

Brzina lateralnog širenja CO₂ utisnutog u duboke slane akvifere radi trajnog skladištenja

Logarušić, Božo

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:377401>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-29**



Repository / Repozitorij:

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



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

**BRZINA LATERALNOG ŠIRENJA CO₂ UTISNUTOG U DUBOKE
SLANE AKVIFERE RADI TRAJNOG SKLADIŠTENJA**

Diplomski rad

Božo Logarušić
N 318

Zagreb, 2022.

BRZINA LATERALNOG ŠIRENJA CO₂ UTISNUTOG U DUBOKE SLANE
AKVIFERE RADI TRAJNOG SKLADIŠTENJA

BOŽO LOGARUŠIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

Kako bi se pokazalo da u nekim situacijama za skladištenje CO₂ u duboki slani akvifer nije neophodno postojanje zamke, izrađen je tipski model utiskivanja CO₂ u horizontalni, lateralno neograničeni sloj bez zamke. Rađena je analiza osjetljivosti promjenom dubine, te propusnosti, a u rezultatima su promatrane brzine lateralnog širenja. Iz velikog broja simuliranih slučajeva (preko 50), ustanovljene su analitičke ovisnosti – u svakom slučaju je odnos vremena i maksimalnog radijusa širenja od bušotine opisiv logaritamskom funkcijom. Nakon toga je pronađena generalizirana multiparameterska analitička korelacija kojom se za većinu slučajeva dubina i propusnosti, radijus širenja CO₂ s vremenom može korelirati unutar pogreške radijusa širenja manje od 7,6 %.

Ključne riječi: komponentna simulacija, utiskivanje CO₂, duboki slani vodonosnik, širenje zone utisnutog CO₂

Diplomski rad sadrži: 50 stranica, 25 slike, 14 tablica, 60 referenci i 2 priloga.
Jezik izvornika: hrvatski

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

Mentor: dr. sc. Domagoj Vulin, redoviti profesor RGNf
Komentorica: dr. sc. Lucija Jukić, poslijedoktorandica RGNf

Ocjenjivači: dr. sc. Domagoj Vulin, redoviti profesor RGNf
dr. sc. Vladislav Brkić, izvanredni profesor RGNf
dr. sc. Iva Kolenković Močilac, docentica RGNf

Datum obrane: 15.09.2022., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

VELOCITY OF LATERAL SPREAD OF CO₂ INJECTED INTO DEEP SALINE
AQUIFERS FOR PERMANENT STORAGE

BOŽO LOGARUŠIĆ

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

Abstract

In order to show that in some situations the presence of a structural trap is not required for CO₂ storage, a generalized model of CO₂ injection in deep saline aquifer represented by a horizontal, laterally infinite layer, without structural or stratigraphic trap, was developed. A sensitivity analysis was performed by changing the depth and permeability, analysing the effect the change in the said parameters had on time and radius of lateral spreading of CO₂ plume. Analytical dependencies were obtained from a large number of simulated cases (over 50) - in each case the relationship between time and maximum spreading radius from the injection well can be described by a logarithmic function. Subsequently, a generalized analytical multi-parameter correlation was found to describe CO₂ plume movement with time within a spread radius with error of less than 7,6 % in different cases of depth and permeability.

Keywords: compositional simulation, CO₂ injection, deep saline aquifer, spread of CO₂ plume

Thesis contains: 50 pages, 25 figures, 14 tables, 60 references and 2 appendices.

Original in: Croatian

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

Mentor: Full Professor Domagoj Vulin, PhD

Co-mentor: Lucija Jukić, PhD

Reviewers: Full Professor Domagoj Vulin, PhD
Associate Professor Vladislav Brkić, PhD
Assistant Professor Iva Kolenković Močilac, PhD

Date of defense: September 15, 2022, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA	III
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA.....	IV
POPIS KORIŠTENIH KRATICA	V
1. UVOD.....	1
2. PREGLED LITERATURE	3
2.1. Sigurnost skladištenja CO ₂	8
2.1.1. Geomehnički problemi	8
2.1.2. Problemi s pornim tlakom	9
2.1.3. Problemi s bušotinama	9
2.1.4. Drugi problemi.....	9
3. ULAZNI PODATCI I SIMULACIJSKI SCENARIJI	10
4. REZULTATI.....	17
4.1 Analiza rezultata simulacijskih slučajeva	20
4.2 Regresija na rezultatne odnose radijusa i vremena	22
4.3 Generalizira korelacija odnosa vremena i radijusa širenja	23
5. DISKUSIJA I USPOREDBA REZULTATA S PODATCIMA IZ LITERATURE	34
6. ZAKLJUČAK.....	38
7. LITERATURA.....	40
8. GRAFIČKI PRILOZI	47

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Širenje zone CO ₂ prema točki preljeva u slučaju utiskivanja u anitklinalnu strukturu	4
Slika 2-2. T–P dijagram odnosa stabilnih faza za CO ₂ –H ₂ O–NaCl sustav	6
Slika 2-3. Promjena radijusa širenja zone visokog zasićenja CO ₂ s vremenom.....	7
Slika 3-1. Podatci o relativnoj propusnosti korišteni u svim slučajevima simulacije	10
Slika 3-2. Tijek rada analize tj. simulacije.....	11
Slika 3-3. Jednostavan računalni kod (Python) za izdvajanje svih podataka iz izlazne (RSM) simulacijske datoteke Eclipsea i tNavigatora.....	14
Slika 3-4. Jednostavan računalni kod (Python) za očitavanja vremena prodora u svaku promatranu ćeliju	15
Slika 4-1. Oblik CO ₂ zone u različitim koracima simulacije za setove 1 i 2.....	17
Slika 4-2. Oblik CO ₂ zone u različitim koracima simulacije za set 3	18
Slika 4-3. Oblik CO ₂ zone u različitim koracima simulacije za set 4	19
Slika 4-4. Tipični oblik korelacije radijusa u odnosu na vrijeme	20
Slika 4-5. Relativna pogreška korelacije za sva vremena u svim slučajevima simulacije (simulacijski set 1).....	24
Slika 4-6. Prikaz simuliranih naspram koreliranih radijusa za sva vremena za scenarijski set 1	25
Slika 4-7. Odnos vremena i apsolutne pogreške za scenarijski set 2	26
Slika 4-8. Prikaz simuliranih naspram koreliranih radijusa za sva vremena za scenarijski set 2	26
Slika 4-9. Odnos radijusa i apsolutne pogreške za scenarijski set 2	27
Slika 4-10. Odnos vremena i apsolutne pogreške za scenarijski set 3	28
Slika 4-11. Prikaz simuliranih naspram koreliranih radijusa za sva vremena za scenarijski set 3	29
Slika 4-12. Odnos radijusa i apsolutne pogreške za scenarijski set 3	29
Slika 4-13. Odnos vremena i apsolutne pogreške za scenarijski set 4	31
Slika 4-14. Prikaz simuliranih naspram koreliranih radijusa za sva vremena za scenarijski set 4	31
Slika 4-15. Odnos radijusa i apsolutne pogreške za scenarijski set 4	32
Slika 5-1. Rezultati analize pogreške za visokotemperaturno duboko ležište iz rada Nordbotten.....	35

Slika 5-2. Prikaz korelacije simuliranog i analitički računatog radijusa prema digitaliziranim podacima od Nordbotten.....	35
Slika 5-3. Prikaz korelacije simuliranog i analitički računatog radijusa do 1000 m, prema digitaliziranim podacima od Nordbotten	36

POPIS TABLICA

Tablica 3-1. Simulacijski set scenarija	12
Tablica 3-2. Različiti setovi simulacijskih scenarija.....	13
Tablica 4-1. Dobiveni koeficijenti za pojedinačne slučajeve	20
Tablica 4-2. $c_{i, j}$ koeficijenti	22
Tablica 4-3. Prosječna apsolutna pogreška za sve promatrane slučajeve	22
Tablica 4-4. Koeficijenti za GMRC	23
Tablica 4-5. Relativne pogreške GMRC-a za različita vremena	24
Tablica 4-6. Relativne pogreške GMRC-a za različita vremena (set 2)	27
Tablica 4-7. Koeficijenti GMRC korelacije za simulacijski set 2	28
Tablica 4-8. Relativne pogreške GMRC-a za različita vremena (set 3)	30
Tablica 4-9. Koeficijenti GMRC korelacije za simulacijski set 3	30
Tablica 4-10. Relativne pogreške GMRC-a za različita vremena (set 4).....	32
Tablica 4-11. Koeficijenti GMRC korelacije za simulacijski set 4.	33
Tablica 5-1. Relativne pogreške podataka iz literature	36

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA

<u>Oznaka</u>	<u>Jedinica</u>	<u>Značenje</u>
Nc	-	kapilarni broj
u	[m/s]	Darcyeva brzina
h	[m]	dubina
T	[°C]	temperatura
k	[mD]	propusnost
p	[Pa]	tlak
re	[%]	apsolutna relativna pogreška
r _{sim}	[m]	simulirani maksimalni radijus zasićenja CO ₂
r _{calc}	[m]	izračunat (korelacijski) maksimalni radijus zasićenja CO ₂
r _i	[m]	simulirani radijus
t	[dan, godina]	vrijeme za scenarij i
μ_w	[Pa·s]	viskoznost vode
σ	[Nm/s]	međupovršinska napetost

POPIS KORIŠTENIH KRATICA

<u>Kratika</u>	<u>Značenje</u>
CCS	izdvajanje i skladištenje CO ₂ (engl. <i>Carbon capture and storage</i>)
CCUS	hvatanje, korištenje i skladištenje ugljikovog dioksida (engl. <i>Carbon capture, utilisation and storage</i>)
DSA	duboki slani vodonosnici (engl. <i>Deep Saline Aquifer</i>)
GMRC	generalizirana korelacija dobivena multivarijantnom regresijom (engl. <i>generalized correlation obtained by multivariate regression</i>)

1. UVOD

Kada se razmatra skladištenje CO₂ u podzemnim formacijama, procjenjuje se da duboki slani vodonosnici imaju puno veće kapacitete skladištenja u usporedbi s iscrpljenim ležištima nafte i plina. Iz tog razloga, dubokim slanim vodonosnicima pridaje se veća pažnja u različitim konceptima za izdvajanje i skladištenje CO₂ (engl. *Carbon capture and storage*, CCS) te hvatanje, korištenje i skladištenje ugljikovog dioksida – CCUS (engl. *Carbon capture, utilisation and storage*). Ovim razmatranjima suprotstavlja se činjenica da je tijekom desetljeća proizvodnje iz ležišta ugljikovodika prikupljeno mnogo više podataka o građi ležišta, uključujući petrofizikalna svojstva kolektorskih i izolatorskih stijena, ali i o mogućoj dinamici utiskivanja (tj. tlaka, injektivnosti i brzina migracije fluida). U tom smislu veća pouzdanost, proizišla iz boljeg poznavanja značajki iscrpljenih ležišta ugljikovodika u usporedbi s dubokim slanim vodonosnicima, pogoduje takvim ležištima u smislu analize utiskivanja CO₂, stvarajući svojevrsni kompromis između potencijalnog skladišnog kapaciteta i stvarne dinamike s kojom se CO₂ može sigurno skladištiti u podzemnim skladišnim objektima. Ključni parametri za skladištenje CO₂ uključuju geomehanička svojstva (Rutqvist, 2012) i, u određenoj mjeri, toplinske učinke na geomehanička svojstva (Preisig i Prévost, 2011), uz tlak loma izolacijske (pokrovne) stijene (što uzrokuje migraciju CO₂ u pliće slojeve) kao jednim od najbitnijih problema (Celia et al., 2015; Aminu et al., 2017). Kod skladištenja u dubokim slanim vodonosnicima, injektiranje počinje pri početnom tlaku, a raspon tlaka od početka do kraja utiskivanja manji je nego kod utiskivanja u iscrpljena ležišta ugljikovodika. Budući da je kapacitet skladištenja ograničen povećanjem tlaka tijekom utiskivanja, što opet ovisi o petrofizikalnim parametrima kao što su propusnost, heterogenost poroznosti i relativne propusnosti i zasićenja fluidima, ali i o volumenu pora podzemnog ležišta, potrebno je opisati dinamiku fluida. Može se ustvrditi da postoji jaz između konceptualnog razmatranja mogućih CCS ili CCUS lanaca i stvarne karakterizacije svih elemenata CCS sustava. Za svaki industrijski izvor CO₂ mogu se razmotriti različite strategije hvatanja (trenutak kada počinje hvatanje CO₂, tehnologija hvatanja, učinkovitost hvatanja, ekonomska isplativost), transporta i eventualno utilizacija (iskorištavanje) CO₂ u suradnji s drugim akterima. Kao završni dio lanca provodi se analiza za svako potencijalno podzemno skladište korištenjem velike količine podataka prikupljenih ispitivanjem bušotina, seizmičkim mjerenjima i numeričkim simulacijama s detaljnim geološkim i petrofizikalnim opisom zamki pogodnih za utiskivanje.

Budući da je takva detaljna analiza podzemnog skladištenja u studijama kojima je cilj optimizacija cijelog CCS lanca neodrživa, najčešća analiza za duboke slane vodonosnike (engl. *Deep Saline Aquifers*, DSA) je omjer efektivnog volumena (u kojem se CO₂ može sigurno uskladištiti) i ukupni volumen kartiranog vodonosnika. Dakle, za duboki slani vodonosnik koji je inicijalno identificiran i kartiran kao stijensko tijelo regionalnog prostiranja, pouzdanost skladištenja se povećava, obično identifikacijom antiklinalnih struktura i procjenom dubine takozvane točke preljeva (engl. spill point), uobičajeno u podnožju antiklinale (Slika 2-1.). Točka preljeva pri tom predstavlja projicirano presijecište krovinske plohe podzemnog skladišnog objekta i zamišljene horizontalne plohe koja indicira „razinu“ do koje se zamka može ispuniti fluidom koji se utiskuje, a da ne dođe do migracije utisnutog fluida iz zamke dalje u formaciju.

U ovom radu, na temelju pretpostavke da zbog utiskivanja CO₂ nastaje zona visokog zasićenja CO₂ (engl. *plume*) koja se gravitacijski pomiče prema krovini skladišnog objekta, simulirano je utiskivanje CO₂ u sloj zasićen slojnom vodom na različitim dubinama (tj. pri različitim tlakovima i temperaturama) i za različite petrofizikalne parametre.

Istražena je mogućnost utiskivanja u horizontalan, neograničen sloj kako bi se dokazalo da CO₂ ne može migrirati bočno izvan određenog graničnog radijusa. Također je predložen analitički izraz za procjenu takvog radijusa kako bi se olakšalo ispitivanje dinamike utiskivanja u duboke slane vodonosnike.

Potreba za procjenom polumjera širenja CO₂ pojavila se tijekom aktivnosti unutar radnog paketa 5 i procjene CCUS scenarija na projektu Strategy CCUS (Strategy CCUS, 2019). Dva regionalna vodonosnika analizirana su u scenarijima pomoću alata stvorenog tijekom projekta, a napravljeno je više opažanja kretanja, tj. migracije CO₂ kako bi se ojačala pouzdanost odabranih potencijalnih lokacija za utiskivanja.

Analize u ovom radu rađene su uz sljedeću hipotezu: moguće je pronaći jednadžbu lateralnog širenja CO₂ koja će uz odgovarajuću točnost biti primjenjiva za optimiranje geološkog skladištenja u duboke slane vodonosnike.

Takva jednadžba bila bi atraktivna za primjenu s ciljem smanjenja učestalosti skupih aktivnosti monitoringa kretanja CO₂ (pomoću 4D seizmike, kontrolnih bušotina i ostalih metoda).

2. PREGLED LITERATURE

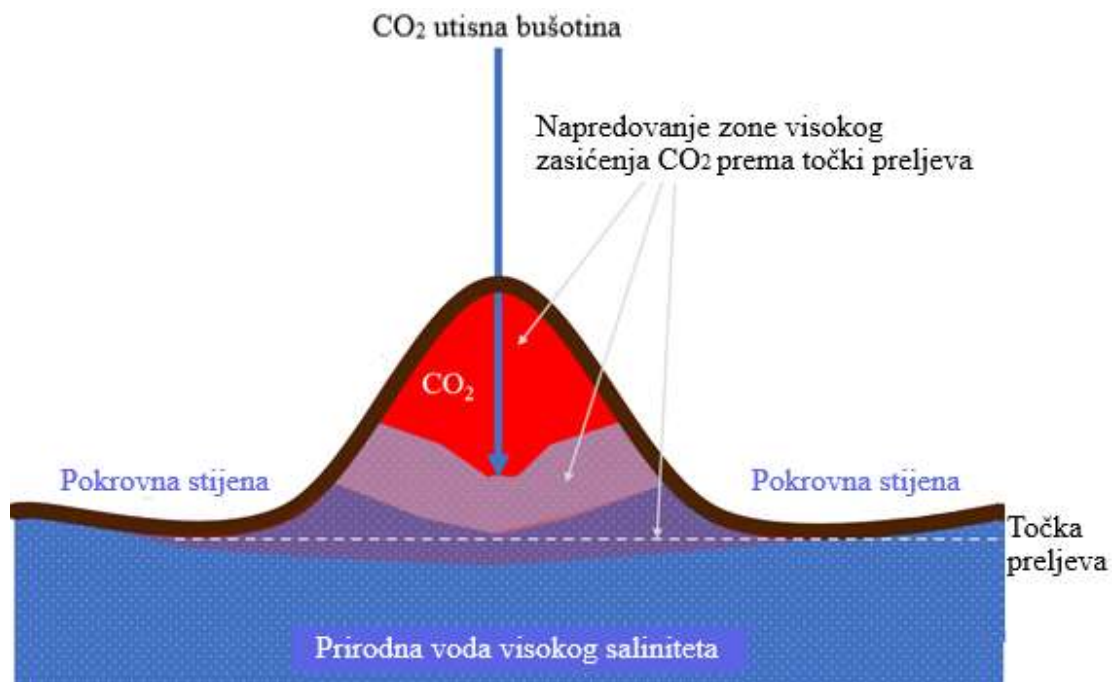
Rane simulacijske studije otkrivaju neke karakteristike utiskivanja CO₂ u DSA. Utiskivanje CO₂ u slojnom (slanom) vodom zasićenu poroznu stijenu sklonu hidrodinamičkoj nestabilnosti, uzrokuje različite brzine fronte CO₂, i vertikalno i horizontalno. U određenoj mjeri to povezuje pojavu viskoznog prstolikog prodiranja s anizotropijskom propusnosti (Yu et al., 2020) i s kapilarnim brojem (Pruess et al., 2001):

$$N_c = \mu_w \cdot u / \sigma \quad (2-1.)$$

gdje je N_c kapilarni broj, μ_w je viskoznost vode (Pa·s), u (m/s) je Darcyjeva brzina (fluks), a σ (N/m) je međupovršinska napetost između utisnutog CO₂ i slane otopine (vode visokog saliniteta koja predstavlja slojnu vodu, engl. *brine*). Iako kapilarni broj i pokretljivost (engl. *mobility*) mogu pružiti informacije o koeficijentu istiskivanja (engl. *displacement efficiency*) kada se fluid/tekućina utiskuje u podzemlje, oni su nedostadni za određivanje dinamike kretanja CO₂ iz utisnih bušotina. Slijedila su istraživanja u tom smjeru kako bi se dobile krivulje relativne propusnosti sustava CO₂-slana voda (Bachu, 2013). Relativna propusnost za svaki fluid mijenja se sa zasićenjem, a rezultat ovog mehanizma je povećana pokretljivost CO₂ u blizini utisne bušotine (i s vremenom na određenoj udaljenosti od bušotine). Zbog toga će promjena relativne propusnosti rezultirati varijacijama injektivnosti do 20% (Burton, Kumar i Bryant, 2009), prvenstveno zato što je svojstvo mjerljivo na razini pora (engl. *pore scale*), na koje utječu složene geometrije pora, heterogene širine pornih kanalića, međupovršinska napetost i kontaktni kut (močivost). Kako bi smanjili nesigurnost u procjenama relativne propusnosti, autori su pokušali izvući univerzalne zaključke putem mjerenja istiskivanja iz jezgre (engl. *coreflood measurements*) i zapažanja rezidualnog uzamčenja (engl. *residual trapping*) za različite sastave stijena (engl. *rock chemistries*) i posljedično močivosti (engl. *wettabilities*) (Krevor et al., 2012; Xie et al., 2017). U gotovo svim slučajevima takvi rezultati završavaju korelacijom relativne propusnosti koja se temelji na generaliziranim Coreyevim i Brooksovim jednadžbama (Brooks i Corey, 1964b, 1964a, 1966), u širokoj uporabi u simulacijskim modelima ležišta za trajno skladištenje CO₂, kao faktor koji utječe na promjenu tlaka i oblik tj. obujam zone CO₂ tijekom vremena (Hosseini et al., 2013; Mathias et al., 2013; Zhang i Agarwal, 2013; Yoshida et al., 2016).

