

# ESCOM projekt – Evaluacijski sustav za smanjenje emisije CO<sub>2</sub>

## ESCOM project – Evaluation system for CO<sub>2</sub> mitigation

dr. sc. Bruno Saftić  
 dr. sc. Daria Karasalihović Sedlar  
 dr. sc. Luka Perković  
 Marija Macenić, mag. ing.  
 Lucija Jukić, mag. ing.  
 Amalia Lekić, mag. ing.  
 Maja Arnaut, mag. ing.  
 Rudarsko–geološko–naftni fakultet

dr. sc. Domagoj Vulin  
 Rudarsko–geološko–naftni fakultet  
 Sveučilišta u Zagrebu  
[domagoj.vulin@rgn.hr](mailto:domagoj.vulin@rgn.hr)



**Ključne riječi:** smanjenje emisija CO<sub>2</sub>, skladištenje CO<sub>2</sub>, energetska efikasnost, „upstream“ industrija  
**Key words:** CO<sub>2</sub> mitigation, CO<sub>2</sub> storage, energy efficiency, upstream industry



Ministarstvo znanosti i obrazovanja

### Sažetak

ESCOM projekt financiran i proveden od strane Fonda za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost te Hrvatske zaklade za znanost dio je programa poticanja istraživačkih i razvojnih aktivnosti u području klimatskih promjena. S obzirom na prirodu programa, glavni cilj ESCOM projekta je podizanje svijesti javnosti o mogućnostima koje naftno-plinska industrija ima za smanjenje emisija, što će biti demonstrirano kroz web stranicu i online alat za okvirne procjene primjene različitih metoda za procjenu manjeg utroška energije, emisija CO<sub>2</sub>, potencijala skladištenja CO<sub>2</sub> i dr. Projekt uključuje zaposlenje i izobrazbu doktoranda istraživača koji bi u tom smjeru postali stručnjaci za dalje istraživanje navedenih mogućnosti, te općenito širenje svijesti javnosti o činjenici kako naftna industrija nije isključivo negativna po učinke na okoliš, nego naprotiv, sposobna smanjiti i zbrinuti količine CO<sub>2</sub> koje premašuju količinu emisija prvotno emitiranih unutar „upstream“ i „downstream“ djelovanja.



REPUBLIKA HRVATSKA

MINISTARSTVO ZAŠTITE  
OKOLIŠA I ENERGETIKE



FOND ZA ZAŠTITU OKOLIŠA I  
ENERGETSKU UČINKOVITOST

### Abstract

The ESCOM project, funded and implemented by the Environmental Protection and Energy Efficiency Fund and the Croatian Science Foundation, is part of the Program for encouraging research and development activities in the field of climate change. Given the nature of the program, the main goal of the ESCOM project is to raise public awareness regarding

the opportunities that the oil and gas industry has in terms of CO<sub>2</sub> emissions mitigation and will be demonstrated on the project website that contains online application which would provide a general assessment of the application of different methods for estimating lower energy consumption, CO<sub>2</sub> emissions, CO<sub>2</sub> storage potential etc. The project involves employment of researchers who are Ph.D. students and would become experts in further exploring these options and generally spread public awareness of the fact that oil industry is not just negatively affecting the environment but, on the contrary, is able to reduce and dispose CO<sub>2</sub> emissions that exceed the amount originally emitted within the upstream and downstream activities.

## 1. Uvod

Vlada Republike Hrvatske na svojoj 264. sjednici održanoj 5. studenog 2015. donijela je odluku o prihvatanju Programa poticanja istraživačkih i razvojnih aktivnosti u području klimatskih promjena za razdoblje od 2015. do 2016. Sredstva za provedbu Programa, temeljem plana korištenja financijskih sredstava dobivenih od prodaje emisijskih jedinica putem dražbi u Republici Hrvatskoj za razdoblje od 2014. do 2016. osigurava Fond za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost, a implementira ga Hrvatska zaklada za znanost. Cilj Programa je potpora istraživačkim i razvojnim aktivnostima u području ublažavanja i prilagodbe klimatskim promjenama (<http://www.hrzz.hr>).

Natječaj je raspisan u travnju 2016., a Rudarsko-geološko-naftni fakultet se prijavio na natječaj u svrhu provedbe projekta PKP-2016-06-6917 ESCOM (Evaluacijski sustav za ublažavanje CO<sub>2</sub>). U ožujku 2017. je potpisan Ugovor o dodjeli sredstava zaklade Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu i dr.sc. Domagoju Vulinu kao voditelju projekta. Istraživačku grupu ESCOM projekta čine četiri iskusna istraživača, četiri doktoranda (od čega dva financirana isključivo kao istraživači na projektu) i voditelj projekta.

Ukupna vrijednost financiranja projekta je oko 650.000,00 HRK, a razdoblje provedbe projekta je od travnja 2017. do travnja 2019.

Očekivani rezultati ESCOM projekta utvrđeni su radnim planom:

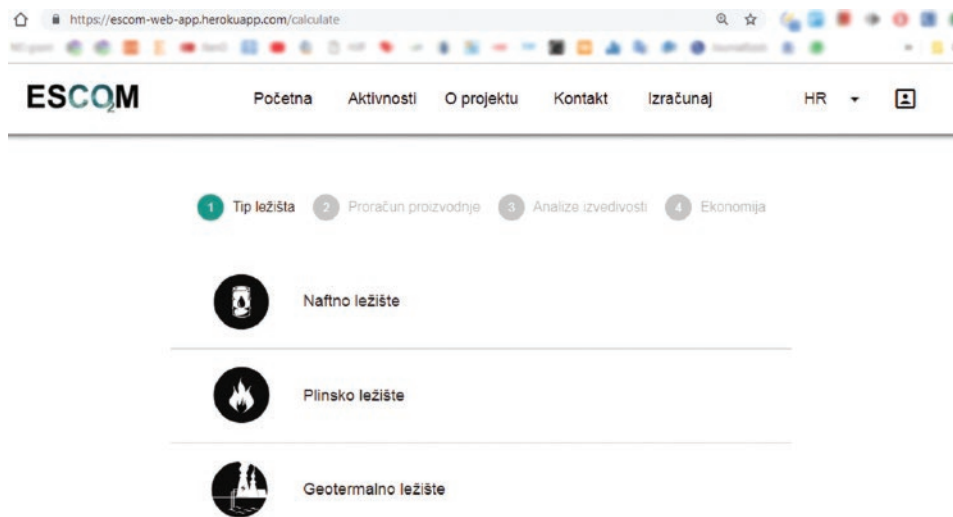
- Zapošljavanje magistra inženjera/inženjerke kao istraživača u području klimatskih promjena;
- Arhiva (baza podataka) podataka o prikupljenim metodama potrebnih proračuna;

- Niz definiranih izrađenih proračuna i provedenih simulacija;
- Osmišljena i izrađena baza podataka;
- Dokumentirani set klasa (programiranih u programskom jeziku Python);
- Web stranica projekta na dostupnoj domeni;
- Organizirana radionica ili okrugli stol;
- Pripremljen članak o rezultatima projekta i komparativne studije;
- Aplikacija s korisničkim sučeljem, koja će služiti kao demonstracija mogućnosti „upstream“ dijela naftno-plinske industrije u vidu smanjenja emisija CO<sub>2</sub> i/ili u smislu mogućnosti utiskivanja CO<sub>2</sub> u podzemne strukture.
- Web stranica projekta koja sadrži informacije o projektu, pregled aktivnosti projekta te aplikaciju za proračun je u završnoj fazi izrade te se nalazi na domenama <https://escom.rgn.hr> i <https://escom-web-app.herokuapp.com>.

## 2. Modeli potrebni za razvoj online aplikacije

Nakon što je izrađena baza podataka te niz proračuna i simulacija u svrhu utvrđivanja algoritama koji će biti primjenjivi za aplikaciju koja može raditi online na serveru (brzo izvršavanje proračuna), a istovremeno dovoljno vjerodostojno računati proračune vezane uz iskorištavanje resursa u podzemlju, bilo je potrebno izraditi niz proračuna te ih prevesti u računalni kod (Python 3.6), odnosno izraditi klase kako bi se kod mogao koristiti objektno tj. modularno. Tako je primjerice, podzemni dio, od kojeg kreću procjene zamišljen kao „tank“ model naftnog, plinskog i geotermalnog ležišta (tj. akvifera) koji predstavlja model u kojem je zanemarena geometrija ležišta i strukture, ali je ležište određeno svojim dimenzijama, i osnovnim petrofizikalnim svojstvima potrebnim za proračun protoka te svojstvima fluida u njemu. Same klase za proračun, tj. programirane funkcije koriste daleko više svojstava. Međutim, kako je primarna namjena evaluacijskog sustava pokazna, poseban zadatak bio je »sakriti« sve parametre koji mogu zakomplicirati primjenu aplikacije, tj. inicijalno ih predefinirati pozadinski, osiguravši online sučelje s ulaznim podacima jednostavnim i lakim za testiranje korisnicima koji nemaju puno iskustva s procjenama proizvodnje iz ležišta.

