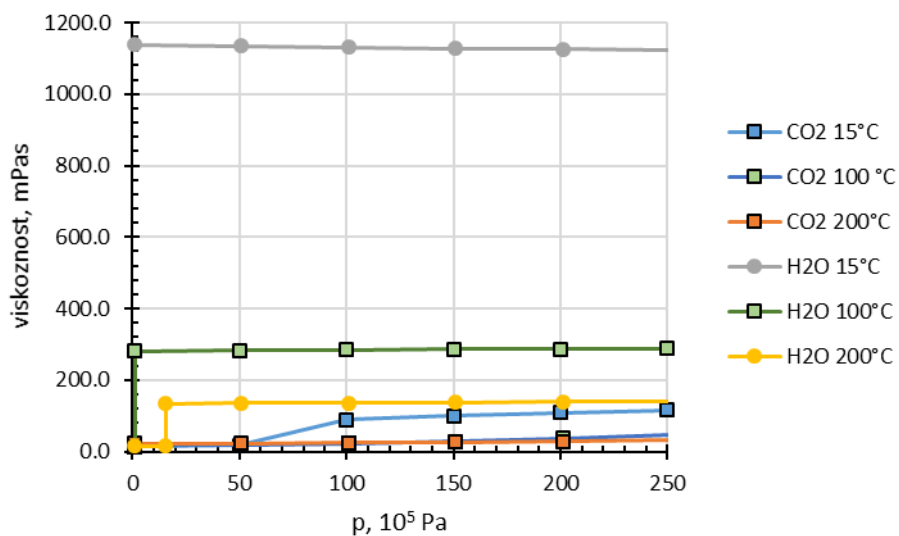
Span i Wagner (1996) dali su jednadžbu stanja kojom se može najpreciznije izračunati svojstva CO₂ (entalpija, gustoća, viskoznost). Za viskoznost CO₂, precizan opis dali su Fenghour et al. (1998).

Na temelju jednadžbi Spana i Wagnera (1996), Fenghour i dr. (1998) i Wagner i Pruß (2002) usporedno su prikazani podatci termičke vodljivosti za CO₂ i H₂O pri različitim temperaturama i tlakovima (Slika 3.1).



Slika 3.1. Termičke vodljivosti za CO₂ i H₂O u rasponu temperatura od 15 do 200°C i tlakova od 1·10⁵ Pa (1 bar) do 250·10⁵ Pa.

Na temelju jednadžbi od Fenghour et al. (1998) i IAPWS (1997), izračunate su viskoznosti CO₂ i H₂O pri različitim temperaturama i tlakovima (Slika 3.2).



Slika 3.2. Viskoznosti za CO₂ i H₂O u rasponu temperatura od 15 do 200°C i tlakova od 1·10⁵ Pa (1 bar) do 250·10⁵ Pa.

3.2. Petrofizikalna svojstva stijena i numerička simulacija protoka u stijeni

Numerička simulacija ležišta može se izvoditi na temelju karakterizacije i određivanja petrofizikalnih svojstava ležišta. Svrha simulatora u ležišnom inženjeringu je simulirati protok kroz poroznu sredinu i rješavati sustave jednačbi za protok topline i mase kroz poroznu sredinu. Simulacijski rezultati se prilagođavaju inicijalnim (početni tlak i temperatura, zasićenje), poznatim proizvodnim (engl. *history matching*) i mogućim (ali često slabije definiranim) rubnim uvjetima (npr. komunikacija s vodonosnikom ili fluidima iz drugih struktura). Model se sastoji od diskretiziranog heterogenog i anizotropnog prostora, s ćelijama (engl. *grid-blocks* ili *cells*) poznatih dimenzija tj. granica, unutar kojih su svojstva (propusnosti, poroznosti, sastav fluida, tlakovi i temperature) homogena i izotropna. U slučaju ležišne simulacije, najčešće se promjene u takvom prostoru matematički formuliraju metodom konačnih volumena (engl. *finite volumes*). Simulacijski rezultati izračunati su diskretizirano u vremenu po koracima (engl. *timestep*). Skup ćelija konačnih volumena formira mrežu konekcija. Za svaki element modela postavljena je jednačba materijalnog balansa tj. protok između dvije ćelije se računa uz pomoć Darcyjevog zakona. Osim što se ćelijama može dodijeliti svojstvo, može ga se dodijeliti i konekcijama između ćelija. Jedno od njih je sposobnost prenošenja fluida (engl. *transmissibility*). Najbitniji podaci koji ulaze u cjelokupni model su oni o karakteristikama ležišta (topologija, granice ležišta, propusnost, poroznost, dubina, debljina sloja itd.), o svojstvima ležišnih fluida (volumni faktori, faktor otopljenog plina, stlačivost, gustoće, viskoznosti) i o bušotinama (lokacije, perforirani intervali, tlak na dnu bušotine). Ležišni model ovisi i o globalnim svojstvima koja se primjenjuju na cijelo ležište i konstantna su. Takva svojstva se odnose na kritične parametre (najčešće iz specijalnih analiza stijena, engl. *Special Core Analysis*, SCAL) poput tablica relativnih propusnosti, kapilarnih tlakova i sl. U procesu usklađivanja s poznatim proizvodnim podacima (engl. *history matching*), ta svojstva su često i jedini parametri koji se mijenjaju do najboljeg poklapanja. Jedan razlog tome je što težinski ovaj parametar zaista ima najveći utjecaj (ali i nesigurnost), a drugi što simulacijski model sadrži velik broj parametara te se ciljano odlučuje mijenjati najutjecajniji parametar umjesto više-manje utjecajnih parametara. Na kraju simulacija ne završava 100 % pouzdanom predikcijom, nego temeljitom analizom slučaja s više predloženih scenarija za budući tijek proizvodnje.

Glavni zadaci simulacije dinamike ležišta su:

1. predviđanje performansi ležišta tj. optimiziranje performansi ležišta na temelju rasporeda i broja bušotina, proizvodnih količina ili količine injektiranog fluida.

2. poboljšanje opisa ležišta poklapanjem s postojećim podacima s polja (engl. *history match*) što uključuje definiranje i identificiranje barijera i protočnih cjelina ili ulaza kontinuiranog tlaka tj. prisutnost vodonosnika.
3. razvoj jednostavnih modela i korelacija

Simulacijski model zahtijeva mnogo podataka koji su sakupljeni iz raznih izvora te su prikupljeni u jedan model. Različiti podatci su više ili manje pouzdani zbog prirode mjerenja. Npr., mjerenje relativne propusnosti obavlja se u laboratoriju na jezgri i predstavlja opis malog volumena (najčešće valjčić promjera 3.8 cm i duljine 5 do 10 cm), a bitno može promijeniti protočne brzine u svim dijelovima modela, svojstva poput poroznosti se temelje na laboratorijskim podacima, ali i na neizravnim tj. karotažnim mjerenjima u bušotini koja zahvaćaju veći volumen stijene nego što se to može postići mjerenjem u laboratoriju. Detaljni modeli koji pokazuju trodimenzionalni položaj struktura temelje se na seizmičkim mjerenjima, koja imaju još manju rezoluciju, međutim zahvaćaju najčešće cijeli volumen ležišta.

Simulacijski softveri u ležišnom inženjeringu mogu biti:

1. simulatori čiji se algoritmi temelje na proračunima materijalnog balansa (engl. *black oil* modeli) - u kojima se svojstva fluida definira zasebno za svaku fazu tablično (između jedne i tri faze). Takav model radi proračun tri materijalna balansa (za naftu, vodu i plin), te traži podatke o svojstvima plina i nafte u tablicama prilikom proračuna. To ga čini stabilnim i brzim, ali i pojednostavljenim te nepreciznim u slučaju kompleksnih promjena faza (npr. u slučaju otapanja utisnutih fluida u nafti ili u slučaju retrogradno kondenzatnih sustava).
2. komponentni simulatori (engl. *compositional*) – definirani s n brojem komponenti u sastavu fluida, i jednadžbom stanja. Takvi modeli ispisuju jednadžbu materijalnog balansa za svaku komponentu u sustavu i koriste jednadžbe stanja (engl. *equation of state* - EOS). Za fluide koji se opisuju u ležišnom inženjerstvu, najčešće se koriste Peng-Robinson (1976) ili Soave-Redlich-Kwongova (1972) jednadžbe stanja (JS). Pomoću JS radi se proračun fazne ravnoteže, a iz toga udio pojedine faze (plinovita, tekuća, eventualno stvaranje hidrata) gustoća i viskoznosti te međupovršinske napetosti. Kako se primjenom komponentnog modela za svaki korak iteracije materijalnog balansa, u svakoj ćeliji radi posebno iterativni proračun jednadžbom stanja, komponentni modeli su višestruko sporiji, teže konvergiraju u rješenje, što je osobito izraženo u uvjetima blizu kritične točke multikomponentnog sastava fluida. Glavna prednost im je ta što je kod retrogradno kondenzatnih ležišta teško izraditi reprezentativan model tabličnim definiranjem svojstava fluida (*black oil* modelom), te

je također jedino komponentnim modelom moguće definirati promjene sastava fluida, npr. kod utiskivanja plinova u ležišta nafte.

3. termalni (engl. *thermal*) – za simulaciju injektiranja pare, vruće vode ili za in-situ sagorijevanje. Ovim modelom se uključuje termalna svojstva stijena i fluida čime je moguće opisati konduktivni i konvektivni prijenos energije.
4. reaktivni model (engl. *reactive*) – uključuje kemijske reakcije soli, stijena i fluida u modelu. Ovi modeli se najčešće koriste za dugoročne procjene, npr. za skladištenje CO₂ u ležištu i njegovo otapanje u vodi i sa stijenama, kroz dugi period (npr. više stotina godina).

Na temelju podataka o ležištu i fluidima te na temelju same primjene modela, potrebno je odabrati adekvatan pristup odabiru tipa šupljikavosti (primarno poroznog i propusnog ili pukotinskog, engl. *single i dual porosity*), procesa koji se odvija (primarna, sekundarna ili tercijarna proizvodnja) itd.

Metode rješavanja:

1. Potpuno implicitna metoda (engl. *fully implicit method - FIM*) – sve vrijednosti (tlak p , zasićenje vodom S_w , zasićenje plinom S_g) su rješavane simultano. FIM metoda je dostupna za *black oil* modele u ECLIPSE 100 i ECLIPSE 300 simulatorima. Za komponentne sustave gdje ima mnogo komponenti, nije preporučljivo koristiti FIM metodu. Korištene su Newtonove metode za rješavanje nelinearnih jednadžbi te najčešće zahtijevaju nekoliko iteracija kako bi se rezidualne vrijednosti smanjile na minimum. U ECLIPSE 100 simulatoru su greška materijalnog balansa i maksimalno zasićenje definirani kao dva pokazatelja da su rezidualne vrijednosti unutar prihvatljivih granica.
2. Metoda implicitnog tlaka i eksplicitnog zasićenja (engl. *Implicit pressure explicit saturation - IMPES*) – rješava tlak uz pomoć zasićenja iz prošlog koraka, te zatim vrši proračun novog zasićenja na temelju dobivenog tlaka. To znači višestruko manje vremena i memorije za kalkulaciju rezultata, ali i (Paceman, 2000.) postoji problem zaostajanja zasićenja te se to često nadoknađuje sa smanjivanjem vremenskog koraka (engl. *timestep*).
3. Adaptivna implicitna metoda (engl. *Adaptive implicit method AIM*, Thomas i Thurnau 1983.) – kod ovakve metode, proračun je kombinacija FIM i IMPES metoda. Kod ćelija sa velikim promjenama u tlaku ili zasićenju koristi se FIM kako ne bi dolazilo do zaostajanja zasićenja, dok ostale računa pomoću IMPES metode. Taj problem "zaostajanja" je istaknut prema Paceman-u, (2000). najčešće u

slučajevima konusiranja oko bušotine i kod izdvajanja plina i njegove tendencije protjecanja prema gore, te se on može izbjeći AIM metodom.

Numeričke pogreške:

Numeričkim proračunom dolazi do kompromisa između sveobuhvatnosti simulacijskih rezultata i njihove preciznosti. Tako svaki simulator ima definirane granice točnosti do koje se izvodi numerički postupak.

1. numeričke pogreške mogu se uočiti zbog konačnog broja znamenki, zaokružene vrijednosti mogu dati greške i rezultirati greškama u jednadžbama materijalnog balansa. Preciznost je određena u programskom kodu sa jednostrukom ili dvostrukom preciznošću.
2. nejedinstvenost rješenja zbog interpolacije, ekstrapolacije, statistike, srednjih vrijednosti.
3. efekt orijentacije mreže ćelija (engl. *the grid orientation effect - GOE*) znatno utječe na proračun protoka. Rješenja metode konačnih razlika (engl. *finite difference method*), koja se koristi u numeričkim simulacijama, mogu biti pod utjecajem orijentacije mreže ćelija kada je omjer mobilnosti (engl. *mobility ratio*) fluida koji istiskuje naspram fluida koji biva istisnut veći od jedan (engl. *adverse mobility ratio displacement*). Za dokazivanje toga Brand i dr. (1991) prikazuju simulaciju simetričnog modela (s geometrijom paralelopipeda), od 5 bušotina (engl. *five spot problem*) korištenjem dvije orijentacije mreže s linijama koje spajaju utisnu i proizvodnu bušotinu na dva načina. Te linije su bile paralelne ili dijagonalne prema mreži te je protok simuliran kroz različite slučajeve znatno odskakao rezultirajući pogreškama u vremenu prodora fluida. Taj efekt se zove GOE. (Brand i dr. 1991.).
4. problemi u proračunu srednjih vrijednosti

Najpoznatiji komercijalni simulatori ECLIPSE i novija verzija INTERSECT tvrtke Schlumberger, NEXUS od Halliburtona, te od manjih CMG, Tough2 i mnogi drugi. Nekomercijalni su oni razvijani unutar kompanija za internu upotrebu unutar kompanija (takve simulatore imaju i velike kompanije poput ExxonMobil, Saudi Aramco, Shell, ChevronTexaco i dr.) ili za akademske svrhe (najčešće limitiranih mogućnosti, fokusiranih na jedan parametar u numeričkoj analizi protoka u stijeni).

U literaturi poput Brown (2000), Fouillac i dr. (2004), Pruess (2006), Atrens i dr. (2009), Plaksina (2011) i Ganjdanesh i dr. (2014), predložen je sustav koji koristi CO₂ kao radni fluid u korištenju geotermalne energije (engl. *engineered geothermal systems* ili *enhanced*

geothermal systems - EGS) što podrazumijeva frakturiranje stijena male propusnosti. Randolph i Saar, (2011) su radili analizu povoljna svojstva EGS ležišta koristeći TOUGH2 simulator te predlažu primjenu ove tehnologije u ležištima koja imaju velike propusnosti i poroznosti te dobru izolatorsku pokrovnost stijenu te takav sustav nazivaju geotermalnim sustavom s dijelom zasićenim s CO₂, tj. tzv. oblakom CO₂ (engl. *CO₂ plume geothermal system*, CPG). Dotični autori su naveli kako je potrebno izbjegavati frakturiranje stijena prilikom utiskivanja i općenito kako je povoljnije iskorištavati toplinsku energiju iz velikih, masivnih ležišta.

U svojoj disertaciji, Randolph (2011) tvrdi da će u CPG sustavima temperatura na proizvodnoj bušotini ostati bliža inicijalnoj temperaturi čitavog polja nego u EGS sustavima, što naravno, dozvoljava dulju uporabu izvora topline.

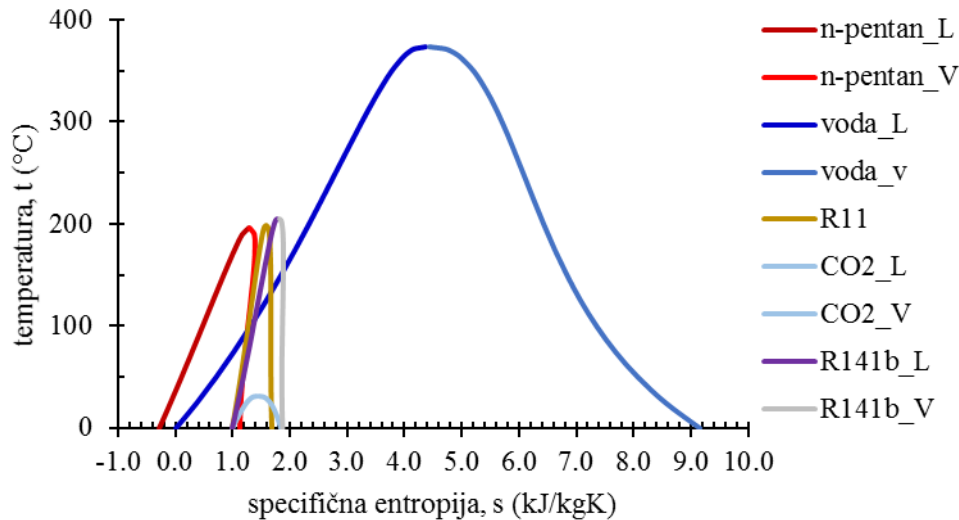
Kervévan i dr. (2014), proučavali su unutar projekta „CO₂-DISSOLVED“ opciju utiskivanja lokalno emitiranog CO₂ koji je primarno otopljen u vodi. Smatraju da bi time troškovi transporta CO₂ bili znatno smanjeni. Takav pristup bi smanjio problem utiskivanja superkritičnog CO₂ (problem stlačivanja CO₂, engl. *pressure buildup*), uz dodatnu prednost korištenja tople vode iz proizvodne bušotine kao izvor toplinske energije za to postrojenje.

Freifeld i dr. (2016), simulirali su korištenje CO₂ kao geotermalnog fluida na primjeru Cranfield polja u Missisippiju gdje je poznato da je CO₂ utiskivan od 2009.godine. Prema Ruan i dr. (2013), tri su faktora utjecala na povećanje temperature na dnu bušotine (u odnosu na temperaturu utiskivanja superkritičnog CO₂ u bušotinu), a to su kompresibilnost, gubitak potencijalne energije i prijenos topline sa okolnih stijena.

