

# Analitička metoda evaluacije uspješnosti utiskivanja i skladištenja CO2

---

Dujaković, Ante

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

*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:169:023156>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-12**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**ANALITIČKA METODA EVALUACIJE USPJEŠNOSTI UTISKIVANJA I  
SKLADIŠTENJA CO<sub>2</sub>**

Završni rad

Ante Dujaković

N4216

Zagreb, 2021.

ANALITIČKA METODA EVALUACIJE USPJEŠNOSTI UTISKIVANJA I  
SKLADIŠTENJA CO<sub>2</sub>

ANTE DUJAKOVIĆ

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

Sažetak

Utiskivanjem CO<sub>2</sub> ne samo da se povećava iscrpak nafte, već se ostvaruje i njegovo trajno zadržavanje unutar formacije. To je jedan od najboljih načina za njegovo korištenje i skladištenje. U radu su navedeni i opisani ključni čimbenici koji utječu na učinkovitost ovakvog procesa, a na temelju rezultata Box-Behnken eksperimentalnog dizajna, predstavljen je i jednostavan postupak za procjenu potencijala skladištenja i povećanja iscrpka nafte. Na kraju je na osnovu modela evaluacije proveden proračun za eksploatacijsko polje Lipovljani te je provedena i analiza osjetljivosti svakog parametra.

Ključne riječi: CO<sub>2</sub>, CCS, CCUS, EOR, utiskivanje, skladištenje, Box-Behnken, iscrpak, utilizacijski faktor, naftno polje Lipovljani, analiza osjetljivosti

Završni rad sadrži: 42 stranice, 8 tablica, 26 slika i 88 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentor: dr. sc. Domagoj Vulin, redoviti profesor RGNf-a

Pomoć pri izradi: Maja Arnaut, mag. ing.

Ocjenjivači: 1. dr. sc. Domagoj Vulin, redoviti profesor RGNf-a  
2. dr. sc. Karolina Novak Mavar, docentica RGNf-a  
3. dr. sc. Nediljka Gaurina Međimurec, redovita profesorica RGNf-a

Datum obrane: 21.9.2021., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

## SADRŽAJ

<b>POPIS SLIKA</b> .....	I
<b>POPIS TABLICA</b> .....	II
<b>POPIS OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA</b> .....	III
<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. CO<sub>2</sub>-EOR PROCES</b> .....	3
<b>3. METODE ANALIZE</b> .....	7
3.1. Analiza parametara .....	9
3.1.1. <i>Omjer gravitacijskog i viskoznog potencijala protoka</i> .....	10
3.1.2. <i>Omjer mobilnosti CO<sub>2</sub> i nafte</i> .....	12
3.1.3. <i>Bezdimenzionalna sila uzgona</i> .....	14
3.1.4. <i>Zasićenje naftom</i> .....	16
3.1.5. <i>Koeficijent heterogenosti ležišta</i> .....	16
3.1.6. <i>Relativni udio sloja visoke propusnosti</i> .....	19
3.1.7. <i>Bezdimenzionalni tlak utiskivanja</i> .....	20
3.1.8. <i>Bezdimenzionalni proizvodni tlak</i> .....	20
3.1.9. <i>Bezdimenzionalni tlak ležišta</i> .....	21
3.1.10. <i>Relativna veličina vodonosnika</i> .....	21
3.2. Planiranje pokusa .....	22
3.3. Numerička simulacija .....	24
3.4. Statističko modeliranje .....	25
<b>4. PRIMJER PRORAČUNA</b> .....	28
<b>5. ANALIZA OSJETLJIVOSTI</b> .....	30
<b>6. ZAKLJUČAK</b> .....	35
<b>7. POPIS LITERATURE</b> .....	36

## POPIS SLIKA

<b>Slika 1-1.</b> Postotni udjeli emisija stakleničkih plinova u Europskoj Uniji za 2019. godinu. 1	
<b>Slika 1-2.</b> Povećanje proizvodnje nafte uslijed utiskivanja CO <sub>2</sub> . .... 2	2
<b>Slika 2-1.</b> Odnos omjera pokretljivosti između CO <sub>2</sub> i nafte te površine obuhvata. .... 3	3
<b>Slika 2-2.</b> Shema mješivog CO <sub>2</sub> -EOR procesa kojim nastaje prijelazna zona miješanja između utisne i proizvodne bušotine. .... 5	5
<b>Slika 2-3.</b> Shematski dijagram rezultata dobivenih ispitivanjem u tankoj cijevi..... 6	6
<b>Slika 3-1.</b> Slijed radnji prilikom generiranja numeričkog i statističkog modela za procjenu izvedivosti CO <sub>2</sub> -EOR procesa. .... 8	8
<b>Slika 3-2.</b> Ovisnost omjera gravitacijskog i viskoznog potencijala protoka te dubine i visine prodiranja. .... 11	11
<b>Slika 3-3.</b> Nastalo prstoliko prodiranje CO <sub>2</sub> zbog njegove povećane mobilnosti u odnosu na naftu. .... 12	12
<b>Slika 3-4.</b> Prikaz naizmjeničnog utiskivanja vode i CO <sub>2</sub> . .... 13	13
<b>Slika 3-5.</b> Utjecaj WAG procesa na smanjenje prstolikog prodiranja CO <sub>2</sub> . .... 14	14
<b>Slika 3-6.</b> Gravitacijska segregacija CO <sub>2</sub> zbog razlike u njegovoj gustoći s naftom..... 14	14
<b>Slika 3-7.</b> Utjecaj CO <sub>2</sub> -Foam procesa na smanjenje prstolikog prodiranja i gravitacijske segregacije CO <sub>2</sub> . .... 15	15
<b>Slika 3-8.</b> Log-normalna ovisnost propusnosti uzorka o udjelu uzoraka s većom propusnošću. .... 17	17
<b>Slika 3-9.</b> Utjecaj heterogenosti na širenje fronte CO <sub>2</sub> . .... 18	18
<b>Slika 3-10.</b> Utjecaj relativnog udjela sloja visoke propusnosti na širenje fronte CO <sub>2</sub> . .... 19	19
<b>Slika 3-11.</b> Geološki model korišten prilikom simulacija..... 25	25
<b>Slika 5-1.</b> Utjecaj R <sub>L</sub> parametra na iscrpak. .... 30	30
<b>Slika 5-2.</b> Utjecaj M <sub>g</sub> <sup>o</sup> parametra na iscrpak. .... 30	30
<b>Slika 5-3.</b> Utjecaj N <sub>g</sub> <sup>o</sup> parametra na iscrpak..... 31	31
<b>Slika 5-4.</b> Utjecaj S <sub>oi</sub> parametra na iscrpak. .... 31	31
<b>Slika 5-5.</b> Utjecaj σ <sub>R</sub> parametra na iscrpak. .... 32	32
<b>Slika 5-6.</b> Utjecaj H <sub>D</sub> parametra na iscrpak. .... 32	32
<b>Slika 5-7.</b> Utjecaj P <sub>injD</sub> parametra na iscrpak. .... 33	33
<b>Slika 5-8.</b> Utjecaj P <sub>pD</sub> parametra na iscrpak..... 33	33
<b>Slika 5-9.</b> Utjecaj P <sub>eD</sub> parametra na iscrpak. .... 34	34
<b>Slika 5-10.</b> Utjecaj N <sub>D</sub> parametra na iscrpak. .... 34	34

## POPIS TABLICA

<b>Tablica 3-1.</b> Intervali za okvirnu procjenu izvedivosti CO <sub>2</sub> -EOR procesa. ....	7
<b>Tablica 3-2.</b> Raspon vrijednosti odabranih parametara za analizu. ....	22
<b>Tablica 3-3.</b> Raspon vrijednosti korišten prilikom izvedbi pokusa. ....	23
<b>Tablica 3-4.</b> Prikaz svih potrebnih eksperimenata za provedbu Box-Behnken eksperimentalnog dizajna. ....	24
<b>Tablica 3-5.</b> Sastav nafte korišten prilikom simulacija. ....	24
<b>Tablica 4-1.</b> Ulazni parametri potrebni za proračun. ....	28
<b>Tablica 4-2.</b> Bezdimenzionalni parametri korišteni u jednadžbama. ....	29
<b>Tablica 4-3.</b> Rezultati proračuna. ....	29

## POPIS OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA

Simbol	Opis	Mjerna jedinica
$\Delta P$	razlika utisnog i proizvodnog tlaka	MPa
$\Delta \rho$	razlika gustoće između nafte i CO <sub>2</sub>	kg/m <sup>3</sup>
$A_i$	hidrodinamička komunikacija u vodoravnom smjeru	-
$g$	gravitacijsko ubrzanje	m <sup>2</sup> /s
$H$	debljina ležišta	m
$H_D$	relativni udio sloja visoke propusnosti	-
$H_i$	omjer efektivne i ukupne debljine ležišta	-
$h_i$	debljina sloja visoke propusnosti	m
$k_{50}$	propusnost uzorka ako 50% uzoraka ima veću propusnost od njega	( $\mu\text{m}$ ) <sup>2</sup>
$k_{84,1}$	propusnost uzorka ako 84,1% uzoraka ima veću propusnost od njega	( $\mu\text{m}$ ) <sup>2</sup>
$k_h$	horizontalna propusnost ležišta	( $\mu\text{m}$ ) <sup>2</sup>
$k_i$	omjer maksimalne i minimalne propusnosti	-
$k_{rg}$	relativna propusnost za CO <sub>2</sub>	-
$k_{ro}$	relativna propusnost za naftu	-
$k_v$	vertikalna propusnost ležišta	( $\mu\text{m}$ ) <sup>2</sup>
$L$	duljina ležišta	m
$\max(x)$	maksimum parametra čiju vrijednost treba normalizirati	-
$M_g^o$	omjer mobilnosti CO <sub>2</sub> i nafte	-
$\min(x)$	minimum parametra čiju vrijednost treba normalizirati	-
$N_D$	relativna veličina vodonosnika	-
$N_g^o$	bezdimezionalna sila uzgona	-
$P_e$	tlak ležišta	MPa
$P_{eD}$	bezdimezionalni tlak ležišta	-
$P_{inj}$	tlak utiskivanja	MPa
$P_{injD}$	bezdimezionalni tlak utiskivanja	-
$P_{MM}$	minimalni tlak miješanja	MPa
$P_p$	proizvodni tlak	MPa

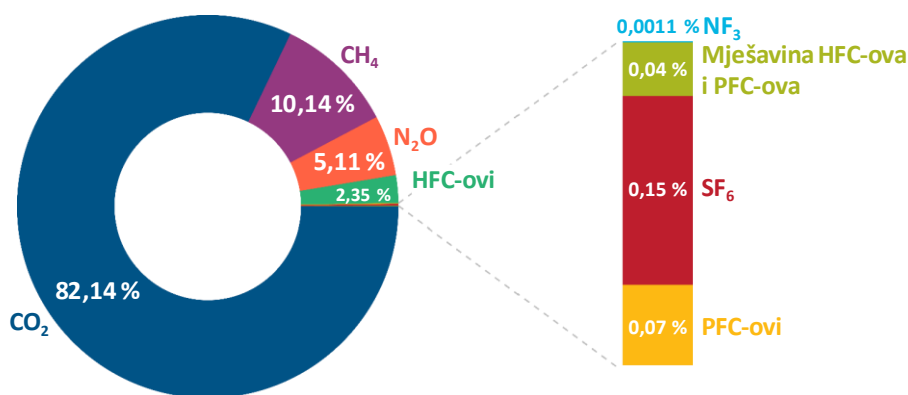
<b>P<sub>pD</sub></b>	bezdimenzionalni proizvodni tlak	-
<b>R</b>	iscrpak nafte	-
<b>R<sub>CO<sub>2</sub></sub></b>	CO <sub>2</sub> utilizacijski faktor	t/m <sup>3</sup>
<b>R<sub>L</sub></b>	omjer gravitacijskog i viskoznog potencijala protoka	-
<b>V<sub>DP</sub></b>	koeficijent varijacije propusnosti	-
<b>V<sub>w</sub></b>	volumen slojne vode unutar ležišta	m <sup>3</sup>
<b>V<sub>φ</sub></b>	porni volumen ležišta	m <sup>3</sup>
<b>x</b>	iznos parametra čiju vrijednost treba normalizirati	-
<b>x<sub>norm</sub></b>	normalizirana vrijednost parametra	-
<b>α</b>	kut nagiba	°
<b>μ<sub>g</sub></b>	viskoznost CO <sub>2</sub>	mPa.s
<b>μ<sub>o</sub></b>	viskoznost nafte	mPa.s
<b>σ<sub>R</sub></b>	koeficijent homogenosti ležišta	-



## 1. UVOD

Klimatske promjene danas su poprimile tolike razmjere da je povratak na staro gotovo i nemoguć (Toniazzo et al., 2004; Charbit et al., 2008; Solomon et al., 2009; Gillett et al., 2011; Matthews i Solomon, 2013; Solomon et al., 2013). Izbjegavanje još veće katastrofe krije se u učinkovitoj kontroli i smanjenju antropogenih emisija stakleničkih plinova u atmosferu (Wei et al., 2006; Yao i Ji, 2010; Wang, 2012; Novak Mavar et al., 2021). No, da bi se to ostvarilo, nužno je udruženo djelovanje na globalnoj razini. Upravo s tim ciljem doneseni su mnogi međunarodni ugovori, a kao najvažnije primjere moguće je navesti Protokol iz Kyota donesen 1997. godine te Pariški sporazum iz 2015. godine (Rowlands, 1995; Adger, 2001; Brunnée, 2002; Gupta, 2006; Gupta, 2007; Bortscheller, 2009; Gupta, 2010; United Nations, 2015). Ovakvi pravni akti ponajviše su usmjereni na stabiliziranje emisija CO<sub>2</sub>. Razlog tome je njegova relativna zastupljenost (Slika 1-1) u odnosu na ostale stakleničke plinove (Lashof i Ahuja, 1990; Herzog et al., 1997; Hitchon et al., 1999; Lee i Kam, 2013; El-Hoshoudy i Desouky, 2018).

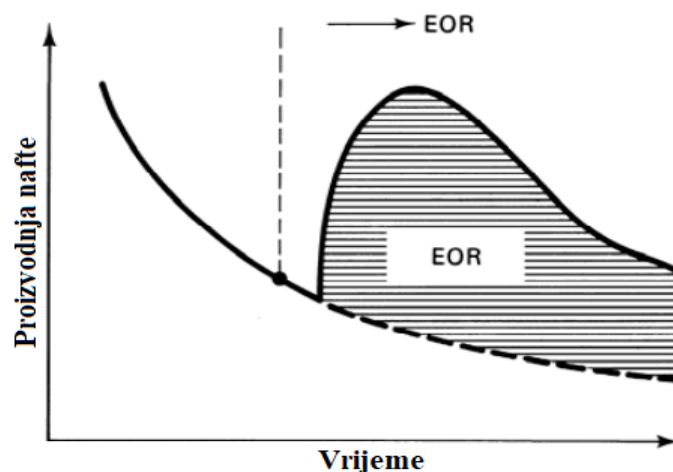
Kako bi se uspješno reducirale emisije CO<sub>2</sub> te suzbilo daljnje povećanje njegove zastupljenosti u atmosferi, neizbježna je primjena raznih postupaka za hvatanje i skladištenje ugljika (engl. *Carbon Capture and Storage – CCS*). Među predloženim metodama, posebno se istaknuo proces skladištenja CO<sub>2</sub> utiskivanjem u geološke formacije, koji trenutno predstavlja (u smislu količina koje se mogu uskladištiti) najbolju opciju dostupnu za dugoročno uklanjanje CO<sub>2</sub>. To dokazuju i mnoga prirodna ležišta u kojima je CO<sub>2</sub> zadržan i do nekoliko milijuna godina (Herzog et al., 1997; Hitchon et al., 1999; Bachu, 2000; Yao i Ji, 2010; Gaurina-Međimurec i Novak Mavar, 2019).



**Slika 1-1.** Postotni udjeli emisija stakleničkih plinova u Europskoj Uniji za 2019. godinu (Europski revizorski sud, 2019).

Utiskivanjem CO<sub>2</sub> može se u nekim formacijama ostvariti dodatno povećanje iscrpka nafte (engl. *Enhanced Oil Recovery – EOR*, slika 1-2). Njegovim injektiranjem postiže se povećanje pokretljivosti nafte preostale u ležištu nakon primarne ili sekundarne faze pridobivanja (Bailey i McDonald, 1993; Bergman et al., 1997; Jüttner, 1997; Hitchon et al., 1999; Bachu, 2000; Espie et al., 2003; Verma, 2015; El-Hoshoudy i Desouky, 2018; Gaurina-Međimurec i Novak Mavar, 2019; Varga, 2019; Arnaut, 2021) čime se ostvaruje povećanje krajnjeg iscrpka nafte te se, uz one ekološke, postižu i ekonomske pogodnosti (Bailey i McDonald, 1993; Herzog et al., 1997; Hitchon et al., 1999; Bachu, 2000; Yao i Ji, 2010; Verma, 2015; Varga, 2019; Novak Mavar et al., 2021). Dakle, u ovom slučaju može se govoriti o hvatanju, korištenju i skladištenju ugljika (engl. *Carbon Capture, Utilization and Storage – CCUS*).