Evaluacija započinje odabirom tipa ležišta nakon kojeg slijedi set ulaznih podataka potrebnih za proračun s mogućnošću učitavanja zadanih podataka (slika 1.).



Slika 1. Prikaz početnog odabira tipa proračuna (escom.rgn.hr)

Nakon serverskog proračuna na temelju upisanih podataka, prikazuje se rezultat u obliku tablice i uz rezultate je najčešće dostupan interaktivni dijagram. U ovom koraku je zapravo izvršena inicijalizacija nekog hipotetskog slučaja (naftnog ležišta, plinskog ležišta ili akvifera tj. geotermalnog ležišta), što je ulazni set podataka za spomenute metode koje se modularno nadograđuju u sustav i odabiru u idućem koraku.

U sljedećem koraku korisnik bira želi li u analizu uključiti proračun emisija na bakljama, proračun pada tlaka u bušotini, proračun utiskivanja CO<sub>2</sub>, proračun skladištenja CO<sub>2</sub> i sl. Cijeli proces strogo odvaja proizvodnju plina, nafte i geotermalne vode kako bi aplikacija navodila korisnika na analize kojima je sustav primarno i namijenjen. Tako primjerice modul za geotermalno ležište daje procjene pothlađivanja ležišta reinjektiranom pothlađenom vodom, a ne promjenjive dnevne proizvodnje, pa je dostupna tablica rezultata koji daju vijek proizvodnje pri nekoliko zadanih protoka geotermalne vode. Tako definiran problem geotermalnog ležišta, u idućem koraku otvara opciju optimizacije i procjene pretvorbe u el. energiju pomoću ORC (engl. *Organic Rankine Cycle*) postrojenja i sl.

Za proračune u prvom koraku - primarna proizvodnja iz tri tipa ležišta (nafta, plin, geotermalno) korištene su provjerene metode, koje su navedene u idućim poglavljima.

## 2.1. Model naftnog ležišta

Proračun u naftnom ležištu sastoji se od dva dijela:

Proračun pada tlaka te kumulativne proizvodnje nafte i plina izdvojenog iz nafte.

Proračun odnosa vremena i protoka, tj. vremena, pada tlaka i kumulativne proizvodnje.

Prvi dio zasniva se na dobro poznatoj jednadžbi materijalnog uravnoteženja (engl. *Material Balance Equation*, MBE). Publiciran je niz vrlo sličnih i po primjenjivosti jednakih MBE jednadžbi. Pri tome je potrebno poznavati niz pokazatelja od kojih su za rezultat najbitniji: dobro određena dimenzije ležišta, prosječna poroznost i početno zasićenje na temelju kojih se određuje količina nafte u ležištu. Tracy (Tracy, 1955.) uz računski primjer i pripadne jednadžbe pokazuje pojednostavljenu metodu. Prikazane jednadžbe zasnivaju se na Schilthuisovoj metodi materijalne ravnoteže (Schilthuis, 1936.) preoblikovano u više koristan oblik. Umjesto procjene inkrementalno proizvedene nafte, metoda iznesena u ovom radu bolje predviđa procjenu proizvodnog omjera nafte i plina, što je praktično jednostavnije provjeriti. Schilthuisove jednadžbe objavljuju se i u nizu naftaških knjiga, poput Lyons i Plisga (Lyons i Plisga 2011.), Ahmed i McKinney (Ahmed i McKinney, 2011.). Geertsma i suradnici (Geertsma i drugi, 1956.) daju sintezu jednadžbi protoka, graničnih uvjeta i jednadžbi uravnoteženja mase i termalne energije.

**Jednadžbe korištene u testiranim proračunima su:**

$$OOIP = V_t \cdot \phi \cdot \frac{(1 - S_{wi})}{B_{oi}} \quad (1)$$

$$OGIP = OOIP \cdot R_{si} \quad (2)$$

**Zasićenje naftom:**

$$S_o = 1 - S_{wi} \quad (3)$$

**Zasićenje tekućom fazom:**

$$S_L = S_o + S_w \quad (4)$$

**Ukupna (efektivna) stlačivost sustava:**

$$c_e = c_t/S_o = (S_o c_o + S_w c_w + c_f)/S_o \quad (5)$$

gdje su OOIP (engl. *Original Oil In Place*) - ukupna količina nafte izražena pri površinskim (standardnim uvjetima), m; - ukupni volumen stijenske mase ležišta, m; - prosječna poroznost ležišta, dij. jed.; - početno zasićenje vodom, dij. jed.; - volumni faktor nafte, dij. jed.; OGIP (engl. *Original Gas In Place*) - ukupan plin otopljen u nafti, m; - plinski faktor, dij. jed.; - vanjska stlačivost stijene zasićene fluidima, 1/Pa; - stlačivost nafte, 1/Pa; - stlačivost vode, 1/Pa i stlačivost formacije, 1/Pa.

Odnos pridobivanja plina i nafte ovisi o propusnosti za svaki fluid, pri čemu se efektivna propusnost za svaki fluid povećava s zasićenjem istog tog fluida. Relativna propusnost (omjer efektivne za pojedini fluid i apsolutne propusnosti) opisuje se Brooks i Coreyevim (Brooks i Corey, 1964.) tipom korelacije:

$$k_{ro} = \left(1 - \frac{S_g}{1-S_{wi}}\right)^4 \quad (6)$$

$$k_{rg} = \left(\frac{S_g}{1-S_{wi}}\right)^3 \cdot \left(2 - \frac{S_g}{1-S_{wi}}\right) \quad (7)$$

gdje su  $k_{ro}$  relativna propusnost za naftu,  $k_{rg}$  relativna propusnost za plin, a  $S_o$  zasićenje plinom.

Klasa izrađena u svrhu razvoja aplikacije računa pad tlaka i kumulativne proizvodnje nafte i plina (materijalno uravnoteženje) te protoke pri istim promatranim tlakovima kako bi se u proračun uključila vremenska komponenta.

Materijalno uravnoteženje ima dva područja proračuna - prvo se računa izravno pomoću koeficijenta kompresibilnosti, a temelji se na općoj jednadžbi:

$$NB_{oi} = (N - N_p)B_o \quad (8)$$

pri čemu je  $N$  druga oznaka za rezerve nafte (OOIP),  $N_p$  u m je oznaka za proizvedenu količinu nafte, je početni volumni faktor, a  $B_o$  volumni faktor pri nekom nižem tlaku (ali iznad tlaka zasićenja, tj. obzirom na to da je ovaj dio proračuna jednostavan, računa se samo jedan korak - do tlaka zasićenja).

$$N = \frac{N_p B_o + B_g (G_p - N_p R_s)}{B_o - B_{oi} + (R_{si} - R_s) B_g} \quad (9)$$

gdje je  $G_p$  proizvedeni plin (m), a  $R_s$  početni plinski faktor.

Muskatova metoda (Muskat, 1945.) uključuje relativne propusnosti fluida kako bi se mogao dinamički opisati proizvodni omjer plina i nafte ( $R$ ):

$$R = \frac{B_o k_{rg} \mu_o}{B_g k_{ro} \mu_g} + R_s \quad (10)$$

pri čemu su  $k_{ro}$  i  $k_{rg}$  relativna propusnost za plin i naftu pri zadanom zasićenju plinom i naftom, a  $\mu_o$  i  $\mu_g$  su viskoznost nafte i plina pri razmatranom tlaku i temperaturi ležišta.

