

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET  
STUDIJ NAFTNOG RUDARSTVA

**UTJECAJ HETEROGENOSTI LEŽIŠTA NA ŠIRENJE UTISKIVANOG CO<sub>2</sub>**

Diplomski rad

**Luka Biočić**  
**N 2280**

Zagreb, 2012.

## UTJECAJ HETEROGENOSTI LEŽIŠTA NA ŠIRENJE UTISKIVANOG CO<sub>2</sub>

**Luka Biočić**

Diplomski rad je izrađen na: Sveučilištu u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu  
Zavodu za naftno inženjerstvo  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### **Sažetak**

Utiskivanje CO<sub>2</sub> u slane akvifere je jedan od načina na kojim bi se moglo riješiti pitanje viška emisija u Hrvatskoj. Kako bi utiskivanje i uskladištenje bili uspješni bitno je provesti simulacije utiskivanja u potencijalne akvifere radi utvrđivanja kretanja CO<sub>2</sub> u podzemlju. U ovom radu se promatra utjecaj heterogenosti na utiskivanje CO<sub>2</sub> u slani akvifer. Numerički simulator koji se koristio za to je Schlumberger ECLIPSE 300, i opcija koju podržava specijalizirana za simulaciju utiskivanja u slane akvifere zvana CO2STORE. Razmatrani su parametri koji se mogu povezati s koeficijentom heterogenosti: raširenost CO<sub>2</sub> u akviferu i vremena proboja CO<sub>2</sub> do određenih udaljenosti od mjesta utiskivanja.

Ključne riječi: ugljični dioksid, geološko uskladištenje CO<sub>2</sub>, propusnost, heterogenost  
Dykstra-Parsonov koeficijent heterogenosti

Diplomski rad sadrži: 34 stranica, 8 tablica, 13 slika i 40 referenci

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentor: Dr. sc. Domagoj Vulin, docent RGNF-a

Ocjenjivači: Dr. sc. Domagoj Vulin, docent RGNF-a  
**Dr. sc. Miroslav Golub, redoviti profesor RGNF-a**  
Dr. sc. Tomislav Kurevija, docent RGNF-a

**Datum obrane: 05. srpanj 2012.**

## **HETEROGENEITY INFLUENCE ON MIGRATION OF INJECTED CO<sub>2</sub>**

**Luka Biočić**

Thesis completed in: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Petroleum Engineering Department  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### **Abstract**

Injecting CO<sub>2</sub> into saline aquifers is one of the ways that the problem of excess CO<sub>2</sub> emissions could be solved. To have success in injecting and storing CO<sub>2</sub> it is important to conduct simulations of the injection process in the potential aquifers for the purpose of determining underground CO<sub>2</sub> migration. In this work, the influence of heterogeneity on CO<sub>2</sub> injection into saline aquifers is examined. The numerical simulator from the Schlumberger company named ECLIPSE 300 and its CO2STORE option specifically used for simulating CO<sub>2</sub> injection into deep saline aquifers was used. Parameters which can be linked to the heterogeneity were considered: spreading of CO<sub>2</sub> inside the aquifer and the time it took CO<sub>2</sub> to penetrate certain distances from the point of injection.

Keywords: carbon dioxide, geological CO<sub>2</sub> storage, permeability, heterogeneity, Dykstra-Parsons heterogeneity coefficient

Thesis contains: 34 pages, 8 tables, 13 figures and 40 references

Original in: Croatian

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

Supervisor: PhD. Domagoj Vulin, Assistant Professor

Reviewers: PhD. Domagoj Vulin, Assistant Professor  
PhD. Bruno Saftić, Associated Professor  
PhD. Tomislav Kurevija, Assistant Professor

Date of defense: 5<sup>th</sup> of July 2012.

## SADRŽAJ

Popis slika _____	4
Popis tablica _____	5
Popis oznaka: _____	6
<b>1. UVOD</b> _____	<b>1</b>
<b>2. TEORIJSKE POSTAVKE</b> _____	<b>5</b>
2.1. Heterogenost _____	5
2.2. Stlačivost pora stijene _____	5
2.3. Relevantna istraživanja vezana uz utiskivanje CO <sub>2</sub> _____	6
<b>3. Struktura ulazne datoteke za E300 model</b> _____	<b>8</b>
3.1. Općenito o pisanju ECLIPSE 300 ulazne datoteke _____	8
3.2. Odjeljenje RUNSPEC _____	8
3.3. Odjeljenje GRID _____	10
3.4. Odjeljenje PROPS _____	11
3.5. Odjeljenje SOLUTION _____	13
3.6. Odjeljenje SUMMARY _____	15
3.7. Odjeljenje SCHEDULE _____	15
<b>4. Rezultati simulacije CO<sub>2</sub> skladištenja</b> _____	<b>20</b>
4.1. Ulazni podaci _____	20
4.2. Rezultati simulacije _____	21
<b>5. Zaključak</b> _____	<b>25</b>
<b>6. LITERATURA</b> _____	<b>27</b>
<b>7. Dodaci</b> _____	<b>29</b>

## Popis slika

<b>Slika 1.1. Projekcija emisija stakleničkih plinova u Hrvatskoj do 2020. G (MZOPUG, 2006.)</b>	<b>1</b>
<b>Slika 1.2. Projekcija emisije CO<sub>2</sub> iz elektroenergetskog sektora za tri razmatrana scenarija (Jurić i Tot, 2007.)</b>	<b>2</b>
<b>Slika 1.3. Konture regionalnih akvifera (Saftić i dr. 2008.)</b>	<b>3</b>
<b>Slika 4.1. Promjene zasićenja s CO<sub>2</sub> u vremenu (model 6).</b>	<b>21</b>
<b>Slika 4.2. Koeficijent heterogenosti u odnosu na širenje. Svaki model predstavlja jedan VDP. Širenje je promatrano za svaki VDP i nakon 5 različitih razdoblja: 2015.g. (utiskivanje), 2025.g. (utiskivanje), 2035.g. (utiskivanje), 2045.g. (širenje 5 godina nakon utiskivanja), 4000g. širenje nakon uočljivih količina otopljenog CO<sub>2</sub></b>	<b>23</b>
<b>Slika 4.3. Širenje u odnosu na prosječnu propusnost. Kako je raspodjela podataka o propusnosti kvadratna, nije bilo moguće dobiti modele različitih koeficijenata heterogenosti, a sličnih prosječnih propusnosti</b>	<b>23</b>
<b>Slika 4.4. Brzina horizontalnog širenja CO<sub>2</sub> u devetom proslojku (dxy) i brzina vertikalnog širenja (dz)</b>	<b>24</b>
<b>Slika 4.5. Brzina ukupnog širenja u odnosu na koeficijent heterogenosti, VDP</b>	<b>24</b>
<b>Slika D1. Promjene zasićenja s CO<sub>2</sub> u vremenu za (redom s lijeva na desno) 2015., 2025., 2035., 2040., 2045. i 4000. g. (model 1).</b>	<b>30</b>
<b>Slika D2. Promjene zasićenja s CO<sub>2</sub> u vremenu za (redom s lijeva na desno) 2015., 2025., 2035., 2040., 2045. i 4000. g. (model 2).</b>	<b>31</b>
<b>Slika D3. Promjene zasićenja s CO<sub>2</sub> u vremenu za (redom s lijeva na desno) 2015., 2025., 2035., 2040., 2045. i 4000. g. (model 3).</b>	<b>32</b>
<b>Slika D4. Promjene zasićenja s CO<sub>2</sub> u vremenu za (redom s lijeva na desno) 2015., 2025., 2035., 2040., 2045. i 4000. g. (model 4).</b>	<b>33</b>
<b>Slika D5. Promjene zasićenja s CO<sub>2</sub> u vremenu za (redom s lijeva na desno) 2015., 2025., 2035., 2040., 2045. i 4000. g. (model 5).</b>	<b>34</b>

*Popis tablica*

<b>Tablica 1.1. Najznačajniji točkasti izvori CO<sub>2</sub> izdvojeni za EU Geocapacity (RGNf, 2009) ____</b>	<b>1</b>
<b>Tablica 3.1. Faze u kojima se mogu pojaviti komponente. _____</b>	<b>18</b>
<b>Tablica 4.1 Relativne propusnosti vode. _____</b>	<b>20</b>
<b>Tablica 4.2 Relativne propusnosti i kapilarni tlakovi CO<sub>2</sub>. _____</b>	<b>20</b>
<b>Tablica 4.3. Početni komponentni sastav vode _____</b>	<b>21</b>
<b>Tablica 4.4. Analiza širenja CO<sub>2</sub> za model 1 _____</b>	<b>22</b>
<b>Tablica 5.1. Usporedba procjena efektivnog kapaciteta (EU Geocapacity, 2009) i simuliranog modela _____</b>	<b>25</b>
<b>Tablica D.1. Brzine širenja CO<sub>2</sub> _____</b>	<b>29</b>

**Popis oznaka:**

$A$	=	površina ( $m^2$ )
$C$	=	koeficijent efikasnosti uskladištenja, dij. jed.
$c_p$	=	koeficijent kompresibilnosti stijene, ( $bar^{-1}$ )
$h$	=	debljina sloja (m)
$k_A$	=	aritmetička sredina koeficijenta propusnosti, $m^2$
$k_h$	=	harmonijska sredina koeficijenta propusnosti, $m^2$
$k_{rg}$	=	relativna propusnost plina, dio cjeline
$k_{rw}$	=	relativna propusnost vode, dio cjeline
$L$	=	dužina (m)
$m$	=	masa u (kg), ili (Mt)
$P_{cog}$	=	kapilarni tlak (bar)
$p$	=	tlak, porni tlak (bar)
$Q$	=	protok ( $m^3/dan$ )
$S_g$	=	zasićenje plinom, dio cjeline ili %
$S_w$	=	zasićenje vodom, dio cjeline ili %
$T$	=	vrijeme (dan),(mjesec)
$t$	=	temperatura u ( $^{\circ}C$ )
$V$	=	volumen ( $m^3$ )
$V_{DP}$	=	Dykstra-Parsonov koeficijent heterogenosti
$V_p$	=	volumen pora, ( $m^3$ )
$x$	=	očekivana vrijednost
$z$	=	molni udio, dio cjeline ili %
$\sigma$	=	standardna devijacija
$\phi$	=	poroznost, dio cjeline ili %

# 1. UVOD

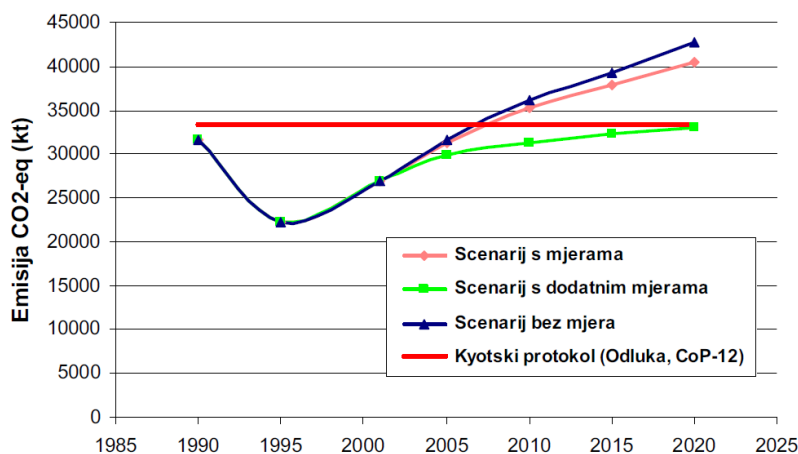
Geološko uskladištenje CO<sub>2</sub> jedna je od perspektivnih metoda zbrinjavanja CO<sub>2</sub> zarobljenog iz velikih industrijskih postrojenja kao što su termoelektrane, čeličane ili rafinerije.

Takvi važniji tzv. točkasti izvori u Republici Hrvatskoj navedeni su u izvještajima za GeoCapacity projekt (tablica 1.1.):

Tablica 1.1. Najznačajniji točkasti izvori CO<sub>2</sub> izdvojeni za EU Geocapacity (RGNf, 2009)

tvrtka	grad	Emisija CO <sub>2</sub> , kt	tehnologija
HEP d.d.	Plomin	1878	El. struja - parne turbine
HEP d.d.	Rijeka	451	El. struja - parne turbine
HEP d.d.	Sisak	546	El. struja - parne turbine
HEP d.d.	Zagreb	854	kombinirano toplana i el. struja
HEP d.d.	Zagreb	423	kombinirano toplana i el. struja
HEP d.d.	Osijek	160	kombinirano toplana i el. struja
HEP d.d.	Zagreb	8	kombinirano toplana i el. struja
INA d.d.	Molve	684	CPS - prerada plina

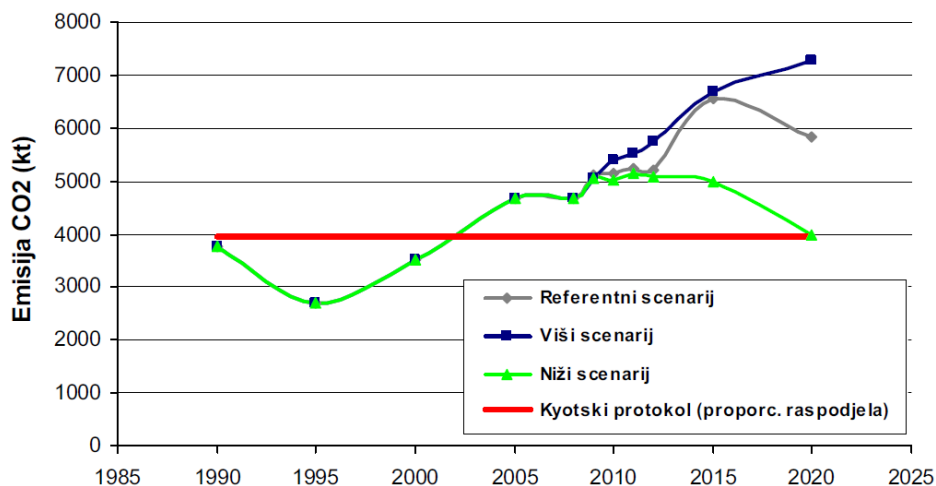
Kyoto protokol prihvaćen je na 3. zasjedanju država stranaka Konvencije (CoP-3) u prosincu 1997. godine. Protokolom se propisuju obveze smanjivanja ukupne antropogene emisije stakleničkih plinova (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFC, PFC i SF<sub>6</sub>) od najmanje 5.2 % računajući kao prosječnu emisiju u razdoblju od 2008. do 2012. godine, u odnosu na referentnu godinu. Nakon ratifikacije ugovora, tj. nakon konferencije stranaka UNFCCC konvencije (CoP-12, 2006.g.), Hrvatskoj je dopušteno povećanje emisije referentne godine u iznosu od 3.5 Mt ekvivalentne emisije.