Nakon utiskivanja u formaciju, CO₂ (koji je manje gustoće od slane tj. slojne vode u DSA) putuje prema gore zbog gravitacije (Slika 2-1.). Ako postoji značajni hidraulički gradijent,

CO₂ može migrirati lateralno iz zamke. Utjecaj gradijenata na migraciju CO₂, kao i potencijal pokretanja CO₂ u željenom smjeru, proučavan je u literaturi (Vosper et al., 2018). Porozna sredina na dubinama u kojima se planira geološko skladištenje CO₂ uglavnom je karakterizirana vrlo malim inicijalnim hidrauličkim gradijentima, nedostatnima za istiskivanje CO₂ iz trenutno zauzetih zamki (engl. *occupied traps*). To potvrđuju i rezultati interpretacije seizmičkog monitoringa (Chadwick et al., 2009, 2010; QueiBer i Singh, 2013; Landrø i Zumberge, 2017; Cowton et al., 2018; Cho i Jun, 2021).



Slika 2-1. Širenje zone CO₂ prema točki preljeva u slučaju utiskivanja u anitklinu strukturu

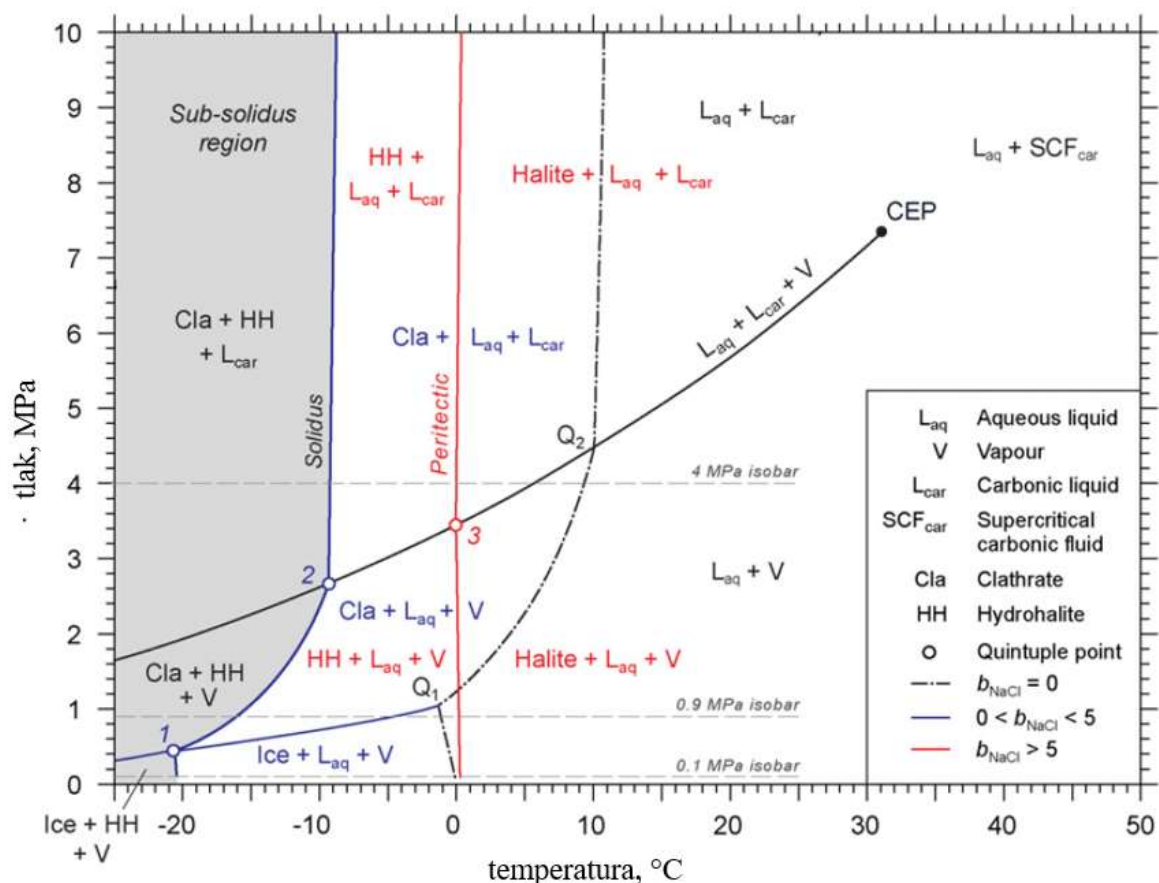
Zbog djelovanja jake sile uzgona koja se javlja kad je CO₂ utisnut u DSA, krivulje relativne propusnosti, koje se obično koriste za predstavljanje horizontalnog toka, treba koristiti s oprezom (Bakhshian et al., 2020). Drugim riječima, budući da anizotropija propusnosti ima manji utjecaj, 3D simulacijski modeli s manje prostora (tanji sloj u koji se utiskuje) za vertikalno kretanje CO₂ (i većim bočnim/lateralnim gradijentom tlaka) mogu se jednostavnije simulirati. Tijekom razdoblja utiskivanja CO₂, superkritični CO₂ se kontinuirano utiskuje, što povećava efikasnost istiskivanja slane slojne vode zbog povećanja relativne propusnosti za CO₂ u zoni blizu bušotine te posljedično povećanja tlaka koji je potreban da se voda vrati u pore i potisne CO₂ na kontaktu (fronti) sa CO₂ zonom. U toj zoni fronte povoljan je odnos mobilnosti CO₂ i vode (tj. CO₂ nije toliko mobilan kao u zoni blizu bušotine) što dodatno pomaže potiskivanju fronte CO₂-vode od bušotine. Imbibicija fluida

se događa iza fronte istiskivanog fluida (slojne vode) i može prekinuti kontinuitet CO₂, tj. *začepiti pore*, dok se proces dreniranja odvija na samoj fronti istiskivanja (Hefny et al., 2020). Međutim, ova pojava ima i pozitivan učinak - dio CO₂ je zarobljen u pornom prostoru kao zaostala nepokretna faza nakon apsorpcije, što rezultira njegovom sekvestracijom tijekom vremena (rezidualno uzamčivanje).

Drugi problem s modeliranjem utiskivanja CO₂ je odvajanje faza, budući da CO₂ može postojati i kao kapljevita i kao plinovita faza kada je u kontaktu sa slanom vodom. U principu, sustav slane vode i CO₂ u jednom rasponu (*srednjih*) temperatura može imati i 4 faze: plinovita (engl. *gaseous*) dominantno CO₂ i plinovita dominantno voda, i također je isto slučaj sa kapljevitom (engl. *aqueous*) fazom (Zhao, 2014; Akinfiev i Diamond, 2010, Slika 2-2.)

Prema određenim istraživanjima (Shen et al., 2015), zona kapljevite faze CO₂ može biti više od pet puta veća od zone plinovite faze. Imajući to na umu, razmatranju korelacija relativne propusnosti na temelju podataka iz literature treba pristupiti s oprezom. Dok kapilarni tlak ima mali utjecaj na modeliranje ležišta tijekom faze injektiranja, može imati utjecaj na učinke efekata kapilarnog uzamčivanja (engl. *capillary trapping effects*) nakon utiskivanja, te je i intuitivno kako je mali učinak kapilarnog uzamčivanja na primarnu migraciju zone zasićenja utisnutim fluidom (Cihan et al., 2017).

Već je utvrđeno da kapacitet skladištenja CO₂ postoji u dubokim slanim vodonosnicima s otvorenim lateralnim granicama, te da ovisi o kombiniranim učincima fizičkih i kemijskih mehanizama uzamčivanja unutar definirane domene skladištenja (engl. *defined storage domain*) (Andersen i Sundal, 2021). Dostupnost podataka o Sleipnerovom polju omogućila je više načina za modeliranje zone CO₂. Postoji niz analiza i studija koje obično prikazuju niz rezultata simulacije, koji pomažu u određivanju odnosa između relevantnih parametara (Liu et al., 2016; VoThanh et al., 2018; Fu et al., 2019.; Ahmadiania i Shariatipour, 2020.; Mukherjee i Dutta, 2020; Yu et al., 2020), pri čemu neke simulacijske studije otkrivaju da veći tlak utiskivanja povoljnije utječe na utiskivanje CO₂ (Hwang et al., 2015.; Vulin et al., 2018). Prema Grimstadu i suradnicima (2020), korištenjem surfaktanata za kontrolu mobilnosti CO₂, može se povećati kapacitet skladištenja u DSA za više od dva puta. Također, različiti mikroorganizmi imali su povoljan utjecaj na injektivnost i kapacitet skladištenja u različitim fazama procesa skladištenja CO₂ (Shen et al., 2020).



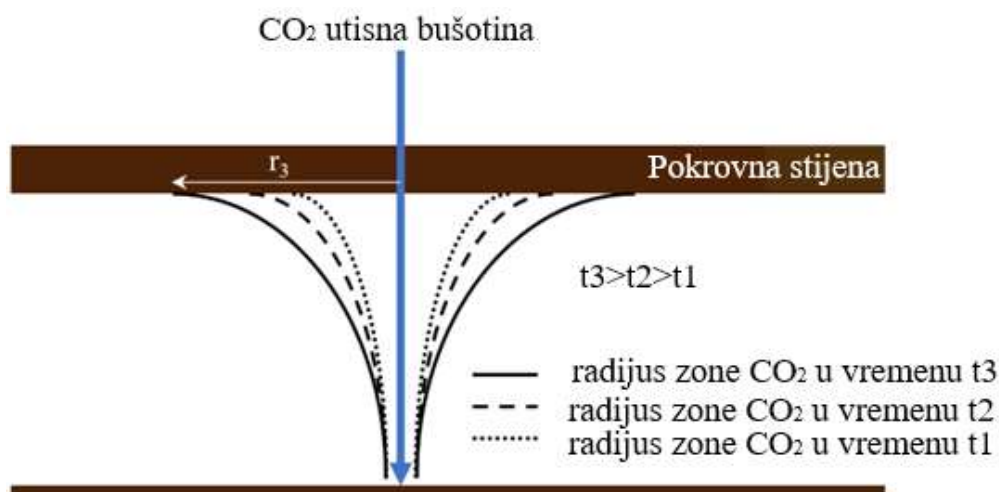
Slika 2-2. T–P dijagram odnosa stabilnih faza za CO₂–H₂O–NaCl sustav (Akinfiev i Diamond, 2010)

Mikrobna aktivnost korištena je za ograničavanje podzemnoga skladišta na način da je njezino djelovanje rezultiralo povećanjem precipitacije minerala (engl. *precipitation*) u raznim vrstama stijena, smanjujući vjerojatnost širenja izvan formacije, tj. područja i zone primarno ciljane za skladištenje CO₂. Optimiziranje i predviđanje brzine širenja CO₂ zone potrebno je zbog planiranja utiskivanja, uključujući broj utisnih bušotina i procjene ulaganja u njihovu izradu (Liu i Hsieh, 2016; Allen et al., 2017; Hoffman i Alessio, 2017; Vulin et al., 2017) i zbog skupih učestalih kampanja praćenja (engl. *monitoring campaigns*, Caspari et al., 2015; Pevzner et al., 2015; Sharma i Van Gent, 2018).

Što se tiče morfologije zone CO₂, postignut je napredak u opisivanju kretanja zone CO₂ koja nije lako prepoznatljiva jednostavnom vizualnom procjenom zasićenja CO₂, što je prepoznato kao korisna metoda za praćenje i bolje razumijevanje značajki zone CO₂ nakon utiskivanja (Harp et al., 2019; Zapata et al., 2020).

Zbog potrebe za utilizacijom CO₂, kako bi projekti utiskivanja CO₂ bili isplativi, nedavno su istraženi učinci lateralnog kretanja CO₂ zone za novu i složeniju obnovljivu energiju, obično u kombinaciji sa sustavima za skladištenje CO₂ (Qiao et al., 2020; Youssef, Tran i Matthäi, 2021; Ezekiel et al., 2022; Fleming et al., 2022; Norouzi et al., 2022).

Mobilnost zone CO₂ određena je heterogenošću i anizotropijom formacije skladišta, no, dugoročno gledano, tijekom utiskivanja CO₂ zona ima tendenciju najbrže migrirati u blizini pokrovne stijene (Strandli i Benson, 2013.; Zhang et al., 2015). Na temelju toga i pretpostavki iz prethodnih radova (Nordbotten et al., 2005; Fu et al., 2019.), koji su na neki način također intuitivni za slučajeve utiskivanja CO₂ u horizontalne formacije, fokus u ovom radu je na promjeni polumjera širenja CO₂ u najgornjem dijelu sloja, tj. blizu pokrovne stijene (Slika 2-3.).



Slika 2-3. Promjena radijusa širenja zone visokog zasićenja CO₂ s vremenom

U literaturi nije pronađen analitički izraz za procjenu brzine širenja zone visokog zasićenja CO₂, osim nekoliko radova koji uzimaju manji broj parametara i samo uspoređuju numerički simulirano i analitički dobiveno lateralno i vertikalno širenje (Nordbotten et al., 2005; Yu et al., 2020), koji su uspoređeni i raspravljani/razmotreni u diskusiji. U ovom diplomskom radu, simulacijski modeli koji uzimaju u obzir različita svojstva skladišnog prostora (prvenstveno dubinu, tj. tlak i temperaturu, te propusnost) korišteni su za pružanje višeparametarske korelacije za procjenu maksimalnog lateralnog kretanja zone visokog zasićenja CO₂ s vremenom.

2.1. Sigurnost skladištenja CO₂

Potencijalni problemi povezani s utiskivanjem CO₂ u zatvorenu strukturu zajednički su za podzemna skladišta, bilo da se radi o iscrpljenom ležištu ugljikovodika ili slanom vodonosniku/akviferu, a neki od potencijalnih problema su (Bentham i Kirby, 2005):

2.1.1. Geomehanički problemi

Kemijske interakcije utisnutoga CO₂ sa stijenama i slojnom vodom potencijalno su važne. Reakcije koje se mogu dogoditi vrlo su specifične, a ovisne o geokemijskim uvjetima i relativnoj zastupljenosti različitih primarnih minerala ustijeni, koja varira ovisno o litologiji, odnosno mineralnom sastavukolektorskih i pokrovnih stijena. Pouzdana predviđanja kemijskih reakcija sustava CO₂-slana voda-stijena temelje se nageokemijskim eksperimentima koji koriste fizičke uzorke stijena.

– Korozija matriksa ležišne stijene mješavinama CO₂/voda, što dovodi do zbijanja ili kolapsa formacije i time do razvoja pukotina i stvaranja novih migracijskih putova kroz pokrovnu stijenu.

– Može se pojaviti otapanje primarnih minerala i taloženje sekundarnih minerala, tj. taloženje minerala u porama ležišne stijene, što dovodi do smanjenja efektivne poroznosti i posljedično propusnosti, što rezultira problemima s utiskivanjem. To bi moglo značiti da bi se moralo odustati od utiskivanja ako bi utiskivanje dovelo do prekomjernog porasta pornog tlaka.

– Otapanje komponenti pokrovne stijene mješavinom CO₂/vode, što može dovesti do gubljenja „svojtva“ pokrovne stijene.

– Dehidracija pokrovne stijene reakcijom sa suhim utiskivanim CO₂ (suhi kako bi se smanjili problemi korozije bušotine), što dovodi do „skupljanja“ i stvaranja migracijskih puteva za CO₂.

– Otapanje CO₂ u pornom fluidu i transport izvan strukture prirodnim ili induciranim strujanjem pornog fluida

Treba napomenuti da neke od ovih reakcija mogu trajati jako dugo, što otežava simulaciju i prikupljanje podataka u relevantnim vremenskim razmjerima.

2.1.2. Problemi s pornim tlakom

Ovi problemi su vjerojatno specifični za pojedinačne situacije, a vjerojatnost pojave problema najbolje se procjenjuje simulacijom u modelu ležišta.

- Frakturiranje pokrovne stijene, zbog povećanih pornih tlakova u ležištu.
- Otvaranje već postojećih, ali prethodno zatvorenih migracijskih putova (npr. rasjeda) kroz pokrovnu stijenu, uzrokovano povećanim tlakom tekućine u porama tijekom utiskivanja.
- Tlak plina u akumulaciji CO₂ premašuje ulazni kapilarni tlak pokrovnih stijena, što dovodi do migracije/širenja CO₂ kroz pokrovnu stijenu (engl. *breaching*).

