

# Analiza različitih plinova za primjenu tehnologije podzemnih skladišta energije

---

**Bikić, Ivan**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2020**

*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:169:951758>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-20**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij naftnog rudarstva

**ANALIZA RAZLIČITIH PLINOVA ZA PRIMJENU TEHNOLOGIJE PODZEMNIH  
SKLADIŠTA ENERGIJE**

Diplomski rad

Ivan Bikić

N253

Zagreb, 2020.

ANALIZA PRIMJENE RAZLIČITIH PLINOVA ZA PRIMJENU TEHNOLOGIJE PODZEMNIH  
SKLADIŠTA ENERGIJE

IVAN BIKIĆ

Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko naftni fakultet

Zavod za naftno inženjerstvo

Pierottijeva 6, 10002 Zagreb

Sažetak

Sustavi pohrane energije komprimiranim zrakom (*engl. Compressed Air Energy Systems- CAES*) primjenjuju se za pohranu viška električne energije u obliku potencijalne energije komprimiranog zraka skladištenog u podzemlju. Osnovne komponente CAES tehnologije čine kompresor, koji koristi višak energije proizveden vjetroelektranama za komprimiranje radnog plina, turbine, koje omogućuju ponovnu pretvorbu u električnu energiju uslijed proizvodnje radnog plina iz ležišta i njegove ekspanzije te podzemno skladište radnog plina. Kao konvencionalni radni plin koristi se zrak, no razmatraju se i drugi plinovi tj. tehnologija se promatra u kontekstu primjene bilo kojeg stlačenog plina u podzemlju (*engl. Underground Compressed Gas Energy Storage, UCGES*). Osnovni cilj ovog diplomskog rada bio je odrediti mogućnost primjene CO<sub>2</sub> kao radnog plina u odnosu na zrak, kao i odrediti mogućnost korištenja dubokih akvifera kao skladišta energije za CAES sustave. Simulacijski slučajevi izrađeni su za ležišta poroznosti 20 % u svrhu određivanja ukupne efikasnosti sustava tijekom utiskivanja i proizvodnje zraka i CO<sub>2</sub>. CO<sub>2</sub> pri uvjetima tlaka od  $180 \cdot 10^5$  Pa i temperature 305,15°K tijekom utiskivanja, te  $100 \cdot 10^5$  Pa tijekom proizvodnje, ima 4,3 puta veću gustoću od zraka što dovodi do mogućnosti proizvodnje veće količine električne energije. Iako je količina proizvedene energije veća u slučaju CO<sub>2</sub>, ukupna efikasnost sustava, koja je izražena kao omjer proizvedene i utrošene energije je značajno manja nego u slučaju proizvodnje zraka. Ukupna efikasnost sustava tijekom korištenja CO<sub>2</sub> ne prelazi 20%, dok efikasnost zraka u svim simulacijskim slučajevima prelazi 50%, iako je ukupno proizvedena električna energija u slučaju zraka značajno manja. Kao mogući razlog manje efikasnosti CO<sub>2</sub> su veći maseni protoci tijekom utiskivanja, koji iziskuju veći utrošak energije tijekom komprimiranja.

Ključne riječi: CAES, CO<sub>2</sub>, komprimirani zrak, kompresija, retencija CO<sub>2</sub>, ekspanzija, stupanj efikasnosti

Diplomski rad sadrži: 61 stranice, 6 tablica, 23 slike i 34 reference

Jezik izvornika: hrvatski

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

Voditelj: Dr.sc. Domagoj Vulin, izvanredni profesor, RGNF  
Pomoć pri izradi: Maja Arnaut, mag. ing., RGNF  
Ocjenjivači: Dr.sc. Domagoj Vulin, izvanredni profesor, RGNF  
Dr.sc. Luka Perković, docent, RGNF  
Dr.sc. Daria Karasalihović Sedlar, redovita profesorica, RGNF

Datum obrane : 17.01.2019., Rudarsko-geološko naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

The analysis of application of various gases for the implementation of underground energy storage technologies

Ivan Bikić

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology  
and Petroleum Engineering  
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

#### Abstract

CAES is used for storage of surplus electrical energy produced by wind farms in the form of the potential energy of compressed gas stored underground. Fundamental components of CAES technology are: compressor, which uses surplus electric energy to compress the working gas; turbines, which enable electricity generation by the expansion of the producing gas and underground storage of working gas. Air is used as a conventional working gas for CAES systems, but other gases are also considered, broadening the technology to so called Underground Compressed Gas Energy Storage (UCGES). The main goal of this Master's thesis is to evaluate the possible application of CO<sub>2</sub> as a working fluid. The purpose of all of the simulation cases, in which the total porosity of aquifer was 20 %, was to determine the round trip efficiency of the CAES system during the injection and production cycles of air and CO<sub>2</sub>. At operating pressure of  $180 \cdot 10^5$  Pa and temperature of 305,15°K during injection, and during the production at of  $100 \cdot 10^5$  Pa, the CO<sub>2</sub> has approximately 4,3 times higher density than the air at stated conditions, which leads to higher electricity production, in the case of CO<sub>2</sub>. Although the generated power is higher for CO<sub>2</sub>, the round trip efficiency, calculated as the ratio of produced energy and energy used for compression of the gas, is considerably lower than in the case of air. The round trip efficiency of the system in which the CO<sub>2</sub> is used as a working gas never exceeds 20 %, while in simulated cases where air was used as a working gas, the efficiency is above 50 %, although the total production of electricity is considerably lower. The possible reason for this phenomenon is higher mass flow rates in the case of CO<sub>2</sub> as a working fluid, which requires more energy for the compression of CO<sub>2</sub>.

Key words: CAES, CO<sub>2</sub>, air, compression, CO<sub>2</sub> retention, expansion, efficiency

Thesis contains: 61 pages, 6 tables, 23 figures and 34 references

Original in: Croatian

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

Supervisor: Associate Professor Domagoj Vulin, PhD  
Technical supervision and assistance: Maja Arnaut, mag.ing.petrol.  
Reviewers: Associate Professor Domagoj Vulin, PhD  
Assistant Professor Luka Perković, PhD  
Full Professor Daria Karasalihović Sedlar, PhD

Date of Master Exam: January 17<sup>th</sup> 2020., Faculty of Mining Geology and Petroleum Engineering,  
University of Zagreb

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	I
POPIS TABLICA .....	III
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA STRUČNIH POJMOVA .....	IV
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA .....	V
1. UVOD .....	1
2. OSNOVE CAES TEHNOLOGIJE I RAZLIČITE IZVEDBE CAES SUSTAVA .....	2
2.1. Sustavi koji koriste fosilna goriva ( <i>engl. Supplementary Fired CAES- SF-CAES</i> ) .....	3
2.2. Sustavi koji ne koriste fosilna goriva ( <i>engl. Non-Supplementary Fired CAES- NFS-CAES</i> ).....	3
2.3. Dijabatski CAES sustavi.....	5
2.4. Adijabatski CAES sustavi A-CAES .....	7
2.5. CAES tehnologija za skladištenje ukapljenog zraka (LAES) .....	9
2.6. Izotermalni CAES sustavi I-CAES .....	9
3. PARAMETRI CAES SUSTAVA.....	11
3.1. Tipovi geoloških formacija koje se koriste za skladištenje zraka u primjeni CAES tehnologije.....	11
3.1.1. Naslage slanih stijena za upotrebu CAES tehnologije .....	12
3.1.2. Porozni sustavi - Akviferi .....	13
3.1.3. Rudnici i raspucane nepropusne stijene.....	14
3.1.4. Veza između akvifera i postrojenja .....	14
3.2. Zatvorenost strukture ležišta .....	15
3.3. Stratigrafski zahtjevi.....	15
3.3.1. Tlak frakturiranja krovine .....	16
3.4. Propusnost.....	16
3.5. Poroznost .....	17
3.6. Parametri utiskivanja .....	18
3.6.1. Temperatura utiskivanja .....	18
3.6.2. Dehidracija pribušotinske zone .....	19
3.6.3. Koniranje vode .....	21
3.6.4. Tlak utiskivanja.....	22
3.6.5. Izmjenično utiskivanje i proizvodnja zraka .....	24
3.7. Potencijalni utjecaj CAES operacije na ponašanje ležišta.....	24
3.7.1. Promjena stlačivosti stijena .....	24
3.7.2. Brza i neplanska proizvodnja zraka.....	25
3.8. Površinska oprema CAES sustava .....	25

3.8.1.	Kompresori primijenjivi za utiskivanje zraka i CO <sub>2</sub> .....	25
3.8.2.	Ekspanderi .....	26
4.	ULAZNI PODATCI ZA MODEL HIPOTETSKOG PODZEMNOG SKLADIŠTA ENERGIJE .....	28
5.	ANALIZA REZULTATA SIMULACIJA, UTROŠKA I PRIDOBIVANJA ENERGIJE 30	
5.1.	Kretanje ležišnog tlaka tijekom utiskivanja i proizvodnje CO <sub>2</sub> .....	30
5.2.	Kretanje ležišnog tlaka tijekom utiskivanja i proizvodnje zraka .....	32
5.3.	Promjena zasićenja u ležištu tijekom utiskivanja CO <sub>2</sub> .....	33
5.4.	Utiskivanje zraka .....	36
5.5.	Proizvodnja CO <sub>2</sub> .....	37
5.6.	Proizvodnja vode tijekom proizvodnje zraka .....	41
5.7.	Kompresija CO <sub>2</sub> .....	43
5.7.1.	Proračun energije utrošene na kompresiju CO <sub>2</sub> i energije pridobivene ekspanzijom CO <sub>2</sub> .....	45
5.8.	Kompresija zraka .....	50
6.	DISKUSIJA REZULTATA .....	56
7.	ZAKLJUČAK .....	59
8.	POPIS LITERATURE .....	61

## POPIS SLIKA

<b>Slika 2-1.</b> – Shematski prikaz D-CAES postrojenja .....	6
<b>Slika 2-2.</b> – Shematski prikaz A-CAES postrojenja .....	8
<b>Slika 2.3.</b> Shematski prikaz C-HyPES (lijevo) i O-HyPES (desno) .....	10
<b>Slika 5-1.</b> Kretanje ležišnog tlaka za različite dubine ležišta tijekom radnog ciklusa .....	31
<b>Slika 5-2.</b> Prikaz kretanja tlakova za ležište debljine 40 metara tijekom utiskivanja zraka .....	32
<b>Slika 5-3.</b> Raspodjela zasićenja u ležištu debljine 40 metara nakon utiskivanja CO <sub>2</sub> u trajanju od 1 i 35 dana, te u operativnom periodu, tj. nakon 200, 250 i 500 dana .....	33
<b>Slika 5-4.</b> Vrijednost zasićenja CO <sub>2</sub> nakon 90 dana utisno-proizvodnog ciklusa u ležištu debljine 40 metara.....	34
<b>Slika 5-5.</b> Vrijednosti zasićenja CO <sub>2</sub> u ležištu debljine 40 metara na kraju utisno-proizvodnog ciklusa.....	35
<b>Slika 5-6.</b> Promjena utisnih količina CO <sub>2</sub> kroz 575 dana za ležište debljine 40 metara ....	35
<b>Slika 5-7.</b> Promjena utisnih količina tijekom utiskivanja zraka kroz period od 535 dana za ležište debljine 40 metara.....	36
<b>Slika 5-8.</b> Promjena zasićenja zrakom za ležište debljine 40 metara .....	37
<b>Slika 5-9.</b> Raspodjela zasićenja CO <sub>2</sub> u ležištu 40 metara nakon 200 dana .....	38
<b>Slika 5-10.</b> Grafički prikaz proizvodnje CO <sub>2</sub> iz ležišta debljine 40 metara .....	39
<b>Slika 5-11.</b> Proizvodnja vode tijekom proizvodnje CO <sub>2</sub> iz ležišta debljine 40 metara .....	40
<b>Slika 5-12.</b> Grafički prikaz promjene proizvodnje zraka tijekom simulacije za debljinu ležišta od 40 metara .....	41
<b>Slika 5-13.</b> Promjena proizvodnje vode tijekom proizvodnje zraka iz ležišta debljine 40 metara.....	42
<b>Slika 5-14.</b> Prikaz proizvedene i pridobivene energije za ležište debljine 40 metara u slučaju CO <sub>2</sub> .....	48
<b>Slika 5-15.</b> Kumulativni utrošci energije za različite debljine ležišta tijekom utiskivanja CO <sub>2</sub> .....	49

<b>Slika 5-16.</b> Dijagram p-h korišten za očitavanja specifičnih entalpija zraka prilikom svakog stupnja kompresije.....	52
<b>Slika 5-17.</b> Dijagramski prikaz utrošene i proizvedene energije iz zraka za ležište debljine 40 metara .....	53
<b>Slika 5-18.</b> Ukupno utrošena energija na utiskivanje zraka za sve simulacijske slučajeve .....	54
<b>Slika 6-1.</b> Varijacija brzine protjecanja tijekom prva tri operativna ciklusa .....	56
<b>Slika 6-2.</b> Efikasnost podzemnog skladišta (omjer energije ekspanzije i energije utrošene za kompresiju i pumpanje) pri različitim omjerima površine i efektivne debljine .....	57
<b>Slika 6-3.</b> Analiza retencije CO <sub>2</sub> pokazuje kako će deblji sloj istog volumena davati veću retenciju .....	58



## POPIS TABLICA

<b>Tablica 4-1.</b> Tablični prikaz početnog modela ležišta .....	28
<b>Tablica 4-2.</b> Tablični prikaz parametara ležišta korištenih u simulacijama .....	29
<b>Tablica 5-1.</b> Prikaz parametara za proračun kompresije tijekom utiskivanja CO <sub>2</sub> .....	45
<b>Tablica 5-2.</b> Ukupno utrošena energija za različite debljine ležišta tijekom utiskivanja CO <sub>2</sub> ....	50
<b>Tablica 5-3.</b> Svojstva zraka tijekom kompresije .....	51
<b>Tablica 5-4.</b> Prikaz ukupno utrošene i proizvedene energije za različite debljine ležišta tijekom utiskivanja i proizvodnje zraka .....	54

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA STRUČNIH POJMOVA

OIE- Obnovljivi izvori energije

MWe – električna snaga izražena u megawatima

CAES- sustavi skladištenja komprimiranog zraka (*engl. Compressed Air Energy Systems*)

SF-CAES- sustavi koji koriste fosilna goriva (*engl. Supplementary Fired Compressed Air Energy Systems*)

NSF-CAES- sustavi koji ne koriste fosilna goriva (*engl. Non- Supplementary Fired Compressed Air Energy Systems*)

TES- jedinice za skladištenje topline (*engl. Thermal Energy Storage*)

PHS- reverzibilne hidroelektrane (*engl. Pumped Hydro Storage*)

D-CAES- Dijabatski CAES sustav (*engl. Diabatic Compressed Air Energy Storage*)

A-CAES- Adijabatski CAES sustavi (*engl. Adiabatic Compressed Air Energy Storage*)

SC-CAES- Superkritični CAES sustavi (*engl. Supercritical Compressed Air Energy storage*)

I-CAES- Izotermalni CAES sustavi (*engl. Isothermal Compressed Air Energy Storage*)

C-HyPES - Zatvoreno hidro-pneumatsko skladištenje energije (*engl. Closed Hydro-pneumatic Energy Storage*)

O-HyPES -Otvoreno hidro-pneumatsko skladištenje energije (*engl. Open Hydro-pneumatic Energy Storage*)

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA

A/h - omjer površine i debljine ležišta

CR - omjer kompresije (*engl. Compression Ratio*)

dx - duljina jedne ćelije simulacijskog modela u smjeru osi x [m]

dy - duljina jedne ćelije simulacijskog modela u smjeru osi y [m]

dz - duljina jedne ćelije simulacijskog modela u smjeru osi z [m]

h - debljina ležišta [m]

$h_{izlaz}$  – specifična entalpija na izlazu iz kompresora [kJ/kg]

$h_{izlaz}$  - specifična entalpija na izlazu iz kompresora [kJ/kg]

$h_{ulaz}$  – specifična entalpija na ulazu u kompresor [kJ/kg]

$h_{ulaz}$  - specifična entalpija na ulazu u kompresor [kJ/kg]

$k_h$  – horizontalna propusnost [mD]

$k_v$  - vertikalna propusnost [mD]

m – maseni protok [kg/s]

m - maseni protok fluida [kg/s]

$M_w$  - molarna masa [g/mol]

NX, NY, NZ - broj ćelija ležišnog modela u smjerovima osi x, y i z

$P_1$  – krajnji tlak ekspanzije, [ $1 \cdot 10^5$  Pa]

$p_2$  – tlak na dnu bušotine, [ $100 \cdot 10^5$  Pa]

$P_c$  - maksimalni tlak kompresora [Pa]

$P_e$  - minimalni tlak na ulazu turbine [Pa]

$p_{hydr}$  – hidrostatski tlak CO<sub>2</sub> [Pa]

$P_i$  - inicijalni tlak u ležištu [Pa]

$P_{in}$  – ulazni tlak prvog stupnja kompresije [Pa]

$P_{out}$  – izlazni tlak zadnjeg stupnja kompresije [Pa]

$P_{pumpe}$  – Snaga pumpe [kW]

$p_{pumpe}$  – tlak pumpe potreban za utiskivanje CO<sub>2</sub> [Pa]

$P_r$  - tlak ležišta tijekom radnog ciklusa CAES operacije [Pa]

$p_{ulaz}$  – tlak na ulasku u pumpu,  $74 \cdot 10^5$  [Pa]

$p_{utis}$  – tlak utiskivanja u ležište,  $180 \cdot 10^5$  [Pa]

$Q$  - volumna brzina protjecanja [ $m^3/h$ ]

$R$  - opća plinska konstanta,  $8.4748 \cdot 10^{-5}$  [( $kg/cm^2 \cdot m^3$ )/( $mol \cdot K$ )]

$t$  – vrijeme utiskivanja [s]

$T_{ulaz}$ - temperatura na ulazu pumpe [ $^{\circ}K$ ]

$V_2$ - volumen  $CO_2$  pri tlaku proizvodnje od  $100 \cdot 10^5$  Pa

$V_{idealni}$  - idealni volumen plina [ $m^3$ ]

$V_{realni}$  – realni volumen plina [ $m^3$ ]

$W$ - rad tijekom ekspanzije  $CO_2$  kroz turbinu [J]

$W_c$  - rad kompresora [KJ]

$x$ - duljina ležišta u smjeru x-osi simulacijskog modela [m]

$y$ - duljina ležišta u smjeru y-osi simulacijskog modela [m]

$Z$  - korekcijski faktor za realni plin

$\Delta h$  - promjena specifične entalpije tijekom kompresije [kJ/kg]

## 1. UVOD

Jedan od najvećih problema koji se pojavljuje u dobu intenzivne energetske tranzicije i primjeni obnovljivih izvora energije, preciznije fotonaponskih ćelija i vjetroagregata (geotermalni izvori energije imaju prednost mogućnosti konstantne proizvodnje energije) je uravnoteženje pretvorbe energije iz različitih izvora u el. energiju i potrošnje električne energije, pri čemu se pojavljuje potreba za skladištenjem „viška“ energije koja nastaje u razdoblju kad je potrošnja mala. Koncept podzemnih skladišta energije je već prihvaćen i implementiran u formacijama soli i omogućuje skladištenje velikih količina energije u obliku komprimiranog zraka, uz efikasnost od oko 50 %. Međutim, formacije soli, kao do sad najpovoljniji tip stijene za skladištenje komprimiranog zraka nisu prisutne u svim područjima tj. jedno od ograničenja primjene dotične tehnologije je geološka građa u pojedinim regijama.

Kako se prirodni plin može skladištiti u dubokim akviferima, tako se u znanstvenim krugovima javila i ideja o skladištenju komprimiranog zraka u takvim strukturama. Osjetno manje znanstvenih istraživanja posvećeno je primjeni CO<sub>2</sub> kao radnog medija.

CO<sub>2</sub> bi zbog svojih svojstava trebao biti slabije mobilan u takvom sustavu, što bi značilo moguće lakše stvaranje veće zone zasićenosti utisnutim plinom i time veću mogućnost povlačenja tog plina u periodu pretvorbe energije tog stlačenog plina nazad u električnu. Očita je i mana CO<sub>2</sub> zbog troškova opremanja tj. zbog korozije koja nastaje u dodiru tubinga, CO<sub>2</sub> i vlage, međutim prilikom rada skladišta komprimiranog plina očekuje se i trajno zadržavanje dijela CO<sub>2</sub> u ležištu, što znači potencijalnu dobit i dodanu vrijednost cijelog sustava.

Analize u ovom diplomskom fokusirane su na performansu ležišta tj. dubokog akvifera u ulozi podzemnog skladišta energije prilikom utiskivanja zraka i CO<sub>2</sub>, uz hipotezu da postoje akviferi takvih petrofizikalnih svojstava da skladištenje komprimiranog CO<sub>2</sub> može biti povoljnija opcija nego skladištenje komprimiranog zraka.

## 2. OSNOVE CAES TEHNOLOGIJE I RAZLIČITE IZVEDBE CAES SUSTAVA

Glavni razlog sve intenzivnijeg istraživanja sustava pohrane električne energije u svijetu je sve veći porast udjela obnovljivih izvora energije (OIE) u proizvodnji električne energije. Iako se, zbog normi koje zahtijevaju smanjenje emisija stakleničkih plinova, OIE prezentiraju kao najbolje rješenje za generaciju električne energije, OIE imaju također određene probleme koje nije jednostavno eliminirati. Varijacije u proizvodnji električne energije, ovisno o vremenskim uvjetima, najveći su problem u kontekstu uravnoteženja potrebe za električnom energijom i njene dostupnosti. Mreža električne energije mora odgovarati na niz izazova, poput viška električne energije u sustavu (što se može reflektirati i na nestabilnost frekvencije struje), a sami manjak električne energije u sustavu direktno utječe na krajnje potrošače. Upravo ova dva čimbenika obnovljivih izvora energije glavni su pokretač istraživanja i investicija u sustave za pohranu električne energije u budućnosti. Sustavi skladištenja električne energije (*engl. Energy Storage Systems*) omogućavaju pohranu viška električne energije te na taj način smanjuju opterećenje mreže zbog učestalih promjena proizvedene energije pomoću OIE. Glavna prednost sustava skladištenja energije jest njihova fleksibilnost u vidu mogućnosti efikasnog odvajanja proizvodnje i potrošnje električne energije što osigurava dovoljnu količinu skladištene energije koja može eliminirati varijacije u proizvodnji električne energije pomoću obnovljivih izvora energije (Tola, et al., 2017). Poznate tehnologije sustave skladištenja energije su (Carneiro, et al., 2019):

- skladištenje energije zamašnjakom (*engl. Flywheels*),
- baterije,
- skladišta toplinske energije (*engl. Thermal Energy Storage, TES*),
- skladištenje vodika (*engl. Hydrogen Storage*),
- skladištenje komprimiranog zraka (*engl. Compressed Air Energy Storage, CAES*),
- reverzibilne hidroelektrane (*engl. Pumped Hydro Storage*),
- metanacija CO<sub>2</sub> i podzemno skladištenje (*engl. Power to Gas + Underground Storage*).

Prema (Carneiro, et al., 2019), sustavi skladištenja energije, s obzirom na snagu postrojenja, dijele se na sustave velike snage, srednje snage i male snage. Sustavi velike snage su postrojenja kapaciteta većeg od 100 MWe, sustavi srednje snage su kapaciteta od

10-100 MWe, dok sustavi male snage imaju kapacitet proizvodnje do 10 MWe. Postrojenja velikog kapaciteta predstavljaju najbolje rješenje za osiguravanje energetske sigurnosti jer imaju najveću mogućnost uravnoteženja potražnje i potrošnje (Carneiro, et al., 2019). CAES sustavi također se mogu klasificirati s obzirom na činjenicu da li su fosilna goriva potrebna za generaciju električne energije. Obzirom na ovisnost o fosilnim gorivima klasifikacija je slijedeća (Laijun, et al., 2016):

### **2.1. Sustavi koji koriste fosilna goriva (engl. *Supplementary Fired CAES- SF-CAES*)**

Kao što i samo ime govori, ovi sustavi za generaciju električne energije prije ekspanzije zraka zahtijevaju miješanje zraka sa prirodnim plinom i sagorijevanje takve smjese kako bi se proizvela maksimalna količina električne energije. Tehnologija je slična tehnologiji plinske turbine, ali osnovna razlika jest odvajanje procesa kompresije i ekspanzije kod SF-CAES sustava u kojima se zrak prvo komprimira i pohranjuje u spremniku, a proizvodi se samo onda kada je potrebno kako bi se zadovoljila potrošnja električne energije. Konvencionalni D-CAES sustav pripada ovoj klasifikacijskoj skupini.