Ipak, neće u svakom naftnom ležištu CO<sub>2</sub>-EOR proces biti isplativ. Stoga je prije same primjene postupka poželjno provesti analiza troškova i koristi (engl. *cost-benefit analysis*) te procijeniti mogu li prednosti EOR-a nadoknaditi troškove hvatanja, transporta i utiskivanja CO<sub>2</sub> (Robel, 1978; Bailey i McDonald, 1993; Bergman et al., 1997; Herzog et al., 1997; Hitchon et al., 1999; Winter i Bergman, 2001; Espie et al., 2003; Mathiassen, 2003; Bradshaw et al., 2007; Gupta, 2010). Kako bi se donesla ispravna odluka, neophodno je predvidjeti mogući iscrpak nafte te približno odrediti CO<sub>2</sub> utilizacijski faktor (Yao i Ji, 2010). No, budući da navedene varijable ovise o raznim parametrima (Bradshaw et al., 2007; Yao i Ji, 2010) i nije ih lako odrediti linearnom regresijom (tj. korelacijama), to je veoma zahtjevan zadatak (Yao i Ji, 2010; Arnaut et al., 2021). Za njegovo rješavanje obično se primjenjuju razni numerički i statistički modeli (Yao i Ji, 2010; Arnaut et al., 2021), a jedna takva metoda predstavljena je u ovom radu.

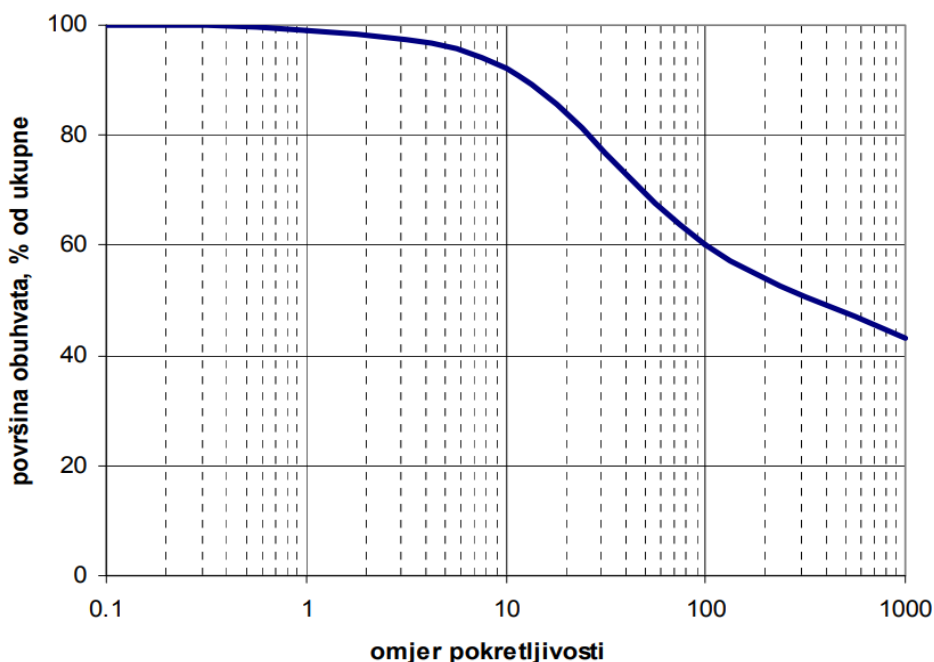


**Slika 1-2.** Povećanje proizvodnje nafte uslijed utiskivanja CO<sub>2</sub> (Lake, 1989).

## 2. CO<sub>2</sub>-EOR PROCES

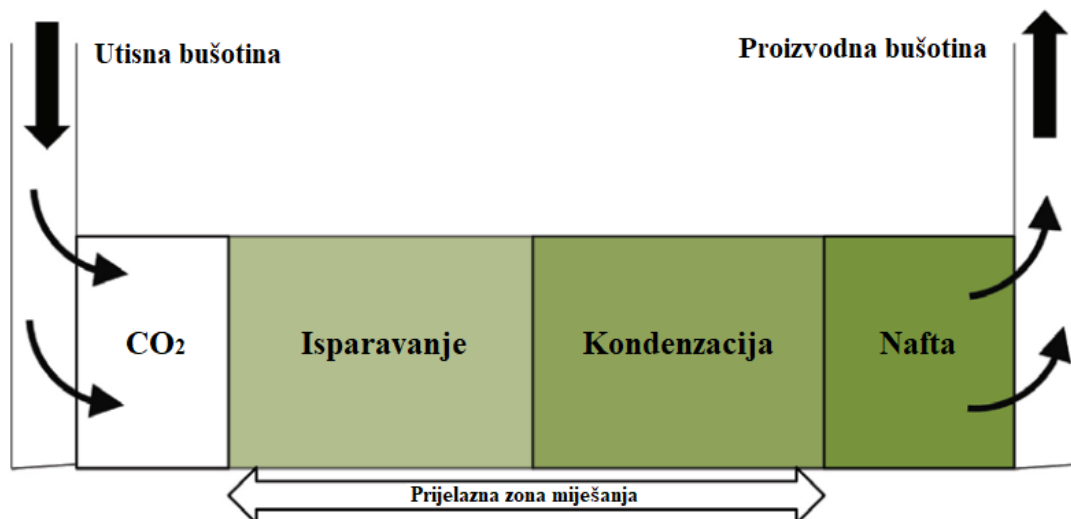
Iako je provođenje detaljnijeg teoretskog razmatranja CO<sub>2</sub>-EOR procesa izvan teme ovog rada, nužno je barem ukratko objasniti ključne principe, zbog postizanja što boljeg uvida u njegovo razumijevanje kako bi se osiguralo donošenje ispravnijih odluka prilikom procjene njegove učinkovitosti.

Utiskivanje CO<sub>2</sub> može se odvijati u mješivim i nemješivim uvjetima (Holm, 1982; Holm, 1986; Zick, 1986; Lake, 1989; Martin i Taber, 1992; Jüttner, 1997; Vulin, 2010; Verma, 2015; Arnaut, 2021). Kada se radi o nemješivim uvjetima, zbog povećane mobilnosti u odnosu na naftu, dio CO<sub>2</sub> vrlo brzo prodire do proizvodne bušotine što uzrokuje smanjenje njegove količine unutar ležišta te manji koeficijent volumnog obuhvata (Slika 2-1), tj. umanjeni udio proizvodnog sloja zahvaćenog utisnutim fluidom (Stalkup, 1978; Holm, 1982; Lake, 1989; Vulin, 2010). Posljedica je uobičajeno manja proizvodnja nafte, a povećana CO<sub>2</sub> što u konačnici rezultira nižim iscrpkom nafte (Holm, 1976; Lake, 1989; Bergman et al., 1997; Vulin, 2010; Verma, 2015; Arnaut, 2021). Smatra se da mješivo istiskivanje nafte pridonosi povećanju krajnjeg iscrpka za približno 20% (Bergman et al., 1997; El-Hoshoudy i Desouky, 2018), a kod nemješivog je taj iznos oko 10% (Bergman et al., 1997).



**Slika 2-1.** Odnos omjera pokretljivosti između CO<sub>2</sub> i nafte te površine obuhvata (Vulin, 2010).

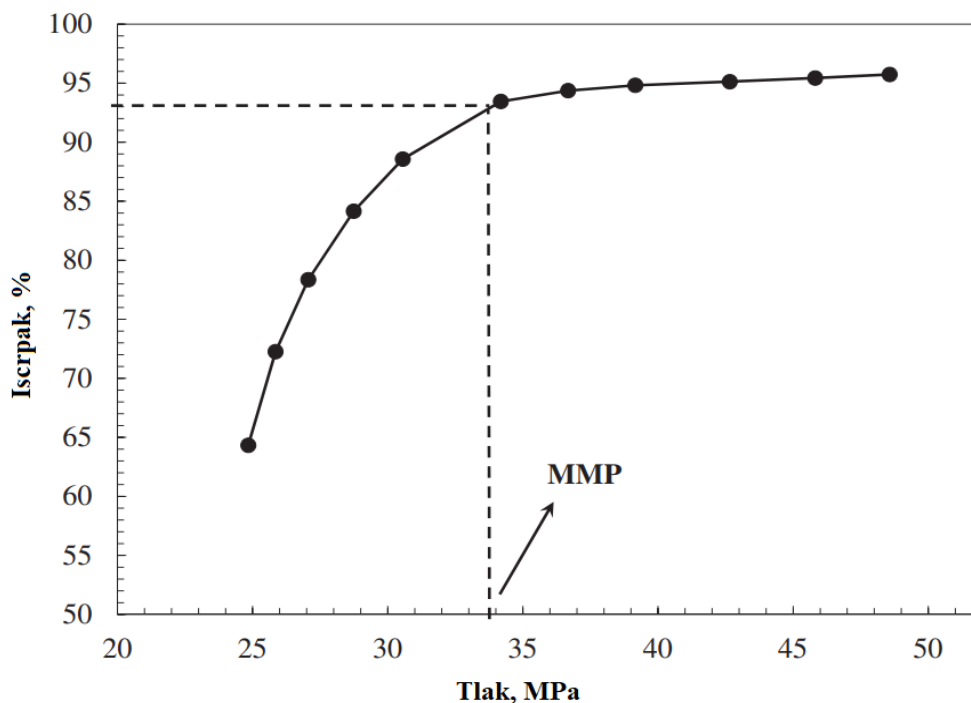
Dakle, s ciljem optimalne proizvodnje, poželjno je ostvariti miješanje nafte i CO<sub>2</sub> (Holm, 1986; Bergman et al., 1997). Za ležišta nafte, mješivost se definira kao fizičko stanje između dva ili više fluida koje će im omogućiti miješanje u svim omjerima bez postojanja vidljive razdjelnice među njima (Holm, 1976; Holm, 1986; Jüttner, 1997; Yin, 2015). Kod utiskivanja CO<sub>2</sub> u naftu, oba fluida su prvotno nemješiva te se ne postiže njihovo miješanje pri prvom kontaktu (engl. *first-contact miscibility*). Umjesto toga, miješanje se ostvaruje ponavljajućim kontaktom, tj. dinamičkim i višestrukim doticajima nafte i CO<sub>2</sub> (engl. *multiple-contact miscibility* ili *dynamic miscibility*). Postoje dva procesa kojima se može uspostaviti takvo miješanje (Stalkup, 1983; Holm, 1986; Lake, 1989; Jüttner, 1997; Mathiassen, 2003; El-Hoshoudy i Desouky, 2018; Varga, 2019). Prvi mehanizam postiže se otparavanjem ugljikovodika srednje molarne mase iz nafte u injektirani plin, a kada se u sastavu plinske smjese u ležištu (CO<sub>2</sub>) postigne dovoljna količina ugljikovodika iz nafte, on postane mješiv s ležišnom naftom (engl. *vaporizing-gas drive*). Zatim, dalje od utisne bušotine, dolazi do kondenzacije srednjih ugljikovodika iz utisnutog medija u naftu sve dok se ne postignu mješivi uvjeti (engl. *condensing-gas drive*). Mnogi autori (Zick, 1986; Stalkup, 1987; Johns et al., 1993; Johns et al., 1994) dokazali su kako se prilikom utiskivanja CO<sub>2</sub> navedeni procesi gotovo nikada ne odvijaju samostalno te da se u ležištu nafte zapravo odvija kombinacija oba procesa (engl. *combined condensing/vaporizing-gas drive*). Drugim riječima, CO<sub>2</sub> prvo izdvaja lakše komponente iz nafte smještene u blizini utisne bušotine, a njegovim daljnjim protjecanjem te iste komponente se prenose u dijelove nafte bliže proizvodnoj bušotini što uzrokuje stvaranje obogaćene prijelazne zone s povoljnim uvjetima za ostvarivanje miješanja (Mathiassen, 2003; Varga, 2019). Nastala prijelazna zona miješanja (Slika 2-2) mješiva je s oba fluida, tj. s CO<sub>2</sub> u stražnjem dijelu, a s naftom u prednjem (Jüttner, 1997; Verma, 2015), što povećava pokretljivosti nafte zbog porasta njenog volumena uzrokovanog bubrenjem uslijed miješanja s kondenziranim komponentama, a njenu mobilnost dodatno pospješuje i smanjenje gustoće, viskoznosti te međupovršinske napetosti (Holm, 1982; Holm, 1986; Holm i O'Brien, 1986; Holm, 1987; Lake, 1989; Martin i Taber, 1992; Johns et al., 1993; Jüttner, 1997; Espie et al., 2003; Mathiassen, 2003; Ghedan, 2009; Al-Jarba i Al-Anazi, 2010; Gao et al., 2010; Vulin, 2010; Verma, 2015; Yin, 2015; El-Hoshoudy i Desouky, 2018; Mansour et al., 2019; Varga, 2019; Novosel et al., 2020; Arnaut, 2021; Massarweh i Abushaikha, 2021).



**Slika 2-2.** Shema mješivog CO<sub>2</sub>-EOR procesa kojim nastaje prijelazna zona miješanja između utisne i proizvodne bušotine (Verma, 2015).

Postojanje ovakvog kombiniranog procesa prvi su eksperimentalno dokazali Zick (1986) te Stalkup (1987). Otkriće kombiniranog mehanizma istiskivanja nafte duboko je promijenilo način objašnjavanja procesa miješanja koji je prije toga bio pogrešno opisiv (Zick, 1986; Novosad i Costain, 1988; Johns et al., 1993; Jaubert et al., 1998). To znači da su objavljena mnoga netočna istraživanja pa analiziranju učinkovitosti utiskivanja CO<sub>2</sub> treba pristupiti s dodatnom mjerom opreza imajući na umu moguće greške zbog navedenog. Posebnu pozornost treba posvetiti najmanjem tlaku kod kojeg dolazi do ovakvog istiskivanja nafte. Naime, da bi nastali uvjeti pogodni za nastanak opisanog miješanja nafte i CO<sub>2</sub>, tlak u ležištu mora biti veći od minimalnog tlaka miješanja (engl. *minimum miscibility pressure* – *MMP*). To je najvažniji parametar za utvrđivanje perspektivnosti ležišta za provedbu povećanja iscrpka nafte utiskivanjem CO<sub>2</sub> (Varga, 2019). Prethodni autori dokazali su da je njegova vrijednost uobičajeno manja u odnosu na ranije korištene obrasce (Mathiassen, 2003; Nielsen, 2021). Navedena odstupanja nastaju jer su, zbog krivog shvaćanja dinamičke mješivosti fluida, eksperimenti provedeni uzimajući u obzir krive pretpostavke (Al-Jarba i Al-Anazi, 2010), a budući da je ovakav parametar svojevrsni eliminacijski faktor o kojem ovisi učinkovitost, a time i primjenjivost procesa, od iznimne je važnosti poznavati njegov točan iznos.

Za određivanje točnog iznosa minimalnog tlaka miješanja potrebne su detaljne PVT analize nafte i smjese nafte i CO<sub>2</sub> (Stalkup, 1978; Holm, 1982; Holm, 1986; El-Hoshoudy i Desouky, 2018; Mansour et al., 2019; Arnaut, 2021). Vrijednosti ponajviše ovise o sastavu nafte i temperaturi ležišta. Nafta veće gustoće i viskoznosti te nafte s povećanim udjelom aromatskih spojeva imaju veći MMP, a njegov iznos dodatno se povećava pri visokim temperaturama (Holm, 1982; Holm, 1986; Holm i O'Brien, 1986; Lake, 1989; Bergman et al., 1997; Mathiassen, 2003; Al-Jarba i Al-Anazi, 2010; Boait et al., 2015; Yin, 2015; El-Hoshoudy i Desouky, 2018; Arnaut, 2021). Najčešći postupak za njegovo određivanje je test uskom cijevi (engl. *slim-tube test*) kojim se dobivaju vrijednosti iscrpka nafte u ovisnosti o tlaku (Slika 2-3). Ipak, budući da istiskivanje nafte u ležištu ovisi o dodatnim mehanizmima kao što su gravitacijska segregacija uzrokovana gravitacijskom silom, viskozno prstoliko prodiranje nastalo nepoželjnim omjerima relativnih propusnosti i heterogenosti pornog prostora, rezultate testa ne treba koristiti za procjenu pogodnosti pojedinog ležišta za provedbu CO<sub>2</sub>-EOR procesa (Flock i Nouar, 1984; Mathiassen, 2003; Varga, 2019). Za navedeno se koriste ponešto složenije metode analize koje u obzir uzimaju i prethodne parametre.