2.1.3. Problemi s bušotinama

Malo je vjerojatno da će biti mnogo postojećih bušotina kroz slani akvifer, osim ako nisu usmjerene na dublje horizonte, svakako mnogo manje nego u iscrpljenim poljima ugljikovodika. Međutim, za one koje postoje, moguće je propuštanje CO₂ ukoliko su loše zatvorene ili problem može nastati uslijed kvara same utisne bušotine.

Postoji mogućnost propuštanja CO₂ zbog oštećenja cementa ili zacijevljenja u bušotinama koje su probušile podzemni skladišni objekt.

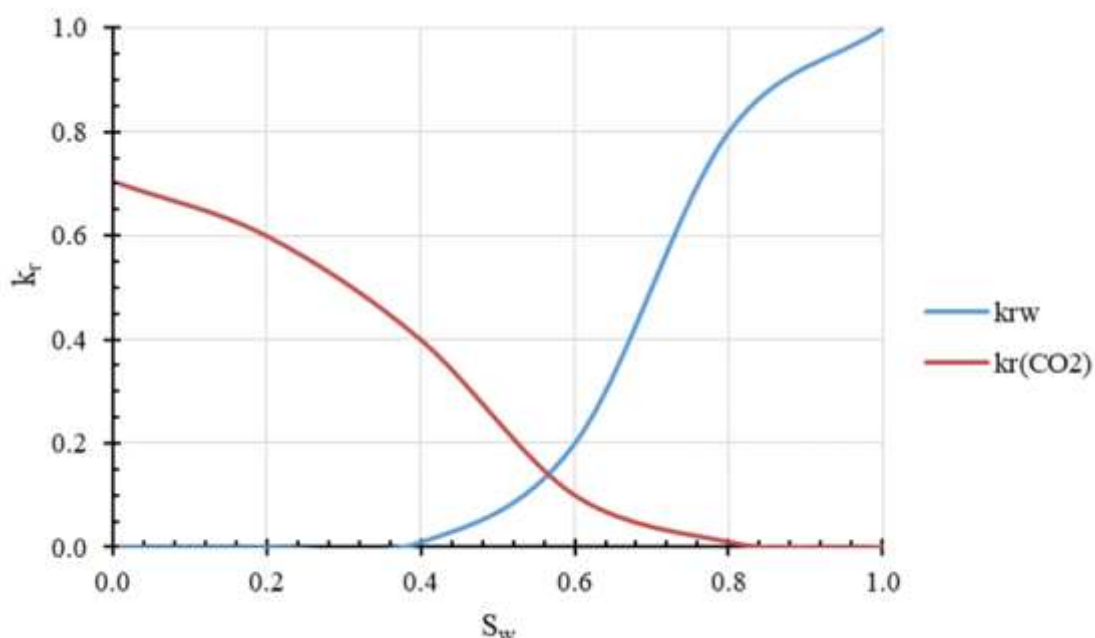
2.1.4. Drugi problemi

Prisutnost neidentificiranih migracijskih puteva kroz pokrovnu stijenu, npr. oni koji se ne mogu identificirati interpretacijom seizmičkih profila, jer su ispod granice razlučivosti.

Propuštanje CO₂ preko mjesta izlivanja (engl. *spill point*) u podnožju zamke, npr. zbog loše procijenjenog razmjera efekta prstolikog prodiranja ili netočnog kartiranja strukturnog zatvaranja (engl. *structural closure*; (Bentham i Kirby, 2005).

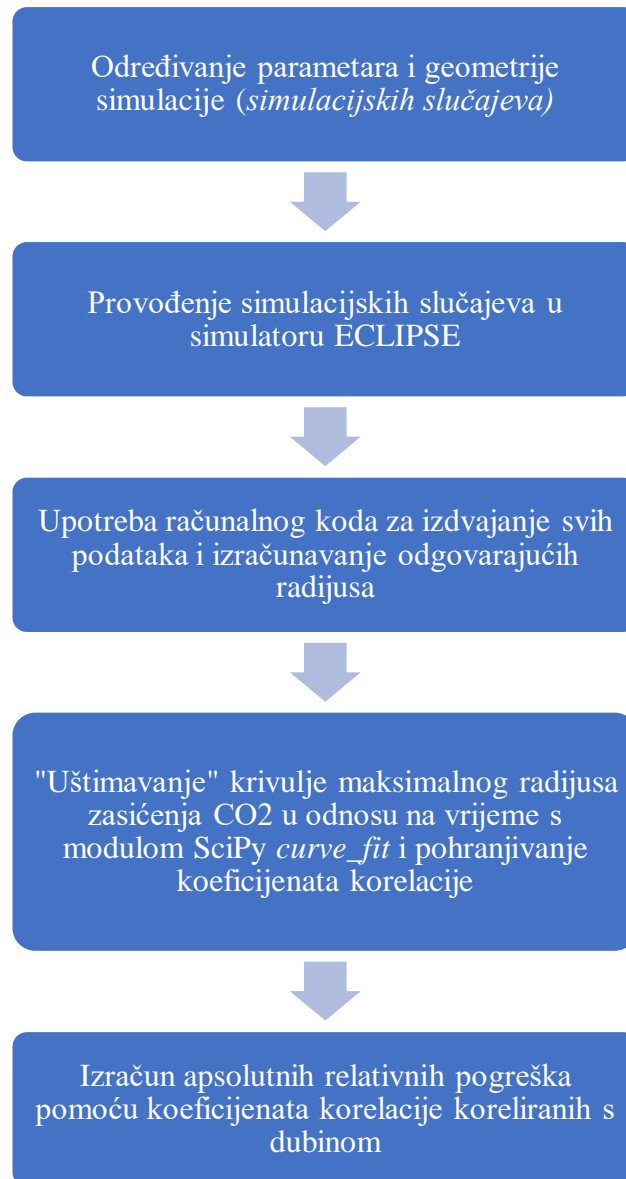
3. ULAZNI PODATCI I SIMULACIJSKI SCENARIJI

Analiza je koncipirana na način da se maksimalni radijus od utisne bušotine oko koje s vremenom raste zasićenje CO₂ može korelirati s dubinom (koja uključuje gradijente temperature i hidrostatskog tlaka) te s propusnošću. Simulacija utiskivanja u jednu bušotinu je napravljena u komponentnom simulatoru Eclipse (Schlumberger, 2021) s CO₂SOL modulom za topljivost CO₂. Osnovni parametri su poroznost od 25% i krivulja relativne propusnosti dobivena na sličan način kao što je opisano u Vulin et al. (2017), a sama analiza predstavlja proširenje već opsežne analize scenarija iz radnog paketa 5 u okviru projekta Strategy CCUS (Slika 3-1.). Spomenute analize radene su za regiju Sjeverne Hrvatske (Strategy CCUS, 2019), gdje su razmatrana dva regionalna vodonosnika. Geometrija simulacijskog modela definirana je s $NX \times NY \times NZ = 50 \times 50 \times 20$ blok centriranih ćelija, s dimenzijama svake ćelije $dx \times dy \times dz = 50 \text{ m} \times 50 \text{ m} \times 10 \text{ m}$, osim onih na granicama koje su $dx \times dy \times dz = 3000 \text{ m} \times 3000 \text{ m} \times 10 \text{ m}$, zbog uklanjanja bočnih rubnih efekata. Takva postavka (i drugi detalji u osnovnom modelu) već je opravdana i objašnjena u Vulin et al. (2017), a krivulja relativne propusnosti definirana je koeficijentima preuzetima iz literature i usporedbom s laboratorijskim rezultatima istiskivanja fluida iz jezgre iz obližnjeg ležišta plina.



Slika 3-1. Podatci o relativnoj propusnosti korišteni u svim slučajevima simulacije

Analizirani simulacijski slučajevi osmišljeni su (Slika 3-2.) da pokriju dovoljno podataka o propusnosti, tlaku i temperaturi.



Slika 3-2. Tijek rada analize tj. simulacije

Tlak je izračunat za svaku dubinu pretpostavljajući hidrostatski gradijent, temperaturni gradijent je $30^{\circ}\text{C} / 1000\text{ m}$ (počevši od 50°C na 1000 m da se prilagodi očekivanim vrijednostima u području razmatranih vodonosnika), a pet scenarija propusnosti ($k = 50, 100, 150, 200$ i 250 mD) je uzeto u obzir za svaku dubinu. Također je rađena analiza sa različitim protočnim količinama utiskivanog CO_2 (Tablica 3-1.).

Tablica 3-1. Simulacijski set scenarija

Naziv	h	p	T	k
	m	bar	°C	mD
1000m-50	1000	100	50	50
1000m-100	1000	100	50	100
1000m-150	1000	100	50	150
1000m-200	1000	100	50	200
1000m-250	1000	100	50	250
1500m-50	1500	150	65	50
1500m-100	1500	150	65	100
1500m-150	1500	150	65	150
1500m-200	1500	150	65	200
1500m-250	1500	150	65	250
2000m-50	2000	200	80	50
2000m-100	2000	200	80	100
2000m-150	2000	200	80	150
2000m-200	2000	200	80	200
2000m-250	2000	200	80	250
2250m-50	2250	225	87.5	50
2250m-100	2250	225	87.5	100
2250m-150	2250	225	87.5	150
2250m-200	2250	225	87.5	200
2250m-250	2250	225	87.5	250
2500m-50	2500	250	95	50
2500m-100	2500	250	95	100
2500m-150	2500	250	95	150
2500m-200	2500	250	95	200
2500m-250	2500	250	95	250
3000m-50	3000	300	110	50
3000m-100	3000	300	110	100
3000m-150	3000	300	110	150
3000m-200	3000	300	110	200
3000m-250	3000	300	110	250

Scenarije iz tablice 3-1. se modificiralo te se ista analiza ponavljala uz još neke promijenjene parametre, poput debljine raskrivenog intervala i brzine protjecanja. Bazni slučaj (engl. *base case scenario*) ima raskriveni raspon od petog do 15-og proslojka i brzinu utiskivanja 267379,7 m³/dan, što odgovara masi od 500 t/dan ili 0,1825 Mtpa. Iduća odabrana brzina protjecanja bila je duplo veća, pri čemu je posvećena pažnja potrebnom tlaku utiskivanja i povećanju ležišnog tlaka (u svim slučajevima razmatranima u ovom radu ne dolazi do nelogično velikih povećanja tlakova).

Također, simulirano je za utiskivanje u cijelom raskrivenom sloju (Tablica 3-2.). Za taj novi set simulacijskih slučajeva očekivalo se „lakšu“ tj. bolju korelaciju parametara, pošto zona zasićenja CO₂ od početka simulacije ima vertikalne granice na vrhu i dnu sloja.

Tablica 3-2. Različiti setovi simulacijskih scenarija

	brzina utiskivanja (m³/dan kt/god)	cijeli raskriveni interval
set 1	267379,7 182,6	ne
set 2	534759,4 365,2	ne
set 3	267379,7 182,6	da
set 4	534759,4 365,2	da

Za takve scenarije napravljen je jednostavan računalni kod (Python) za izdvajanje svih podataka iz izlazne (RSM) simulacijske datoteke Eclipsea i korištenog tNavigatora, koja predstavlja slabo strukturiranu tabličnu reprezentaciju simuliranih podataka (tlakova, utisnutih količina, zasićenja na određenoj koordinati itd.) u vremenu:

```

def rawStringToTable(raw_string, headers, subheaders, header_lines):
    dfRSM = pd.DataFrame()
    data_ends = np.array(header_lines) - 4
    for hli, header_line in enumerate(header_lines):
        l = header_line+5
        headers[hli] = [m+'', '+str(n) for m,n in zip(headers[hli],
subheaders[hli])]
        if hli == (len(header_lines)-1):      # ako je posljednji red
podataka
            data = pd.DataFrame([i.split() for i in raw_string[l :]],
columns = headers[hli])
            if dfRSM.empty:
                dfRSM = pd.concat([dfRSM, data.copy()], axis = 1)
            else:
                data = data.iloc[:, 1:]      # kako se ne bi ponavljala
kolona s vremenom
                dfRSM = pd.concat([dfRSM, data.copy()], axis = 1)
        else:
            data = pd.DataFrame([i.split() for i in raw_string[l :
data_ends[hli+1]]], columns = headers[hli])
            if dfRSM.empty:
                dfRSM = data.copy()
            else:
                data = data.iloc[:, 1:]
                dfRSM = pd.concat([dfRSM, data.copy()], axis = 1)
    all_columns = list(dfRSM)
    dfRSM[all_columns] = dfRSM[all_columns].astype(float)
    return (dfRSM)

```

Slika 3-3. Jednostavan računalni kod (Python) za izdvajanje svih podataka iz izlazne (RSM) simulacijske datoteke Eclipsea i tNavigatora

Zatim su podatci očitavanja vremena prodora u svaku promatranu ćeliju i izračunati radijusi od utisne bušotine analizirano na velikom broju simulacijskih slučajeva, također pomoću vlastitog (*in-house* RGN kod) izrađenog koda:

```

numpyPath = config.npyDir + config.npyFile

with open(numpyPath + '.pickle', 'rb') as handle:
    cases = pickle.load(handle)

radiuses = np.zeros(25, dtype = float)
radiuses[0], radiuses[1:] = 25., 50.
radiuses = np.cumsum(radiuses)
bt_times = {}
bt_correlation_coef = pd.DataFrame(columns = ['case', 'c1', 'c2', 'c3',
'c4'])
k, h = [], []
all_data_h, all_data_k, all_data_t, all_data_r = [], [], [], []
for case in cases:
    case_name = case.split('\\')[-1]
    k.append(np.int(case_name.split('-')[-1].split('.')[0]))
    h.append(np.int(case_name.split('-')[1].split('M')[0]))
    # print(case_name)
    a = cases[case].to_numpy()

    #
    # pronadji vremena prodora do odredjenog radiusa i spremi u bt_times
    dictionary tablica
    #
    bxfm = a[:, 9:]
    col_length = len(bxfm[:,0])
    breakthrough_indices = (col_length - np.sum(bxfm, axis =
0)).astype(int)
    breakthrough_indices[breakthrough_indices == col_length] = col_length -
1
    breakthrough_times = np.take(a[:,0], breakthrough_indices)
    breakthrough_times = np.unique(breakthrough_times)[: -1] # izbij
ponavlja juce vrijednosti i posljednje zabiljezeno vrijeme
    r = radiuses[:len(breakthrough_times)]
    bt_times[case_name] = np.array([breakthrough_times, r]).T
    all_data_h.append((np.ones(len(r))*h[-1]).tolist())
    all_data_k.append((np.ones(len(r))*k[-1]).tolist())
    all_data_t.append((breakthrough_times).tolist())
    all_data_r.append((r).tolist())
    # pronadji korelaciju breakthrough timesa i spremi u
bt_correlation_coef tablicu
    #
    popt, pcov = curve_fit(breakthrough_correlation, breakthrough_times, r,
p0=[.5, 0.5, 0.1, 0], maxfev=100000)
    new_row = [case_name] + list(popt)
    bt_correlation_coef.loc[len(bt_correlation_coef)] = new_row

```

Slika 3-4. Jednostavan računalni kod (Python) za očitavanja vremena prodora u svaku promatranu ćeliju

Sljedeći korak uključivao je poklapanje (tj. koreliranje) krivulja korištenjem modula SciPy (Virtanen et al., 2020) pomoću funkcije *curve_fit*. Korelirana je krivulja maksimalnog radijusa zasićenja CO₂ u odnosu na vrijeme za svaki simulirani scenarij i koeficijenti korelacije su pohranjivani/spremani u *numpy* matricu tj. varijablu polja (engl. *numpy array variable*, Harris et al., 2020). Nakon toga, korelacijski koeficijenti su korelirani s dubinom,

a podatci dobiveni tako koreliranjem unutar druge korelacije sa svim regresijskim koeficijentima korišteni su za izračun apsolutne relativne pogreške (re):

$$re = \left| \frac{r_{sim} - r_{calc}}{r_{sim}} \right|_t \quad (3-1.)$$

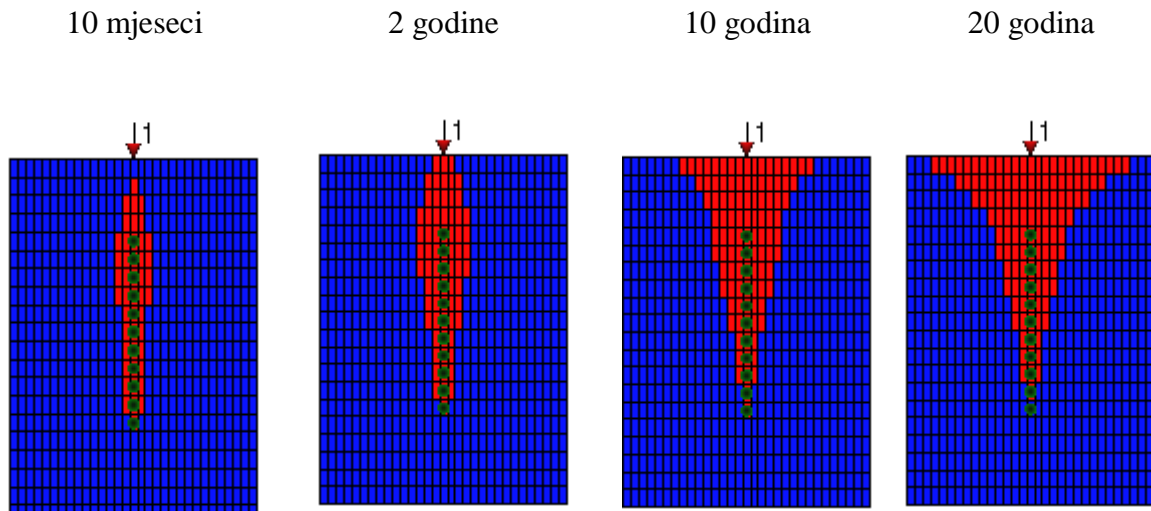
gdje je r_{sim} = simulirani maksimalni radijus zasićenja CO₂ (m), a r_{calc} = izračunati (korelacijski) maksimalni radijus zasićenja CO₂ (m) u određenom vremenu t (dani).

Nakon korištenja generičkih funkcija za korelacije, multivarijatna analiza korištenjem sve tri zavisne varijable u jednoj jednadžbi otkrila je novi (alternativni) odnos. Granice takvih odnosa identificiraju se analizom apsolutne relativne pogreške.