Ako se preostala nafta (izraženo u površinskim uvjetima) izrazi kao:

$$N - N_p = V_p S_o / B_o \quad (11)$$

pri čemu je  $V_p$  volumen pora u ležištu, a  $S_o$  zasićenje naftom u ležištu, te ako se promjena volumena nafte izrazi kao:

$$\frac{dN_p}{dp} = \frac{V_p}{dp} \left( \frac{dS_o}{B_o} - \frac{S_o \cdot dB_o}{B_o^2} \right) \quad (12)$$

Slično se računaju i preostale rezerve plina oslobođenog iz nafte:

$$G - G_p = \frac{V_p (S_o R_s)}{B_o} + \frac{(1 - S_o - S_{wi}) V_p}{B_g} \quad (13)$$

i promjena volumena plina:

$$\frac{dG_p}{dp} = V_p \cdot \left( \frac{S_o}{B_o} \cdot \frac{dR_s}{dp} + \frac{R_s}{B_o} \cdot \frac{dS_o}{dp} - \frac{R_s S_o}{B_o^2} \cdot \frac{dB_o}{dp} - \frac{1 - S_o - S_{wi}}{B_g^2} \cdot \frac{dB_g}{dp} \right) \quad (14)$$

Dijeljenjem jednadžbi (14)/(12) može se pisati:

$$\frac{dG_p}{dN_p} = R \quad (15)$$

Izjednačavanjem jednadžbe (15) i jednadžbe (10) dobije se sljedeći oblik:

$$\frac{dS_o}{dp} = \frac{\frac{S_o B_g}{B_o} \frac{dR_s}{dp} + \frac{S_o k_{rg} \mu_o}{B_o k_{ro} \mu_g} \frac{dB_o}{dp} - \frac{1 - S_o - S_{wi}}{B_g} \frac{dB_g}{dp}}{1 + \frac{k_{rg} \mu_o}{k_{ro} \mu_g}} \quad (16)$$

Na temelju jednadžbi (9), (10) i (16) izrađena je funkcija cilja u kojoj se pretpostavlja promjena iscrpka ( $i$ ) u nekom koraku  $i$ , čime će biti definirana i promjena zasićenja  $S_o$  na temelju koje se računaju relativne propusnosti te proizvodni plinski faktor  $R$ :



$$\left(\frac{Np}{N}\right)_i = \left(1 - \left(\frac{Np}{N}\right)_{i-1}\right) \cdot \left(\left(\frac{B_o}{B_g} - R_s\right)_i - \left(\frac{B_o}{B_g} - R_s\right)_{i-1}\right) - \left(B_{ob} \cdot \frac{\frac{1}{B_g(i)} - \frac{1}{B_g(i-1)}}{\left(\frac{B_o}{B_g} - R_s\right)_i + \bar{R}}\right) \quad (17)$$

U literaturi se može naći niz varijacija postavljanja funkcije cilja i računanja parametara unutar funkcije, međutim sve su nastavak na Muskatov izvod. u jednadžbi je prosječni proizvodni faktor u koracima  $i$ .

Nakon prevođenja ovog školskog proračuna u računalni kod, materijalni balans bilo je potrebno povezati s vremenskom komponentom tj. stanovitom dinamikom ležišta. Depresija na sloj definirana je množiteljem tlaka, koji se pak rješava numerički, kako bi bio zadovoljen zadani vijek proizvodnje iz promatrane bušotine (Slika 2.).

Kada je poznat tlak u bušotini za svaki korak proračuna u materijalnom balansu, primjenjiva je Darcyeva jednadžba za radijalan protok:

$$q_w = k \cdot \frac{2\pi \cdot h}{\mu} \cdot \frac{p_e - p_w}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} \quad (18)$$

gdje  $j$  - tlak ( $w$  = bušotina,  $e$  = drenažni radijus, tj. ležišni tlak), Pa; - radijus bušotine, m; - radijus pada tlaka do bušotine, tj. drenažni radijus, m; - efektivna debljina sloja, m; - dinamička viskoznost, Pa·s; - propusnost sloja, m.

## 2.2. Model plinskog ležišta

Plinsko ležište se može jednostavno opisati analitički. Darcyeva modificirana jednadžba radijalnog protoka za stlačiv fluid (plin) je:

$$q = \frac{\pi \times k \times h (p_e^2 - p_w^2)}{\mu \times p_w \times \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} \quad (19)$$

gdje su - tlak ( $w$  = bušotina,  $e$  = drenažni radijus, tj. ležišni tlak), Pa; - radijus bušotine, m; - radijus pada tlaka do bušotine, tj. drenažni radijus, m; - efektivna debljina sloja, m; - dinamička viskoznost, Pa·s; - propusnost sloja, m.

Materijalni balans plinskog ležišta se odnosi na promjenu volumena cjelokupnog stlačivog sustava, što se može opisati efektivnom stlačivošću:

$$c_e = (c_f + c_w S_{wi} + M(c_f + c_w)) / (1 - S_{wi}) \quad (20)$$

gdje su - stlačivost vode, 1/Pa; - stlačivost formacije (porozne stijene, tj. matriksa i pora), 1/Pa; - početno zasićenje vodom (početno zasićenje plinom je tada), a  $M$  predstavlja omjer volumena ležišta tj. hidrodinamičke cjeline zahvaćenog vodom u odnosu na volumen zahvaćen plinom.

Tad se može primijeniti materijalno uravnoteženje (Ramagost and Farshad, 1981.):

$$\frac{p}{Z} (1 - c_e (p_i - p)) = \left(\frac{p}{Z}\right)_i \left(1 - \frac{G_p}{G}\right) \quad (21)$$

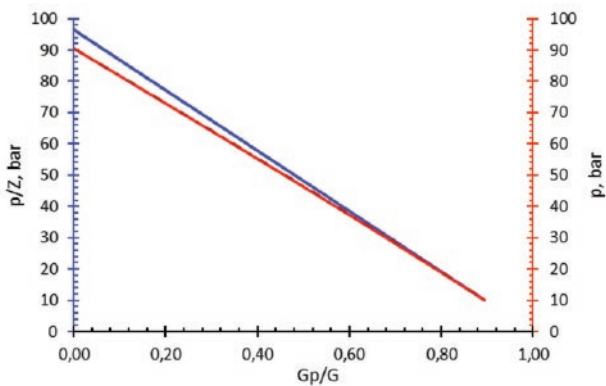
gdje je  $p$  tlak ležišta, je početni tlak ležišta,  $Z$  je korekcijski faktor kompresibilnosti za realni plin,  $G_p$  je količina proizvedenog plina, a  $G$  su ukupne rezerve plina

```
def solveForTimeLimit(dp_guess, matBalTable, t_prod):
    """
    :param dp_guess: mnozitelj tlaka s kojim ce proizvodnja trajati t_prod godina
    :param matBalTable: tablica materijalnog uravnotezenja
    :param t_prod: zadano vrijeme proizvodnje, god
    :return: .FlowRates dataframe tablica (property)
    :return: za ispis ukupno vrijeme (t_total), protok nafte (qo, m3/dan),
            protok plina (qg, m3, dan), vrijeme pojedinog konstantnog protoka (t)
    """
    if dp_guess < 0.3: dp_guess = 0.3 # donji limit za solver
    if dp_guess > 0.99: dp_guess = 0.99 # gornji limit za solver
    dp = matBalTable['p'] - matBalTable['p'] * dp_guess # depresija u busotini
    qo = 86400 * k * (1e-15) * kro * 2 * pi * h_prod * dp * (1e5) / (0.001 *
    mi_o * log(re / rw))
    t = Np / qo # vrijeme proizvodnje u koraku (i)
    t_total = np.sum(t) # ukupno vrijeme proizvodnje
    return (abs(t_total - t_prod)) # provjera vremenskog uvjeta t_prod

self.dp = newton(solveForTimeLimit, dp_guess, args=(self.matBalTable, t_prod))
```

Slika 2. Funkcija za rješavanje omjera dinamičkog tlaka u bušotini i ležišnog tlaka sa zadanim vremenom proizvodnje.

(OGIP). Tipična krivulja materijalnog uravnoteženja plinskog ležišta prikazana je na Slici 3. Na slici se preklapaju podatci u kojima nije uračunata stlačivost cijelog sustava i tamo gdje je uračunata. Kod većih tlakova, ovaj efekt bi trebao biti izraženiji.



Slika 3. Odnos pada tlaka i rezervi za tipično ležište plina (Hrvatska zaklada za znanost, 2018.)

### 2.3. Model geotermalnog ležišta

Prijenos topline u poroznoj i propusnoj stijeni, ovisi o protoku fluida i izmjeni topline s matriksom stijene:

Kondukcija topline: provođenje topline u kojoj molekule prenose svoju kinetičku energiju na druge molekule u tekućinama koje ispunjavaju pore i frakture unutar stijene.

Advekcija - kretanje fluida potaknuto gradijentima tlaka koji može biti prirodnog podrijetla ili uzrokovan utiskivanjem, opisana jednadžbom difuzije tlaka.