3.3. Karakteristike termodinamičkih ciklusa prikladnih za pretvorbu geotermalne energije u električnu

Sve veći broj istraživača i inženjera bavi se optimizacijom termodinamičkih ciklusa za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije pa tako i iz geotermalnih ležišta, prije svega visokoentalpijskih. Sagledavajući potencijal primjene tehnologija geotermalnih, solarnih i vjetrovnih sustava proizvodnje električne energije – geotermalni sustavi se mogu izdvojiti po velikom kapitalnom ulaganju zbog cijene bušenja i opremanja bušotine te cijene postavljanja površinskog sustava. S druge strane, geotermalni izvor energije je stalan, tj. ne varira ovisno o vremenskim uvjetima.

Među tehnologijama iskorištavanja obnovljivih izvora energije najčešće se razmatra binarni Rankineov ciklus (zbog primjenjivosti u rasponu nižih temperatura, od 70°C do 200°C), a radni fluidi koji se pokazuju kao optimalni su organski (izobutan, n-pentan, amonijak, itd., Slika 3.3.).

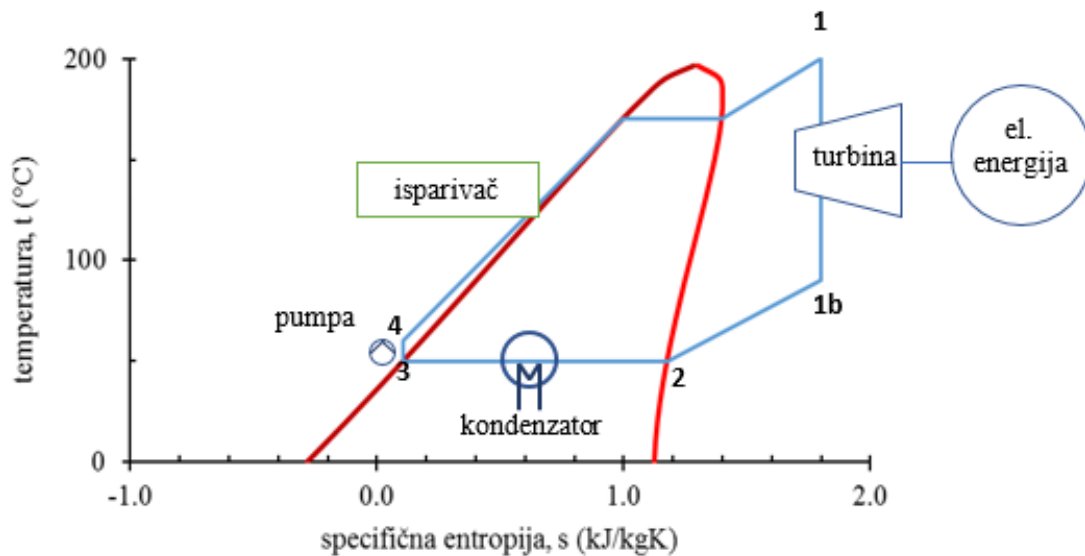


Slika 3.3. Dijagram temperature (T) i specifične entropije (s) na granici dvofaznog područja za nekoliko sekundarnih radnih fluida.

U organskom Rankineovom ciklusu (ORC, Slika 3.4), korištenjem povoljnih termodinamičkih svojstava radnog fluida u isparivaču se absorbira termalna energija fluida iz geotermalne bušotine (Slika 3.4, između radne točke 4 i 1), i pri odgovarajućem tlaku sekundarni, tj. radni fluid u plinovitom stanju izobarno dolazi do turbine koja pretvara toplinsku energiju u mehaničku (rotacijsku) energiju te pomoću generatora u električnu energiju (Slika 3.4, između 1 i 1b), pri čemu se izentropno smanjuju tlak i temperatura sekundarnog (radnog) fluida. Kod takvog smanjenja tlaka, bitno je pronaći radni fluid koji će svojim svojstvima omogućiti rad turbine u plinskom području, tj. treba izbjeći ulaz u dvofazno područje jer tada dolazi do erozije lopatica u turbini. Klasični Rankineov ciklus predviđa vodu kao radni fluid, a kod organskog ciklusa, zbog oblika krivulje rosišta (dijela krivulje zasićenja koja dijeli plinsko i dvofazno područje) adekvatnog fluida, ostvariva je veća iskoristivost Rankineovog pri nižim temperaturama radnog fluida. Fluid se dalje mora pothladiti u rashladnoj jedinici (tornju), a u kondenzatoru (Slika 3.4, između 2 i 3) dolazi do postepenog prijelaza iz potpuno plinskog područja, pri čemu izotermno i izobarno dolazi do smanjenja specifične entropije (s , kJ/kgK). Shematski se proces stlačivanja fluida najčešće prikazuje naglašeno, tj. u stvarnosti izentropsko povećanje tlaka pumpom zanemarivo mijenja temperaturu (Slika 3.4, između točaka 3 i 4).

Geotermalna voda (ili drugi fluid koji preuzima geotermalnu toplinsku energiju) se zbog povoljnog tlaka u ležištu (vodonosniku) te najčešće zbog manje gustoće (od one pri atmosferskom tlaku i temperaturi) eruptivno pridobiva na proizvodnoj bušotini, dok je za isti maseni protok potrebna stanovita snaga pumpe za utiskivanje ohlađene vode natrag u ležište

(u slučajevima ekstremno niskog protoka i izvrsne injektivnosti utisne bušotine, tj. visoke propusnosti u tom dijelu ležišta, moguće je i utiskivanje bez pumpe).



Slika 3.4. Shematski prikaz radnih točaka i elemenata za primjenu ORC ciklusa pri proizvodnji električne energije, primjenjivo za niskoentalpijska geotermalna ležišta.

3.4. Eksergija sustava

U stvarnosti, cjelokupni termodinamički procesi su neravnotežni. U slučaju razmatranja iskorištavanja geotermalne energije, sustav se sastoji od:

- izmjene topline i energije u vidu tlaka potrebnog za protjecanje u ležištu u koje se utiskuje pothlađeni i proizvodi zagrijani fluid,
- potrebne energije ležišta i/ili pumpe za utiskivanje fluida i pridobivanje fluida iz proizvodne bušotine
- potrebnih termodinamičkih uvjeta za prijenos i pretvorbu topline u električnu energiju ili za transport i korištenje u okolnim objektima (plastenici, rekreacijski centri, stambeni objekti)

Optimizacija ovakvog sustava je izuzetno složena, pošto je za opis svakog od navedenih elemenata potrebna multiparametarska, analiza. Sveobuhvatni algoritam za takvu analizu ne postoji, te se najčešće pribjegava pojednostavljenjima. Za bolju karakterizaciju takvih složenijih sustava uvodi se novi pojam – eksergija. Eksergija izražava udaljenost od termodinamičke ravnoteže, tj. što je eksergija veća, sustav je dalje od termodinamičke ravnoteže i veće su mogućnosti za pretvorbu energije u rad (el. energiju).

Tako se eksergiju (ψ , J) definira kao maksimalni upotrebljiv rad koji se može proizvesti dok se ne postigne ravnotežno stanje, koje je definirano unutarnjom energijom (U , J) volumenom (V , m³) i entropijom (s , J/(K·mol)):

$$\psi = U - U_0 + p_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) \quad (3.1)$$

Eksergija je dakle maksimalni teoretski rad koji se može postići u kombiniranom sustavu do uspostave ravnotežnog stanja (engl. *dead state*, U_0 , p_0 , V_0 , T_0 , S_0). Eksergija se računa za poznate uvjete tlaka, volumena i temperature (p , V , T , PVT uvjeti), a ravnotežno stanje može biti npr. temperatura okoline (atmosferski uvjeti).

Uništenje eksergije zbog ireverzibilnosti procesa čini bitnu razliku između eksergije i energije općenito. Često se u govoru koristi termin „potrošnja energije“, što je neispravno i što potvrđuje prvi zakon termodinamike. Eksergija se može smatrati i minimalnim teoretskim radom potrebnim da se sustav dovede iz ravnotežnog stanja u neko drugo neravnotežno stanje.

Tako se eksergija vezana uz toplinu (Q , J) može definirati s:

$$\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot Q \quad (3.2)$$

Eksergija vezana uz rad stroja (W , J) definirana je promjenom volumena:

$$W - p_0(\Delta V) \quad (3.3)$$

Pošto se najčešće parametri temperature i volumena mijenjaju, uvodi se pojam eksergetске snage, tj. brzine promjene eksergije, što je u daljem tekstu označeno kao $\dot{\psi}$ (W):

$$P_{ex} = \frac{d\psi}{dt} \quad (3.4)$$

Eksergetska analiza cjelokupnog geotermalnog sustava pokazala su se kao prikladniji način evaluacije od odvojenog energetskog optimiranja ORC ciklusa, proizvodne i utisne bušotine te dinamičkih procjena promjene temperature i tlaka, tj. protoka fluida i topline u ležištu (Atrens et. al, 2009, 2010, 2011; Zhang et al., 2013).

U cjelokupnom geotermalnom sustavu, može se izraziti *proizvedena* eksergija u nekom zadanom razdoblju ($\dot{\psi}$, MW):

$$\dot{\psi} = \dot{m} \left(h_{prod} - h_{inj} - T_0(s_{prod} - s_{inj}) \right) \quad (3.5)$$

Pri čemu je \dot{m} maseni protok (kg/s), h je specifična entalpija (kJ/kg), a s specifična entropija (kJ/kg·K). Indeks *prod* označava proizvodnu, a *inj* utisnu bušotinu. T_0 predstavlja prosječnu temperaturu ambijenta (atmosfera) i korištena je temperatura 20°C.

Kako u jednadžbu ulaze vrijednosti entalpija na površini, a rezultati simulacijskog modela predstavljaju ležišne protoke preračunate na površinske uvjete, bez pada temperature, potrebno je proračunati tlakove na ušću utisne i proizvodne bušotine, za što je izrađen numerički proračun (najčešće u koracima po 50 m) prema jednadžbi:

$$p_{prod} = p_{dno} - \rho g \Delta z - \Delta p_f \quad (3.6)$$

$\rho g \Delta z$ je pad tlaka (Pa) od tlaka na dnu bušotine (p_{dno} , Pa) na intervalu Δz (m) i ovisi o gustoći fluida na zadanom intervalu te Δp_f je pad tlaka radi trenja u bušotini (Pa):

$$\Delta p_f = 0.5 \cdot f \cdot \left(\frac{\Delta z}{d}\right) \cdot \rho \cdot v^2 \quad (3.7)$$

Pad tlaka radi trenja sadržava u sebi kinetičku energiju fluida, koja ovisi o brzini kretanja fluida (v , m/s) i gustoći fluida (ρ) te o faktoru trenja (f , engl. *friction factor*) za koji je korištena Haalandova korelacija (1983) iz razloga jer je nije potrebno rješavati iterativno:

$$f = \left(\frac{1}{-1.8 \cdot \log \left(\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{e}{(3.7 \cdot d)^{1.11}} \right) \right)} \right)^{-2} \quad (3.8)$$

gdje je Re Ryenoldsov broj, d , promjer cijevi (u modelu je korišten unutrašnji promjer bušotine $d=0.15$ m) i e – hrapavost cijevi (u modelu $e=0.0004$)

3.5. Dubine i dimenzije pojedinih blokova u hidrodinamičkom poroznom sustavu

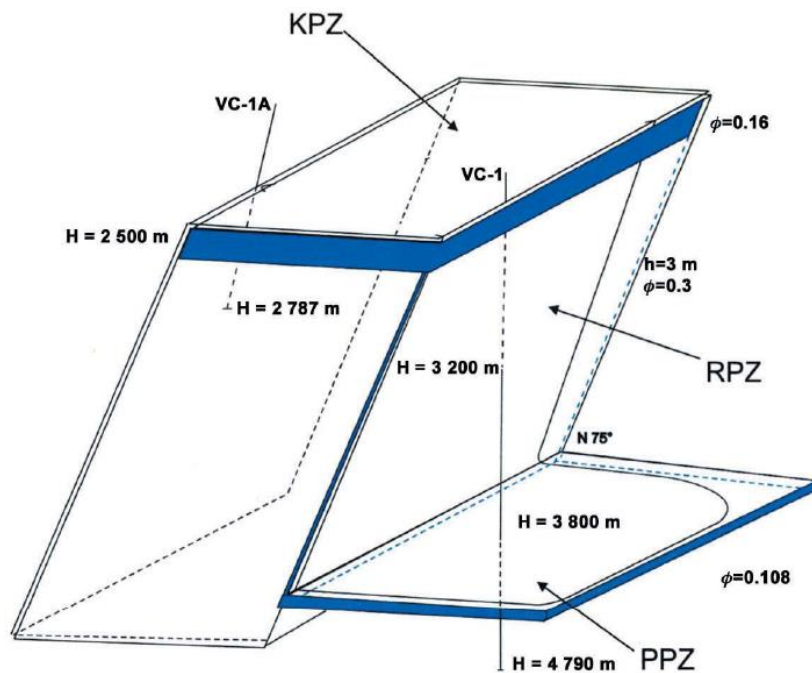
Za analizu iskorištavanja termalne energije ležišta uzet je primjer ležišta Velika Ciglena, kod kojeg je izgrađena prva geotermalna elektrana u Republici Hrvatskoj koja će biti puštena u pogon ove godine. Radi se o geotermalnom ležištu otkrivenom prilikom istražnog bušenja u svrhu otkrivanja ugljikovodika. Tako je eliminirana bitna komponenta u razvoju geotermalnih ležišta, pošto troškovi bušenja spadaju u najveće troškove, što je i razlog zašto geotermalna energija kao najstabilniji obnovljiv izvor energije (proizvodnja geotermalne vode ne ovisi o sezonskim ili dnevnim promjenama uvjeta) nije više zastupljena. Koliko je poznato, detaljna geološka karakterizacija spomenutog ležišta nije javno dostupna, a s obzirom na relevantne publikacije ustanovljeno je kako još postoje brojne nejasnoće u geološkoj strukturi ležišta kao temelju za procjenu hidrodinamički povezanih protočnih puteva u ležištu.

Možda dva najznačajnija rada iz kojih se može definirati konceptualni simulacijski model su od Guzović et al. (2010) te Čubrić (2012). Informaciju o strukturi geotermalnog polja Velika Ciglena može se pronaći u više javno dostupnih izvora (Slika 7.1, Guercio i Bonafin, 2016; Serpen i Aksoy, 2016; Čubrić, 2012). Također, više puta se prikazuje poprečni presjek (Slika 7.2- Čubrić, 2012; Slika 7.3 - Guzović et al., 2010). Oba presjeka predstavljaju različite interpretacije seizmičkih, karotažnih i hidrodinamičkih mjerenja. Konačno, razmatranja na temelju svih dostupnih podataka svode se na teoretsku pretpostavku takozvanog „Z-modela“ (Slika 3.5).

Tako su izrađena dva temeljna statička modela: statički model 1 (SM1, prema Čubrić, 2012) i statički model 2 (SM2, prema Guzović et al., 2010)

Dok je u radu od Čubrić (2012) navedeno kako se pretpostavlja da se većina protoka odvija u krovinskoj propusnoj zoni debeloj 61 m od ukupne efektivne debljine 174 m, Guzović i dr. (2010, Slika 3.6) navode kako debljina iste zone iznosi 80 m. U gore navedenim publikacijama nalazi se niz različitih podataka koji utječu na dimenzije protočne zone, tj. ležišta, dubine te na kraju i konačne količine geotermalne vode u ovim zatvorenim strukturama.

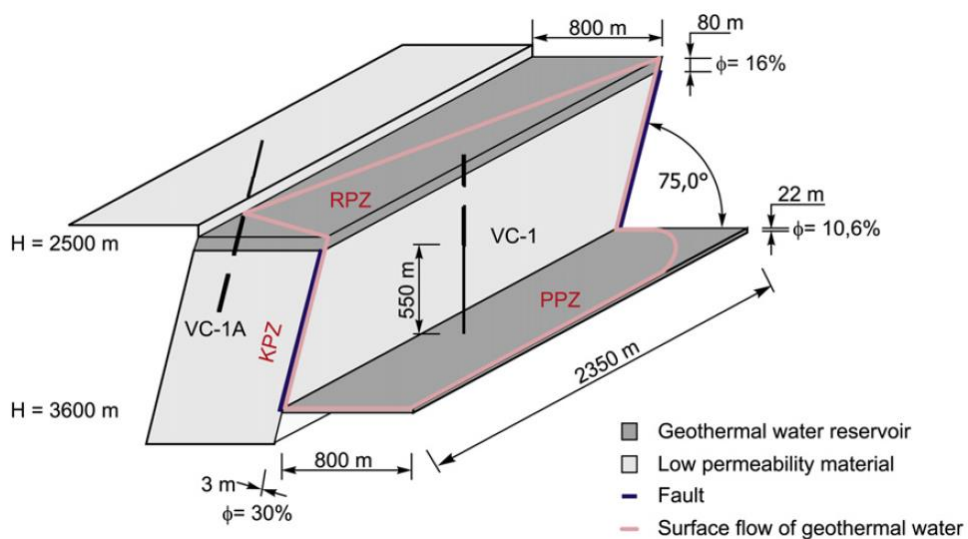
Izdvajanje razlika u interpretaciji po „Z-modelu“ rezultirala je detekcijom parametara potrebnih za simulacijsku analizu slučaja u ovom radu (Tablica 3.1).



Slika 3.5. Protočni Z-model u geotermalnom ležištu Velika Ciglena (Čubrić, 2012)

Može se uočiti i različitost u označavanju zona, pri čemu su usvojeni nazivi:

- Krovinska propusna zona (KPZ)
- Rasjedna propusna zona (RPZ)
- Podinska propusna zona (PPZ)



Slika 3.6. Protočni Z-model u geotermalnom ležištu Velika Ciglena (Guzović i dr. 2010)

Tablica 3.1 Izvor podataka

podatak	Guzović i dr. (2010)	Čubrić (2012)
	SM2	SM1
<i>KPZ</i>		
<i>duljina (m)</i>	2350	1350
<i>širina (m)</i>	800	820
<i>debljina (m)</i>	80	61 (174)
<i>poroznost (dij. jed.)</i>	0.16	0.16
<i>propusnost (m²·10⁻¹⁵)</i>	-	
<i>RPZ</i>		
<i>duljina (m)</i>	2350	1350
<i>širina (m)</i>	3	3
<i>vertikalna duljina (m)</i>	1100	1300
<i>poroznost (dij. jed.)</i>	0.3	0.3
<i>propusnost (m²·10⁻¹⁵)</i>	-	-
<i>PPZ</i>		
<i>duljina (m)</i>	2350	1350
<i>širina (m)</i>	800	600
<i>debljina (m)</i>	22	30
<i>poroznost (dij. jed.)</i>	0.106	0.106
<i>propusnost (m²·10⁻¹⁵)</i>	-	

Guzović i dr. (2010) navode kako se najplića propusna zona nalazi na 2585 m, dok Čubrić (2012) navodi za istu zonu da se nalazi na dubinama od 2585 do 2940 m. Imajući u vidu kako je Čubrić izravno sudjelovao u karakterizaciji ovih struktura, njegove podatke se može smatrati preciznijim, međutim, neke informacije se ipak mogu bolje iščitati iz drugih publikacija.