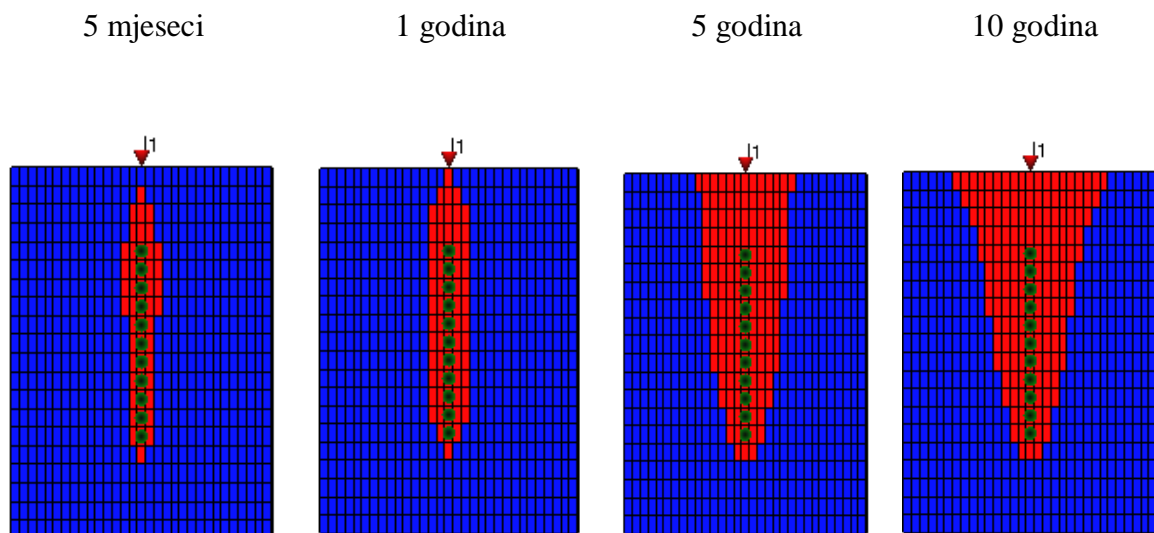
4. REZULTATI

Nakon simuliranja svih scenarija, vizualno, tj. kvalitativno je razmotren oblik CO₂ zone za sve simulacijske setove (Slika 4-1.).

Set 1



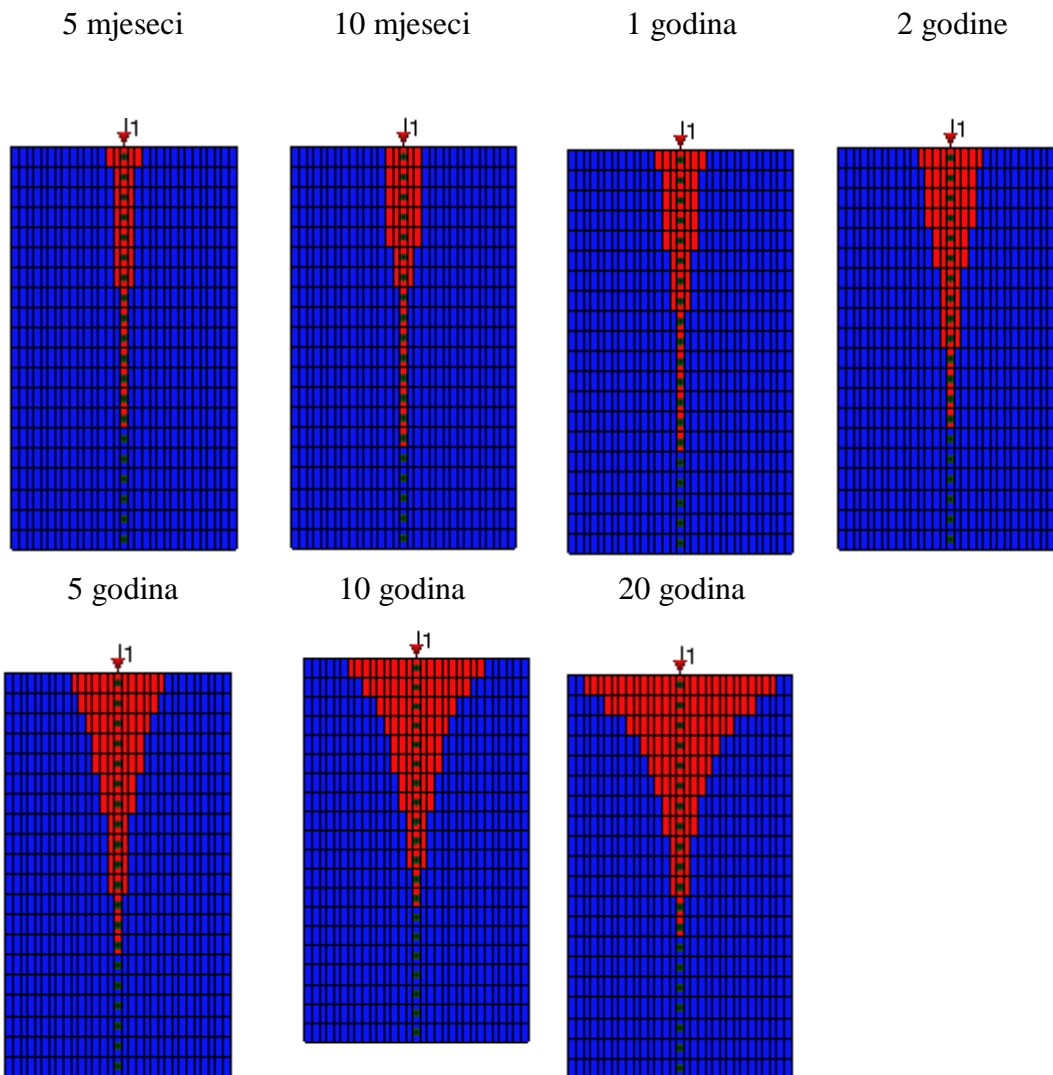
Set 2



Slika 4-1. Oblik CO₂ zone u različitim koracima simulacije za setove 1 i 2

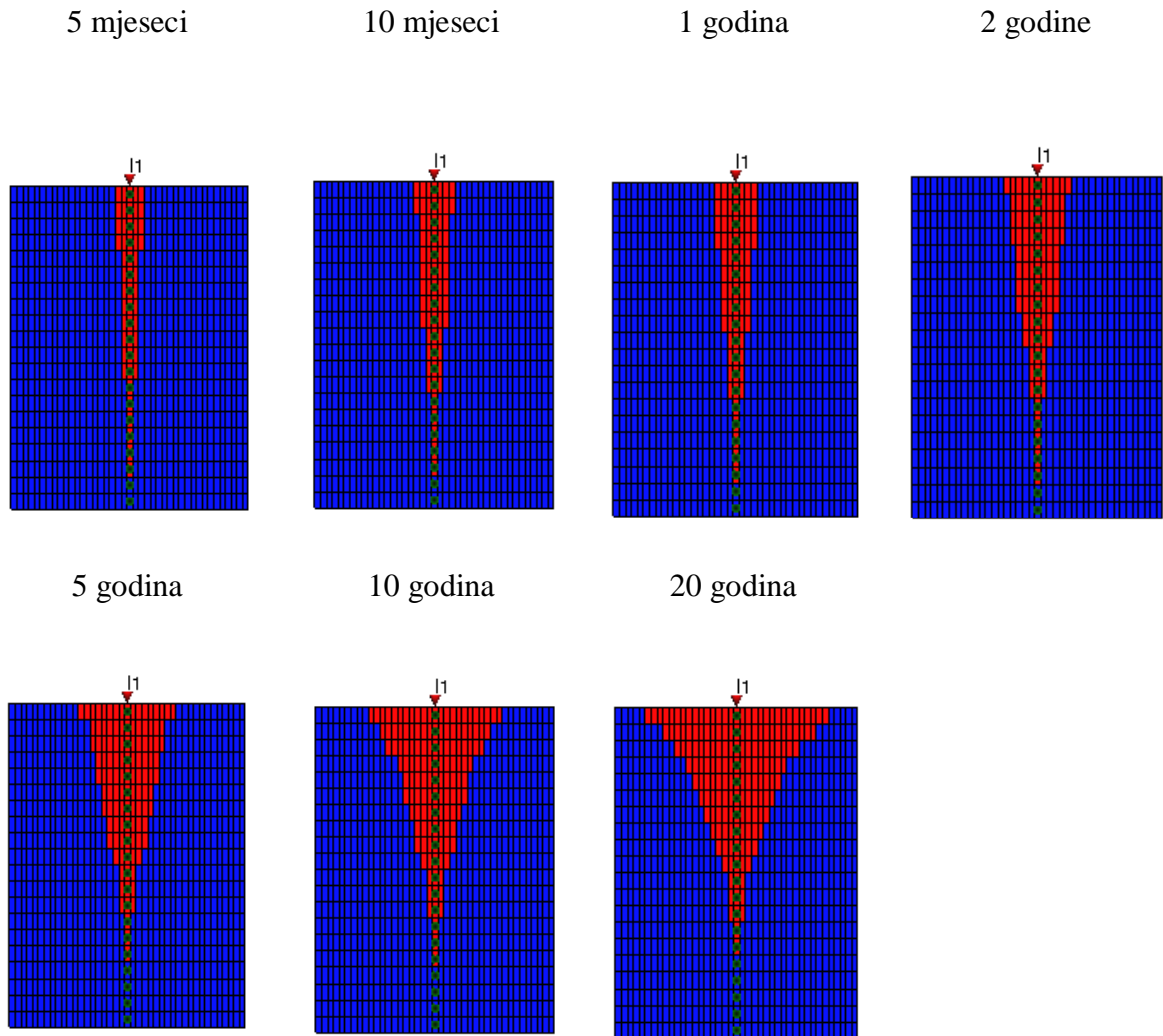
Također je vizualno analiziran oblik zone CO₂ za simulacijske setove 3 i 4 (cijeli raskriveni interval) za ista i par dodatnih vremena (Slika 4-2. i Slika 4-3.)

Set 3



Slika 4-2. Oblik CO₂ zone u različitim koracima simulacije za set 3

Set 4



Slika 4-3. Oblik CO₂ zone u različitim koracima simulacije za set 4

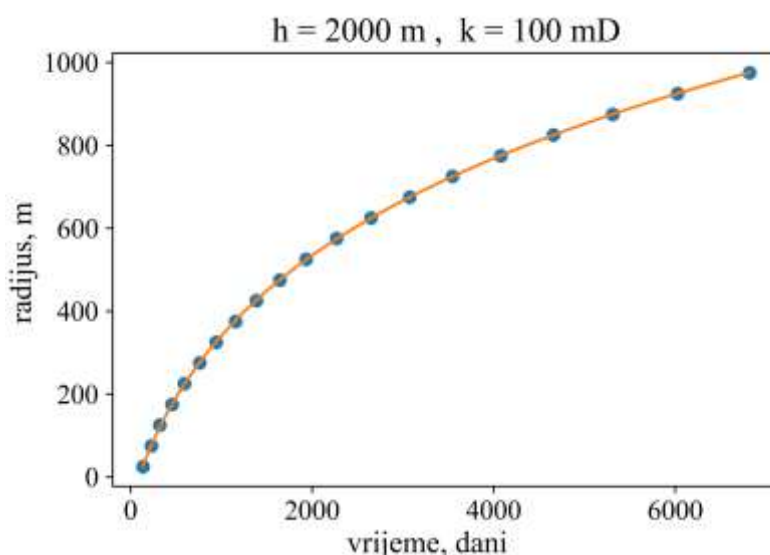
Nakon vizualne analize uočena je promjena molarnog masenog udjela CO₂ u ćelijama (engl. *grid block*) najvišeg proslojka rešetke (engl. *grid*). Nakon što CO₂ dosegne prvu susjednu ćeliju od bušotine u najvišem proslojku (pošto se smatra da je bušotina u središtu ćelije, radijus će biti 25 m), CO₂ se širi lateralno kroz druge ćelije, a radijus zasićenja se povećava za 50 m, odnosno po širini ćelije. Za simulacijski set 2 (duplo veća brzina protjecanja naspram seta 1) prikazana su duplo kraća vremena s pretpostavkom prikaza istog oblika zone CO₂ za istu količinu utisnutog CO₂. U prikazanim simulacijskim slučajevima za setove 3 i 4 (cijeli raskriveni interval), može se primijetiti zanimljivo poklapanje za iste vremenske periode, a ne, kako bi se očekivalo, za istu količinu utisnutog CO₂.

Zabilježeni su i grafički prikazani radijusi u odnosu na vrijeme (npr. Slika 4-4.) Gotovo savršeno podudaranje može se postići korelacijom radijusa i vremena za svaki pojedinačni slučaj simulacije (r_i = radijus u m i t = vrijeme u danima za scenarij i):

$$r_i = c_1 \cdot \ln(c_2 \cdot t + c_3) + c_4 \cdot t \quad (4-1.)$$

4.1 Analiza rezultata simulacijskih slučajeva

Nakon što su zasićenja CO₂ zabilježena za niz različitih vremena simulacije i različitih simulacijskih slučajeva, odgovarajući polumjeri za koeficijente u jednadžbi (4-1.) mogu se upariti kako bi se ispravno predvidjela brzina širenja CO₂ zone u horizontalnom sloju. Međutim, takvo je podudaranje nije moguće postići za predviđanja u kojima su DSA podaci ograničeni, tj. korelacija je pogodna za poklapanje podataka prikupljenih tijekom utiskivanja CO₂ u akvifer.



Slika 4-4. Tipični oblik korelacije radijusa u odnosu na vrijeme

Kako bi se koeficijenti dobiveni za svaki simulacijski slučaj (Tablica 4-1.) povezali s propusnošću i dubinom, stavljeni su u *numpy array* varijablu.

Tablica 4-1. Dobiveni koeficijenti za pojedinačne slučajeve

h , m	k , mD	c_1	c_2	c_3	c_4
1000	50	310,6370891	0,001492773	0,798244307	0,004981457
1000	100	266,5997926	0,002964822	0,727819825	0,009969366
1000	150	235,7215407	0,004486189	0,682799281	0,017133649

<i>h, m</i>	<i>k, mD</i>	<i>c₁</i>	<i>c₂</i>	<i>c₃</i>	<i>c₄</i>
1000	200	220,922773	0,005674308	0,687065988	0,021401693
1000	250	204,5622241	0,007298678	0,594764867	0,025917399
1500	50	321,3383604	0,001069229	0,811631946	0,009883861
1500	100	268,6663202	0,002218733	0,731831469	0,014953973
1500	150	239,4051139	0,003276625	0,697970635	0,021229188
1500	200	213,5378715	0,004543925	0,629771046	0,027890383
1500	250	205,0721617	0,005326426	0,646701061	0,030716467
2000	50	337,3982424	0,000873059	0,839033008	0,009758401
2000	100	273,2979148	0,001891355	0,7518954	0,015672003
2000	150	239,4316243	0,002880545	0,706157043	0,022194326
2000	200	216,2128742	0,003904102	0,645667413	0,027925902
2000	250	203,4927985	0,004822642	0,603241628	0,031364787
2250	50	350,3771296	0,000795311	0,848667564	0,008565176
2250	100	267,2497294	0,001869611	0,731444449	0,017068567
2250	150	230,8496592	0,002955786	0,654693783	0,023931034
2250	200	215,0692125	0,003766942	0,642041532	0,028428228
2250	250	205,2613207	0,004527912	0,63195465	0,03092243
2500	50	299,9580964	0,000899098	0,810899357	0,016456832
2500	100	273,4391584	0,001729022	0,749392537	0,016161866
2500	150	239,311831	0,002651189	0,686870503	0,022351734
2500	200	225,0888105	0,003314156	0,697855651	0,026292467
2500	250	206,3677505	0,004289856	0,644723005	0,030729749
3000	50	282,284334	0,000889102	0,784431543	0,019180332
3000	100	278,1137331	0,001565931	0,753931911	0,015762601
3000	150	234,1654268	0,002546928	0,673309771	0,023639257
3000	200	219,454169	0,003255554	0,662667006	0,027238292
3000	250	209,661607	0,003875812	0,6487769	0,029829632

4.2 Regresija na rezultatne odnose radijusa i vremena

Jednadžba 4-2. je dala najmanju apsolutnu relativnu pogrešku, a multiparametarska regresija na koeficijente $c_i = c_1, c_2, c_3$ i c_4 rezultirala je s osam dodatnih koeficijenata ($c_{i,j}$, Tablica 4-2.):

$$c_i = c_{i,1} \cdot \ln(k) + c_{i,2} \cdot k + c_{i,3} + c_{i,4} \cdot \ln(h) + c_{i,5} \cdot h + c_{i,6} \cdot k \cdot h + \frac{c_{i,7}}{k} + \frac{c_{i,8}}{h} \quad (4-2.)$$

Tablica 4-2. $c_{i,j}$ koeficijenti

j	c1	c2	c3	c4
1	-216,431	0,001892	-0,19431	0,055867
2	0,492876	2,45E-05	0,000142	-8,35E-05
3	-751,208	-0,05331	-0,54062	0,345294
4	280,359	0,005434	0,299441	-0,08024
5	-0,09676	-4,06E-07	-9,74E-05	2,37E-05
6	4,95E-05	-6,33E-09	7,21E-08	-2,08E-08
7	-7413,27	0,084789	-4,35727	2,89276
8	199176	7,84035	221,776	-81,5926
prosječna rel. pogr. :	0,025651	0,039699	0,023058	0,071584

Korištenjem $c_{i,j}$ iz tablice 4-2. u jednadžbi (4-2.), a zatim primjenom c_i u jednadžbi 4-1. dobiveni su zadovoljavajući rezultati (prosječna apsolutna pogreška ispod 5%, Tablica 4-3.) za r_i u zadanom vremenu te za zadanu dubinu i propusnost

Tablica 4-3. Prosječna apsolutna pogreška za sve promatrane slučajeve

h	k	prosječna apsolutna pogreška	h	k	prosječna apsolutna pogreška
1000	50	15,33%	2250	50	6,78%
1000	100	3,81%	2250	100	1,72%
1000	150	1,74%	2250	150	2,39%
1000	200	4,74%	2250	200	2,00%
1000	250	4,91%	2250	250	2,72%
1500	50	13,05%	2500	50	1,99%

h	k	prosječna apsolutna pogreška	h	k	prosječna apsolutna pogreška
1500	100	2,27%	2500	100	0,94%
1500	150	0,71%	2500	150	1,27%
1500	200	1,81%	2500	200	1,41%
1500	250	2,35%	2500	250	1,75%
2000	50	12,99%	3000	50	16,65%
2000	100	1,95%	3000	100	1,84%
2000	150	1,60%	3000	150	2,27%
2000	200	3,12%	3000	200	4,11%
2000	250	4,70%	3000	250	4,00%

Rezultati su manje pouzdani za najmanje simulirane propusnosti (oko 50 mD prosječna apsolutna pogreška premašuje 15%).