Slobodna konvekcija kroz propusne stijene, to jest, protok fluida zbog razlika u gustoći, uzgonom.

**Kondukcija se opisuje Fourierovim zakonom:**

$$Q_t = -K \cdot \Delta T \quad (22)$$

gdje je  $Q_t$  gustoća protoka topline,  $\frac{J}{(s \cdot m^2)}$ ;  $K$  je toplinska vodljivost,  $\frac{J}{s \cdot ^\circ C \cdot m}$ ; a  $\Delta T$  je promjena temperature,  $^\circ C$ .

**Termalni koeficijent difuzije može se definirati kao:**

$$a_T = \frac{K}{\rho \cdot \beta} \quad (23)$$

gdje je  $\rho$  gustoća materijala,  $kg/m^3$ ; a  $\beta$  toplinski kapacitet,  $\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$ .

**Koeficijent uskladištenja (s, engl. storativity) definira se kao:**

$$s = \rho_w (\phi c_w + (1 - \phi) c_r) \quad (24)$$

gdje je  $\rho_w$  - gustoća vode,  $kg/m^3$ ;  $\phi$  - poroznost stijene, dij. jed., a  $c_w$  i  $c_r$  su stlačivost vode i stijene,  $1/Pa$ . U izrađenom algoritmu pretpostavlja se da je sustav dizajniran tako da je količina utisnute vode jednaka količini proizvedene, tj. da sustav ne ovisi o stlačivosti jer nema bitne promjene tlaka.

U homogenim i izotropnim uvjetima, hidraulički difuzivitet s obzirom na tlak je:

$$a_p = \frac{k}{sv} \quad (25)$$

tj. istog je oblika kao i  $a_T$ , gdje je  $k$  hidraulička propusnost,  $m$ ;  $v$  kinematička viskoznost fluida,  $m^2/s$ .

Omjer  $a_p/a_T$  ekstremno varira od  $10^4$  do  $10^7$  (Axelsson, 2012.), a pošto omjer pokazuje brzinu odvijanja procesa termalne i masene izmjene i jako je velik, ova dva procesa se mogu razmatrati odvojeno.

Pretpostavljen je beskonačan, homogen, izotropan sloj zasićen vrućim fluidom, što predstavlja isti slučaj kao problem početne i granične vrijednosti u teoriji kondukcije topline (Carslaw i Jaeger, 1959.):

$$T = T_0 \cdot \operatorname{erf} \left( \frac{\pi \cdot b \cdot r^2 + y}{2\sqrt{a \cdot t}} \right) \quad (26)$$

pri čemu je  $T_0$  - početna temperatura;  $r$  - radijalna udaljenost od bušotine,  $b = 2 \cdot K / (\beta \cdot Q)$ , a  $Q_w$  je radijalni obuhvat masenim protokom:  $Q_w = 4\pi \cdot r^2 \cdot q$ .

U vremenu  $t = 0$ , injektiranje hladnog fluida brzinom  $Q$ ,  $kg/s$ , započinje na mjestu  $r = 0$  (u utisnoj bušotini). Specijalan slučaj utiskivanja vode konstantne temperature  $g(t) = A$ , na drugi (sličan) način opisan je u Bödvarsson (1969.) za dvodimenzionalni prostor ( $x, y$ ):

$$T = A \cdot \operatorname{erf} \left( \frac{\alpha \cdot x + y}{2(at)^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (27)$$

gdje su  $A$  oscilacijski parametar za sigmoidnu Gaussovu funkciju  $\operatorname{erf}$ , je parametar svojstava vode koji ovisi o vremenu ( $t$ ), toplinskoj vodljivosti ( $K$ ) gustoći vode ( $\rho_w$ ), specifičnoj toplini vode ( $C_{p,w}$ ) toplinskom kapacitetu i propusnosti stijene:

$$\alpha = \frac{Kt}{\rho_w C_{p,w} k} \quad (28)$$

Parametar  $a$  ovisi o svojstvima stijene, tj., gustoći ( $\rho_r$ ), toplinskom kapacitetu stijene ( $C_{p,r}$ ) i toplinskoj vodljivosti ( $K_r$ ):

$$a = \frac{K_r}{\rho_r C_{p,r}} \quad (29)$$

Pretpostavljajući da je prijenos topline kondukcijom zanemariv u usporedbi s adveksijskim prijenosom, može se pokazati kako hladna fronta napreduje

od utisne bušotine u vremenu  $t$  (Axelsson, 2012.; Bödvarsson, 1972.)

$$r_{cold} = \sqrt{\beta_w \cdot \frac{Q \cdot t}{\pi \cdot H(\rho\beta)}} \quad (30)$$

jer bi proračuni unutar web aplikacije bili prekompleksni (predugo bi trajali) da se računa prostorna raspodjela temperature, a za učinkovit rad organskog Rankineovog ciklusa (ORC) je potrebna konstantna temperatura geotermalnog, tj. primarnog fluida, dovoljno je na temelju prethodnih jednadžbi izdvojiti vrijeme proizvodnje pri konstantnoj temperaturi:

$$t_0 = \left(\frac{V_p}{q_w}\right) \cdot \frac{c_{p,r} \cdot \rho_r}{c_{p,w} \cdot \rho_w} \quad (31)$$

gdje je  $V_p$  volumen pora u ležištu.

Kada je poznato vrijeme bez pothlađivanja proizvedenog fluida, uz poznatu temperaturu i tlak u ležištu, poznata je gustoća fluida (vode) i njen toplinski kapacitet. Unazad može se računati maksimalan protok,  $q_w$ , a iz jednadžbe radijalnog protoka se može izračunati i potreban tlak utiskivanja ( $p_w$ ):

$$q_w = k \cdot \frac{2\pi \cdot h}{\mu} \cdot \frac{p_e - p_w}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} \quad (32)$$

#### 2.4. Model iskorištavanja geotermalne energije indirektnom cirkulacijom fluida

Promatrajući pravokutni koordinatni sustav jednadžba (23) može se izraziti za svaki od smjerova zasebno:

$$q_x = -\lambda \frac{dT}{dx}; \quad q_y = -\lambda \frac{dT}{dy}; \quad q_z = -\lambda \frac{dT}{dz} \quad (33)$$

gdje indeksi  $x$ ,  $y$  i  $z$  označavaju smjer prolaza topline. U slučaju da se promatra cilindrični koordinatni sustav (radijalni prolaz topline), Fourierova jednadžba postaje:

$$q_r = -\lambda_r \frac{\partial T}{\partial r} \quad (34)$$

gdje  $r$  predstavlja radijus. Rješavanjem jednadžbe difuzije, uz poznavanje početnih i graničnih uvjeta i pretpostavkom da je sustav homogen, dolazi se do konačnog izraza koji opisuje prijelaz topline, u pravokutnom sustavu (Ingersoll i Zobel, 1913.):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (35)$$

odnosno, u cilindričnom sustavu:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (36)$$

gdje je  $\rho \cdot c_p$  - specifična volumna toplina,  $J/m^3 \cdot ^\circ C$ ;  $T$  - temperatura,  $^\circ C$ .

Omjer toplinske vodljivosti i specifične volumne topline,  $\frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$ , Kelvin je opisao kao toplinski difuzivitet, koji se obično označava s  $\alpha$ , te ima dimenziju  $m^2/s$ . Dva su glavna modela odnosno analitička rješenja jednadžbe toplinske difuzije, linijski i cilindrični. Rješenja tih modela daju nešto različite vrijednosti, ovisno o graničnim uvjetima koji se primjenjuju. Carslaw i Jaeger (1959.) prikazali su rješenje linijskog prijelaza topline za slučaj toplinskog izvora u nekom mediju. Obzirom na nižu temperaturu stjenke bušotine od medija u kojem se nalazi, ostvaruje se toplinska kondukcija ili provođenje. Pretpostavlja se da je bušotina beskonačno dugačka linija koja se nalazi u homogenom i izotropnom mediju (engl. *Infinite line source model - ILS*). Linijski model opisuje promjenu temperature u funkciji vremena i polumjera bušotine tijekom prijelaza topline. S obzirom da je promjer bušotine relativno mali u odnosu na duljinu izmjenjivača, moguća su određena pojednostavljenja. Također se pretpostavlja da je početna temperatura medija u vremenu  $t=0$ , odnosno prije uspostave toplinskog toka između bušotinskog izmjenjivača i stijene:

$$T(r, t) = T(r, 0) = T_i \quad (37)$$

S obzirom na pretpostavku homogenog i izotropnog medija, temperaturno polje na bilo kojoj udaljenosti  $r$  od bušotine je simetrično u svim smjerovima, prilikom prijelaza topline. Uzevši u obzir granične uvjete, dolazi se do rješenja parcijalne diferencijalne jednadžbe:

$$\Delta T = \frac{q'}{2\pi\lambda} \left( \frac{1}{2} Ei(u) \right) \quad (38)$$

gdje je  $u$  varijabla, koja se definira kao:

$$u = \frac{r^2}{4\alpha t} \quad (39)$$

gdje su  $r$  - radijus,  $m$ ;  $t$  - vrijeme,  $s$ ;  $q'$  - jedinični prijelaz topline,  $W/m$ .