4. Rezultati i rasprava simulacijskih slučajeva

4.1. Proizvodnja geotermalne vode i reinjektiranje proizvedene vode

Navedeni podaci korišteni su u kreiranju dinamičkog modela u Schlumberger ECLIPSE Black-Oil simulatoru. Model je razdijeljen u 8820 ćelija, 21 u X smjeru, 21 u Y smjeru i 20 u Z smjeru. Dimenzije, u svakom od navedenih smjerova, navedene su vektorski, radi kreiranja ćelija manjih dimenzija u blizini bušotina i između njih kako bi se bolje uočila priroda protjecanja kroz stijenu. Od navedenih podataka u tablici 3.1 izrađena su 2 bazna scenarija, jedan prema Čubrić (2012) – statički model 1 (SM1), a drugi prema Guzović i dr. (2010) – statički model 2 (SM2). Ukupne dimenzije ležišta u SM1 iznose 1423 m u X smjeru, 1350 m u Y smjeru i 1504 m u Z smjeru, dok su u SM2 dimenzije u X smjeru 1603 m, 2350 m u Y smjeru i 1202 m u Z smjeru. U oba slučaja, za bazni scenarij, propusnosti su zadane prema pojedinim cjelinama (KPZ, RPZ i PPZ). Tlak u ležištu određen je na oko 247 bara, a temperatura na 175 °C. Dubina krovine nalazi se na 2540 m u oba bazna scenarija. Model sadrži dvije bušotine, VC1 i VC1a od kojih je VC1 utisna bušotina, a VC1a proizvodna bušotina. Proizvodna bušotina proizvodi 20 000 m³/dan vode, a zadano je da utisna bušotina utiskuje jednako toliko, no na temperaturi od 70°C. Bušotina VC1 nalazi se u PPZ bloku, dok je VC1a u KPZ bloku, u oba slučaja. Propusnosti i poroznosti za bazni scenarij mogu se iščitati iz sljedeće tablice:

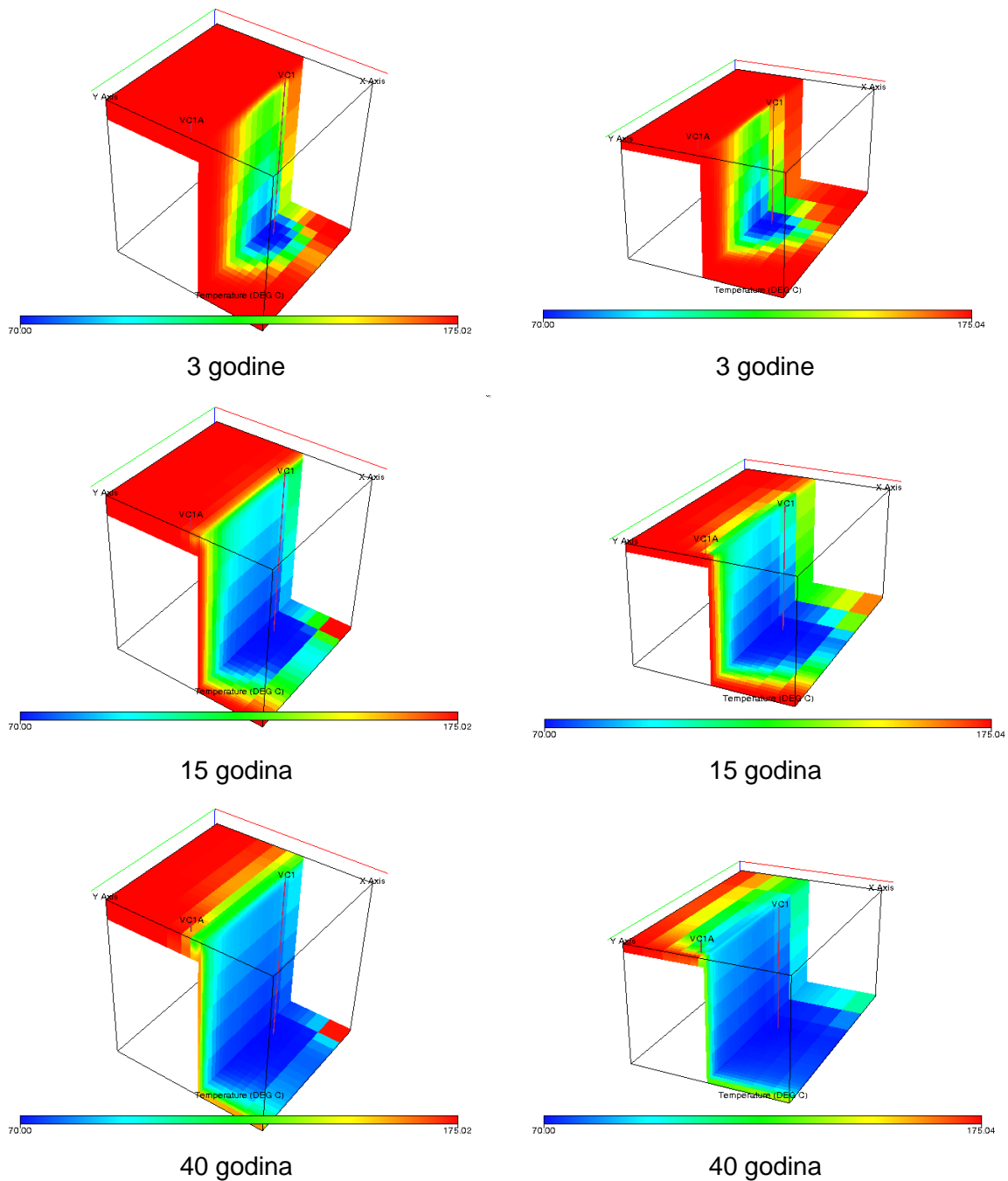
Tablica 4.1 Konstantne vrijednosti poroznosti i propusnosti u ležištu.

	horizontalna propusnost, k_H (mD)	vertikalna propusnost, k_V (mD)	poroznost, ϕ (%)
KPZ	620	310	16
PPZ	441	220	10.6
RPZ	1000	1200	30

Iz izlaznih rezultata simulatora može se vidjeti kako ovakva razdvojena struktura relativno malih protočnih volumena nema kapacitet za utiskivanje, niti proizvodnju zadane količinu vode (20 000 m³/dan) svih 50 godina simulacije već se vrijednost kreće oko 5700 m³/dan u SM1, dok je u SM2 srednja vrijednost oko 8025 m³/dan (tome odgovaraju i utisne vrijednosti).

Pad temperature kroz 50 godina iznosi od 175°C na oko 120°C kod simulacijskog slučaja SM1, dok se kod SM2 temperatura spušta čak do 112°C. Čini se da obzirom na razliku u količini utisnutog fluida od oko 2300 m³/dan, finalna razlika od 8 °C i nije tako velika.

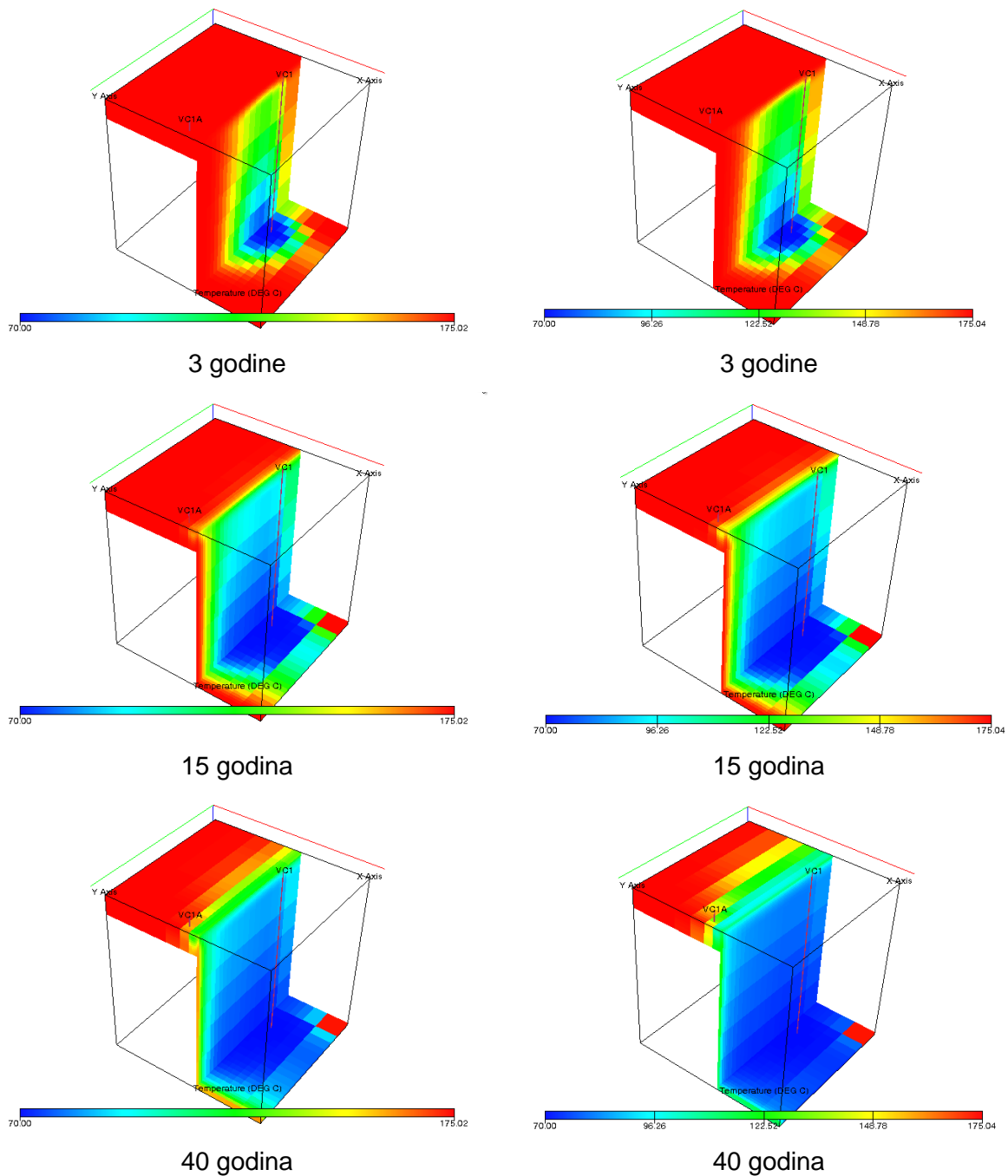
Pregled temperatura u trećoj, petnaestoj i četrdesetoj godini simulacije biti će izloženi na sljedećoj slici. (Slika 4.1)



Slika 4.1 Prikaz temperature u modelima (lijevo SM1, desno SM2)

4.2. Usporedba baznog scenarija i izmijenjenog scenarija s područjem veće propusnosti zbog hidrauličkog frakturiranja na SM1

Kad su eliminirani parametri koji slabije utječu na rezultate, rađena je analiza injektivnosti nakon frakturiranja na modelu SM1.



Slika 4.2 usporedba sa (desno) i bez (lijevo) hidrauličkog frakturiranja SM1

U slučaju analize injektivnosti nakon hidrauličkog frakturiranja u postavkama baznog scenarija promijenjena je propusnost oko utisne bušotine VC1. Također dodan je parametar "skin faktora" kojem je dodijeljena negativna vrijednost u svrhu povećanja propusnosti i širenja efektivnog radijusa bušotine. „Skin faktor“ se u naftnom inženjerstvu koristi kako bi se matematički uvećao ili smanjio drenažni radius (doseg) bušotine zbog oštećenja propusnosti blizu kanala bušotine.

Može se uočiti kako je mogućnost injektiranja vode povećana. U baznom scenariju količina utisnute vode bila je prosječno 5700 m³/ dan dok je u slučaju povećane propusnosti vrijednost

porasla na čak oko 6950 m³/ dan. Može se primijetiti da je temperatura ležišta pala brže u slučaju veće propusnosti. U 50 godina temperatura proizvodne vode pala je sa 175°C na 112°C dok je u baznom scenariju pala na 120°C, ali je bila proizvođena manja količina geotermalne vode. Pri utiskivanju te količine vode potrebna je velika količina energije budući da se treba postići tlak na dnu bušotine od 450 bara.

4.3. Analiza osjetljivosti

Kako bi se utvrdila proizvodnost bušotine u slučaju kad se utiskuje voda, rađena je analiza osjetljivosti na:

- a) veličinu manje propusnih slojeva
- b) eventualnu nedetektiranu vezu s bočne strane (propuštanje kroz rasjede)

Veličina manje propusnih slojeva regulirana je propusnostima proslojaka, koje su mijenjane od baznog slučaja do ekstremno propusnog i poroznog slučaja (u kojem bi značilo da su bušotine u proslojcima nepovoljnije propusnosti).

Pri tome krovinska propusna zona (KPZ), podinska propusna zona (PPZ) i rasjedna propusna zona (RPZ) imaju konstantne vrijednosti poroznosti i propusnosti (Tablica 4.1):

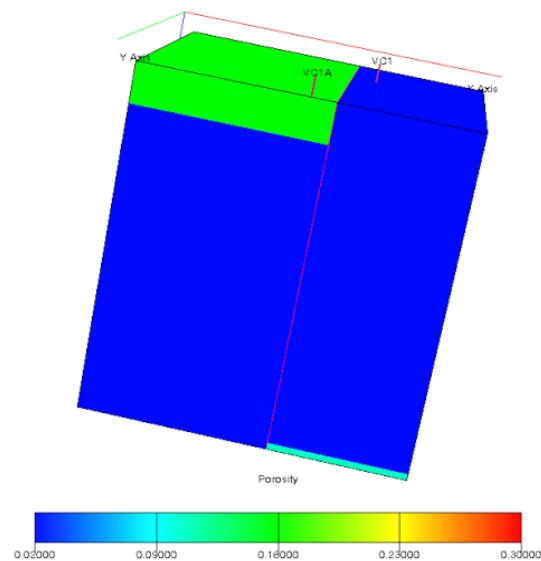
Gore navedene tri zone čine prema dosadašnjim interpretacijama (Čubrić, 2012; Guzović i dr., 2010) hidrodinamski povezan dio tzv. Z-modela u koji se utiskuje pothlađena voda u PPZ, a proizvodi se iz KPZ.

Tri slučaja se postavljena kako bi se ustanovile mogućnosti proizvodnje iz ovog ležišta uz projektiran protok 20 000 m³/dan ili barem tehnološki prihvatljiv manji protok. Slika 4.3 pokazuje shematski bazni slučaj - poroznost krovinske propusne zone (KPZ) je 16 %, a podinske zone (PPZ) 10.6 %. Zone su vertikalno odijeljene visokopropusnim rasjedom (tanka crvena crta), a okružene su skoro nepropusnim stijinama (0.001 mD) niske poroznosti (2 %). Takvo okruženje bilo je bitno ostaviti aktivno u modelu radi održavanja tlaka, a još više zato jer prijenos topline, pored svojstava fluida i brzine protjecanja najviše ovisi o stijenskoj masi koja okružuje fluide.

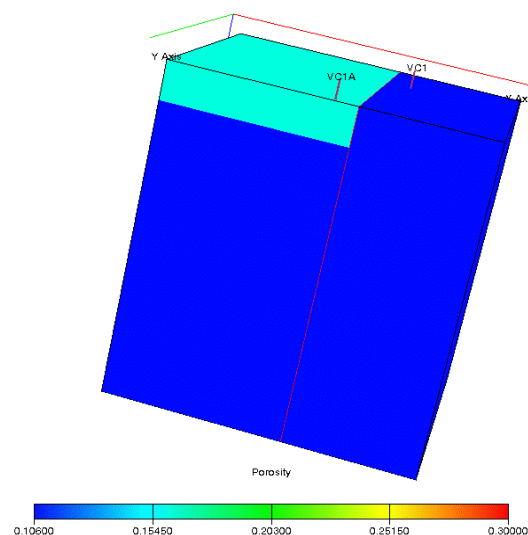
Slike 4.3 i 4.4 pokazuju poroznost stijena unutar bloka ispod KPZ te iznad PPZ za bazni slučaj i za prvi slučaj (S1) u analizi osjetljivosti. Zbog naglog pada tlaka u bušotini, te naznaka kako se vjerojatno radi o ipak većem dijelu poroznog prostora povezanog s glavnim Z-modelom hidrodinamički povezanih slojeva KPZ i PPZ, postavljena su tri scenarija (S1, S2, S3, Tablica 4.2). Prvi scenarij ima protočna svojstva i poroznost poput PPZ. Ovaj scenarij se može smatrati najlogičnijim, ukoliko ne vrijedi bazni scenarij, pošto je za očekivati da će se s dubinom poroznost i propusnost smanjivati prema vrijednostima od PPZ. Također, pošto se radi o

formaciji za koju se pretpostavlja da je raspucana (što nije niti generalno definirano u kojoj mjeri i s kojim svojstvima pukotina), postavljen je velik iznos omjera vertikalne i horizontalne propusnosti (0.5), pošto je u raspucanim stijenama veća vertikalna migracija fluida.

Rasjed, s obzirom na predviđane dimenzije (Čubrić, 2012; Guzović i dr., 2010) i zbog predviđane jake komunikacije PPZ i KPZ ima vertikalnu propusnost 1200 mD i horizontalnu 1000 mD. U svim modelima uočit će se kako je zbog razlike potencijala na tako simulacijski definiranoj rasjednoj zoni skoro potpuno eliminirana horizontalna komunikacija duž rasjeda, tj. rasjed se ponaša poput izmjenjivača topline velike površine.