**Slika 2-3.** Shematski dijagram rezultata dobivenih ispitivanjem u tankoj cijevi (Esposito et al., 2017).

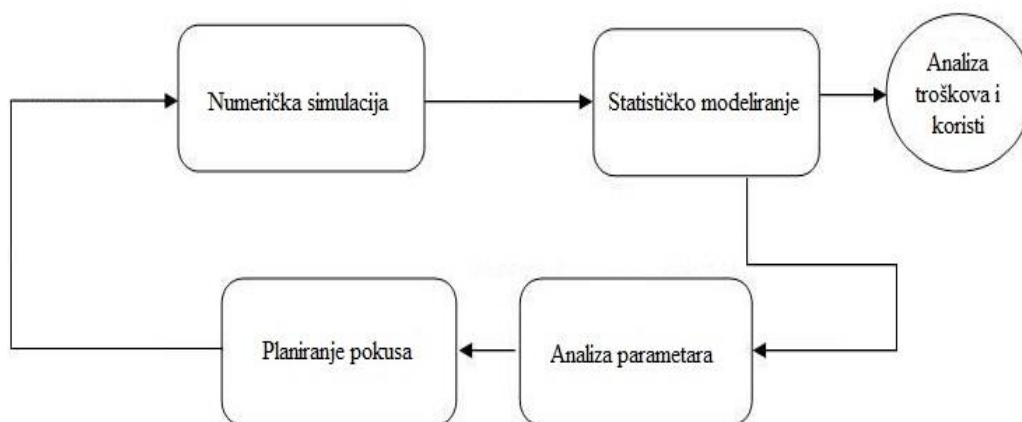
### 3. METODE ANALIZE

Mnogi autori (Tablica 3-1) predlagali su razne metode za okvirnu procjenu izvedivosti (engl. *screening*) CO<sub>2</sub>-EOR procesa na temelju parametara ležišnih stijena i fluida te su smatrali da je postupak provediv ako se ležišne karakteristike nalaze unutar dopuštenih intervala. Problem takvih pojednostavljenih analiza je što se njima ne dobivaju konkretni podaci o iscrpku te je nemoguće predvidjeti hoće li koristi nadmašiti troškove hvatanja, transporta i utiskivanja. Stoga je takve podatke preporučljivo koristiti samo kao smjernice za utvrđivanje ležišta u slučaju kojih treba provesti temeljitu procjenu kako bi se odredila njihova prikladnost za mješivo istiskivanje s CO<sub>2</sub> (Al-Jarba i Al-Anazi, 2010).

**Tablica 3-1.** Intervali za okvirnu procjenu izvedivosti CO<sub>2</sub>-EOR procesa (dorađeno iz Varga, 2019).

	Aladasani i Bai, 2010	Gao et al., 2010	Yin, 2015		El-Hoshoudy i Desouky, 2018
			Pješčenjaci	Karbonati	
<b>Poroznost, %</b>	3-37	>12	7-29,5	4-23,7	>7
<b>Propusnost, (μm)<sup>2</sup></b>		>0,01	>0,01	>0,002	
<b>Gustoća, kg/m<sup>3</sup></b>	801-886	<892	<892	<886	<892
<b>Viskoznost, mPa.s</b>	<35	<10	<3	<6	<3
<b>Temperatura, °C</b>	27,78-121,11		28,33-126,67	30-111,11	
<b>Tlak, MPa</b>					>20,68
<b>Dubina, m</b>	457-4073	>762	351-3642	914-3383	>762
<b>Zasićenje naftom, %</b>	15-89		>20	>20	>20
<b>Debljina sloja, m</b>			4,57-81,69	22,86-41,76	22,86-41,76

Detaljnije evaluacije uobičajeno započinju standardnom PVT analizom ležišne nafte koja je popraćena analizom promjene njenih PVT svojstava pri utiskivanju CO<sub>2</sub> (Domitrović et al., 2004; Domitrović et al., 2005; Novosel, 2005; Ghedan, 2009; Novosel, 2010; Varga, 2019). Mjerena PVT svojstva upotrebljavaju se za podešavanje parametara jednadžbe stanja (engl. *equation of state* – *EOS*) kako bi rezultati dobiveni jednadžbom što više odgovarali eksperimentalno dobivenim podacima. Primjer ovakvog postupka moguće je pronaći u radu „Definiranje jednadžbe stanja za utiskivanje CO<sub>2</sub> u naftu“ (Biličić, 2016), a korištenjem dobivene jednadžbe mogu se na pogodan način dobiti podaci o iscrpku nafte prilikom utiskivanja CO<sub>2</sub> (Domitrović et al., 2004; Domitrović et al., 2005; Novosel, 2009; Novosel, 2010; Varga, 2019). U slučaju da nisu dostupni eksperimentalni podaci o utiskivanju, iscrpak se može procijeniti raznim numeričkim i statističkim modelima (Stalkup, 1978; Vulin, 2010; Yao i Ji, 2010; Etehadtavakkol et al., 2014; Novosel et al., 2020; Arnaut et al., 2021). Navedeni modeli uglavnom se dobivaju statističkim modeliranjem na temelju raznih računalnih simulacija kojima prethodi odabir najutjecajnijih parametara za kvantifikaciju iscrpka (Slika 3-1). Jednu takvu metodu predstavili su Yao i Ji (2010), a u narednim poglavljima opisan je postupak njenog nastajanja. Korištenjem ove metode može se veoma lako procijeniti iscrpak, a na temelju njega je moguće provesti analizu troškova i koristi te donesti odluku o daljnjoj realizaciji projekta što, u slučaju zadovoljavajućih rezultata, dovodi do provedbe pilot projekta s ciljem dodatne provjere podataka dobivenih na osnovu statističkog i numeričkog modela. Rezultate pilot projekta moguće je upotrijebiti za dodatno podešavanje jednadžbi te donošenje konačne odluke o komercijalizaciji (Novosel, 2009; Gao et al., 2010; Vulin, 2010; Varga, 2019; Novosel et al., 2020).



**Slika 3-1.** Slijed radnji prilikom generiranja numeričkog i statističkog modela za procjenu izvedivosti CO<sub>2</sub>-EOR procesa (prerađeno iz Khosravi i Rostami, 2011).



### 3.1. Analiza parametara

Iscrpak nafte ovisan je o raznim parametrima te je veoma zahtjevno odrediti koji su parametri najutjecajni. Ponekad se oni odabiru dogovorno ili kvalitativnom procjenom na temelju iskustvenih spoznaja istraživača (Vulin, 2010), a sličan pristup imali su i Yao i Ji (2010) koji su u svom radu preuzeli i nadopunili parametre već korištene od strane drugih autora. Međutim, time je moguće zanemariti i neke ključne čimbenike te je već u tako ranoj fazi procjene moguća pogreška od nekoliko stotina posto (Vulin, 2010). Dodatan problem može nastati uslijed manjka podataka koji se tada procjenjuju na osnovu raznih geostatističkih, numeričkih, determinističkih i stohastičkih metoda te analitičkih korelacija (Vulin, 2010; Varga, 2019). Osnovni problem navedenih metoda je u tome što one u većini slučajeva nisu ispitane s fluidom koji ima veliki udio CO<sub>2</sub> te je stoga njihova prikladnost često upitna (Stalkup, 1983; Mathiassen, 2003; Vulin, 2010; Yin, 2015). Sve to uzrokuje da mnoge analize imaju veliki stupanj nesigurnosti koji konstantno zahtjeva dodatna financijska ulaganja s ciljem otklanjanja nepoznanica i pročišćavanja te poboljšavanja setova podataka (Stalkup, 1978; Yin, 2015). U tu svrhu potrebno je obaviti konkretne PVT i petrofizičke analize koristeći CO<sub>2</sub> kao ispitni fluid, ali i dodatna seizmička ispitivanja te karotažna mjerenja (Vulin, 2010; Varga, 2019). Dobivenim rezultatima moguće je generirati vlastite korelacije i geostatističke procjene koje će tada biti znatno točnije. Primjer takve analize moguće je pronaći u radu „Ekološki aspekti i mogućnost skladištenja CO<sub>2</sub> u neogenska pješčenjačka ležišta sjeverne Hrvatske na primjeru polja Ivanić“ (Novak Mavar, 2016). U navedenom radu je korištena deterministička tehnika običnog kriginga za izradu karata poroznosti, debljine i dubine ležišta za eksploatacijsko polje Ivanić.

U nastavku su ukratko objašnjeni bezdimenzionalni parametri koje su Yao i Ji (2010) odabrali kao najpogodnije za analizu. Prilikom njihovog određivanja, treba imati na umu potonje činjenice da bi se osiguralo dobivanje najtočnije procjene iscrpke.

### 3.1.1. Omjer gravitacijskog i viskoznog potencijala protoka

Ovaj parametar odnosi se na vrijeme potrebno fluidu da prijeđe ležište u uzdužnom smjeru u usporedbi s vremenom potrebnim za poprečnu dimenziju, tj. to je omjer gravitacijskih i viskoznih sila koje u sloju najčešće djeluju okomito jedna na drugu te koje uzrokuju navedeno poprečno i uzdužno gibanje (Vulin, 2010; Bossie-Codreanu, 2017; Debbabi et al., 2017; Galimberti, 2018).

Postoji nekoliko načina za opisivanje odnosa između gravitacijskog i viskoznog potencijala protoka, a u ovom radu se koristi sljedeći:

$$R_L = \frac{L}{H} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}} \quad (3-1)$$

Gdje su:

$R_L$  – omjer gravitacijskog i viskoznog potencijala protoka, [-];

$L$  – duljina ležišta, [m];

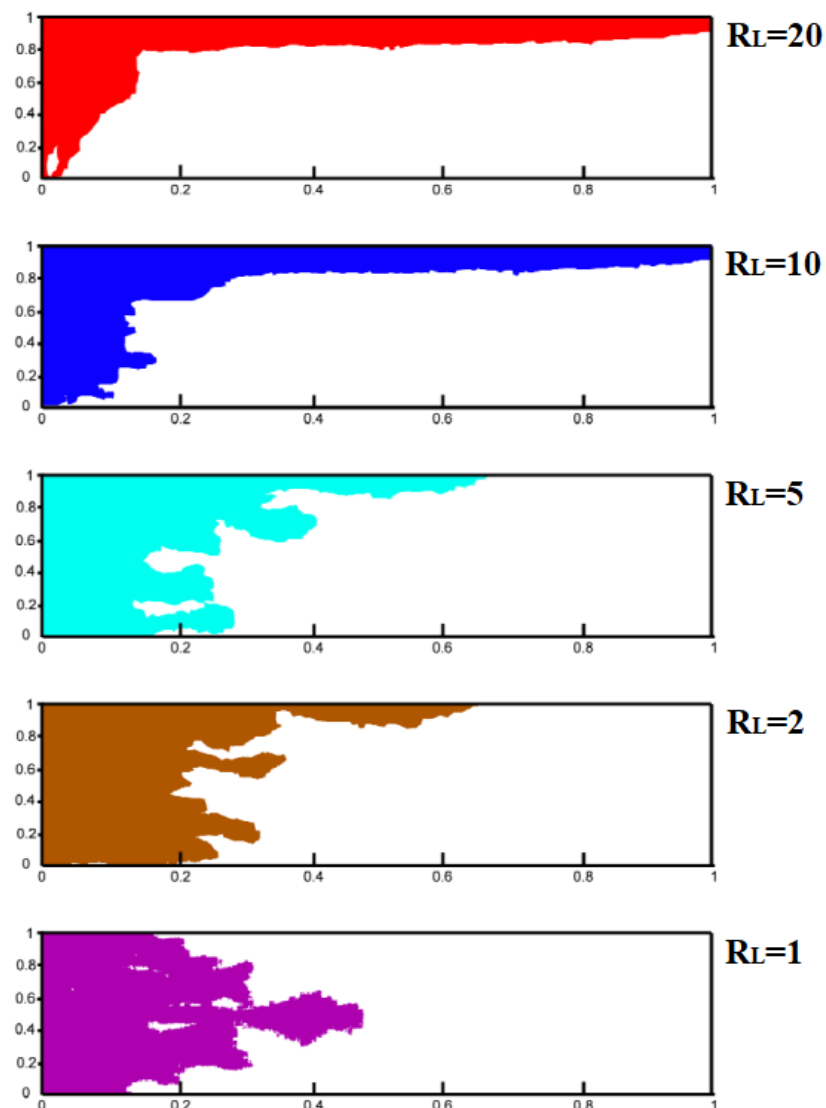
$H$  – debljina ležišta, [m];

$k_v$  – vertikalna propusnost ležišta, [ $(\mu\text{m})^2$ ];

$k_h$  – horizontalna propusnost ležišta, [ $(\mu\text{m})^2$ ].

Pri velikim iznosima  $R_L$  omjera, utjecaj vertikalnog protoka uzrokovanog gravitacijom je velik što dovodi do gravitacijske segregacije  $\text{CO}_2$  na vrhu ležišta. Smanjenjem njegove vrijednosti, dolazi do prstolikog prodiranja zbog djelovanja viskoznih sila, a smanjuje se utjecaj gravitacijskih sila (Slika 3-2).

Vrijednost  $R_L$  omjera znatno utječe na konačni iscrpak (Wood, 2006; Vulin, 2010; Yao i Ji, 2010). Njihov odnos je obrnuto proporcionalan, tj. povišeni  $R_L$  omjer umanjuje mogućí iscrpak iz ležišta. To se događa zato što nastala gravitacijska segregacija pri većim iznosima  $R_L$  omjera ima snažniji učinak na smanjenje koeficijenta obuhvata od prstolikog prodiranja koje nastaje pri nižim iznosima. Dakle, iako se oba procesa negativno odražavaju na rezidualno zasićenje i učinkovitost (Wood, 2006; Vulin, 2010; Lee i Kam, 2013), gravitacijska segregacija ima znatno veće posljedice (Johns et al, 1994).

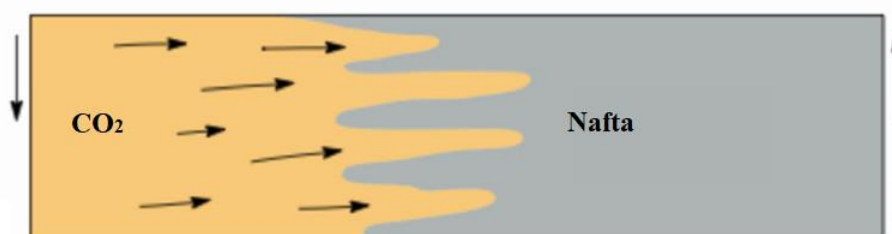


**Slika 3-2.** Ovisnost omjera gravitacijskog i viskoznog potencijala protoka te dubine i visine prodiranja (Vulin, 2010).

Djelovanje navedenih sila intenzivno je istraživano u radovima koji se bave problematikom opisanih pojava, a bezdimenzionalni pokazatelji obje sile su odabrani kao sljedeći parametri za karakterizaciju utiskivanja.

### 3.1.2. Omjer mobilnosti CO<sub>2</sub> i nafte

Već ranije je spomenuto kako će pri nemješivom istiskivanju doći do ranog prodora CO<sub>2</sub> zbog nepovoljnog omjera mobilnosti CO<sub>2</sub> i nafte. Pretjerana mobilnost CO<sub>2</sub> u odnosu na naftu također predstavlja problem i u mješivom procesu jer je upravo ona glavni činilac koji diktira stvaranje opisanog prstolikog prodiranja (Slika 3-3). U slučaju da nastane ovakvo stanje, u ležištu tada dolazi do nejednolike, neravnomjerne i nehomogene disperzije CO<sub>2</sub> što u konačnici rezultira manjim volumetrijskim koeficijentom obuhvata (Blackwell et al., 1959; Habermann, 1960; Holm, 1976; Stalkup, 1978; Orr et al., 1982; Stalkup, 1983; Holm, 1987; Al-Jarba i Al-Anazi, 2010; Gao et al., 2010; Lee i Kam, 2013; Bossie-Codreanu, 2017; Debbabi et al., 2017).



**Slika 3-3.** Nastalo prstoliko prodiranje CO<sub>2</sub> zbog njegove povećane mobilnosti u odnosu na naftu (Boait et al., 2015).