### **2.2. Sustavi koji ne koriste fosilna goriva (engl. *Non-Supplementary Fired CAES- NFS-CAES*)**

NSF-CAES sustavi skladište određeni dio toplinske energije nastale tijekom kompresije zraka koja se u SF-CAES sustavima odbacuje u atmosferu. Tipični dizajn NSF-CAES sustava uključuje adijabatsku kompresiju sa jednostupanjskom izmjenom topline ili višestupanjskom pohranom topline u TES jedinicama (engl. *Thermal Energy Storage*). U ovakvim sustavima grijanje zraka može se ostvariti tijekom izmjene topline ekspanzirajućeg zraka i TES stanice, dok se po završetku ekspanzije zrak iz turbine može koristiti za prijenos topline komprimiranog zraka u TES stanicu i na taj način je to u potpunosti zatvoreni sustav bez utjecaja na atmosferu. Tipovi izvedbi CAES tehnologije koji se ubrajaju u NSF-CAES su adijabatski A-CAES, superkritični SC-CAES te LAES . Najzastupljeniji sustav skladištenja energije u svijetu je PHS (engl. *Pumped Hydro Storage*) te baterije za pohranu električne energije, odnosno elektrokemijski akumulatori. U svijetu sustavi skladištenja energije imaju kapacitet od 130 GW, a od tih 130 GW instaliranog kapaciteta, 99% predstavljaju PHS sustavi (Tola, et al., 2017). PHS sustavi skladište gravitacijsku potencijalnu energiju premještanjem vode s niže nadmorske visine na višu nadmorsku visinu. Ciklus PHS sustava može se podijeliti u dvije faze:

1. Električna energija se pretvara u mehaničku energiju te u konačnosti u gravitacijsku potencijalnu energiju pomoću pumpi koje premještaju vodu iz spremnika na nižoj nadmorskoj visini u spremnik na koji se nalazi na višoj nadmorskoj visini.
2. Obrnutim procesom, potencijalna gravitacijska energija vode se pretvara u mehaničku energiju i zatim u električnu energiju na način da se voda ispušta iz spremnika na višoj nadmorskoj visini u spremnik na nižoj nadmorskoj visini. Tijekom kretanja vode s više na nižu lokaciju, voda pokreće turbine koje su svojim osovinama povezane sa generatorom i na taj način se generira električna energija pomoću PHS sustava (Barbour, et al., 2016). Glavni problem PHS sustava je što mogu biti izvedivi samo u određenim geološkim područjima u kojima je moguće izgraditi dva spremnika, jedan na višoj i jedan na nižoj nadmorskoj visini, kao i veliko financijsko ulaganje u jedan takav projekt. Kao alternativa PHS sustavima nameću se CAES sustavi iz razloga što CAES postrojenja, uz PHS tehnologiju, jedini imaju mogućnost proizvodnje el. energije snage veće od 100 MW koja je potrebna za pokrivanje vršne potrošnje (engl. *Peak Shaving*). CAES sustavi koriste geološke formacije, poput solnih doma ili drugih poroznih formacija, za skladištenje zraka ili CO<sub>2</sub> kao radnog fluida (Carneiro, et al., 2019). Također, podzemno skladištenje plinova daje dodatnu ekonomsku vrijednost podzemnim ležištima, u ovom slučaju skladištima, kao što su porozni sustavi poput akvifera, napuštenih tunela ili rudnika. CAES postrojenje skladišti energiju utiskivanjem komprimiranog zraka u određenu geološku formaciju. Kad je potrebno proizvesti električnu energiju, komprimirani zrak ekspanira iz skladišta kroz turbinu, koja je svojom osovinom povezana s generatorom, i na taj način proizvodi električnu energiju (Carneiro, et al., 2019). CAES postrojenje sastoji se od kompresora, spremnika za skladištenje komprimiranog zraka, ekspandera, električnog motora, generatora te sustava za grijanje zraka koji ekspanira iz skladišnog spremnika kroz turbinu (Tola, et al., 2017). Za pokretanje kompresora koristi se višak električne energije koji je proizveden pomoću obnovljivih izvora energije tj. koristi se jeftinija električna energija (tj. tzv. jalova energija) koja je proizvedena najčešće u noćnim satima, a generacija struje pomoću CAES postrojenja se može koristiti za pokrivanje vršne potrošnje energije ili u slučaju kada je cijena električne energije veća, i na taj način maksimizira se profit ovakvih postrojenja. Koncept ovih postrojenja je vrlo zanimljiv istraživačima iz razloga što su geološke formacije koje su podobne za skladištenje radnog fluida, zraka ili CO<sub>2</sub>, puno pristupačnije nego u slučaju PHS postrojenja koja ovise o podobnom terenu za gradnju ovih postrojenja. Isto tako cijena je puno manja za CAES postrojenja nego za PHS



postrojenja i upravo je to prednost CAES tehnologije zbog koje bi mogla postati najznačajniji oblik skladištenja energije u budućnosti. Od prvih CAES postrojenja koja su izgrađena 1970-tih, ostvaren je značajan napredak u vidu izvedbe CAES postrojenja, pa tako danas postoji veliki broj izvedbi ove tehnologije kao što su (Wang, et al., 2017):

- Dijabatski CAES sustav (engl. Diabatic Compressed Air Energy Storage – D-CAES)
- Adijabatski CAES sustavi (engl. Adiabatic Compressed Air Energy Storage – A-CAES)
- Superkritični CAES sustavi (engl. Supercritical Compressed Air Energy storage – SC-CAES)
- Izotermalni CAES sustavi (engl. Isothermal Compressed Air Energy Storage- I-CAES)

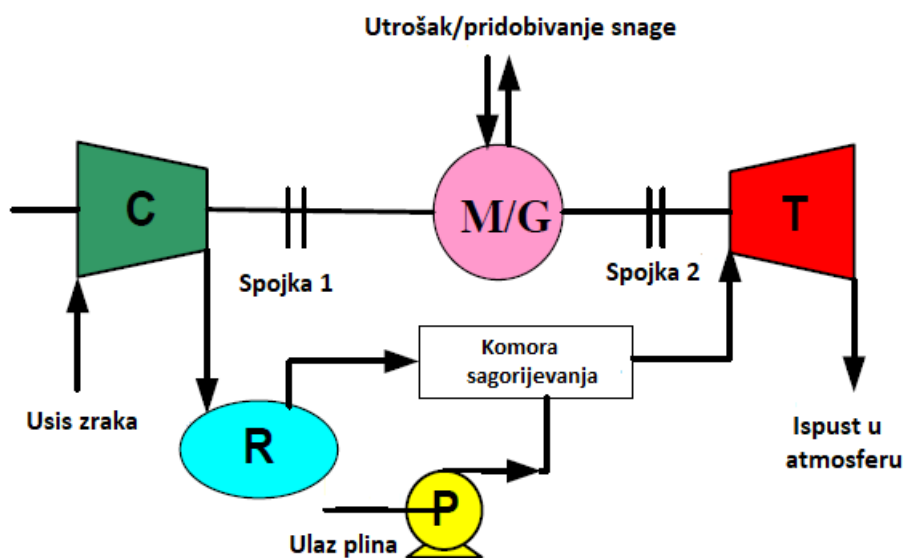
Svi navedeni koncepti biti će opisani u slijedećim odlomcima. Gore navedeni sustavi prikazuju najznačajniji napredak tehnologije i najintenzivnija istraživanja su upravo na ovim konceptima. Od ostalih metoda važno je navesti slijedeće (He i Wang, 2018):

- CAES tehnologija sa skladištenjem tekućeg zraka (*engl. Liquefied Air Energy Storage – LAES*).
- CAES sustav sa dodavanjem vlage komprimiranom zraku (*engl. Compressed Air Energy Storage with Humidification - CASH*)
- Skladištenje komprimiranog zraka pod vodom (*engl. Under Water Compressed Air Energy Storage - UWCAES*)

### **2.3. Dijabatski CAES sustavi**

Dijabatski CAES sustavi skladište energiju u obliku komprimiranog zraka i pretvaraju potencijalnu energiju komprimiranog zraka prvotno u mehaničku energiju u obliku rotacije osovine ekspandera, a zatim u električnu energiju pomoću generatora vezanog na osovinu ekspandera. Kompresija zraka se vrši pomoću visokotlačnih kompresora, jednog ili više njih, tijekom perioda niske potražnje električne energije, noćni period ili u slučaju viška proizvedene električne energije. Zatim komprimirani zrak pod visokim tlakom ekspandira kroz ekspander i na taj način se generira električna energija. Shodno tome, kompresija se odvija tokom manje potražnje ili viška proizvedene električne energije, dok se ekspanzija koristi za pokrivanje vršne potrošnje i potražnje. Dijabatski CAES proces temelji se na principu plinske turbine. Osnovne komponente D-CAES sustava su:

kompresor, ekspander/turbina i komora za sagorijevanje. Tijekom faze ekspanzije, komprimirani zrak pod visokim tlakom expandira kroz ekspander, ali prije ekspandera bitno je povećati temperaturu zraka kako bi se proizvela maksimalna snaga. Iz tog razloga prije ulaska u ekspander u D-CAES sustavu, zrak ulazi u komoru sagorijevanja gdje se miješa sa prirodnim plinom i sagorijeva (Slika 2-1). Na taj način povećava se količina rada koju sustav može obaviti i povećava se proizvedena snaga sustava (Wang, et al., 2017).



**Slika 2-1.** Shematski prikaz D-CAES postrojenja (preuređeno od Wang, 2017.)

Danas postoje dva operativna (komercijalna) D-CAES postrojenja. Prvo postrojenje se nalazi u gradu Huntorf u Njemačkoj i operativno je od 1978. godine. Potrebna snaga kompresora iznosi 60 MW dok proizvodni kapacitet jedinice za proizvodnju energije iznosi 321 MW. Postrojenje Huntorf pripada SF-CAES sustavima, a komprimirani zrak skladišti se u solnoj domi na dubini od 600 metara čiji volumen iznosi  $310\,000\text{ m}^3$  pri tlaku od  $50\text{--}70 \cdot 10^5\text{ Pa}$ . Ciklus utiskivanja traje 8 sati dok proizvodnja električne energije traje 2 sata. Iskoristivost postrojenja iznosi 42% upravo zbog korištenja prirodnog plina za generaciju električne energije (Laijun, et al., 2016). Drugo postrojenje nalazi se u gradu McIntosh u saveznoj državi Alabami. Operativna snaga kompresora iznosi 50 MW, dok proizvodni kapacitet iznosi 110 MW. Postrojenje je dizajnirano za utiskivanje zraka do 41 sata, dok proizvodnja električne energije traje 26 sati. Zrak se također skladišti u solnoj domi na dubini od 450 metara te pri operativnom tlaku od  $45\text{--}75 \cdot 10^5\text{ Pa}$ . D-CAES sustavi su prvi te

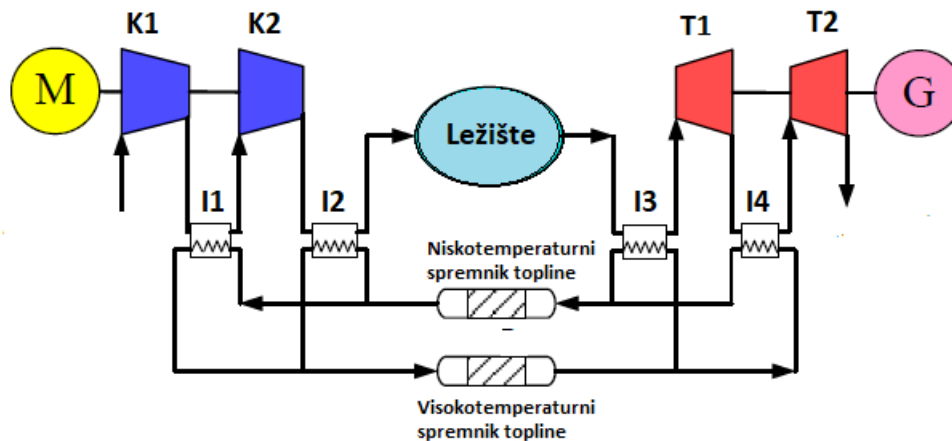
stoga imaju relativno nisku iskoristivost. Iskoristivost D-CAES sustava može se povećati ukoliko se pohrani određeni dio topline koja je generirana tijekom kompresije zraka ili nakon ekspanzije kroz turbinu kada izlazna temperatura zraka zbog sagorijevanja još uvijek ima dosta veliku vrijednost. U sustavima gdje je rekuperator dodan kako bi preuzeo toplinu izlaznog zraka iz ekspandera, značajno se smanjuje potrošnja fosilnih goriva. Razlog tomu je što se ulazna temperatura u ekspander može povećati sa 59°C na 469°C. Ovakav sustav koristi se na postrojenju McIntosh što je uzrokovalo povećanje ukupne efikasnosti sustava sa 42%, kod Huntorf postrojenja, na 54% (Shengi, et al., 2018). Jedan od načina povećanja efikasnosti D-CAES sustava jest skladištenje određenog dijela topline u samom ležištu. Parametri na koje utječe skladištenje topline u ležištu su (Allen, et al., 1983):

- Za D-CAES sustav, veća temperatura skladištenja smanjuje količinu fosilnih goriva potrebnih za generaciju električne energije,
- Umanjuje ovisnost profita D-CAES postrojenja o promjeni cijena fosilnih goriva,
- Pospješuje dehidraciju pribušotinske zone i
- Povećava eksurgiju sustava.

#### **2.4. Adijabatski CAES sustavi A-CAES**

Tijekom kompresije zraka nastaje značajna količina topline uzrokovana kompresijom zraka koja se u adijabatskom CAES procesu ispušta u atmosferu pomoću izmjenjivača topline. Kao što je i navedeno u prethodnom odlomku, u fazi ekspanzije potrebna je velika količina topline kako bi se povećala snaga postrojenja, a najčešći izvor dodatne topline je sagorijevanje fosilnih goriva, poput prirodnog plina, kako bi se povećala temperatura zraka prije ekspanzije. U tom pogledu, korištenje topline koja se u adijabatskom procesu gubi jer se odbacuje u atmosferu, može značajno povećati korisnost cjelokupnog procesa. U A-CAES procesu za skladištenje te topline koristi se jedinica za skladištenje toplinske energije (*engl. Thermal Energy Storage- TES*). Pomoću TES jedinice toplina generirana kompresijom zraka se skladišti i koristi za predgrijavanje zraka prije ekspandera. Uz TES jedinicu dodatak u A-CAES sustavima u odnosu na D-CAES sustave su izmjenjivači topline između svakog stupnja kompresije, a njihov glavni zadatak je preuzimanje topline nastale kompresijom i prijenos te iste topline u TES jedinicu. Jednako tako, uloga izmjenjivača topline u fazi ekspanzije jest preuzimanje topline iz TES jedinice i predavanje

te topline radnom fluidu prije ekspanzije. Uporabom TES jedinice i izmjenjivača topline eliminira se potreba za fosilnim gorivima, a ta činjenica najviše utječe na povećanje efikasnosti cjelokupnog sustava. Teoretska iskoristivost cijelog sustava može iznositi 70 % i više, što predstavlja značajan napredak u odnosu na D-CAES čija je iskoristivost iznosila od 42-54%.



**Slika 2-2.** Shematski prikaz A-CAES postrojenja (preuređeno od Wang, 2017.)

A-CAES sustav je složeniji od D-CAES sustava (slika 2-2.), a jednako tako da postoji više stupnjeva kompresije i ekspanzije. Prema Yang et.al. (2016), manji broj stupnjeva kompresije pri jednakom tlaku ekspanzije za rezultat imaju veći snagu koja je generirana procesom, dok veći broj stupnjeva ekspanzije pri jednakom tlaku kompresije također rezultiraju većom proizvedenom snagom u procesu. Ukoliko se u potpunosti eliminira korištenje prirodnog plina za predgrijavanje ostvaruje se ekološki prihvatljiv projekt i samim time znatno utječe na profitabilnost projekta. Izostavljanjem sagorijevanja znači da su temperature ulaznog zraka u ekspander znatno manje a samim time i snaga električne energije će biti manja. Primjera radi, u A-CAES sustavu sa TES jedinicom ulazna temperatura zraka može iznositi  $599,15^{\circ}\text{K}$  te količina proizvedene energije iznosi 41MW. Uspoređujući tu vrijednost s istim sustavom koji koristi iste kompresore i ekspandere te jednak broj stupnjeva kompresije i ekspanzije i komoru za sagorijevanje proizvedena snaga iznositi će 71 MW što predstavlja veliku razliku. Vrijeme pokretanja A-CAES postrojenja, odnosno postizanje radnih uvjeta, može trajati 15-30 minuta jer je potrebno više vremena kako bi se postigla željena temperatura nego u slučaju sagorijevanja (Amirlatifi, et al., 2019).

## 2.5. CAES tehnologija za skladištenje ukapljenog zraka (LAES)

LAES (*engl. Liquid air energy storage*) je podvrsta CAES sustava kojoj je cilj povećati gustoću skladištene energije. Gustoća energije se definira kao količina energije koja je skladištena u nekom sustavu u odnosu na volumen tog sustava. Glavna karakteristika LAES-a je da se zrak skladišti u tekućem stanju. Ovaj sustav se također dijeli na dvije faze, u prvoj fazi zrak kompresijom prelazi u tekuće stanje te skladišti u spremniku niske temperature, dok u fazi ekspanzije zrak ekspanzira kroz turbinu (He i Wang, 2018.). Iako je gustoća energije u LAES sustavima i do 20 puta veća nego u konvencionalnim CAES sustavima, iskoristivost LAES sustava je vrlo niska i iznosi do 45%. Niska efikasnost LAES sustava i mali proizvodni kapacitet snage su razlog zbog kojeg nema primjene LAES sustava.

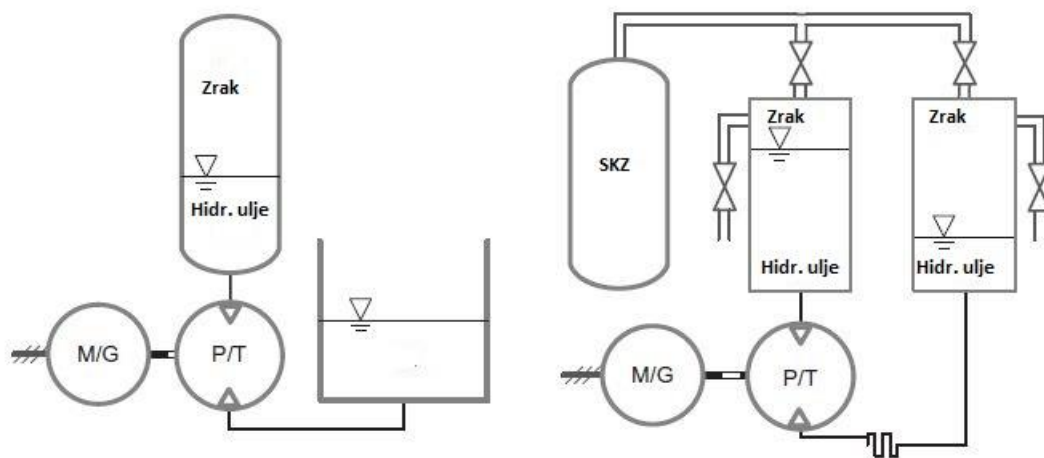
## 2.6. Izotermalni CAES sustavi I-CAES

Zamisao I-CAES sustava je sprječavanje povećanja temperature zraka tijekom kompresije te pada temperature tijekom faze ekspanzije. Svi dosadašnji I-CAES sustavi bazirani su na klipnim strojevima u kojima se kompresija ili ekspanzija odvija izrazito sporo što ostavlja dovoljno vremena da se proces izmjene topline odvije unutar samog stroja. Ovakav tip izmjene topline moguć je ukoliko unutar određenog stroja nalaze dodatni elementi za izmjenu topline ili pomoću tekućih klipova. Drugi način je utiskivanje tekućine unutar kompresijske komore. Koncept I-CAES sustava prvi put je implementiran u sustavima hidro-pneumatskog skladištenja energije (*engl. Hydro-pneumatic Energy Storage- HyPES*). Postoje dva sustava hidro-pneumatskog skladištenja energije a to su:

1. Zatvoreno hidro-pneumatsko skladištenje energije (slika 2-3, *engl. Closed Hydro-pneumatic Energy Storage- C-HyPES*) i
2. Otvoreno hidro-pneumatsko skladištenje energije (slika 2-3, *engl. Open Hydro-pneumatic Energy Storage- O-HyPES*)

U slučaju C-HyPES sustava skladištenje energije postiže se pumpanjem tekućine, najčešće hidrauličkog ulja, unutar spremnika u kojem se nalazi zrak. Utiskivanje hidrauličkog ulja smanjuje volumen zraka u spremniku i na taj način ostvaruje se povećanje tlaka unutar spremnika. U slučaju kada je potrebno proizvoditi energiju, omogućava se ekspanzija komprimiranog zraka na način da se dozvoljava kretanje hidrauličkog ulja u suprotnom smjeru od smjera kretanja hidrauličkog ulja tijekom utiskivanja. Tijekom reverzibilnog protjecanja ulja ono prolazi kroz pumpu i na taj način dolazi do generiranja električne

energije. U C-HyPES pumpa može obavljati funkciju i kompresije i ekspanzije. Najveći problem C-HyPES sustava je mala gustoća energije te iz tog razloga ovakvih sustava nema u praktičnoj uporabi. O-HyPES rješavaju problem male gustoće energije C-HyPES. U O-HyPES sustavima zrak je komprimiran pomoću tekućeg klipa prije ulaska u spremnik komprimiranog zraka (*engl. Compressed Air Storage*) pri visokom tlaku. Ovakav sustav zahtijeva rad barem dva naizmjenična tekuća klipa (*engl. Liquid Piston*). U klipove tekućina se može utiskivati ili istjecati iz njih, dok sustav ventila omogućava cikličko kretanje zraka. O-HyPES sustavi su primjenjivani u praksi, a prvo postrojenje izrađeno je 2012. godine u Texasu.



**Slika 2-3.** Shematski prikaz C-HyPES (lijevo) i O-HyPES (desno) (Budt, et al., 2016)

### 3. PARAMETRI CAES SUSTAVA

Uvjeti skladištenja zraka ili CO<sub>2</sub> slični su uvjetima skladištenja prirodnog plina. Nepropusna stijena, krovina koja onemogućava vertikalno kretanje fluida, porozna stijena te određena vrsta strukturne zamke su potrebni kako bi sustav skladištenja mogao funkcionirati. S geološkog stajališta, to su najčešće pješčenjaci natkriveni nepropusnim šejlom ili određenom vrstom nepropusne karbonatne stijene. Postoje razlike između skladištenja prirodnog plina i zraka (Allen, et al., 1983):

- Skladištenje, odnosno ciklusi utiskivanje i proizvodnje, odvijaju se svakodnevno,
- Zrak ima veću viskoznost od prirodnog plina,
- Skladištenje zraka pri visokim temperaturama je poželjno radi povećanja iskoristivosti i proizvodnje više energije,
- Učestale promjene tlaka, temperature i vlažnosti mogu utjecati na ponašanje akvifera i krovinske stijene i
- Kemijske reakcije, zbog prisutnosti kisika u zraku, mogu rezultirati oksidacijom minerala.

Tlak skladištenja je određen radnim karakteristikama kompresora i ekspandera te ekonomskim čimbenicima koji diktiraju profitabilnost projekta.

#### **3.1. Tipovi geoloških formacija koje se koriste za skladištenje zraka u primjeni CAES tehnologije**

Geološke formacije koje se koriste za skladištenje prirodnog plina su odavno poznat koncept u sustavu skladištenja za pokrivanje vršne potrošnje plina tijekom zime, ali u vidu CAES tehnologije koja je još u začetku, podzemno skladištenje zraka nije u potpunosti istraženo. Podzemno skladištenje zraka za potrebe CAES tehnologije je bitno iz razloga što podzemno skladištenje, pogotovo u poroznim sustavima, je jedini način da se osigura dovoljni kapacitet proizvodnje električne energije, što rješava problem maloga kapaciteta, a druga prednost je ta što omogućavaju dugoročno rješenje za pohranu energije jer nisu kratkog životnog vijeka kao npr., litij-ionski sustavi baterija. Prethodno navedeni sustavi podzemnog skladištenja energije prema (Carneiro, et al., 2019), spadaju u sustave koji imaju mogućnost proizvodnje snage veće od 100 MWe, i upravo takvi sustavi su od ključnog značenja za implementaciju sustava skladištenja energije iz razloga što zbog svog velikog kapaciteta omogućavaju bolje upravljanje mrežom električne energije, osiguravaju energetske sigurnost, uspostavljaju ravnotežu između potražnje i potrošnje

energije te ubrzavaju put prema gospodarstvima sa niskim udjelom fosilnih goriva u generaciji električne energije i što je najvažnije osiguravaju prednosti poput pouzdanosti sustava, optimiziranje prijenosa energije te povećanje kvalitete i iskoristivosti cjelokupnog sustava. Glavni razlog za sve širom implementacijom ove tehnologije u budućnosti je regulatorne prirode jer prema odredbama Europske Unije kako bi se do 2050-te godine spriječio porast globalne temperature ispod 2°C, skladišni kapacitet energije u EU bi se trebao povećati s trenutnih 45 GW na 70-220 GW skladištene energije, uz proizvodni kapacitet između 1500-5500 GWh proizvedene električne energije (Carneiro, et al., 2019). Formacije koje su podobne za implementaciju CAES tehnologije i skladištenje zraka su (Carneiro, et al., 2019):

- Naslage slanih stijena,
- Porozne stijene te
- Rudnici i raspucane nepropusne stijene.