4.3 Generalizira korelacija odnosa vremena i radijusa širenja

Vrlo zanimljivi rezultati dobiveni su uklapanjem korelacijske krivulje za sve parametre (vrijeme, propusnost, dubina) odjednom (Slika 4-5. i Slika 4-6.):

$$r_i = m_1 \cdot \ln(k) + m_2 \cdot \ln(h) + m_3 \cdot \ln(t) + m_4 \left(\frac{1}{h}\right) \cdot k \cdot t + \frac{m_5}{k} + m_6 \cdot h + m_7 \cdot t + m_8 \quad (4.3)$$

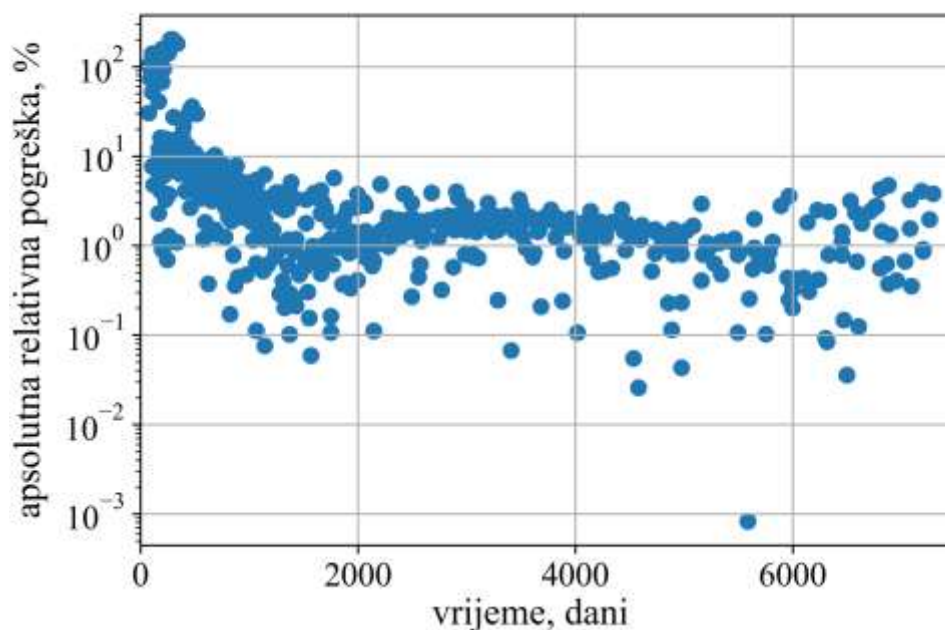
Multivarijantnom regresijom su dobiveni koeficijenti od m_1 do m_8 (Tablica 4-4.), koji su zatim korišteni za konačnu, generaliziranu korelaciju.

Tablica 4-4. Koeficijenti za GMRC

m₁	5,83758E+01
m₂	-1,22732E+02
m₃	1,49757E+02
m₄	2,81309E-02
m₅	-5,37362E+03
m₆	2,24766E-02

m₇ 4,14878E-02

m₈ -1,10534E+02



Slika 4-5. Relativna pogreška korelacije za sva vremena u svim slučajevima simulacije (simulacijski set 1)

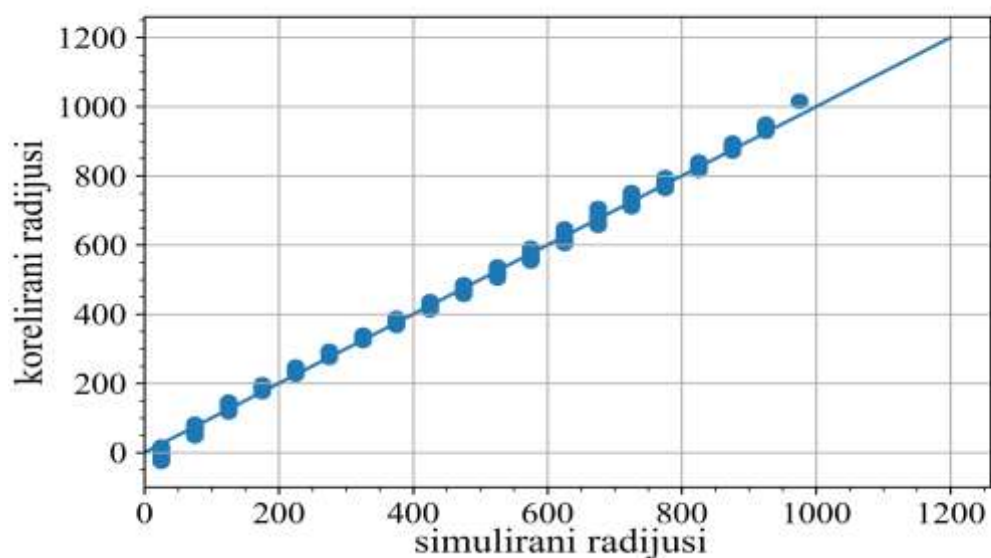
Opisna statistika podataka (Tablica 4-5.) za različit raspon "prihvatljivih" vremena u generaliziranoj korelaciji dobivena multivarijatnom regresijom (engl. *generalized correlation obtained by multivariate regression*, GMRC) pokazuje kako se generalno s vremenom povećava pouzdanost predviđanja radijusa širenja. .

Tablica 4-5. Relativne pogreške GMRC-a za različita vremena

	svi podaci	t > 1 god.	t > 2 god.	t > 5 god.	t > 10 god.
aritmetička sredina	9,17%	2,78%	1,70%	1,51%	1,42%
standardna devijacija	0,2627	0,0389	0,0138	1,13%	0,94%
minimum	0,0008%	0,0008%	0,0008%	0,00%	0,00%
25% percentil	0,96%	0,83%	0,72%	0,68%	0,77%

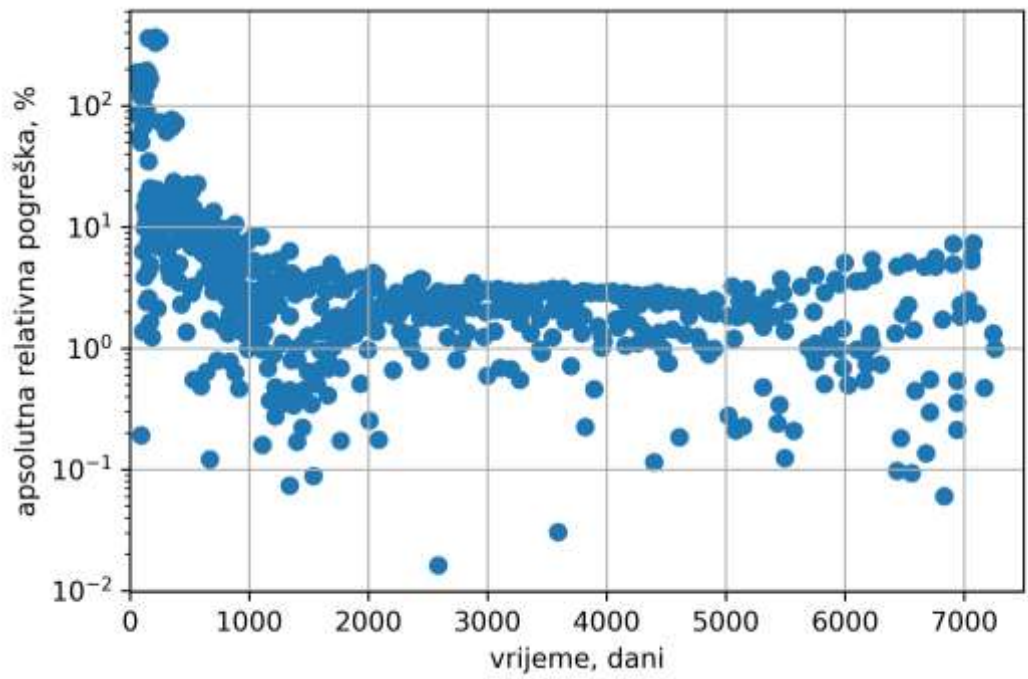
	svi podaci	t > 1 god.	t > 2 god.	t > 5 god.	t > 10 god.
50% percentil	1,89%	1,63%	1,43%	1,33%	1,39%
75% percentil	5,08%	3,29%	2,12%	1,97%	1,89%
maksimum	202,20%	35,85%	7,93%	6,21%	4,85%

Slika 4-6. prikazuje simulirane i korelirane radijuse CO₂ fronte te se može zaključiti kako je izračun (korelacija) najmanje pouzdan za ekstremne razmatrane radijuse.

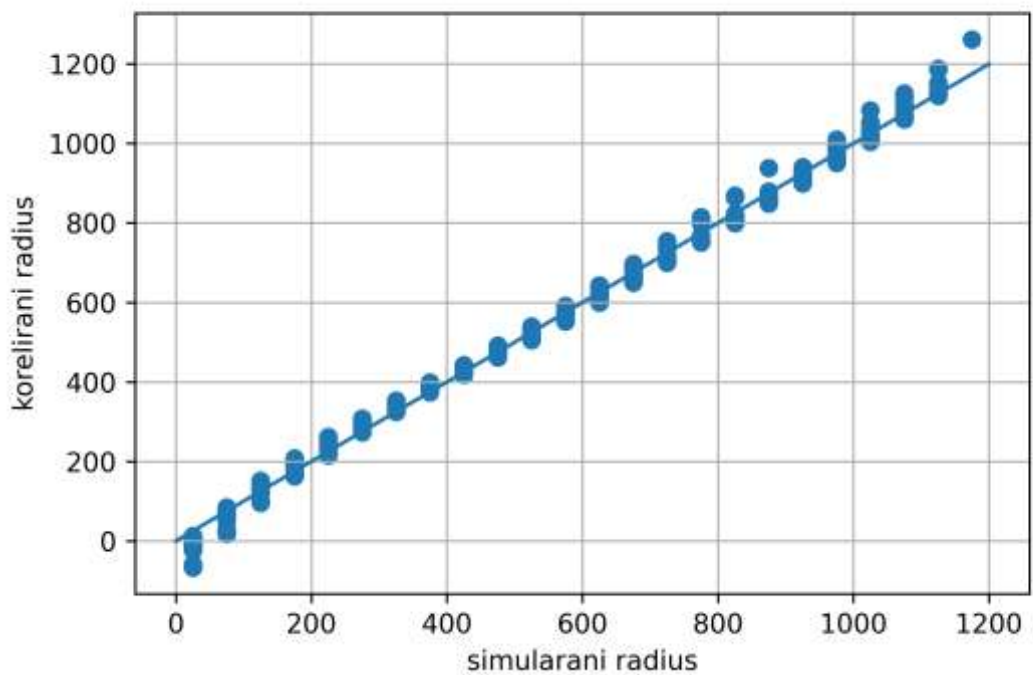


Slika 4-6. Prikaz simuliranih naspram koreliranih radijusa za sva vremena za scenarijski set 1

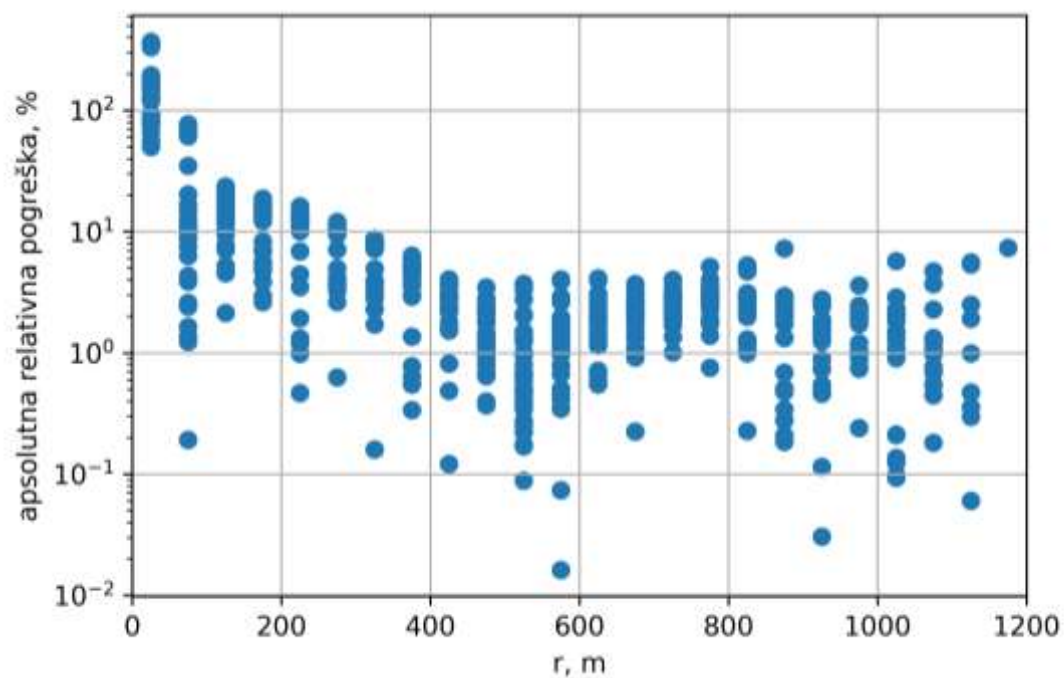
Ista analiza ponovljena je za dvostruko veću brzinu protjecanja te su rezultati dati na slikama 4-7., 4-8., i 4-9.



Slika 4-7. Odnos vremena i apsolutne pogreške za scenarijski set 2



Slika 4-8. Prikaz simuliranih naspram koreliranih radijusa za sva vremena za scenarijski set 2



Slika 4-9. Odnos radijusa i apsolutne pogreške za scenarijski set 2

Tablica 4-6. Relativne pogreške GMRC-a za različita vremena (set 2)

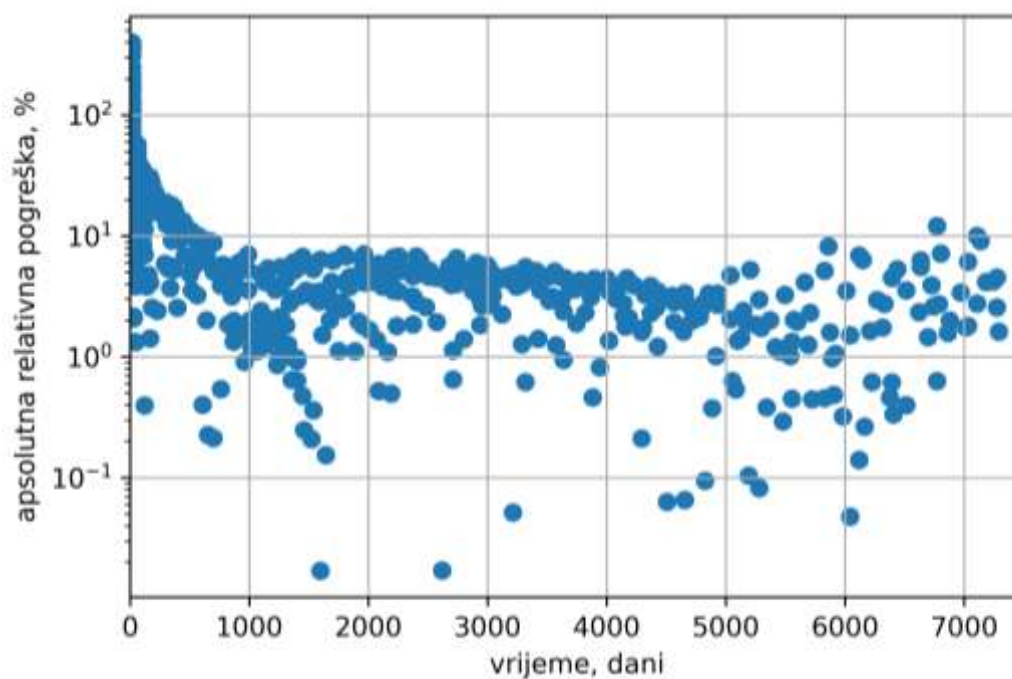
	svi podaci	t > 1 god.	t > 2 god.	t > 5 god.	t > 10 god.
aritmetička sredina	13,29%	3,55%	2,30%	2,06%	1,96%
standardna devijacija	0,43	0,05	0,02	0,01	0,01
minimum	0,02%	0,02%	0,02%	0,02%	0,06%
25% percentil	1,43%	1,29%	1,15%	1,24%	0,99%
50% percentil	2,75%	2,33%	2,09%	2,04%	1,82%
75% percentil	7,31%	3,68%	2,90%	2,76%	2,70%
maksimum	367,43%	72,63%	10,61%	7,34%	7,34%

Koeficijenti korelacije za set 2 nalaze se u Tablica 4-7.