Slika 4.3 Bazni slučaj simuliran u ležišnom simulatoru Eclipse



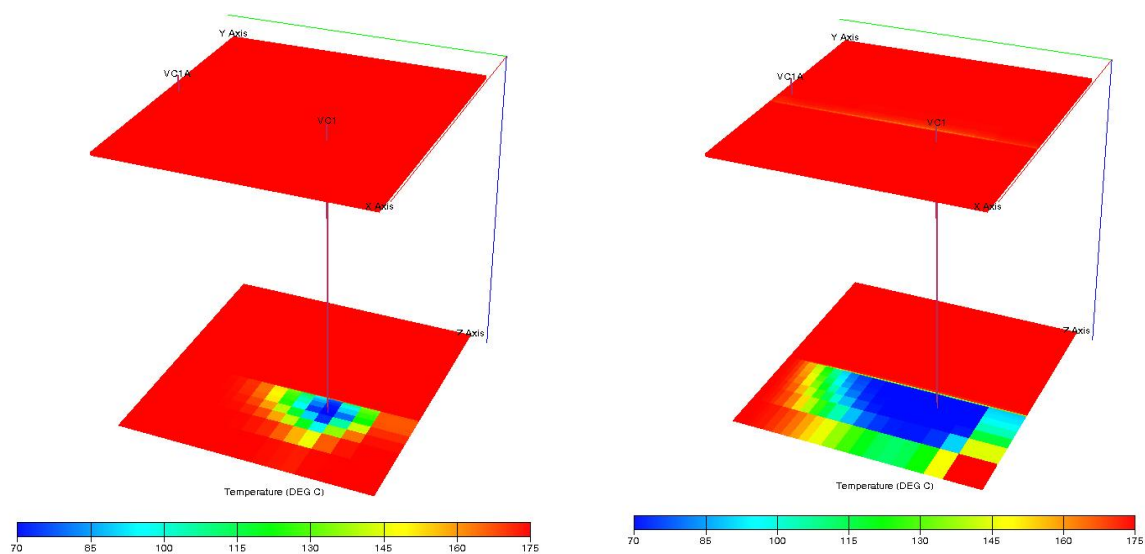
Slika 4.4 Prvi scenarij (S1, povećane poroznosti nepropusnih blokova) simuliran u ležišnom simulatoru Eclipse

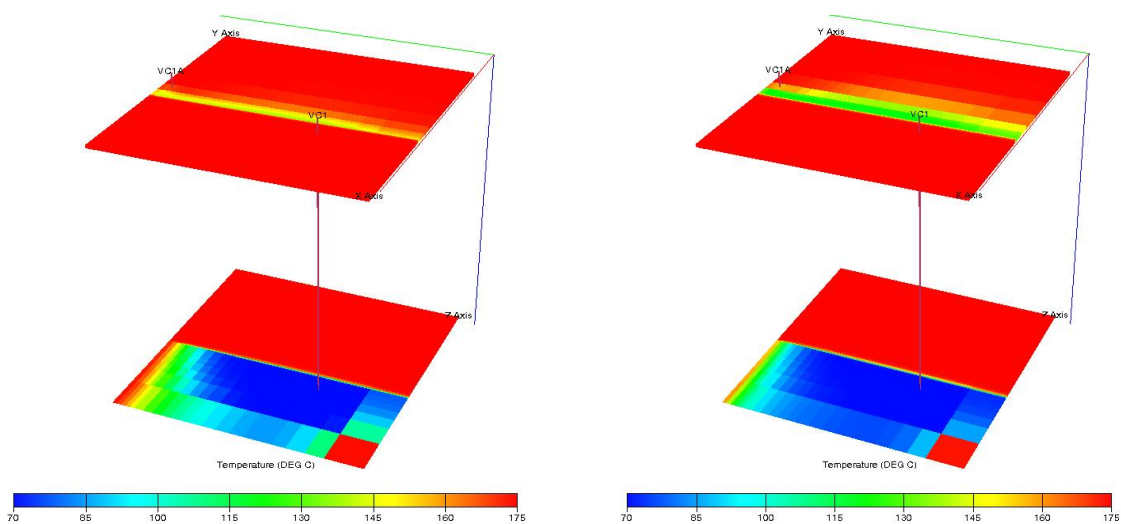
Tablica 4.2 Propusnost i poroznost stijena unutar bloka ispod KPZ te iznad PPZ.

	bazni slučaj	scenarij S1	scenarij S2	scenarij S3
horizontalna propusnost, k_h (mD)	0.001	441	620	620
vertikalna propusnost, k_v (mD)	0.001	220	310	310
poroznost (%)	2	10.6	16	20
ukupni porni volumen ležišta, 10^6m^3	88.547	317.845	461.822	568.472
Omjer pornog volumena Z modela (KPZ+PPZ+RPZ) i ukupnog pornog volumena, m	0.4	0.11	0.08	0.06

Analiza hlađenja ležišta

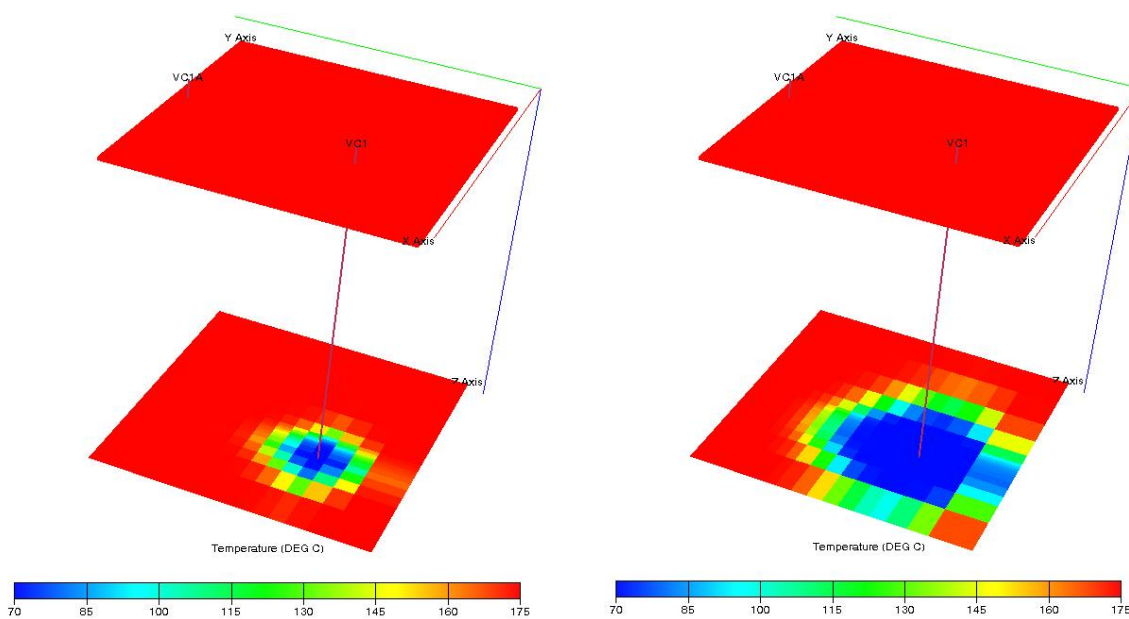
Na slici 4.5 vidi se pothlađivanje bloka PPZ u kojem se utiskuje hladna voda (plavo, 70°C) te KPZ gdje se proizvodi geotermalna voda. Temperatura se brzo smanjuje u podinskom dijelu, što pokazuje da je opravdano utiskivati u jedan dio ležišta, a proizvoditi iz drugog.

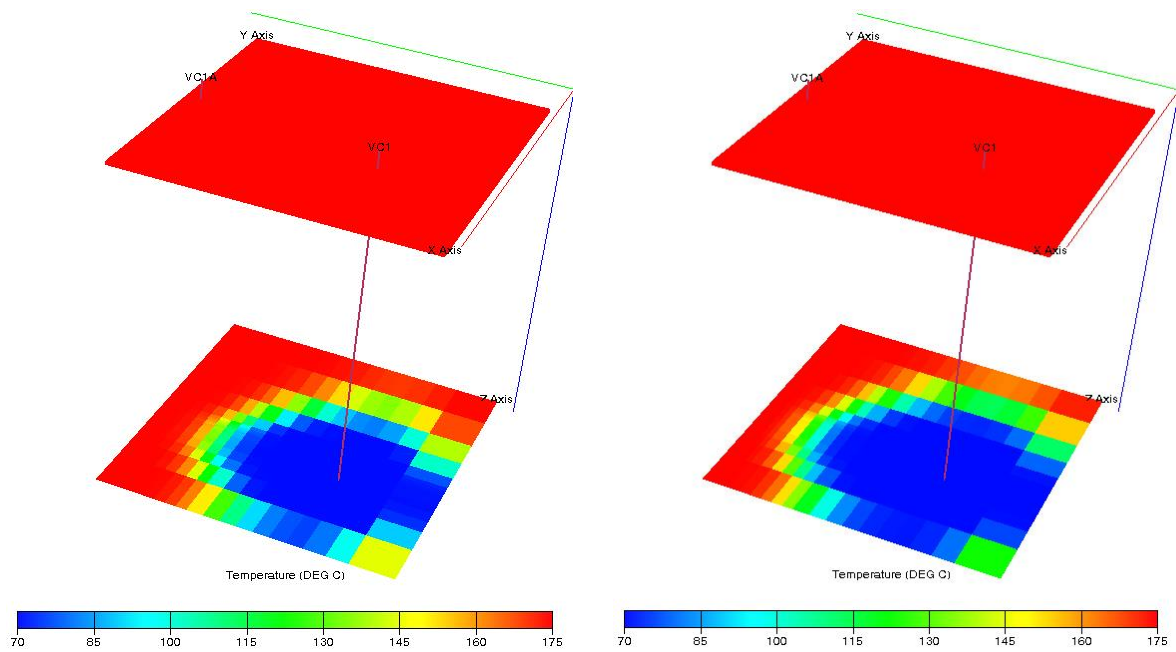




Slika 4.5 Prikaz najplićeg i najdubljeg proslojka u modelu i širenja temperature nakon 1, 10, 20 i 30 godina za bazni scenarij.

Slika 4.6 pokazuje kako se odmakom od baznog Z-modela omogućava komunikacija duž cijelog najdubljeg dijela u modelu. Dakle, generalnim povećanjem propusnosti smanjilo se širenje topline duž rasjeda.

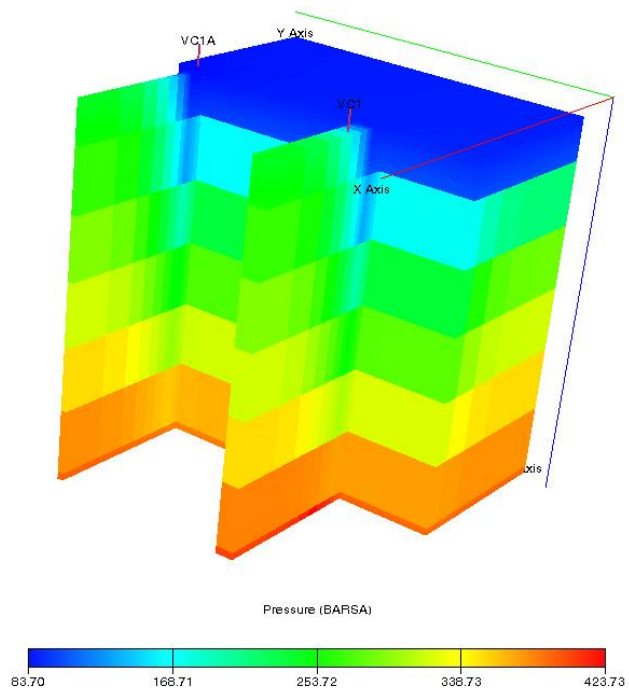




Slika 4.6 Prikaz najplićeg i najdubljeg proslojka u modelu i širenja temperature nakon 1, 10, 20 i 30 godina za scenarij 1. U ostalim scenarijima razlike su minimalne.

Analiza potencijala tlaka

Analiza osjetljivosti na parametre propusnosti i poroznosti je rađena jer je uočen brz pad tlaka (Slika 4.7).



Slika 4.7 Pad tlaka u baznom scenariju nakon 10 godina

Tlačna ležišna energija u KPZ će biti iscrpljena u jako kratkom periodu, te je nemoguće ostvariti predviđani protok od 20 000 m³/dan. Nakon što se tlak dovede do donjeg dozvoljenog minimuma (u simulacijskom modelu postavljen je na 80·10⁵ Pa), očito je kako tlak u podini nije povoljan za utiskivanje vode (postavljen je limit tlaka na dnu utisne bušotine 450·10⁵ Pa, dok je početni tlak na dnu modela oko 360·10⁵ Pa). Tako nastaje određeni potencijal zbog kojeg tlak uspijeva padati duž rasjeda (Slika 4.7, širenje plave fronte od 80·10⁵ Pa), međutim nedovoljno kako bi se nadomjestio u KPZ tj. kako bi se smanjio tlak u PPZ (Slika 4.9).

Pad tlaka u vremenu izražen je kao udio (f_p) početnog tlaka (p_i):

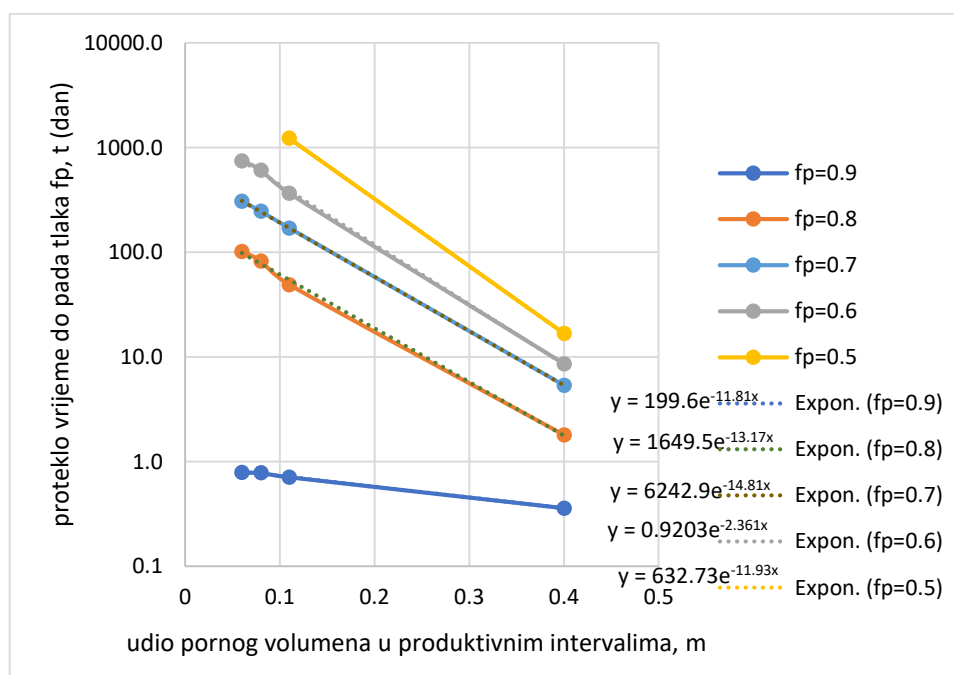
$$p(t) = p_i \cdot f_p \quad (4.1)$$

Očito je kako $p(t)$ izravno ovisi o ukupnom efektivnom pornom volumenu (Slika 4.9, Slika 7.4.). Kako bi se odnose tlaka dovelo u relaciju s pornim volumenom, promatrano je vrijeme do neke vrijednosti pada tlaka u proizvodnoj bušotini te omjer volumena pora Z-modela i volumena pora cijelog volumena ležišta (m , Tablica 4.3). Uočljivo je kako se tlak u bušotini stabilizira nakon 10-ak godina na svom minimumu u svim slučajevima.

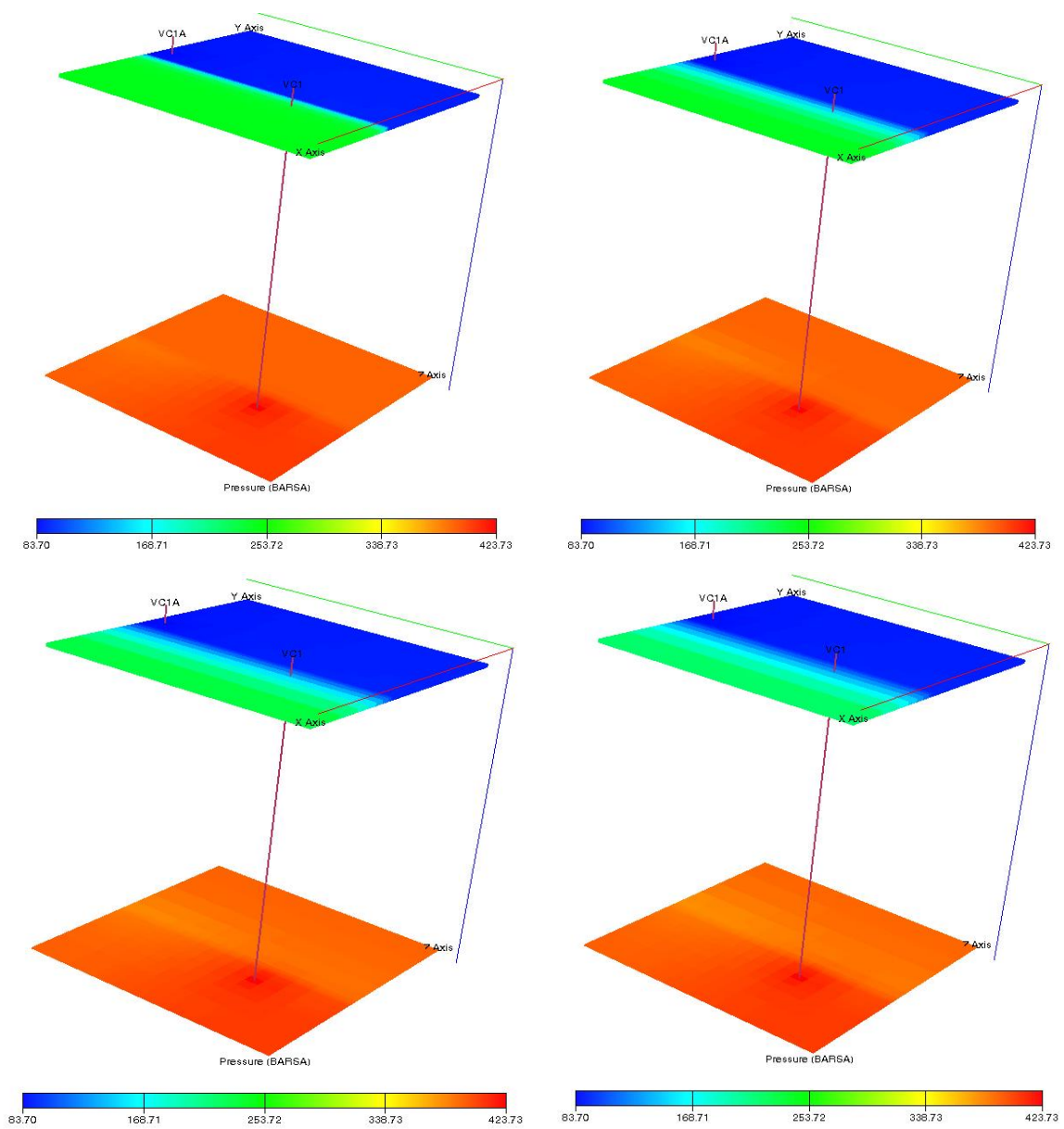
Kada bi se htjelo na temelju bilježenja pada tlaka u proizvodnoj bušotini dok se pokušava uspostaviti maksimalan protok 20 000 m³/dan pretpostavljati odnos volumena pora koji ne sudjeluje izravno u protoku, može se izraditi korelacija kao na slici 4.8. Na temelju takvih korelacija, pošto je velik broj nepoznanica o toj prirodno raspucanoj formaciji, može se uskladiti podatke o tlaku u proizvodnoj bušotini i slici 4.8 Slika 4.8. Npr., u slučaju da tlak padne na 90% početnog u 13.5 sati (očitanje na y osi od otprilike 0.56) - na krivulji $f_p=0.9$ se očitava $m \sim 0.2$. iduća poznata krivulja je ona za $f_p=0.8$ i trebalo bi čekati skoro 19 dana da se potvrdi da okolna stijena koja utječe na tlak ima pet puta veći volumen od protočnog dijela ležišta. Korelacija je provjerena novim simulacijskim slučajem i tlakovi u očitanoj vremenu su u simulacijskom slučaju 2 ($f_p=0.9$) do 6 % ($f_p<0.6$) veći.