### ***3.1.1. Naslage slanih stijena za upotrebu CAES tehnologije***

Stijene u podzemlju mogu formirati ili duge horizontalne formacije debljine od nekoliko centimetara do nekoliko stotina metara, ili mogu postojati u obliku vertikalnih struktura npr., solne dome. Formacije soli (engl. *salt rock reservoirs*) su karakteristične po tome što imaju izrazito malu propusnost, što osigurava visoko kvalitetno zadržavanje komprimiranog plina unutar takvih formacija, sprječavajući velike gubitke zraka iz ležišta (Carneiro, et al., 2019). Ukoliko ne postoji, prirodnim načinom formirana kaverna za skladištenje zraka, tada se koristi tehnologija iskapanja soli, koja uključuje utiskivanje vode u formaciju soli, otapanje te soli i njena proizvodnja na površini u vidu otopine soli. Iako je moguće koristiti i horizontalne formacije soli za skladištenje zraka, njihova obrada je puno zahtjevnija od solnih doma formacija. Sa stajališta kemijskog sastava, formacije halita (NaCl) predstavljaju najbolju opciju iz razloga što je halit visoko topiv, plinotjesan, odnosno nepropustan za plinove, te ukoliko raspon deformacija nije izrazito velik, on se deformira tečenjem a ne krhkom deformacijom koja povećava propusnost slojeva koji nisu bili u kontaktu sa skladištenim plinom prije deformacije (Parkes, et al., 2018). Jedina dva operativna CAES postrojenja, Huntorf i McIntosh upravo koriste formacije soli za skladištenje zraka i trenutno ovakav tip skladištenja, uz trenutna istraživanja, predstavlja najbolju opciju za CAES operacije. Iako za sada predstavlja najbolju opciju, skladištenje u formacijama soli ima jednako tako i svoje nedostatke. Prvi nedostatak su izrazito visoka



kapitalna ulaganja zbog vrlo skupog procesa iskapanja soli (engl. *Solution Mining*). Prema Aminlatifi, et.al. (2019., str 7), trenutni kapitalni troškovi za CAES postrojenja iznose između 400-800\$ po kW instalirane snage. Drugi problem je u samoj tehnologiji iskapanja soli. Naslage soli ne moraju i ne sadrže u potpunosti samo NaCl, već mogu sadržavati i određeni postotak glinovitog materijala. Tijekom procesa iskapanja soli, u idealnom slučaju na površini tijekom proizvodnje se trebaju proizvoditi mješavina otopina vode i soli te glina koja se u podzemlju nalazila unutar tih naslaga soli. Problem koji nastaje radi glinovitog materijala je taj što gline, za razliku od NaCl, nisu topive u vodi i oko 25-30% ne bude proizveden na površini već se istaloži na dnu kaverne. Dodatni problem je taj što sa glinom i određeni postotak vode ostane u kaverni, a ta voda može izazvati bubrenje istaloženih glina i još dodatno smanjiti efektivni volumen skladištenja u kaverni i na taj način utjecati na ekonomičnost cijelog projekta. Problem je i limitirani volumen solnih formacija, jer za povećanje volumena potrebno je proširiti kavernu što može izazvati nestabilnosti te urušavanje formacija unutar radnog prostora zraka.

### **3.1.2. Porozni sustavi - Akviferi**

Glavne petrofizikalne karakteristike koje omogućuju skladištenje u poroznim sustavima su poroznost i propusnost. Skladištenje zraka u ovakvim sustavima jednako je skladištenju plina za pokrivanje vršne potrošnje zimi. Skladištenje energije za CAES sustave se odvija na način, da plin, u slučaju CAES tehnologije zrak, koji je nositelj energije u skladištu u vidu potencijalne energije pri povišenom tlaku, se utiskuje u ležište pomoću kompresora i ispunjava šupljikavi prostor u stijenskoj masi. Proizvodnja električne energije se ostvaruje prilikom ekspanzije tog plina, pretvorba potencijalne energije u kinetičku, i pokreće ekspander pri čemu dolazi do generiranja električne energije (Carneiro, et al., 2019). Osnovni zahtjevi koji trebaju biti ispunjeni za skladištenje plina u poroznim sustavima jest da postoji antiklinalna porozna struktura (npr. pješčenjak), iznad kojih je nepropusna krovina koja onemogućava vertikalno kretanje fluida (Aghahosseini i Breyer, 2018). Takvi sustavi su od izrazito velikog interesa za CAES tehnologiju iz razloga što iziskuju značajno niža kapitalna ulaganja u usporedbi sa skladištenjem u formacijama soli. Problem sa skladištenjem u poroznim sustavima je taj da u svijetu još ne postoji niti jedno operativno CAES postrojenje sa skladištenjem u poroznim sustavima (Aghahosseini i Breyer, 2018). Najveća razlika između skladištenja u sustavima konstantnog volumena, formacijama soli, i poroznim sustavima jest promjenjivost volumena i kompenzacija tlaka tijekom faza utiskivanja i ekspanzije zraka. Skladištenjem zraka u formacijama soli tlak tijekom cijelog

ciklusa je konstantan iz razloga što su formacije soli izrazito nepropusne te se povećanje tlaka prenosi na stijenske ležišta. Skladištenjem zraka u akviferu, vrijednost tlaka se može znatno mijenjati ovisno o vremenu, kao i o prostornom položaju unutar ležišta zbog znatnih gubitaka zbog mogućnosti protjecanja kroz propusne dijelove dotične hidrodinamičke cjeline. Tijekom skladištenja u formacijama konstantnog volumena, u fazi dizajna postoji određeni faktor slobode u pogledu odabira dubine skladištenja, inicijalnog tlaka u ležištu i volumena ležišta. Za skladištenje u akviferima, inženjeri nemaju slobodu manipulacije dubinom ležišta, tlakom skladištenja i volumenom ležišta, nego se ležišta moraju uskladiti sa zahtjevima površinske opreme, kompresorima i ekspanderima, i koristiti onakva kakva jesu, uz dodatne parametre akvifera kao što su poroznost, propusnost te raspoloživi volumen. Pošto je tlak skladištenja vezan i uz inicijalni tlak koji postoji u ležištu, on nije parametar koji je promjenjiv tijekom cijelog životnog ciklusa postrojenja (Allen, et al., 1983). Parametri koji utječu na skladištenje su minimalne vrijednosti poroznosti i propusnosti, tlak, temperatura, maksimalni tlak uz nepropusnu krovinu (za neki stupanj umanjen tlak frakturiranja krovine, engl. *caprock treshhold pressure*), litološke formacije pogodne za CAES skladištenje itd.

### **3.1.3. Rudnici i raspucane nepropusne stijene**

Nedostatak već postojećih rudnika koji nisu u upotrebi, limitiraju korištenje ovog geološkog tipa za skladištenje energije zbog izrazito visokih kapitalnih troškova iskapanja. Ali jednako tako u slučaju već postojećih rudnika oni mogu biti korišteni za CAES tehnologiju. Granitne strukture su najpogodnije za ovakav tip skladištenja energije (Aghahosseini i Breyer, 2018).

### **3.1.4. Veza između akvifera i postrojenja**

Parametri koji povezuju odabir kompresora i ekspandera s karakteristikama akvifera su inicijalni tlak ležišta, propusnost, volumen, tlak frakturiranja i tendencija koniranja vode. Utiskivanje zraka je efektivnije ukoliko je tlak veći, ali za zadanu razliku tlaka, količina utiskivanja nije konstantna iz razloga što se sa vremenom utiskivanja povećava tlak u ležištu i time otpor na utiskivanje sa površine. Iako nije potrebno vršiti utiskivanje u ležište u konstantnim količinama, poželjno je imati konstantu proizvodnju tijekom faze ekspanzije zraka iz ležišta. Iz razloga što i količina proizvodnje zraka po bušotini s vremenom opada, izrazito je važno točno odrediti broj bušotina, kako bi sustav proizvodio nominalnom snagom. Tlak u ležištu nakon utiskivanja trebao bi biti između maksimalnog tlaka

kompresora ( $P_c$ ) i inicijalnog tlaka u ležištu  $P_i$ . Istovjetno fazi kompresije, u fazi ekspanzije zrak ekspandira do minimalnog tlaka na ulazu u ekspander  $P_e$  (Allen, et al., 1983). Tlak skladištenja zraka unutar ležišta,  $P_s$ , mora imati vrijednost između maksimalnog tlaka kompresije i minimalnog tlaka na ulazu u ekspander ( $P_e$ ). S vremenom utiskivanja tlak u ležištu se približava vrijednost  $P_e$  te se iz tog razloga se smanjuje diferencijalni tlak utiskivanja. Sa smanjenjem diferencijalnog tlaka smanjuje se i količina zraka koja se utiskuje u ležište, a faktor koji diktira volumen utiskivanja u ležište i količine utiskivanja održava donekle konstantnim jest broj bušotina za utiskivanje. Istovjetno fazi kompresije, tijekom faze ekspanzije tlak u ležištu,  $P_r$  se smanjuje do minimalne vrijednost tlaka na ulazu u ekspander  $P_e$ . U fazi ekspanzije, kao što je prije navedeno, je bitno da se tijekom cijelog procesa ekspanzije održava jednak protok kroz ekspander, i faktor koji također utječe na konstantni volumen ekspanzije jest optimalni broj bušotina (Allen, et al., 1983).

### **3.2. Zatvorenost strukture ležišta**

Za antiklinalnu strukturu minimalna duljina visina strukture (*engl. Closure*) mora iznositi 10 metara, te minimalna debljina ležišta također mora iznositi 10 metara kako bi se izradio minimalan broj bušotina (Allen, et al., 1983). Visina strukture prema definiciji je najmanja visina između vrha antiklinale i sinklinale unutar zajedničkog stratigrafskog horizonta. Minimalna debljina od 10 metara osigurava adekvatnu debljinu ležišta za skladištenje zraka i pri toj debljini je jednostavno ostvariti komunikaciju između perforacija i ležišta. U trodimenzionalnom sustavu, omjer visine i duljine ležišta može značajno varirati. Kut antiklinale ne smije biti veći od  $15^\circ$  kako bi se otklonila mogućnost smicanja formacija i smanjio utjecaj rasjeda tijekom utiskivanja. Struktura mora biti u potpunosti zatvorena kako bi se onemogućila lateralna migracija utisnutoga zraka. Tijekom faze mirovanja, tlak u ležištu će se izjednačiti i postići vrijednost inicijalnog tlaka (Allen, et al., 1983).

### **3.3. Stratigrafski zahtjevi**

Najčešći sustavi ležišta koji se koriste za skladištenje prirodnog plina, koje je istovjetno CAES procesu sa skladištenjem u akviferu ali u puno široj uporabi, su propusni pješčenjaci s nepropusnom krovinom, šejl ili izrazito guste karbonatne stijene. Krovina mora biti dovoljne debljine te izrazite čvrstoće i nepropusnosti kako bi se ostvarila što bolja veza i plinotjesnost između cementa i krovine ležišta. Dva faktora koja CAES projekt čine mogućim za implementaciju jesu nepropusna krovina iznad što propusnije ležišne stijene iz razloga što nepropusnost krovine te protok plina unutar i izvan ležišta ovisi o ova dva

faktora (Allen, et al., 1983). Npropusnost krovine može se utvrditi laboratorijskim ispitivanjem jezgri (jednako kao i propusnost), ali regionalne trendove propusnosti krovine nije moguće odrediti zbog heterogenosti formacija. *In-situ* mjerenja propusnosti se provode tlačnim testovima, u kojima se voda proizvodi na jednoj bušotini, dok se na ostalim bušotinama, koje se nalaze na različitim udaljenostima i dubinama, mjeri razina vode i njeno povlačenje tijekom proizvodnje. Razlika tlaka i brzina otjecanja, odnosno količina proizvodnje vode se koristi za izračun propusnosti.

### 3.3.1. Tlak frakturiranja krovine

Tlak frakturiranja krovine je uz propusnost jedan od najvažniji karakteristika ležišta, a opisuje maksimalni diferencijalni tlak kojem krovinska stijena može biti izložena te pri kojem neće doći do pucanja krovinske stijene koje će uzrokovati izmjenu fluida između ležišta i krovinske stijene. Shodno tome, maksimalni tlak skladištenja osim što je određen maksimalnim tlakom kompresora, jednak je sumi hidrostatskog tlaka i maksimalnog diferencijalnog tlaka koji krovinska stijena može podnijeti. Popuštanje krovinskih stijena radi ostalih utjecaja, poput porasta temperature, dehidracije ili frakturiranja ležišne stijene, nemaju veliki utjecaj na cjelokupni integritet sustava kada je maksimalni dozvoljeni tlak frakturiranja krovine tijekom operacije postavljen dovoljno nisko. Ovakav opis tlaka frakturiranja krovine odgovara plitkim sustavima u kojima su tlakovi niski. Prema Vulin, et.al. (2017.), maksimalni tlak skladištenja tijekom utiskivanja CO<sub>2</sub> koji ne izaziva frakturiranje krovine iznosi 90% vrijednosti litostatskog tlaka pri zadanoj dubini. Vrijednost tlaka frakturiranja pri zadanoj dubini izračunava se pomoću jednadžbe 3-1 (Vulin, et.al., 2017.).

$$p_f = p_{sr} \cdot f_g \cdot h = 0.18 \cdot h \quad (3-1.)$$

Gdje su:

$p_f$ – tlak frakturiranja, 10<sup>5</sup> Pa

$f_g$ - gradijent frakturiranja pri zadanoj dubini (*engl. Fracture Gradient*), 0.2·10<sup>5</sup> Pa/m

$h$ - dubina, m

## 3.4. Propusnost

Propusnost predstavlja mogućnost protjecanja fluida kroz poroznu stijenu. U literaturi postoji definicija više tipova propusnosti kao što su apsolutna propusnost, efektivna

propusnost te relativna propusnost. Apsolutna propusnost se mjeri pomoću plina i u potpuno nezasićenim jezgrama, efektivna propusnost se mjeri na uzorcima koji sadržavaju dva ili više fluida, a označava propusnost uzorka za određeni fluid. Relativna propusnost se izražava kao omjer efektivne propusnosti, te apsolutne propusnosti za svaki fluid prisutan u stijeni. Porast zasićenja jednim tipom fluida (fazom) povećava efektivnu i relativnu propusnost za taj fluid i posljedično smanjuje efektivnu i relativnu propusnost za drugi fluid te je stoga za očekivati da će na početku utiskivanju plina u sloj njegova efektivna propusnost biti mala te da je potreban početni period utiskivanja i povećanja zasićenja plinom kako bi se postigle povoljne vrijednosti propusnosti za plin te smanjila proizvodnja vode (i/ili drugih inicijalno prisutnih fluida) iz sloja. Velika propusnost ležišnih stijena u značajnoj mjeri smanjuje ekonomska ulaganja u CAES postrojenje. Za određeni konstantni pad tlaka u ležištu tijekom faze ekspanzije, za ležišta veće propusnosti u fazi razrade biti će potreban manji broj bušotina za jednaki proizvedeni volumen zraka. Posebna prednost visoke propusnosti za CAES postrojenje u odnosu na skladištenje prirodnog plina jest ta što je trajanje radnog ciklusa CAES postrojenja jedan dan, ili koji sat više. Negativan utjecaj visoke propusnosti jest u pogledu raspodjele tlaka unutar ležišta. Tijekom utiskivanja, prijenos tlaka kroz ležište je brži i više izražen što znači da unutar radnog dijela ležišta, pribušotinskoj zoni, tlak tijekom operacije će biti manji što može značiti kraći vremenski period proizvodnje električne energije. U visokopropusnim sustavima zbog raspodjele tlaka voda iz visokozasićenih zona u ležištu može biti lakše mobilizirana te u vrlo kratkom vremenskom periodu može doći do pojave vode unutar same bušotine što znatno može smanjiti relativnu propusnost zraka (Smith, et al., 1979). Minimalna vrijednost propusnosti za CAES postrojenje iznosi 300 mD iz razloga što za propusnosti manje od navedene, rad koji trebaju obaviti kompresori za tlačenje zraka i istiskivanje vode dalje od pribušotinske zone je prevelik. Vrijednosti propusnosti u diplomskom radu su izabrane 300 mD kao minimalnu graničnu vrijednost iako u Hrvatskoj vrijednosti od 300 mD nisu česte odnosno ima ih izrazito malo. Načini povećanja apsolutne propusnosti jednaki su kao i u naftnim i plinskim bušotinama: kiselinskim obradama, hidrauličkim frakturiranjem ili produbljivanjem bušotina i povećanjem raskrivenog intervala (Allen, et al., 1983).

### **3.5. Poroznost**

Poroznost je volumen šupljikavog prostora unutar stijenske mase, izražava se u postocima, a računa se kao omjer razlike ukupnog volumena stijene i volumena matriksa stijene te

ukupnog volumena stijene. Poroznost ležišta mora biti dovoljno velika kako bi skladištenje zraka bilo moguće. Minimalna vrijednost poroznosti koja je dostatna za skladištenje zraka iznosi 10%. Poroznost za istu vrstu stijena može biti vrlo različita kao npr., za pješčenjake poroznost može varirati od 5-25% (Allen, et al., 1983).

### **3.6. Parametri utiskivanja**

Parametri utiskivanja su temperatura zraka, tlak zraka, brzina protjecanja (utiskivanja) zraka, vlažnost zraka, istiskivanje vode te karakteristike ciklusa utiskivanja i proizvodnje zraka (Allen, et al., 1983). Odnos između parametara utiskivanja i ležišta predstavljaju brojne probleme koji su razmatrani u analizi provedenoj u ovom radu.

#### **3.6.1. Temperatura utiskivanja**

Tijekom utiskivanja zraka u ležište dolazi do povećanja temperature prilikom kompresije zraka u kompresorima. Ovisno o tipu postrojenja jedan dio toplinske energije, nastale kompresijom zraka, može se sačuvati pomoću rekuperatora i koristiti za predgrijavanje zraka prije ulaska u ekspander, ili se može u potpunosti odbacivati u atmosferu. Razlog tomu je što prilikom kompresije temperature zraka mogu biti toliko visoke da bi uzrokovale termalnu degradaciju matriksa stijena. Prilikom operacije utiskivanja i proizvodnje zraka na dnevnoj bazi tijekom CAES operacije bitno je odrediti koje su minimalne i maksimalne vrijednosti temperature utiskivanja zraka te da li tijekom operativnog ciklusa postoje različiti profili temperature sa odmicanjem od utisne bušotine. Sami proces utiskivanja tijekom operativnog ciklusa postrojenja nije isti iz razloga što se u početnoj fazi razrade utiskuje zrak čija je glavna zadaća formirati zračni jastuk unutar ležišta, i taj zrak se kasnije tijekom operativnog ciklusa ne smije proizvoditi. U literaturi je navedeno kako tijekom formiranja zračnog jastuka temperatura zraka ne bi trebala biti visoka, otprilike 311,15°K (Allen, et al., 1983). Ova navedena vrijednost nije pravilo koje su prihvatili svi istraživači. Također postoji podjela na koncepte visoke i niske temperature utiskivanja zraka, a granična temperatura iznosi oko 366,15°K (Sottlemeyre, 1978). Utiskivanje zraka pri nižim temperaturama je puno jednostavnije, nije limitirano niti maksimalnom radnom temperaturom kompresora niti termalnim utjecajem na matriks ležišta. Jedini problem kod utiskivanja pri ovim temperaturama je kapacitet zraka za prijenos vode dalje od utisne bušotine u fazi formiranja zračnog jastuka (Sottlemeyre, 1978). Utiskivanje zraka pri višim temperaturama je puno zahtjevnije, iz razloga što

određeni faktori koji ne mogu utjecati na isplativost CAES operacije pri temperaturi od 366,15°K ovdje postaju problem. Neki od njih su (Sottlemyre, 1978):

1. Ponašanje zaštitnih cijevi i cementa pri povišenim temperaturama,
2. Prisutnost vode u pribušotinskoj zoni i visoki tlakovi para u sustavu,
3. Potencijalne geokemijske reakcije pri povišenim temperaturama koje mogu smanjiti efektivnu poroznost i propusnost ležišta,
4. Nastanak čestica koje mogu biti nošene tijekom proizvodnje zraka i
5. Integritet krovine.

Utiskivanjem plinova visokih temperatura u porozne stijene dolazi do naglog pada temperature plina na jako kratkoj udaljenosti od utisne bušotine. Nagla izmjena topline uzrokuje raspodjelu temperature u ležištu sa zonama različitih temperatura unutar ležišta. Tijekom utiskivanja zraka u porozni medij, do izmjene topline dolazi zbog velike kontaktne površine između zraka i ležišne stijene te velikog termalnog kapaciteta stijene. Upravo zbog velikog termalnog kapaciteta ležišne stijene te niske termalne vodljivosti, većina topline komprimiranog zraka ostaje u pribušotinskoj zoni. Tijekom ciklusa od godinu dana, maksimalni promjer prijenosa topline je limitiran na udaljenost od 3 metra. Tijekom duljeg vremena utiskivanja zraka visoke temperature, toplina se prenese na dijelove koji su uz samu bušotinu, i temperatura stijena u pribušotinskoj zoni se tijekom godina povećava (Smith, et al., 1979). Nastavkom operativnog ciklusa CAES postrojenja taj promjer može biti i veći, ali generalno je vezan uz pribušotinsku zonu. Jedino što se značajno mijenja jest temperatura proizvedenog zraka, koja se u slučaju temperature utiskivanja od 505,15°K mijenja sa vrijednosti 391,15°K nakon prve godine, na vrijednost od 458,15°K na kraju 10 godine (Smith, et al., 1979). To je vrlo bitno jer tijekom simuliranja temperaturnih profila može biti utvrđeno da određeni dio topline nastao kompresijom može biti skladišten i u samom ležištu, a ne samo na površini unutar TES jedinice.

### ***3.6.2. Dehidracija pribušotinske zone***

Dehidracija pribušotinske zone je ključni faktor za uspjeh skladištenja komprimiranog zraka u CAES sustavima. U slučaju CAES operacije dva su razloga za postojanje vode u poroznom sustavu. Prvi je razlog taj da je voda zarobljena tijekom migracije uslijed

kompakcije stijena u procesu taloženja i sedimentacije, a zadržala se u poroznom sustavu zbog postojanja zamke koja je onemogućila njeno daljnje kretanje ili zbog vlage koja je prisutna u atmosferskom zraku koji se utiskuje u ležište (Sottlemyre, 1978). Slojna voda je uvijek prisutna i predstavlja problem koji treba biti efikasno riješen kako bi projekt bio ekonomski ostvariv. Prva faza razrade ležišta za CAES operaciju je utiskivanje zraka radi formiranja zračnog jastuka. Zrak relativno niske temperature, manje od  $366,15^{\circ}\text{K}$ , utiskuje se kako bi se istisnula voda koja je prisutna u akviferu. Ova faza završava kada je u ležište utisnuta željena količina zraka unaprijed određena projektom. Volumen, odnosno masa utisnutog zračnog jastuka mora biti dovoljno velika kako bi prosječni tlak u ležištu ostao konstantan tijekom cijelog operativnog života postrojenja (Wiles i McCann, 1981). Tlak utiskivanja veći je od ležišnog tlaka i uzrokuje pomicanje zone većinski zasićene slojnom vodom dalje od utisne bušotine (Sottlemyre, 1978). Problem je voda koja uslijed velikog kapilarnog tlaka ne može biti istisnuta iz pora. Glavni razlozi zbog kojih izostaje migracija takve intersticijalne vode su (Sottlemyre, 1978):

1. voda zarobljena u slijepim porama,
2. kapilarne sile koje onemogućavaju kretanje vode, ili
3. hidraulički potpuno izolirane pore.