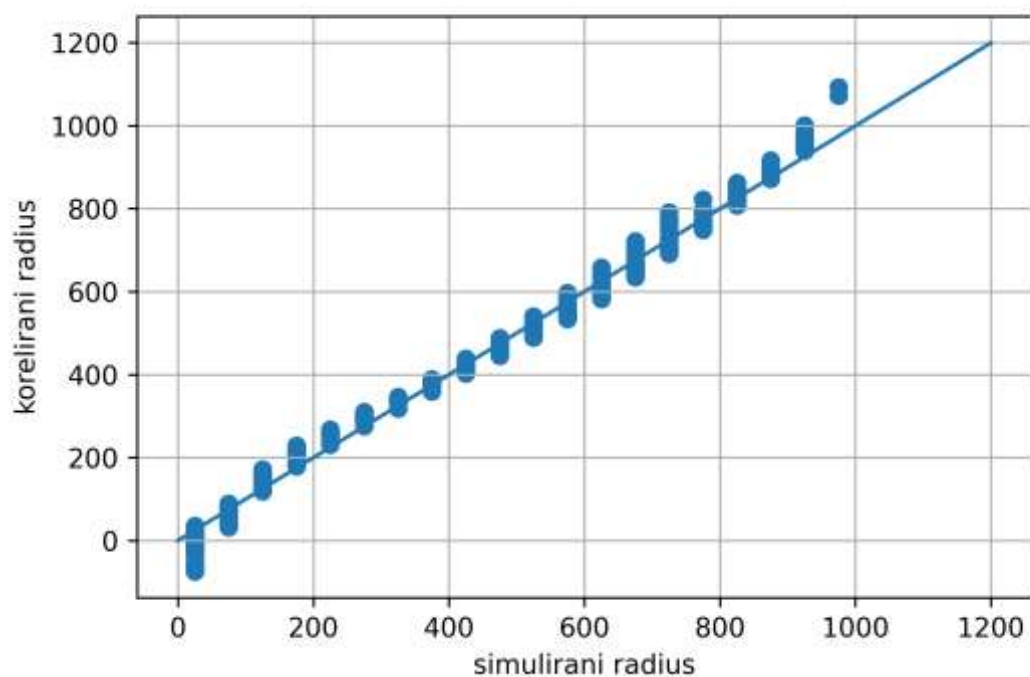
Tablica 4-7. Koeficijenti GMRC korelacije za simulacijski set 2

m_1	5,83758E+01
m_2	-1,22732E+02
m_3	1,49757E+02
m_4	2,81309E-02
m_5	-5,37362E+03
m_6	2,24766E-02
m_7	4,14878E-02
m_8	-1,10534E+02

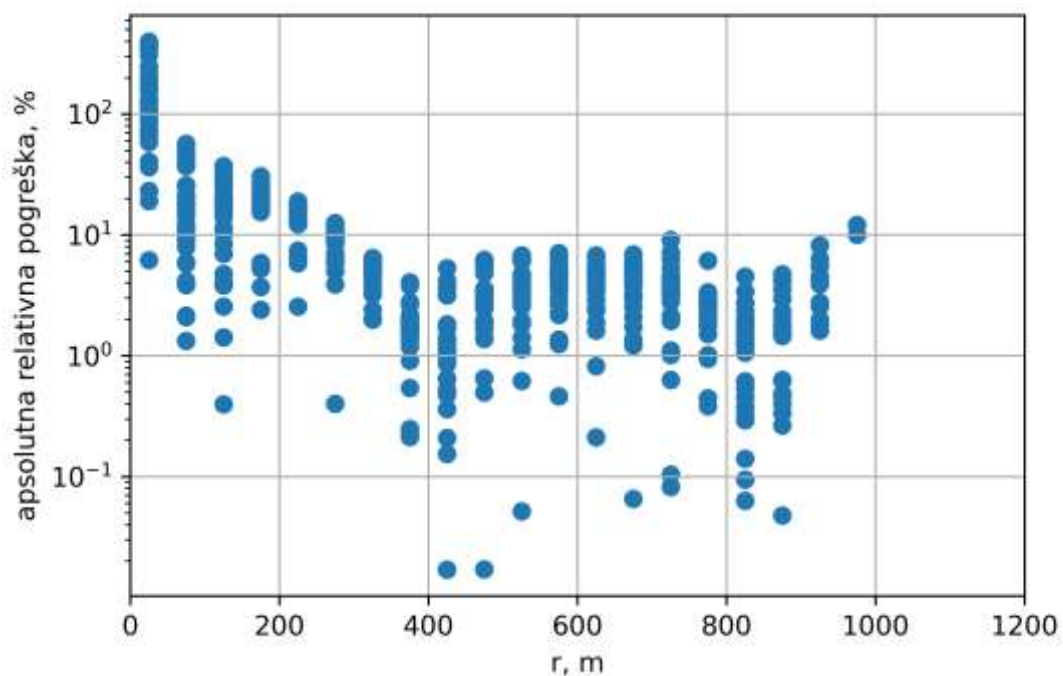
Isti postupak je ponovljen za setove 3 i 4 (slučaj kad je raskriven cijeli interval, slike 4-10., 4-11., 4-12., 4-13., 4-14., 4-15., i tablice 4-8., 4-9., 4-10., 4-11.)



Slika 4-10. Odnos vremena i apsolutne pogreške za scenarijski set 3



Slika 4-11. Prikaz simuliranih naspram koreliranih radijusa za sva vremena za scenarijski set 3



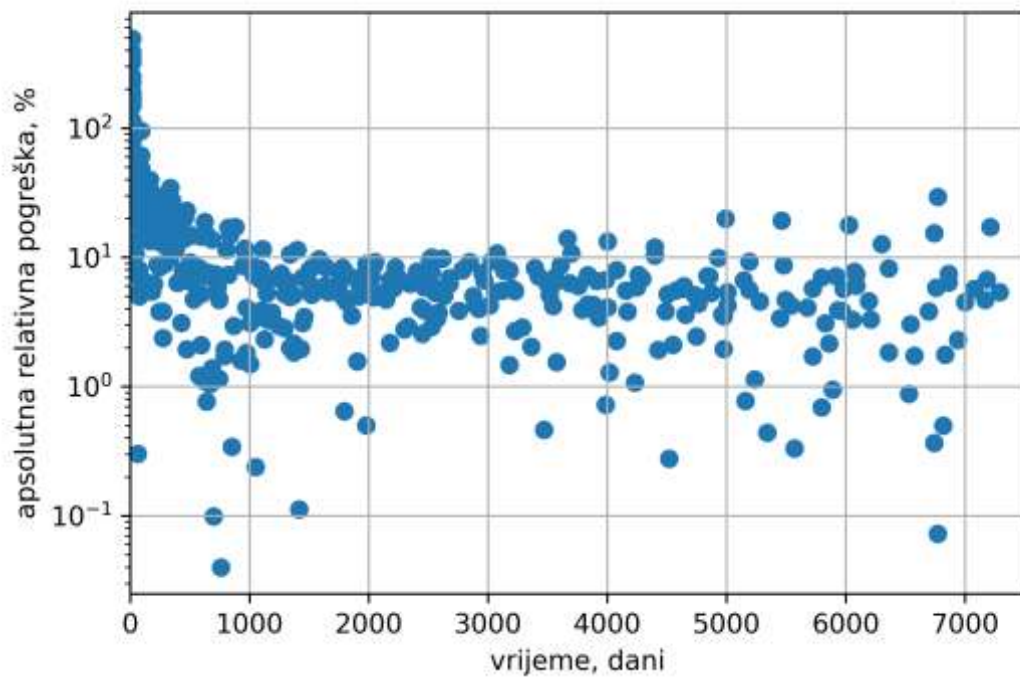
Slika 4-12. Odnos radijusa i apsolutne pogreške za scenarijski set 3

Tablica 4-8. Relativne pogreške GMRC-a za različita vremena (set 3)

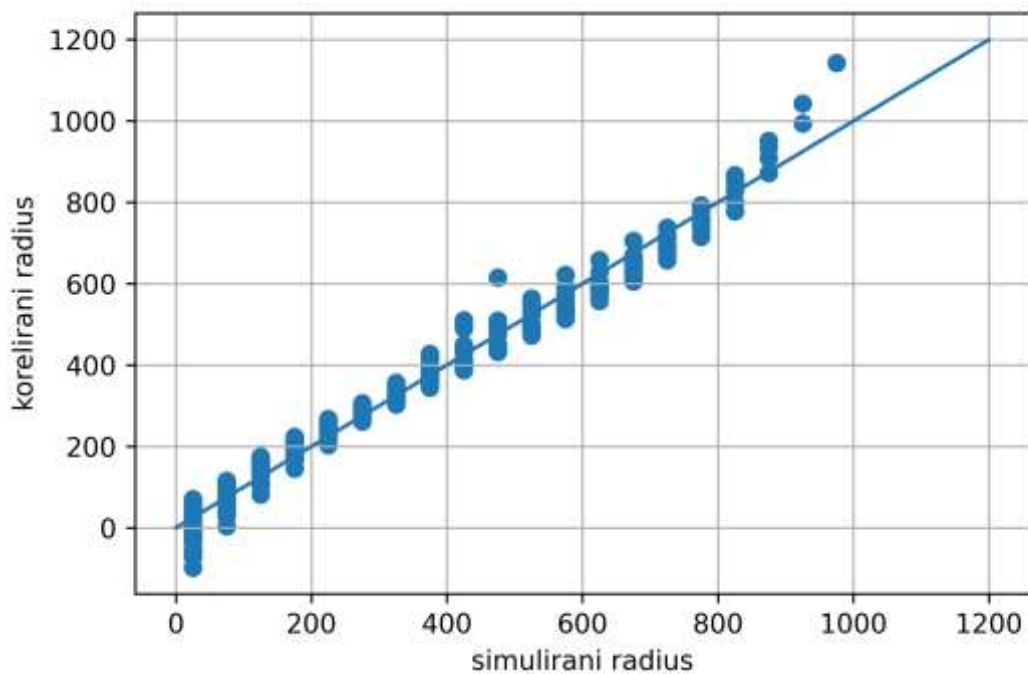
	svi podaci	t > 1 god.	t > 2 god.	t > 5 god.	t > 10 god.
aritmetička sredina	14,69%	3,80%	3,14%	3,16%	2,63%
standardna devijacija	0,42	0,03	0,02	0,02	0,02
minimum	0,02%	0,02%	0,02%	0,02%	0,05%
25% percentil	2,01%	1,72%	1,61%	1,62%	1,24%
50% percentil	4,41%	3,39%	3,01%	3,13%	2,30%
75% percentil	9,74%	5,13%	4,58%	4,52%	3,58%
maksimum	396,63%	15,43%	12,07%	12,07%	12,07%

Tablica 4-9. Koeficijenti GMRC korelacije za simulacijski set 3

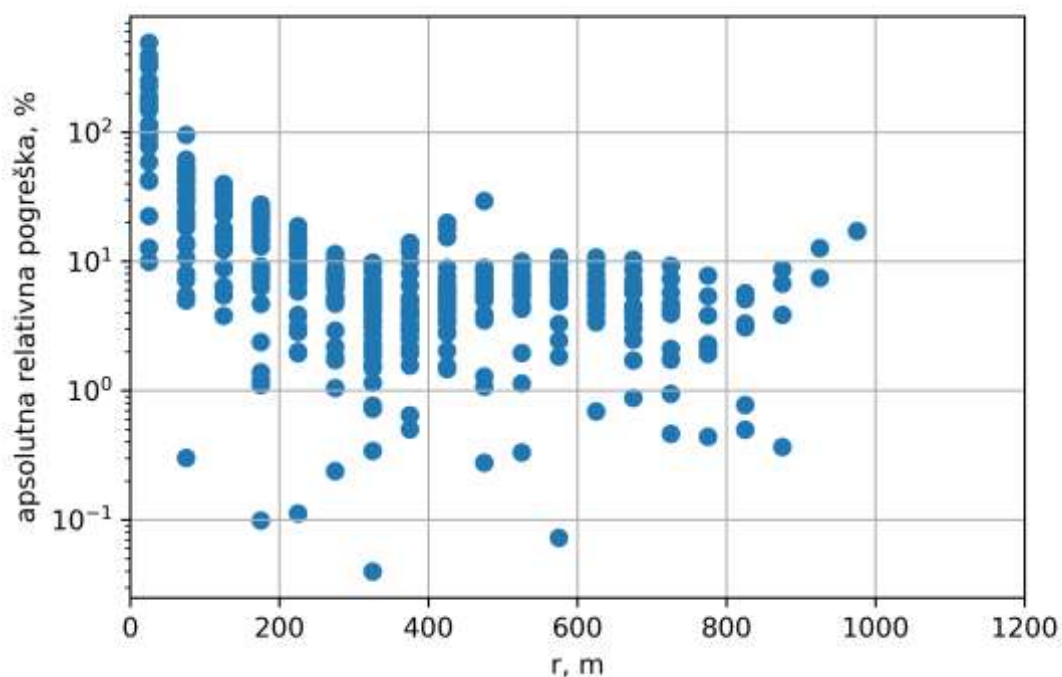
m₁	-2,00333E+00
m₂	-4,18161E+01
m₃	7,50449E+01
m₄	1,37669E-01
m₅	-4,68921E+03
m₆	4,46541E-03
m₇	5,43661E-02
m₈	1,43688E+02



Slika 4-13. Odnos vremena i apsolutne pogreške za scenarijski set 4



Slika 4-14. Prikaz simuliranih naspram koreliranih radijusa za sva vremena za scenarijski set 4



Slika 4-15. Odnos radijusa i apsolutne pogreške za scenarijski set 4

Tablica 4-10. Relativne pogreške GMRC-a za različita vremena (set 4)

	svi podaci	t > 1 god.	t > 2 god.	t > 5 god.	t > 10 god.
aritmetička sredina	21,79%	6,09%	5,70%	5,71%	5,68%
standardna devijacija	0,54	0,04	0,04	0,04	0,05
minimum	0,04%	0,04%	0,04%	0,07%	0,07%
25% percentil	3,99%	3,29%	3,28%	3,42%	3,06%
50% percentil	6,74%	5,52%	5,30%	5,37%	4,67%
75% percentil	13,97%	7,60%	7,30%	7,15%	6,92%
maksimum	490,62%	29,39%	29,39%	29,39%	29,39%

Tablica 4-11. Koeficijenti GMRC korelacije za simulacijski set 4.

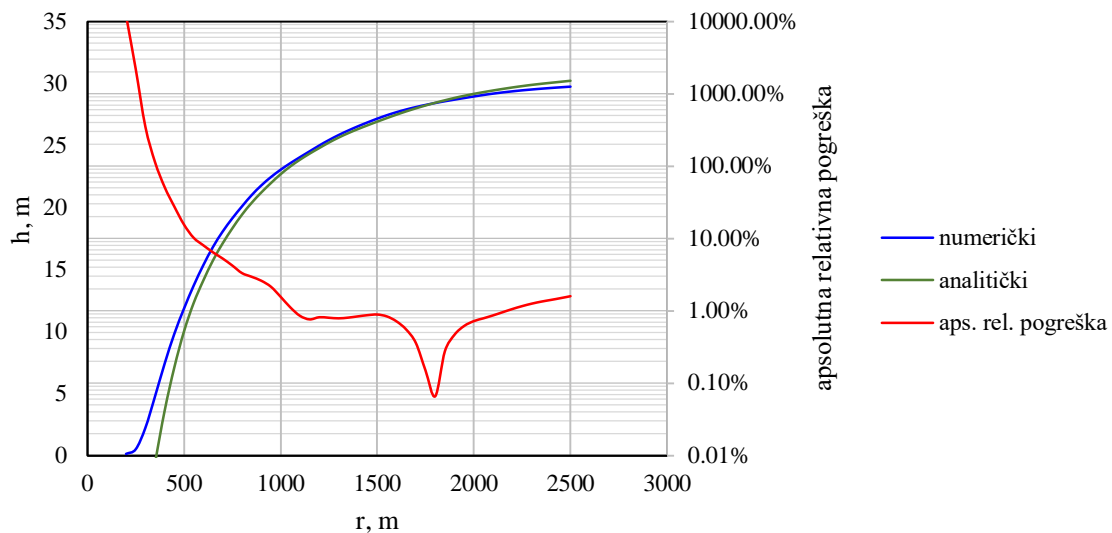
m₁	3,17618E+00
m₂	1,04521E+02
m₃	5,51528E+01
m₄	3,13638E-01
m₅	-2,29153E+03
m₆	-1,20258E-01
m₇	2,32716E-02
m₈	-6,90894E+02

5. DISKUSIJA I USPOREDBA REZULTATA S PODATCIMA IZ LITERATURE

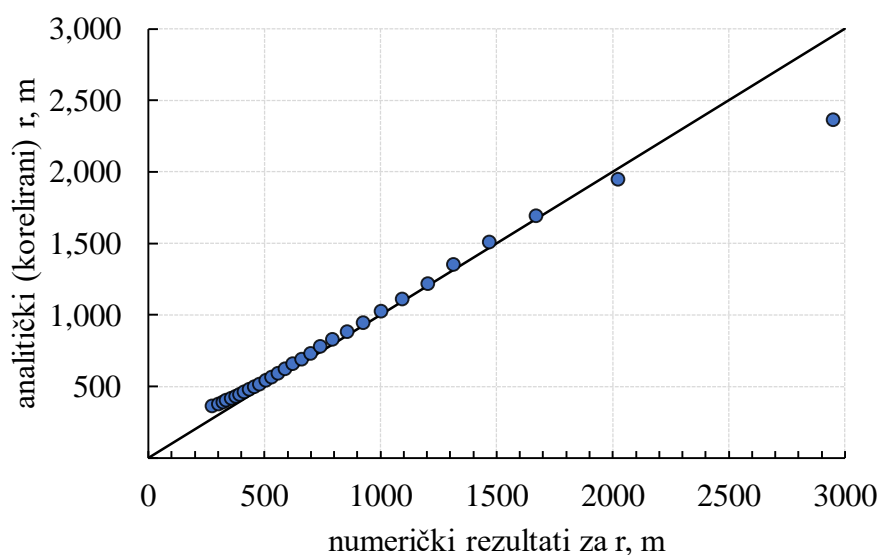
Dobiveni rezultati na temelju četiri serije simuliranih slučajeva daju kvalitativnu sliku koliko različito raskriveni interval ili različita brzina utiskivanja mijenja karakteristiku zone zasićenja CO₂. Dodavši tome tlak i propusnost, dolazi se do podataka koji mogu na zadovoljavajući način opisati širenje zone zasićenja (prostorno-vremenski) te u tome smislu ima važnu primjenu pri razmatranju mogućnosti za skladištenje CO₂ u DSA.

Nordbotten i suradnici (2005) dali su također analitički izraz za širenje zone zasićenja CO₂, po uzoru na Buckley-Leverettovu jednadžbu modificiranu za radijalni protok te je na taj način uzeta u obzir propusnost, brzina utiskivanja, tlak, temperatura, viskoznost fluida itd. U svojoj analizi simulirali su utiskivanje CO₂ u homogenu, izotropnu formaciju debljine 30 m, s propusnosti 20 mD i poroznosti 15 %, te nepropusnom pokrovnom stijenom što su smatrali reprezentativnim za formaciju Viking, u bazenu (Alberta) u zapadnoj Kanadi. U njihovom slučaju, simulirane zone zasićenja su dostigle radijus oko 2500 m, dok se u slučajevima u ovom radu postiže radijuse od oko maksimalnih 1000 m, nakon 20 godina utiskivanja. Treba napomenuti i kako su podatci o načinu simulacije utiskivanja u radu Nordbotten et al. (2005) jako šturi, što analizu čini nereproducibilnom i teško provjerljivom. Simulirana su 4 slučaja, uz varijaciju dubine – plitki (1000 m) i duboki (3000 m) sloj te temperature - visoka i niska temperatura, pri čemu je gradijent za visokotemperaturne slučajeve od 45°C/1000 m odgovarajuć za usporedbu. Kako numerički podatci nisu prikazani u radu, digitalizirana je slika koja pokazuje rezultate za visokotemperaturno duboko ležište, te su na temelju digitaliziranih podataka računane relativne pogreške (Slika 5-1.).