Formula za proračun omjera mobilnosti je:

$$M_g^o = \frac{k_{rg}\mu_o}{k_{ro}\mu_g} \quad (3-2)$$

Gdje su:

$M_g^o$  – omjer mobilnosti CO<sub>2</sub> i nafte, [-];

$k_{rg}$  – relativna propusnost za CO<sub>2</sub>, [-];

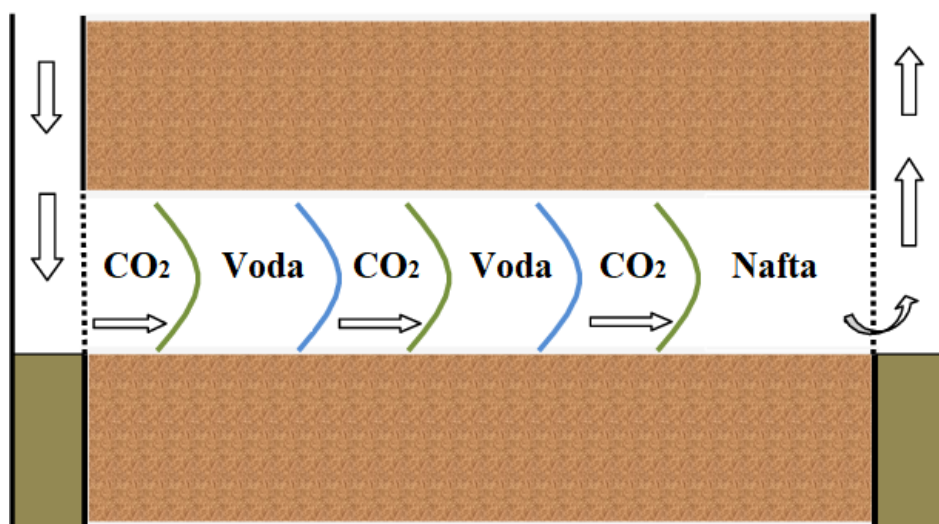
$k_{ro}$  – relativna propusnost za naftu, [-];

$\mu_o$  – viskoznost nafte, [mPa.s];

$\mu_g$  – viskoznost CO<sub>2</sub>, [mPa.s].

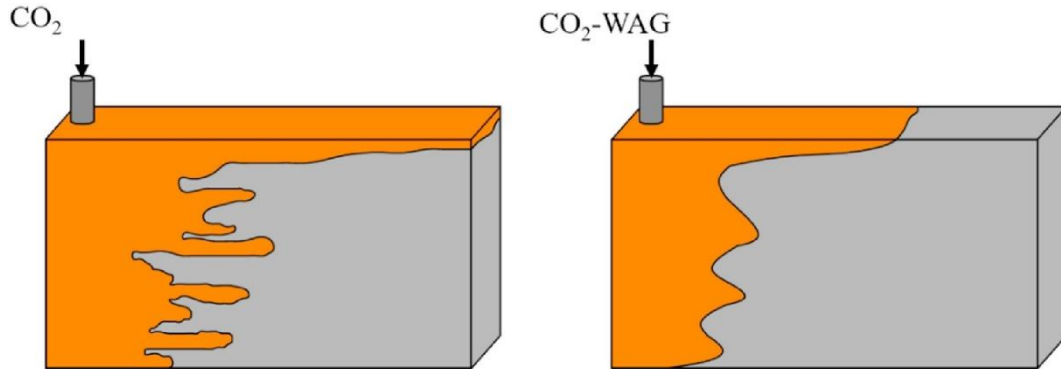
Iz jednadžbe se može lako zaključiti da je omjer mobilnosti CO<sub>2</sub> i nafte u većini uvjeta nepovoljan budući da je viskoznost CO<sub>2</sub> znatno manja od viskoznosti nafte. Iz ovog razloga, ležišta koja sadrže naftu relativno visoke viskoznosti nisu pogodna za istiskivanje korištenjem CO<sub>2</sub> (Habermann, 1960; Holm, 1976; Stalkup, 1978; Stalkup, 1983; Holm, 1987; Elgaghah et al., 2007; Al-Jarba i Al-Anazi, 2010; Gao et al., 2010).

Dakle, smanjenje koeficijenta mobilnosti ključan je čimbenik za razvoj uspješnog procesa utiskivanja. To se najčešće postiže naizmjeničnim utiskivanjem vode i CO<sub>2</sub> (engl. *Water Alternating Gas* – WAG, slika 3-4) te dodavanjem raznih polimera u utisni fluid s ciljem povećanja njegove viskoznosti (Caudle i Dyes, 1958; Orr et al., 1982; Holm, 1986; Holm i O'Brien, 1986; Lee i Kam, 2013; Etehadtavakkol et al., 2014; Galimberti, 2018; Massarweh i Abushaikha, 2021). Primjena CO<sub>2</sub>-WAG utiskivanja kombinira visoku volumetrijsku učinkovitost zavodnjavanja te poboljšane karakteristike istiskivanja zbog djelovanja CO<sub>2</sub> (Massarweh i Abushaikha, 2021). Time se nastoje objediniti prednosti oba procesa, a pozitivna pogodnost je i što se utiskivanjem vode dodatno povećava tlak u ležištu omogućavajući da njegova vrijednost bude veća od MMP-a (Zahoor et al., 2011; Arnaut, 2021; Massarweh i Abushaikha, 2021). No, WAG proces podrazumijeva trofazni protok za koji još uvijek nisu u potpunosti razjašnjene promjene u sastavu fluida koje se događaju prilikom takvog protjecanja (Holm, 1987; Arnaut, 2021).



**Slika 3-4.** Prikaz naizmjeničnog utiskivanja vode i CO<sub>2</sub> (Zahoor et al., 2011).

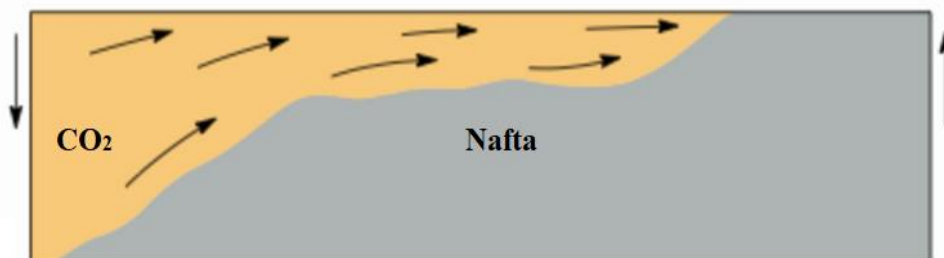
Iako se primjenom CO<sub>2</sub>-WAG procesa može umanjiti učinak viskoznog prodiranja, njim se ipak ne sprječava pojava gravitacijske segregacije koja je posljedica sile uzgona zbog razlika u gustoći između faza unutar ležišta (Slika 3-5).



**Slika 3-5.** Utjecaj WAG procesa na smanjenje prstolikog prodiranja CO<sub>2</sub> (Massarweh i Abushaikha, 2021).

### 3.1.3. *Bezdimenzionalna sila uzgona*

Osim nepovoljnih omjera viskoznosti, CO<sub>2</sub> i nafta također imaju osjetnu razliku u gustoćama. Ako je iznos razlike značajan, to uobičajeno dovodi do segregacije CO<sub>2</sub> pri vrhu formacije zbog pojačanog djelovanja sile uzgona (Slika 3-6). Slično kao i kod prstolikog prodiranja, gravitacijska segregacija će se nepovoljno odraziti na disperziju i obuhvat te će umanjiti konačni iscrpak (Holm; 1976; Stalkup, 1978; Espie et al, 2003; Wood, 2006; Bossie-Codreanu, 2017).



**Slika 3-6.** Gravitacijska segregacija CO<sub>2</sub> zbog razlike u njegovoj gustoći s naftom (Boait et al., 2015).

Bezdimenzionalna sila uzgona može se proračunati pomoću sljedeće relacije:

$$N_g^o = \frac{H\Delta\rho g \cos \alpha}{\Delta P} \quad (3-3)$$

Gdje su:

$N_g^o$  – bezdimenzionalna sila uzgona, [-];

H – debljina ležišta, [m];

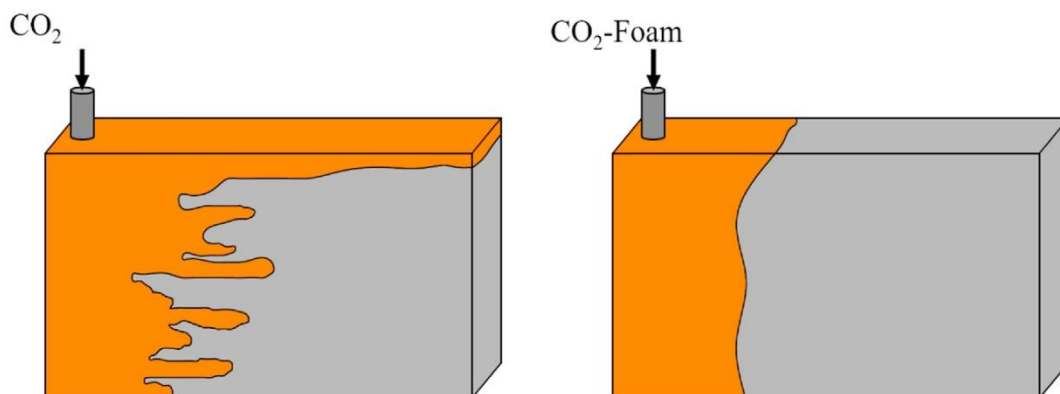
$\Delta\rho$  – razlika gustoće između nafte i CO<sub>2</sub>, [kg/m<sup>3</sup>];

g – gravitacijsko ubrzanje, [m<sup>2</sup>/s];

$\alpha$  – kut nagiba, [°];

$\Delta P$  – razlika utisnog i proizvodnog tlaka, [MPa].

Vidljivo je da će u debljim i nagnutim ležištima utjecaj uzgona biti povećan (Blackwell et al., 1959; Holm, 1982; Yin, 2015). Smanjenje njegova učinka može se umanjiti utiskivanjem CO<sub>2</sub> u obliku pjene (engl. *CO<sub>2</sub>-Foam*). Pjena je disperzija CO<sub>2</sub> unutar tekuće faze pripremljena i stabilizirana pomoću raznih surfaktanata. Njenom primjenom ne samo da se ublažava pojava gravitacijske segregacije, nego se to čini i za viskozno prodiranje unutar ležišta (Slika 3-7). Dakle, povećavanjem gustoće i viskoznosti pjena uzrokuje preusmjeravanje injektiranih fluida iz slojeva visoke propusnosti u one niske propusnosti, ali njena primjena je ponekad ograničena jer mnoge pjene nisu stabilne pri ležišnim uvjetima. Iz toga razloga, u pjenu se često dodaju razne nanočestice kako bi poboljšale njenu stabilnost (Massarweh i Abushaikha, 2021).



**Slika 3-7.** Utjecaj CO<sub>2</sub>-Foam procesa na smanjenje prstolikog prodiranja i gravitacijske segregacije CO<sub>2</sub> (Massarweh i Abushaikha, 2021).

#### 3.1.4. Zasićenje naftom

Zasićenje ležišta određenim fluidom definirano je kao dio pornog prostora zapunjenog tim fluidom. Zasićenje ležišta ugljikovodicima najvažniji je pokazatelj u gotovo svim projektiranjima razrade i iskorištavanja ležišta (Sečen, 2002). To se posebno odnosi na CO<sub>2</sub>-EOR projekt u kojem tehnički uspjeh u najjednostavnijem smislu ovisi o zasićenju ležišta naftom preostalom nakon primarnih i sekundarnih operacija te o učinkovitosti obuhvaćanja i istiskivanja te nafte (Pathak et al., 2011). Stoga je primjena rezidualnog zasićenja naftom neizbježna u gotovo svim analizama učinkovitosti.

Iznos početnog zasićenja naftom ( $S_{oi}$ ), može se mjeriti različitim rutinskim i posebnim analizama jezgre te ostalim laboratorijskim postupcima, ali češće se obavlja analizom karotažnih mjerenja. Razlog tome je što se jedan dio fluida može izgubiti iz jezgre tijekom njenog vađenja i transporta do laboratorija (Sečen, 2002; Pathak et al., 2011), a i u ležištu je početno zasićenje naftom posljedica niza ležišnih parametara, dok se u laboratoriju to svojstvo dobiva u kontroliranim uvjetima, čime je precizno određeno svojstvo jezgre (uzorka) stijene, a ne cijelog heterogenog ležišta.

Ovisnost zasićenja naftom o iscrpku je jasna i očigledan je nizak potencijal iskorištavanja iz ležišta s niskom zasićenošću naftom (Holm, 1976). Povećanje iscrpka nafte s povećanjem zasićenja pripisuje se činjenici da što je veće početno zasićenje naftom, to je veći udio mobilne nafte koja je preostala u ležištu nakon primarnih i sekundarnih metoda iskorištavanja i koja se može vrlo lako istisnuti iz ležišta (Wood, 2006). Isto tako CO<sub>2</sub> pri većim zasićenjima naftom lakše ostvaruje miješanje s njom (Elgaghah et al., 2007).

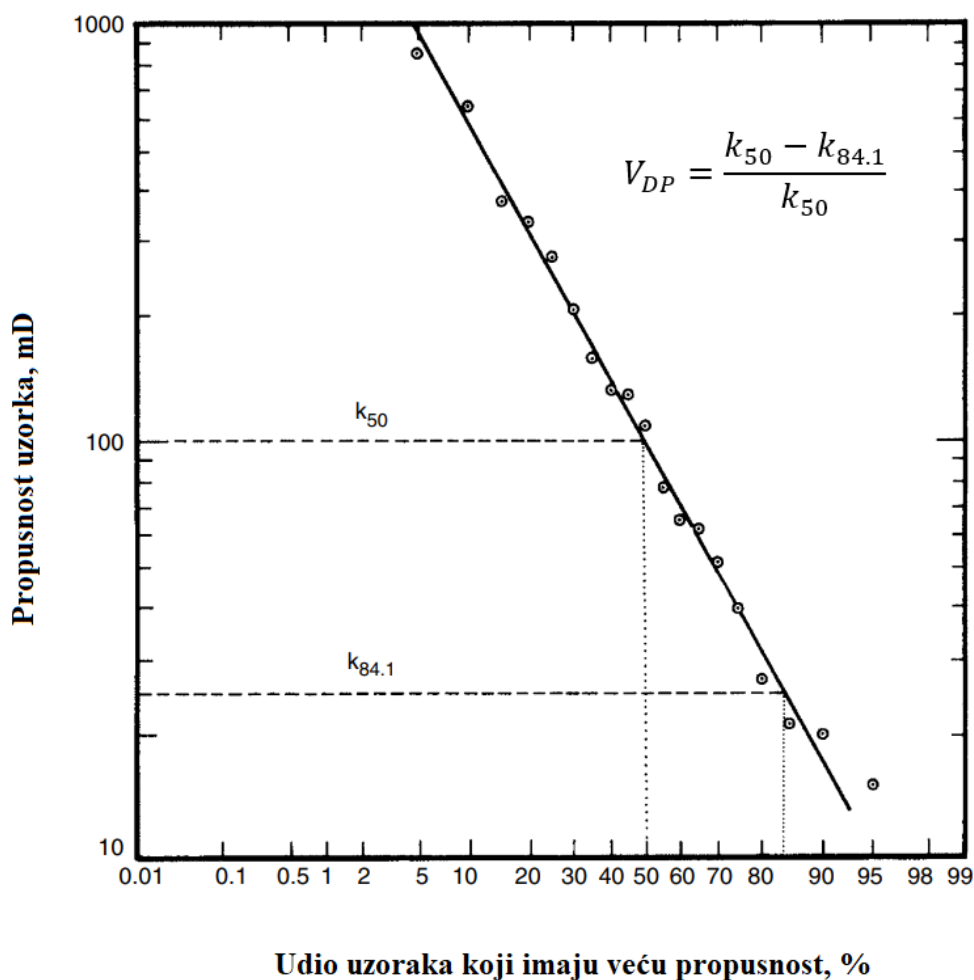
#### 3.1.5. Koeficijent heterogenosti ležišta

Jedan od najbitnijih ležišnih parametara jest heterogenost. Heterogenost se definira kao promjenjivost nekog svojstva (poroznost, propusnost) u različitim točkama unutar ležišta. U stvarnosti je gotovo svaka stijena heterogena pa pretpostavka homogenosti uz dodjeljivanje iste vrijednosti određene na temelju pojedinačnog mjerenja svim blokovima ležišta predstavlja vrlo neadekvatan set ulaznih podataka. Takvi se podaci radije mogu procijeniti već spomenutim geostatističkim metodama na osnovu višebrojnih mjerenja. Njihova mjera raspršenosti može se dobiti proračunavanjem varijance, a to može poslužiti kao kvantifikacija heterogenosti (Vulin, 2010).



Dykstra i Parsons (1950) objavili su u svom radu postupak određivanja koeficijenta varijacije propusnosti koji je utemeljen na pretpostavci da podaci o propusnosti mogu biti pretpostavljeni log-normalnom raspodjelom (Lyons, 2010; Vulin, 2010). Postupak određivanja može biti grafoanalitički (Slika 3-8, Lyons, 2010):

1. osigurati da su uzorci iz analize jezgre jednake debljine (često 1 ft);
2. rasporediti propusnosti uzoraka u padajućem redosljedju od najviše do najniže;
3. izračunati za svaki uzorak udio uzoraka koji imaju veću propusnost;
4. prikazati log-normalnu ovisnost propusnosti i dijela uzoraka s većom propusnošću;
5. odrediti propusnost uzorka ako 50% uzoraka ima veću propusnost od njega,  $k_{50}$ ;
6. odrediti propusnost uzorka ako 84,1% uzoraka ima veću propusnost od njega,  $k_{84,1}$ ;
7. proračunati koeficijent varijacije propusnosti,  $V_{DP}$ , primjenom formule.