Slika 1.1. Projekcija emisija stakleničkih plinova u Hrvatskoj do 2020. G (MZOPUG, 2006.)



Ovisno o pretpostavljenoj dinamici ulaska u sustav novih hidroelektrana, termoelektrana i vjetroelektrana, definirana su tri scenarija razvoja elektroenergetskog sektora (Jurić i Tot, 2007.): referentni scenarij, viši scenarij (veće emisije CO<sub>2</sub>) i niži scenarij (manje emisije CO<sub>2</sub>).



Slika 1.2. Projekcija emisije CO<sub>2</sub> iz elektroenergetskog sektora za tri razmatrana scenarija (Jurić i Tot, 2007.)

Jurić i Tot (2007.) također izvještavaju kako bi dozvoljena kvota emisije CO<sub>2</sub> elektroenergetskog sektora mogla biti približno 4 Mt (slika 1.2.). Iz referentnog scenarija može se dakle očitati kako bi HEP-ove elektrane, kao točkasti izvori trebale smanjiti emisiju za približno 1.2 Mt (za usporedbu sa simuliranim podacima, preračunato u volumen pri standardnim uvjetima iznosi 83022 m<sup>3</sup>/dan) u 2013. g. i 6.5Mt u 2015 (449703 m<sup>3</sup>/dan).

Procjene utiskivanja CO<sub>2</sub> u duboke slane akvifere u Hrvatskoj svodile su se uglavnom na procjenu efektivnog kapaciteta (EU Geocapacity, RGNf, 2009).

Efektivni kapacitet predstavlja dio pornog prostora koji može biti fizički *dohvaćen* utjecajima utiskivanog CO<sub>2</sub> (Vulin, 2010). Za računanje efektivnog kapaciteta koristi se pretpostavka efikasnosti utiskivanja (i zadržavanja) CO<sub>2</sub> u geološke formacije, tj. koeficijent učinkovitosti skladištenja (eng. *storage efficiency coefficient*, *C*) kako bi se računalo masu CO<sub>2</sub> koji se može utisnuti u pore:

$$m_{CO_2} = \text{volumen pora} \times \text{gustoća } CO_2 \text{ (pri ležišnim uvjetima)} \times C \quad (1.1)$$

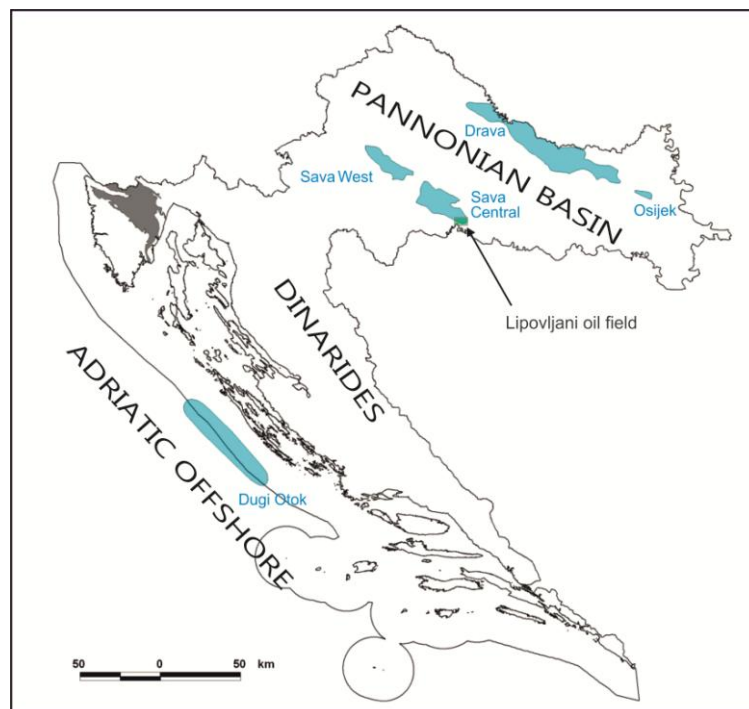
gdje je *C* koeficijent efikasnosti uskladištenja. Za akvifere, iz kojih nisu proizvedeni ugljikovodici niti voda, koeficijent *C* će biti jako malen pošto se očekuje brzi porast tlaka, a time i veći troškovi utiskivanja te mogućnost loma pokrovnih stijena (Vulin, 2010).

Koeficijent  $C$  se nakon kvalitativnih, kvantitativnih i statističkih analiza obično dogovorno određuje da je  $C \approx 0.03$ .

Preporuke za odabir povoljnih formacija za uskladištenje  $\text{CO}_2$  su da se formacije nalaze na dubinama većim od 1000 m kako bi  $\text{CO}_2$  nakon utiskivanja ostao u superkritičnom ili tekućem području i tako imao puno veću gustoću nego kad je u plinovitom stanju.

Pri tome se još spominju transportna svojstva superkritičnog  $\text{CO}_2$  pošto je viskoznost superkritičnog  $\text{CO}_2$  sličnija viskoznosti plina, nego gustoći tekuće faze.

Iznad formacije regionalnog akvifera u koju se predviđa utiskivanje treba biti kompaktna, nepropusna krovina. Pri tome se posebno razmatra problem propuštanja  $\text{CO}_2$  u krovini zbog povećanja tlaka ili zbog kapilarnog povlačenja.



Slika 1.3. Konture regionalnih akvifera (Saftić i dr. 2008.)

Prema spomenutim kriterijima izrađena je karta regionalnih akvifera (slika 1.3.) te su računati i publicirani efektivni kapaciteti svakog akvifera u okviru projekta EU Geocapacity (2009).

Ovakve prve procjene temeljene su na procjeni volumena u kojem se može zadržati  $\text{CO}_2$ , bez razmatranja protočnih karakteristika akvifera.

Osnovna hipoteza diplomskog rada glasi: prostorna rasprostranjenost  $\text{CO}_2$  može se povezati sa stupnjem heterogenosti stijene.

Druga hipoteza glasi:  $\text{CO}_2$  je moguće utiskivati na takav način, da bez obzira na izolatorsku kvalitetu krovinskih naslaga neće postojati opasnost od propuštanja.

Za provjeru hipoteza, pretpostavio se pojednostavljeni ležišno simulacijski model koji predstavlja slani akvifer. Pri tome je korišten stohastički pristup pri definiranju heterogenosti propusnosti generiranjem 6 setova podataka za testiranje osjetljivosti promatranih parametara utiskivanja CO<sub>2</sub> u odnosu na različite stupnjeve heterogenosti.

Ostali parametri su za svaki promatrani slučaj raspona propusnosti bili konstantni. U obzir su uzeti: topivost CO<sub>2</sub> u mineraliziranoj slanoj vodi u akviferu, kompresibilnost pora, razlika vertikalne i horizontalne propusnosti, relativne propusnosti za CO<sub>2</sub> i slanu vodu, kapilarni tlakovi prilikom dreniranja (istiskivanja močive faze nemočivom), hidrodinamičko zarobljavanje (simulacija nepokretnog CO<sub>2</sub>) i termodinamičke (fazne promjene) prilikom utiskivanja.

Mehanizmi zarobljavanja koji nisu uzeti u obzir su: stratigrafsko i mineralno zarobljavanje. U svrhu analize koristio se komponentni (engl. *compositional*) numerički računalni simulator tvrtke Schlumberger (ECLIPSE 300 ili skraćeno E300). Komponentnim simulatorom moguće je za svaki element diskretiziranog modela predviđati termodinamičke promjene dvofaznog sustava, uključujući i sastave plinske i tekuće faze.

## 2. TEORIJSKE POSTAVKE

### 2.1. Heterogenost

Heterogenost, tj. varijacije propusnosti i poroznosti pješčenjaka statistički je proučavao Law (1943). Došao je do zaključka kako, uz manja odstupanja, sortirane grupe poroznosti i propusnosti daju zadovoljavajuće logaritamske i aritmetičke učestalosti normalnih raspodjela. Definiranje raspodjela propusnosti i pravilnosti tih raspodjela može biti korisno za primjenu u slučajevima kad za procjenu heterogenosti ležišta nisu dostupne opsežne analize stijena. Raspršenost podataka se opisuje koeficijentom varijacije  $V$ :

$$V = \frac{\sigma}{x} \quad (2.1.)$$

$\sigma$  = standardna devijacija,

$x$  = očekivana vrijednost

Jedan od poznatijih načina kvantificiranja varijacije propusnosti u ležištu je pomoću Dykstra – Parsonovog koeficijenta ( $V_{DP}$ ). Modifikacija, koja omogućuje računsko određivanje  $V_{DP}$  je modifikacija Warrena i Cosgrovea (1964):

$$V_{DP} = 1 - \frac{1}{\exp\left(\ln \frac{k_A}{k_h}\right)^{0.5}}$$

$k_A$  = aritmetička sredina koeficijenta propusnosti,  $m^2$

$k_h$  = harmonijska sredina koeficijenta propusnosti,  $m^2$

### 2.2. Stlačivost pora stijene

Utiskivanjem fluida u porni prostor, dolazi do promjene volumena pora. Na diskretizirani element stijene djeluju vektori sila koje su posljedica petrostatskog tlaka, i pornog tlaka. Razlika petrostatskog tlaka i pornog tlaka je efektivni tlak. Većina volumnih promjena pore uzrokovana je mikroskopskim preslagivanjem zrna u stijeni promjenom tlaka, dok je sama kompresibilnost zrna stijene zanemariva u odnosu na volumen pora. U literaturi se zbog toga

često posistovjećuje ukupnu kompresibilnost stijene i kompresibilnost pora. Kompresibilnost pora je promjena volumena pora stijena promjenom efektivnog tlaka u stijeni:

$$c_p = -\left(\frac{dp}{dV_p}\right)/V_p \text{ bar}^{-1}$$

Gdje su:

$c_p$  - koeficijent kompresibilnosti stijene,  $\text{bar}^{-1}$

$p$  – porni tlak, bar

$V_p$  – volumen pora,  $\text{m}^3$

### **2.3. Relevantna istraživanja vezana uz utiskivanje CO<sub>2</sub>**

Koide i dr. (1992), Gunter i dr. (1993), Holtz i dr. (2002), Flett i dr. (2005), Bachu i dr. (2007). proučavali su različite mehanizme zarobljavanja ugljikovog (IV) oksida prilikom njegovog utiskivanja i uskladištenja u slane vodonosnike. (strukturno i stratigrafskog zarobljavanje, (*eng. structural and stratigraphic trapping*), zarobljavanje zbog njegove topljivosti u vodenoj otopini (*eng. solubility trapping*), zarobljavanje prilikom kemijskih reakcija sa stjenskim mineralima (*eng. mineral trapping*) i hidrodinamičko zarobljavanje (*eng. hydrodynamical trapping*).

Proučavanje utiskivanja CO<sub>2</sub> za tercijalne metode dodatnog pridobivanja nafte i plina razmatrano je u radovima Hattenbacha i dr. (1998), Jessena i dr. (2001), Oldenburga i Bensaona (2002), Agustssona i Grinestaffa (2004), kao i raznim SPE-ovim publikacijama SPE Reprint Series (1999), SPE Monograph Series (2002).

Numeričke metode za simuliranje utiskivanja CO<sub>2</sub> u geološke formacije proučavali su Lindeberg (1997), Pruess i Garcia (2002), Garcia (2003) i Bielinski (2006). Usporedbu različitih primjenjenih pristupa za simuliranje utiskivanja CO<sub>2</sub> u geološke formacije su obradili Pruess i dr. (2002), Bielinski .

Od malobrojnih eksperimentalnih podataka dostupna je publicirana baza podataka Properties of Oil Reservoirs in the U.S.A. (NPC, 1984), mjerenja kapilarnog tlaka u odnosu na zasićenje faza za sustav CO<sub>2</sub> - H<sub>2</sub>O Plugua i Bruininga (2007) i Benniona and Bachua (2008). Zbog nedostataka eksperimentalnih podataka nemoguće je kvalitetno testirati različite metode i pristupe koji se bave problematikom utiskivanja CO<sub>2</sub> u geološke formacije.