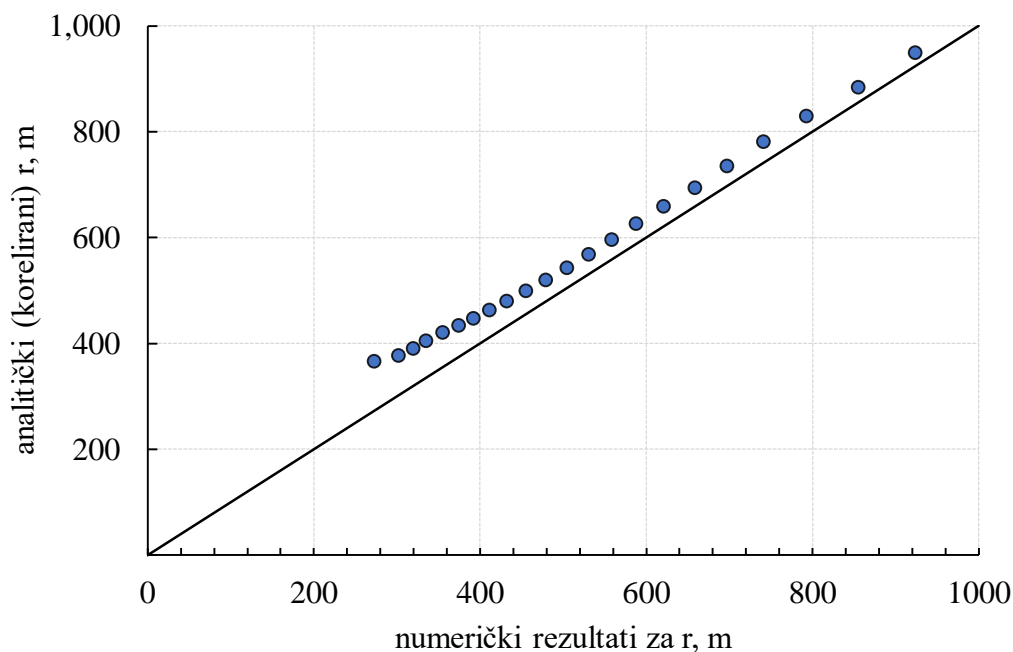
Kako u analizi nije pokazana pogreška, tj. rezultati koji su u funkciji s vremenom, nemoguće je razlučiti da li je analitička formulacija Nordbotten i suradnika (2005) primjenjiva za procjene širenja zone zasićenja s CO₂. Još jedan pokušaj usporedbe pokazan je pronalaženjem odnosa radijusa za različite visine dizanja iz digitaliziranih podataka (Slika 5-2., Tablica 5-1. Relativne pogreške), međutim, treba uzeti u obzir kako su u dotičnom radu i radijusi i dubine zasićenja procijenjeni analitički, tako da se ne radi o identičnoj usporedbi kao na slikama 4-8., 4-11. i 4-14..



Slika 5-1. Rezultati analize pogreške za visokotemperaturno duboko ležište iz rada Nordbotten et al. (2005)



Slika 5-2. Prikaz korelacije simuliranog i analitički računatog radijusa prema digitaliziranim podatcima od Nordbotten et al. (2005)



Slika 5-3. Prikaz korelacije simuliranog i analitički računatog radijusa do 1000 m, prema digitaliziranim podacima od Nordbotten et al. (2005)

Tablica 5-1. Relativne pogreške podataka iz literature

	statistika pogreške za r	statistika pogreške za h
aritmetička sredina	11.38%	881.61%
standardna devijacija	0.08	29.56
minimum	2.73%	1.56%
25% percentil	5.62%	3.32%
50% percentil	7.84%	8.05%
75% percentil	15.29%	51.15%
maksimum	35%	1.56%

Rezimirajući, gore opisan set podataka iz literature, kao jedini pronađeni set podataka koji su rezultati analize slične analizi u ovom radu (lateralno širenje zone zasićenja CO₂) opisuje izolirani broj slučajeva, tj. njih 4 koji su uspoređivani sa četiri simulacijska referentna seta rezultata. U analizi iz ovog rada, uspoređeni su rezultati sa 120 simulacijskih slučajeva te s ovim literaturnim podacima. Aritmetičke sredine pogrešaka su uglavnom slične, s time da su bitno veće (duplo) u slučaju seta 4, a manje u slučaju seta 1. Nažalost, podatci iz literature

ne pokazuju vremensku komponentu, te, ako se isključe razmatranja iz prve godine, prema podacima u tablicama 4-5., 4-6., 4-8., i 4-10. razvidno je da se statistika pogreške jako smanjuje. Ukoliko se uzme u obzir da je prva godina utiskivanja manje kritična za procjenu širenja zone zasićenja lateralno, pošto se u svim slučajevima radilo o radijusima širenja manjim od 100 m. U ovom radu, kao i u radu Nordbotten et al. (2005) vidi se lošija korelacija u početku, dok je iz literaturnih podataka velika greška i u kasnom periodu utiskivanja. Međutim najčešće je ta korelacija (Prilog 2. Prosječna apsolutna pogreška za sve promatrane slučajeve) u ovom radu bila loša za niže propusnosti od 50 mD. Nordbotten et al. (2005) koristili su jednadžbe poput one iz Buckley-Leverettove teorije, gdje se računa s bezdimenzionalnim vremenom (vrijeme utiskivanja nije bitno u analitičkom proračunu, nego količina) zbog čega je zanemarena promjena injektivnosti zbog promjene odnosa tlaka u pribušotinskoj zoni, PVT svojstava te relativne propusnosti.

U radu uzetom za usporedbu, nije napomenuto koji je period simuliranja na temelju kojeg se dobilo referentne rezultate, iako su postignute puno veće lateralne dubine nego u ovom radu, nakon 20 godina simulacije utiskivanja. Također, obzirom na uvodni dio, prilično je sigurno da su dotični referentni simulirani podaci zastarjeli, tj. da nije rađena simulacija s efektom topivosti CO₂ u vodi, tj. komponentna simulacija, nego tzv. „black oil“ simulacija, u kojoj se vjerojatno zanemario ili kapljeviti ili plinski udio CO₂ (simuliran je dvofazni protok sustava CO₂-voda). Ovo na prvi pogled ne izgleda bitno, jer je krajnji cilj utisnuti stanovitu masu CO₂, međutim, fizika protjecanja na taj način nije potpuno opisana, pošto je relativna propusnost različita za plinoviti i superkritični CO₂, odnosno plinoviti će biti mobilniji.

Podatci iz ovog rada za velik broj slučajeva (radi se o 95% ukupnih podataka), iza prve godine utiskivanja pokazuju izvrsne rezultate, s relativnim pogreškama u svim simulacijskim setovima manjim od 6%, a najčešće oko 3%.

6. ZAKLJUČAK

U radu su pokazani rezultati analize maksimalnog radijusa kretanja fronte CO₂ u ravnom sloju. Ovakvi rezultati se temelje na velikom broju simuliranih slučajeva (120), koji uključuju kompleksnu fiziku ovog procesa, počev od protočnih svojstava stijene, variranja brzina utiskivanja, a također uključuju i termodinamičke fazne promjene sustava CO₂ i slojne vode. U pokušaju usporedbe s podacima iz literature, došlo je do poteškoća u reproduciranju metode opisane u Nordbotten et al. (2005), ali u svakom slučaju, može se ustanoviti kako su analize ovakvog tipa jako rijetke, a vjerojatno i zastarjele. U prilog tom zaključku ide i činjenica da se u praktičnoj upotrebi, prilikom izrade robusnih integriranih alata za analize dinamike i ekonomičnosti CCS i/ili CCUS lanca (koji se ne mogu koristiti ležišno-simulacijskim alatima) ne koriste jednadžbe širenja CO₂ u akviferu, čime se procjene limitiraju na statičke parametre poput volumena i geometrije geološke strukture, ili statističke procjene na premalom broju podataka u kojima se najčešće koristi *efikasnost skladištenja* CO₂, ostavljajući procjene na vrlo nesigurnoj razini sve dok se ne bi prikupili podatci prilikom stvarnog utiskivanja.

Dakle, rezultati poput ovih mogu biti korišteni za početne analize, u slučajevima kad se razmatra regionalni akvifer i nije još odabrana točna pozicija bušotine, ili za slučajeve utiskivanja, kada se želi minimizirati trošak praćenja (engl. *monitoring*). Za slučaj umanjenja troška „monitoringa“, zasebna funkcija oblika (log + lin) može poslužiti za podešavanje (engl. *tuning*) predviđanja brzine kretanja, te je nakon izrade takve podešene (engl. *tuned*) korelacije moguće predviđati širenje zone zasićenja s CO₂, što posljedično opravdava manje česta 4D seizmička mjerenja. Multiparametarska jednadžba pokazala je nešto širi raspon pogrešaka, tako da je u nekim slučajevima preciznija od log + lin jednadžbe, ali najčešće u početnom periodu (prvih godinu dana), puno manje precizna.

Opći zaključci analize su:

- (1) Pokazano je kako kombinacija logaritamske i linearne funkcije izvrsno opisuje radijalno napredovanje fronte CO₂ s vremenom
- (2) Takve individualne krivulje (Prilog 1.) za svaki slučaj propusnosti, dubine (tj. tlaka i temperature) daju set koeficijenata koje je moguće korelirati s propusnosti i dubinom pomoću funkcije općeg oblika (jednadžba 4-2).

- (3) Usporedbom rezultata simulacije i korelacije koja uzima u obzir vrijeme, propusnost i dubinu (Prilog 2.) pogreška nikad nije veća od 5% za propusnosti $k \geq 100$ mD. U slučaju propusnosti 50 mD ta greška varira (ovisno o dubini) 6 do 20 %.
- (4) Alternativno je multivarijatom regresijom pokazano kako se poopćenim pristupom, tj. korištenjem jedne jednadžbe u ovisnosti o propusnosti, dubini i vremenu, s relativnom pogreškom manjom od 7,6 % (75-i percentil) može predviđati napredovanje fronte nakon godine dana. U prosjeku je ta pogreška i manja i smanjuje se kako se razmatranje pomiče dalje od početka utiskivanja.

Hipoteza rada je na taj način ispitana i dobiven je opći oblik (log + lin) za pojedinačne slučajeve, te opći oblik za širi raspon parametara, sa također zadovoljavajućom točnošću (koja je i ponajviše analizirana u ovom radu).

Aplikativnost ovakve jednadžbe može biti predmet rasprave u smislu ubrzanja primjene tehnologija uskladištenja CO₂ u dubokim slanim vodonosnicima zbog smanjenja ulaganja u praćenje kretanja zone zasićenja u skladišnom objektu (akviferu). Drugi slučaj primjene jednadžbe je u ranoj fazi i u alatima koji nisu pogodni za dugotrajne multiscenarijske analize korištenjem ležišnog simulatora.

Dakle, kako je dostupna iscrpna statistička analiza rezultata, preostaje jedino pitanje koju pouzdanost je netko spreman prihvatiti u određenom stupnju analize CCS / CCUS lanca? U tom smislu, u budućnosti će biti interesantno usporediti realne podatke utiskivanja u akvifere i analitičke rezultate iz ovog rada. Kako bi to bilo moguće, potrebno je podacima omogućiti javni pristup, po uzoru na projekt Sleipner, za koji su objavljeni iscrpni podatci o tijeku i monitoringu utiskivanja .

Izvan opsega ovog rada, ali korisno i interesantno bi bilo razviti opći oblik jednadžbe koji uključuje i brzinu utiskivanja i udaljenost raskrivenog intervala od nepropusne krovine (i podine) formacije-skladišta CO₂. Za to bi trebao puno veći broj simulacijskih slučajeva i drugačiji računalni kod. Naravno, nakon toga, parametri koji bi mogli ući u analizu su prije svega parametri o heterogenosti poroznosti te heterogenosti i anizotropnosti propusnosti.

7. LITERATURA

1. AHMADINIA, M. , SHARIATIPOUR, S.M., 2020. Analysing the role of caprock morphology on history matching of Sleipner CO₂ plume using an optimisation method, *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 10(5), pp. 1077–1097.
2. AKINFIEV, N. N., DIAMOND, L. W., 2010. Thermodynamic model of aqueous CO₂–H₂O–NaCl solutions from– 22 to 100° C and from 0.1 to 100 MPa. *Fluid Phase Equilibria*, 295(1), 104-124.
3. ALLEN, R., NILSEN, H. M., ANDERSEN, O., LIE, K. A., 2017. On obtaining optimal well rates and placement for CO₂ storage, *Comput Geosci*, 21, pp. 1403–1422.
4. AMINU, M. D., NABAVI, S. A., ROCHELLE, C. A., MANOVIC, V. 2017. A review of developments in carbon dioxide storage, *Applied Energy*, 208, pp. 1389–1419.
5. ANDERSEN, O., SUNDAL, A., 2021. Estimating Caprock Impact on CO₂ Migration in the Gassum Formation Using 2D Seismic Line Data, *Transport in Porous Media*, 138(2), pp. 459–487.
6. BACHU, S., 2013. Drainage and Imbibition CO₂/Brine Relative Permeability Curves at in Situ Conditions for Sandstone Formations in Western Canada, *Energy Procedia*, 37, pp. 4428–4436.
7. BAKHSHIAN, S., HOSSEINI, S.A., LAKE, L.W., 2020. CO₂-brine relative permeability and capillary pressure of Tuscaloosa sandstone: Effect of anisotropy, *Advances in Water Resources*, 135.
8. BENTHAM, M., KIRBY, G.A., 2005. CO₂ storage in saline aquifers, *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*, Vol. 60 (2005), No. 3, pp. 559-567
9. BROOKS, R.H., COREY, A.T., 1964a. Hydraulic properties of porous media, *Hydrology Papers, Colorado State University*, 3(March).
10. BROOKS, R.H., COREY, A.T., 1964b. Hydraulic Properties of Porous Media and Their Relation to Drainage Design, *Transactions of the ASAE*, 7(1).
11. BROOKS, R.H., COREY, A.T., 1966. Properties of Porous Media Affecting Fluid Flow, *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 92(2).

12. BURTON, M., KUMAR, N., BRYANT, S.L., 2009. CO₂ injectivity into brine aquifers: Why relative permeability matters as much as absolute permeability, *Energy Procedia*, 1(1), pp. 3091–3098.
13. CASPARI, E., PEVZNER, R., GUREVICH, B., DANCE, T., ENNIS-KING, J., CINAR, Y., LEBEDEV, M., 2015. Feasibility of CO₂ plume detection using 4D seismic: CO₂CRC Otway Project case study — Part 1: Rock-physics modeling, *Geophysics*, 80(4), pp. B95–B104.
14. CELIA, M. A., BACHU, S., NORDBOTTEN, J. M., BANDILLA, K. W., 2015. Status of CO₂ storage in deep saline aquifers with emphasis on modeling approaches and practical simulations, *Water Resources Research*, 51(9), pp. 6846–6892.
15. CHADWICK, A., WILLIAMS, G., DELEPINE, N., CLOCHARD, V., LABAT, K., STURTON, S., ROSSI, G., 2010. Quantitative analysis of time-lapse seismic monitoring data at the Sleipner CO₂ storage operation, *The Leading Edge*, 29(2), pp. 170–177..
16. CHADWICK, R. A., NOY, D., ARTS, R., EIKEN, O., 2009. Latest time-lapse seismic data from Sleipner yield new insights into CO₂ plume development, *Energy Procedia*, 1(1), pp. 2103–2110.
17. CHO, Y. I JUN, H., 2021. Estimation and uncertainty analysis of the CO₂ storage volume in the sleipner field via 4D reversible-jump markov-chain Monte Carlo, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 200, p. 108333.
18. CIHAN, A., BIRKHOLZER, J., TREVISAN, L., GONZALEZ-NICOLAS, A., ILLANGASEKARE, T., 2017. Investigation of representing hysteresis in macroscopic models of two-phase flow in porous media using intermediate scale experimental data, *Water Resources Research*, 53(1).
19. COWTON, L. R., NEUFELD, J. A., WHITE, N. J., BICKLE, M. J., WILLIAMS, G. A., WHITE, J. C., CHADWICK, R. A., 2018. Benchmarking of vertically-integrated CO₂ flow simulations at the Sleipner Field, North Sea, *Earth and Planetary Science Letters*, 491, pp. 121–133.

20. EZEKIEL, J. ADAMS, B. M, SAAR, M. O., EBIGB, A., 2022. Numerical analysis and optimization of the performance of CO₂-Plume Geothermal (CPG) production wells and implications for electric power generation, *Geothermics*, 98, p. 102270.
21. FLEMING, M.R., ADAMS, B. M., OGLAND-HAND, J. D., BIELICKI, J. M., KUEHN, T. H., SAAR, M. O., 2022. Flexible CO₂-plume geothermal (CPG-F): Using geologically stored CO₂ to provide dispatchable power and energy storage, *Energy Conversion and Management*, 253, p. 115082.
22. FU, H., LONG, Y., WANG, S., WANG, Y., YU, P., LING, K., 2019. The Development of CO₂ Plume in CO₂ Sequestration in the Aquifer, *Carbon Management Technology Conference 2019, CMTC 2019* [Preprint].
23. GRIMSTAD, A.-A., BERGMO, P., NILSEN, H. M., KLEMETSDAL, O., 2020. CO₂ Storage with Mobility Control, *SSRN Electronic Journal* [Preprint].
24. HARP, D., ONISHI, T., CHU, S., CHEN, B., PAWAR, R., 2019. Development of quantitative metrics of plume migration at geologic CO₂ storage sites, *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 9(4), pp. 687–702.
25. HARRIS, C. R., MILLMAN, K. J., VAN DER WALT, S. J., GOMMERS, R., VIRTANEN, P., COURNAPEAU, D., OLIPHANT, T. E. 2020. Array programming with NumPy, *Nature*.
26. HEFNY, M., QIN, C., SAAR, M. O., EBIGBO, A., 2020. Synchrotron-based pore-network modeling of two-phase flow in Nubian Sandstone and implications for capillary trapping of carbon dioxide, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 103.
27. HOFFMAN, N., ALESSIO, L., 2017. Probabilistic Approach to CO₂ Plume Mapping for Prospective Storage Sites: The CarbonNet Experience, *Energy Procedia*, 114, pp. 4444–4476.
28. HOSSEINI, S. A., LASHGARI, H., CHOI, J. W., NICOT, J.-P., LU, J., HOVORKA, S. D., 2013. Static and dynamic reservoir modeling for geological CO₂ sequestration at Cranfield, Mississippi, U.S.A., *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 18, pp. 449–462.