**Slika 3-8.** Log-normalna ovisnost propusnosti uzorka o udjelu uzoraka s većom propusnošću (Lyons, 2010).

Primjena ove metoda prepoznata je kao nesavršena jer podaci ne moraju imati log-normalnu raspodjelu te jer u obzir nije uzeta i poroznost koja je funkcionalno povezana s propusnošću (Vulin, 2010; Bossie-Codreanu, 2017). Dodatan problem stvara subjektivnost grafoanalitičke metode, a sve to dovodi do raznih modifikacija u postupcima određivanja heterogenosti. Upravo to su napravili i Yao i Ji (2010) koji su umjesto koeficijenta heterogenosti uveli koeficijent homogenosti kao njegovu recipročnu vrijednost te su formulaciju još dodatno nadopunili na sljedeći način:

$$\sigma_R = \frac{A_i \sqrt{H_i}}{V_{DP} \ln k_i} \quad (3-5)$$

Gdje su:

$\sigma_R$  – koeficijent homogenosti ležišta, [-];

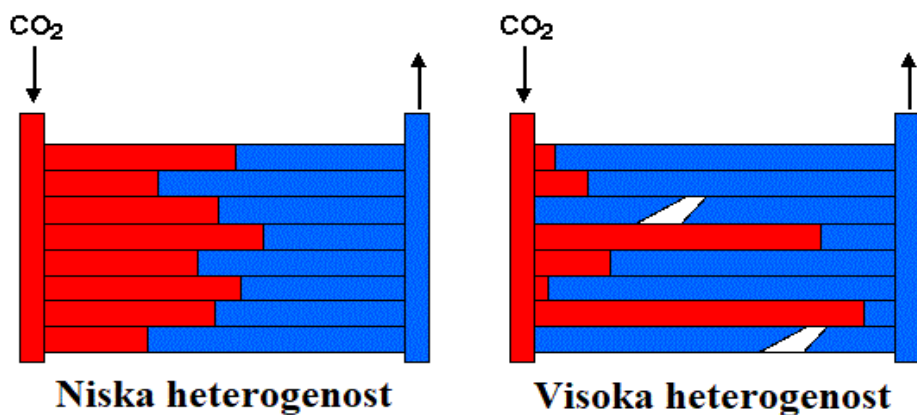
$A_i$  – hidrodinamička komunikacija u vodoravnom smjeru, [-];

$H_i$  – omjer efektivne i ukupne debljine ležišta, [-];

$V_{DP}$  – koeficijent varijacije propusnosti, [-];

$k_i$  – omjer maksimalne i minimalne propusnosti, [-].

Kao i kod procesa zavodnjavanja, treba izbjegavati ležišta povećane heterogenosti jer ona uzrokuje neravnomjeran tok fronte utisnutog fluida (Slika 3-9), a time i nepravilnu disperziju te smanjenje obuhvata ležišta (Holm, 1982; Al-Jarba i Al-Anazi, 2010; Gao et al., 2010). Štoviše, mnoga istraživanja su pokazala kako je istiskivanje nafte utiskivanjem plinova osjetljivije na heterogenost nego zavodnjavanje (Vulin, 2010).



**Slika 3-9.** Utjecaj heterogenosti na širenje fronte CO<sub>2</sub> (Melzer, 2008).

### 3.1.6. Relativni udio sloja visoke propusnosti

Relativni udio sloja visoke propusnosti je parametar koji pokazuje njegovu zastupljenost u ukupnoj debljini ležišta. Određuje se na sljedeći način:

$$H_D = \frac{h_i}{H} \quad (3-6)$$

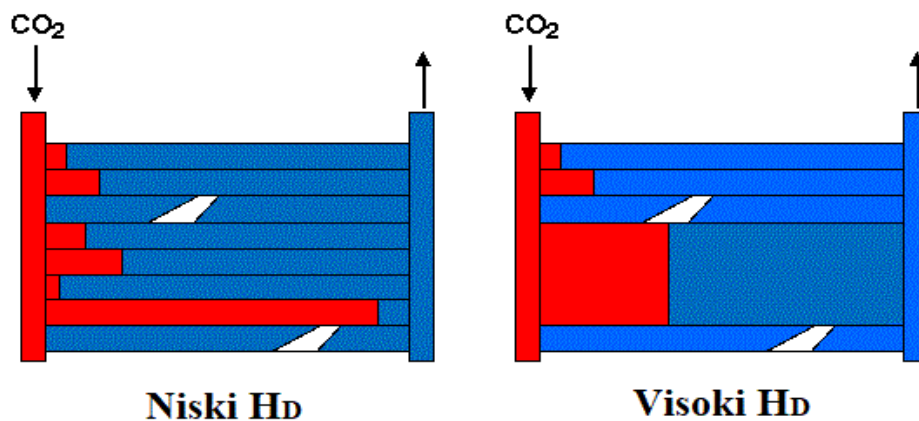
Gdje su:

$H_D$  – relativni udio sloja visoke propusnosti, [-];

$h_i$  – debljina sloja visoke propusnosti, [m];

$H$  – debljina ležišta, [m].

Njegova vrijednost je zapravo još jedan dodatan pokazatelj heterogenosti, tj. homogenosti. Kada je relativni udio sloja visoke propusnosti u ukupnoj debljini ležišta veći, može se zaključiti da je ležište homogenije jer najpropusniji sloj zauzima veći dio ležišta što uzrokuje ujednačeniju frontu širenja  $\text{CO}_2$  (Slika 3-10).



**Slika 3-10.** Utjecaj relativnog udjela sloja visoke propusnosti na širenje fronte  $\text{CO}_2$  (Melzer, 2008).

### 3.1.7. *Bezdimenzionalni tlak utiskivanja*

Da bi se dobio bezdimenzionalni tlak utiskivanja, iznos tlaka utiskivanja potrebno je podijeliti s parametrom koji ima istu mjernu jedinicu. Za potrebe ovog rada odabrano je da taj parametar bude minimalni tlak miješanja pa se bezdimenzionalni tlak utiskivanja dobiva na sljedeći način:

$$P_{injD} = \frac{P_{inj} - P_{MM}}{P_{MM}} \quad (3-7)$$

Gdje su:

$P_{injD}$  – bezdimenzionalni tlak utiskivanja, [-];

$P_{inj}$  – tlak utiskivanja, [MPa];

$P_{MM}$  – minimalni tlak miješanja, [MPa].

Budući da tlak utiskivanja utječe na ukupni tlak u ležištu, očekivan je pozitivan učinak povećanja utisnog tlaka na učinkovitost procesa zbog lakšeg dostizanja minimalnog tlaka miješanja. Međutim, treba napomenuti da nakon što se navedeni tlak dosegne, iscrpak se nastoji izravnati te dodatno povećanje tlaka utiskivanja neće imati značajniji utjecaj na povećanje iscrpka, a troškovi mogu porasti višestruko (Wood, 2016).

### 3.1.8. *Bezdimenzionalni proizvodni tlak*

Kao i kod prethodnog parametra, proizvodni tlak potrebno je umanjiti od minimalnog tlaka miješanja te dobivenu razliku podijeliti s minimalnim tlakom miješanja da bi se dobio bezdimenzionalni proizvodni tlak:

$$P_{pD} = \frac{P_p - P_{MM}}{P_{MM}} \quad (3-8)$$

Gdje su:

$P_{pD}$  – bezdimenzionalni proizvodni tlak, [-];

$P_p$  – proizvodni tlak, [MPa];

$P_{MM}$  – minimalni tlak miješanja, [MPa].

Smanjenje proizvodnog tlaka s ciljem ostvarivanja veće depresije uzrokovat će veći protoka unutar ležišta. Ako je protok dovoljno velik, povećat će se djelovanje viskoznih sila i prstoliko probijanje će biti izraženije (Vulin, 2010). Iz ovoga razloga poželjno je imati proizvodni tlak dostatne vrijednosti kako bi se smanjila pojava viskoznog prodora.

### 3.1.9. *Bezdimenzionalni tlak ležišta*

I u slučaju ovog parametra potrebno je pri određivanju postupiti na isti način kao i kod prethodna dva parametra:

$$P_{eD} = \frac{P_e - P_{MM}}{P_{MM}} \quad (3-9)$$

Gdje su:

$P_{eD}$  – bezdimenzionalni tlak ležišta, [-];

$P_e$  – tlak ležišta, [MPa];

$P_{MM}$  – minimalni tlak miješanja, [MPa].

Poželjno je da njegova vrijednost bude što veća radi lakšeg postizanja mješivih uvjeta doseganjem minimalnog tlaka miješanja.

### 3.1.10. *Relativna veličina vodonosnika*

Posljednji parametar koji će se koristiti prilikom analize učinkovitosti je relativna veličina vodonosnika. Njegov iznos određuje se primjenom sljedeće formule:

$$N_D = \frac{V_w}{V_\phi} \quad (3-10)$$

Gdje su:

$N_D$  – relativna veličina vodonosnika, [-];

$V_w$  – volumen slojne vode unutar ležišta, [m<sup>3</sup>];

$V_\phi$  – porni volumen ležišta, [m<sup>3</sup>].

Širenje vode iz podinskog akvifera potiskivat će naftu prema proizvodnim bušotinama. Ako je akvifer velikih dimenzija i sadrži dovoljno potisne energije, tada se može proizvesti gotovo sva pokretljiva nafta bez značajnijeg sniženja tlaka. Kada je akvifer manjih dimenzija i ne može u potpunosti nadomještavati proizvedene količine nafte, tlak u ležištu će se smanjivati (Sečen, 2002).

### 3.2. Planiranje pokusa

Objašnjeni parametri iskorišteni su za planiranje niza eksperimenata u kojima se mijenjanjem njihove veličine dobivaju različiti iznosi iscrpka i utilizacijskog koeficijenta ovisno o vrijednosti odabranih parametara (Tablica 3-2).

**Tablica 3-2.** Raspon vrijednosti odabranih parametara za analizu (Yao i Ji, 2010).

Faktor	Vrijednost		
	Niska	Srednja	Visoka
$R_L$	0,499	2,23	3,525
$M_g^\circ$	25	37,5	50
$N_g^\circ$	0,097	0,165	0,23
$S_{oi}$	0,3	0,5	0,7
$H_D$	0,1	0,5	0,9
$\sigma_R$	0,89	60,77	102,4
$P_{injD}$	-0,1	0,2	0,5
$P_{pD}$	-0,5	-0,2	0,1
$P_{eD}$	-0,3	0	0,3
$N_D$	0	5	10

Vrijednosti svih bezdimenzionalnih parametara normalizirane su tako da se njihov iznos kreće u rasponu od -1 do 1 te su takve vrijednosti korištene za provedbu eksperimenata (Tablica 3-3).

**Tablica 3-3.** Raspon vrijednosti korišten prilikom izvedbi pokusa (Yao i Ji, 2010).

Faktor	Vrijednost		
	Niska	Srednja	Visoka
<b>R<sub>L</sub></b>	-1	0	1
<b>M<sub>g</sub><sup>°</sup></b>	-1	0	1
<b>N<sub>g</sub><sup>°</sup></b>	-1	0	1
<b>S<sub>oi</sub></b>	-1	0	1
<b>H<sub>D</sub></b>	-1	0	1
<b>σ<sub>R</sub></b>	-1	0	1
<b>P<sub>injD</sub></b>	-1	0	1
<b>P<sub>pD</sub></b>	-1	0	1
<b>P<sub>eD</sub></b>	-1	0	1
<b>N<sub>D</sub></b>	-1	0	1

Za normalizaciju se koristi sljedeća formula:

$$x_{norm} = 2 \times \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} - 1 \quad (3-11)$$

Gdje je:

$x_{norm}$  – normalizirana vrijednost parametra;

$x$  – iznos parametra čiju vrijednost treba normalizirati;

$\min(x)$  – minimum parametra čiju vrijednost treba normalizirati;

$\max(x)$  – maksimum parametra čiju vrijednost treba normalizirati.

Za planiranje pokusa korišten je Box-Behnken eksperimentalni dizajn jer je učinkovitiji te zahtijeva manji broj eksperimenata u usporedbi s drugim dizajnima (Yao i Ji, 2010). U tablici 3-4 prikazani su svi potrebni eksperimenti, a vidljivo je da svaki redak predstavlja varijacije s ponavljanjem te stoga sadrži 16 eksperimenata. Time dolazimo do podatka da je za provedbu dizajna potrebno minimalno 160 eksperimenata, a u svom radu Yao i Ji (2010) na taj broj nadodali su još dodatnih 60 eksperimenata kako bi dobili širi raspon podataka.

**Tablica 3-4.** Prikaz svih potrebnih eksperimenata za provedbu Box-Behnken eksperimentalnog dizajna.

<b>R<sub>L</sub></b>	<b>M<sub>g</sub><sup>o</sup></b>	<b>N<sub>g</sub><sup>o</sup></b>	<b>S<sub>oi</sub></b>	<b>H<sub>D</sub></b>	<b>σ<sub>R</sub></b>	<b>P<sub>injD</sub></b>	<b>P<sub>pD</sub></b>	<b>P<sub>eD</sub></b>	<b>N<sub>D</sub></b>
0	±1	0	0	0	±1	±1	0	0	±1
±1	±1	0	0	±1	0	0	0	0	±1
0	±1	±1	0	0	0	±1	±1	0	0
0	±1	0	±1	0	±1	0	0	±1	0
±1	0	0	0	0	0	0	±1	±1	±1
0	0	±1	±1	±1	0	0	0	0	±1
±1	0	0	±1	0	0	±1	±1	0	0
0	0	±1	0	±1	0	±1	0	±1	0
±1	0	±1	0	0	±1	0	0	±1	0
0	0	0	±1	±1	±1	0	±1	0	0

### 3.3. Numerička simulacija

Na osnovu eksperimentalnih točaka dobivenih eksperimentalnim dizajnom, provedene su numeričke simulacije primjenom Schlumberger ECLIPSE PVTi računalnog programa.

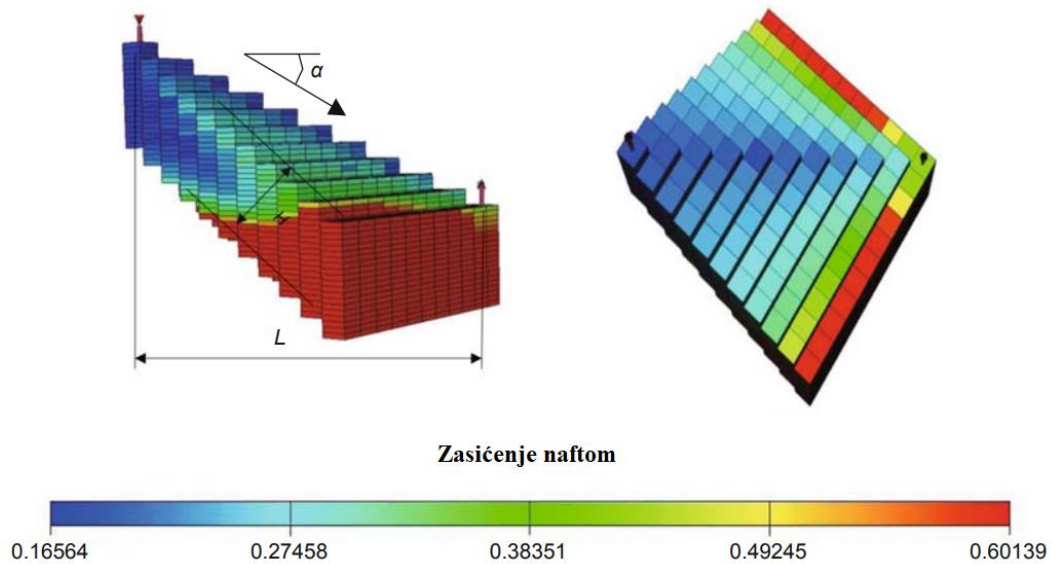
Sastav nafte korišten prilikom simulacija je prikazan u tablici 3-5.