Kod eksploatacije toplinske energije iz stijene ili tla, temperatura na stjenki bušotine se može odrediti pomoću modificirane jednadžbe:

$$T(r, t) = T_i - \frac{q'}{2\pi\lambda} \left( \frac{1}{2} Ei\left(\frac{r_b^2}{4\alpha t}\right) \right) \quad (40)$$

U jednadžbama (39) i (41)  $Ei$  predstavlja eksponencijalni integral, čije rješenje glasi:

$$-E_i(-x) = \int_x^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \quad (41)$$

U slučaju kada vrijedi da je  $x < 0,02$  (Lee, 1982), s greškom manjom od 0,6%, eksponencijalni integral se može pojednostaviti:

$$-E_i(-x) \cong -\ln(e^\gamma x) = \ln\left(\frac{1}{x}\right) - \gamma = \ln\left(\frac{1}{x}\right) - 0,5772 \quad (42)$$

gdje  $\gamma$  predstavlja Eulerovu konstantu koja iznosi 0,5772. Kada vrijedi da je  $(4\alpha t / r^2) > 50$  za slučaj pridobivanja toplinske energije, jednadžba (41) se može izraziti kao:

$$T(r, t) = T_i + \frac{q'}{4\pi\lambda} \left( \ln\left(\frac{e^\gamma r_b^2}{4\alpha t}\right) \right) = T_i + \frac{q'}{2\pi\lambda} \left( \ln\frac{r_b^2}{4\alpha t} + 0,5772 \right) = T_i + \frac{q'}{4\pi\lambda} \left( \ln\frac{r_b^2}{\alpha t} - 0,80907 \right) \quad (43)$$

Da bi se odredila temperatura fluida u izmjenjivaču potrebno je poznavati vrijednosti bušotinskih otpora. Otpor koji bušotina pruža prijelazu topline s medija, naziva se skin. Pojam je analogan pojmu skin u naftnoj industriji, gdje predstavlja bezdimenzijsku vrijednost koja opisuje oštećenje pribušotinske zone. U sustavu gdje se promatra prijelaz topline, skin se definira kao:

$$\Delta T_{skin} = s \left( \frac{q'}{2\pi\lambda} \right) = R_b \cdot q' \quad (44)$$

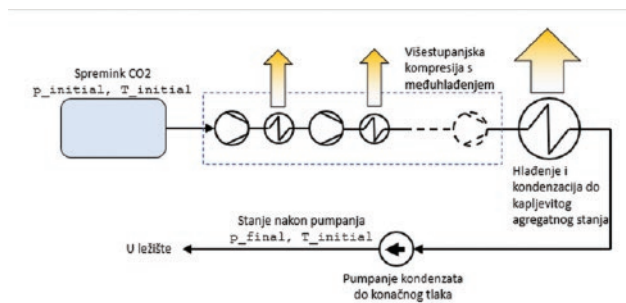
gdje  $R_b \cdot q'$  predstavlja bušotinski otpor prijelazu topline, m °C/W. Odnosno,  $\Delta T_{skin}$ , °C, opisuje otpor koji se mora svladati da bi se uspostavio prijelaz topline između medija i izmjenjivača. Prema tome, krajnji izraz za određivanje temperature radnog fluida, kod eksploatacije toplinske energije glasi:

$$T(r, t) = T_i - \frac{q'}{2\pi\lambda} \cdot \left( 0,5 \cdot E_i\left(\frac{r_b^2}{4\alpha t}\right) \right) - \Delta T_{skin} = T_i + \frac{q'}{4\pi\lambda} \left( \ln\left(\frac{r_b^2}{\alpha t}\right) - 0,80907 \right) - \Delta T_{skin} \quad (45)$$

Jednadžba (45) daje rješenje temperature fluida u revitaliziranoj bušotini pomoću koaksijalnog izmjenjivača za slučaj konstantnog opterećenja sustava. Drugim riječima, pretpostavlja se da se duboki bušotinski izmjenjivač topline koristi cijelo vrijeme korištenja s konstantnim opterećenjem.

## 2.5. Model kompresije CO<sub>2</sub>

Nakon izdvajanja CO<sub>2</sub> iz dimnih plinova elektrane ili nekog drugog energetskog postrojenja, potrebno ga je komprimirati s atmosferskog tlaka pri kojem je



Slika 4. – Shematski prikaz kompresije CO<sub>2</sub> za potrebe injektiranja u ležište (Hrvatska zaklada za znanost, 2018)

u plinovitom stanju do tlaka prikladnog za transport pri kojem je u tekućoj fazi ili veće gustoće, ovisno o temperaturi. Može se pretpostaviti kako je „cut-off“ tlak prilikom kojeg dolazi do zamjene kompresora (plinsko područje) pumpom (plin je komprimiran u kapljevину) jednak kritičnom tlaku CO<sub>2</sub> koji iznosi 7.38 MPa. Stoga, kompresor se koristi u području od 0.1 do 7.38 MPa, a zatim pumpa za kompresiju od 7.38 do željenog završnog tlaka (IEA,2002.).

Slika 4. prikazuje shemu kompresije CO<sub>2</sub> za potrebe injektiranja u ležište pod pretpostavkom da je konačna temperatura jednaka početnoj.

Pretpostavlja se kako je broj stupnjeva kompresije (Nstupnjeva) poznat unaprijed. Mohitpour (2000.) je

dao jednadžbu optimalnog omjera kompresije (CR) za svaki stupanj te ona glasi:

$$CR = \left( \frac{P_{cut-off}}{P_{početni}} \right)^{\frac{1}{N_{stupnjeva}}} \quad (46)$$

Snaga potrebna za kompresiju u svakom stupnju (W<sub>s,i</sub>) dana je sljedećom jednadžbom:

$$W_{s,i} = \left( \frac{1000}{24 \cdot 3600} \right) \left( \frac{m \cdot Z_s \cdot R \cdot T_{in}}{M \cdot \eta_{is}} \right) \left( \frac{k_s}{k_s - 1} \right) \left[ (CR)^{\frac{k_s - 1}{k_s}} - 1 \right] \quad (47)$$

gdje m-maseni protok, t/dan; Z<sub>s</sub>-faktor kompresibilnosti za CO<sub>2</sub> u svakom stupnju kompresije zasebno,-; R-plinska konstanta, kJ/kmolK; T<sub>in</sub> - ulazna temperatura CO<sub>2</sub>, K; M - molekularna masa CO<sub>2</sub>, kg/kmol;



nis- izentropska efikasnost kompresora, -; ks - prosječni toplinski kapacitet u svakom stupnju kompresije zasebno. Parametre za izračun kompresije pomoću gornje jednadžbe treba procijeniti iz dostupnih termodinamičkih tablica za CO<sub>2</sub>, a kako bi se dobila ukupno potrebna snaga za kompresiju, potrebno je zbrojiti snage kompresije svakog pojedinog stupnja.

## 2.6. CO<sub>2</sub> – EOR model

U EU se sve više razmatraju metode korištenja CO<sub>2</sub> za pridobivanje resursa iz podzemlja. Ideja i koncept povećanja ukupnog iscrpka utiskivanjem CO<sub>2</sub> stari su preko 50 godina, a krajem sedamdesetih godina prošlog stoljeća započeti su prvi projekti utiskivanja u SAD. Utiskivanjem CO<sub>2</sub>, dio ugljikovodika prelazi u fazu bogatu s CO<sub>2</sub> (tzv. CO<sub>2</sub> rich gaseous phase), a dio CO<sub>2</sub> se otapa u nafti. Dalje u prostoru od utisne bušotine (CO<sub>2</sub>) do proizvodne bušotine (nafta i plin) dolazi do multikontaktnog otapanja i otplinjavanja ove dvije faze. Drugim riječima, faza bogata s CO<sub>2</sub> će, krećući se od utisne bušotine u tom prostoru imati sve više otopljenih lakih i srednjih ugljikovodika i kao takva će se lakše otapati u nafti.