Uz ireducibilnu intersticijalnu vodu, kondenzirana voda predstavlja dodatni problem za CAES operaciju. Posebnu pažnju treba posvetiti mehanizmu dehidracije pribušotinske zone zbog činjenice da se eliminacijom vode iz pribušotinske zone smanjuje i mogućnost potencijalnih kemijskih reakcija vode i ležišne stijene koje mogu smanjiti efektivnu propusnost ležišta.. Radijalna udaljenost pri kojoj dolazi do kondenziranja vode predstavlja vanjsku granicu takozvane "suhe zone" (*engl. Dry Zone*), te nakon te točke u ležištu dolazi do porasta zasićenja vodom. Potisnuta voda nije dio ireducibilnog zasićenja vodom te se uslijed gravitacije drenira u niže dijelove ležišta. Na taj način postiže se uvjet dehidrirane pribušotinske zone. Ovakav način ostvarivanja dehidrirane pribušotinske zone nije jedini mehanizam tijekom postupka dehidracije koji uklanja vodu iz pribušotinske zone. Tijekom faze proizvodnje zraka, zrak se tijekom prolaska kroz pribušotinsku zonu ponovno zagrijava iz razloga što je pribušotinska zona područje u ležištu sa najvišom temperaturom. Vrijeme potrebno za dehidraciju pribušotinske zone funkcija je (Sottlemyre, 1978):

1. Stupnja nezasićenosti zraka za utiskivanje,
2. Temperature i tlaka utiskivanja,



3. Raspodjele tlaka i temperature u ležištu tijekom skladištenja zraka i
4. Masenog protoka zraka i kontaktne površine zraka i vode.

Prema određenim modelima koji su reprezentativni za CAES sustave, utiskivanjem zraka pri temperaturi od 505,15°K, potpuno istiskivanje i isušivanje vode u radijusu od 3 metra bi bilo ostvareno unutar 4 tjedna, dok se pri najnižoj temperaturi utiskivanja od 311,15°K vrijeme potrebno za dehidraciju pribušotinske zone promjera 3 metra iznosi 32 tjedna. Ukoliko je temperatura utiskivanja 394°K, vrijeme dehidracije pribušotinske zone u radijusa 6 metara iznosi godinu dana (Allen, et al., 1983). Problemi koji su vezani uz slojnu vodu imaju utjecaj na dva dijela cjelokupnoga sustava, na ležište i na opremu samog postrojenja. Smanjivanje efektivne propusnosti može se korelirati empirijskim krivuljama relativnih propusnosti za zrak i vodu. Ukoliko se određeni dio vode proizvodi zajedno sa zrakom, povećava se i gustoća stupca proizvedenog fluida, što povećava vrijednost hidrostatskog tlaka na dno bušotine te također negativno utječe na proizvodne količine. Voda u proizvodnji ne utječe negativno samo sa hidrodinamičkog gledišta sustava, nego i utječe na konstrukcijske elemente poput proizvodnog tubinga, zaštitnih cijevi i efektivni rad ekspandera. Ukoliko postoji određeni udio sumpora ili alkalnih metala korozija bušotinske i površinske opreme biti će još značajnija (Sottlemeyre, 1978). Prisutnost vode u pribušotinskoj zoni utječe i na raspodjelu temperature u ležištu. Ukoliko je udio veliki, odnosno dehidracija nije odrađena zadovoljavajuće, toplina neće sezati toliko duboko u ležište. Uzrok tome jest da se određeni dio topline koji bi se trebao prenositi na ležišnu stijenu troši na isparavanje vode iz pribušotinske zone i ta toplina neće biti iskorištena za ležišno predgrijavanje zraka prije ekspanzije. Za D-CAES sustave to znači veću potrošnju fosilnih goriva prilikom generacije električne energije, dok će kod A-CAES sustava biti potrebno duže vrijeme za postizanje visoke temperature i pokretanje postrojenja za generaciju električne energije (Wiles i McCann, 1981).

### **3.6.3. Koniranje vode**

Ukoliko se za CAES operaciju koristi akvifer koji je u potpunosti ili većim dijelom zasićen vodom, koniranje vode može predstavljati problem. Utiskivanjem zraka voda se istiskuje radijalno i vertikalno, ukoliko dno bušotine ne seže do dna ležišta. Tijekom duljeg perioda utiskivanja voda se nakon određenog vremena istiskuje više u radijalnom nego u vertikalnom smjeru iz razloga što je vertikalna propusnost stijena najčešće manja od horizontalne propusnosti. Uslijed prethodno navedene raspodjele propusnosti voda koja je

istisnuta dalje od svog inicijalnog položaja može se nalaziti u blizini dna bušotine. Tijekom proizvodnje zraka može doći do migracije mobilne vode u bušotinu. Kroz dulji vremenski period može doći do znatnog podizanja razine vode u ležištu, a u najgorem slučaju formirati će se konus vode oko zone perforacija i omogućiti ulaz vode u bušotinu. Konus u pribušotinskoj zoni smanjuje vrijednost relativne propusnosti zraka i na taj način pri jednakom diferencijalnom tlaka proizvodnost zraka iz ležišta će biti smanjena, dok istovremeno pri temperaturama većim od  $348,15^{\circ}\text{K}$  može doći do geokemijskih reakcija s ležišnom stijenom što također smanjuje propusnost ležišta, u ovom slučaju ne samo efektivne već i apsolutne propusnosti ležišta. Razlog zbog kojeg je potrebno provesti analizu koniranja vode za PM-CAES (*engl. Porous Media Compressed Air Energy Storage*) operaciju jest utvrđivanje trajanja faze utiskivanja i proizvodnje zraka te vrijednost protoka zraka za oba slučaja. Gustoća zraka tijekom proizvodnje je puno manja od gustoće zraka tijekom utiskivanja, te ukoliko se želi ostvariti približno jednake masene protoke u obje faze, tijekom proizvodnje potrebno je ostvariti puno veći diferencijalni tlak na dnu bušotine kako bi se jednaka masena količina zraka proizvela u jednakom vremenskom intervalu. Veći diferencijalni tlak u bušotini tijekom proizvodnje uzrokovat će pad tlaka koji seže puno dublje u ležište te koji dovodi do pokretanja vode iz dijelova ležišta koji imaju veću zasićenost vodom. U ležištu također postoji tranzicijska zona kapilarnog podizanja vode, što dodatno pospješuje zadržavanje vode u neželjenim zonama (Wiles i McCann, 1981). Faktori koji najviše utječu na pojavu koniranja vode su (Wiles i McCann, 1981):

1. Duljina proizvodnog niza bušotine unutar ležišta,
2. Debljina ležišta,
3. Masena brzina protjecanja zraka,
4. Propusnost te
5. Zasićenost fluidima, vodom i zrakom.

#### **3.6.4. Tlak utiskivanja**

Tri osnovne odrednice tlaka utiskivanja su maksimalni tlak utiskivanja, diferencijalni tlak tijekom utiskivanja te tlak u ležištu.

##### **3.6.4.1. Maksimalni tlak utiskivanja**

Maksimalni tlak utiskivanja određen je maksimalnim tlakom kompresije, litostatskim gradijentom krovinske stijene te gustoćom i debljinom krovine ležišta. Prema Allen (1983.)

vrijednost prosječnog litostatskog gradijenta iznosi  $22,63 \cdot 10^3$  Pa/m, bazirano na prosječnoj gustoći od  $2306,6 \text{ kg/m}^3$ . Maksimalni skladišni tlak ne smije premašiti vrijednost od 80% litostatskog tlaka. Ukoliko vrijednost tlaka u ležištu premaši vrijednost litostatskog tlaka krovine tada može doći do frakturiranja krovine što može uzrokovati neželjene posljedice poput gubitka zraka iz ležišta, migriranje vode iz ležišta u krovinu i oštećenje površinskih struktura. Kao što je i prethodno navedeno, određene stijene imaju čak i viši litostatski tlak ali u praksi maksimalna vrijednost tlaka skladištenja ne smije premašiti 50% litostatskog tlaka krovine, što znači da s obzirom na vrijednost litostatskog gradijenta, maksimalni dozvoljeni gradijent tlaka u ležištu iznosi  $11,32 \cdot 10^3$  Pa/m dubine (Allen, et al., 1983).

#### **3.6.4.2. Diferencijalni tlak skladištenja**

Diferencijalni tlak skladištenja se definira kao razlika između tlaka skladištenja i inicijalnog tlaka u ležištu. U visoko propusnim ležištima male vrijednosti diferencijalnog tlaka u rasponu od  $173\text{-}345 \cdot 10^3$  Pa mogu se koristiti za manje CAES projekte. Za podzemna skladišta plina diferencijalni tlak varira od  $690\text{-}2070 \cdot 10^3$  Pa. Prilikom razrade CAES projekta u početni fazama utiskivanja koriste se manji diferencijalni tlakovi, dok se sa vremenom diferencijalni tlak utiskivanja povećava. Vrijednost diferencijalnog tlaka direktno je povezana sa mehaničkom čvrstoćom stijena stoga je vrijednost maksimalnog diferencijalnog tlaka jednaka sumi inicijalnog tlaka u ležištu i minimalnog tlaka potrebnog za frakturiranje krovine (Allen, et al., 1983). U vidu tijekom utiskivanja zraka pri povišenom tlaku treba imati kompresibilnost zraka. Zrak prilikom kompresije ima višu temperaturu te veću gustoću pa je zbog veće gustoće tijekom utiskivanja zrak viskozniji i teže se utiskuje. Ukoliko se tijekom utiskivanja zraka želi održavati konstantan protok, diferencijalni tlak mora se povećati ne samo zbog povećanja tlaka kao funkcije vremena tijekom utiskivanja u ležište nego i zbog većeg otpora pri protoku kroz porozni sustav zbog povećane viskoznosti. Povećana temperatura uzrokovat će prijenos topline između zraka i ležišne stijene što će sniziti temperaturu zraka što je on udaljeniji od utisne bušotine. Ali ovaj problem može biti i reverzibilan iz razloga što prilikom proizvodnje zrak prije ulaska u bušotinu preuzima toplinu stijena i na taj način njegova temperatura se povećava. Upravo zbog povećanja temperature, zrak će biti viskozniji te će proizvodnja pri istom padu tlaka u bušotini biti manja (Smith, et al., 1979).

### **3.6.5. *Izmjenično utiskivanje i proizvodnja zraka***

Proces izmjeničnog utiskivanja i proizvodnje zraka (engl. *Air Cycling*) počinje nakon faze mirovanja, u kojoj je sustav zatvoren, kako bi došlo do uspostavljanja ravnoteže u ležištu s obzirom na tlak i temperaturu nakon utiskivanja i razvoja zračnog jastuka. Vremensko trajanje utiskivanja i proizvodnje, mora biti određeno na način da se očuva integritet zračnog jastuka tijekom radnog vijeka sustava, iako u početku operativne faze može doći do dužih faza utiskivanja kako bi se nadomjestio eventualni gubitak tlaka uslijed popuštanja određenog dijela postrojenja ili kako bi se vodena fronta udaljila još dalje od same bušotine (Wiles i McCann, 1981.). Formiranje zračnog jastuka za održavanje tlaka u ležištu je proces koji traje relativno dugo i zahtijeva izmjenu intervala utiskivanja i mirovanja. Intervali mirovanja bez utiskivanja su potrebni kako bi se ostvarila pravilna raspodjela tlaka unutar ležišta i eventualno ostvarila gravitacijska drenaža vode u niže dijelove ležišta. Trajanje jednog ciklusa u CAES projektu je jedan dan. Duži periodi utiskivanja mogu biti tijekom vikenda kako bi se osiguralo održavanje tlaka kroz dulji period nekorištenja radi manje potrošnje električne energije. Količina radnog fluida koja ekspandira iz ležišta ne bi smjela premašiti 10% volumena zračnog jastuka. Ovakva restrikcija je nužna kako bi se spriječilo smanjenje tlaka unutar ležišta, koniranje vode te osigurao integritet zračnog jastuka unutar ležišta (Allen, et al., 1983).

### **3.7. Potencijalni utjecaj CAES operacije na ponašanje ležišta**

Tijekom CAES operacije brojni efekti mogu biti uočeni na samom ležištu kao npr. povećanje kompresibilnosti stijenske mase sa temperaturom, različito ponašanje tlaka unutar ležišta, prebrza i neplanirana proizvodnja zraka. Način na koji prethodno navedeni efekti utječu na ponašanje ležišta i cjelokupnog sustava biti će objašnjeni u slijedećim poglavljima.

#### **3.7.1. *Promjena stlačivosti stijena***

Povećanjem temperature u ležištu uslijed utiskivanja zraka dolazi do povećanja kompresibilnosti stijenske mase, odnosno matriksa stijena. Uslijed povećanja temperature prilikom utiskivanja, dolazi do lakšeg širenja pora te istovjetno prilikom ekspanzije zraka uslijed veće temperature, zrak se brže istiskuje iz ležišta. Povećanjem temperature s 293,15°K na 473,15°K promjena stlačivosti stijena iznosi oko 15-25% (Allen, et al., 1983). Postotak promjene stlačivosti također ovisi i o efektivnim naprezanjima koje djeluju u podzemlju. Bitno je uočiti kako promjenom stlačivosti može doći do znatne promjene

raspoloživog volumena stijene i to je razlog zbog kojeg je preporučljivo ispitati promjene stlačivosti prije utiskivanja u ležište (Allen, et al., 1983).

### ***3.7.2. Brza i neplanska proizvodnja zraka***

Ukoliko akvifer nije okarakteriziran izrazito velikom propusnošću, kretanje vode zbog njene veće viskoznosti neće biti u mogućnosti pratiti kretanje zraka tijekom njegove proizvodnje. Takva pojava rezultira značajnim padom tlaka unutar zračnog jastuka što može uzrokovati probleme poput (Allen, et al., 1983):

- Kompakcije stijena uslijed gubitka potpore zbog prevelikog pada tlaka i
- Koniranje vode zbog smanjenja vrijednosti tlaka ispod hidrostatske vrijednosti.

Ova dva fenomena mogu dovesti do smanjenja propusnosti i poroznosti i na taj način smanjiti efektivni volumen skladištenja. Jednako tako može doći i do kašnjenja sa proizvodnjom zraka, a samim time i ispostavom električne energije, jer je potrebno mijenjati operativne parametre i nadomjestiti gubitke tlaka i radnog fluida u ležištu (Allen, et al., 1983).

## **3.8. Površinska oprema CAES sustava**

CAES sastoji se od nekoliko podsustava. Ti podsustavi su: kompresija, skladištenje zraka te ekspanzija. Ovisno o izvedbi CAES sustava postrojenje može još sadržavati još i podsisteme regeneracije topline ili komore za sagorijevanje. Cijeli ciklus CAES postrojenja zasniva se na reverzibilnom izentropskom procesu kompresije i ekspanzije (Cardenas i Pimm, 2017). Kompresori pretvaraju električnu energiju u mehaničku energiju koja komprimira zrak na visoke tlakove i uslijed čega dolazi do porasta temperature zraka. Podsustav skladištenja zraka služi za pohranu zraka pri visokom tlaku te istovremeno skladište veliku količinu potencijalne energije. Potencijalna energija iz skladišta u fazi ekspanzije pretvara se u mehaničku energiju u vidu rotacije ekspandera, a uslijed rotacije ekspandera zbog veze sa generatorom dolazi do nastanka električne energije (Laijun, et al., 2016). U ovom dijelu diplomskog rada biti će objašnjeni podsustavi kompresije i ekspanzije obzirom da je skladištenje zraka objašnjeno u prijašnjim odlomcima.

### ***3.8.1. Kompresori primijenjivi za utiskivanje zraka i CO<sub>2</sub>***

Kompresori predstavljaju elementarni dio CAES postrojenja. Osnovne karakteristike koje kompresori moraju zadovoljiti kako bi bili kompatibilni za CAES operaciju jesu

mogućnost ostvarivanja velikog masenog protoka, visok stupanj iskoristivosti, visok omjer tlakova kompresije (engl. *Compression Ratio*, CPR) itd. Za velika CAES postrojenja kao pravilo struke nametnuo se dizajn u kojem se za komprimiranje pri nižim ili srednjim vrijednostima tlaka koriste aksijalni kompresori dok se za kompresiju pri većim tlakovima koriste centrifugalni kompresori (Laijun, et al., 2016). Faktori koji moraju biti uzeti u obzir tijekom dizajniranja protoka su (Laijun, et al., 2016):

1. Kompresori tijekom cijele operacije rade u neustaljenom režimu (engl. *Unsteady State*) protjecanja u sloju,
2. Poželjno je ostvariti adijabatsku kompresiju kako bi se umanjili gubici termalne energije kompresije,
3. Izlazna temperatura pri svakom stupnju kompresije mora biti dovoljno blizu radne temperature TES jedinice,

S obzirom na tlak skladištenja i dozvoljene maksimalne temperature skladištenja, komprimiranje zraka može biti ostvareno u jednom stupnju ili u više stupnjeva. Višestupanjska kompresija je bolja solucija iz razloga što se jednak izlazni tlak iz kompresora može ostvariti pri puno manjoj temperaturi i otkloniti problem termalne degradacije skladišta, te degradaciju samog kompresora ukoliko se prijeđe njegovo temperaturno radno ograničenje. Između svakog kompresora zrak se hladi na temperaturu manju od maksimalne radne temperature sljedećeg kompresora. Ukoliko se za svaki stupanj kompresije koristi isti CPR, tada će za pohranu topline biti dovoljna samo jedna TES stanica, jer su ulazne i izlazne temperature u svakoj fazi kompresije jednake (Cardenas i Pimm, 2017). Tijekom više stupanjke kompresije gubici u sustavu su manji, a izlazna temperatura iz kompresora je također manja. Cijeli sustav mora biti optimiziran s obzirom na kapacitet kompresora, broj stupnjeva kompresije, maseni protok zraka, izlazne temperature iz kompresora, vrijeme trajanja kompresije (Laijun, et al., 2016).

### **3.8.2. Ekspanderi**

Ekspanderi su ključna komponenta u pretvaranju termoelektrične konverzije tijekom perioda proizvodnje i distribucije električne energije, a efikasnost ovog podsistema definira iskoristivost cjelokupnog postrojenja. Radni proces ekspandera je reverzibilan u odnosu na kompresor istoga tipa. Najčešći tipovi ekspandera su stapni ekspanderi, koji su istovjetni aksijalnom kompresoru, te rotacijske turbine poput radijalnih turbina ili vijčanih koje su jednake centrifugalnom i vijčanom kompresoru. Stapni ekspanderi rade po naizmjeničnom

principu rada a karakterizira ih isprekidani izlazni tok iz ekspandera. Količina protoka iz stavnih ekspandera je izrazito mala te u CAES operacijama oni mogu biti korišteni za izrazito mala postrojenja. Rotacijski ekspanderi su puno bolje rješenje za CAES sustave velike snage iz razloga što omogućavaju konstantan protok, i imaju puno veći operativni volumen (Wei i Wang, 2018).

#### 4. ULAZNI PODATCI ZA MODEL HIPOTETSKOG PODZEMNOG SKLADIŠTA ENERGIJE

Tijekom zadnjih 10 godina većina istražnih radova povezanih sa CAES tehnologijom bila je usmjerena na ispitivanje efikasnosti površinske opreme, poput kompresora, izmjenjivača topline i ekspandera, u svrhu određivanja ukupnog stupnja efikasnosti i isplativosti CAES tehnologije. Međutim, jedan od važnijih parametara koji definira efikasnost i isplativost cijelog projekta jest skladišni prostor, u ovom slučaju porozni akvifer, koji je odabran za analizu pošto u RH nisu otkrivene formacije solnih doma. Analiza uključuje ležišne parametre i PVT parametre radnih fluida. Za komponentni numerički simulacijski model odabran je ECLIPSE E300 (ECLIPSE E300, Schlumberger, 2017). Prvi slučaj koji je uzet kao polazna točka za simulaciju ležišta, jest horizontalno ležište dimenzija 900 metara u smjeru x-osi ( $X=900$ ), 900 metara u smjeru y-osi ( $Y=900$ ), te 200 metara debljine ležišta ( $Z=200$ ). Ležišni tlak iznosio je  $100 \cdot 10^5$  Pa, a kao kontrolni parametar tijekom simulacije odabran je tlak na dnu bušotine maksimalne vrijednosti  $180 \cdot 10^5$  Pa u fazi utiskivanja i  $100 \cdot 10^5$  Pa u fazi proizvodnje. Ležište se nalazi na dubini od 1000 metara. Propusnost je jednaka u horizontalnom smjeru te iznosi  $k_h = 300$  mD, a radi realnog opisa anizotropnosti propusnosti sedimentne stijene, propusnost u vertikalnom smjeru iznosi 10% horizontalne propusnosti te ima vrijednost od  $k_v = 30$  mD. Poroznost ležišta je 20%. Utiskivanje i proizvodnja definirani su kroz jednu utisno-proizvodnu bušotinu koja je smještena u sredini ležišta. Prilikom utiskivanja plina u svrhu povećanja tlaka u ležištu i smanjenja zasićenja vodom u pribušotinskoj zoni, potrebno je vrlo malo vremena kako bi se postigao željeni (granični) tlak unutar ležišta od  $180 \cdot 10^5$  Pa, ali zasićenja unutar pribušotinske zone se nisu izrazito promijenila. Problem je taj što simulator vrši utiskivanje u ležište dok se ne postigne granica kontrolnog parametra, tlak na dnu bušotine od  $180 \cdot 10^5$  Pa, koja se u ovom slučaju postiže iznimno brzo u vremenskom periodu od 5 dana. Pošto je vremenski period utiskivanja izrazito kratak, ukupna količina plina koja je utisnuta u ležište takvih dimenzija nije dovoljna za ostvarivanje dehidracije pribušotinske zone što rezultira većom proizvodnjom vode nego plina. Zbirni prikaz parametara ležišta za prethodno navedeni slučaj prikazan je u tablici 4-1.

**Tablica 4-1.** Tablični prikaz početnog modela ležišta

Volumen ( $m^3$ )	h (m)	Površina ( $m^2$ )	x (m)	y (m)	dx (m)	dy (m)	dz (m)	A/h
1 600 000 000	200	810000	900	900	30	30	10	4050



Dimenzije ležišta koje su davale odgovarajuće rezultate izabrane su po uzoru na članak autora Wang (2017.). Ležište se nalazi na dubini od 1000 metara, te ako nije nadpritisnuto, može se očekivati slojni tlak sličan hidrostatskom ( $100 \cdot 10^5$  Pa), dok je pretpostavljena temperatura  $348.15^\circ\text{K}$ . Za prvi simulacijski slučaj dimenzije ležišta iznose 4000 metara u smjeru x-osi, 4000 metara u smjeru y-osi, te debljina ležišta 20 metara. Parametar koji je u ovim simulacijskim slučajevima određivao dimenzije ležišta jest konstantan volumen ležišta, dok se za svaki simulacijski slučaj mijenjao omjer površine i debljine ležišta u skladu sa konstantnim volumenom. Broj ćelija u ležišnom modelu je  $NX \cdot NY \cdot NZ = 40 \cdot 40 \cdot 5$ , što predstavlja 40 ćelija u smjeru osi x, 40 ćelija u smjeru osi y, te 5 ćelija u smjeru osi z (tablica 4-2). U svakom slučaju pri početku simulacije ležište je u potpunosti zasićeno vodom. Za utiskivanje i proizvodnju korištene su dvije bušotine smještene u sredini ležišta sa međusobnim razmakom od 200 metara (zbog načina rada CAES sustava, bilo je potrebno definirati dvije utisne i na istim koordinatama dvije proizvodne bušotine). Tijekom perioda utiskivanja, plin se utiskuje duž cijele visine ležišta, dok se proizvodnja vrši kroz gornje dvije ćelije postavljenog modela. Pri 1000 metara dubine, pretpostavljen je petrostatski tlak  $200 \cdot 10^5$  Pa, stoga je tlak utiskivanja postavljen na  $180 \cdot 10^5$  Pa (Vulin, et al., 2018).. Svojstva fluida tijekom utiskivanja i proizvodnje izračunata su prema Peng-Robinson jednadžbi stanja (Peng i Robinson, 1978.). Zbirni prikaz parametara ležišta za slučajeve koji su korišteni za analizu prikazani su u tablici 4-2.