Tablica 4.3 Utjecaj cijelog pornog volumena ležišta na pad tlaka.

	m (bazni)	m (scen. 1)	m (scen. 2)	m (scen. 3)
f_p	0.4	0.11	0.08	0.06
0.9	0.4	0.7	0.8	0.8
0.8	1.8	48.9	82.3	101.8
0.7	5.4	170.0	245.8	307.1
0.6	8.6	365.3	608.5	747.0
0.5	16.7	1224.7		

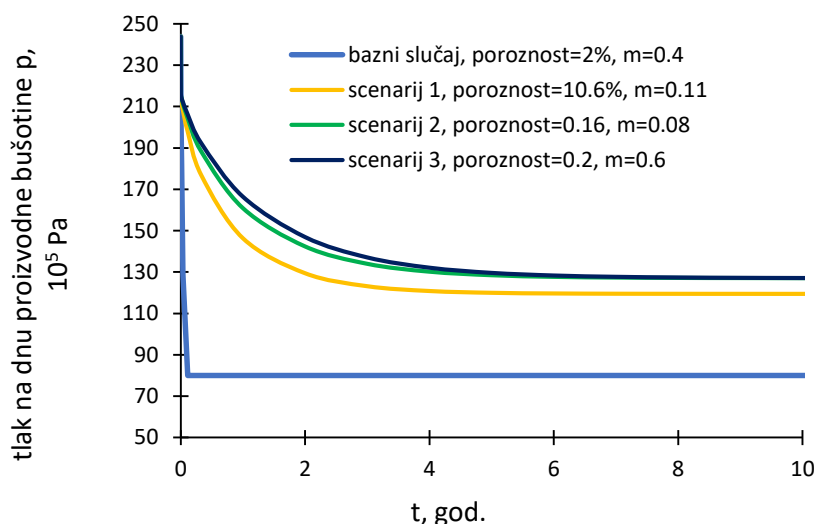


Slika 4.8 Korelacija udjela pornog volumena u produktivnim intervalima i vremena do određenog pada tlaka.



Slika 4.9 Tlak u KPZ i PPZ (bazni scenarij) nakon 1 godine te 10, 20 i 30 godina.

Slika 4.10 pokazuje promjenu tlaka na dnu proizvodne bušotine.



Slika 4.10 Promjena tlaka u proizvodnoj bušotini za svaki simulacijski scenarij.

4.4. Utiskivanje CO₂ i istovremena proizvodnja geotermalnog fluida

Na bazne scenarije, u kojima se injektira i proizvodi voda, izvršene su izmjene za prilagodbu utiskivanja CO₂. Utiskivanje CO₂ odvija se, također, u bušotini VC1, te se utiskuje količina od 964 049 m³/dan što odgovara masi od 0.65 Mt godišnje. Za utiskivanje te količine CO₂ potreban je manji tlak nego kada se utiskuje voda. Po dvije varijante napravljene su iz svakog statičkog modela te u njima varira isključivo propusnost RPZ cjeline u smjeru Z.

U prvom slučaju utiskivanja CO₂ deriviranog direktno iz baznog scenarija SM1 (s vertikalnom propusnošću rasjeda od 1200 mD) prema podacima iz Čubrić (2012), ukupna utisnuta količina CO₂ iznosi 7 033 080 000 m³ dok je ukupna proizvedena količina 5 293 104 000 m³ što znači da je količina zaostalog CO₂ u ležištu jednaka 1 739 976 000 m³ u 20 godina trajanja simulacije.

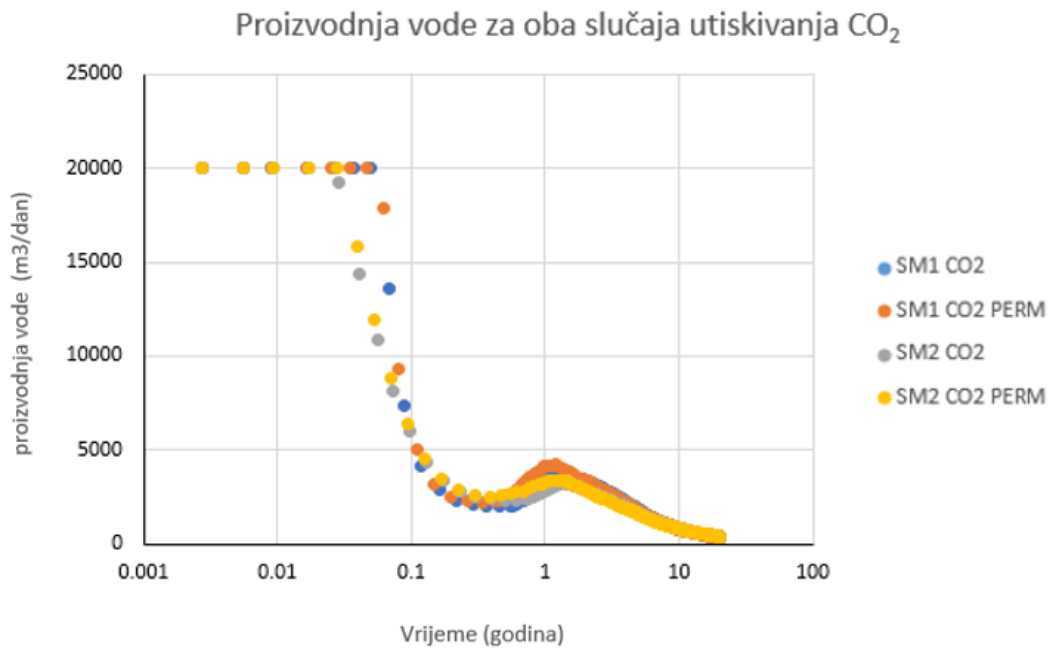
U prvim slučajevima utiskivanja CO₂ (npr. SM1 CO₂), propusnost u smjeru Z cjeline RPZ, iznosi 1200 mD, dok u slučajevima s naznakom PERM (npr. SM1 CO₂ PERM) iznosi 2500 mD.

Ostali slučajevi su prikazani u sljedećoj tablici.

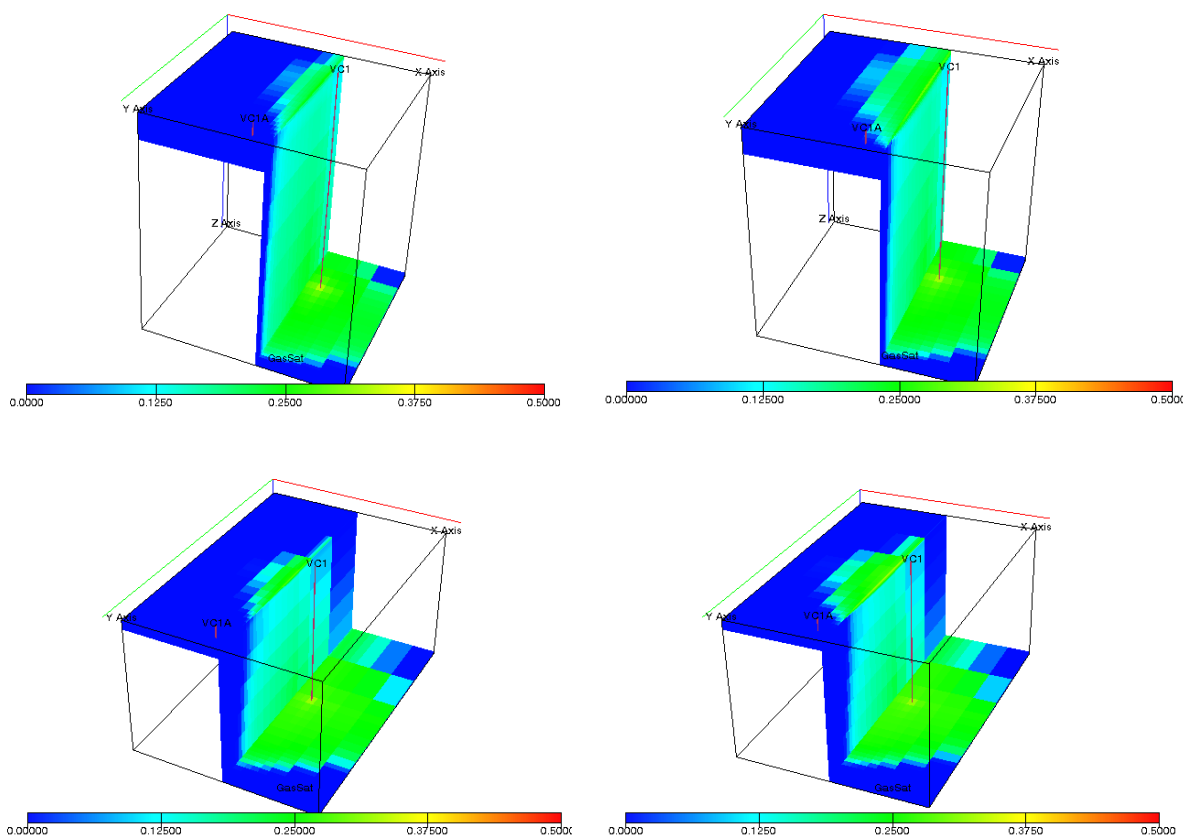
Tablica 4.4 Zaostali CO₂ (10⁶ m³ u 20 godina)

	SM1 CO ₂	SM1 CO ₂ PERM	SM2 CO ₂	SM2 CO ₂ PERM
Ukupna injektirana količina	7 033.080	7 040.951	7 040.919	7 041.378
Ukupna proizvedena količina	5 293.104	5 325.840	5 163.817	5 227.047
Zaostali CO ₂	1 739.976	1 715.111	1 877.102	1 814.331

Na slici (Slika 4.11) prikazano je kako povećanjem vertikalne propusnosti raste i proizvodnja vode.

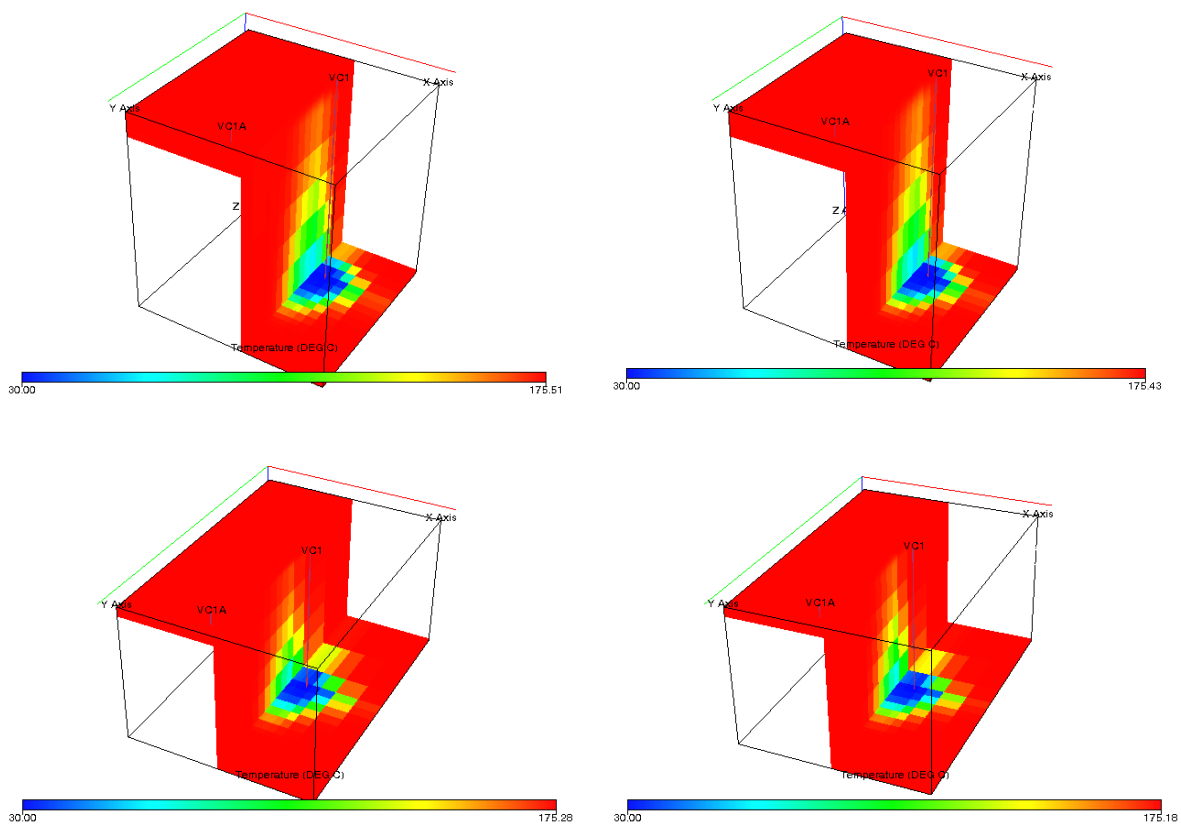


Slika 4.11 Proizvodnja vode



Slika 4.12 Zasićenje plinom nakon 1 god obzirom na propusnost (4 slučaja - gore SM1 , dolje SM2, s lijeve strane bazni, s desne strane povećana propusnost)

Do početka proizvodnje CO₂ dolazi nakon oko 3-4 mjeseca ovisno o slučaju, no to ne utječe na temperaturu fluida u proizvodnoj bušotini. Ona ostaje gotovo konstantna na 175 °C sa fluktuacijama od oko 0.5 °C. To govori kako CO₂ ima visoku mobilnost u pornom prostoru, no ne i toplinski kapacitet. Razlike između desnih i lijevih prikaza (Slika 4.12) su isključivo propusnost rasjeda u Z smjeru (vertikalna ploha). Može se zaključiti da se znatno pomiče područje zasićeno plinom (zeleno područje) te to također ukazuje na visoku mobilnost CO₂ te činjenicu da je lakši od vode i ima tendenciju kretanja prema krovini, što je još više istaknuto povećanjem vertikalne propusnosti.



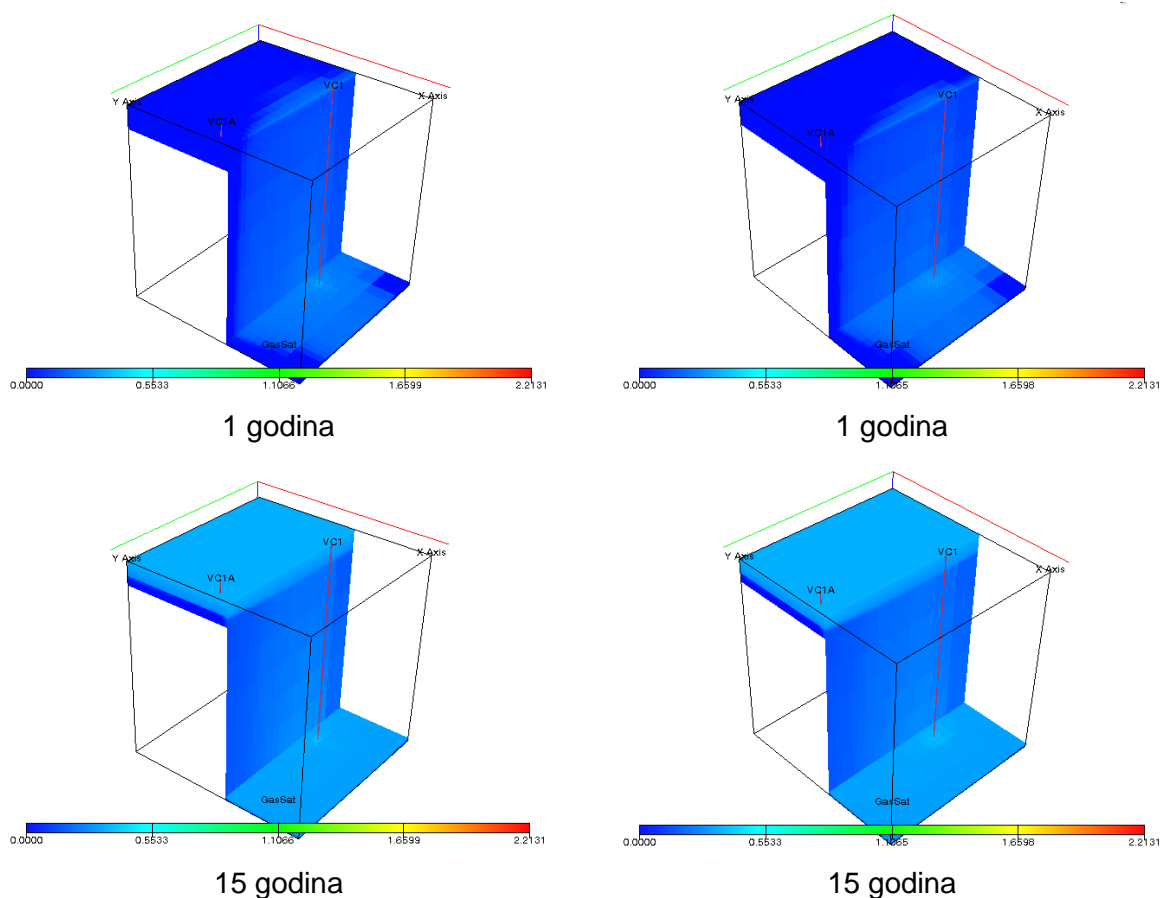
Slika 4.13 Temperatura nakon 20 godina obzirom na propusnost (4 slučaja - gore SM1 , dolje SM2, s lijeve strane bazni, s desne strane povećana propusnost)

Iz slika 4.12 i 4.13 može se vidjeti da propusnost, u ovom slučaju, ne utječe znatno na pad temperature oko bušotine ali vidno utječe na radijus i brzinu prodora CO₂. To također potvrđuju rezultati iz tablice 4.4 u kojoj su slučajevi većih propusnosti imali veću utisnutu količinu CO₂ i posljedično veću količinu zaostalog CO₂.