Kumar i dr (2005), Bachu i dr. (2007), Hurter i dr. (2007), Ülker i dr. (2007), Yang i dr. (2010) proučavali su utjecaj raznih parametara poput područja obuhvata utisne bušotine,

dubine utisne bušotine, heterogenosti ležišta, promjena poroznosti i propusnosti, temperature, tlaka, saliniteta i petrografskog sastava na potencijal skladištenja CO<sub>2</sub> u slane akvifere.

Castinel i sr (1977), Ephere i dr (1977), Riza u Tchelepi (2002), Ennis-Kinhg i dr. (2003), Flett i dr (2004), Brayant i dr (2006), Yang i dr. (2010) Taheri i dr. (2012) su posebno proučavali utjecaj heterogenosti i anizotropnosti ležišta na mehanizme skladištenja.

### 3. Struktura ulazne datoteke za E300 model

#### 3.1. Općenito o pisanju ECLIPSE 300 ulazne datoteke

Većina postojećih komercijalnih ležišnih numeričkih simulatora temelji se na računalnom kodu pisanom prije nekoliko desetljeća. Simulacijski računalni paketi se sastoje najčešće od (1) preprocesorskih alata za pripremu podataka, (2) procesorskih alata, tj. samih simulacijskih modula te (3) post-procesorskih alata pomoću kojih se najčešće prikazuju i analiziraju rezultati. Ulazne datoteke za simulacijske module su u ASCII formatu, a najveću fleksibilnost moguće je ostvariti izravnim upisivanjem komandi u ulaznoj datoteci.

Pri tome postoji niz pravila za strukturu ulazne datoteke (kako je i običaj za ulazne datoteke starijih aplikacija), npr. ulazni podaci se smiju pisati samo do 76-e kolone inače ih program ne očitava, ključne riječi koje mogu imati više grupa podataka se nakon unosa svake grupe završavaju znakom „/“ i na kraju za kraj ključne riječi još jednim „/“ (općenito, jedna od najčešćih grešaka koje program javlja obično je nedostatak „/“ na kraju ključne riječi ispod svih grupa podataka, tj. grešaka u sintaksi). Također, korisna ključna riječ, a spada u SCHEDULE odjeljenje je NOSIM – uključanjem te opcije program samo provjerava greške pri unosu podataka, a ne radi cijelu simulaciju što štedi vrijeme, pošto za jedan simulacijski slučaj simulacija traje i do pola sata. Ukoliko se bilo koji redak unosa želi deaktivirati ili se želi upisati neki tekst koji program ne očitava nego služi za unos komentara, na početak retka se stave dva minusa „--“, . Iako su ovdje nabrojane sve ključne riječi i postavke koje su korištene, te iste riječi imaju još mnogo drugih postavki za druge slučajeve. Kako bi se moglo pratiti što je zapravo tehnički rađeno pomoću simulatora, nabrojat će se ključne riječi koje su korištene:

#### 3.2. Odjeljenje RUNSPEC

Odjeljenje **RUNSPEC** je obvezno odjeljenje u kojoj se definiraju osnovna svojstva modela.

Korištene su slijedeće ključne riječi:

**METRIC** - Određuje metrički sustav jedinica

**OPTIONS3** - Ključna riječ kojom se aktiviraju specijalne postavke unutar određenih dijelova E300. Ove opcije su uglavnom privremene i pokusne prirode, ili omogućuju uskladivost sa ranijim inačicama programa. Podaci se unose u obliku cijelih brojeva koji aktiviraju posebne postavke u našem primjeru prvih 7 je uzeto pod osnovne postavke ili neaktivno a opcija 8 je aktivirana i ona omogućuje da se

kapilarni tlak voda plin sustava dodaje vodenoj fazi prije nego plinovitoj. Npr.:

### OPTIONS3

7\* 1 /

**DIFFUSE** – koristi se difuzija i koeficijenti difuzije se uvrštavaju u **PROPS** odjeljenju pomoću ključnih riječi **DIFFGAS** ili **DIFFCOIL** sama ključna riječ **DIFFUSE** nema nikakve ulazne podatke.

**COMPS** – Ova ključna riječ aktivira kompozicijski način rada i alternativa je **BLACKOIL** načinu koji je osnovna postavka programa. **COMPS** ima jedan set podataka koji se odnosi na broj komponenti u sustavu. Npr.:

### COMPS

4 /

**DIMENS** – Ova ključna riječ definira osnovnu veličinu simulacijske mreže i ima unos koji se sastoji od tri broja koji se odnose na broj ćelija u X, Y, i Z smjeru. Npr.:

### DIMENS

14 14 10 /

**TABDIMS** - Ključna riječ se odnosi na opis veličine tablica zasićenja koje se koriste u simulaciji npr:

1. Broj tablica zasićenja.
2. Broj PVT tablica.
3. Maksimalni broj redaka u tablicama zasićenja, osnovna postavka 50.
4. Maksimalni broj redaka u pvt tablicama, osnovna postavka 50.

### TABDIMS

1 1 40 40 /

**FULLIMP** - Ova ključna riječ aktivira opciju implicitnog rješenja. Sama ključna riječ nema dodatnih podataka koje se unose, često je neophodna u E300 simulacijama pri velikim protocima te je osnovna postavka u **BLACKOIL**, **THERMAL**, i Coal bed methane simulacijama.

**SOLID** - ukazuje na postojanje krute faze (čestica). Ne može se koristiti sa **BLACKOIL** simulacijama. Sama ključna riječ nema uz sebe vezane podatke. U nekim simulacijama postoje čvrste čestice tokom cijele simulacije(npr. soli) koje mogu preći u tekuću fazu kemijskom reakcijom. Suspendirane čvrste čestice se prenose protokom ili se adsorbiraju na ležišnu stijenu te na taj način smanjuju propusnost i porni volumen.



**START** - zadaje datum početka simulacije, te svi datumi izvještaja uneseni kod komande **DATES** u odjeljenju **SCHEDULE** moraju biti kasniji od datuma **START**. Uz komandu se unosi broj dana mjesecu, zatim ime mjeseca (JAN, FEB, MAR, APR, MAY, JUN, JUL, AUG, SEP, OCT, NOV, DEC), zatim godina. Npr.:

**START**

1 AUG 2012 /

**UNIFOUT** - Ova ključna riječ ukazuje da se izlazne datoteke spajaju u zajedničku datoteku umjesto da se stvara posebna datoteka za svaki datum izvještaja. Sama ključna riječ nema uza sebe vezane podatke za unos.

**UNIFIN** - Ova ključna riječ ukazuje da se ulazne datoteke (npr restart datoteke) spajaju u zajedničku datoteku

### **3.3. Odjeljenje GRID**

Odjeljenje u kojem se nalazi statički opis ležišta, geometrija mreže, propusnosti, poroznosti, efektivna debljina itd.

**DX, DY, DZ** – Ključnim riječima se određuje veličina ćelija u pojedinim smjerovima. Iza svake ide po jedan realni broj za svaku ćeliju. Vrijednosti koje se ponavljaju može se množiti. Sam ECLIPSE vrijednosti ćelija očitava prvo u smjeru X onda Y i na kraju Z. Npr.za simulaciju se odabralo model u kojem sve ćelije imaju širinu 164 m i visinu 55 m:

**DX**

1960\*164 /

**DY**

1960\*164 /

**DZ**

1960\*55 /

**TOPS** – vrijednosti dubine gornje plohe svake od ćelija. Minimum koji se mora unijeti kako bi simulacija radila su vrijednosti dubina gornje plohe ćelija početne ravnine (k=1) na temelju kojeg program sam računa ostale uz pomoć debljine slojeva. Npr., definirana je krovina, zadavanjem 1700 m dubine najvišljeg niza ćelija:

**TOPS**

196\*1700 /

**PORO** – Ključnom riječi se zadaju poroznosti za ćelije na način da se za svaku ćeliju unosi po jedan realni broj, s time da ECLIPSE vrijednosti ćelija očitava prvo u smjeru X onda Y pa na kraju Z. Npr.:

**PORO**

1960\*0.18

**PERMX, PERMY, PERMZ** – Ključne riječi služe za unos propusnosti ćelija u smjeru X, Y i Z. Učitavanje podataka program vrši isto kao u slučaju TOPS , DX, DY, DZ. Podaci za PERMX i PERMY su generirani slučajnim brojem za svaku od 1960 ćelija, u određenom rasponu i tako da se može testirati 6 slučajeva u kojima će koeficijent heterogenosti VDP biti uočljivo različit. Npr.:

**PERMX**

356,343,210,196,121,424,74,49,259,326,52,111,122,481

462,319,217,301,210,367,109,306,81,218,184,89,249,294...

itd.

/

**COPY**

**PERMX PERMY /**

/

Vertikalne propusnosti su uzimane 10x manje od horizontalnih:

**COPY**

**PERMX PERMZ /**

/

**MULTIPLY**

**PERMZ 0.1 /**

/

**INIT** – Ključna riječ kojom se ulazni podaci iz odjeljenja GRID i PROPS upisuju u izlaznu datoteku.

### **3.4. Odjeljenje PROPS**

Odjeljenje za PVT podatke, relativne propusnosti i kapilarne tlakove, koeficijente difuzije, itd.

**CNAMES** – Ključna riječ kojom se zadaju imena komponenata u svrhu izvještaja. Iza riječi idu imena ograđena navodnicima i razmacima. Npr.:

**CNAMES**

'H2O' 'CO2' 'NaCl' 'CaCl2' /

**ZMFVD** – Ukupni sastav fluida vezan uz dubinu za svako ravnotežno područje. Svaka tablica je za jedno područje i odijeljena je svojim / ) Prva kolona su dubine koje se trebaju jednoliko povećavati, druga je molni udio vode, treći CO<sub>2</sub>, četvrti NaCl i peti CaCl. Zbroj svih molnih udjela treba iznositi 1. Npr.:

**ZMFVD**

-- dubina	H2O	CO2	NaCl	CaCl2
1411.4	0.9109	0.0	0.0741	0.015
1413.227	0.9109	0.0	0.0741	0.015 /

**DIFFCWAT** – Ova ključna riječ je specifična za **GASWAT**, **CO2STORE** i **GASSOL**. Njome se utvrđuju koeficijenti difuzije vodene faze za svaku komponentu u kompozicijskoj simulaciji. Koeficijenti difuzije vode su obično manji od plinskih. Podaci se unose za svaku komponentu po jedan čak i za vodu. Npr.:

**DIFFCWAT**

-- H2O	CO2	NaCl	CaCl2
0.0001	0.0001	0.0001	0.0001 /

**DIFFCGAS** – ključna riječ kojom se unose koeficijenti difuzije plina za svaku komponentu u komponentnoj simulaciji. Unose se slično kao i u slučaju **DIFFCWAT**. Npr.:

**DIFFCGAS**

-- H2O	CO2
0.001	0.001 /

**RTEMP** – Ključna riječ kojom se zadaje temperatura ležišta, neophodna svaki put kada se koristi jednadžba stanja. Podatak je realni broj, u METRIC sustavu u °C:

**RTEMP**

87 /

**WSF** - Definiranje tablice zasićenja vodom i relativne propusnosti vode. Npr.:

**WSF**

-- Sw	krw
0.3	0.0
0.38	0.000152

0.46	0.002439
0.53	0.012346
0.61	0.039018
0.69	0.09526
0.77	0.197531
0.84	0.36595
0.92	0.624295
1.0	1.0 /

**GSF** – Ključna riječ kojom se unose funkcije zasićenja plinom, relativne propusnosti za plin i pripadajućih plin-voda kapilarnih tlakova. Npr.:

**GSF**

- Sg	krp	Pcog
0.0	0.0	0.
0.08	0.0	0.6
0.16	0.000407	0.78
0.23	0.005831	0.93
0.31	0.024131	1.09
0.39	0.064892	1.26
0.47	0.140566	1.49
0.54	0.269314	1.84
0.62	0.484797	2.53
0.7	1.0	10.0 /

**ROCK** – Ključna riječ kojom se zadaju podaci o stijeni u ležištu: referentni tlak i stlačivost pora stijene. Npr.:

**ROCK**

137.2 7.25E-5 /

### **3.5. Odjeljenje SOLUTION**

Odjeljenje u kojem se zadaju referentne vrijednost na početku simulacije.:

**EQUIL** – Ključna riječ u kojoj se definiraju ravnotežni podaci na početku simulacije. Sastoji se od nekoliko podataka:

1. Referentna dubina (osnovna postavka za E300 nedefinirana)
2. Tlak na referentnoj dubini
3. Dubina kontakta vode i nafte (ova vrijednost se ignorira u jednofaznim sustavima, osnovna postavka je vrijednost 0)
4. Kapilarni tlak u sustavu nafta voda ili plin voda na dubini kontakta(osnovna postavka 0)
5. Dubina kontakta nafte i plina (ova vrijednost se ignorira u jednofaznim sustavima, osnovna postavka 0)
6. Kapilarni tlak u sustavu nafta plin na dubini kontakta(osnovna postavka 0)
7. i 8. vrijednost se odnose na BLACKOIL simulacije
9. Cjelobrojna vrijednost koja definira točnost početnog proračuna fluida u ležištu. Za  $N=0$  simulator podešava zasićenja fluidima u svakoj ćeliji prema uvjetima u sredini ćelije, početni proračun će biti za ustaljeni protok(manja točnost kod velikih ćelija). Za  $N<0$  simulator uzima prosjek uvjeta na podjednako udaljenim nivoima unutar ćelije, te se ćelije tretiraju kao da su horizontalne, početni proračun neće biti istovjetan ustaljenom protoku. Za  $N>0$  ćelije se tretiraju kao nagnute uzimaju se podjednako udaljeni nivoi unutar ćelije.  $N$  je najviše 20.
10. Cjelobrojna vrijednost kojom se odabire vrsta inicijalizacije u kompozicijskoj simulaciji. Za simulaciju plin voda podaci se unose isto kao i za nafta voda sustav to jest dubina kontakta i kapilarni tlak kao pod brojevima 3 i 4. -1 = Kontinuirana ugljikovodična faza u početnom stanju(nema kontakta nafta-plin). -2 = kontakt nafta-plin sa sastavom plinske faze na kontaktu. Tlak na referentnoj dubini biti će podešen na tlak retrogradne kondenzacije.-3 = kontakt nafta-plin sa sastavom tekuće faze na kontaktu. Tlak na referentnoj dubini postavljen je na veličinu tlaka zasićenja.