**Tablica 3-5.** Sastav nafte korišten prilikom simulacija (Yao i Ji, 2010).

<b>Komponenta</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>C<sub>1</sub></b>	<b>C<sub>2</sub></b>	<b>C<sub>3+4</sub></b>	<b>C<sub>5+6</sub></b>	<b>C<sub>7-C<sub>19</sub></sub></b>	<b>C<sub>19-C<sub>35</sub></sub></b>	<b>C<sub>35+</sub></b>
<b>Udio, %</b>	0,3	2,0	16,7	5,9	5,5	4,0	37,9	20,4	7,3



Korišteni geološki model je nehomogeno, trodimenzionalno, kartezijansko ležište pod određenim nagibom, a za utiskivanje je usvojena simetrična mreža bušotina s pet točaka (engl. *five-spot pattern*). Ležište je podijeljeno na 2420 blokova, tj. na 11 blokova u smjeru obje horizontalne osi te na 20 blokova u smjeru vertikalne osi (Slika 3-11)



**Slika 3-11.** Geološki model korišten prilikom simulacija (Yao i Ji, 2010).

#### 3.4. Statističko modeliranje

Podaci dobiveni numeričkim simulacijama zatim se statistički modeliraju kako bi se kvantitativno analizirao utjecajni odnos između dobivenih vrijednosti i neovisnih varijabli. Za to su generirane različite odzivne površine (engl. *response surface*) s ciljem pronalaska one koja bi najbolje odgovarala rezultatima provedenih simulacija, a analiza pogrešaka je pokazala da se rezultati najbolje mogu aproksimirati kvadratnim modelom. Na osnovu kvadratnog modela te korištenjem metode najmanjih kvadrata dobivene su sljedeće dvije jednadžbe za iscrpak i utilizacijski faktor:

$$\begin{aligned}
R = & 0,4234 - 0,024R_L - 0,04341M_g^\circ - 0,059N_g^\circ + 0,1222S_{oi} + 0,0254H_D + \\
& 0,0663\sigma_R + 0,034P_{injD} + 0,01663P_{pD} + 0,0765P_{eD} + 0,0503N_D - 0,0036R_LM_g^\circ + \\
& 0,000767R_LN_g^\circ - 0,00602R_LS_{oi} + 0,00131R_LH_D - 0,00386R_L\sigma_R + 0,00986R_LP_{injD} - \\
& 0,01006R_LP_{pD} + 0,001554R_LP_{eD} - 0,00196R_LN_D + 0,0309M_g^\circ N_g^\circ - 0,00633M_g^\circ S_{oi} + \\
& 0,0127M_g^\circ H_D + 0,0371M_g^\circ \sigma_R + 0,04881M_g^\circ P_{injD} - 0,04848M_g^\circ P_{pD} + 0,01093M_g^\circ P_{eD} - \\
& 5 \times 10^{-6}M_g^\circ N_D + 0,0224N_g^\circ S_{oi} + 0,00607N_g^\circ H_D - 0,01481N_g^\circ \sigma_R + 0,00368N_g^\circ P_{injD} - \\
& 0,00805N_g^\circ P_{pD} - 0,00317N_g^\circ P_{eD} - 0,00059N_g^\circ N_D + 0,00522S_{oi}H_D - 0,00212S_{oi}\sigma_R + \\
& 0,00288S_{oi}P_{injD} + 0,0149S_{oi}P_{pD} + 0,0181S_{oi}P_{eD} + 0,00038S_{oi}N_D - 0,04451H_D\sigma_R + \\
& 0,0053H_DP_{injD} - 0,00465H_DP_{pD} + 0,003344H_DP_{eD} + 0,000118H_DN_D + \\
& 0,0357\sigma_R P_{injD} - 0,0318\sigma_R P_{pD} + 0,01138\sigma_R P_{eD} - 0,0007\sigma_R N_D - 0,03043P_{injD}P_{pD} + \\
& 0,00274P_{injD}P_{eD} - 0,00039P_{injD}N_D - 0,00345P_{pD}P_{eD} - 0,00058P_{pD}N_D + \\
& 0,000926P_{eD}N_D + 0,004R_L^2 + 0,00407M_g^{\circ 2} - 0,0234N_g^{\circ 2} - 0,0141S_{oi}^2 - \\
& 0,00751H_D^2 + 0,0129\sigma_R^2 + 0,000132P_{injD}^2 + 0,000326P_{pD}^2 + 0,0359P_{eD}^2 - \\
& 0,00727N_D^2
\end{aligned}
\tag{3-12}$$

$$\begin{aligned}
R_{CO_2} = & 2,018 - 0,087R_L + 0,088M_g^\circ + 0,052N_g^\circ - 1,186S_{oi} + 0,028H_D + 0,034\sigma_R + \\
& 0,047P_{injD} + 0,082P_{pD} + 0,373P_{eD} + 0,119N_D - 0,0043R_LM_g^\circ - 0,02R_LN_g^\circ + \\
& 0,185R_LS_{oi} + 0,0092R_LH_D - 0,029R_L\sigma_R + 0,0083R_LP_{injD} - 0,0062R_LP_{pD} - \\
& 0,027R_LP_{eD} + 0,0033R_LN_D - 0,016M_g^\circ N_g^\circ - 0,188M_g^\circ S_{oi} - 0,0014M_g^\circ H_D - \\
& 0,049M_g^\circ \sigma_R - 0,16M_g^\circ P_{injD} + 0,163M_g^\circ P_{pD} + 0,0096M_g^\circ P_{eD} + 0,0011M_g^\circ N_D - \\
& 0,197N_g^\circ S_{oi} + 0,032N_g^\circ H_D - 0,0094N_g^\circ \sigma_R - 0,125N_g^\circ P_{injD} + 0,129N_g^\circ P_{pD} + \\
& 0,00057N_g^\circ P_{eD} - 0,0056N_g^\circ N_D - 0,151S_{oi}H_D + 0,394S_{oi}\sigma_R + 0,148S_{oi}P_{injD} - \\
& 0,152S_{oi}P_{pD} - 0,232S_{oi}P_{eD} - 0,0082S_{oi}N_D + 0,0076H_D\sigma_R + 0,019H_DP_{injD} - \\
& 0,018H_DP_{pD} + 2,53 \times 10^{-5}H_DP_{eD} + 0,0003H_DN_D + 0,074\sigma_R P_{injD} - 0,075\sigma_R P_{pD} + \\
& 0,004\sigma_R P_{eD} - 0,0029\sigma_R N_D - 0,073P_{injD}P_{pD} - 0,021P_{injD}P_{eD} + 0,0099P_{injD}N_D + \\
& 0,002P_{pD}P_{eD} - 0,0049P_{pD}N_D - 0,001P_{eD}N_D - 0,034R_L^2 - 0,044M_g^{\circ 2} - 0,066N_g^{\circ 2} + \\
& 0,494S_{oi}^2 + 0,034H_D^2 + 0,0091\sigma_R^2 - 0,0028P_{injD}^2 - 0,0007P_{pD}^2 - 0,064P_{eD}^2 + \\
& 0,053N_D^2
\end{aligned}
\tag{3-13}$$

Na slici 3.1. prikazano je kako se nakon statističkog modeliranja može pristupiti ponovnoj analizi parametara. To je napravljeno i u ovome slučaju te je pomoću Stat-Ease Design-Expert računalnog programa provedena analiza varijance (engl. *analysis of variance* – ANOVA) utjecajnih parametara s ciljem izbacivanja neutjecajnih parametara iz jednadžbi kako bi se omogućila brža procjena te su dobivene pojednostavljene jednadžbe:

$$\begin{aligned}
 R = & 0,4259 - 0,02R_L - 0,03541M_g^\circ - 0,05854N_g^\circ + 0,1278S_{oi} + 0,02447H_D + \\
 & 0,068\sigma_R + 0,03307P_{injD} + 0,01481P_{pD} + 0,0849P_{eD} + 0,0497N_D + \\
 & 0,01608M_g^\circ P_{injD} + 0,01482M_g^\circ P_{pD} + 0,027S_{oi}P_{eD} - 0,04415H_D\sigma_R + 0,04048\sigma_R P_{injD} - \\
 & 0,02521\sigma_R P_{pD} - 0,01159P_{injD}P_{pD} - 0,02467N_g^{\circ 2} - 0,01488S_{oi}^2 - 0,03675P_{eD}^2
 \end{aligned}
 \tag{3-14}$$

$$\begin{aligned}
 R_{CO_2} = & 2,01 - 0,093R_L + 0,073M_g^\circ + 0,0057N_g^\circ - 1,16S_{oi} + 0,053H_D + 0,06\sigma_R - \\
 & 0,32P_{injD} + 0,18P_{pD} + 0,35P_{eD} + 0,12N_D - 0,16M_g^\circ P_{injD} + 0,17M_g^\circ P_{pD} - 0,2N_g^\circ S_{oi} + \\
 & 0,39S_{oi}\sigma_R + 0,15S_{oi}P_{injD} - 0,15S_{oi}P_{pD} - 0,23S_{oi}P_{eD} - 0,14P_{injD}P_{pD} + 0,5S_{oi}^2
 \end{aligned}
 \tag{3-15}$$

Uspoređivanjem vrijednosti dobivenih iz pojednostavljenih jednadžbi s rezultatima numeričke simulacije, dolazi se do zaključka da jednadžbe dobro prate rezultate numeričke simulacije pa se mogu upotrijebiti za procjenu iscrpka i potencijala skladištenja CO<sub>2</sub>.

#### 4. PRIMJER PRORAČUNA

U nastavku je dan primjer proračuna za eksploatacijsko polje Lipovljani na osnovu ulaznih parametara (Tablica 4-1).

**Tablica 4-1.** Ulazni parametri potrebni za proračun.

<b>L</b>	1250	m
<b>H</b>	125	m
<b>k<sub>v</sub></b>	0,02	( $\mu\text{m}$ ) <sup>2</sup>
<b>k<sub>h</sub></b>	0,2	( $\mu\text{m}$ ) <sup>2</sup>
<b>k<sub>rg</sub></b>	0,04	-
<b>k<sub>ro</sub></b>	0,31	-
<b><math>\mu_g</math></b>	0,038	mPa.s
<b><math>\mu_o</math></b>	10	mPa.s
<b><math>\Delta\rho</math></b>	159	kg/m <sup>3</sup>
<b>g</b>	9,81	m/s <sup>2</sup>
<b><math>\alpha</math></b>	0	°
<b><math>\Delta P</math></b>	1,675	MPa
<b>A<sub>i</sub></b>	250	-
<b>H<sub>i</sub></b>	0,5	-
<b>V<sub>DP</sub></b>	0,9949	-
<b>K<sub>i</sub></b>	195,5238	-
<b>h<sub>i</sub></b>	62,5	m
<b>P<sub>inj</sub></b>	16,75	MPa
<b>P<sub>MM</sub></b>	14,7	MPa
<b>P<sub>p</sub></b>	15,075	MPa
<b>P<sub>e</sub></b>	16	MPa
<b>V<sub>w</sub></b>	9474636	m <sup>3</sup>
<b>V<sub><math>\phi</math></sub></b>	37898545	m <sup>3</sup>

Na temelju ulaznih parametara izračunati su bezdimenzionalni parametri koji se koriste u jednadžbama te je njihova vrijednost normalizirana (Tablica 4-2).

**Tablica 4-2.** Bezdimenzionalni parametri korišteni u jednadžbama.

	<b>10 PARAMETARA</b>	<b>10 PARAMETARA (NORMALIZIRANO)</b>
<b>R<sub>L</sub></b>	3,16	0,76
<b>M<sub>g</sub><sup>o</sup></b>	33,96	-0,28
<b>N<sub>g</sub><sup>o</sup></b>	0,12	-0,71
<b>S<sub>oi</sub></b>	0,45	-0,25
<b>σ<sub>R</sub></b>	33,68	-0,35
<b>H<sub>D</sub></b>	0,50	0,00
<b>P<sub>injD</sub></b>	0,14	-0,21
<b>P<sub>pD</sub></b>	0,02	0,75
<b>P<sub>eD</sub></b>	0,09	0,29
<b>N<sub>D</sub></b>	0,25	-0,95

Nakon što su parametri normalizirani, mogu se njihovim uvrštavanjem u jednadžbe dobiti iznosi iscrpka i utilizacijskog faktora (Tablica 4-3).

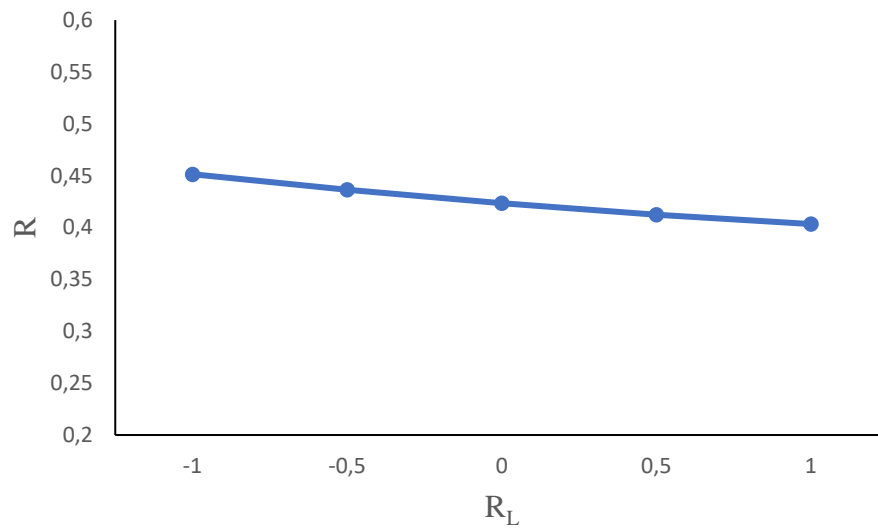
**Tablica 4-3.** Rezultati proračuna.

	<b>STVARNA JEDNADŽBA</b>	<b>POJEDNOSTAVLJENA JEDNADŽBA</b>
<b>R</b>	0,407	0,379
<b>R<sub>CO<sub>2</sub></sub></b>	2,1 t/m <sup>3</sup>	2,4 t/m <sup>3</sup>

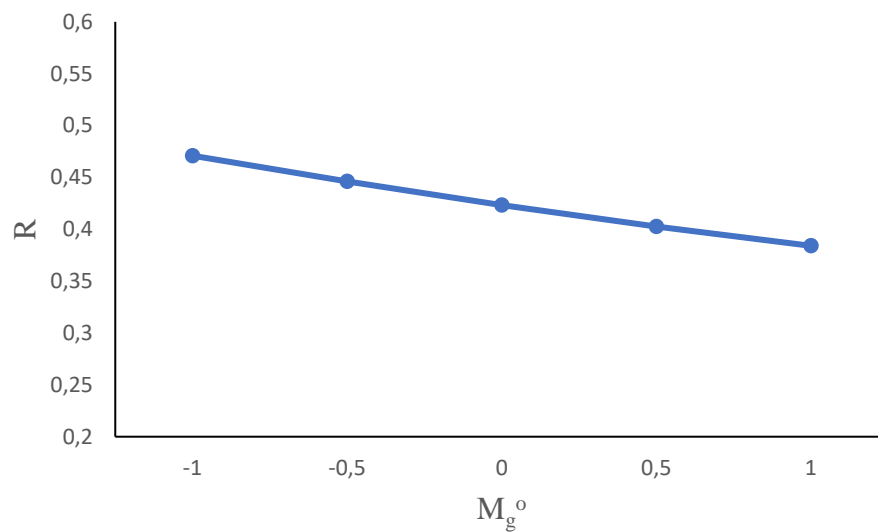
Dobiveni podaci mogu se upotrijebiti za donošenje odluke o provedbi projekta na temelju njegove isplativosti. Pri tome u obzir treba uzeti da su ovakve metode vrlo često nepouzdanе zbog značajne nesigurnost koja postoji u mnogim procjenama, a koja nastaje zbog raznih ograničenja i pretpostavki koje ovakve metode implementiraju.

## 5. ANALIZA OSJETLJIVOSTI

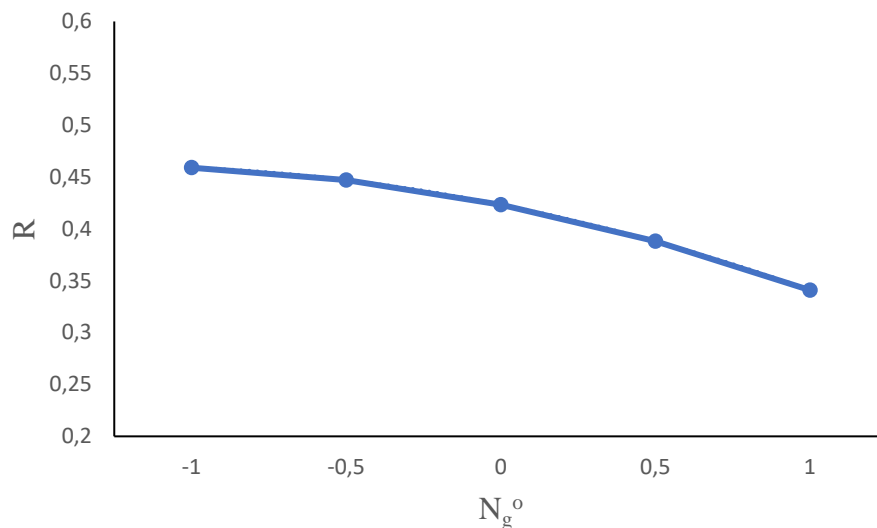
U ovom poglavlju prikazana je ovisnost iscrpka o kretanju svakog parametra korištenog za analizu.