Na nekoj udaljenosti od utisne bušotine, plinovita faza bogata s CO<sub>2</sub> može potpuno nestati, i tada se kaže da je CO<sub>2</sub> otopljen u nafti. Da bi do toga došlo, moraju biti zadovoljeni neki uvjeti u ležištu, a temeljni kriterij koji određuje da li će se CO<sub>2</sub> otopiti u nafti (ili će utisnuti CO<sub>2</sub> samo povećati tlak u sloju i nemješivo potiskivati naftu, putujući od utisne do proizvodne bušotine nekoliko puta brže od nafte, čime će se i proizvesti velike količine CO<sub>2</sub>) je tlak. Ukoliko je tlak utiskivanja veći od tog rubnog tlaka, proces je mješiv, tj. utiskuje se iznad minimalnog tlaka miješanja (engl. *Minimum Miscibility Pressure*, MMP).

Kod malog broja dostupnih podataka i nepoznatog sastava nafte za proračun MMP može se koristiti neka korelacija, npr. Lee (1979.):

$$\text{MMP} = 1071.82893 \cdot 10^b \times 6894.76 \quad (48)$$

$$b = 2.772 - \left( \frac{1519}{1.8 T} \right) \quad (49)$$

gdje je MMP - minimalni tlak miješanja, Pa; T - temperatura ležišta, K.

Rezultati simulacijske studije vezano uz određivanje minimalnog tlaka miješanja i iscrpka u *slim-tube* testu, na temelju ekstenzivnih laboratorijskih analiza, objavljeni su u Vulin i drugi (2018.). Spoznaje iz ovih rezultata temelj su za prilagođavanje seta podataka

koji se primjenjuje za multiparametarsku simulacijsku analizu kako bi se poboljšao analitički CO<sub>2</sub>-EOR model u ESCOM projektu.

- Utiskivanjem CO<sub>2</sub> postiže se nekoliko bitnih efekata za iscrpak:
- Povećava se tlak u sloju (što s druge strane zahtijeva utrošak energije u kompresiju CO<sub>2</sub> za utiskivanje pri željenim uvjetima);
- Otapanjem CO<sub>2</sub> u nafti, povećava se pokretljivost nafte, tj. smanjuje joj se viskoznost;

Dolazi do tzv. efekta bubrenja (engl. *swelling*) nafte čime se povećava volumen nafte. Time se povećava i volumni udio nafte u sloju, tj. zasićenje naftom, a propusnost za svaki prisutan fluid (plin, nafta, voda) se mijenja sa zasićenjem, tj. što je zasićenje veće, relativna propusnost za taj fluid raste (Vulin, 2018.).

Analiza ovakvog procesa uključuje ekstenzivne laboratorijske studije fluida i ponašanje fluida prilikom utiskivanja CO<sub>2</sub>, zatim simulacijske studije promatranog ležišta nafte uz velik broj scenarija kojima se određuje optimalna brzina utiskivanja CO<sub>2</sub>, tlak utiskivanja te iscrpak.

Analize za definiranje matematičkog modela kojim će se procijeniti dodatni iscrpak (engl. *additional recovery*, AR) i količina zadržanog CO<sub>2</sub> u ležištu, rađene su na temelju numeričkih simulacija hipotetskog ležišta. Hipotetsko ležište (bazni model) je NX=31 · NY=31 · NZ=15 ćelija. Bazni model ima dimenzije DX=26 m, DY=26 m i DZ=5 m. Bitni rezultati simulacijske analize usporedno su prikazani grafički. Analizama su detektirani najbitniji parametri te su rađene daljnje analize osjetljivosti parametara (slika 5.).

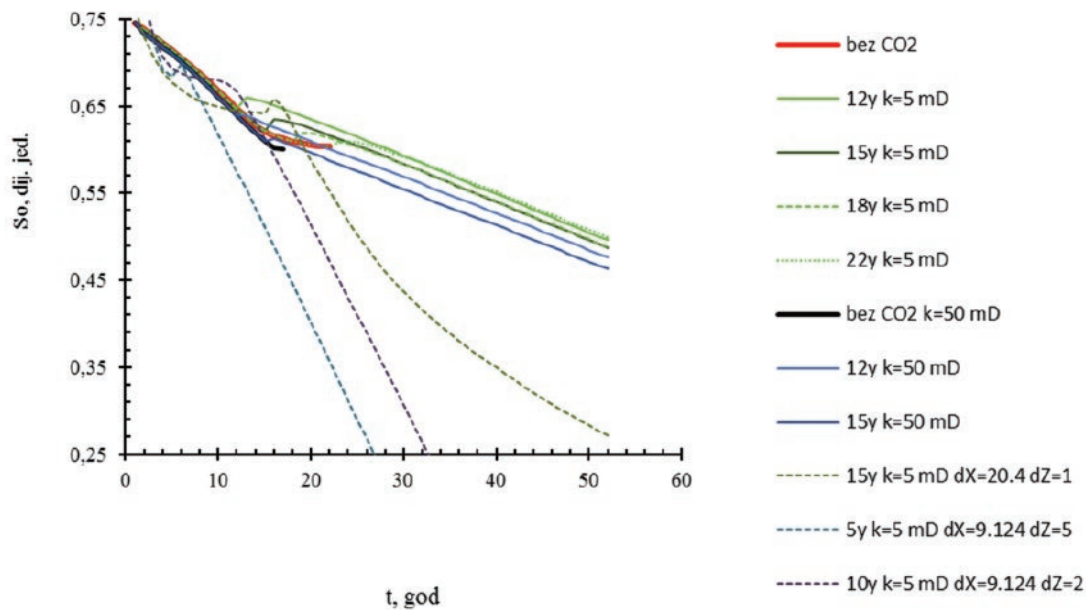
Nizom sličnih analiza i eliminacijom parametara koji manje utječu na rezultate izvedeni su sljedeći zaključci na temelju kojih se izgradio i algoritam za demonstraciju CO<sub>2</sub>-EOR procesa:

Brzina pridobivanja za vrijeme utiskivanja CO<sub>2</sub> je približno jednaka onoj na početku proizvodnje ležišta (za algoritam u modelu opravdano je uzeti jednaku brzinu proizvodnje, kao na početku utiskivanja);

Rast G.O.R. također slijedi stopu porasta G.O.R.-a na početku proizvodnje;

Prosječni molni udio CO<sub>2</sub> u nafti je uvijek manji od 1.5 %. Molni udio nakon postizanja miješanja (2-3 godine) je maksimalno 1.1 %. Ove vrijednosti definirane su na temelju svih razmatranih modela i u svim slučajevima su jako slične;

Konačni molni udio CO<sub>2</sub> u plinskoj fazi kreće se oko (veći volumen ležišta) do 95 %. Ove vrijednosti definirane su na temelju svih razmatranih modela i u



Slika 5. Jedna od simulacijskih analiza slučaja u kojem su crtkano prikazani slučajevi utiskivanja CO<sub>2</sub>

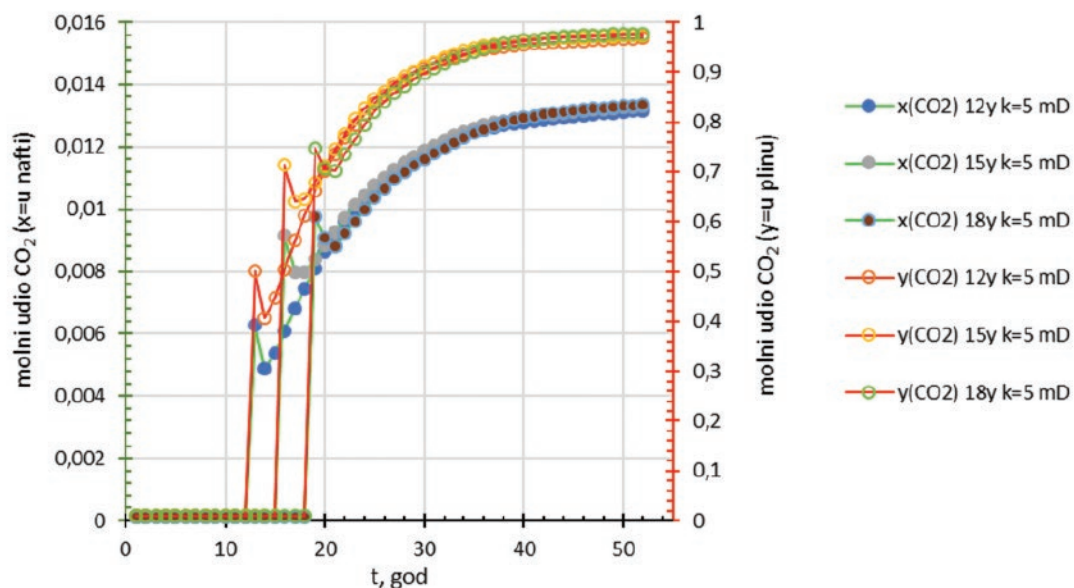
svim slučajevima su jako slične. Količina CO<sub>2</sub> u plinskoj fazi biti će veća ako se kasnije krene s utiskivanjem.