Početne postavke iznose 1.

11. Ako je ovaj argument postavljen na 1 tlak u ležištu nije postavljen na tlak zasićenja na kontaktu ako su odabrane opcije 2 i 3 u argumentu 10.

Npr.:

**EQUIL**

1700 198 0.0 0 0.0 0 1 1 0 /

**RPTRST** – Ova ključna riječ kontrolira ispis podataka u restart datoteku. Riječi koje su korištene: **PRESSURE** = tlak, **SGAS** = zasićenje plinom, **SWAT** = zasićenje vodom, **VGAS** = viskoznost plina. Npr.:

**RPTRST**

**PRESSURE SGAS SWAT VGAS /**

**RPTSOL** - Ključna riječ koja kontrolira ispis podataka u SOLUTION dio Print datoteke. Slijede ju riječi koje korenspodiraju komadnim riječima u drugim datotekama.

Npr.:

**RPTSOL**

**PRESSURE SGAS SWAT VGAS /**

### ***3.6. Odjeljenje SUMMARY***

**SUMMARY** je odjeljenje u kojem se specificira koji će se podaci ispisivati u izlaznoj datoteci s rješenjima

**FPR** – Tlak ležišta.

**FGIPL** – Plin u ležištu u tekućoj fazi.

**FGIPG** – Plin u ležištu u plinovitoj fazi.

**WBHP** – Tlak na dnu bušotine iza riječi ide ime bušotine za koju se piše izvještaj. Npr.:

**WBHP**

**CO2\_INJ /**

**FGIR** – Brzina utiskivanja plina.

**TCPU** – Trenutno iskorištenje procesora u sekundama.

**RUNSUM** –omogućuje da podaci iz **SUMMARY** datoteke budu tabelarno ispisani u Print datoteci na kraju simulacije.

**RPTONLY** – Ključna riječ koja ograničava ispis izvještaja u Summary datoteku samo na datume koji su zadani, ako nije prisutna izvještaji se ispisuju za svaki vremenski korak.

### ***3.7. Odjeljenje SCHEDULE***

Odjeljenje u kojem se unose podaci o bušotinama, korelacijama i vremenu simulacije.

**RPTSCHED** – Ključna riječ kojom se kontrolira ispis podataka u SCHEDULE odjeljenje Print datoteke. Riječi koje slijede korenspodiraju riječima u RPTRST i RPTSOL. Npr.:

**RPTSCHED**

**PRESSURE SGAS SWAT VGAS /**

**WELSPECS** – Ključna riječ kojom se definiraju podaci o bušotini, slijede ju redovi brojeva koji sadrže:

1. Ime bušotine (najviše 8 znakova)
2. Ime grupe bušotina kojoj pripada (najviše 8 znakova), Osnovna postavka u E300 je **FIELD**
3. Položaj I(na X osi mreže) bušotine
4. Položaj J(na Y osi mreže) bušotine
5. Referentna dubina za tlak na dnu bušotine
6. Faza koja prolazi bušotinom OIL (nafta), WATER (voda), GAS (plin) i LIQ (kombinacija nafte i vode)

Npr.:

**WELSPECS**

'CO2\_INJ' FIELD 7 7 1\* GAS /

**COMPDAT** – Ova ključna riječ opisuje opremanje bušotine i slijedi ključnu riječ **WELSPECS**. Iza nje slijedi unos podataka:

1. Ime bušotine ili predložka za više isto opremljenih bušotina..
2. I (na X osi) pozicija ćelija kroz koje ide bušotina (osnovna postavka je ona iz dana u WELSPECS).
3. J (na Y osi) pozicija ćelija kroz koje prolazi bušotina (osnovna postavka je ona iz dana u WELSPECS).
4. K (na Z osi) pozicija gornje ćelije povezane s bušotinom.
5. K (na Z osi) pozicija donje ćelije povezane s bušotinom (idući podaci se onda odnose na K broj ćelija između točke 4 i 5)
6. Otvoreni/zatvoreni spojevi sa slojem. OPEN –otvoreni, SHUT- zatvoreni. Osnovna postavka je OPEN.
7. Broj tablice zasićenja za relativne propusnosti spoja. Ako se odabere osnovna postavka koristi se ista tablica kao i za ćeliju u kojoj se nalazi spoj inače se odabire pomoću riječi SATNUM.
8. Faktor transmisibilnosti za spoj. U slučaju odabira osnovne postavke program sam vrši proračun vrijednosti na temelju dostupnih podataka.

9. Promjer bušotine na mjestu spoja, bitno za proračun stavke 8, proračuna indeksa produktivnosti odnosno injektivnosti. Osnovna postavka za E300 iznosi 1 stopu odnosno 0,3048 metara.
10. Kh efektivna vrijednost spoja (umnožak debljine spoja i propusnosti sloja u kojem se spoj nalazi). Osnovna se postavka izračunava iz dostupnih vrijednosti.
11. Skin faktor, koristi se pri određivanju istih podataka kao i stavka 9 i ignorira se ako ga nema. Osnovna postavka je 0.

Npr.:

COMPDAT

'CO2\_INJ' 7 7 9 9 1\* 1\* 1\* 0.09 1\* 1\* /

**WELLSTRE** – Ključna riječ kojom se definira sastav utiskivanog fluida: 1 ime za protok, preostale vrijednosti su molni udjeli komponenata u utiskivanom sastavu, Npr., za utiskivanje čistog CO<sub>2</sub>, molni udio vode je 0.0, a CO<sub>2</sub> = 1.0

**WELLSTRE**

'SeqCO2' 0.0 1.0 /

**WINJEGAS** – definira plin koji se utiskuje u određenu bušotinu i koristi se zajedno sa riječi **WCONIJNE**. Podaci koji se zadaju:

1. Ime bušotine ili šablone više istih bušotina.
2. Vrsta protoka **STREAM** (zadan riječi **WELLSTRE**)
3. Ime protoka zadano u riječi **WELLSTRE**

Npr.:

**WINJGAS**

'CO2\_INJ' STREAM 'SeqCO2' /

**WCOMINJE** – Kontrolni podaci za utisnu bušotinu. Podaci se unose za:

1. Ime bušotine ili šablone za više istih bušotina.
2. Vrsta utisne bušotine WATER ili GAS
3. Bušotina je ili OPEN (otvorena radi), STOP(zatvorena iznad utisne/proizvodne formacije), SHUT (u potpunosti izolirana od formacije) osnovna postavka je OPEN
4. Način kontrole rada bušotine, može biti RATE (protokom na površini), RESV(volumen proizvedenog fluida pri ležišnim uvjetima), BHP(tlak na dnu bušotine)



5. Ciljani protok na površini. Osnovna postavka nema.
6. Volumen proizvedenog fluida pri ležišnim uvjetima. Nema ga u osnovnoj postavci.
7. Tlak na dnu bušotine gornja granica.

Npr.:

**WCONINJE**

'CO2\_INJ' GAS OPEN RATE 375000 1\* 400.0 /

**DATES** – Zadaju se datumi za koje se ispisuju izvještaji u izlaznu datoteku. Npr.:

DATES

1 SEP 2012 /

**WELLSHUT** – ključna riječ kojom se zatvaraju pojedine bušotine iza nje idu nazivi bušotina ili šablona istih bušotina. Npr.:

WELLSHUT

CO2\_INJ' /

**END** – kraj simulacije

**CO2STORE** – Ova ključna riječ uključuje opciju za skladištenje CO<sub>2</sub> i nalazi se u RUNSUM odjeljenju a izdvojena je za kraj jer je njen opis uključuje i tehnički dio. U opciji CO2STORE uzimaju se u obzir tri faze, faza bogata H<sub>2</sub>O, faza bogata CO<sub>2</sub>, i krute faze. Faza bogata s CO<sub>2</sub> se označava kao plinska faza a H<sub>2</sub>O bogata faza kao vodena (tekuća) faza. Međusobne topivosti CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O se računaju da se podudaraju sa eksperimentalnim podacima za sustav CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O u tipičnim uvjetima skladištenja, temperaturom 12 – 100 °C, tlakom do 600 bar. Sastav fluida se zadaje ključnom riječi **COMPS**, trenutno dostupne komponente su: CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, i soli NaCl, CaCl<sub>2</sub>, i CaCO<sub>3</sub>. Komponente soli se prate ka dio tekućeg sustava, također podjela vodene i plinske faze je točno podešena. Svojstva fluida se dodjeljuju interno na temelju njihovih imena.

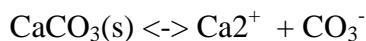
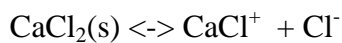
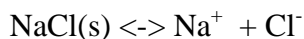
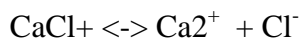
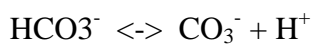
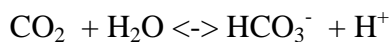
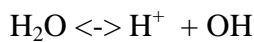
Tablica 3.1. Faze u kojima se mogu pojaviti komponente.

Ime komponente	Faza
CO <sub>2</sub>	Voda / plin
H <sub>2</sub> O	Voda / plin
NaCl	Voda / krutina

CaCl <sub>2</sub>	Voda / krutina
CaCO <sub>3</sub>	Voda / krutina

### Razdvajanje faza

Dijeljenje CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O u tekućoj i plinskoj fazi prati postupak koji su dali Spycher i Preuss (2005). Smatra se da soli ostaju u tekućoj fazi osim ako se aktivira opcija SOLID. Tom opcijom komponente NaCl, CaCl<sub>2</sub> i CaCO<sub>3</sub> mogu biti prisutne u tekućoj (vodenoj) i u krutoj fazi prema sljedećim ravnotežnim kemijskim reakcijama:



Ukoliko je prisutan samo NaCl, koristi se samo pojednostavljena procedura i računa se maksimalna topivost NaCl u vodenoj fazi prema (Potter, Babcock i Brown, 1977).

$$W_{\text{tNaCl}} = 26.218 + 0.0072T + 0.000106T^2 \text{ gdje je } T = \text{temperatura u } ^\circ\text{C}$$

### Gustoća

Gustoća plina se dobiva kubičnom jednadžbom stanja specijalno podešenom kako bi davala gustoću stiješnjene plinske faze. Prijelaz između tekućeg CO<sub>2</sub> i plinovitog CO<sub>2</sub> će dovesti do brzih promjena gustoće plinske faze, program koristi usko prijelazno područje kako bi prikazao dvofazno područje za CO<sub>2</sub>. Za gustoću slane vode prvo se računa gustoća čiste vode (Kell i Whalley, 1975) i onda se koristi Ezrokhi-eva metoda (Kell i Whalley, 1975) za proračun utjecaja soli i CO<sub>2</sub>.

### Viskoznost

Viskoznost CO<sub>2</sub> se računa iz (Vesović i dr., 1990., Fenghour i dr., 1999).

## 4. Rezultati simulacije CO<sub>2</sub> skladištenja

### 4.1. Ulazni podaci

Model je napravljen na temelju podataka akvifera Sava Central (EU GeoCapacity, 2009, Vulin i dr., 2012).

Dubina krovine je  $h = 1700$  metara, površina  $A = 2.3 \text{ km} \times 2.3 \text{ km} = 5.29 \text{ km}^2$ , efektivna debljina akvifera je  $h_e = 550$  metara. Temperatura u akviferu je  $T = 89^\circ\text{C} = 362 \text{ K}$ , krivulje relativnih propusnosti vode (tablica 3.1.) i plina (tablica 3.2.), koeficijent kompresibilnosti stijene pri referentnom tlaku  $c = 0.000316 \text{ bar}^{-1}$ , salinitet iznosi 25 ppm. Korišten je E300 kompozicijski simulator. Sam model je veličine  $14 \times 14 \times 10$  ćelija čija je dužina i širina 164 m a debljina 55 m. Utiskivano je u deveti proslojak (engl. *gridblock layer*) protokom  $q = 375000 \text{ m}^3/\text{dan CO}_2$ , što predstavlja 271012.5 tona CO<sub>2</sub> godišnje. Početak utiskivanja je 01.09.2012. i traje do 01.12.2040., sama simulacija u kojoj je promatrano širenje CO<sub>2</sub> nakon prestanka utiskivanja traje do 4000. godine. Pored spomenutih parametara, bilo je potrebno uračunati i relativne propusnosti za vodu i CO<sub>2</sub>, ovisno o zasićenju (Tablice 4.1. i 4.2.) te početni sastav fluida u akviferu (slane vode, tablica 4.3.)

Tablica 4.1 Relativne propusnosti vode.

<b>S<sub>w</sub></b>	<b>k<sub>rw</sub></b>
0.3	0
0.38	0.000152
0.46	0.002439
0.53	0.012346
0.61	0.039018
0.69	0.09526
0.77	0.197531
0.84	0.36595
0.92	0.624295
1	1

Tablica 4.2 Relativne propusnosti i kapilarni tlakovi CO<sub>2</sub>.