Slika 5-1. Utjecaj  $R_L$  parametra na iscrpak.

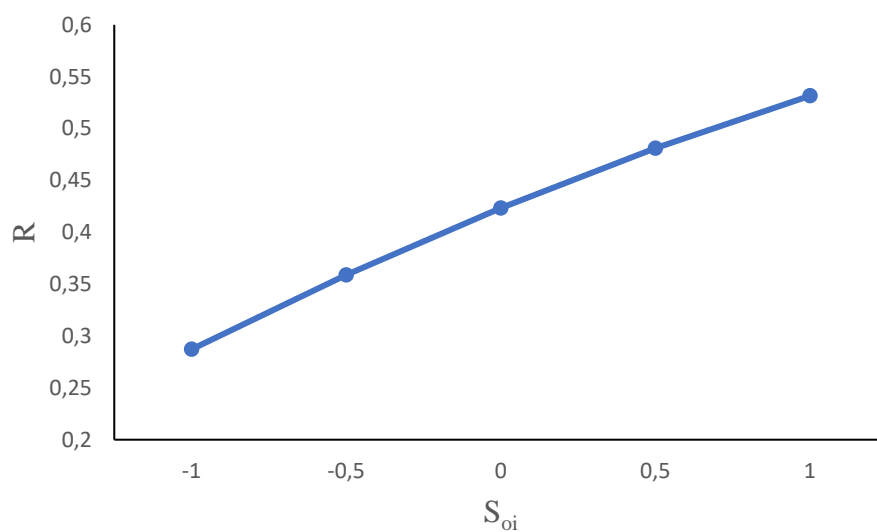


Slika 5-2. Utjecaj  $M_g^o$  parametra na iscrpak.



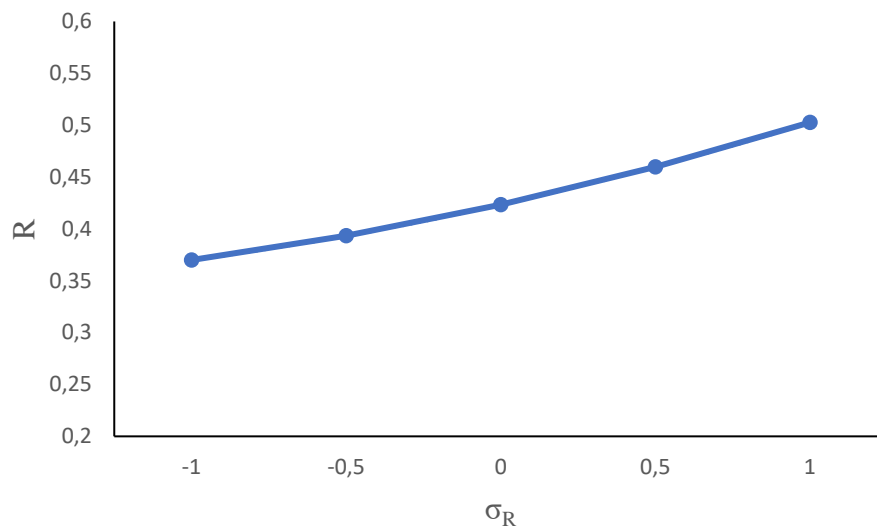
**Slika 5-3.** Utjecaj  $N_g^o$  parametra na iscrpak.

Prva tri grafa potvrđuju tvrdnje navedene u poglavlju o analizi parametara. Vidljivo je da i gravitacijska segregacija i viskozni prodor imaju negativan utjecaj na iscrpak, ali je djelovanje gravitacijske segregacije nešto utjecajnije.

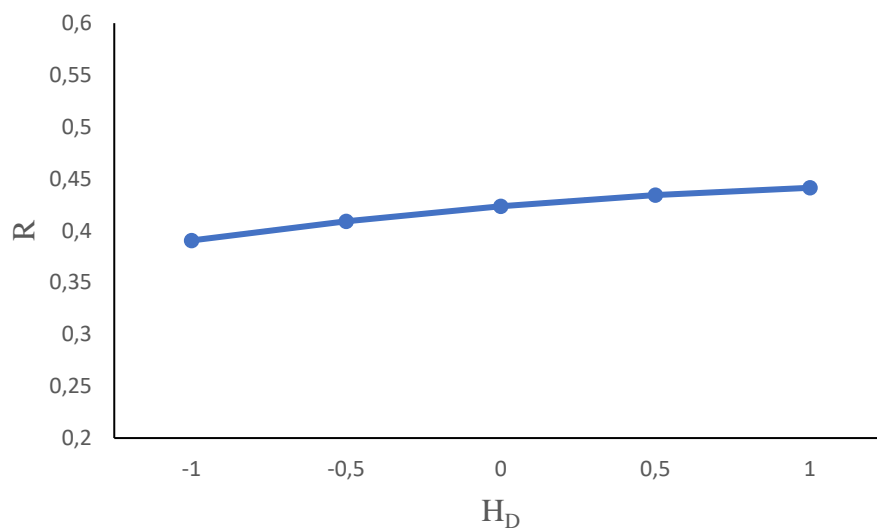


**Slika 5-4.** Utjecaj  $S_{oi}$  parametra na iscrpak.

Uočljivo je da je utjecaj  $S_{oi}$  parametra izniman. To je parametar koji ima najveći utjecaj na iscrpak.



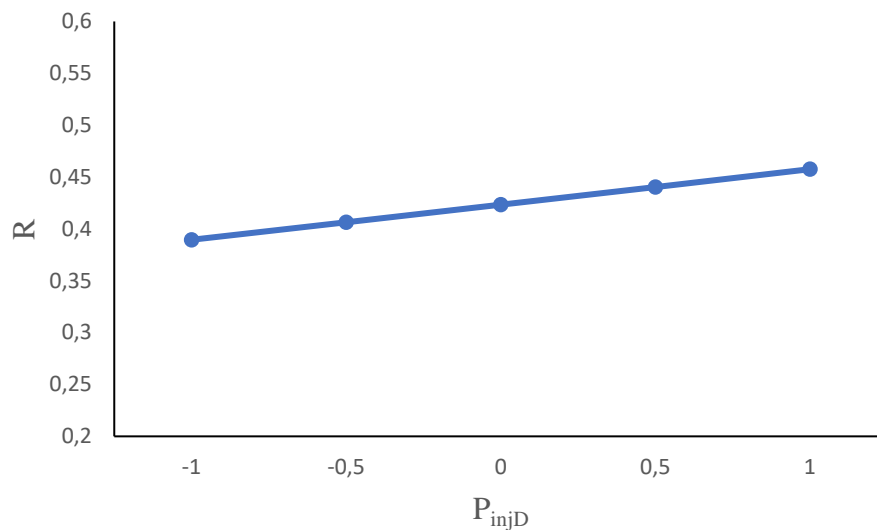
**Slika 5-5.** Utjecaj  $\sigma_R$  parametra na iscrpak.



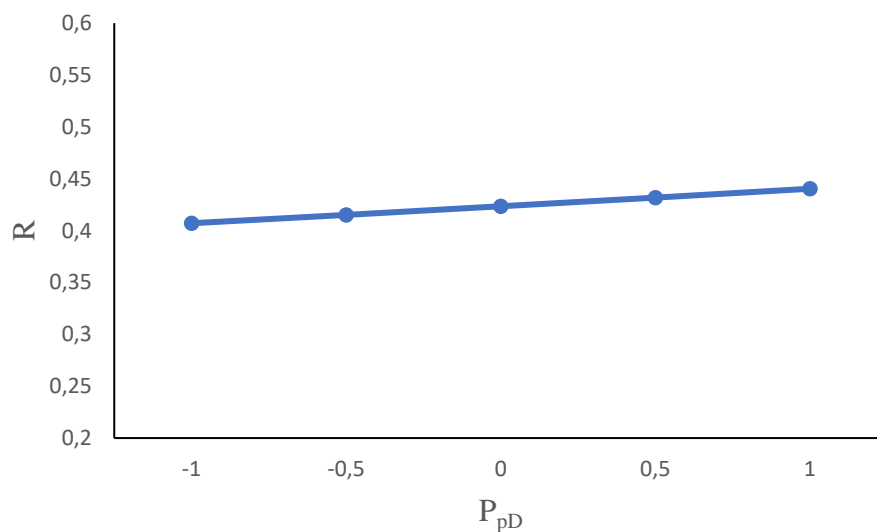
**Slika 5-6.** Utjecaj  $H_D$  parametra na iscrpak.

Iz ovih grafova je očit negativan utjecaj heterogenosti na iscrpak, tj. pozitivan utjecaj homogenosti.

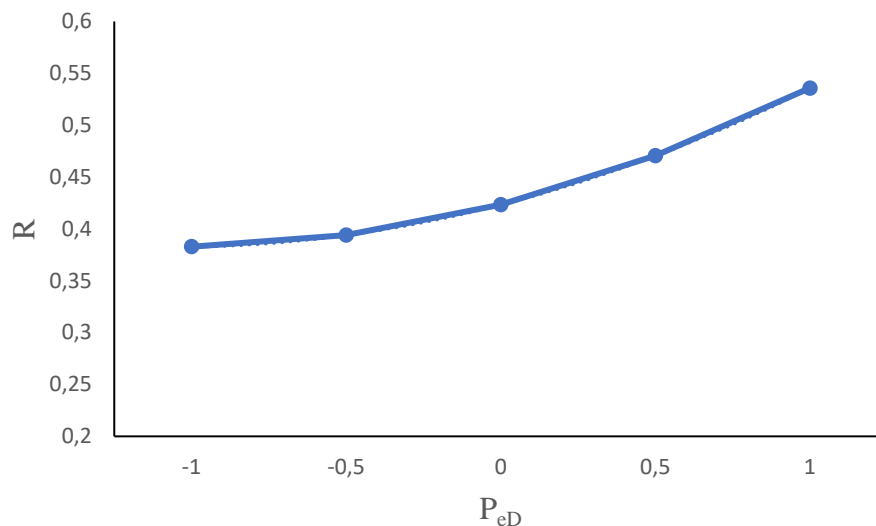




**Slika 5-7.** Utjecaj  $P_{injD}$  parametra na iscrpak.

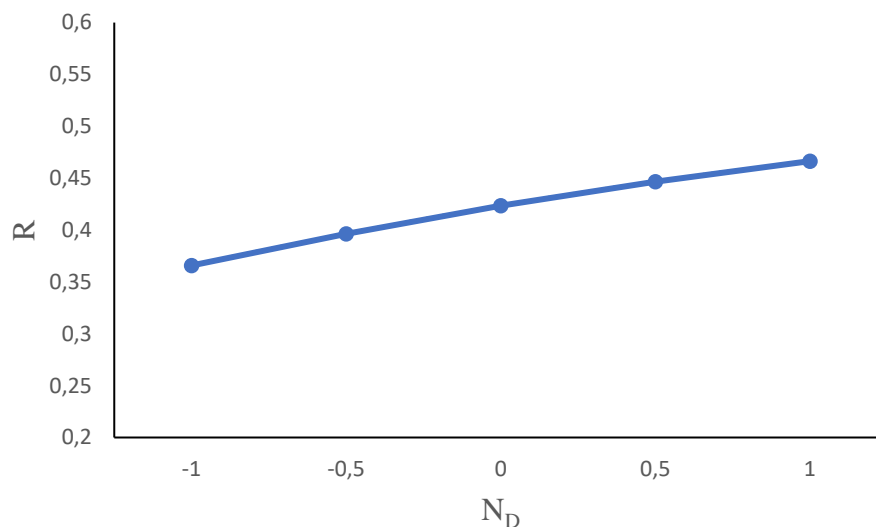


**Slika 5-8.** Utjecaj  $P_{pD}$  parametra na iscrpak.



**Slika 5-9.** Utjecaj  $P_{eD}$  parametra na iscrpak.

Navedena tri grafa dokazuju da sve tri vrste tlakova u sustavu pozitivno djeluju na iscrpak.



**Slika 5-10.** Utjecaj  $N_D$  parametra na iscrpak.

I ovaj graf dokazuje činjenice opisane u prethodnim poglavljima te jasno pokazuje da podinski akvifer pospješuje proizvodnju.

Sličnu analizu moguće je provesti i za utilizacijski faktor, ali budući da je korelacijski koeficijent između iscrpka i utilizacijskog faktora 0,935 i 0,952, parametri će imati sličan utjecaj kao i na iscrpak te je stoga takva analiza izostavljena.

## 6. ZAKLJUČAK

Nakon analize čimbenika koji utječu na koeficijent iskorištenja CO<sub>2</sub> i iscrpak nafte, uvedeno je deset bezdimenzionalnih parametara za karakterizaciju ležišta. Na temelju Box-Behnkenovog dizajna provedene su numeričke simulacije variranjem vrijednosti navedenih čimbenika. Rezultati su interpretirani kvadratnom odzivnom površinom, te je konačno dobiven model za brzu procjenu sekvestracije CO<sub>2</sub> i iscrpka nafte. Iz rada se može zaključiti sljedeće:

1. Mnogo je čimbenika koji utječu na CO<sub>2</sub> sekvestraciju i iscrpak nafte te se navedeni parametri često odabiru proizvoljno bez određene potkrijepljenosti u znanstvenim metodama što već u samom startu povećava nesigurnost metoda dostupnih za procjenu.
2. Kako bi se ta nesigurnost umanjila, potrebno je provesti detaljnije analize ulaznih parametara, a simulacijski modeli trebali bi uzeti u obzir pravilno definirane mehanizme istiskivanja i koji ne uzimaju u obzir postojanje kombiniranog mehanizma istiskivanja.
3. Kada su metode definirane uzimanjem u obzir prethodnih činjenica, one bi trebale davati dovoljno točne rezultate ako je set ulaznih podataka kvalitetan te stoga tome treba posvetiti posebnu pažnju.
4. Ipak, i u takvim uvjetima metode često mogu davati netočne rezultate jer iako dobiveni evaluacijski modeli ne odstupaju značajnije od rezultata numeričkih simulacija, upitno je koliko dostatno geološki modeli korišteni pri simulacijama opisuju stvarne uvjete u ležištu.
5. Potrebno je stoga uvidjeti ograničenja mnogih metoda te dati prijedloge i primjere kako se bolje i pouzdanije procjene mogu odrediti.

## 7. POPIS LITERATURE

1. ADGER, W.N. 2001. Scales of Governance and Environmental Justice for Adaptation and Mitigation of Climate Change. *Journal of International Development*, 13(7), 921-931.
2. ALADASANI, A., BAI, B. 2010. Recent Developments and Updated Screening Criteria of Enhanced Oil Recovery Techniques. *International Oil and Gas Conference and Exhibition in China*.
3. AL-JABRA, M., AL-ANAZI, B.D. 2010. Tehnike povećanja iscrpka nafte i istiskivanje korištenjem CO<sub>2</sub>. *Nafta*, 61(9), 396-398.
4. ARNAUT, M., VULIN, D., JOSÉ GARCÍA LAMBERG, G., JUKIĆ, L. 2021. Simulation Analysis of CO<sub>2</sub>-EOR Process and Feasibility of CO<sub>2</sub> Storage during EOR. *Energies*, 14(4), 1154-1181.
5. BACHU, S. 2000. Sequestration of CO<sub>2</sub> in Geological Media: Criteria and Approach for Site Selection in Response to Climate Change. *Energy conversion and management*, 41(9), 953-970.
6. BAILEY, R.T., MCDONALD, M.M. 1993. CO<sub>2</sub> Capture and Use for EOR in Western Canada, 1. General Overview. *Energy Conversion and Management*, 34(9-11), 1145-1150.
7. BERGMAN, P.D., WINTER, E.M., CHEN, Z.Y. 1997. Disposal of Power Plant CO<sub>2</sub> in Depleted Oil and Gas Reservoirs in Texas. *Energy Conversion and Management*, 38(11/12), 211-216.
8. BILIČIĆ, V. 2016. Definiranje jednadžbe stanja za utiskivanje CO<sub>2</sub> u naftu. *Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni-fakultet*.
9. BLACKWELL, R.J., RAYNE, J.R., TERRY, W. 1959. Factors Influencing the Efficiency of Miscible Displacement. *Transactions of the AIME*, 217(1), 1-8.
10. BOAIT, F., JAFARGANDOMI, A., JOHNSON, G. 2015. Measurement, Monitoring and Verification: Enhanced Oil Recovery and Carbon Dioxide Storage. *Scottish Carbon Capture and Storage (SCCS)*.
11. BORTSCHELLER, M.J. 2009. Equitable But Ineffective: How the Principle of Common but Differentiated Responsibilities Hobbles the Global Fight Against Climate Change. *Sustainable Development Law and Policy*, 10(2), 49-53, 65-68.