Veći iscrpak (u istom vremenu) dati će veća ležišta. Na ovo pravilo utječe i omjer ukupnog volumena  $V_t$  i horizontalne dimenzije. Tj. omjer vertikalne i horizontalne dimenzije:  $\frac{DZ}{(DX \cdot DY)^{0.5}}$ .

Algoritam ESCOM aplikacije sastoji se od:

1. korelacije za minimalni tlak miješanja,
2. funkcije za određivanje početnog nagiba krivulje kumulativnog iscrpka nafte,

3. određivanja indeksa u matrici proračuna proizvodnje na kojem je prvi tlak iznad 0.5 početnog tlaka,
4. određivanja vrijednosti proizvodnje nafte  $N_p$  u periodu utiskivanja, prema zadanom trendu određenom ad 2,
5. određivanje količine CO<sub>2</sub> zaostalog u ležištu, prema trendu G.O.R. iz podataka u primarnoj fazi proizvodnje te pravilnosti povećanja udjela CO<sub>2</sub> u plinskoj fazi, određenoj na velikom broju simulacijskih slučajevima poput onih na slici 6.



Slika 6. Udio CO<sub>2</sub> (mol, dij. jed.) u sastavu nafte i plinske faze u ležištu i proizvodnoj bušotini

## 2.7. Simulacija kretanja cijena u vremenu

Pindyck (2004.) proučavao je volatilitnost plina i nafte. Zaključio je kako je volatilitnost sirove nafte i prirodnog plina prediktivna. Koristio je opću autoregresivnu uvjetnu heteroskedasticnost (engl. *generalized autoregressive conditional heteroscedasticity*, GARCH model) i procijenio da je volatilitnost sirove nafte u rasponu od 0.2196 do 0.2266. Aatola i dr. (2013.) objasnili su kako predviđanje cijene CO<sub>2</sub> utječe na formiranje zakona i pravilnika, tj. kako se može donijeti zaključke o pouzdanosti, robusnosti i predvidljivosti klimatske politike. Prva faza sheme trgovanja emisijama Europske unije (EU ETS, 2005-2007) bila je faza učenja, gdje prekomjerna raspodjela dozvola na emisije utjecala na tržište i formiranje cijena, što pokazuje visoku volatilitnost, pa čak i nultu cijenu. Tan i Wang (2017.) koriste regresijski pristup kako bi pronašli odnos između cijene CO<sub>2</sub> za sve tri faze EU ETS-a. Naveli su da se za opisivanje ekstremne volatilitnosti koja se može smatrati vrijednostima rizika (VaR) na 99% -tnoj razini signifikantnosti, tj. kao maksimalni gubitak vrijednosti portfelja za određeno vremensko razdoblje, treba upotrijebiti 0,01 kvantil, 0,05 kvantil i 0,95 kvantil.

Drugi trgovinski period (2008-2012) može se kategorizirati kao zreliji, ali ne i prilično aktivan. Volatilitnost se smanjila, a glavni rezultat toga razdoblja bio je da je EU ETS postao čvrsti temelj za ublažavanje klimatskih promjena. Sadašnja faza (2013.-2020.) pokazuje značajke dobrog i funkcionalnog tržišta, s dvije glavne razlike od prethodnih faza: nema besplatne dodjele za proizvodnju električne energije, a industrija može dobiti besplatnu dodjelu prema usklađenim pravilima.

Ako se vremenski niz podataka promatra u nekom vremenskom razdoblju, mogu se promatrati kao slučajne promjene promatranog parametra u vremenu mogućeg ostvarenja zavisne varijable u vremenu.

Ove realizacije mogu obuhvaćati Wienerov proces,  $z(t)$  gdje je odnos promjene u  $z$  ( $\Delta z$ ) u vremenskom intervalu ( $\Delta t$ ) povezan s slučajnom varijablom ( $z$ ,  $N(0,1)$ ), a konačna primjena Wienerovog procesa je u Monte Carlo simulaciji koja uključuje determinističku i stohastičku komponentu:

$$\ln\left(\frac{S_t}{S_{t-1}}\right) = \alpha + z_t\sigma \quad (50)$$

Deterministička komponenta ( $\alpha$ ) sada je trend (engl. *drift*), i konstantna je, a  $z_t$  je slučajni pomak (engl. *random shock*), tj. volatilitnost pomnožena slučajnom varijablom ( $z_t$ ).

Od momenta  $t=0$  sa cijenom u tom momentu  $S_0$  može se pisati:

$$S_t = S_0 e^{\alpha t + z_t \sigma} \quad (51)$$

i time je definirana jednadžba za simulaciju mogućih realizacija cijene nafte, plina ili CO<sub>2</sub>, čime je moguće u konstruirati linije 10, 50, i 90 percentila vjerojatnosti ostvarenja cijene nafte, plina ili CO<sub>2</sub>. Algoritmi za ekonomiku unutar sustava ESCOM su deterministički (pretpostavljena fiksna cijena) i stohastički, prema gore navedenim postavkama. Iako kod za algoritme funkcionira, u fazi je podešavanja na temelju analiza volatilitnosti cijena, te stoga još nije implementiran on-line.

## 2.8. Ostali modeli

Model skladišnog kapaciteta za CO<sub>2</sub> je izrađen prema Vulin (2010.), proračunom materijalnog balansa i svojstava CO<sub>2</sub> pri početku utiskivanja i u uvjetima kad završava utiskivanje CO<sub>2</sub>. Metoda za proračun emisija na baklji je definirana na temelju niza simulacijskih slučajeva i objavljena u radu Karasalihović Sedlar i drugi (2018).

Proračun pada tlaka prilikom višefaznog protoka je izrađen prema Beggs i Brill (1973.) metodi proračuna gradijenta tlaka. U slučaju protjecanja vode ili čistog CO<sub>2</sub>, korelacije za faktor trenja u bušotini nisu adekvatne, te je za tu svrhu posebno razvijen kod na temelju Haalandove korelacije (1983.). Evaluacija mogućnosti pridobivanja toplinske energije iz napuštene bušotine rađena je na temelju proračuna i metode opisane u Macenić i Kurevija (2017.).

## 3. Zaključak

ESCOM projekt je potvrda kako je u ozračju energetskih strategija koje nimalo ne favoriziraju proizvodnju nafte i plina, a isto tako površno ocjenjuju ostale potencijale skrivene u podzemlju, moguće stvoriti utjecaj i prikaz da ti potencijali zaista postoje. Alat u vidu online aplikacije za početne procjene primjene metoda u smislu računanja energije, emisija i troškova bez mjera i istih parametara nakon primjene neke od dostupnih metoda prije svega je namijenjen široj publici, koja najčešće nije niti svjesna svih mogućnosti i opcija smanjenja CO<sub>2</sub> emisija, osobito dijela vezanog uz znanje i iskustvo u naftnoj i plinskoj industriji. Na web stranici nalaze se informativni sadržaji kojima se svim posjetiteljima stranice pokušavaju približiti

principi razmišljanja o tim potencijalima i njihovim procjenama. Aplikacija za registrirane korisnike pohranjuje upisane podatke, te su neki slučajevi stvarnih bušotina (ležišta) već testirani u svrhu podešavanja algoritama i daju približno točne rezultate. Neki od tih podataka se kasnije mogu učitati kao funkcionalni demonstracijski slučaj. Sama aplikacija nije analitički softver za konkretne evaluacije proizvodnje ležišta, iako se na već spomenutim setovima podataka uspješno konfigurirati ulazne podatke tako da se prihvatljivo poklapaju s nekim stvarnim proizvodnim podatcima. Ovakav pristup pomicanja percepcije o naftnoj industriji nije nov - velike naftne kompanije, poput Statoil, Total, BP i sl. uključile su se u velik broj projekata gdje sustavno grade i potvrđuju imidž tzv. »zelenih kompanija«. Uspoređujući financiranje takvih projekata - ESCOM se pokazao kao vrlo efikasan - projekt je trajanja dvije godine, većina financiranja je vezana uz financiranje istraživača, a sličan (svima dostupan) evaluacijski sustav se ne može pronaći niti vezano uz druga tehnička područja u RH, niti općenito vezano uz smanjenje emisija u svijetu.