<b>S<sub>g</sub></b>	<b>k<sub>rg</sub></b>	<b>P<sub>cog</sub>, bar</b>
0	0	0
0.08	0	0.6
0.16	0.000407	0.78
0.23	0.005831	0.93
0.31	0.024131	1.09
0.39	0.064892	1.26
0.47	0.140566	1.49

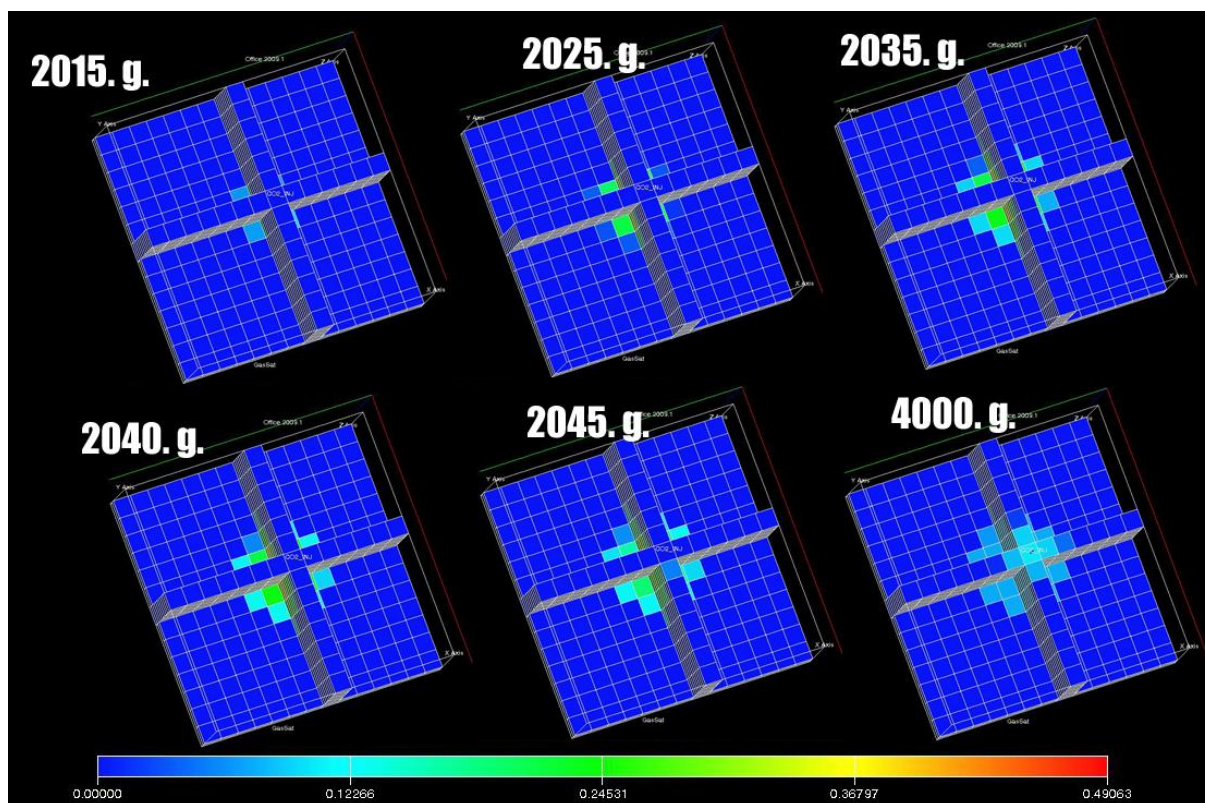
<b>0.54</b>	0.269314	1.84
<b>0.62</b>	0.484797	2.53
<b>0.7</b>	1	10

Tablica 4.3. Početni komponentni sastav vode

<b>komponenta</b>	<b>molni udio z</b>
<b>H<sub>2</sub>O</b>	0.975
<b>CO<sub>2</sub></b>	0.000
<b>NaCl</b>	0.023
<b>CaCl<sub>2</sub></b>	0.002

#### 4.2. Rezultati simulacije

Simulirano 6 modela sa različitim faktorom heterogenosti (tablica 4.1.), što je naravno i utjecalo na prosječnu propusnost akvifera. Svi ostali parametri su u svakom od 6 modela bili konstantni. Osnovni predmet razmatranja je bila brzina širenja CO<sub>2</sub> u prostoru (slika 4.1.), a kvantificirani primjer takvog razmatranja, dat je u tablici 4.4.



Slika 4.1. Promjene zasićenja s CO<sub>2</sub> u vremenu (model 6).

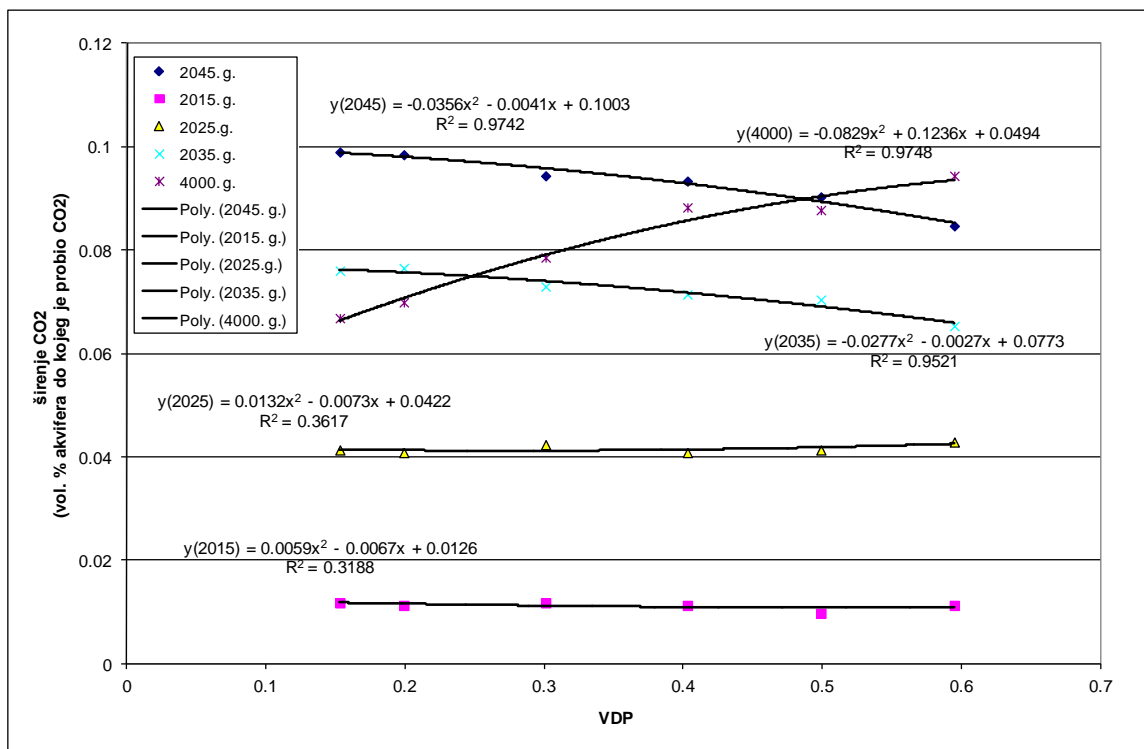
Tablica 4.4. Analiza širenja CO<sub>2</sub> za model 1

proslojak	Model 1				
	2015	2025	2035	2045	4000
1	0	0	5	13	1
2	0	0	5	13	5
3	0	1	13	21	8
4	0	5	13	22	10
5	0	13	21	25	14
6	1	13	22	25	21
7	5	13	24	25	22
8	5	20	25	25	25
9	12	16	21	25	25
10	0	0	0	0	0
<b>Ukupno:</b>	<b>23</b>	<b>81</b>	<b>149</b>	<b>194</b>	<b>131</b>
<b>Širenje (ukupno/1960):</b>	<b>0.011734694</b>	<b>0.041326531</b>	<b>0.07602</b>	<b>0.09898</b>	<b>0.066837</b>
<b>Maksimalno u jednom proslojku</b>	<b>12</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>

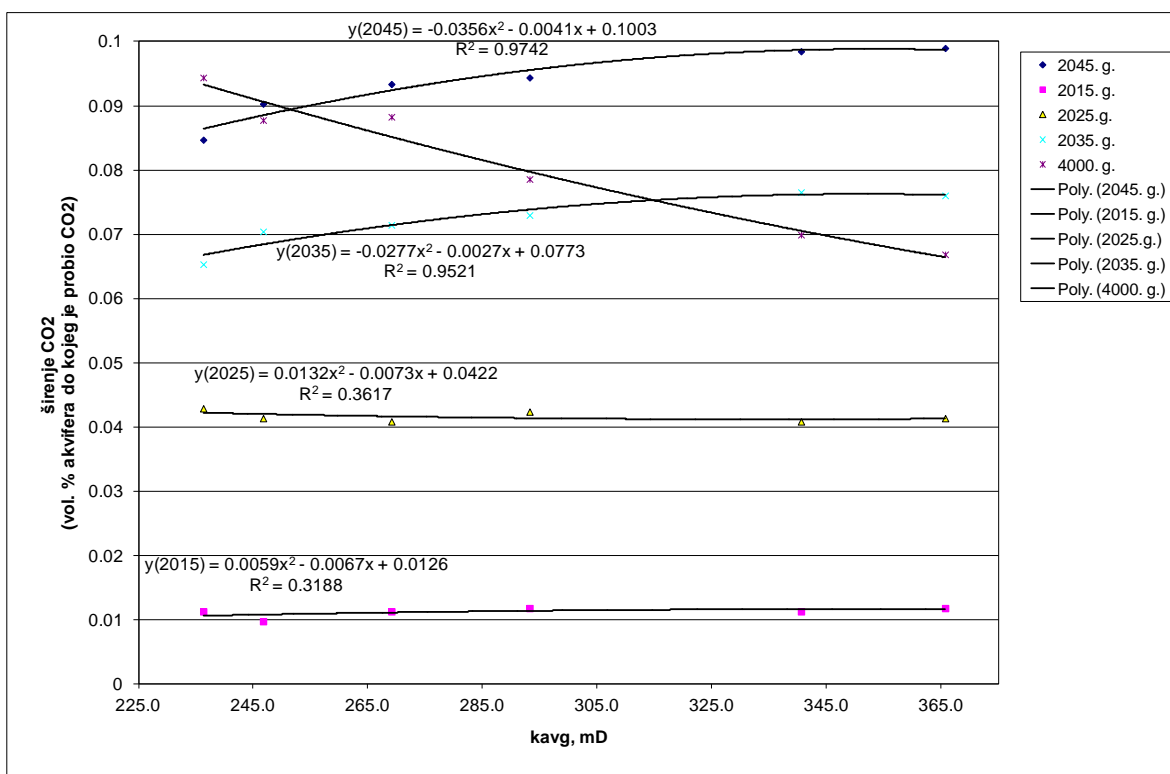
Pojam *širenje* CO<sub>2</sub> odabran umjesto koeficijenta obuhvata, zato jer se promatra područje do kojeg je stigao CO<sub>2</sub>, a ne područje koje je 100% zasićeno s CO<sub>2</sub>. Iz tablice je vidljivo kako CO<sub>2</sub> stigne do krovine još za vrijeme utiskivanja (5 ćelija u najplićem proslojku je zasićeno određenom količinom CO<sub>2</sub>). Smanjena rasprostranjenost CO<sub>2</sub> nakon 4000 godina posljedica je otapanja CO<sub>2</sub> u slanoj vodi. Kada se CO<sub>2</sub> otopi u vodi ne može migrirati kao zasebna faza.

Također, već iz ovakvog tabličnog prikaza, uočljiv je brz vertikalni napredak CO<sub>2</sub>. Slika 4.2. pokazuje širenje u odnosu na Dykstra-Parsonov koeficijent heterogenosti, VDP. Svaki model predstavlja jedan VDP. Za 2015. Godinu i 2025. godinu ne vidi se značajna razlika u širenju CO<sub>2</sub>, tj. širenje CO<sub>2</sub> je slično, bez obzira na raspon propusnosti i heterogenosti.