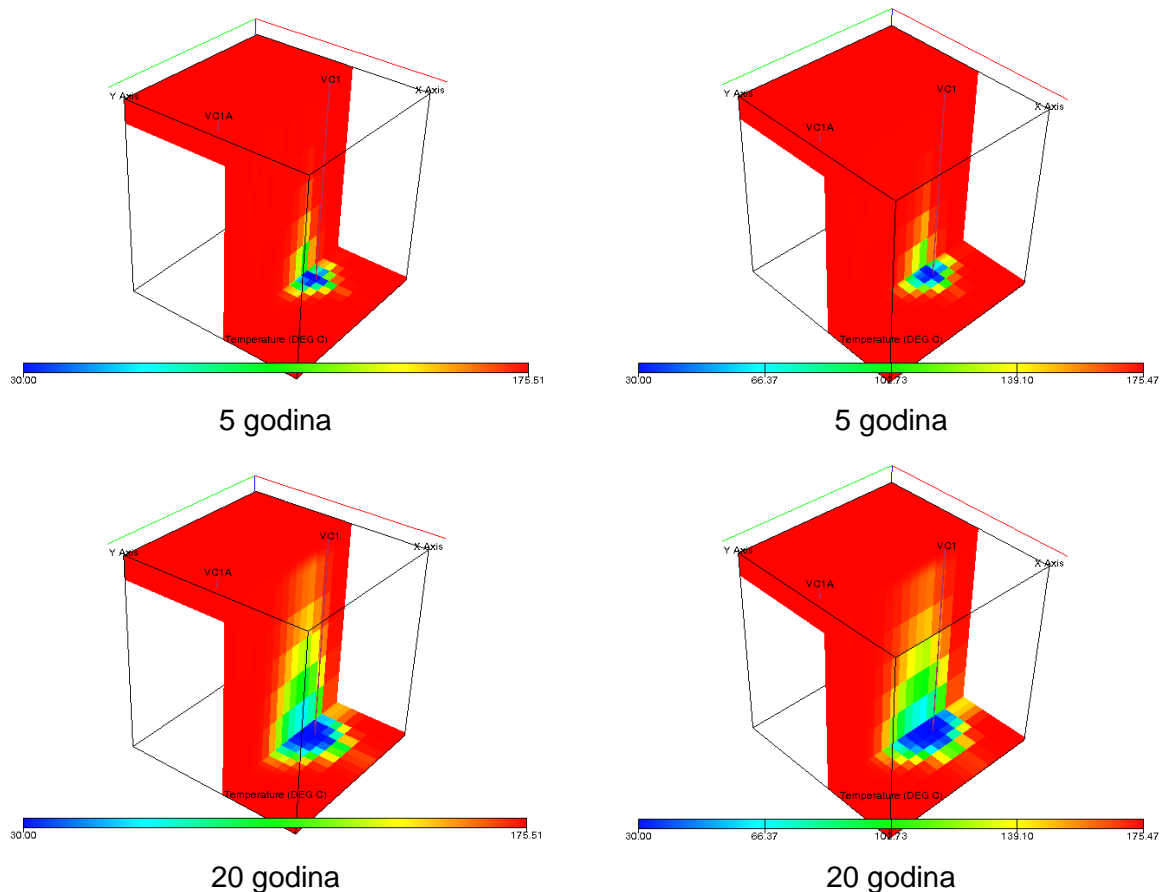
4.5. Usporedba scenarija utiskivanja CO₂ i izmijenjenog scenarija s područjem veće propusnosti zbog hidrauličkog frakturiranja

Isto kao i kod slučaja s vodom, kada su eliminirani parametri koji slabije utječu na rezultate, rađena je analiza injektivnosti nakon frakturiranja pomoću modela frakture. Model frakture napravljen je uvođenjem negativnog skin faktora i velike propusnosti u neposrednoj blizini bušotine.

Slike 4.14 i 4.15 prikazuju rezultate zasićenja plinom i promjene temperature u slučaju modela frakture u usporedbi sa baznim scenarijem. Velika razlika nije uočljiva, pogotovo ne u 3D prikazu. No, u izlaznoj datoteci simulatora možemo uočiti kako je ukupna količina utisnutog CO₂ veća u slučaju modela frakture za 9 298 000 m³ u 20 godina što nije veliko poboljšanje obzirom da je količina utisnutog plina dnevno jednaka 964 049 m³. Temperatura proizvedenog fluida i dalje ostaje na razini početne. Količina zarobljenog plina u 20 godina povećala se za 32 704 000 m³. U usporedbi sa baznim scenarijem, frakturirani slučajevi u svoj naziv imaju dodatak 'Fraktura' (npr. SM1 CO₂ Fraktura).



Slika 4.14 Zasićenje plinom nakon 1 godine i 15 godina sa (desno) i bez (lijevo) frakturiranja



Slika 4.15 Temperatura nakon 5 i 20 godina u slučajevima sa (desno) i bez (lijevo) frakturiranja (SM1)

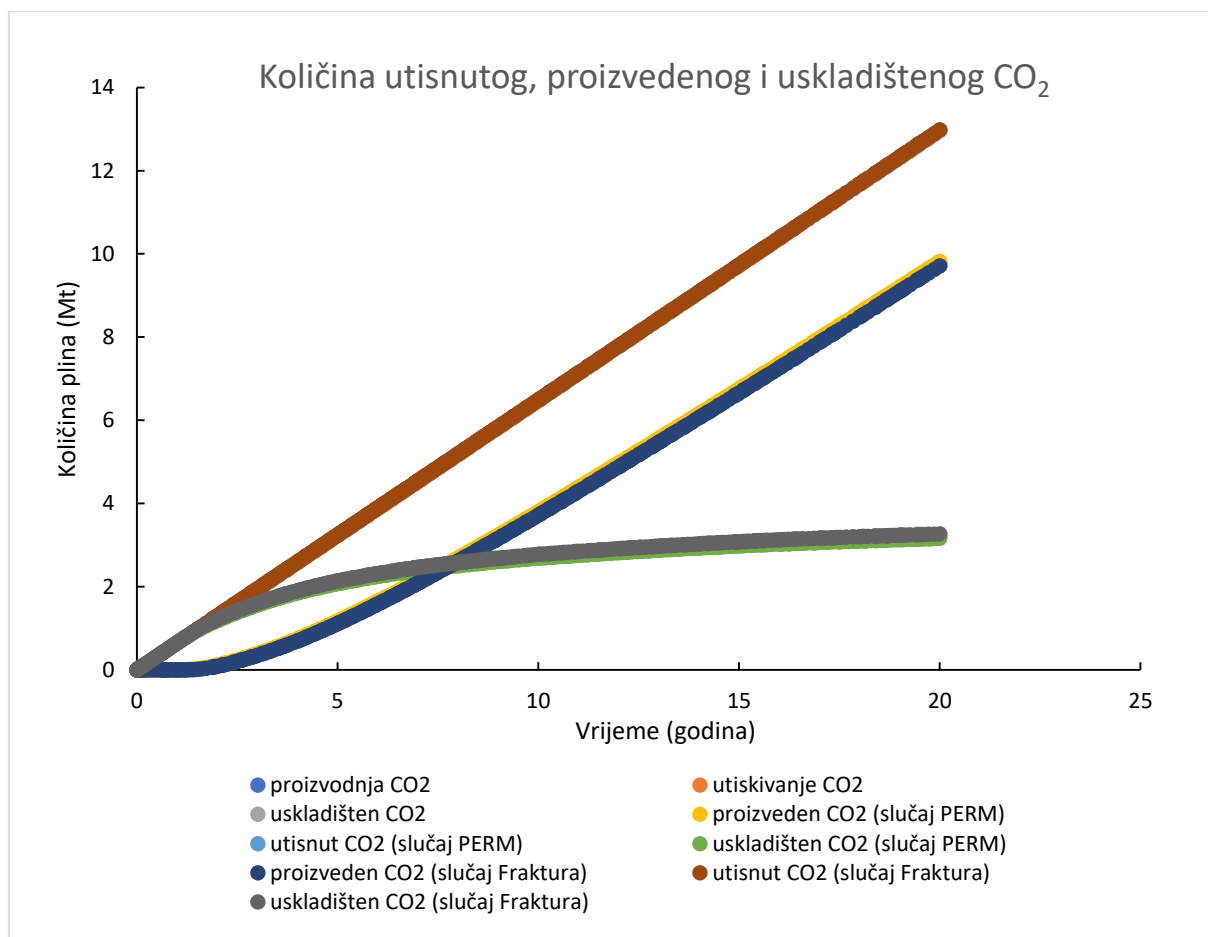
Nakon analize može se zaključiti da je za ovakvu strukturu velike propusnosti, hidrauličko frakturiranje, u slučaju utiskivanja CO₂ ne čini pretjeranu razliku.

4.6. Popratni efekti u vidu uskladištenja CO₂

Jedan od bitnijih faktora analize dobivenih slučajeva je uskladišteni CO₂ (Tablica 4.5 i Slika 4.16) Količina uskladištenog plina govori o uspješnosti spajanja proizvodnje geotermalne energije i skladištenja CO₂. Količina uskladištenog ugljikovog dioksida je najveća u slučaju dodanog modela frakture (slučaj fraktura), u skladu s također povećanim utisnutim količinama.

Tablica 4.5 Ukupno uskladišteni CO₂ (m³)

	SM1 CO ₂	SM1 CO ₂ PERM	SM1 CO ₂ Fraktura
Ukupna injektirana količina	7 033 080 000	7 040 951 000	7 042 378 000
Ukupna proizvedena količina	5 293 104 000	5 325 840 000	5 269 698 000
Zaostali CO ₂	1 739 976 000	1 715 111 000	1 772 680 000



Slika 4.16 Količina utisnutog, proizvedenog i uskladištenog CO₂

4.7. Analiza eksergije sustava

Proizvodnja i utiskivanje vode

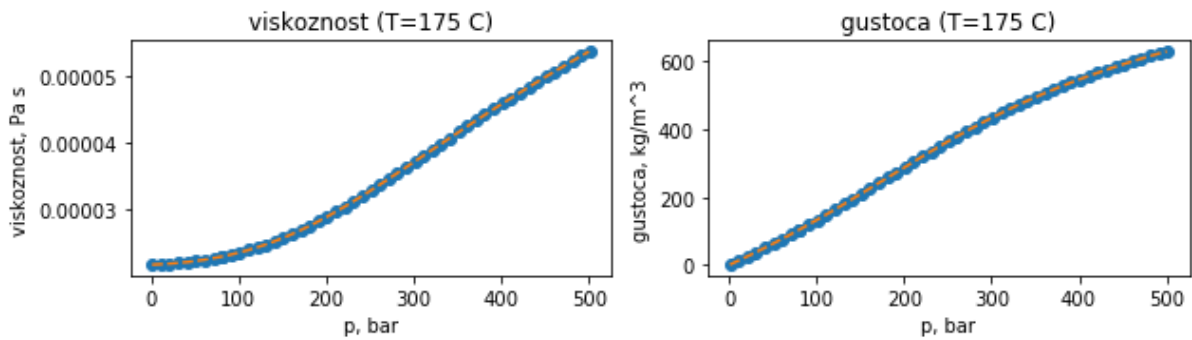
Pri utiskivanju vode, moguće je postići utiskivanu količinu približno jednaku onoj proizvedenoj uz maksimalan tlak na dnu bušotine $p = 450 \cdot 10^5$ Pa.

Atrens i dr. (2010) su koristili ovaj princip procjene energije (tj. eksergije) koja se može iskoristiti iz geotermalnog ležišta, uz niz pojednostavljenja, pa je tako umjesto tlaka na dnu bušotine korišten prosječni ležišni tlak, čime se zanemaruju utjecaji injektivnosti. Te utjecaje je u slučaju ovog rada bilo moguće analizirati simulacijskim 3D modelom. Međutim, nakon simulacije, bez detaljnijih analiza na terenu o performansu bušotine (engl. *vertical lift performance*, VLP) i pribušotinske zone (engl. *inflow performance relationship*, IPR), teško je automatizirano povezati simulacijske slučajeve i tlak na ušću bušotine (tj. na površini). Nakon takve (numeričke) analize slijedile bi simulacije tj. optimizacija ORC ciklusa, čime bi bilo potrebno uskladiti četiri numerička sustava (ležište, proizvodna bušotina, ORC, utisna bušotina). Takav sveobuhvatni numerički sustav trenutno ne postoji, što je zaključeno opširnijim istraživanjem literature. Stoga u prilog eksergetskoj analizi idu i već ranije objavljeni rezultati analize parametara ORC elektrane, prije svega izlazna temperatura fluida, tj. temperatura fluida prilikom utiskivanja.

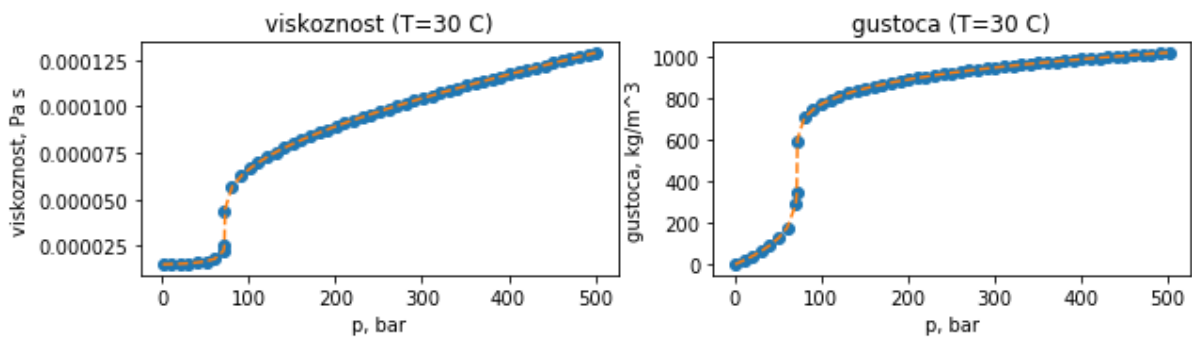
Spomenuti zaseban numerički proračun pada tlaka prema jednadžbi 4.3 koristio je prethodno izračunate tablice gustoća, viskoznosti, entalpija i entropija ovisno o tlaku i za izoterme od interesa, a na temelju analiziranih simulacijskih slučajeva daje svojstva proizvedenog i utisnutog fluida na ušću bušotine (Tablica 4.8, Tablica 4.9, Tablica 4.10), što je bilo neophodno za proračun eksergije prema jednadžbi 4.2. Slika 4.17 pokazuje viskoznost i gustoću za slučaj proizvodne bušotine pri proizvodnji CO₂, a slika 4.18 iste parametre za utisnu bušotinu i vidljivo je kako CO₂ ima povoljne promjene gustoće u proizvodnoj bušotini (iz superkritičnog područja u čisto plinsko područje), dok bi u utisnoj bilo potrebno komprimirati plin do minimalno 70 bar, i tada bi tek bilo moguće koristiti pumpu za utiskivanje CO₂ u tekućoj fazi. Optimizacija uvjeta rada kompresijskog, rashladnog i utisnog sustava prelazi opseg ovog rada, te je u zbroj raspoloživih eksergetskih snaga uračunata jedino potrebna hidraulička snaga pumpe (na utisnoj bušotini za vodu):

$$P = q \cdot dp \quad (4.2)$$

P = snaga (W), q = volumni protok (m³/s), dp = diferencijalni tlak u pumpi (Pa).



Slika 4.17 Interpolirane vrijednosti gustoća i viskoznosti CO₂ korištene za proračun pada tlaka u proizvodnoj bušotini.



Slika 4.18 Interpolirane vrijednosti gustoća i viskoznosti CO₂ korištene za proračun pada tlaka u utisnoj bušotini.

Tablica 4.6 Izračunate vrijednosti na ušću utisne bušotine u slučaju proizvodnje i utiskivanja vode.

<i>temperatura</i>	t	70	°C
<i>tlak na dnu bušotine</i>	p _{dno}	450	10 ⁵ Pa
<i>tlak na ušću bušotine.</i>	p _{ušće}	109.7	10 ⁵ Pa
<i>entalpija</i>	h	302.01	kJ/kg
<i>entropija</i>	s	0.9487	kJ/(kg·K)
<i>gustoća</i>	ρ	982.51	kg/m ³

Poseban problem predstavlja održavanje tlaka na proizvodnoj bušotini te se ovdje mogu prikazati tri vrste rezultata. Prvi rezultat drži se parametara koji su do sada procjenjivani za ležište Velika Ciglena - vrijednost tlaka na proizvodnoj bušotini od približno $25 \cdot 10^5$ Pa, uz početnu proizvodnju $20\,000$ m³ vode dnevno (Tablica 4.7).