**Tablica 4-2.** Tablični prikaz parametara ležišta korištenih u simulacijama

Volumen ( $\text{m}^3$ )	h (m)	Površina ( $\text{m}^2$ )	x (m)	y (m)	dx (m)	dy (m)	dz (m)	A/h
320 000 000	20	16 000 000	4 000	4 000	100	100	4	800 000
320 000 000	40	8 000 000	2 828	2 828	71	71	8	200 000
320 000 000	60	5 333 333	2 309	2 309	58	58	12	88 889
320 000 000	80	4 000 000	2 000	2 000	50	50	16	50 000

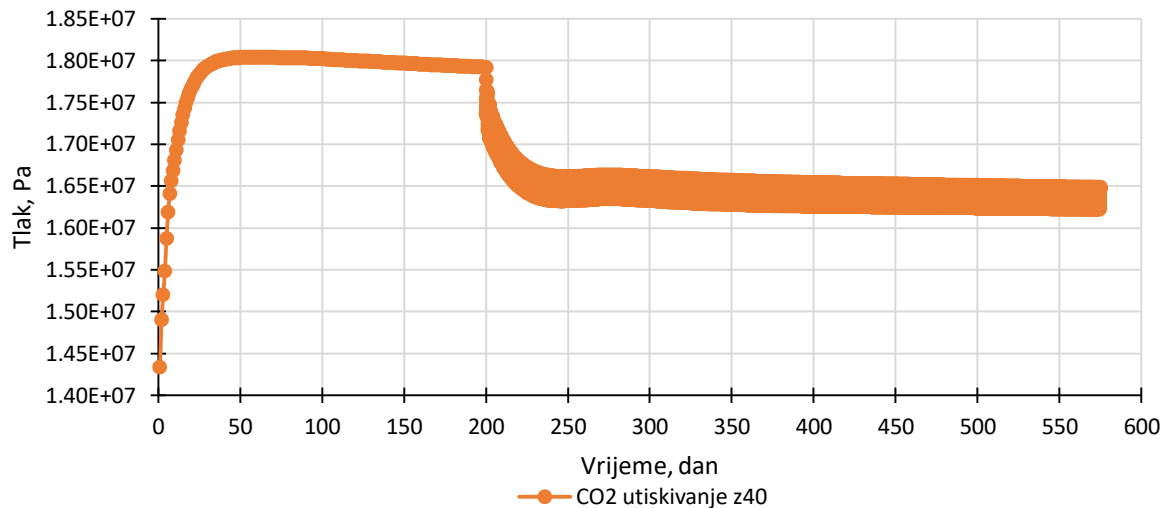
Razmatrani su  $\text{CO}_2$  i zrak kao radni fluidi. U simulacijskim slučajevima korišten je čisti  $\text{CO}_2$ , dok je sastav zraka 78% dušika, 21% kisika te 1 %  $\text{CO}_2$ . Cilj usporedbe ova dva radna fluida je odrediti mogućnost primjene  $\text{CO}_2$ , ne samo za skladištenje u poroznim sustavima, već i za mogućnost proizvodnje električne energije, kao alternativa zraku.

## **5. ANALIZA REZULTATA SIMULACIJA, UTROŠKA I PRIDOBIVANJA ENERGIJE**

Pomoću ležišnog simulatora ECLIPSE E300 (ECLIPSE E300, Schlumberger, 2017) moguće je za odabrane parametre dubine ležišta, inicijalnog tlaka u ležištu i samih dimenzija ležišta odrediti volumne i masene protoke tijekom perioda utiskivanja, proizvodnje, te određivanje raspodjele fluida unutar ležišta u fazama mirovanja bez utiskivanja i proizvodnje. Analizom pridobivenih rezultata moguće je odrediti isplativost implementacije CO<sub>2</sub> kao radnog fluida u usporedbi sa zrakom. Najbitniji rezultati simulacija koji omogućuju proračun energije potrebne za utiskivanje zraka i CO<sub>2</sub>, te pridobivene energije tijekom proizvodnje plinova iz ležišta su maseni protoci. U slijedećem poglavlju biti će opisana promjena ležišnoga tlaka tijekom perioda utiskivanja, proizvodnje i mirovanja, količine proizvodnje plinova i vode tijekom navedenih perioda i proračuni utrošenih i pridobivenih energija tijekom operativnih ciklusa postrojenja.

### **5.1. Kretanje ležišnog tlaka tijekom utiskivanja i proizvodnje CO<sub>2</sub>**

Radnom ciklusu utiskivanja i proizvodnje prethodi ciklus konstantnog utiskivanja koji je potreban za postizanje povećanje tlaka u ležištu sa početnih  $100 \cdot 10^5$  Pa, do željenog tlaka skladištenja od  $180 \cdot 10^5$  Pa. Prilikom korištenja CO<sub>2</sub> kao radnog fluida, ciklus početne faze razvoja ležišta sastoji se od 100 dana utiskivanja i 100 dana mirovanja potrebnih za preraspodjelu plina i vode unutar ležišta. Do preraspodjele plina i vode unutar ležišta dolazi zbog djelovanja gravitacijske sile i razlike u gustoćama utisnutog plina i vode. Ovaj korak je neophodan radi stvaranja zone visokog zasićenja plinom, nakon čega je minimizirana proizvodnja vode prilikom izvlačenja plina. Uvjeti tlaka i temperature tijekom utiskivanja CO<sub>2</sub> iznose  $180 \cdot 10^5$  Pa i od 305,15 °K. Pri zadanim uvjetima utiskivanja gustoća CO<sub>2</sub> iznosi 864,4 kg/m<sup>3</sup> (NIST WEBBOOK). Nakon početne faze razvoja ležišta slijedi faza naizmjeničnog utiskivanja i proizvodnje plina od 375 dana. Trajanje radnog ciklusa postrojenja iznosi jedan dan. Radni ciklus postrojenja podijeljen je u 4 radna perioda. Prvi period je period utiskivanja plina u ležište u trajanju od 10 sati, drugi period je 6 sati mirovanja nakon utiskivanja. Prvi period mirovanja popraćen je sa proizvodnjom plina iz ležišta u trajanju od 5 sati, dok zadnji period jednog radnog ciklusa jest 3 sata mirovanja tijekom kojeg nema niti utiskivanja niti proizvodnje. Periodi mirovanja potrebni su za gravitacijsko izdvajanje fluida unutar ležišta. Na slici 5-1. prikazana su kretanja tlaka za simulacijski slučaj u kojem debljina ležišta iznosi 40 metara.



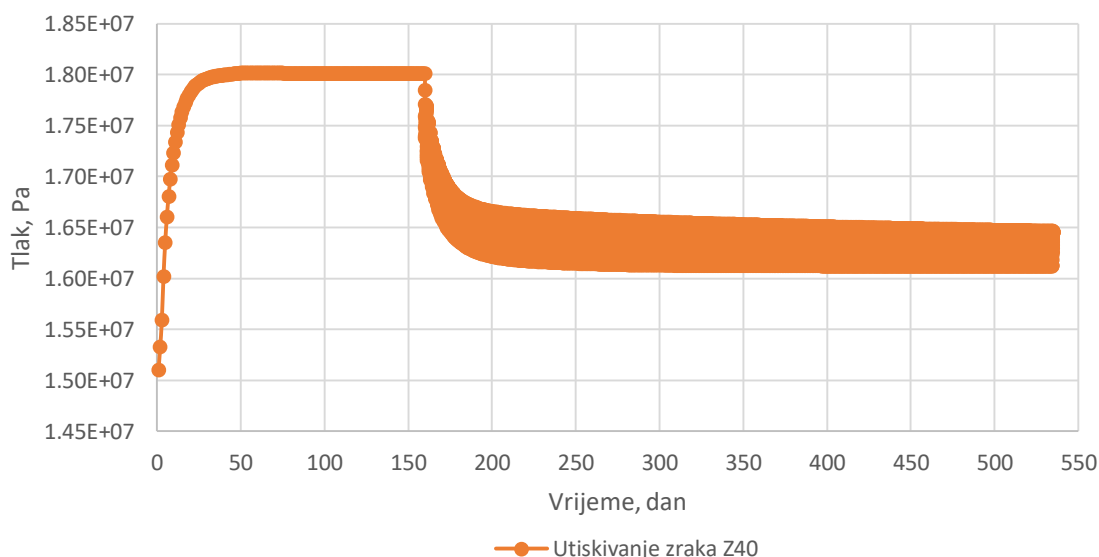
**Slika 5-1.** Kretanje ležišnog tlaka za različite dubine ležišta tijekom radnog ciklusa

U svim slučajevima vidljiv je vremenski period utiskivanja potreban za postizanje radnog tlaka od  $180 \cdot 10^5$  Pa koji je limitiran zbog tlaka frakturiranja krovine. Za svaki simulacijski slučaj volumen ležišta je jednak i iznosi  $3,2 \cdot 10^8$  m<sup>3</sup>, što znači da su rađene analize za različite omjere površine i debljine podzemnog skladišta (A/z omjer). U slučaju debljine ležišta od 20 metara, vrijeme potrebno za postizanje željenog tlaka u ležištu je najdulje. Razlog tomu su manje utisne količine, manji maseni protoci utiskivanja, te vrijeme potrebno za postizanje željenog tlaka iznosi 70 dana. Povećanjem dubine ležišta, smanjuje se i vrijeme utiskivanja za postizanje željenog tlaka. U slučaju debljine ležišta od 40 metara, vrijeme potrebno za utiskivanje iznosi 32 dana, za slučaj debljine ležišta od 60 metara vrijeme utiskivanja iznosi 20 dana, dok je u slučaju debljine ležišta od 80 metara potrebno 13 dana za postizanje tlaka od  $180 \cdot 10^5$  Pa. Razlog promjene vremena utiskivanja jest duljina bušotine koja je u komunikaciji sa ležištem, iz razloga što je duljina bušotine kroz koju se vrši utiskivanje u ležište jednaka debljini ležišta. Debljine ležišta za svaki slučaj mijenjaju se linearno, dok je iz vremenskih perioda vidljivo kako vrijeme potrebno za utiskivanje nije u linearnom odnosu sa duljinom bušotine koja je u komunikaciji sa ležištem. U vremenu od 100 do 200 dana ležište je zatvoreno, te u tom vremenskom intervalu nema proizvodnje niti utiskivanja. Vidljivo je kako se tijekom tog vremena od 100 dana tlak u ležištu smanjuje izrazito malo uz linearan pad tlaka u ležištu, što se može pripisati topljenju plina u ležišnoj vodi. Nakon 200 dana započinju radni ciklusi utiskivanja, proizvodnje i mirovanja. Tijekom operativnih ciklusa, promjena tlaka u ležištu nije izrazito velika, tj. najveća promjena tlaka događa se u prvih 80-90 dana, ovisno od debljini ležišta, nakon početka izmjenične proizvodnje i utiskivanja. Tijekom tih 80-90

dana pad prosječnog tlaka u ležištu za svaki slučaj je jednak te iznosi oko  $15 \cdot 10^5$  Pa. Nakon završetka faze pada ležišnog tlaka, dolazi uravnoteženog kretanja tlaka, ali uz blagi pad prosječnog tlaka u ležištu. Za ležište debljine 20 metara krajnji tlak iznosi  $161 \cdot 10^5$  Pa, za ležište debljine 40 metara iznosi  $163 \cdot 10^5$  Pa, za ležište debljine 60 metara krajnji tlak iznosi  $170 \cdot 10^5$  Pa, dok je za ležište debljine 80 metara krajnji tlak najveći i iznosi  $172 \cdot 10^5$  Pa.

## 5.2. Kretanje ležišnog tlaka tijekom utiskivanja i proizvodnje zraka

Pretpostavke modela za utiskivanje zraka jednake su pretpostavkama modela za utiskivanje CO<sub>2</sub>. Osnovna razlika u modelima je vrijeme utiskivanja za razvoj zračnog jastuka, te u slučaju zraka vrijeme utiskivanja za ostvarivanje tlaka od  $180 \cdot 10^5$  Pa iznosi 60 dana. Trajanje faze mirovanja potrebno za izdizanje plina u ležištu iznosi 100 dana, dok je trajanje cikličke operacije proizvodnje i utiskivanja 375 dana jednako kao i u slučaju utiskivanja CO<sub>2</sub>. Osnovna razlika između utiskivanja CO<sub>2</sub> i zraka je u gustoći, te pri temperaturi od 305,15 °K i tlaku od  $180 \cdot 10^5$  Pa gustoća zraka iznosi 200 kg/m<sup>3</sup>. Ova razlika u gustoći znači da će se zrak puno brže izdignuti u gornje dijelove ležišta nego CO<sub>2</sub>, ali vrijeme bez proizvodnje ili utiskivanja odabrano jednako kao i u slučaju utiskivanja CO<sub>2</sub> radi lakše usporedbe slučajeva. Na slici 5-2 prikazana su kretanja tlakova u ležištu za kretanje zraka tijekom ciklusa od 525 dana.



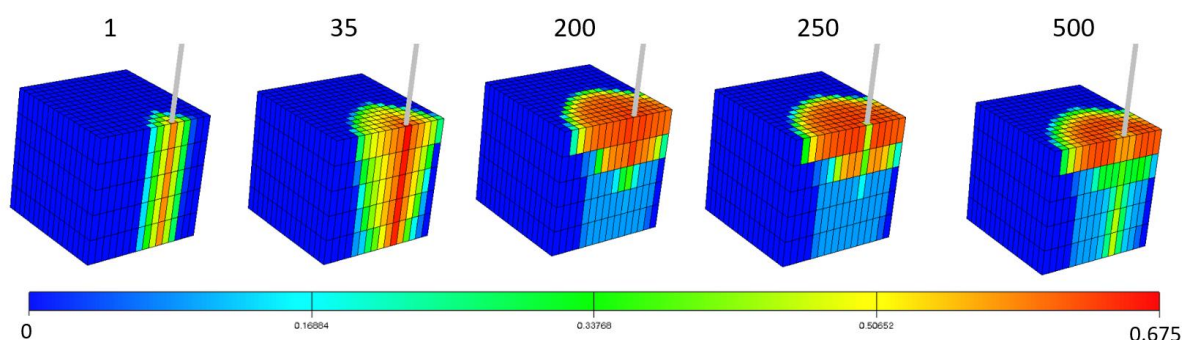
**Slika 5-2.** Prikaz kretanja tlakova za ležište debljine 40 metara tijekom utiskivanja zraka

Prilikom utiskivanja najmanje vrijeme potrebno za postizanje željenog tlaka skladištenja od  $180 \cdot 10^5$  Pa je u slučaju debljine ležišta od 80 metara i potrebno je 13 dana jednako kao i

u slučaju za CO<sub>2</sub>, u slučaju ležišta debljine 60 metara 19 dana, za ležište debljine 40 metara potrebno je 29 dana, dok je za ležište debljine 20 metara potrebno 58 dana. Kretanje krivulje nakon početka ciklusa izmjenične proizvodnje i utiskivanja jednako je kao i u slučaju utiskivanja CO<sub>2</sub>, gdje je vidljiv pad tlaka nakon početka ciklusa izmjenične proizvodnje i utiskivanja. Raspon promjene tlaka u ležištu do kraja ciklusa poprima izrazito bliske vrijednosti za svaki simulacijski slučaj, te se može zaključiti da sa aspekta utiskivanja CO<sub>2</sub> i zraka promjene tlaka u ležištu se mijenjaju jednako.

### 5.3. Promjena zasićenja u ležištu tijekom utiskivanja CO<sub>2</sub>

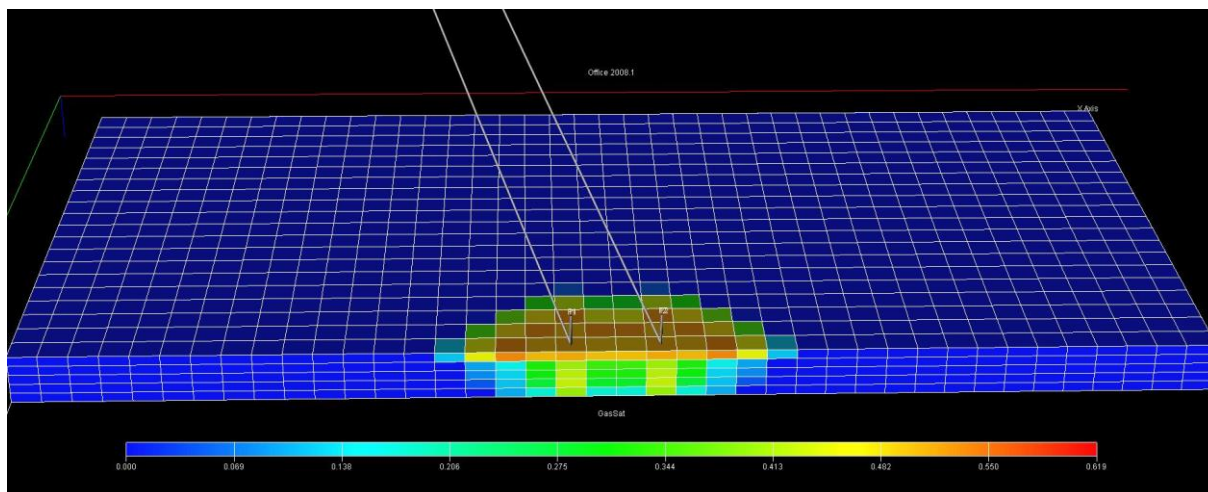
Utiskivanje CO<sub>2</sub> u ležište može se podijeliti u dvije faze. Prva faza utiskivanja CO<sub>2</sub> jest utiskivanje u svrhu povećanja tlaka u ležištu te se odvija kroz period od 100 dana. Druga faza utiskivanja CO<sub>2</sub> odvija se tijekom utisno-proizvodnog ciklusa postrojenja i odvija se u periodu utiskivanja od 10 sati u jednom danu.



**Slika 5-3.** Raspodjela zasićenja u ležištu debljine 40 metara nakon utiskivanja CO<sub>2</sub> u trajanju od 1 i 35 dana, te u operativnom periodu, tj. nakon 200, 250 i 500 dana

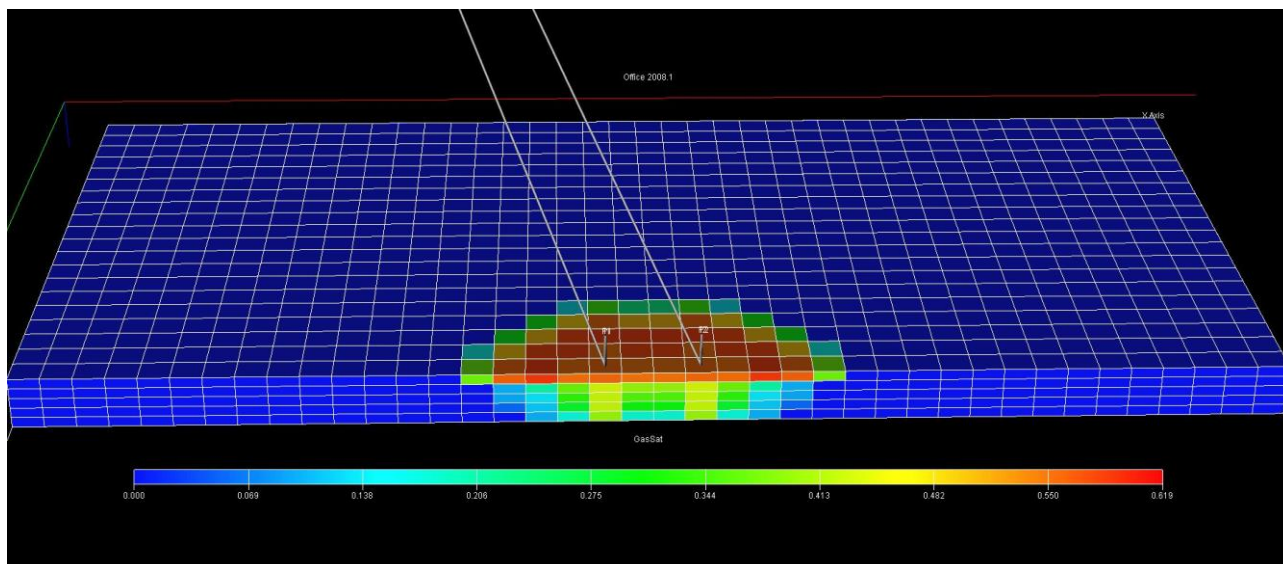
Ležište je prije početka utiskivanja u potpunosti zasićeno vodom. Utiskivanje CO<sub>2</sub> u ležište je provedeno je kroz cijelu raspoloživu debljinu od 40 metara. Maksimalno zasićenje CO<sub>2</sub> nakon prvog perioda utiskivanja od 100 dana iznosi 62% zasićenja u ćelijama ležišta u kojima je došlo do promjene zasićenja, i to će ovisiti o kapilarnim svojstvima stijene. Na slici 5-3 vidljivo je kako se, iako se utiskivanje vrši kroz cijelu debljinu ležišta, zasićenje mijenja sa dubinom. Razlog promjeni zasićenja sa dubinom je razlika u gustoći između CO<sub>2</sub> i vode. Pošto CO<sub>2</sub> ima manju gustoću od vode, većina utisnutog CO<sub>2</sub> izdvojila se u gornje dijelove ležišta i u područjima koja su izrazito bliska bušotini. Nakon 90 dana od početka utisno-operativnog ciklusa, prosječni tlak u ležištu prestaje padati te do kraja operativnog ciklusa od 575 dana ima približno istu vrijednost koja se mijenja izrazito malo. Prestanak promjene pada tlaka u ležištu ukazuje i na promjenu preraspodjele zasićenja u

ležištu. Na slici 5-4 prikazano je stanje zasićenja u ležištu nakon prestanka pada tlaka u ležištu, za slučaj s dvije bušotine pošto bi ciljani radni uvjeti (tj. količina energije koja se skladišti) bili teže postignuti samo s jednom bušotinom.



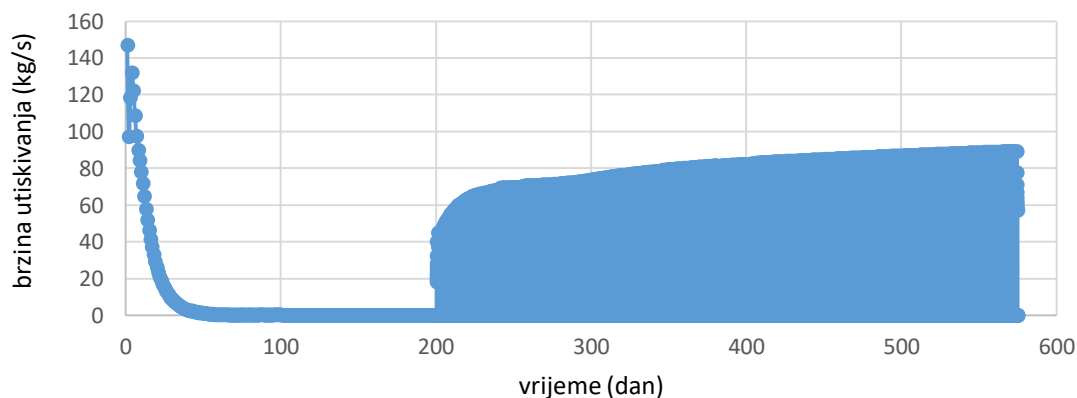
**Slika 5-4.** Vrijednost zasićenja CO<sub>2</sub> nakon 90 dana utisno-proizvodnog ciklusa u ležištu debljine 40 metara

Uspoređujući sa slikom 5-3. zasićenost CO<sub>2</sub> u ovom slučaju je manja nego nakon 200-tog dana operacije. Ovakvo kretanje zasićenja u ležištu poklapa se sa krivuljama proizvodnje vode i CO<sub>2</sub>, koje će biti prikazane u poglavljima koja slijede. Vidljivo je da se oko postojećeg jastuka CO<sub>2</sub> formira određena vodena fronta, na slici prikazana svijetlo plavom bojom, koja se u usporedbi sa slikom 5-3. pomakla dublje u ležište. Razlog tome je što se iz pribušotinske zone proizvodila voda koja je u ovom slučaju nadomještena plinom te se svakim daljim korakom simulacije povećava udio plina u ležištu. Najveći pad zasićenja zabilježen je u gornjim dijelovima ležišta, koja su imala najveća zasićenja plinom, dok je najveći porast zasićenja u donjim dijelovima ležišta, iz razloga što plin koji se utiskuje u donjem dijelu ležišta nije u mogućnosti izdići se dovoljnom brzinom u gornje dijelove ležišta tijekom proizvodnje. Pretpostavka je da će se daljnjim porastom količina utiskivanja i proizvodnje do kraja radnog ciklusa od 575 dana zasićenje u ležištu još dodatno povećati u korist CO<sub>2</sub> uz pomicanje vodene fronte dalje u ležište. Na slici 5-5 prikazana je raspodjela zasićenja u ležištu debljine 40 metara nakon 575 dana operacije.



**Slika 5-5.** Vrijednosti zasićenja CO<sub>2</sub> u ležištu debljine 40 metara na kraju utisno-proizvodnog ciklusa

Usporedno sa slikom 5-4., zasićenja CO<sub>2</sub> rastu unutar u svim smjerovima radne zone ležišta. Dolazi do pomicanja vodene fronte dalje od bušotine u horizontalnom smjeru, dok u najvišim slojevima ležišta se vrijednost zasićenja primiče maksimalnom zasićenju CO<sub>2</sub> u ležištu. Razlog postizanja maksimalnog zasićenja u gornjim slojevima ležišta jest taj da se proizvodnja odvija samo iz gornja dva sloja ležišta, što smanjuje zasićenje vodom i olakšava kretanje plina tijekom utiskivanja kroz gornje skecije ležišta. Isto tako sa vremenom dolazi do izdizanja CO<sub>2</sub> u gornje dijelove ležišta zbog razlike u gustoći. Tijekom utiskivanja CO<sub>2</sub> u ležište količine utiskivanja nisu jednake. Količina utiskivanja CO<sub>2</sub> tijekom perioda utiskivanja od 100 dana u ležište debljine 40 metara prikazane su na slici 5-6.