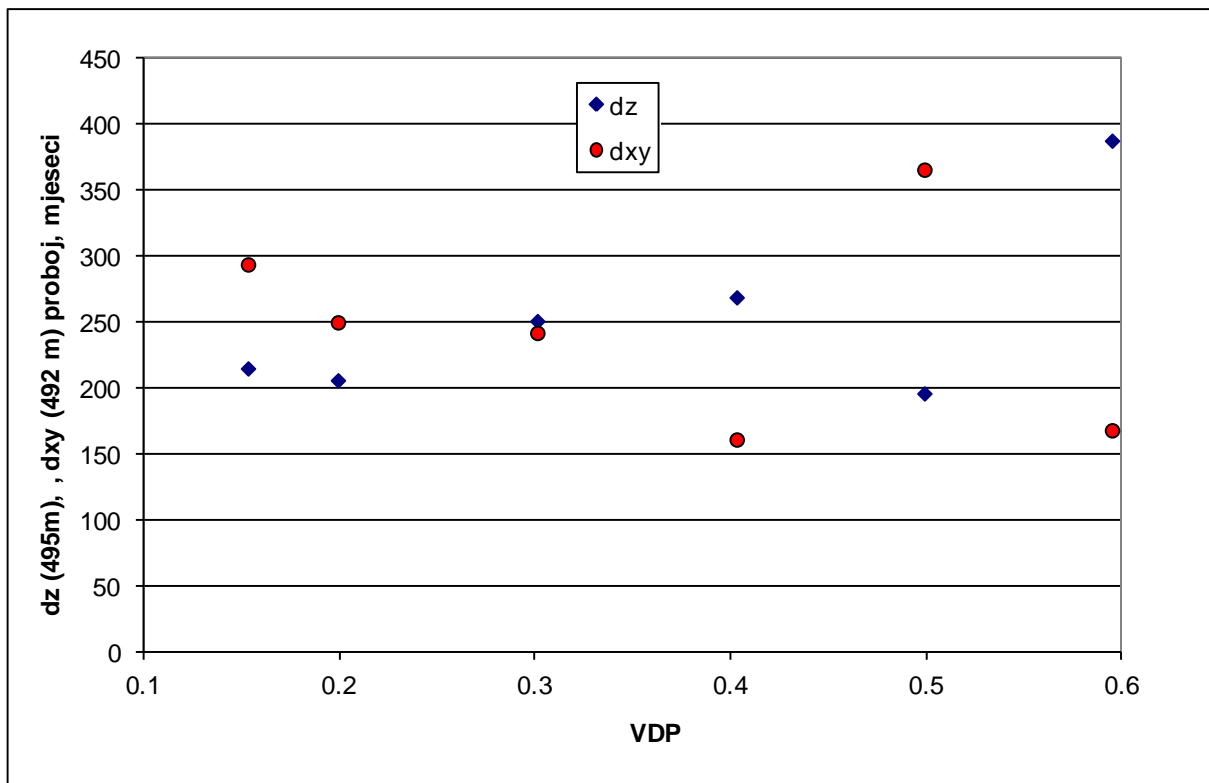
Zatim, promatrano je vrijeme proboja od proslojka u kojem se utiskuje (deveti proslojak) do krovine (9×55m=495m) i uspoređivano s vremenom proboja do iste udaljenosti u devetom proslojku (zbog relativno male rezolucije modela, bilo je izvedivo promatrati do 492 m). U principu, slika (slika 4.3.) pokazuje kako veća heterogenost uzrokuje i veću raspršenost proučavanih vrijednosti dxy i dz, međutim, također se može i vidjeti da će u periodu utiskivanja horizontalno širenje biti brže od vertikalnog ukoliko je veća heterogenost. Zaključno, promatrano je ukupno širenje prema cijelom volumenu (slika 4.4.) i ustanovljeno kako najveća heterogenost uzrokuje najmanju konačnu raširenost CO<sub>2</sub>.



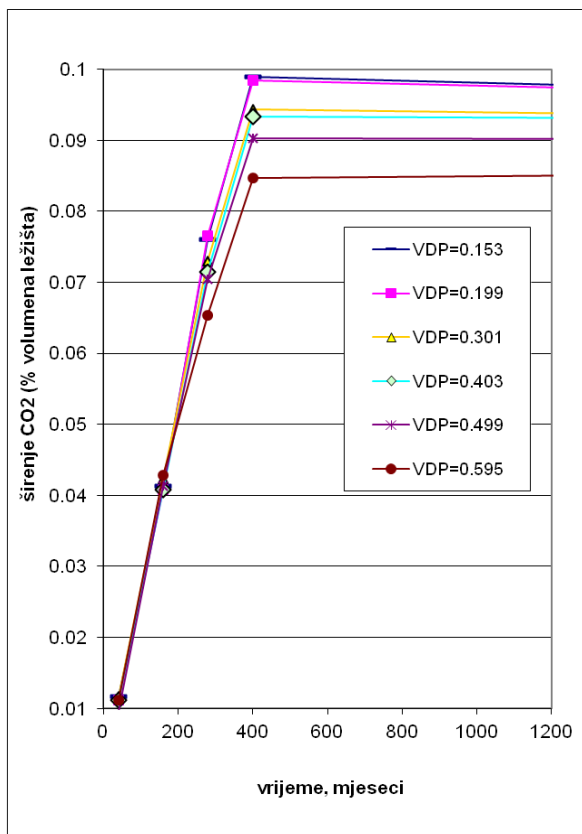
Slika 4.2. Koeficijent heterogenosti u odnosu na širenje. Svaki model predstavlja jedan VDP. Širenje je promatrano za svaki VDP i nakon 5 različitih razdoblja: 2015.g. (utiskivanje), 2025.g. (utiskivanje), 2035.g. (utiskivanje), 2045.g. (širenje 5 godina nakon utiskivanja), 4000g. širenje nakon uočljivih količina otopljenog CO<sub>2</sub>



Slika 4.3. Širenje u odnosu na prosječnu propusnost. Kako je raspodjela podataka o propusnosti kvadratna, nije bilo moguće dobiti modele različitih koeficijenata heterogenosti, a sličnih prosječnih propusnosti



Slika 4.4. Brzina horizontalnog širenja CO<sub>2</sub> u devetom proslojku (dxy) i brzina vertikalnog širenja (dz)



Slika 4.5. Brzina ukupnog širenja u odnosu na koeficijent heterogenosti, VDP

## 5. Zaključak

Nakon navedenih analiza, može se zaključiti kako je prva hipoteza točna, tj. da se prostorno širenje CO<sub>2</sub> može povezati sa stupnjem heterogenosti. Treba napomenuti kako je simulaciji 6 spomenutih modela prethodilo testiranje niza slučajeva te kako i ovakav, relativno mali model 14×14×10 za svaki pokušaj simulacije traje približno pol sata, na osam-procesorskom računalu. Hipotezu bi bilo poželjno još jednom potvrditi, na puno većem broju ispitivanih modela, međutim takvo simuliranje bi potrajalo mjesecima i izlazi iz opsega diplomskog rada.

Druga hipoteza glasi, tj. da je CO<sub>2</sub> moguće utiskivati na takav način, da bez obzira na izolatorsku kvalitetu krovinskih naslaga neće postojati opasnost od propuštanja nije se potvrdila kao točna. Naime, vrlo je vjerojatno da će CO<sub>2</sub> uvijek probiti do krovine, osim ako se ne bi radilo o akviferima s puno većom debljinom sloja od one promatrane (550m).

Simulirano je utiskivanje CO<sub>2</sub> brzinom 742.5 tona na dan. Pri tome je u ćeliji utiskivanja jedna utisna bušotina (radi pojednostavljenja) predstavljala zapravo područje na kojem bi se nalazio niz utisnih bušotina. Ukupno je simulirano utiskivanje 7 661 115 tona (tablica 5.1.), a prema slici 4.5. CO<sub>2</sub> nije probio do 10% pornog volumena akvifera.

Tablica 5.1. Usporedba procjena efektivnog kapaciteta (EU Geocapacity, 2009) i simuliranog modela

	<b>Sava central</b>	<b>simulirani model</b>	
<b>A</b>	517	5.272	km <sup>2</sup>
<b>h</b>	550	550	m
<b>V</b>	284 350 000 000	2 899 600 000	m <sup>3</sup>
<b>poroznost</b>	0.18	0.18	
<b>Vp</b>	51 183 000 000	521 928 000	m <sup>3</sup>
<b>efektivni porni volumen</b>	1 535 490 000		
<b>Storage capacity, <math>m(\text{CO}_2)</math></b>	<b>837.6</b>	<b>7.661</b>	<b>Mt</b>

Maksimalni simulirani tlak je na kraju utiskivanja, 2040. godine i iznosi 300 bar. Minimalni tlak se uz krovinu i iznosi 250 bar u svim ćelijama, dakle povećao se za 50 bara uz krovinu. Pad tlaka do 4000 godine je oko 10 bara u svim ćelijama.

Treba napomenuti termodinamičku složenost sustava CO<sub>2</sub> i slane vode. Naime, iz statistike simulatora se može očitati kako je na kraju utiskivanja, tj. 2040.g., npr. u modelu broj 6, zasićenje plinom 0.01519 (1.519%). Iz tablice 5.1. može se uočiti efektivni porni volumen takav da bi se moglo zaključiti zasićenje plinom (CO<sub>2</sub>) 3%. Naime, koeficijent uskladištenja C je u tom proračunu uzet 0.03. Uspoređujući utisnutu količinu CO<sub>2</sub> u simulaciji, može se



zaključiti kako je simulirano zasićenje plinom preveliko, međutim do tog podatka se dolazi nakon komponentne simulacije, koja uzima u obzir da će utiskivanjem CO<sub>2</sub> biti drastično prošireno dvofazno područje sustava H<sub>2</sub>O-NaCl-CO<sub>2</sub>, te da će u ležištu uvijek biti prisutan plin. Čak i nakon 4000. g., statističko očitavanje zasićenja plinom je 0.00687. U slučaju razmatranja nepropusnosti krovnih naslaga, ovi rezultati su nepovoljni zbog velike mobilnosti plinske faze, zbog manje gustoće, tj. velikog volumena koji ta faza zauzima, i zbog činjenice da je molni udio CO<sub>2</sub> u plinskoj fazi najveći (oko 97%).

## 6. LITERATURA

1. AGUSTSSON, H. I GRINESTAFF, G. A., 2003. *Study of IOR by CO<sub>2</sub> Injection in the Gullfaks Field, Offshore Norway*. Society of Petroleum Engineers, SPE paper 89338.
2. BACHU, S. i dr., 2007. *CO<sub>2</sub> storage capacity estimation: methodology and gaps*, International Journal of Greenhouse Gas Control, 1 (4), 430-443.
3. BENNION, D. B., BACHU, S., 2008. *Drainage and Imbibition Relative Permeability Relationships for Supercritical CO<sub>2</sub>/Brine and H<sub>2</sub>S/Brine Systems in Intergranular Sandstone, Carbonate, Shale, and Anhydrite Rocks*. SPE Res Eval & Eng 11 (3), 487-496. SPE-99326-PA
4. BIELINSKI, A., 2007. *Numerical Simulation of CO<sub>2</sub> Sequestration in Geological Formations*. Institut fur Wasserbau, Universit'at Stuttgart.
5. BRYANT, S. L., i dr., 2008. *Buoyancy-Dominated Multiphase Flow and Its Effect on Geological Sequestration of CO<sub>2</sub>*. SPE J., 13 (4), 447-454. SPE paper 99938.
6. CASTINEL, G., COMBARNOUS, M., 1997. *Natural convection in an anisotropic porous layer*. Int. Chem. Eng., 17, 605-614.
7. ENNIS-KING, J., PATERSON, L., 2005. *Role of Convective Mixing in the Long-Term Storage of Carbon Dioxide in Deep Saline Formations*. SPE J., 10 (3), 349-356. SPE paper 84344.
8. EPHERRE, J. F., 1977 *Criterion for the appearance of natural convection in an anisotropic porous layer*. Int. Chem. Eng., 17, 615-616.
9. EU Geocapacity, 2009.: *Assessing European Capacity for Geological Storage of Carbon Dioxide*, Technical reports, 2009, FP-518318.
10. FENGHOUR, A., WAKEHAM, W.A., VESOVIC, V. 1999.: *The Viscosity of Carbon Dioxide* J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 27, No.1
11. FLETT M. A i dr., 2005. *Heterogeneous saline formations: long-term benefits for geo-sequestration of greenhouse gases*. In Proc. 7th Int. Conf. on Greenhouse Gas Control Technologies vol. Eds. Oxford, UK:Elsevier, 1, 501-509.
12. GARCIA, J. E., 2003. *Fluid Dynamics of Carbon Dioxide Disposal into Saline Aquifers*. Dissertation, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California.
13. HATTENBACH, R., i dr. 1998. *Capture of Carbon Dioxide from Coal Combustion and its Utilization for Enhanced Oil Recovery*. Greenhouse Gas Control Technologies, 4th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-4), Interlaken, Switzerland, August 30-October 2.
14. HOLTZ, M. H., 2002. *Residual gas saturation to aquifer influx: a calculation method for 3-D computer reservoir model construction*. Society of Petroleum Engineers, SPE Paper No. 75502, 5 p.
15. HURTER, S., i dr., 2007. *Simulations for CO<sub>2</sub> injection projects with Compositional Simulator*. Presented at Offshore Europe, Aberdeen, Scotland, UK. SPE paper 108540.
16. JESSEN, K., i dr., 2001. *Increasing CO<sub>2</sub> Storage in Oil Recovery*. First National Conference on Carbon Sequestration, Washington, DC, May 14-17.
17. JURIC, Ž i TOT, M., 2007. *Utjecaj protokola iz Kyota na razvoj hrvatskog elektroenergetskog sredstva*. 8. savjerovanje HRO CIGRE, Zagreb
18. KELL, G. S.; WHALLEY, E. *Reanalysis of the density of liquid water in the range 0-150 °C and 0-1 kbar*. J. Chem. Phys. 1975, 62, 3496-3503
19. KOIDE, H. i dr., 1992. *Subterranean containment and long term storage of carbon dioxide in unused aquifers and in depleted natural gas reservoirs*. Energy Conversion Management, 33, 619-626.
20. KUMAR, A. i dr., 2005. *Reservoir Simulation of CO<sub>2</sub> Storage in Deep Saline Aquifers*. SPE J., 10 (3), 336-348. SPE paper 89343.
21. LAW, J., 1943. *A Statistical Approach to the Interstitial Heterogeneity of Sand Reservoirs*, Los Angeles Meeting, str. 202, 219
22. LINDEBERG, E., 1997. *Escape of CO<sub>2</sub> from Aquifers*. Energy Convers. Mgmt., 38, 235-240.