Tablica 4.7 Ulazni parametri proizvodne bušotine za proračun eksergije

temperatura	t	175	°C
tlak na dnu bušotine	p _{dno}	243.4	10 ⁵ Pa
tlak na ušću bušotine.	p _{ušće}	25.5	10 ⁵ Pa
entalpija	h	741.89	kJ/kg
entropija	s	2.0884	kJ/(kg·K)
gustoća	ρ	893.35	kg/m ³

U tablici 4.8 prikazani su podatci za utisnu bušotinu

Tablica 4.8 Parametri fluida (vode) na utisnoj bušotini

temperatura	t	70	°C
tlak na dnu bušotine	p _{dno}	450	10 ⁵ Pa
potreban tlak na ušću bušotine.	p _{ušće}	109.7	10 ⁵ Pa
entalpija	h	302.01	kJ/kg
entropija	s	0.9487	kJ/(kg·K)
gustoća	ρ	982.51	kg/m ³

Eksergija takvog ležišta je:

$$\begin{aligned}
 \psi_{H_2O} &= \dot{m} (h_{prod} - h_{inj} - T_0 (s_{prod} - s_{inj})) \\
 &= 893.35 \cdot \frac{20000}{24 \cdot 3600} \cdot (741.89 - 302.01 - 293.15 \cdot (2.0884 - 0.9847)) \\
 &= 24.056 \text{ MW}
 \end{aligned}$$

Ovdje je iskorištena simulacijska analiza s najpovoljnijim rezultatima, kako bi se razmotrio pad temperature u vremenu i utjecaj na moguću proizvedenu eksergiju (Tablica 4.9)

Tablica 4.9 Utjecaj pothlađivanja temperature na eksergetsku snagu geotermalnog ležišta

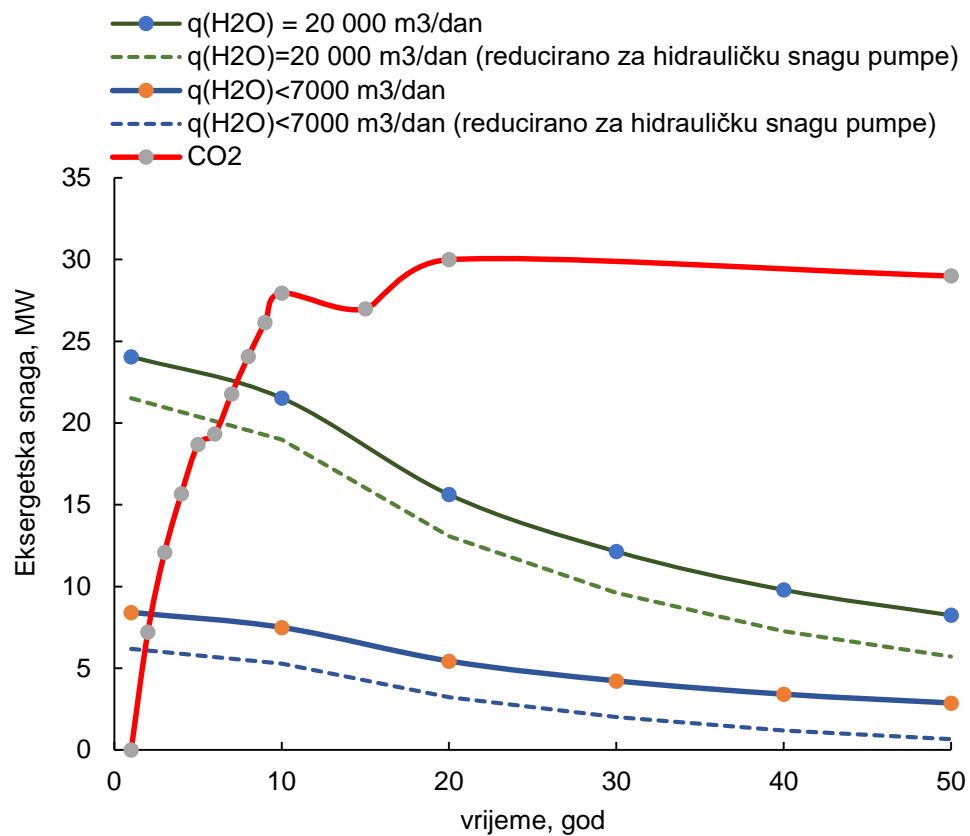
vrijeme	q	t	ρ	h	s	ψ
god	m ³ /s	°C	kg/m ³	kJ/kg	kJ/(kg·K)	MW
1	0.231481	175	893.36	741.89	2.0884	24.057
10	0.231481	166	902.63	702.63	1.9999	21.524
20	0.231481	144	923.72	607.7	1.7782	15.625
30	0.231481	130	936.02	547.93	1.6324	12.144
40	0.231481	120	944.28	505.47	1.5258	9.801
50	0.231481	113	949.81	475.84	1.4497	8.248

Slučaj utiskivanja i proizvodnje CO₂ bitno je različit. Injektivnost za CO₂ raste jer se relativna propusnost, tj. propusnost za CO₂ povećava sa njegovim zasićenjem u ležištu. Proizvodnja CO₂ ne kreće od prve godine, tako da se ovakva proizvodnja nadopunjuje s početnim efektom skladištenja. Nakon dvije godine protok CO₂ postaje značajan (Tablica 4.10).

Tablica 4.10 Eksergetska snaga geotermalnog sustava s proizvodnjom CO₂.

vrijeme	q	$p_{utis(dno)}$	$p_{utis(ušće)}$	h	s	$\rho_{utis(ušće)}$	ψ
god	m ³ /s	10 ⁵ Pa	10 ⁵ Pa	kJ/kg	kJ/(kg·K)	kg/m ³	MW
1	6E-09	431.8	106.5	269.41	1.2120	784.9	0.0
2	3.342	438.8	112.2	267.61	1.2037	795.9	7.2
3	5.277	419.1	96.3	273.35	1.2293	761.5	12.1
4	6.586	405.0	85.2	279.93	1.2560	724.4	15.7
5	7.676	393.7	76.6	293.77	1.3057	650.3	18.7
6	8.333	384.3	69.5	390.78	1.6313	272.9	19.3
7	8.905	376.5	63.9	415.42	1.7212	210.0	21.8
8	9.281	369.4	59.0	432.41	1.7860	167.7	24.1
9	9.471	363.4	55.0	440.97	1.8231	148.0	26.1
10	9.740	358.3	52.4	446.56	1.8472	135.1	27.9
15	10.309	338.3	58.4	433.67	1.7915	164.8	27.0
20	10.608	326.1	53.4	444.45	1.8381	140.0	30.0
50	10.608	326.1	53.4	444.45	1.8381	140.0	30.0

Slika 4.19 pokazuje zbirne rezultate usporedbe eksergetske snage.



Slika 4.19 Usporedba eksergetske snage na temelju najpovoljnijih simulacijskih slučajeva proizvodnje vode i CO_2 iz geotermalnog ležišta

5. Zaključak

Pregledom literature, pokazalo se kako su rijetke sveobuhvatne analize sustava geotermalno ležište-bušotine-elektrana. Svaki od tri segmenta detaljno se može razraditi optimizacijom numerički simuliranih slučajeva (scenarija), a količina dostupne energije ponajviše ovisi o kapacitetu ležišta, tj. njegovih dimenzija te veličine visokopropusnih zona.

Naglasak analiza u ovom radu je bio upravo na analizi osjetljivosti parametara, promjenom propusnosti i veličine ležišta te je ustanovljeno sljedeće:

- Prema podacima objavljenim u Čubrić (2012) i Guzović et al. (2010) izrađena su dva statička modela ležišta SM1 i SM2 te uspoređeni rezultati pokazuju kako se hladna fronta širi brže u (većem) modelu SM2 (Slika 4.1).
- Slični rezultati su postignuti i u modelima s frakturom, uz razlike u pothlađivanju ukupnog volumena ležišta (Slika 4.2). To je vjerojatno rezultat bolje komunikacije hladnog fluida iz utišne bušotine sa slabopropusnim zonama oko tog dijela ležišta (PPZ) te veće količine vode koja je cirkulirala kroz ležište.
- Kako se radi o velikim količinama utiskivanja i proizvodnje, ustanovljeno je da ni frakturiranje ne može višestruko povećati injektivnost bušotine. U samom modelu, tlak kod proizvodne bušotine pada brzo na minimalnu zadanu vrijednost od 80 bar. U slučaju proizvodnje vode, proizvodnja vode se trostruko smanjila u kratkom roku (manje od godinu dana) te je taj realno manji protok ostao skoro konstantan do kraja simuliranih razdoblja.
- Rađena je analiza omjera pornog volumena Z modela (KPZ+PPZ+RPZ) i ukupnog pornog volumena, m (Slika 4.5, Slika 4.6). Tako je u baznom slučaju taj omjer 0.4 dok ostali slučajevi (scenariji temeljeni na SM1, nazvani S1, S2, S3) pretpostavljaju puno veći volumeni pora i propusnosti (skoro 4 do preko 6.5 puta). Utjecaj poroznosti tj. efektivnog volumena ležišta na pothlađivanje KPZ, tj. zone blizu proizvodne bušotine je puno manji od utjecaja propusnosti.
- Pad tlaka u ležištu bit će brži u početku proizvodnje nego kasnije (Slika 4.8).
- U svim slučajevima s većom propusnosti postigao se puno veći tlak na dnu proizvodne bušotine (Slika 4.10)
- Povećana propusnost rasjedne zone (RPZ) slabo utječe na zadržavanje utisnutog CO₂. Drugim riječima, CO₂ se brže širi prema plićim strukturama u svakom slučaju, što otvara mogućnost za utilizaciju CO₂ kao geotermalnog fluida (Slika 4.12, Slika 4.13), ali ne djeluje povoljno na istovremenu proizvodnju geotermalne vode i utiskivanja CO₂. Također, zbog većeg širenja u frakturiranom modelu, CO₂ će u takvom slučaju imati dodatno veću efektivnu propusnost (jer je efektivna propusnost proporcionalna sa zasićenjem).

- Simulirani scenariji utiskivanja CO₂ pokazali rezultirali su manjom potrebnim tlakom za utiskivanje CO₂, konstantnom visokom proizvodnjom CO₂ i nebitnim padom temperature CO₂ na proizvodnoj bušotini (Slika 4.14, Slika 4.15.)

U tablici 5.1 može se vidjeti prikaz slučajeva ispitanih u ovom radu.

Tablica 5.1 Popis slučajeva i pripadajući utjecaj

	H₂O	H₂O Fraktura	CO₂	CO₂ PERM	CO₂ Fraktura
SM1	SM1 H ₂ O	SM1 H ₂ O Fraktura	SM1 CO ₂	SM1 CO ₂ PERM	SM1 CO ₂ Fraktura
SM2	SM2 H ₂ O		SM2 CO ₂	SM2 CO ₂ PERM	
Utjecaj	-	velik	velik	slab	srednji

Na temelju svih simulacijskih slučajeva, analize eksergije i uvjeta u bušotinama izvedeni su sljedeći zaključci:

CO₂ je kao medij iznimno povoljan u očuvanju temperature ležišta bez obzira što se utiskuje na relativno niskim temperaturama.

Ukupno raspoloživa energija proizvedenog fluida (eksergija) stoga može biti veća pri utiskivanju CO₂.

U prvih pet godina utiskivanja i proizvodnje CO₂, to utiskivanje rezultira nižom eksergijom nego vjerojatna realizacija proizvodnje geotermalne vode, međutim u tom razdoblju se odvije najveći dio trajnog skladištenja CO₂.

Na primjeru povezivim s realnim slučajem Velike Ciglene, pokazano je kako je na taj način moguće uskladištiti preko 3.25 Mt CO₂.

Potrebno je simulacijski ispitati još slučajeva koji se mogu povezati s dimenzijama i uvjetima u stvarnim ležištima. U ovom radu, pretpostavljen je slučaj s vertikalnom propusnom frakturom i takva konfiguracija protoka u ležištu izrazito povoljno djeluje kao prirodni izmjenjivač topline, zbog visoke propusnosti ležišta i velike površine, ali prilično kratkog smjera protjecanja fluida.

6. Reference

1. Atrens, A., Gurgenci, H. and Rudolph, V., 2009, February. Exergy analysis of a CO₂ thermosiphon. In *Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, CA*.
2. Atrens, A.D., Gurgenci, H. and Rudolph, V., 2010. Electricity generation using a carbon-dioxide thermosiphon. *Geothermics*, 39(2), pp.161-169.
3. Atrens, A.D., Gurgenci, H. and Rudolph, V., 2011. Economic optimization of a CO₂-based EGS power plant. *Energy & Fuels*, 25(8), pp.3765-3775.
4. Brand, C.W., Heinemann, J.E. and Aziz, K., 1991, January. The grid orientation effect in reservoir simulation. In *SPE Symposium on Reservoir Simulation*. Society of Petroleum Engineers.
5. Brown, D.W., 2000, January. A hot dry rock geothermal energy concept utilizing supercritical CO₂ instead of water. In *Proceedings of the twenty-fifth workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford University* (pp. 233-238).
6. Chapman, Walter G., et al. SAFT: Equation-of-state solution model for associating fluids. *Fluid Phase Equilibria* 52 (1989): 31-38.
7. Cooper, J.R., 1997. Release on the IAPWS Industrial formulation 1997 for the thermodynamics properties of water and steam. *The International Association for the Properties of Water and Steam, Lucerne, Switzerland*.
8. Čubrić, S., 2012. Basic characteristics of hydraulic model for the Velika Ciglena geothermal reservoir. *Nafta*, 63(5-6), pp.173-179.
9. Fenghour, A.; Wakeham, W.A.; Vesovic, V., The Viscosity of Carbon Dioxide, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 1998, 27, 31-44
10. Fouillac, C., Sanjuan, B., Gentier, S. and Czernichowski-Lauriol, I., 2004, May. Could sequestration of CO₂ be combined with the development of enhanced geothermal systems, In *Third Annual Conference on Carbon Capture and Sequestration, Alexandria, VA* (Vol. 4).
11. Freifeld, B.M., Pan, L., Doughty, C., Zakem, S., Hart, K. and Hostler, S., 2016. Demonstration of Geothermal Energy Production Using Carbon Dioxide as a Working Fluid at the SECARB Cranfield Site, Cranfield, Mississippi
12. Ganjdanesh, R., Bryant, S., Orbach, R., Pope, G. and Sepehrnoori, K., 2014. Coupled carbon dioxide sequestration and energy production from geopressured/geothermal aquifers. *SPE Journal*, 19(02), pp.239-248.
13. Gross, J. and Sadowski, G. Perturbed-chain SAFT: An equation of state based on a perturbation theory for chain molecules. *Industrial & engineering chemistry research*. 2001 Feb 21;40(4):1244-60.

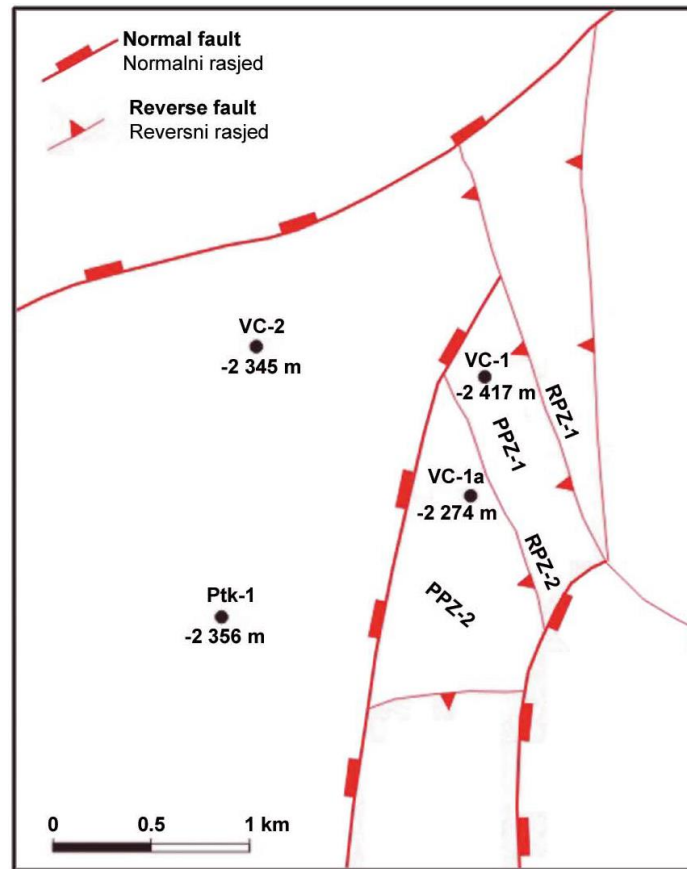
14. Guercio, M. and Bonafin, J., 2016. The Velika Ciglena Geothermal Binary Power Plant, *Proceedings, 6th African Rift Geothermal Conference*, Addis Ababa, Ethiopia, 2nd – 4th November 2016
15. Guzović, Z. and Lončar, D. and Ferdelji, N., 2010. Possibilities of electricity generation in the Republic of Croatia by means of geothermal energy. *Energy*, 35(8), pp.3429-3440.
16. Haaland, SE, 1983. Simple and Explicit Formulas for the Friction Factor in Turbulent Flow. *Journal of Fluids Engineering*. 105 (1): 89–90.
17. IAPWS, 1997. *Revised Release on the IAPS Formulation 1985 for the Viscosity of Ordinary Water Substance*, International Association for the Properties of Water and Steam, Erlangen, Germany, 1997, 15, retrieved from <http://www.iapws.org/relguide/visc.pdf>
18. Kervéan, C., Beddelem, M.H. and O’Neil, K., 2014. CO₂-DISSOLVED: a novel concept coupling geological storage of dissolved CO₂ and geothermal heat recovery—Part 1: Assessment of the integration of an innovative low-cost, water-based CO₂ capture technology. *Energy Procedia*, 63, pp.4508-4518.
19. Kestin, J. and Sengers, J.V.; Kamgar-Parsi, B.; Levelt Sengers, J.M.H., Thermophysical Properties of Fluid H₂O, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 1984, 13, 1, 175-183.
20. McDonald, T.M., Mason, J.A., Kong, X., Bloch, E.D., Gygi, D., Dani, A., Crocella, V., Giordanino, F., Odoh, S.O., Drisdell, W.S. and Vlasisavljevich, B., 2015. Cooperative insertion of CO₂ in diamine-appended metal-organic frameworks. *Nature*, 519(7543), p.303.
21. Peaceman, D.W., 2000. *Fundamentals of numerical reservoir simulation* (Vol. 6). Elsevier.
22. Pekot, L. J., P. Petit, Y. Adushita, S. Saunier, and R. L. De Silva, 2011, Simulation of two-phase flow in carbon di-oxide injection wells: Presented at the Offshore Europe Conference, SPE.
23. Peng, D. Y. and Robinson, D. B. (1976). A New Two-Constant Equation of State. *Industrial and Engineering Chemistry: Fundamentals*. 15: 59–64
24. Plaksina, T., 2011. Modeling effects of coupled convection and CO₂ injection in stimulating geopressed geothermal reservoirs.
25. Pruess, K., 2006. Enhanced geothermal systems (EGS) using CO₂ as working fluid—a novel approach for generating renewable energy with simultaneous sequestration of carbon, *Geothermics*, 35(4), 351-367.