29. HWANG, J., BAEK, S., LEE, H., JUNG, W., SUNG, W., 2015. Evaluation of CO₂ storage capacity and injectivity using a relief well in a saline aquifer in Pohang basin, offshore South Korea, *Geosciences Journal* 2016 20:2, 20(2), pp. 239–245.
30. KREAVOR, S. C. M., PINI, R., ZUO, L., BENSON, S. M., 2012. Relative permeability and trapping of CO₂ and water in sandstone rocks at reservoir conditions, *Water Resources Research*, 48(2), p. 2532.
31. LANDRØ, M., ZUMBERGE, M., 2017. Estimating saturation and density changes caused by CO₂ injection at Sleipner — Using time-lapse seismic amplitude-variation-with-offset and time-lapse gravity, *Interpretation*, 5(2), pp. T243–T257.
32. LIU, C.T., HSIEH, B.Z., 2016. Assessment model for estimating CO₂ commercial storage capacity in saline formations: A case study in Taiwan, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 49, pp. 14–23.
33. LIU, D., LI, Y., SONG, S., AGARWAL, R., 2016. Simulation and analysis of lithology heterogeneity on CO₂ geological sequestration in deep saline aquifer: a case study of the Ordos Basin, *Environmental Earth Sciences* 2016 75:11, 75(11), pp. 1–13.
34. MATHIAS, S. A., GLUYAS, J. G., GONZÁLEZ MARTÍNEZ DE MIGUEL, G. J., BRYANT, S. L., WILSON, D., 2013. On relative permeability data uncertainty and CO₂ injectivity estimation for brine aquifers, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 12, pp. 200–212.
35. MUKHERJEE, A., DUTTA, P., 2020. Fluid-heat dynamics and techno-economic analysis in a deep saline aquifer, <https://doi.org/10.1080/17583004.2020.1840870>, 11(6), pp. 593–609.
36. NORDBOTTEN, J.M., CELIA, M.A., BACHU, S., 2005. Injection and Storage of CO₂ in Deep Saline Aquifers: Analytical Solution for CO₂ Plume Evolution During Injection, *Transport in Porous Media* 2005 58:3, 58(3), pp. 339–360.
37. NOROUZI, A.M., GLUYAS, J., BABAEI, M., 2022. CO₂-plume geothermal in fluvial formations: A 2D numerical performance study using subsurface metrics and upscaling, *Geothermics*, 99, p. 102287.

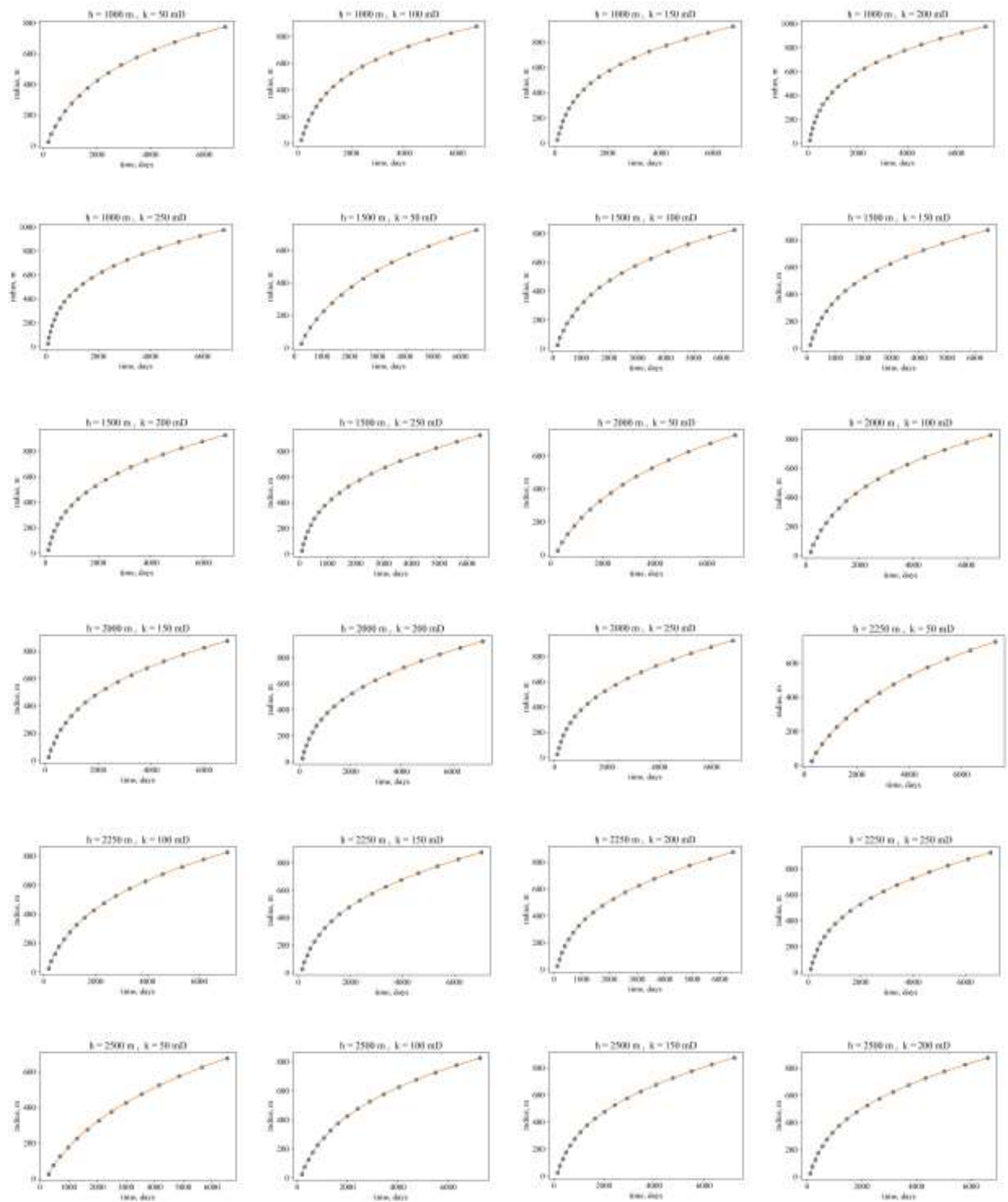
38. PEVZNER, R., CASPARI, E., GUREVICH, B., DANCE, T., CINAR, Y., 2015. Feasibility of CO₂ plume detection using 4D seismic: CO₂CRC Otway Project case study — Part 2: Detectability analysis, *Geophysics*, 80(4), pp. B105–B114.
39. PREISIG, M., PRÉVOST, J.H., 2011. Coupled multi-phase thermo-poromechanical effects. Case study: CO₂ injection at In Salah, Algeria, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5(4), pp. 1055–1064.
40. PRUESS, K., XU, T., APPS, J., GARCIA, J., 2001. Numerical Modeling of Aquifer Disposal of CO₂ *SPE - EPA Exploration and Production Environmental Conference Proceedings*, p. 16.
41. QIAO, Z., CAO, Y., LI, P., WANG, X., ROMERO, C. E., PAN, L., 2020. Thermo-economic analysis of a CO₂ plume geothermal and supercritical CO₂ Brayton combined cycle using solar energy as auxiliary heat source, *Journal of Cleaner Production*, 256, p. 120374.
42. QUEIBER, M., SINGH, S.C., 2013. Full waveform inversion in the time lapse mode applied to CO₂ storage at Sleipner, *Geophysical Prospecting*, 61(3), pp. 537–555.
43. RUTQVIST, J., 2012. The geomechanics of CO₂ storage in deep sedimentary formations, *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(3), pp. 525–551.
44. SHARMA, S., VAN GENT, D., 2018. The Australian South West Hub Project: Developing Confidence in Migration Assisted Trapping in a Saline Aquifer – Understanding Uncertainty Boundaries Through Scenarios that Stress the Models, in *14th Greenhouse Gas Control Technologies Conference*. Elsevier BV, p. 21.
45. SHEN, C.H., NGHIEM, L., CHEN, T.-L., HSIEH, B.-Z., 2015. Plume migration of different carbon dioxide phases during geological storage in deep saline aquifers, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 26(4).
46. SHEN, X., DONG, W., WAN, Y., ZHANG, F., YUAN, Z., ZHANG, Q., 2020. Numerical Simulation of Effects of Microbial Action on CO₂ Geological Storage in Deep Saline Aquifers, *Natural Resources Research 2020 30:2*, 30(2), pp. 1629–1648.

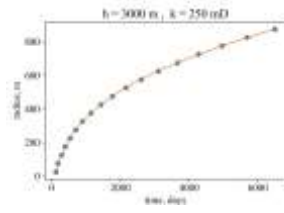
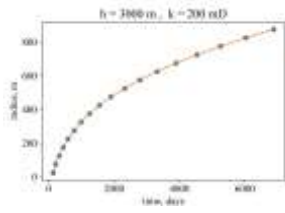
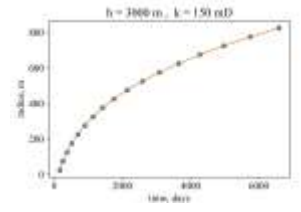
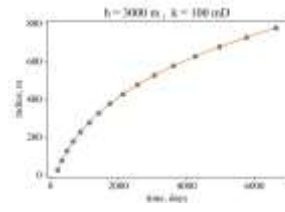
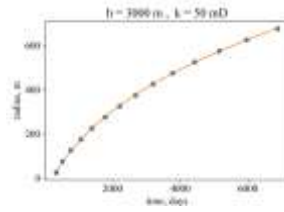
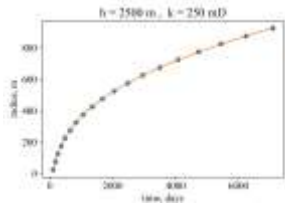
47. STRANDLI, C.W., BENSON, S.M., 2013. Diagnostics for Reservoir Structure and CO₂ Plume Migration from Multilevel Pressure Measurements, *Energy Procedia*, 37, pp. 4291–4301.
48. STRATEGY CCUS., 2019. *Strategic Planning of Regions and Territories in Europe for Low Carbon Energy and Industry Through CCUS - The Strategy CCUS Project, H2020 project, consortium lead: BRGM.*
49. VIRTANEN, P., GOMMERS, R., OLIPHANT, T. E., HABERLAND, M., REDDY, T., VAN MULBREGT, P., 2020. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python, *Nature Methods* 2020 17:3, 17(3), pp. 261–272.
50. VOSPER, H., CHADWICK, R.A., WILLIAMS, G.A., 2018. CO₂ plume migration in underground CO₂ storage: The effects of induced hydraulic gradients, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 74, pp. 271–281.
51. VOTHANH, K., SUGAI, Y., SASAKI, K., 2018. An Object-Base Modeling and Simulation of CO₂ Plume Dynamic in Saline Formation in Nam Vang Field, Cuu Long Basin, Vietnam | SPWLA Formation Evaluation Symposium of Japan | OnePetro, in *SPWLA 24th Formation Evaluation Symposium of Japan*. Chiba: SPWLA.
52. VULIN, D., SAFTIĆ, B., MACENIĆ, M., 2018. Estimate of dynamic change of fluid saturation during CO₂ injection — Case study of a regional aquifer in Croatia, *Interpretation*, 6(1), pp. SB51–SB64.
53. XIE, Q., SAEEDI, A., DELLE PIANE, C., ESTEBAN, L., BRADY, P. V., 2017. Fines migration during CO₂ injection: Experimental results interpreted using surface forces, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 65, pp. 32–39.
54. YOSHIDA, N., LEVINE, J.S., STAUFFER, P.H., 2016. Investigation of uncertainty in CO₂ reservoir models: A sensitivity analysis of relative permeability parameter values, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 49, pp. 161–178.
55. YOUSSEF, A.A.A., TRAN, L.K., MATTHÄI, S.K., 2021. Impact of the vertical resolution of corner-point grids on CO₂ plume migration predictions for layered aquifers, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 106, p. 103249.

56. YU, X., AHMADINIA, M., SHARIATIPOUR, S.M., LAWTON, D., OSADETZ, K., SAEEDFAR, A., 2020. Impact of Reservoir Permeability, Permeability Anisotropy and Designed Injection Rate on CO₂ Gas Behavior in the Shallow Saline Aquifer at the CaMI Field Research Station, Brooks, Alberta, *Natural Resources Research*, 29(4), pp. 2735–2752.
57. ZAPATA, Y., KRISTENSEN, M. R., HUERTA, N., BROWN, C., KABIR, C. S., REZA, Z., 2020. CO₂ geological storage: Critical insights on plume dynamics and storage efficiency during long-term injection and post-injection periods, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 83.
58. ZHANG, Z., AGARWAL, R., 2013. Numerical simulation and optimization of CO₂ sequestration in saline aquifers, *Computers & Fluids*, 80(1), pp. 79–87.
59. ZHANG, Z.F., WHITE, S.K., WHITE, M.D., 2015. Delineating the horizontal plume extent and CO₂ distribution at geologic sequestration sites, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 43, pp. 141–148.
60. ZHAO, H., 2014. Phase equilibria in CO₂-brine system for CO₂ storage. Doctoral Dissertation. *The Pennsylvania State University*.

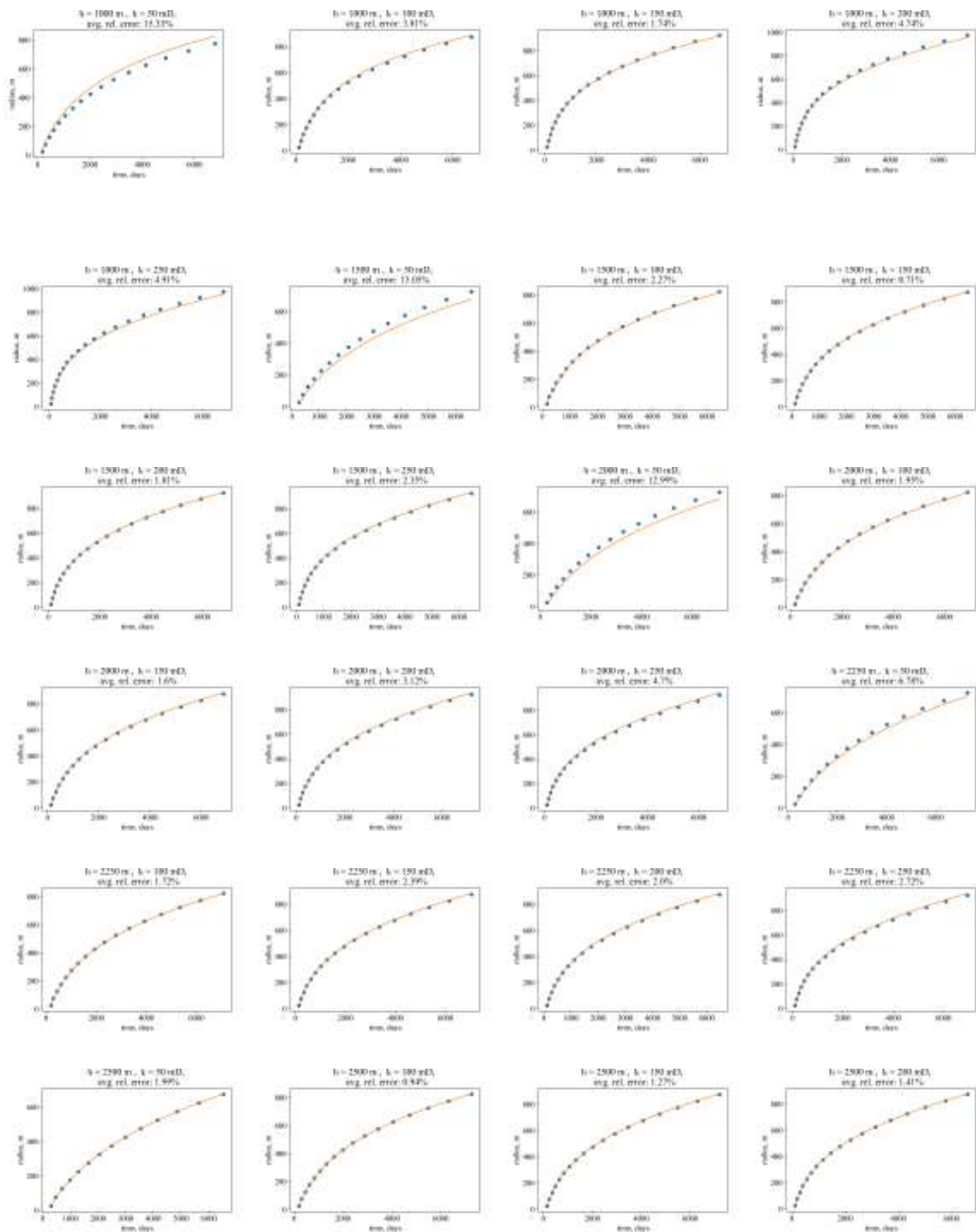
8. GRAFIČKI PRILOZI

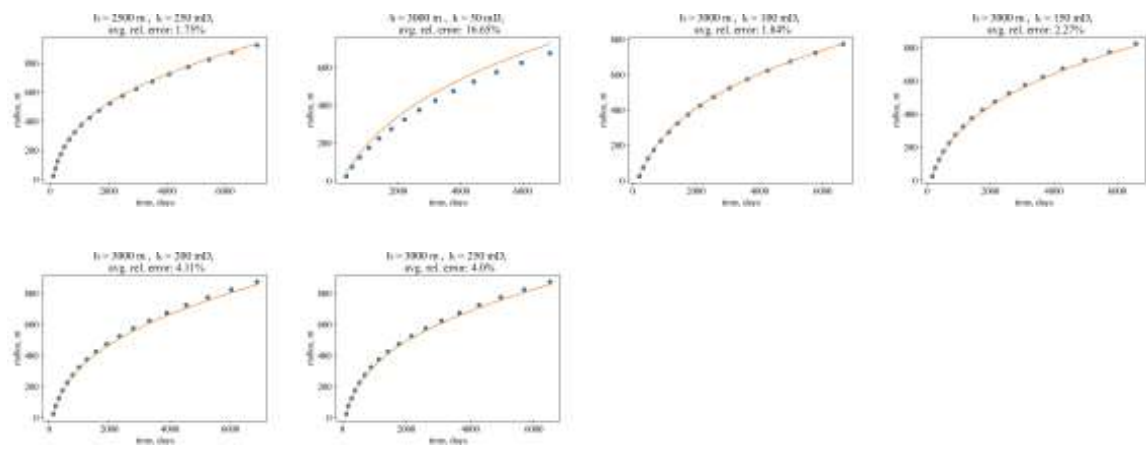
Prilog 1. Poklapanje individualnih krivulja





Prilog 2. Prosječna apsolutna pogreška za sve promatrane slučajeve





IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno na temelju znanja i vještina stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu, Sveučilišta u Zagrebu, služeći se navedenom literaturom.



Božo Logarušić



KLASA: 602-01/22-01/147
URBROJ: 251-70-12-22-2
U Zagrebu, 07.09.2022.

Božo Logarušić, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/22-01/147, URBROJ: 251-70-12-22-1 od 24.06.2022. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

BRZINA LATERALNOG ŠIRENJA CO₂ UTISNUTOG U DUBOKE SLANE AKVIFERE RADI TRAJNOG SKLADIŠTENJA

Za mentora ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada Prof.dr.sc. Domagoj Vulin nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i komentoricu Dr.sc. Lucija Jukić.

Mentor:

(potpis)

Prof.dr.sc. Domagoj Vulin

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)



Komentorica:

(potpis)

Dr.sc. Lucija Jukić

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)