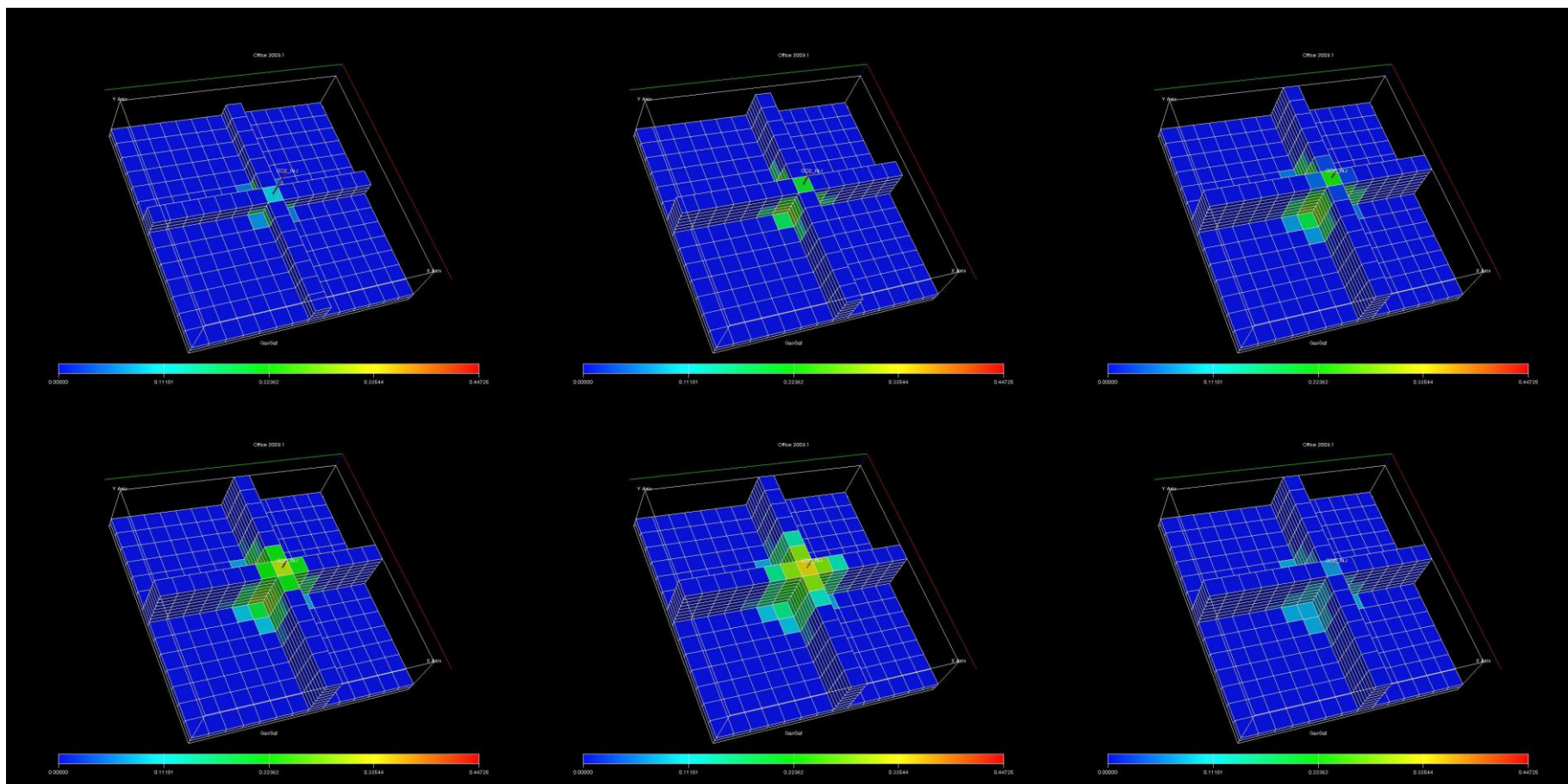
23. Ministarstvo zaštite okoliša, prostornog uređenja i graditeljstva, 2006.: *Drugo, treće i četvrto nacionalno izvješće Republike Hrvatske prema Okvirnoj konvenciji Ujedinjenih naroda o promjeni klime*
24. OLDENBURG, C., BENSON, S., 2002.: *CO<sub>2</sub> Injection for Enhanced Gas Production and Carbon Sequestration*. Society of Petroleum Engineers, SPE paper 74367.
25. OLIVIER, J.G.J. ET AL. 2011.: *Long-term trend in global CO<sub>2</sub> emissions; 2011 report*, den Haag, Netherlands: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency; Institute for Environment and Sustainability (IES) of the European Commission's Joint Research Centre (JRC)
26. PLUG, W. - J., BRUINING, J., 2007. *Capillary pressure for the sand- CO<sub>2</sub>-water system under various pressure conditions. Application to CO<sub>2</sub> sequestration*. Advances in Water Resources, 30 (11), 2339-2353.
27. POTTER RW II, BABCOCK RS, BROWN DL 1977.: *A new method for determining the solubility of salts in aqueous solutions at elevated temperatures*. J. Research U.S. Geol. Survey, 5, 389-395.
28. PRUESS, K., GARCIA, J. E., 2002. *Multiphase Flow Dynamics during CO<sub>2</sub> Injection into Saline Aquifers*. Environmental Geology, 42, 282–295.
29. RIAZ, A., TCHELEPI, H. A. 2008. *Dynamics of Vertical Displacement in Porous Media Associated With CO<sub>2</sub> Sequestration*. SPE J., 13 (3), 305-313. SPE paper 103169.
30. SAFTIĆ, B, KOLENKOVIĆ, I, VULIN, D., 2008.: *Putting carbon dioxide back in the subsurface - possibilities in Croatia*. Energija i okoliš 2008 = Energy and Environment 2008, Croatian Solar Energy Association, 2008. pp. 79-88.
31. Society of Petroleum Engineers (SPE). *CO<sub>2</sub> Flooding*. SPE Reprint Series, 1999.
32. Society of Petroleum Engineers (SPE). *Practical Aspects of CO<sub>2</sub> Flooding*. SPE Monograph Series, 2002.
33. SPYCHER, N. AND PRUESS, K., 2005: *CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O Mixtures in the Geological Sequestration of CO<sub>2</sub>. II. Partitioning in chloride brines at 12-100°C and up to 600 bar*. Geochimica Cosmochim. Acta, 69, 3309-3320.
34. TAHERI, A., 2012. *The Effects of Anisotropy and Heterogeneity on CO<sub>2</sub> Dissolution in Deep Saline Aquifers*. Norwegian University of Science & Technology; D. Wessel-Berg, Sintef Petroleum Research; O. Torsater, M. Sorouch. Presented at the Carbon Management Technology Conference, Orlando, Florida, USA, February 7-8.
35. ÜLKER, E. B., I DR., 2007. *Implications of the phase-solubility behaviour on the performance predictions of the CO<sub>2</sub> trapping in depleted gas reservoirs and aquifers*. In: *SPE 107189-MS SPE/EAGE Annual Conference & Exhibition*, UK, 11–14 June 2007
36. VESOVIC, W. A. i dr., 1990.: *The Transport Properties of Carbon Dioxide*, JPCRD 19(3) pp. 763-808
37. VULIN, D., 2010.: *Modeliranje termodinamičkih i petrofizičkih parametara za geološko skladištenje ugljičnog dioksida*. Doktorska disertacija, RGN fakultet, Sveučilište u Zagrebu
38. WARREN, J. E., I COSGROVE, J. J., 1964.: *Prediction of Waterflood Behavior in a Stratified System*, Sot. Pet. Eng. J., 149-157.
39. Wikipedia, [http://hr.wikipedia.org/wiki/Protokol\\_iz\\_Kyota](http://hr.wikipedia.org/wiki/Protokol_iz_Kyota), (12. 06. 2012.)
40. YANG, F, i dr., 2010.: *Comparison of Completion and Heterogeneity Effect on CO<sub>2</sub> Sequestration in Shallow and Deep Saline Aquifers*. Presented at the CPS/SPE International Oil & Gas Conference and Exhibition in China held in Beijing, China, 8–10 June 2010, SPE paper 131381.

## 7. Dodaci

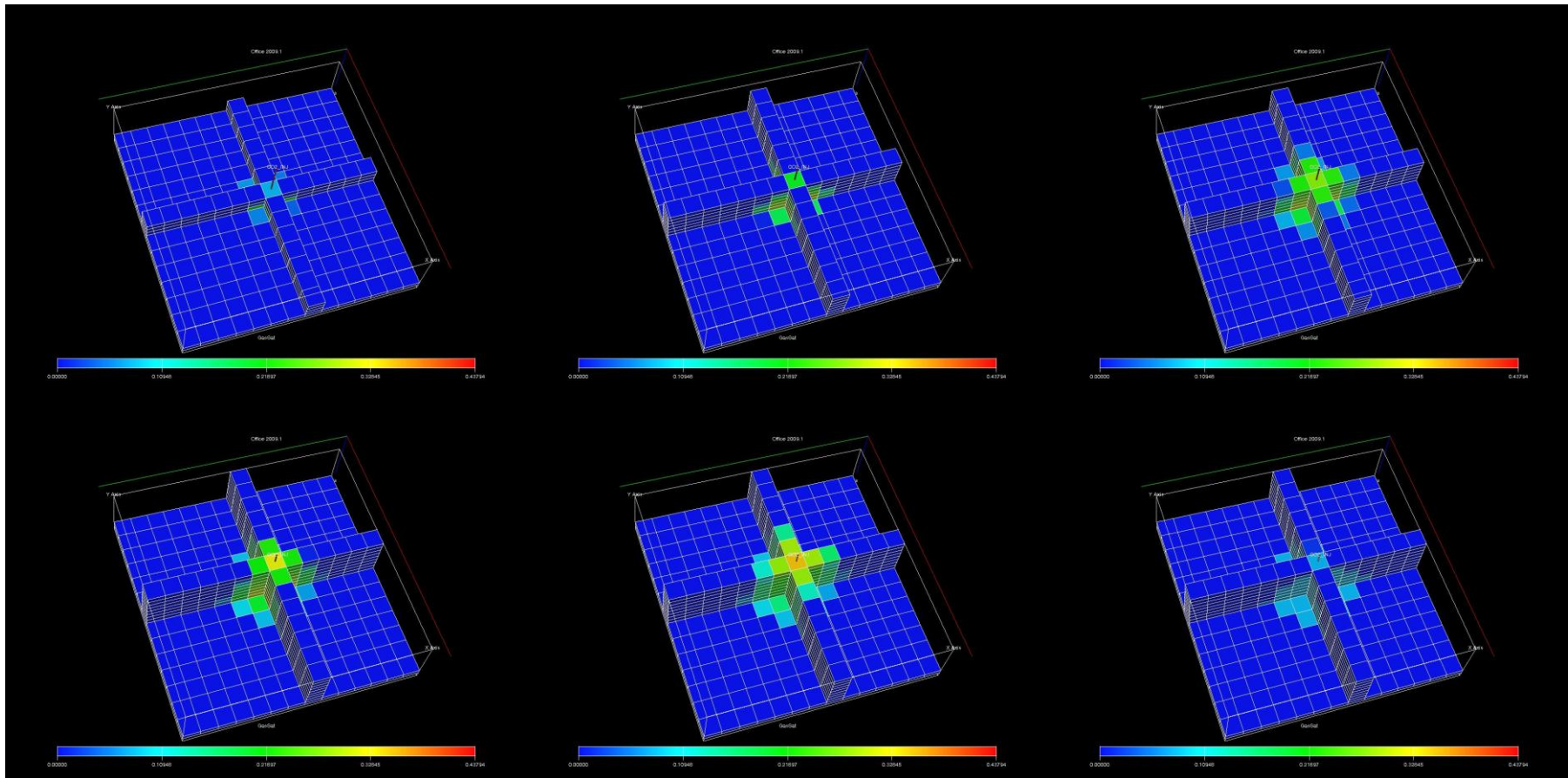
Tablica D.1. Brzine širenja CO<sub>2</sub>

	model 1					model 2					model 3						
	2015	2025	2035	2045	4000	2015	2025	2035	2045	4000	2015	2025	2035	2045	4000		
1	0	0	5	13	1	1	0	0	5	13	2	1	0	0	2	12	9
2	0	0	5	13	5	2	0	1	5	13	5	2	0	0	5	13	9
3	0	1	13	21	8	3	0	1	13	21	8	3	0	1	12	17	11
4	0	5	13	22	10	4	0	5	13	22	12	4	0	5	13	21	14
5	0	13	21	25	14	5	0	11	21	25	15	5	0	10	18	24	17
6	1	13	22	25	21	6	1	13	21	25	21	6	1	13	22	24	21
7	5	13	24	25	22	7	5	13	25	25	24	7	4	16	24	25	24
8	5	20	25	25	25	8	5	20	25	25	25	8	5	20	25	25	25
9	12	16	21	25	25	9	11	16	22	24	25	9	13	18	22	24	24
10	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0
sum	23	81	149	194	131	sum	22	80	150	193	137	sum	23	83	143	185	154
spread	0.01173	0.04133	0.07602	0.09898	0.06684	spread	0.01122	0.04082	0.07653	0.09847	0.0699	spread	0.01173	0.04235	0.07296	0.09439	0.07857
max	12	20	25	25	25	max	11	20	25	25	25	max	13	20	25	25	25