## Literatura:

1. Aatola, P., Ollikainen, M. i Toppinen, A., 2013. Price determination in the EU ETS market: Theory and econometric analysis with market fundamentals. *Energy Economics*, 36, pp.380-395.
2. Ahmed, T. i McKinney, P., 2011. *Advanced reservoir engineering*. Elsevier.
3. Arnaut, M., 2018. Heat and Mass Transfer in Wells During Multiphase Fluid Production and Injection [PowerPoint prezentacija s predavanja održanog na 31. Ljetnoj školi naftnog inženjerstva]. Dubrovnik
4. Axelsson, G., 2012: The Physics of Geothermal Energy. In: Sayigh A, (ed.) *Comprehensive Renewable Energy*, 7, Elsevier, Oxford, UK, 3-50.
5. Bariss, U., Avenitis, E., Junghans, G. i Blumberga, D., 2016. CO<sub>2</sub> Emission Trading Effect on Baltic Electricity Market. *Energy Procedia*, 95, pp.58-65.
6. Beggs, D.H. i Brill, J.P., 1973. A study of two-phase flow in inclined pipes. *Journal of Petroleum technology*, 25(05), pp.607-617
7. Bødvarsson, G., 1969. On the temperature of water flowing through fractures. *Journal of Geophysical Research*, 74(8), pp.1987-1992.
8. Bødvarsson, G., 1972. Thermal problems in the siting of reinjection wells. *Geothermics*, 1(2), pp.63-66.
9. Brooks, R. i Corey, T., 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Papers, Colorado State University*, 24, p.37.
10. Carslaw, H.S. i Jaeger, J.C., 1959. *Conduction of heat in solids*: Oxford Science Publications (p. 510). Oxford, England.
11. Geertsma, J., Croes, G.A. i Schwarz, N., 1956. Theory of dimensionally scaled models of petroleum reservoirs.
12. Haaland, S. E., 1983. Simple and explicit formulas for the friction factor in turbulent pipe flow. *Journal of Fluids Engineering*, 105(1), 89-90.
13. Hrvatska zaklada za znanost (2018). Drugo redovno izvješće: Rezultati istraživanja nakon 18 mjeseci projekta. Zagreb
14. IEA Greenhouse Gas R&D Programme, "Transmission of CO<sub>2</sub> and Energy," Report no. PH4/6 (March 2002).
15. Ingersoll, L.R. i Zobel, O.J., 1913. *An introduction to the mathematical theory of heat conduction: with engineering and geological applications*. Ginn.
16. Jukić, L., 2018. CO<sub>2</sub> emissions produced by flaring on a mature oil field [PowerPoint prezentacija s predavanja održanog na 31. Ljetnoj školi naftnog inženjerstva]. Dubrovnik
17. Karasalihović Sedlar, D., Vulin, D., Jukić, L. i Smajla, I., 2018. Possibility of decreasing CO<sub>2</sub> emissions from flaring on a mature oil field. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 171, pp.1302-1308.
18. Lee, J., 1982, Well testing, Society of Petroleum Engineers of AIME, SPE.
19. Lee, J.I. 1979. Effectiveness of Carbon Dioxide Displacement Under Miscible and Immiscible Conditions. Research Report PR-40, Petroleum Recovery Inst., Calgary (March 1979.)
20. Lyons, W.C. i Plisga, G.J., 2011. *Standard handbook of petroleum and natural gas engineering*. Elsevier
21. Macenić, M., 2018. CO<sub>2</sub> reduction by using dry wells and abandoned oil and gas wells for geothermal heat energy exploitation by means of closed circulation [PowerPoint prezentacija s predavanja održanog na 31. Ljetnoj školi naftnog inženjerstva]. Dubrovnik

## Diseminacijske aktivnosti projekta

Na otvorenju 31. Ljetne škole naftnog inženjerstva, 4. lipnja 2018., voditelj ESCOM projekta je prezentirao projekt. U sklopu prve radionice Ljetne škole naftnog inženjerstva, 7. lipnja 2018. pred znanstvenom i gospodarskom publikom, održana je radionica ESCOM projekta na kojoj su suradnici projekta održali predavanja (Arnaut, 2018.; Jukić, 2018.; Macenić, 2018.; Saftić, 2018.; Vulin, 2018.) kroz koje su prezentirani izrađeni algoritmi.

Kao rezultat istraživanja ESCOM projekta, do sada su objavljena tri znanstvena rada od kojih je jedan u prestižnom naftnom časopisu *Journal of Petroleum Science and Engineering*.

## Zahvala

Ovaj članak je objavljen u sklopu ESCOM projekta (PKP-2016-06-6917). Projekt financira Fond za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost uz podršku Hrvatske zaklade za znanost.



22. Macenić, M., Kurevija, T., 2017. Revitalization of abandoned oil and gas wells for a geothermal heat exploitation by means of closed circulation: Case study of the deep dry well Pčelić-1. *Interpretation*, 6(1), SB1-SB9.
23. Mohitpour, M., H. Golshan, i A. Murray, "Pipeline Design & Construction: A Practical Approach", The American Society of Mechanical Engineers, New York (2000).
24. Muskat, M., 1945. The Production Histories of Oil Producing Gas-Drive Reservoirs. *Journal of Applied Physics*, 16(3), pp.147-159.
25. Pindyck, R.S., 2004. Volatility in natural gas and oil markets. *The Journal of Energy and Development*, 30(1), pp.1-19.
26. Saftić, B., 2018. Geology and Reduction of Carbon Footprint [PowerPoint prezentacija s predavanja održanog na 31. Ljetnoj školi naftnog inženjerstva]. Dubrovnik
27. Schilthuis, R.J., 1936. Active oil and reservoir energy. *Transactions of the AIME*, 118(01), pp.33-52.
28. Tan, X.P. i Wang, X.Y., 2017. Dependence changes between the carbon price and its fundamentals: A quantile regression approach. *Applied Energy*, 190, pp.306-325.
29. Tracy, G.W., 1955. Simplified form of the material balance equation. *Technical note, Petroleum Branch Office, SPE* 438-G, vol 204. 1955
30. Vulin, D. Modeliranje termodinamičkih i petrofizičkih parametara za geološko skladištenje ugljičnog dioksida. Disertacija. Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2010.
31. Vulin, D., 2018. E-lecture 6: CO<sub>2</sub>-EOR, Enos – Enabling Onshore Storage, ENOS – EU H2020 project: <http://www.enos-project.eu/highlights/e-books/e-lecture-6-co2-eor/> (dostupno 26.05.2018.)
32. Vulin, D. (2018). Optimization of Organic Rankine Cycle for Utilization of Heat Energy from Production Wells [PowerPoint prezentacija s predavanja održanog na 31. Ljetnoj školi naftnog inženjerstva]. Dubrovnik
33. Vulin, D., 2018. Numerical Case Studies for Efficient CO<sub>2</sub> Usage Combined by CO<sub>2</sub> Storage [PowerPoint prezentacija s predavanja održanog na 31. Ljetnoj školi naftnog inženjerstva]. Dubrovnik
34. Vulin, D., 2018. Evaluation System for CO<sub>2</sub> Mitigation [PowerPoint prezentacija s predavanja održanog na 31. Ljetnoj školi naftnog inženjerstva]. Dubrovnik
35. Vulin, D., 2018. ESCOM project [PowerPoint prezentacija s predavanja održanog na 31. Ljetnoj školi naftnog inženjerstva]. Dubrovnik
36. Vulin, D., Gaćina, M., & Biličić, V. (2018). Slim-tube simulation model for CO<sub>2</sub> injection EOR. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 33(2), 37-49.

## Internetske stranice:

1. URL 1: Hrvatska zaklada za znanost, <http://www.hrzz.hr/default.aspx?id=2342> - pristupljeno 22.11.2018.
2. URL 2: ESCOM, <http://escom.rgn.hr/> - pristupljeno 22.11.2018.
3. URL 3: ESCOM, <https://escom-web-app.herokuapp.com> - pristupljeno 22.11.2018.