26. Randolph, J.B. and Maar, M.O., 2011. Coupling carbon dioxide sequestration with geothermal energy capture in naturally permeable, porous geologic formations: Implications for CO₂ sequestration, *Energy Procedia*, 4, 2206-2213.
27. Randolph, J.B. and Saar, M.O., 2011. Coupling carbon dioxide sequestration with geothermal energy capture in naturally permeable, porous geologic formations: Implications for CO₂ sequestration. *Energy Procedia*, 4, pp.2206-2213.
28. Randolph, J.B., 2011. Coupling geothermal energy capture with carbon dioxide sequestration in naturally permeable, porous geologic formations—a novel approach for expanding geothermal energy utilization. University of Minnesota.
29. Rettig, M. et al., 2011. Applications of Organic Rankine Cycles, in Proc. *World Engineers Convention, WEC-7-30*, Geneva, 4-9 September, Switzerland 2011
30. Ruan, B., Xu, R., Wei, L., Ouyang, X., Luo, F. and Jiang, P., 2013. Flow and thermal modeling of CO₂ in injection well during geological sequestration. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 19, pp.271-280.
31. Serpen, U. and Aksoy, N., 2016. Developing geothermal energy in Croatia by using old oil wells for power generation. *Proceedings, 41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, February 22-24, 2016
32. Soave, G. Equilibrium Constants from a Modified Redlich-Kwong Equation of State, *Chem. Eng. Sci.*, 1972, 27, 1197-1203
33. Span, R. and Wagner, W., A New Equation of State for Carbon Dioxide Covering the Fluid Region from the Triple-Point Temperature to 1100 K at Pressures up to 800 MPa, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 1996, 25, 6, 1509-1596.
34. Šiljković, Ž., 1995. Utjecaj naftnih i plinskih polja Središnje Hrvatske na stanje okoliša. *Acta Geographica Croatica*, 30(1.), pp.51-58.
35. Thomas, G.W. and Thurnau, D.H., 1983. Reservoir simulation using an adaptive implicit method. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 23(05), pp.759-768.
36. Tran, D., L. Nghiem, V. Shrivasta, and B. Kohse, 2010, Study of geomechanical effects in deep aquifer CO₂ storage: Presented at the 44th U.S. Rock Mechanics Symposium, American Rock Mechanics Association.
37. Vulin, D., Saftić, B. and Macenić, M., 2017. Estimate of dynamic change of fluid saturation during CO₂ injection—Case study of a regional aquifer in Croatia. *Interpretation*, 6(1), pp.SB51-SB64.
38. Wagner, W. and Pruß, A., The IAPWS formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 2002, 31, 2, 387-535

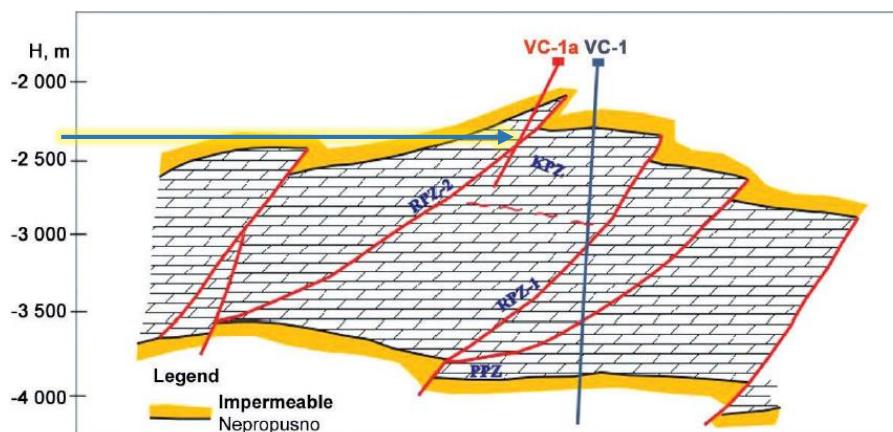
39. Xu, X., Zhao, X., Sun, L. and Liu, X., 2009. Adsorption separation of carbon dioxide, methane and nitrogen on monoethanol amine modified β -zeolite. *Journal of Natural Gas Chemistry*, 18(2), pp.167-172.
40. Zhang, F.Z., Jiang, P.X. and Xu, R.N., 2013. System thermodynamic performance comparison of CO₂-EGS and water-EGS systems. *Applied Thermal Engineering*, 61(2), pp.236-244.

7. Dodatci

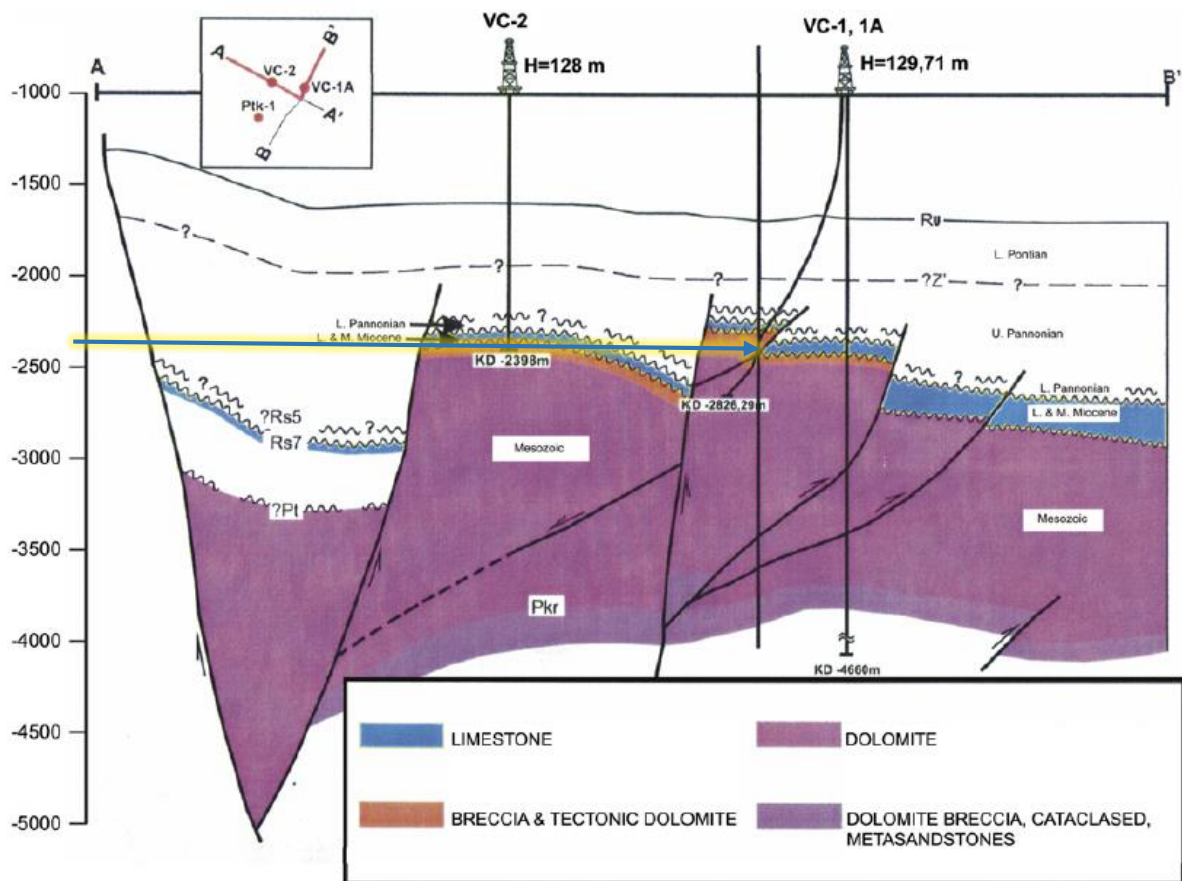
7.1. Grafički prilozii za određivanje dimenzija simulacijskog modela



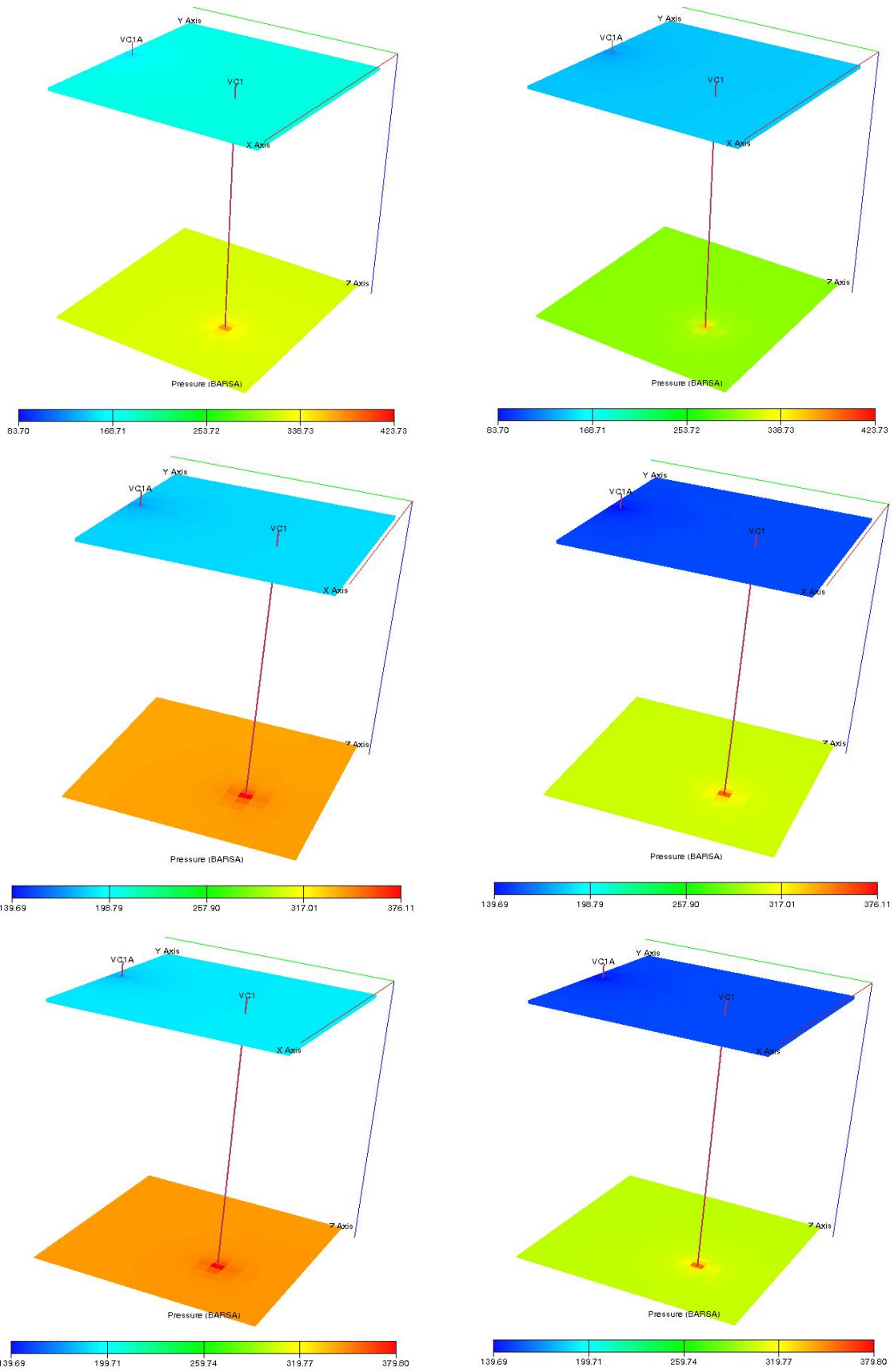
Slika 7.1 Strukturno tj. tektonsko rješenje geotermijskog ležišta Velika Ciglena (Čubrić, 2012)



Slika 7.2 Uzdužni profil s bušotinama VC-1 i VC-1a (Čubrić, 2012). Plavom strelicom označena je dubina na kojoj bušotina VC-1a probija rasjed.



Slika 7.3 Uzdužni profil s bušotinama VC-1 i VC-1a (Guzović i dr., 2010)



Slika 7.4 Tri scenarija (prvi red – scenarij 1, drugi – scenarij 2 i treći – scenarij 3) i tlak u PPZ i KPZ nakon jedne i nakon deset godina.

8. Sažetak

Simulacijska analiza istovremene proizvodnje geotermalne energije i skladištenja CO₂

Na temelju karakteristične hipotetske strukture numeričkom simulacijom ispitane su protočne karakteristike geotermalnog ležišta. Prema dimenzijama, rasjedu i petrofizikalnim svojstvima (propusnost, poroznost), model se može povezati s geotermalnim ležištem Velika Ciglena, te su na taj način simulacijski rezultati protoka topline (tj. pothlađivanja ležišta), injektivnosti utisne i produktivnosti proizvodne bušotine usporedive s publiciranim podacima o tom geotermalnom ležištu. Iako publicirani podatci imaju velikih različitosti (jer su objavljeni u različitim stadijima istraživanja ležišta), detektirano je kako su kritični parametri injektivnost ležišta te preciznije određivanje hidrodinamskih granica i povezanih struktura. Time je po prvi put napravljen dinamički (protočni) simulacijski model za geotermalno ležište u Republici Hrvatskoj, a poznate spoznaje nadopunjene su analizom mogućeg utiskivanja CO₂. Ustanovljeno je kako je vidljiv efekt skladištenja CO₂ do njegovog prodora u proizvodnu bušotinu, i da je najznačajniji u prve dvije godine, iako uočljiv i prvih deset godina istovremenog utiskivanja i proizvodnje fluida. Postignut je efekt popuštanja tlaka na utisnoj bušotini za CO₂, zbog istovremene proizvodnje na drugoj bušotini te zbog povećanja zasićenja i posljedično efektivne propusnosti za CO₂ fazu. Prikazan je efekt pothlađivanja ležišta, koji je značajan jedino prilikom utiskivanja vode, dok se u slučaju utiskivanja i proizvodnje CO₂ taj efekt ne odražava na temperaturu proizvedenog fluida. Finalno, rađena je eksergetska analiza efikasnosti ležišta, koje u ovakvom slučaju služi kao izmjenjivač topline. Pri tome je izrađen numerički proračun pada tlaka CO₂ u proizvodnoj i utisnoj bušotini kako bi se procijenilo entalpije i entropije za eksergetsku analizu. Ponovo se pokazalo kako eksergetska snaga ponajviše ovisi o protočnim karakteristikama ležišta, te padovima tlaka u bušotini. Za procjenu cjelokupnog sustava pri zadanim tlakovima potrebno je optimizirati za svaki slučaj snage pumpi i kompresora, međutim njihova detaljna analiza nadilazi širinu ovog rada. Tako je, uz zanemarivanje gubitaka u bušotinskim i površinskim segmentima proizvodnje eksergije pokazano kako utiskivanje CO₂ treba uzimati u obzir u ovakvim sustavima, pošto eksergetska snaga pri istovremenom utiskivanju i proizvodnji CO₂ u periodu od 20 godina ima uglavnom trend porasta, dok u slučaju proizvodnje geotermalne vode ima tendenciju konstantnog pada.

Ključne riječi:

Geotermalno polje, termalni simulacijski model, Velika Ciglena, skladištenje CO₂, eksergija

Autor: Lejla Muhasilović

9. Summary

Numerical simulation analysis of coupled geothermal energy utilization and CO₂ storage

Based on the characteristic hypothetical structure, numerical simulation was used to investigate the flow characteristics of the geothermal reservoir. According to its dimensions, fault and petrophysical properties (permeability, porosity), the model can be linked to the geothermal reservoir Velika Ciglena. Therefore, the simulation results of the heat flow (i.e., the cooling of the reservoir), the injectivity of the injection well and productivity of the production well can be compared to the published data on this geothermal reservoir. Although the published data has large differences as a result of being published at different stages of the reservoir characterization, injectivity, structure connectivity and hydrodynamic boundaries are found to be critical parameters in this data. For this reason, a first ever dynamic simulation model for the geothermal reservoir in the Republic of Croatia was made and the existing data was supplemented by an analysis of possible CO₂ injection. It has been established that the effect of CO₂ being trapped is expressed the most in the first two years of simultaneous injection and production, until CO₂ has reached to the production well. Nevertheless, this effect is also evident in the first ten years of simultaneous injection and production of fluids. The effect of a drop in pressure was evident in the CO₂ injection well, due to gas production at the production well caused by the increase in CO₂ saturation and consequently the effective CO₂ permeability increase. The cooling effect of the reservoir is also shown in the model, and is significant only when the water is injected, on the other hand, when using CO₂ as a working fluid, it does not reflect the temperature of the fluid produced. Ultimately, an exergy analysis of the reservoir efficiency was performed, which in this case was used as a heat exchanger. A numerical calculation of the drop in CO₂ pressure in the production and injection well was made in order to evaluate enthalpy and entropy for exergy analysis. It has been shown again, that the exergy power depends largely on flow characteristics (of the reservoir) and the drop in pressure in the well. To evaluate the overall system at a given pressure, it would be necessary to optimize (for each case) the power of the pump and compressor, but this kind of detailed analysis goes beyond the scope of this work. Therefore, with neglected losses in wells and surface segments of exergy production, it has been shown that CO₂ injection should be taken into account in such systems, since the exergy power at simultaneous injection and production of CO₂ over the period of 20 years has a major upward trend, while in case of geothermal water production has a tendency of constant fall.

Key words: Geothermal reservoir, thermal simulation model, Velika Ciglena, CO₂ sequestration, exergy

Author: Lejla Muhasilović