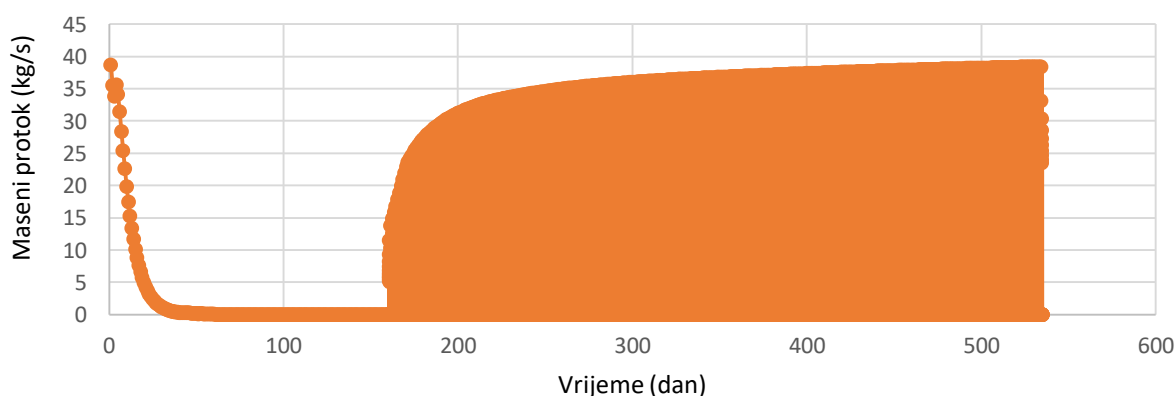


**Slika 5-6.** Promjena utisnih količina CO<sub>2</sub> kroz 575 dana za ležište debljine 40 metara

Na prikazanom grafu vidljivo je da je količina utiskivanja najveća tijekom prvog dana i onda iznosi 147 kg/s. Razlog tomu je što je tijekom prvog dana utiskivanja tlak u ležištu najmanji, a samim time je i najmanji protutlak na kompresor. Što vrijeme u simulaciji odmiče dalje, utisne količine se smanjuju zbog povećanja tlaka u ležištu, te u ovom slučaju utiskivanje prestaje nakon 32 dana. Sa početkom utisno-proizvodnog ciklusa količine utiskivanja su manje nego prilikom početnog razvoja ležišta. Razlog tome je veći tlak u ležištu, ali što vrijeme odmiče dalje tijekom utisno-proizvodnog ciklusa vidljivo je da i količine utiskivanja unutar ležišta sa vremenom rastu. Razlog tome je što se tijekom proizvodnje CO<sub>2</sub> iz ležišta proizvodi i određena količina vode, što ostavlja dodatni prostor u ležištu za skladištenje CO<sub>2</sub>. Također, odmicanjem prema kraju utisno-proizvodnog ciklusa, mijenja se se prosječni tlak u ležištu, sa  $180 \cdot 10^5$  Pa na  $165 \cdot 10^5$  Pa, što smanjuje djelovanje protutlaka ležišta na kompresor i omogućava veće količine utiskivanja u ležište. Na kraju utisno-proizvodnog ciklusa količina utiskivanja CO<sub>2</sub> u prvom satu utiskivanja iznosi 89 kg/s.

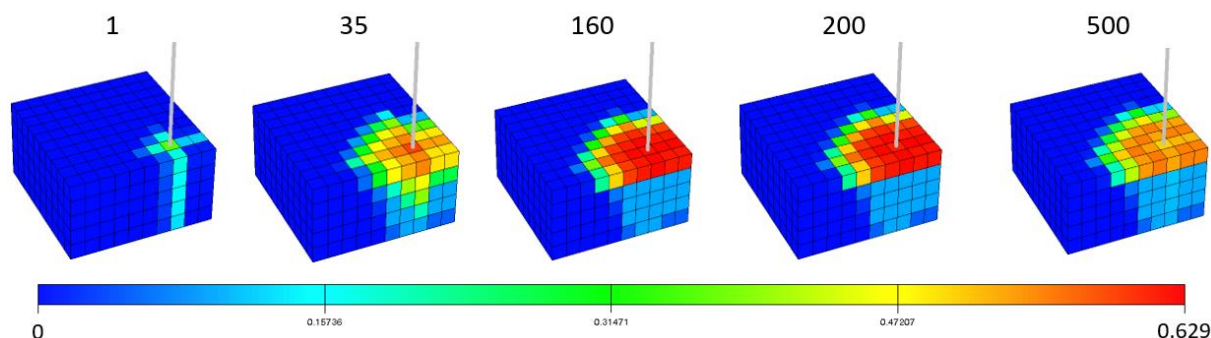
#### 5.4. Utiskivanje zraka

Vrijeme početnog utiskivanja zraka potrebno za nastajanje zračnog jastuka je različito od vremena početnog utiskivanja zraka i ono iznosi 60 dana. Parametri ležišta kao što su propusnost, poroznost i debljina ležišta jednaki su kako i u slučaju prethodno opisanog utiskivanja CO<sub>2</sub>. Tlak utiskivanja zraka također iznosi  $180 \cdot 10^5$  Pa. Promjene utisnih količina sa vremenom prikazane su na slici 5-7. U slučaju utiskivanja zraka manje je maksimalno zasićenje zrakom u plinskom jastuku, međutim zasićenje zrakom je visoko samo u najplićem dijelu strukture (slika 5-8).



**Slika 5-7.** Promjena utisnih količina tijekom utiskivanja zraka kroz period od 535 dana za ležište debljine 40 metara





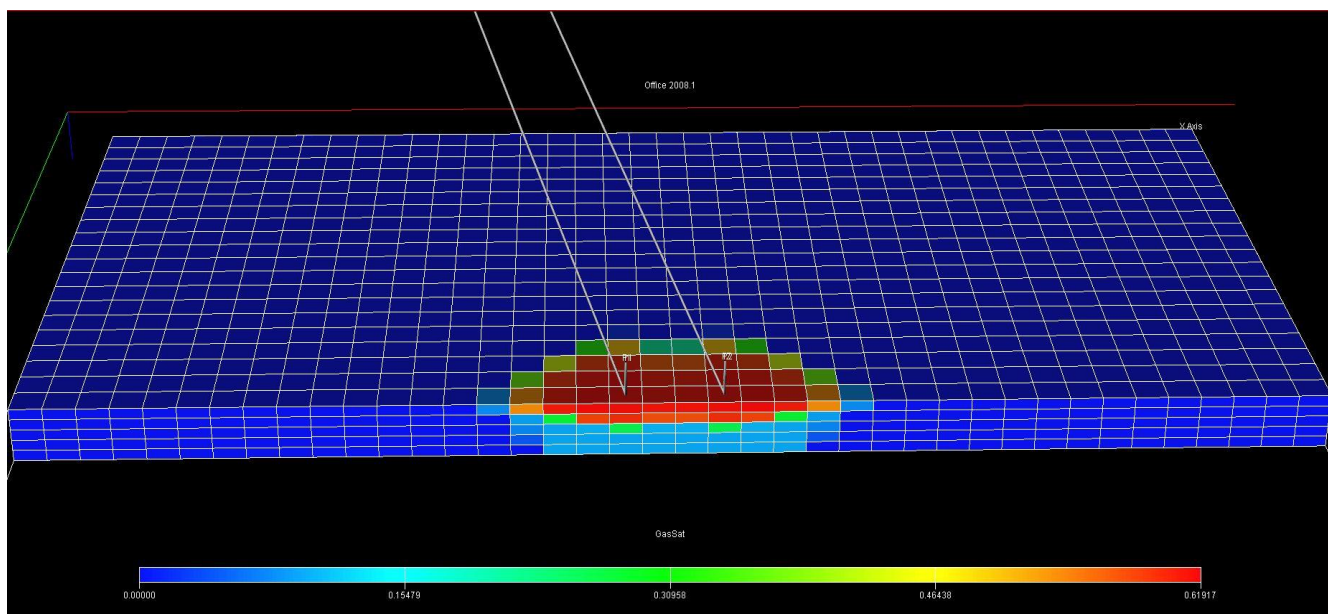
**Slika 5-8.** Promjena zasićenja zrakom za ležište debljine 40 metara

Utisnute količine zraka su značajno manje nego u slučaju utiskivanja CO<sub>2</sub>. Razlika u masenim protocima tijekom utiskivanja jest u razlici gustoća između CO<sub>2</sub> i zraka. Pri tlaku od  $180 \cdot 10^5$  Pa i temperaturi od 305,15 °K, CO<sub>2</sub> ima 4.3 puta veću gustoću od zraka, što znači da se pri zadanim uvjetima utiskivanja, u ležište može utisnuti značajno veća količina CO<sub>2</sub> nego zraka. Tijekom prvog dana utiskivanja maseni protok za zrak iznosi 38,7 kg/s, što je značajno manje od 147 kg/s u slučaju utiskivanja CO<sub>2</sub>. Bitno za primijetiti je promjena količina utiskivanja sa vremenom tijekom utisno-proizvodnog ciklusa. Porast masenih protoka utiskivanja zraka puno je veći tijekom utiskivanja zraka nego tijekom utiskivanja CO<sub>2</sub>, iako su vrijednosti masenih protoka zraka manje od CO<sub>2</sub>. Nakon 375 dana proizvodno utisnog ciklusa, količina masenog protoka zraka u prvom satu utiskivanja iznosi 38,4 kg/s, dok u slučaju CO<sub>2</sub>, količina utiskivanja u prvom satu zadnjeg ciklusa utiskivanja tijekom zadnjeg dana utisno-proizvodnog ciklusa iznosi 89 kg/s što predstavlja razliku od 58 kg/s u odnosu na prvi dan utiskivanja.

### 5.5. Proizvodnja CO<sub>2</sub>

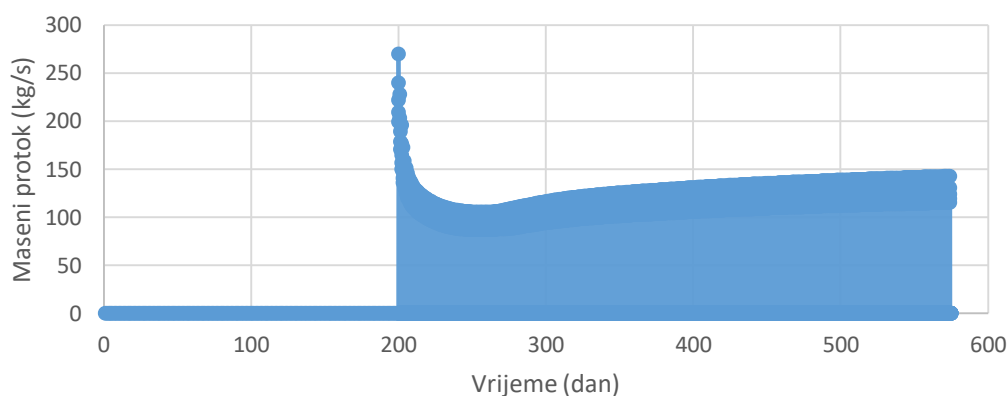
U odnosu na utiskivanje, tijekom proizvodnje promijenjena je duljina intervala bušotine kroz koju se proizvodi plin. Za razliku od utiskivanja gdje se koristilo svu raspoloživu duljinu bušotine kroz ležište, tijekom proizvodnje se proizvodi samo iz prva dva najviša reda ćelija simulacijskog modela. Razlog takvom odabiru dubina za proizvodnje jest izdizanje plina radi razlike gustoće koji će tijekom skladištenja i radnih ciklusa uvijek zauzimati gornje dijelove ležišta. Proizvodnje iz ležišta nema prvih 200 dana, jer kao što je i prije navedeno, taj period je potreban za održavanje tlaka u ležištu i raspodjelu zasićenja. Ukoliko bi došlo do proizvodnje u prvih 200 dana, došlo bi do smanjenja prosječnog tlaka u ležištu i samim time ne bi se postigao željeni efekt utiskivanja radi povećanja tlaka u

ležištu. Slika 5-9. prikazuje raspodjelu zasićenja u ležištu debljine 40 metara nakon 200 dana.



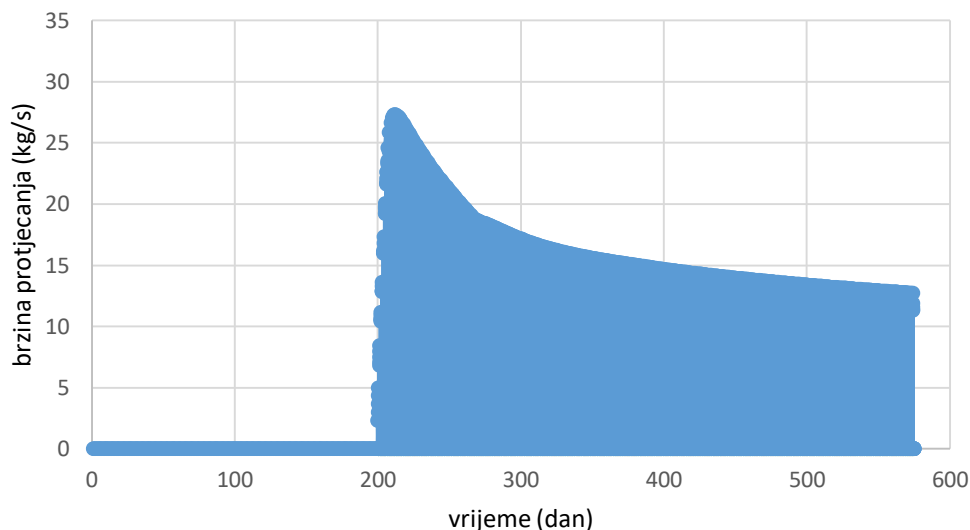
**Slika 5-9.** Raspodjela zasićenja CO<sub>2</sub> u ležištu 40 metara nakon 200 dana

Na slici je vidljivo da gotovo sav CO<sub>2</sub> koji je utisnut tijekom razvojnog perioda utiskivanja se izdignuo u gornje dijelove ležišta. Upravo iz tog razloga za proizvodnju CO<sub>2</sub>, odabrana su dva najviša sloja u ležištu, kako bi se maksimalno povećala proizvodnja CO<sub>2</sub>, dok bi se proizvodnja vode iz ležišta svela na minimum. Čelije crvene boje najviše su zasićene sa CO<sub>2</sub>. Njihovo zasićenje iznosi 62%, dok je najmanje zasićenje CO<sub>2</sub> u ćelijama svijetloplave boje te udio CO<sub>2</sub> u ukupnom zasićenju takvih ćelija iznosi 15%. Dimenzije ćelija u ovom slučaju u smjeru x i y osi su jednake i iznose 71 metar. Vidljivo je da zasićenje pri vrhu ležišta na udaljenosti od 175 metara od bušotine postoji zasićenje od 62%, dok na dubini od 15 metara i udaljenosti 30 vrijednost zasićenja iznosi 15%. Razlog tome jest što uz razliku u gustoći, propusnosti u vertikalnom i horizontalnom smjeru nisu jednake, te tijekom utiskivanja plin se kreće u smjeru najmanjih otpora, a otpori pri protjecanju tijekom utiskivanja manji su u smjeru veće propusnosti. Uslijed izdizanja zbog razlike gustoće, razlika u propusnosti između vertikalnog i horizontalnog smjera omogućava ovakvu razliku u promjeni zasićenja sa promjenom dubine. Kontrolni parametar u slučaju proizvodnje kao i u slučaju utiskivanja je tlak na dnu bušotine. Kontrola nad proizvodnjom ležišta ostvaruje se održavanjem konstantnog tlaka na dnu bušotine pri vrijednosti od  $100 \cdot 10^5$  Pa. Vrijednosti masenih protoka CO<sub>2</sub> prikazani su na slici 5-10.



**Slika 5-10.** Grafički prikaz proizvodnje CO<sub>2</sub> iz ležišta debljine 40 metara

Proizvodnja plina na početku utisno-proizvodnog ciklusa ima značajno veće vrijednosti nego u preostalim danima simulacijskog slučaja. Razlog velikih vrijednosti proizvodnje u prvim danima simulacijskog slučaja je taj da se u tom periodu, proizvodi plin koji je bio utisnut u svrhu povećanja tlaka u ležištu. Period visoke proizvodnje je relativno kratak, i traje otprilike 13 dana. Prvog dana proizvodnja iz ležišta iznosi 270 kg/s (525 000 m<sup>3</sup>/h). Nakon velikih početnih proizvodnji dolazi do faze stabilizacije tijekom koje proizvodnja CO<sub>2</sub> pada, ali ne istim intenzitetom kao i u prvih 13 dana proizvodnje. Faza stabilizacije proizvodnje, te prijelaza proizvodnje iz padajućih u rastuće vrijednosti traje do 275-og dana simulacije. Nakon faze stabilizacije slijedi blagi porast proizvodnje, koji traje sve do kraja simulacijskog slučaja. Proizvodnja CO<sub>2</sub> u zadnjem danu proizvodnog ciklusa za navedeni simulacijski slučaj iznosi 142,70 kg/s. Taj blagi porast proizvodnje je u skladu sa porastom utisnih količina CO<sub>2</sub>, što upućuje na smanjenje udjela vode u ležištu te povećanje udjela CO<sub>2</sub> u ležištu. Kretanje proizvodnje plina uzročno posljedično je povezano sa proizvodnjom vode (slika 5-11).

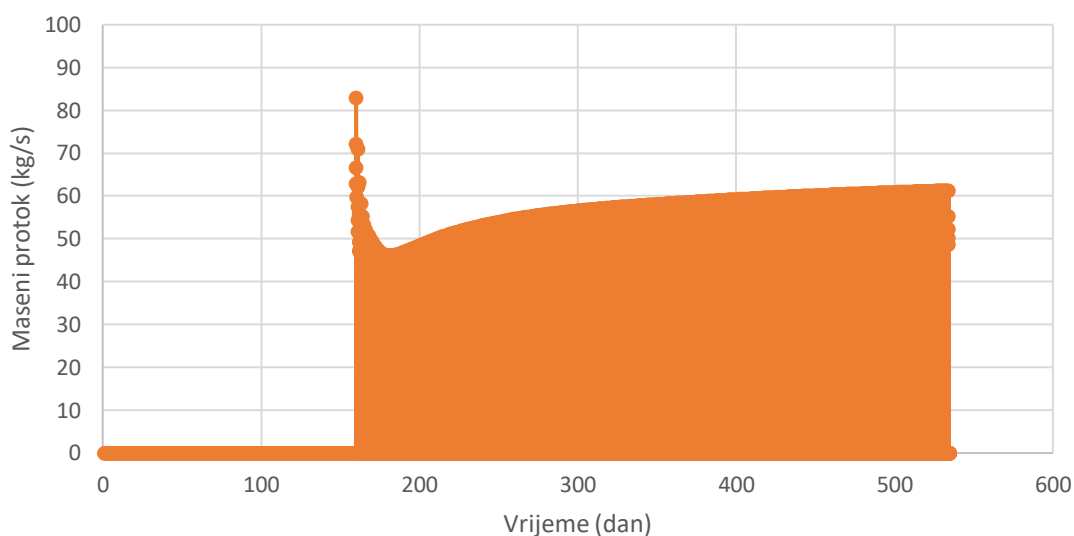


**Slika 5-11.** Proizvodnja vode tijekom proizvodnje CO<sub>2</sub> iz ležišta debljine 40 metara

Uspoređujući slike 5-7 i 5-9 vidljiva je povezanost između proizvodnje CO<sub>2</sub> i vode. U periodima visoke proizvodnje CO<sub>2</sub> proizvodnja vode je mala iz razloga što se tijekom utiskivanja voda istisnula iz pribušotinske zone. Usporedno sa smanjivanjem proizvodnje CO<sub>2</sub>, raste proizvodnja vode. Porast proizvodnje vode traje 12 dana te se vremenski podudara sa padom proizvodnje CO<sub>2</sub>. Maksimalna vrijednost proizvodnje u 12-tom danu iznosi 27,31 kg/s. Maksimalnu proizvodnju vode slijedi pad proizvodnje vode koji se do kraja simulacijskog slučaja odvija po krivulji sa dva nagiba. Prvi nagib u kojem je pad proizvodnje veći i koji traje do 275-og dana podudara se sa vremenskim periodom u kojem dolazi do stabilizacije proizvodnje CO<sub>2</sub>, dok period nakon 275-og dana određuje drugačiji pad proizvodnje vode koji se podudara sa promjenom proizvodnje CO<sub>2</sub> iz konstantne proizvodnje u rastuću. Razlog ovakve promjene trendova i povećanja proizvodnje CO<sub>2</sub> je u tome što se sa odmicanjem vremena i povećanjem kumulativno proizvedenih količina vode u ležištu stvara sve više prostora koji može ispuniti samo plin koji se utiskuje. Sa proizvodnjom plina i vode iz ležišta, smanjuje se prosječni tlak u ležištu i samim time protutlak koji djeluje na kompresor tijekom utiskivanja. Posljedica smanjenja protutlaka u ležištu je utiskivanje većih količina CO<sub>2</sub>. Samim time plin ispunjava sve veći dio pornog prostora unutar ležišta, i na taj način se smanjuje mogućnost protjecanja vode i povećava se proizvodnja CO<sub>2</sub>.

## 5.6. Proizvodnja vode tijekom proizvodnje zraka

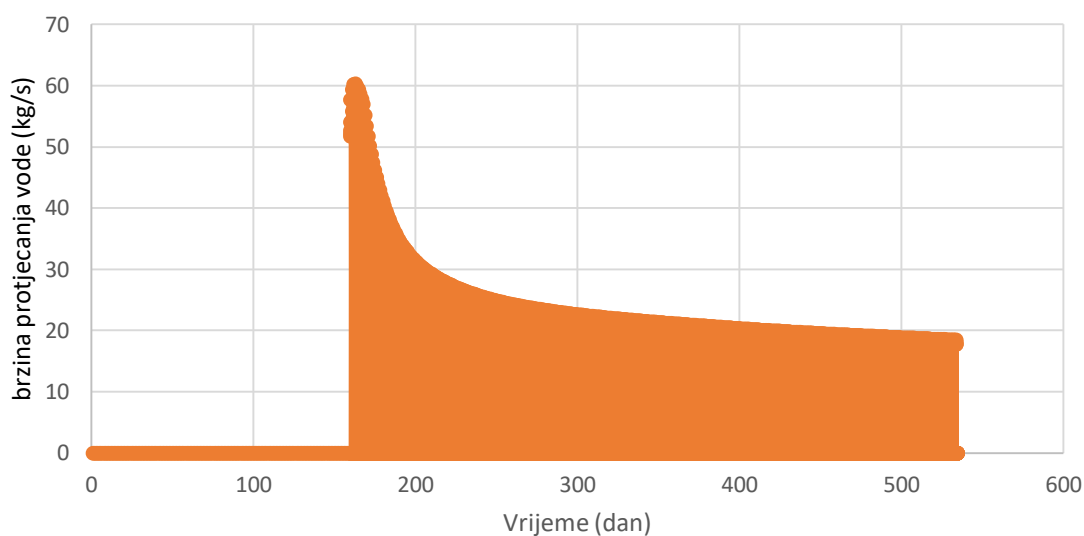
Svi uvjeti koji su postojali prilikom proizvodnje CO<sub>2</sub> iz ležišta debljine 40 metara jednaki su i u slučaju proizvodnje zraka. Osnovna razlika je da zbog kraćeg perioda utiskivanja zraka u ležište, proizvodnja u slučaju zraka započinje 40 dana ranije nego u slučaju CO<sub>2</sub>. Kontrolni parametar tijekom proizvodnje zraka je također konstantan tlak na dnu bušotine (*engl. Bottom Hole Pressure, BHP*), a vrijednost tlaka na dnu bušotine tijekom proizvodnje iznosi  $100 \cdot 10^5$  Pa.