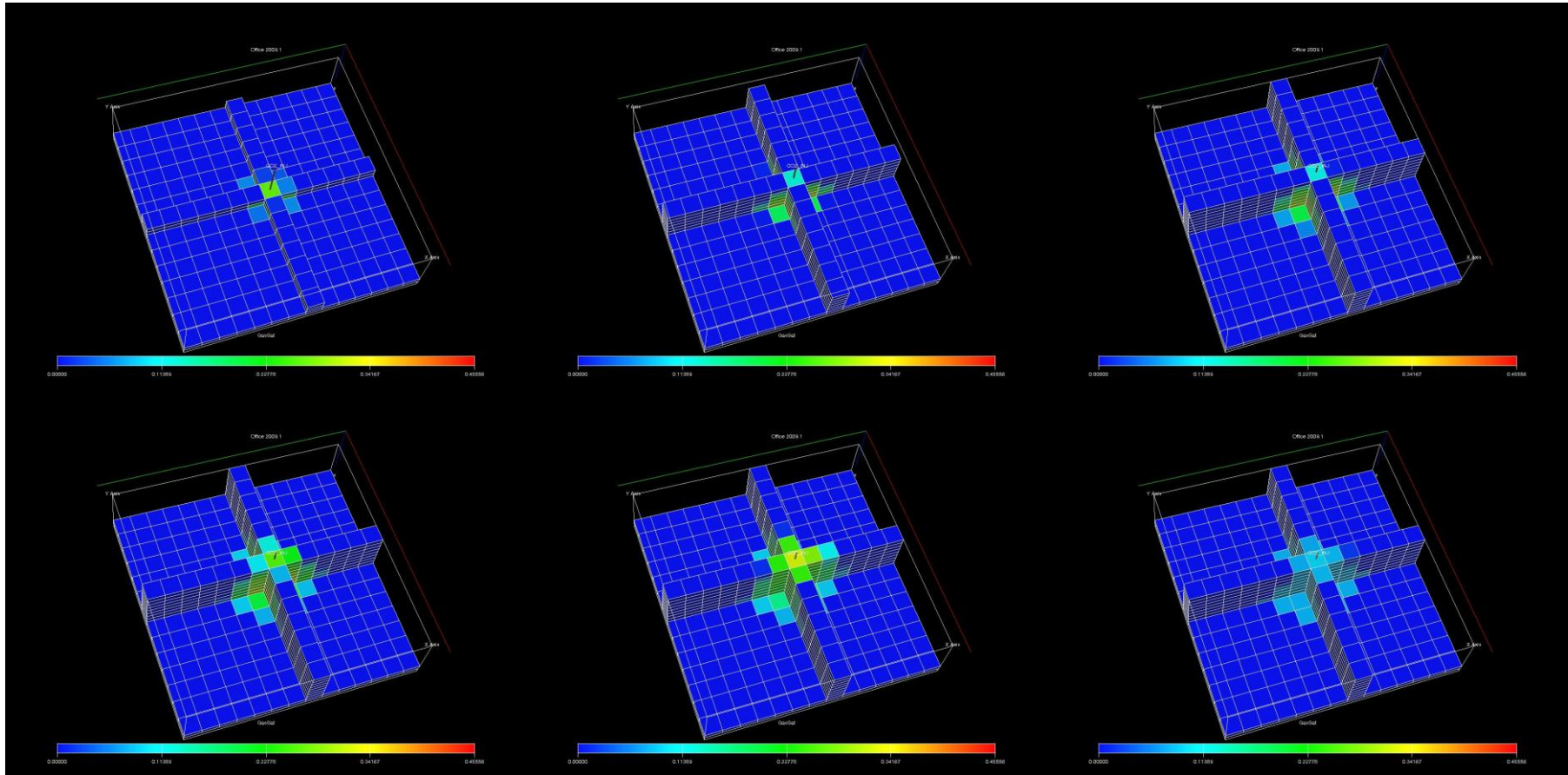
	model 4					model 5					model 6						
	2015	2025	2035	2045	4000	2015	2025	2035	2045	4000	2015	2025	2035	2045	4000		
1	0	0	1	8	11	1	0	0	5	13	23	1	0	0	0	1	12
2	0	0	5	12	12	2	0	1	5	13	10	2	0	0	0	5	11
3	0	0	10	19	15	3	0	1	12	17	12	3	0	0	4	16	16
4	0	5	13	22	19	4	0	5	13	21	17	4	0	2	11	21	21
5	0	10	20	22	21	5	0	10	17	21	20	5	0	7	17	23	25
6	0	13	22	25	23	6	1	13	21	24	22	6	0	12	22	25	24
7	4	15	23	26	23	7	4	16	23	25	23	7	4	20	27	26	25
8	6	18	23	25	25	8	5	20	21	22	23	8	6	23	24	25	27
9	12	19	23	24	24	9	9	15	21	21	22	9	12	20	23	24	24
10	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0
sum	22	80	140	183	173	sum	19	81	138	177	172	sum	22	84	128	166	185
spread	0.01122	0.04082	0.07143	0.09337	0.08827	spread	0.00969	0.04133	0.07041	0.09031	0.08776	spread	0.01122	0.04286	0.06531	0.08469	0.09439
max	12	19	23	26	25	max	9	20	23	25	23	max	12	23	27	26	27



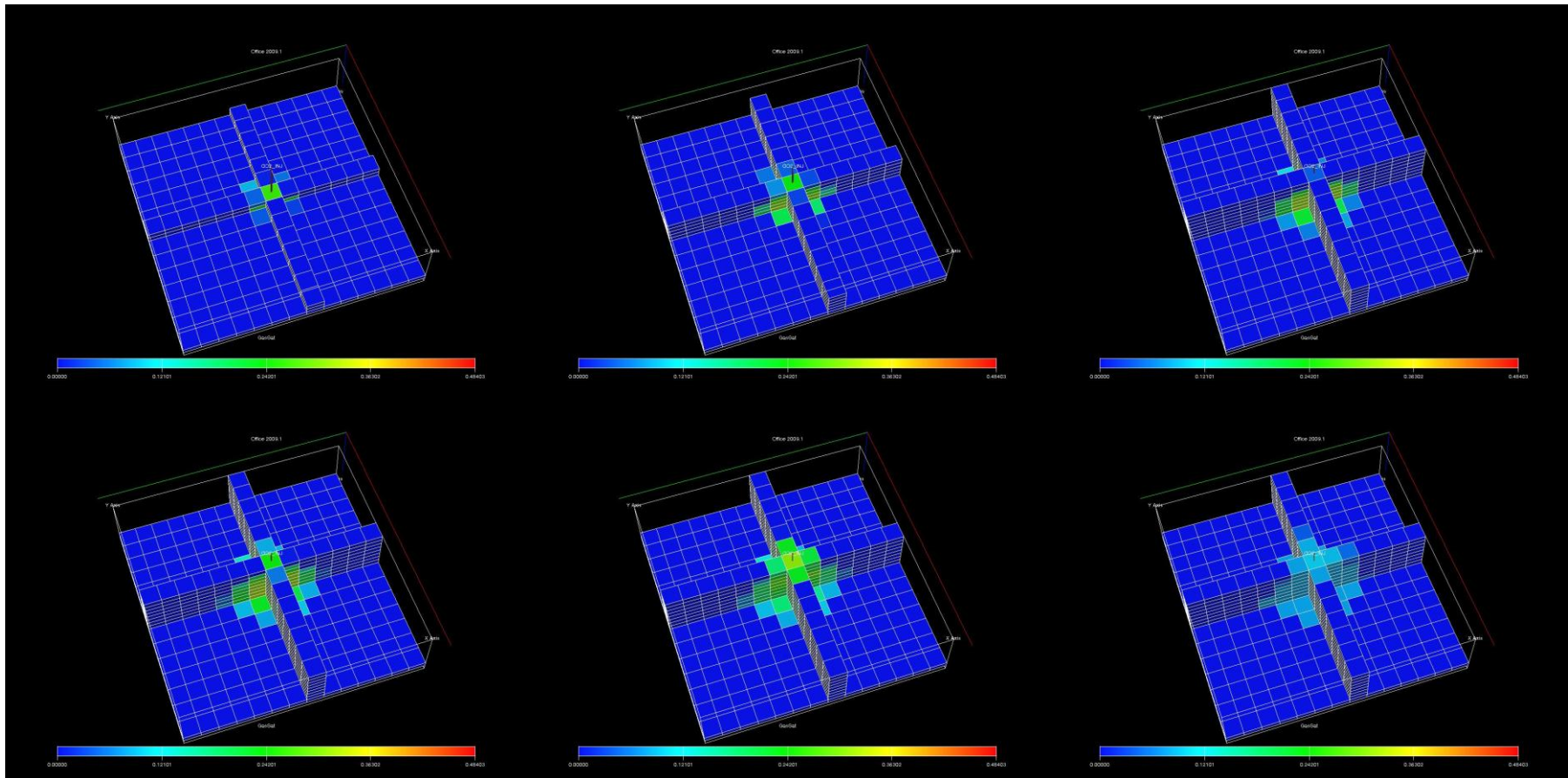
Slika D1. Promjene zasićenja s CO<sub>2</sub> u vremenu za (redom s lijeva na desno) 2015., 2025., 2035., 2040., 2045. i 4000. g. (model 1).



Slika D2. Promjene zasićenja s CO<sub>2</sub> u vremenu za (redom s lijeva na desno) 2015., 2025., 2035., 2040., 2045. i 4000. g. (model 2).

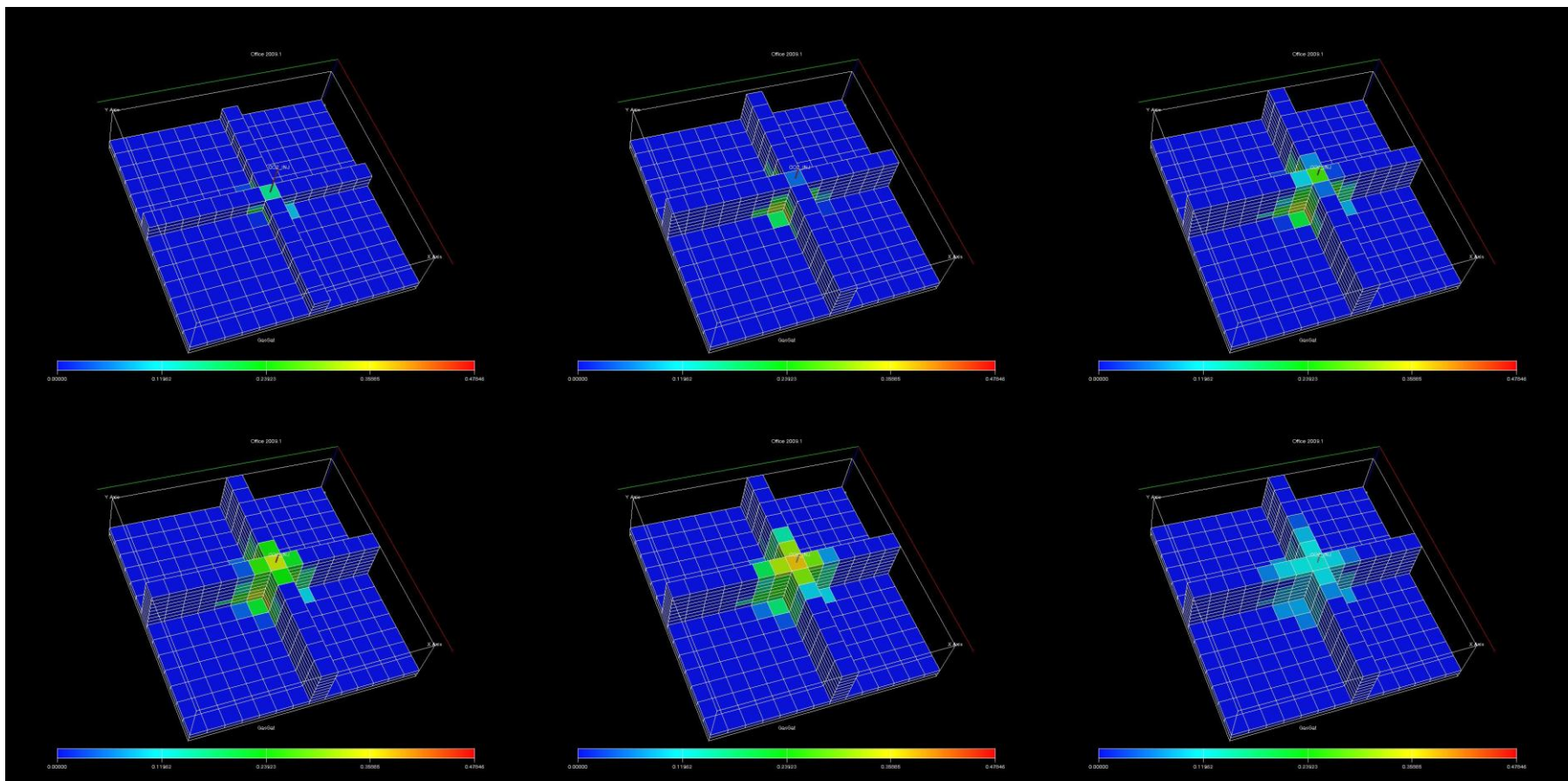


Slika D3. Promjene zasićenja s CO<sub>2</sub> u vremenu za (redom s lijeva na desno) 2015., 2025., 2035., 2040., 2045. i 4000. g. (model 3).



Slika D4. Promjene zasićenja s CO<sub>2</sub> u vremenu za (redom s lijeva na desno) 2015., 2025., 2035., 2040., 2045. i 4000. g. (model 4).





Slika D5. Promjene zasićenja s CO<sub>2</sub> u vremenu za (redom s lijeva na desno) 2015., 2025., 2035., 2040., 2045. i 4000. g. (model 5).