12. BOSSIE-CODREANU, D. 2017. Studying Remediation Processes Using a Dimensionless Classification of Potential Storage Sites. *Energy Procedia*, 114, 5500-5520.
13. BRADSHAW, J., BACHU, S., BONIJOLY, D., BURRUSS, R., HOLLOWAY, S., CHRISTENSEN, N.P., MATHIASSEN, O.M. 2007. CO<sub>2</sub> Storage Capacity Estimation: Issues and Development of Standards. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 1(1), 62-68.
14. BRUNNÉE, J. 2002. COPing With Consent: Law-Making Under Multilateral Environmental Agreements. *Leiden Journal of International Law*, 15(1), 1-52.
15. CAUDLE, B.H., DYES, A.B. 1958. Improving Miscible Displacement by Gas-Water Injection. *Transactions of the AIME*, 213(1), 281-283.
16. CHARBIT, S., PAILLARD, D., RAMSTEIN, G. 2008. Amount of CO<sub>2</sub> Emissions Irreversibly Leading to the Total Melting of Greenland. *Geophysical Research Letters*, 35(12), 1-5.
17. DEBBABI, Y., STERN, D., HAMPSON, G.J., JACKSON, M.D. 2018. Use of Dimensionless Scaling Groups to Interpret Reservoir Simulation Results. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 163, 270-282.
18. DOMITROVIĆ, D., ŠUNJERGA, S., JELIĆ-BALTA, J. 2004. Numerical Simulation of Tertiary CO<sub>2</sub> Injection at Ivanić Oil Field, Croatia. *SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery*.
19. DYKSTRA, H., PARSONS, R.L. 1950. The Prediction of Oil Recovery by Water Flood. *Secondary Recovery of Oil in the United States*, 2, 160-174.
20. ELGAGHAH, S., ZEKRI, A.Y., ALMEHAIDEB, R.A., SHEDID, S.A. 2007. Laboratory Investigation of Influences of Initial Oil Saturation and Oil Viscosity on Oil Recovery by CO<sub>2</sub> Miscible Flooding. *EUROPEC/EAGE Conference and Exhibition*.
21. EL-HOSHOUDY, A.N., DESOUKY, S. 2018. CO<sub>2</sub> Miscible Flooding for Enhanced Oil Recovery. *Carbon Capture, Utilization and Sequestration*, 79-94.
22. ESPIE, A.A., BRAND, P.J., SKINNER, R.C., HUBBARD, R.A., TURAN, H.I. 2003. Obstacles to the Storage of CO<sub>2</sub> Through EOR Operations in the North Sea. *Greenhouse Gas Control Technologies-6th International Conference*, 213-218.
23. ESPOSITO, R.O., ALIJÓ, P.H.R., SCILIPOTI, J.A., TAVARES, F.W. 2017. Compositional Grading in Oil and Gas Reservoirs. *Gulf Professional Publishing*.

24. ETTEHADTAVAKKOL, A., LAKE, L.W., BRYANT, S.L. 2014. CO<sub>2</sub>-EOR and Storage Design Optimization. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 25(79-92).
25. FLOCK, D.L., NOUAR, A. 1984. Parametric Analysis on the Determination of the Minimum Miscibility Pressure in Slim Tube Displacements. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 23(5).
26. GALIMBERTI, E.B. 2018. Investigation of Dispersion and Its Effect on the Surfactant-Polymer Flooding Process. *The Pennsylvania State University, College of Earth and Mineral Sciences*.
27. GAO, P., TOWLER, B., PAN, G. 2010. Strategies for Evaluation of the CO<sub>2</sub> Miscible Flooding Process. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*.
28. GAURINA-MEĐIMUREC, N., NOVAK MAVAR, K. 2019. Carbon Capture and Storage (CCS): Geological Sequestration of CO<sub>2</sub>. *CO<sub>2</sub> Sequestration*.
29. GHEDAN, S. 2009. Global Laboratory Experience of CO<sub>2</sub>-EOR Flooding. *SPE/EAGE Reservoir Characterization and Simulation Conference*.
30. GILLETT, N.P., ARORA, V.K., ZICKFELD, K., MARSHALL, S.J., MERRYFIELD, W.J. 2011. Ongoing climate change following a complete cessation of carbon dioxide emissions. *Nature Geoscience*, 4(2), 83-87.
31. GORIČNIK, B., DOMITROVIĆ, D., ŠUNJERGA, S., VULIN, D. 2005. Simulation Study of CO<sub>2</sub> Retention During Tertiary EOR Flood in Ivanić Oilfield. *67th EAGE Conference & Exhibition*.
32. GUPTA, J. 2006. International law and climate change: The challenges facing developing countries. *Yearbook of International Environmental Law*, 16(1), 119.
33. GUPTA, J. 2007. The multi-level governance challenge of climate change, *Environmental Sciences*, 4(3), 131-137.
34. GUPTA, J. 2010. A history of international climate change policy. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 1(5), 636-653.
35. HABERMANN, B. 1960. The Efficiency of Miscible Displacement as a Function of Mobility Ratio. *Transactions of the AIME*, 219(1), 264-272.
36. HERZOG, H., DRAKE, E., ADAMS, E. 1997. CO<sub>2</sub> capture, reuse, and storage technologies for mitigating global climate change. *Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts*.

37. HITCHON, B., GUNTER, W.D., GENTZIS, T., BAILEY, R.T. 1999. Sedimentary basins and greenhouse gases: a serendipitous association. *Energy Conversion and Management*, 40(8), 825-843.
38. HOLM, L.W. 1976. Status of CO<sub>2</sub> and Hydrocarbon Miscible Oil Recovery Methods. *Journal of Petroleum Technology*, 28(1), 76-84.
39. HOLM, L.W. 1982. CO<sub>2</sub> Flooding: Its Time Has Come. *Journal of Petroleum Technology*, 34(12), 2739-2745.
40. HOLM, L.W. 1986. Miscibility and Miscible Displacement. *Journal of Petroleum Technology*, 38(8), 817-818.
41. HOLM, L.W. 1987. Evolution of the Carbon Dioxide Flooding Processes. *Journal of Petroleum Technology*, 39(11), 1337-1342.
42. HOLM, L.W., O'Brien, L.J. 1986. Factors to Consider When Designing a CO<sub>2</sub> Flood. *International Meeting on Petroleum Engineering*.
43. JAUBERT, J.N., ARRAS, L., NEAU, E., AVAULLEE, L. 1998. Properly Defining the Classical Vaporizing and Condensing Mechanisms When a Gas Is Injected Into a Crude Oil. *Industrial Engineering & Chemistry Research*, 37(12), 4860-4869.
44. JOHNS, R.T., DINDORUK, B., ORR, F.M. 1993. Analytical Theory of Combined Condensing/Vaporizing Gas Drives. *SPE Advanced Technology Series*, 1(2), 7-16.
45. JOHNS, R.T., FAYERS, F.J., ORR, F.M. 1994. Effect of Gas Enrichment and Dispersion on Nearly Miscible Displacements in Condensing/Vaporizing Drives. *SPE Advanced Technology Series*, 2(2), 26-34.
46. JÜTTNER, I. 1997. Oil Displacement in Miscible Condition. *Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik*, 9(1), 63.
47. KHOSRAVI, M., FATEMI, S., ROSTAMI, B. 2011. Assessing Structured Uncertainty in a Mature Fractured Reservoir, Using Combination of Response Surface Method and Reservoir Simulation. *SPE Reservoir Characterisation and Simulation Conference and Exhibition*.
48. LAKE, L.W. 1989. Enhanced Oil Recovery. *Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall*.
49. LASHOF, D.A., AHUJA, D.R. 1990. Relative Contributions of Greenhouse Gas Emissions to Global Warming. *Nature*, 344(6266), 529-531.
50. LEE, S., KAM, S.I. 2013. Enhanced Oil Recovery by Using CO<sub>2</sub> Foams: Fundamentals and Field Applications. *Enhanced Oil Recovery Field Case Studies*, 23-61.

51. LYONS, W. 2009. Working Guide to Reservoir Engineering. *Gulf Professional Publishing*.
52. MANSOUR, E.M., AL-SABAGH, A.M., DESOUKY, S.M., ZAWAWY, F.M., RAMZI, M. 2019. A Laboratory Investigation of Carbon Dioxide-Enhanced Oil Recovery by Focusing on CO<sub>2</sub>-Oil Physical Properties. *Egyptian Journal of Petroleum*, 28(1), 21-26.
53. MARTIN, D.F., TABER, J.J. 1992. Carbon Dioxide Flooding. *Journal of Petroleum Technology*, 44(4), 396-400.
54. MASSARWEH, O., ABUSHAIKHA, A.S. 2021. A Review of Recent Developments in CO<sub>2</sub> Mobility Control in Enhanced Oil Recovery. *Petroleum*.
55. MATTHEWS, H.D., SOLOMON, S. 2013. Irreversible Does Not Mean Unavoidable. *Science*, 340(6131), 438-439.
56. MELZER, S. 2008. CO<sub>2</sub> EOR, Reservoir Sweep and CO<sub>2</sub> Storage. *2008 Wyoming EOR/IOR Conference*.
57. NOVAK MAVAR, K. 2016. Ekološki aspekti i mogućnost skladištenja CO<sub>2</sub> u neogenska pješčenjačka ležišta sjeverne Hrvatske na primjeru polja Ivanić. *Nafta i plin*, 36(147), 52-61.
58. NOVAK MAVAR, K., GAURINA-MEĐIMUREC, N., HRNČEVIĆ, L. 2021. Significance of Enhanced Oil Recovery in Carbon Dioxide Emission Reduction. *Sustainability*, 13(4), 1800.
59. NOVOSAD, Z., COSTAIN, T. 1988. New Interpretation of Recovery Mechanisms in Enriched Gas Drives. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 27(2).
60. NOVOSEL, D. 2005. Initial Results of WAG CO<sub>2</sub> IOR Pilot Project Implementation in Croatia. *SPE International Improved Oil Recovery Conference in Asia Pacific*.
61. NOVOSEL, D. 2009. Thermodynamic Criteria and Final Results of WAG CO<sub>2</sub> Injection in a Pilot Project in Croatia. *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*.
62. NOVOSEL, D. 2010. Učinak ugljičnog dioksida u tercijarnoj fazi iskorištavanja naftnih ležišta polja Ivanić. *Nafta*, 61(6), 300-307.
63. NOVOSEL, D., BABIĆ, D., LEONARD, N., MIKULIĆ, S., JELIĆ-BALTA, J. 2020. Pet godina utiskivanja CO<sub>2</sub> za povećanje iscrpka nafte na polju Ivanić i Žutica – Iskustva i rezultati. *Nafta i Plin*, 40(163-164), 33-49.



64. ORR, F.M., HELLER, J.P., TABER, J.J. 1982. Carbon Dioxide Flooding for Enhanced Oil Recovery: Promise and Problems. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 59(10), 810-817.
65. PATHAK, P., FITZ, D.E., BABCOCK, K.P. 2011. Residual Oil Saturation Determination for EOR Projects in a Mature West Texas Carbonate Field. *SPE Enhanced Oil Recovery Conference*.
66. ROBEL, R.J. 1978. Enhanced Oil Recovery Potential in the United States. *Interstate Oil and Gas Compact Commission*, 20(2).
67. ROWLANDS, I.H. 1995. Explaining National Climate Change Policies. *Global Environmental Change*, 5(3), 235-249.
68. SEČEN, J. 2002. Razrada ležišta ugljikovodika. *INA-Industrija nafte dd, Naftaplin*.
69. SOLOMON, S., PIERREHUMBERT, R.T., MATTHEWS, D., DANIEL, J.S., FRIEDLINGSTEIN, P. 2013. Atmospheric Composition, Irreversible Climate Change, and Mitigation Policy. *Climate science for serving society*, 415-436.
70. SOLOMON, S., PLATTNER, G.K., KNUTTI, R., FRIEDLINGSTEIN, P. 2009. Irreversible Climate Change Due to Carbon Dioxide Emissions. *Proceedings of the national academy of sciences*, 106(6), 1704-1709.
71. STALKUP, F.I. 1978. Carbon Dioxide Miscible Flooding: Past, Present, and Outlook for the Future. *Journal of Petroleum Technology*, 30(8), 1102-1112.
72. STALKUP, F.I. 1983. Status of Miscible Displacement. *Journal of Petroleum Technology*, 35(4), 815-826.
73. STALKUP, F.I. 1987. Displacement Behavior of the Condensing/Vaporizing Gas Drive Process. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*.
74. TONIAZZO, T., GREGORY, J.M., HUYBRECHTS, P. 2004. Climatic Impact of a Greenland Deglaciation and Its Possible Irreversibility. *Journal of Climate*, 17(1), 21-33.
75. UNITED NATIONS 2015. Paris Agreement. *United Nations Treaty Collect*.
76. VARGA, T. 2019. Analiza multikontaktne miješanja CO<sub>2</sub> usklađivanjem simulacijskog i laboratorijskog rezultata slim-tube testa. *Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni-fakultet*.
77. VERMA, M.K. 2015. Fundamentals of Carbon Dioxide-Enhanced Oil Recovery (CO<sub>2</sub>-EOR): A Supporting Document of the Assessment Methodology for Hydrocarbon Recovery Using CO<sub>2</sub>-EOR Associated With Carbon Sequestration. *Washington, DC: US Department of the Interior, US Geological Survey*.

78. VULIN, D. 2010. Modeliranje termodinamičkih i petrofizičkih parametara za geološko skladištenje ugljičnog dioksida. *Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni-fakultet.*
79. WEI, Q., YILIAN, L., DONGGUANG, W. 2006. Advances and Problems of Geological Disposal of Greenhouse Gases. *Geological Science and Technology Information*, 25(2), 84-87.
80. WINTER, E.M., BERGMAN, P.D. 1993. Availability of Depleted Oil and Gas Reservoirs for Disposal of Carbon Dioxide in the United States. *Energy Conversion and Management*, 34(9-11), 1177-1187.
81. WOOD, D.J. 2006. Creating a Quick Screening Model for CO<sub>2</sub> Flooding and Storage in Gulf Coast Reservoirs Using Dimensionless Groups. *Faculty of the Graduate School, The University of Texas at Austin.*
82. YAO, Y., JI, Z. 2010. A Quick Evaluation Model for CO<sub>2</sub> Flooding and Sequestration. *Petroleum Science*, 7(4), 515-523.
83. YIN, M. 2015. CO<sub>2</sub> Miscible Flooding Application and Screening Criteria. *Missouri University of Science and Technology.*
84. ZAHOR, M.K., DERAHMAN, M.N., YUNAN, M.H. 2011. WAG Process Design— an Updated Review. *Brazilian journal of petroleum and gas*, 5(2).
85. ZICK, A.A. 1986. A Combined Condensing/Vaporizing Mechanism in the Displacement of Oil by Enriched Gases. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition.*

- web izvori:

86. ARNAUT, M. 2021. CO<sub>2</sub>-EOR proces i skladištenje CO<sub>2</sub>. *Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni-fakultet.*  
<https://www.rgn.unizg.hr/hr/studiji/poslijediplomski-studij/blog/2846-co2-eor-proces-i-skladistenje-co2>
87. NIELSEN, M.H. 2021. Miscibility of Hydrocarbon Systems. *Whitson Wiki.*  
[https://wiki.whitson.com/phase\\_behavior/miscibility/about\\_misc](https://wiki.whitson.com/phase_behavior/miscibility/about_misc)
88. WANG, Y. 2012. Green Economy: Last Straw for Salvation?. *Earth Journalism Network.* <https://earthjournalism.net/stories/green-economy-last-straw-for-salvation>

## **IZJAVA:**

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

*Ante Dujaković*

---

Ante Dujaković



KLASA: 602-04/21-01/185  
URBROJ: 251-70-12-21-2  
U Zagrebu, 17.9.2021.

**Ante Dujaković, student**

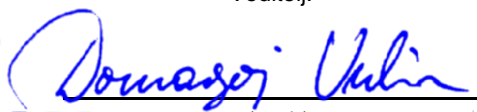
## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/185, URBROJ: 251-70-12-21-1 od 7.5.2021. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

### ANALITIČKA METODA EVALUACIJE USPJEŠNOSTI UTISKIVANJA I SKLADIŠTENJA CO<sub>2</sub>

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

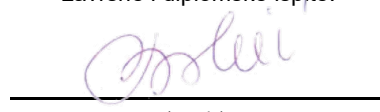
Voditelj:

  
(potpis)

Prof.dr.sc. Domagoj Vulin

(titula, ime i prezime)

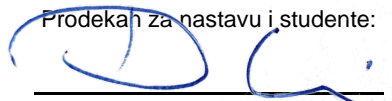
Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:

  
(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Vladislav Brkić

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

  
(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Dalibor  
Kuhinek

(titula, ime i prezime)