**Slika 5-12.** Grafički prikaz promjene proizvodnje zraka tijekom simulacije za debljinu ležišta od 40 metara

Maseni protoci proizvodnje zraka manji su nego tijekom proizvodnje CO<sub>2</sub> (slika 5-12) zbog manje gustoće zraka pri ležišnim uvjetima. U prvom satu prvog dana proizvodnje, maseni protok zraka iz ležišta iznosio je 83 kg/s što je otprilike tri puta manja proizvodnja nego u slučaju proizvodnje CO<sub>2</sub>. No uspoređujući vremenski period pada proizvodnje zraka i CO<sub>2</sub>, pad proizvodnje je puno kraći u slučaju proizvodnje zraka i traje 12 dana što je znatno manje od 75 dana koliko je potrebno da se uspostavi rast proizvodnje CO<sub>2</sub> iz ležišta. Minimalna proizvodnja zraka iznosi 46 kg/s, dok vrijednost proizvodnje na kraju simulacije iznosi 61,3 kg/s. Ovakvo ponašanje tijekom proizvodnje može se objasniti činjenicom da je tijekom proizvodnje zraka veća proizvodnja vode u odnosu na slučaj proizvodnje CO<sub>2</sub>. Dva razloga mogu biti uzrok većoj proizvodnji vode u slučaju zraka. Prvi razlog je taj da zrak pri istim uvjetima tlaka i temperature ima veći kapacitet prijenosa vlage (*engl. Water Vapor Carrying Capacity*), što znači da ima mogućnost prenijeti više

vode od CO<sub>2</sub>. Drugi razlog je razlika u gustoći i viskoznosti zraka i CO<sub>2</sub>. Pri ležišnim uvjetima viskoznost zraka iznosi  $23,3 \cdot 10^{-6}$  Pas, dok vrijednost viskoznosti CO<sub>2</sub> iznosi  $83,47 \cdot 10^{-6}$  Pas. Manja viskoznost znači manje otpore prilikom protjecanja zraka, ali istovremeno i veće brzine protjecanja zraka u ležištu. Zbog većih brzina protjecanja, odziv tlaka se brže prenosi kroz ležište, te voda iz udaljenijih ležišta je brže proizvedena nego u slučaju CO<sub>2</sub>. Veća količina ukupno proizvedene vode znači da je moguće utiskivati više zraka u ležište, te ukoliko je više zraka u ležištu smanjuje se relativna propusnost vode i ukupna proizvodnja vode iz ležišta zasićenog zrakom. Promjena proizvodnje vode tijekom proizvodnje zraka iz ležišta debljine 40 metara prikazana je na slici 5-13.



**Slika 5-13.** Promjena proizvodnje vode tijekom proizvodnje zraka iz ležišta debljine 40 metara

Maksimalna proizvodnja vode tijekom proizvodnje zraka iznosi 60,3 kg/s (217,8 m<sup>3</sup>/h), dok minimalna vrijednost proizvodnje iznosi 18,45 kg/s (66,4 m<sup>3</sup>/h). Vidljivo je da je proizvodnja vode tijekom proizvodnje zraka veća nego tijekom proizvodnje CO<sub>2</sub>, ali isto tako da je pad proizvodnje vode, tijekom proizvodnje zraka, brži nego pad proizvodnje vode u slučaju ležišta sa CO<sub>2</sub> kao radnim fluidom. Smanjenjem proizvodnje vode smanjuje se i gustoća smjese zraka i vode koja se proizvodi iz ležišta. Pošto se u slučaju zraka proizvodi više vode, a pad proizvodnje vode je brži nego u slučaju CO<sub>2</sub>, znači da će se smanjivanje efektivne gustoće smjese zraka i vode odvijati brže. Smanjenjem efektivne gustoće smjese zraka i vode smanjuje se hidrostatski stupac koji djeluje na dno bušotine i

na taj način povećava se depresija tlaka na dnu bušotine što omogućava povećanje proizvodnje.

### 5.7. Kompresija CO<sub>2</sub>

Prije proračuna kompresije svojstva plina koja je bitno znati su (Desai, 2017):

1. Vrsta plina koja se komprimira, njegov sastav te fizikalna svojstva svake komponente plina,
2. Tlak na usisu kompresora (*engl. Suction pressure- P<sub>s</sub>*),
3. Temperaturu na usisu kompresora (*engl. Suction Temperature- T<sub>s</sub>*),
4. Željeni tlak na kraju kompresije (*engl. Discharge pressure- P<sub>d</sub>*) i
5. Volumni protok plina na usisu.

Nakon što je poznat sastav plina i udio komponenti u plinu koji se komprimira, potrebna svojstva plina koja su potrebna za određivanje performansi kompresora su (Desai, 2017):

1. Molekulska masa plina,
2. Faktor kompresibilnosti tijekom usisa i
3. Omjer specifičnih toplina.

CO<sub>2</sub> pri standardnim uvjetima, temperaturi od 288,15 °K i tlaku od 1·10<sup>5</sup> Pa, se nalazi u plinovitom stanju. Kritična točka CO<sub>2</sub> iznosi 304,25 °K i 73,8·10<sup>5</sup> Pa. Molarna masa plina iznosi 44,01 g/mol. Za razmatrani slučaj kompresije uzet je čisti CO<sub>2</sub>, što znači da tijekom kompresije ne dolazi do promjene molarne mase plina. Faktor stlačivosti plina definira omjer između realnog volumena plina i idealnog volumena plina, a definiran je slijedećom jednadžbom 5.1. (Desai, 2017):

$$Z = \frac{V_{realni}}{V_{idealni}} \quad (5.1.)$$

Z- faktor stlačivosti

V<sub>realni</sub> – Realni volumen plina (m<sup>3</sup>)

V<sub>idealni</sub> – Idealni volumen plina (m<sup>3</sup>)

Faktor stlačivosti plina funkcija je sastava plina, tlaka i temperature. Tijekom kompresije iznos faktora stlačivosti izrazito je važan iz razloga što pri zadanim uvjetima tlaka i temperature faktor stlačivosti definira volumen plina na ulazu u kompresor. CO<sub>2</sub> tijekom

kompresije ima posebno ponašanje jer u određenoj fazi kompresije dolazi do prijelaza iz plinovitog u superkrično stanje. Uslijed prelaza iz plinovitog u superkrično stanja dolazi do velikih promjena u gustoći iz razloga što u superkričnom stanju CO<sub>2</sub> ima gustoću kao tekućina dok je viskoznost jednaka viskoznosti plinovitog CO<sub>2</sub>. Prijelaz iz plinskog u superkrično stanje također uzrokuje drastičan pad faktora stlačivosti u blizini kritične točke, što rezultira velikim promjenama volumena CO<sub>2</sub>. Faktor stlačivosti ima najmanju vrijednost u kritičnoj točki, a nakon kritične točke vrijednost faktora stlačivosti kontinuirano raste. Tijekom kompresije ovakvo ponašanje predstavlja problem iz razloga što tijekom višestupanjske kompresije ulazni volumen svake faze kompresije određen je promjenom volumena unutar prethodne faze kompresije. Ukoliko je impeler koji slijedi dizajniran za jednak faktor stlačivosti kao i njemu prethodni impeler, tada taj impeler postaje predimenzioniran za volumen plina koji ulazi u njega (Desai, 2017). Kod CO<sub>2</sub> ova pojava je bitna jer kritični uvjeti tijekom kompresije mogu biti postignuti izrazito brzo ukoliko se ne vodi računa o maksimalnim omjerima kompresije tijekom dizajniranja kompresorske jedinice. Kako bi se izbjegli fazni prijelazi tijekom kompresije iz plinovitog u tekuće stanje, temperatura tijekom kompresije bi se uvijek trebala držati iznad kritične temperature od 304,25°K (Desai, 2017). Omjer kompresije definiran je jednadžbom 5-2 (McCullum i Ogden, 2006).

$$CR = \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{1/n}$$

(5-2.)

Gdje su:

CR- omjer kompresije (*engl. Compression Ratio*)

P<sub>out</sub> – Izlazni tlak zadnjeg stupnja kompresije (Pa)

P<sub>in</sub> – Ulazni tlak prvog stupnja kompresije (Pa)

Poželjno je da tijekom kompresije CO<sub>2</sub> omjeri kompresije budu izabrani na način da uvjeti kritične točke budu postignuti tek pri kasnijim fazama kompresije. Maksimalna vrijednost omjera kompresije tijekom utiskivanja CO<sub>2</sub> iznosi 2 (Jackson i Brodal, 2019). Ulazni tlak za prvi stupanj kompresije tijekom komprimiranja CO<sub>2</sub> iznosi 1×10<sup>5</sup> Pa, dok tlak utiskivanja u ležište iznosi 180·10<sup>5</sup> Pa. Odabrana temperatura pri usisu u svaki stupanj



kompresije iznosi 305,15 °K, što osigurava da tijekom kompresije neće doći do prijelaza iz tekuće u plinsku fazu.

### 5.7.1. Proračun energije utrošene na kompresiju CO<sub>2</sub> i energije pridobivene ekspanzijom CO<sub>2</sub>

Temeljni cilj ovog diplomskog rada je proračun potrebne energije za kompresiju CO<sub>2</sub> i proračun energije koju je moguće pridobiti iz ležišta tijekom proizvodnje. Proračun potrebne energije pri svakom stupnju kompresije izračunava se prema jednadžbi 5-3. (Romeo, et al., 2009).

$$W_c = m \cdot (h_{izlaz} - h_{ulaz}) \cdot t \quad (5-3.)$$

Gdje su:

$W_c$  - rad kompresora (kJ)

$m$  - maseni protok fluida (kg/s)

$h_{izlaz}$  – specifična entalpija na izlazu iz kompresora

$h_{ulaz}$  – specifična entalpija na ulazu u kompresor

$t$  – vrijeme utiskivanja (s)

Vrijednosti parametara potrebnih za proračun kompresije prikazani su u tablici 5-1.

**Tablica 5-1.** Prikaz parametara za proračun kompresije tijekom utiskivanja CO<sub>2</sub>

Stupanj Kompresije	Ulazni Tlak (Pa)	Izlazni Tlak (Pa)	Z	$h_{ulaz}$ (kJ/kg)	$h_{izlaz}$ (kJ/kg)	$\Delta h$ (kJ/kg)
1	$1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	0,9907	220	270	50
2	$2 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^5$	0,9813	225	265	40
3	$4 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^5$	0,9622	215	270	55
4	$8 \cdot 10^5$	$16 \cdot 10^5$	0,9219	215	260	45
5	$16 \cdot 10^5$	$32 \cdot 10^5$	0,8334	205	255	50
6	$32 \cdot 10^5$	$74 \cdot 10^5$	0,3715	185	225	40

Vrijednosti specifičnih entalpija u skladu su s dijagramom iz rada Kumar (2010., str 6). Kompresija CO<sub>2</sub> ostvarena je u 6 stupnjeva kako bi se izbjegli problemi s nastankom tekuće faze tijekom kompresije prije postizanja kritične točke. Iz podataka u tablici je vidljivo da za prvih 5 stupnjeva kompresije razlika u faktoru stlačivosti nije velika između

svake faze. Najveći pad faktora stlačivosti se događa tijekom zadnje faze kompresije upravo iz prethodno navedenih razloga da je faktor stlačivosti najmanji u blizini kritične točke, što predstavljaju uvjeti od  $74 \cdot 10^5$  Pa i  $305.15$  °K. Jednako tako lako je uočiti da zadnji izlazni tlak kompresije iznosi  $74 \cdot 10^5$  Pa, a ne  $180 \cdot 10^5$  Pa koliko je određen tlak utiskivanja u ležište. Razlog tomu je što se za utiskivanje CO<sub>2</sub> u zadnjoj fazi ne koriste centrifugalni kompresori, nego centrifugalna pumpa. Pošto se nakon zadnjeg stupnja kompresije CO<sub>2</sub> nalazi u superkritičnom stanju, njegova gustoća je višestruko veća nego u slučaju zadnjeg stupnja kompresije, efektivnije je u tom slučaju koristiti pumpu iz razloga što se u tom slučaju koristi manje energije na utiskivanje CO<sub>2</sub>, te se pri odabranom omjeru kompresije eliminiraju dodatni stupnjevi kompresije koji bi bili potrebni za postizanje tlaka od  $180 \cdot 10^5$  Pa (Muhammad, et al., 2019). Za proračun energije potrebne za pumpanje potrebno je odrediti tlak utiskivanja pumpe i volumni protok na ulazu u pumpu. Jednadžba 5-4. prikazuje proračun tlaka pumpe. prikazuje proračun snage pumpe.

$$p_{pumpe} = p_{utis} - p_{Hidr} - p_{ulaz} \quad (5-4.)$$

$p_{pumpe}$  – tlak pumpe potreban za utiskivanje CO<sub>2</sub> (Pa)

$p_{utis}$  – tlak utiskivanja u ležište,  $180 \cdot 10^5$  Pa

$p_{hydr}$  – hidrostatski tlak CO<sub>2</sub> (Pa)

$p_{ulaz}$  – tlak na ulasku u pumpu,  $74 \cdot 10^5$  Pa

U jednadžbi je prikazano da je potrebni tlak utiskivanja pumpe jednak razlici potrebnog tlaka utiskivanja u ležište, hidrostatskog tlaka CO<sub>2</sub> i tlaka na ulazu u pumpu koji je jednak tlaku izlaza iz zadnjeg stupnja kompresije. Hidrostatski tlak je uzet u obzir iz razloga što na dubini od tisuću metara, stupac fluida proizvodi tlak koji iznosi  $84,79 \cdot 10^5$  Pa te stvara dodatni tlak na ležište koji smanjuje efektivni tlak na dnu bušotine i samim time smanjuje energiju potrebnu za utiskivanje fluida u ležište. Jednadžba 5-5. prikazuje proračun volumen na ulazu u pumpu (Desai, 2017).

$$Q = \frac{z_i \cdot (R/MW) \cdot T_{ulaz} \cdot m \cdot 1000}{p_{ulaz}} \quad (5-5.)$$

Gdje su:

Q- volumni protok na ulazu u pumpu [m<sup>3</sup>/h]

R- Opća plinska konstanta,  $8.4748 \cdot 10^{-5}$  [(kg/cm<sup>2</sup>·m<sup>3</sup>)/(mol·K)]

MW- molarna masa [g/mol]

T<sub>ulaz</sub>- temperatura na ulazu pumpe [°K]

m – maseni protok ( kg/s)

p<sub>ulaz</sub>- ulazni tlak pumpe (Pa)

Volumni protok na ulazu pumpe proračunat je za tlak od  $74 \cdot 10^5$  Pa pri temperaturi od 305,15 °K. Tijekom simulacije volumni protok na ulazu u pumpu nije konstantan i on je ovisan o masenom protoku koji je jedini parametar u jednadžbi 5-5. koji se mijenja s tijekom simulacije. Vrijednosti masenog protoka tijekom simulacije dobiveni su pomoću simulatora ECLIPSE E300. Jednadžba 5-6. prikazuje proračun snage pumpe potrebne za utiskivanje CO<sub>2</sub> u ležište.

$$P_{pumpe} = \frac{p_{pumpe} \cdot Q}{3.6 \cdot 10^6} \quad (5-6)$$

Gdje su:

P<sub>pumpe</sub> – Snaga pumpe [kW]

p<sub>pumpe</sub> – tlak na ulazu pumpe [Pa]

Q- volumni protok na ulazu u pumpu [m<sup>3</sup>/h]

Snaga pumpe tijekom simulacije mijenja se ovisno o volumnom protoku CO<sub>2</sub>, dok se volumni protok CO<sub>2</sub> tijekom utiskivanja mijenja ovisno o promjeni tlaka u ležištu tijekom simulacije. Drugi dio proračuna ovog diplomskog rada vezan je za količinu energije koju je moguće pridobiti tijekom proizvodnje plina i ekspanzije kroz turbinu, te proračun ukupne efikasnosti sustava. Tijekom proizvodnje kontrolni parametar je konstantan tlak na dnu bušotine koji iznosi  $100 \cdot 10^5$  Pa. Proračun energije koju je moguće pridobiti tijekom proizvodnje CO<sub>2</sub> iz ležišta prikazan je jednadžbom 5-7.

$$W = P_2 \cdot V_2 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{P_2}\right) + (P_2 - P_1) \cdot V_2 \quad (5-7)$$

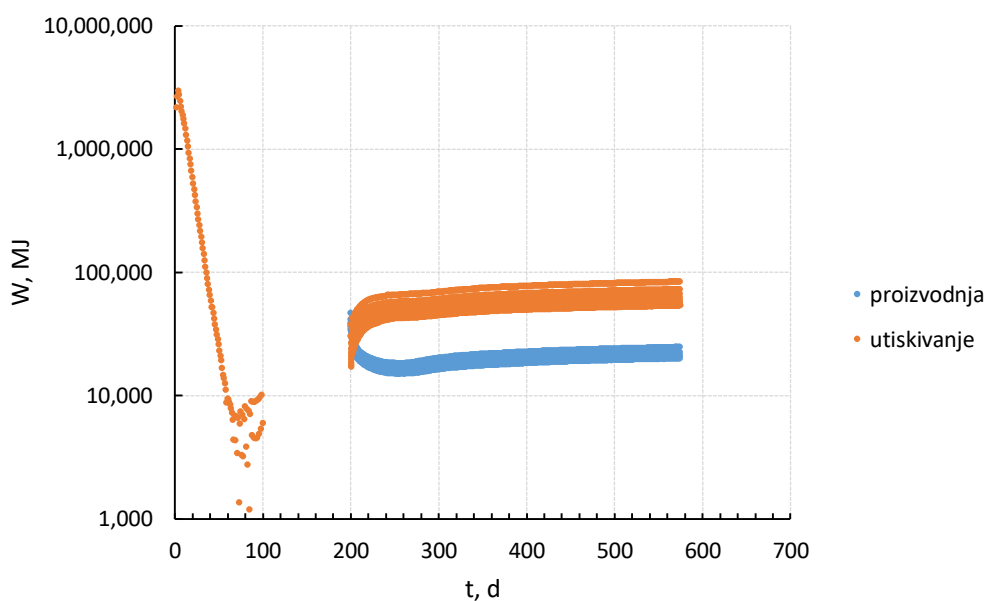
W- rad tijekom ekspanzije CO<sub>2</sub> kroz turbinu [J]

p<sub>2</sub> – tlak na dnu bušotine,  $100 \cdot 10^5$  Pa

$V_2$ - volumen  $\text{CO}_2$  pri tlaku proizvodnje od  $100 \cdot 10^5$  Pa

$P_1$  – krajnji tlak ekspanzije,  $1 \cdot 10^5$  Pa

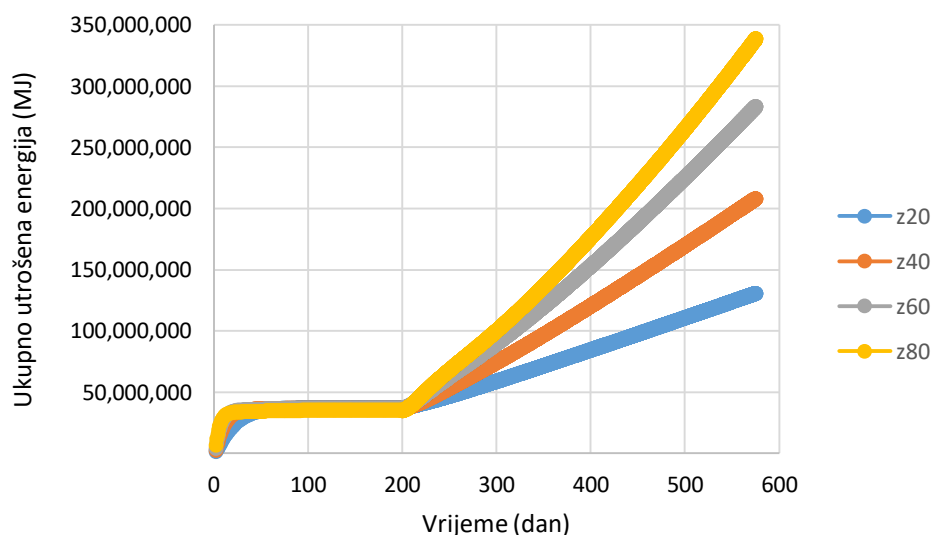
Volumen pri tlaku proizvodnje,  $V_2$ , izračunat je pomoću omjera gustoće  $\text{CO}_2$  pri tlaku  $100 \cdot 10^5$  Pa i masenog protoka u odgovarajućem vremenu. Na slici 5-14. prikazano je kretanje energije potrebne za utiskivanje i energije dobivene tijekom proizvodnje  $\text{CO}_2$  za slučaj debljine ležišta 40 metara.



**Slika 5-14.** Prikaz proizvedene i pridobivene energije za ležište debljine 40 metara u slučaju  $\text{CO}_2$

Kretanje proizvedene i pridobivene energije se podudara s krivuljama utiskivanja i proizvodnje  $\text{CO}_2$ . Razlog ovakvih trendova kretanja krivulja su promjene masenih protoka tijekom proizvodnje i utiskivanja. Krivulje utrošene energije i proizvedene energije preklapaju se tijekom kratkog vremenskog perioda na početku utisno-proizvodnog perioda. Tijekom tog kratkog vremenskog perioda proizvodnja energije pridobivene iz ležišta veća je od utrošene zbog proizvodnje  $\text{CO}_2$  iz vršnih dijelova ležišta koji su utisnuti tijekom razvojne faze ležišta u prvih 100 dana. Nakon početnog perioda visoke proizvodnje energije dolazi do pada proizvedene i porasta utrošene energije, te do kraja simulacije krivulje utrošene i proizvedene energije imaju jednaki nagib, što znači da su s vremenom simulacije količina utrošene i pridobivene energije u konstantnom proporcionalnom odnosu. Kako se, zbog proizvodnje vode, te povećanja zasićenja utisnutim plinom, a time i

povećanja relativne propusnosti za plin sve više prostora u ležištu oslobađa za utisnuti CO<sub>2</sub>, dolazi do povećanja utisnih količina i do povećanja energije utrošene na utiskivanje. Proizvodnja energije očito je manja u odnosu na utrošenu energiju što znači da se tijekom ciklusa proizvodnje u ležištu zadržava više plina u ležištu nego što je iz ležišta proizvedeno. Produljenje trajanja perioda proizvodnje tijekom simulacija dovelo bi do većih količina proizvodnje vode i naglijeg pada tlaka u ležištu. Proizvodnja vode je u CAES sustavima u akviferima jedan od kritičnih parametara koji određuju efikasnost postrojenja. Razlika između krivulja na slici 5-14. sugerira na izrazito nisku efikasnost pridobivanja energije tijekom korištenja CO<sub>2</sub> kao radnog plina. Efikasnost postrojenja izračunata je kao omjer ukupno utrošene i ukupno proizvedene energije. Efikasnost u slučaju debljine ležišta 40 metara iznosi 15,2%. Razlog niske efikasnosti također može biti mogućnost otapanja određenog dijela CO<sub>2</sub> u vodi. Otapanjem CO<sub>2</sub> u vodi smanjuje se efektivna količina plina koja je pridobiva i samim time smanjuje se količina energije koja može biti proizvedena. Količina plina koja se zadržava unutar ležišta tijekom trajanja simulacije određena je omjerom površine i debljine ležišta A/h. U ležištima veće debljine veća je mogućnost utiskivanja plina unutar ležišta zbog veće raspoložive duljine bušotine unutar ležišta. Uslijed proizvodnje iz ležišta većih debljina količine utisnutog plina koje se zadržavaju u ležištu biti će veće nego u slučaju ležišta manjih debljina. Na slici 5-15 prikazani su ukupni utrošci energije tijekom simulacije za slučajeve debljina ležišta od 20, 40, 60 i 80 metara.



**Slika 5-15.** Kumulativni utrošci energije za različite debljine ležišta tijekom utiskivanja CO<sub>2</sub>

Potrebna energija utrošena za početni razvoj ležišta jednakog je iznosa za sve slučajeve. Utrošena energija na početno utiskivanje je jednaka iz razloga što u svim simulacijskim slučajevima volumen ležišta je jednak. Osnovna razlika je u vremenu potrebnom za ostvarivanje maksimalnog tlaka skladištenja od  $180 \cdot 10^5$  Pa. Najkraće vrijeme utiskivanja je za debljinu ležišta od 80 metara, dok je najdulje vrijeme potrebno za razvoj debljine ležišta od 20 metara. Potrebno vrijeme za početni razvoj ležišta funkcija je debljine ležišta, jer sa većom debljinom duljina bušotine koja je raspoloživa za utiskivanje CO<sub>2</sub> u ležište je veća i samim time veće su količine utiskivanja. Ukupna utrošena energija najveća je za najveću debljinu ležišta upravo iz istog razloga, jer povećanje utiskivanja vremenom ima najveći rast za ležište debljine 80 metara. Tablica 5-2. prikazuje ukupnu utrošenu energije i efikasnost za svaki simulacijski slučaj.

**Tablica 5-2.** Ukupno utrošena energija za različite debljine ležišta tijekom utiskivanja CO<sub>2</sub>

Debljina ležišta (m)	Ukupno utrošena energija (MJ)	Ukupno proizvedena energija (MJ)	Efikasnost %
20	114,618,417	21,831,834	19,0
40	207,375,790	37,233,078	18,0
60	295,246,407	50,775,150	17,2
80	361,413,717	60,442,617	16,7

### 5.8. Kompresija zraka

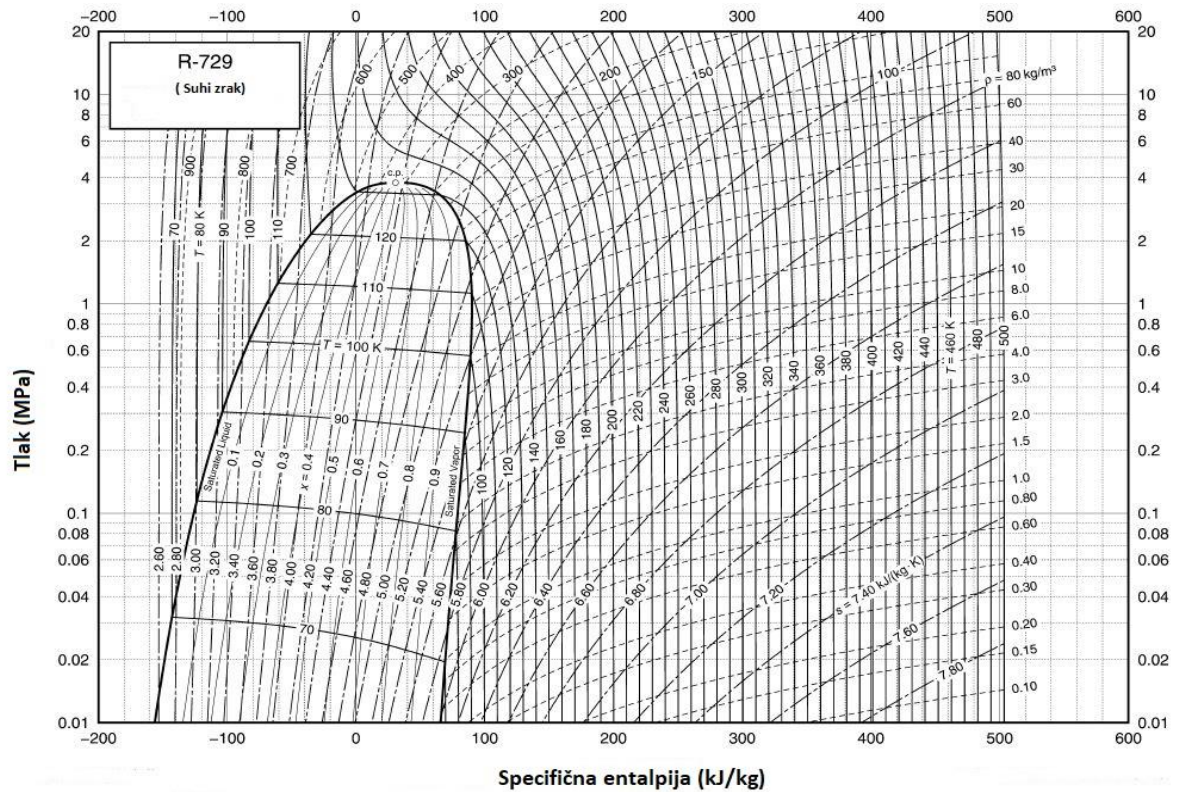
Za izračune utrošene energije za kompresiju zraka, kao i pridobivene energije tijekom proizvodnje zraka korištene su iste jednadžbe kao i za CO<sub>2</sub>. Razlika tijekom kompresije zraka u usporedbi sa CO<sub>2</sub> jest razlika ponašanje zraka tijekom kompresije. Zrak u fazi kompresije nije u mogućnosti pri relativno niskim uvjetima tlaka kompresije promijeniti agregatno stanje iz plinovitog u tekuće, te variranje faktora stlačivosti tijekom povećanja tlaka nije jednako kao i kod CO<sub>2</sub>. Kao što je navedeno u prethodnim poglavljima, ukoliko se uzme početna temperatura kompresije CO<sub>2</sub> od 288,15°K, CO<sub>2</sub> već pri tlaku od  $51 \times 10^5$  Pa prelazi u tekuće stanje, dok za zrak takva pojava nije moguća i on se tijekom uvjeta kompresije koji su ispitani u ovom diplomskom radu, uvijek nalazi u plinovitom stanju i superkritičnom. Male promjene faktora stlačivosti zraka tijekom kompresije omogućavaju korištenje većih omjera kompresije tijekom komprimiranja plina, što znači da za postizanje

željenog tlaka utiskivanja od  $180 \cdot 10^5$  Pa se može koristiti manji broj stupnjeva kompresije u odnosu na CO<sub>2</sub>. Manje promjene volumena tijekom svakog stupnja kompresije neće dovesti do potkapacitiranja impelera slijedećeg stupnja kompresije kao u slučaju CO<sub>2</sub>. Omjer kompresije tijekom komprimiranja zraka bi se trebao nalaziti u rasponu vrijednosti od 2 do 4 prema Kraut (1987, str. 244.). Svojstva zraka tijekom kompresije prikazana su u tablici 5-3 ([https://www.peacesoftware.de/einigewerte/luft\\_e.html](https://www.peacesoftware.de/einigewerte/luft_e.html)).

**Tablica 5-3.** Svojstva zraka tijekom kompresije

stupanj kompresije	P <sub>1</sub> (Pa)	P <sub>2</sub> (Pa)	h <sub>1</sub> (kJ/kg)	h <sub>2</sub> (kJ/kg)	Δh (kJ/kg)	Z	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )	Omjer kompresije
1	1,00	3,6	305	440	135	0,9990883	4,19127	3,66
2	3,66	13,40	305	430	125	0,9968438	15,3619	3,66
3	13,40	49,03	305	435	130	0,9922432	56,4615	3,66
4	49,03	179,44	280	415	135	1,0416323	199,681	3,66

Iz prethodno prikazanih podataka je vidljivo da pri odabranoj temperaturi od 305,15°K, koja je jednaka kao i tijekom kompresije CO<sub>2</sub> radi lakše usporedbe zrak ima značajno manju gustoću od CO<sub>2</sub>. Manja gustoća znači da će zrak imati veći volumen što negativno utječe na količinu zraka koja se može skladištiti unutar ležišta, te će u usporedbi sa CO<sub>2</sub> količina zraka u ležištu biti znatno manja. Samim time što se manja količina plina skladišti unutar ležišta, tijekom perioda proizvodnje manja količina plina može se proizvesti na površinu što dovodi do manje generacije električne energije. Na slici 5-15. prikazan je p-h dijagram korišten za očitavanje entalpija za svaki stupanj kompresije zraka.

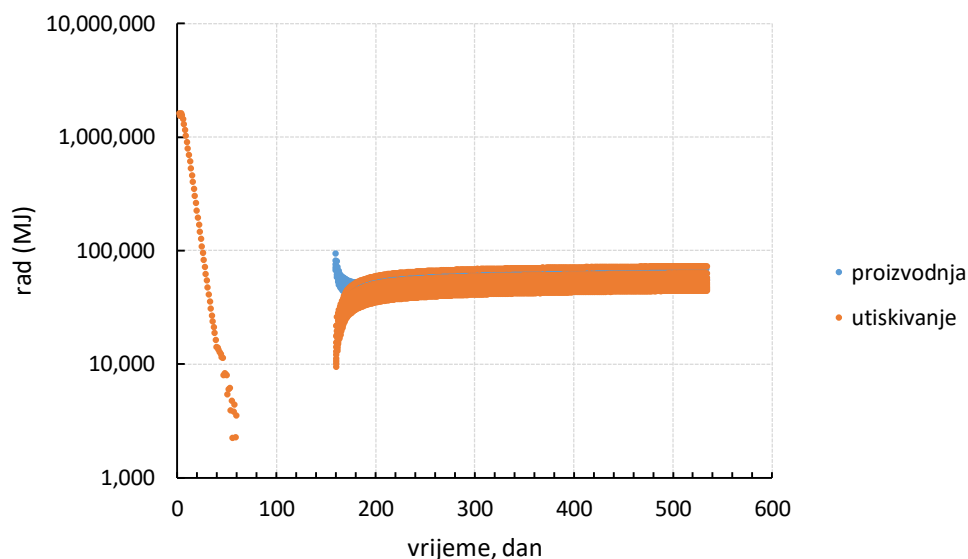


**Slika 5-16.** Dijagram p-h korišten za očitavanja specifičnih entalpija zraka prilikom svakog stupnja kompresije (ASHRAE Handbook poglavlje 30, 2009)

Uspoređujući p-h dijagram korišten za očitavanje energije potrebne prilikom kompresije zraka i CO<sub>2</sub>, vidljivo je kako tijekom kompresije zraka promjena entalpije je veća što može sugerirati da će energija potrebna za kompresiju zraka biti veća nego tijekom kompresije CO<sub>2</sub>. Ipak tijekom proračuna energija to nije bio slučaj iz razloga što se zbog manje gustoće zraka komprimira manja količina zraka, manji maseni protoci, te su tijekom kompresije CO<sub>2</sub> potrebna dva dodatna stupnja kompresije i završno pumpanje u ležište.

Ukupna energija utrošena na kompresiju zraka te ukupna energija pridobivena tijekom proizvodnje za ležište debljine 40 metara prikazani su na slici 5-16.





**Slika 5-17.** Dijagramski prikaz utrošene i proizvedene energije iz zraka za ležište debljine 40 metara

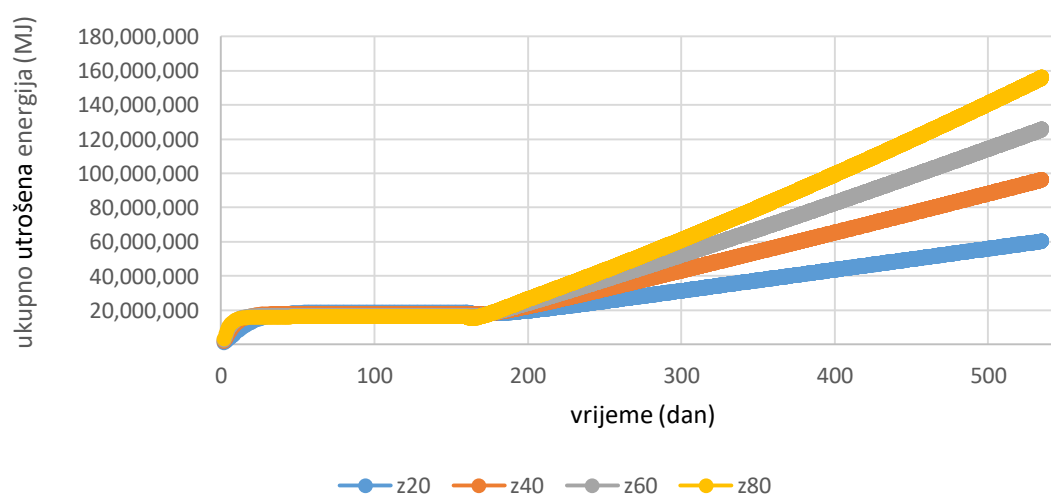
Proizvodnja zraka, kao i u slučaju proizvodnje CO<sub>2</sub>, u izrazito kratkom periodu veća je od količine utiskivanja. Razlog je proizvodnja zraka utisnutog u vremenskom periodu od 60 dana potrebno za formiranje zračnog jastuka u ležištu. Nakon završetka tog perioda, zbog porasta utiskivanja i vremenskog trajanja utiskivanja koje je 5 sati duže od vremenskog trajanja proizvodnje, utisne količine postaju veće i do kraja simulacije količina zraka u ležištu se povećava. Važno je uočiti da za slučajeve u kojima je radni plin zrak dolazi do preklapanja krivulja utiskivanja i proizvodnje. Preklapanje krivulja rezultat je činjenice da je moguće proizvesti veći udio zraka koji je utisnut tijekom deset sati nego u slučaju CO<sub>2</sub>. Razlog tomu je veća pokretljivost zraka unutar ležišta zbog njegove manje gustoće i manje viskoznosti pri uvjetima skladištenja. Također preklapanje krivulja upućuje na činjenicu da je iskoristivost sustava u kojima je zrak radni fluid veća nego u slučajevima u kojima je CO<sub>2</sub> radni fluid. Osim razlike u gustoći i viskoznosti na veću efikasnost sustava utiče i činjenica da zrak nije topiv u vodi i samim time veća količina zraka u ležištu je raspoloživa za proizvodnju. Manja gustoća zraka rezultirat će manjim masenim protocima tijekom proizvodnje koji će utjecati na manji proizvedeni volumen, u usporedbi sa CO<sub>2</sub>, i ta činjenica diktira količinu proizvedene energije u sustavu. Prema jednadžbi 5-7. volumen proizvedenog plina u proporcionalnom je odnosu sa radom. Pošto je proizvedeni volumen plina određen kao omjer masenog protoka i gustoće u određenom vremenu, znači da će manji proizvedeni volumen plina u konačnici rezultirati sa manjom proizvodnjom

električne energije. Zbirni prikaz utrošenih i proizvedenih energija u sustavima sa utiskivanjem i proizvodnjom zraka prikazan je u tablici 5-4.

**Tablica 5-4.** Prikaz ukupno utrošene i proizvedene energije za različite debljine ležišta tijekom utiskivanja i proizvodnje zraka

Debljina ležišta (m)	Ukupno utrošena energija (MJ)	Ukupno proizvedena energija (MJ)	Efikasnost %
20	103,149,137	61,704,102	59,8
40	182,013,301	104,007,602	57,1
60	248,327,730	139,775,784	56,3
80	316,167,916	176,350,152	53,1

Uspoređujući tablice 5-3. i 5-4. vidljivo je da je ukupno utrošena ali i ukupno proizvedena energija za slučajeve u kojima je CO<sub>2</sub> radni plin veća ali je ukupna efikasnost sustava znatno manja. Razlog tome je upravo otapanje značajne količine CO<sub>2</sub> u vodi. Tijekom proizvodnje zraka efikasnost sustava opada sa povećanjem debljine ležišta što upućuje na činjenicu da se sa povećanjem debljine ležišta sve veća količina utisnutog zraka zadržava u ležištu. Svrha zaostalog zraka u ležištu jest održavanje tlaka u ležištu tijekom cijele operacije i smanjenja zasićenja vodom u radnoj zoni ležišta. Efikasnost sustava izračunata je kao omjer ukupno proizvedene i ukupno utrošene energije samo za vrijeme trajanja utisno-proizvodnog ciklusa od 375 dana. Promjena ukupno utrošene energije za debljine ležišta od 20, 40, 60 i 80 metara prikazana je na slici 5-7.

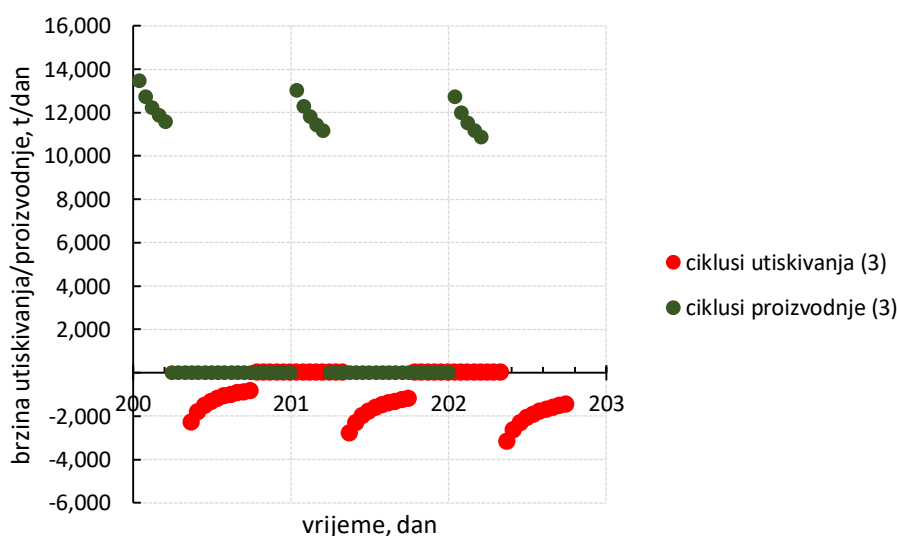


**Slika 5-18.** Ukupno utrošena energija na utiskivanje zraka za sve simulacijske slučajeve

Kao i u slučaju utiskivanja CO<sub>2</sub> energija utrošena na početni razvoj ležišta jednaka je za sve simulacijske slučajeve, osnovna razlika je u vremenu potrebnom za utiskivanje do tlaka od  $180 \cdot 10^5$  Pa. Potrošnja energije najveća je u slučaju ležišta debljine 80 metara, a razlog je što je u tom slučaju najdulji kanal bušotine kroz koji je moguće utiskivati u ležište. Uspoređujući sa utrošenim energijama za utiskivanje CO<sub>2</sub>, za utiskivanje CO<sub>2</sub> u ležište debljine 20 metara potrebna je približno jednaka količina energije kao i u slučaju utiskivanja zraka u ležište debljine 80 metara.

## 6. DISKUSIJA REZULTATA

Skladištenje energije u podzemnim strukturama uključuje period utiskivanja plina radi stvaranja plinskog jastuka (engl. *gas plume* ili *cushion gas*), zatim period mirovanja sustava radi stabiliziranja novonastalih odnosa utisnutog plina i slojne vode te cikličkog utiskivanja i izvlačenja plina. Samo sa stanovišta ležišnog inženjerstva, velik je broj parametara koji će utjecati na injektivnost, produktivnost te na sumarne količine energije utrošene u ovakvom sustavu. Također, proizvodnja vode predstavlja parametar koji ovdje nije razmatran (potrebno bi bilo injektirati vodu natrag u sloj i tu je tada potrebno simulirati velik broj scenarija utiskivanja. Ekonomska evaluacija i optimiranje sustava također premašuje opseg diplomskog rada. S ležišnog gledanja, u analizi omjera utrošene i vraćene energije su uzeti neobrađeni podatci, a možda bi bilo potrebno uzimati u obzir kako tijekom svakog ciklusa postoji limit određen tlakom frakturiranja pokrovnih naslaga, te promjena u brzini protjecanja ukoliko se protok u bušotini limitira tlakom (slika 6-1). Posljedično, slijed promjena brzina protjecanja postaje uniforman (tj. istovjetan) nakon većeg broja ciklusa utiskivanja i isto tako efikasnost sustava postane konstantna (maksimalna).

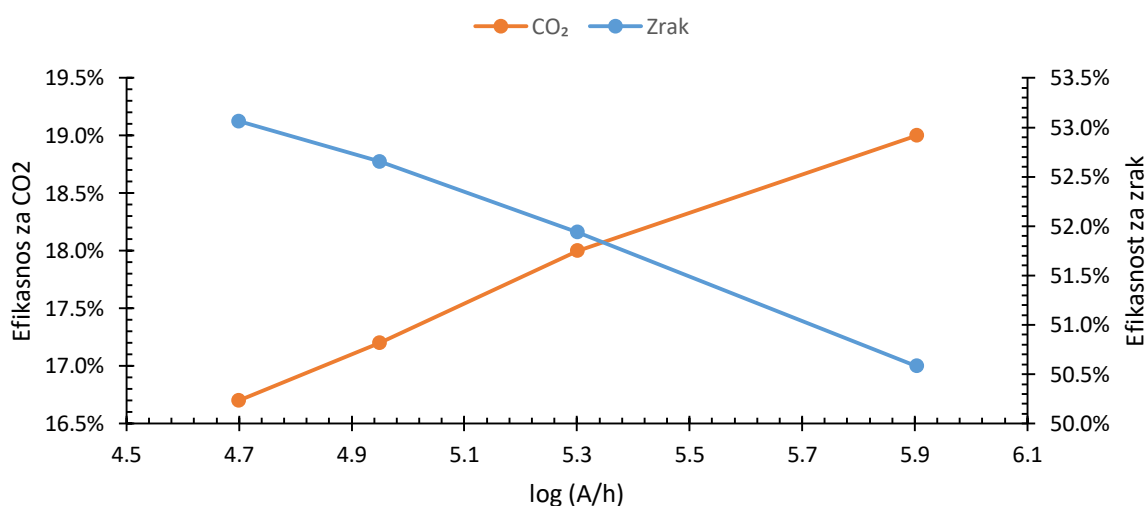


**Slika 6-1.** Varijacija brzine protjecanja tijekom prva tri operativna ciklusa.

S ciljem smanjenja štetnog okolišnog utjecaja ugljikovog dioksida razmatrana je mogućnost njegove primjene kao radnog plina za CAES tehnologiju, te primjena poroznih akvifera kao skladišta potencijalne energije komprimiranog plina u podzemlju. Da bi se odredila mogućnost primjene CO<sub>2</sub>, potrebno je ispitati ponašanje CO<sub>2</sub> tijekom utiskivanja i proizvodnje, odnosno kompresije i ekspanzije. Za kompresiju CO<sub>2</sub> potreban je veći broj

stupnjeva kompresije, zbog ograničenja vrijednosti omjera kompresije koje iznosi dva. Nizak omjer kompresije omogućava sprečavanje kondenzacije CO<sub>2</sub> tijekom kompresije i povećava broj stupnjeva potrebnih za postizanje određenog tlaka. Veći broj stupnjeva kompresije iziskuje veće kapitalno ulaganje. Pošto pri uvjetima utiskivanja u ležište, 180·10<sup>5</sup> Pa i 305,15 °K CO<sub>2</sub> ima gustoću od 864,4 kg/m<sup>3</sup>, što je 4,3 puta više od gustoće zraka pri istim uvjetima, čija gustoća iznosi 200 kg/m<sup>3</sup>, veća količina CO<sub>2</sub> utiskuje se i ležište što uzrokuje veći utrošak energije tijekom komprimiranja i utiskivanja CO<sub>2</sub>. Istovijetno utiskivanju, i tijekom proizvodnje, zbog veće gustoće CO<sub>2</sub>, moguće je pridobiti veću količinu energije.

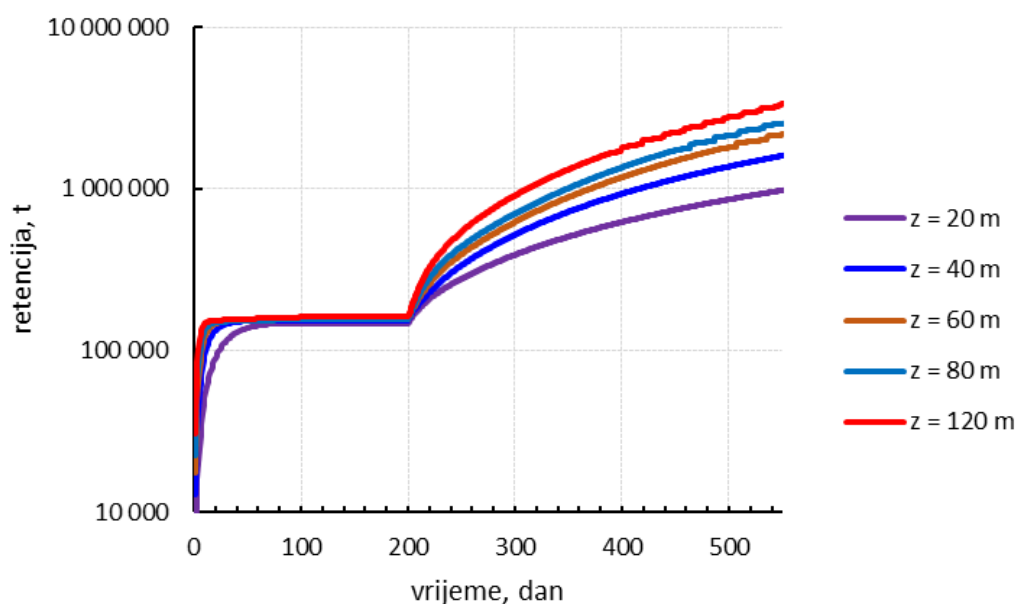
Iako je veća količina energije pridobiva kada se u sustavu kao radni fluid koristi CO<sub>2</sub>, efikasnost sustava u kojem se koristi CO<sub>2</sub> je u prosjeku oko 40% manja nego za slučaj jednake debljine ležišta u kojima je korišten zrak kao radni fluid (slika 6-2).



**Slika 6-2.** Efikasnost podzemnog skladišta (omjer energije ekspanzije i energije utrošene za kompresiju i pumpanje) pri različitim omjerima površine i efektivne debljine

Slika 6-2 pokazuje i suprotnu pravilnost efikasnosti ovisno o omjeru površine i debljine sloja. Suprotna pravilnost efikasnosti za slučajeve zraka i CO<sub>2</sub> ukazuje na činjenicu da CO<sub>2</sub> ima veću topivost, te za ležišta veće debljine tijekom utiskivanja postoji veća kontaktna površina između CO<sub>2</sub> koji se utiskuje i vode iz ležišta. Zbog veće kontaktne površine dolazi do otapanja više CO<sub>2</sub> u ležišnoj vodi što umanjuje količinu CO<sub>2</sub> koji može biti proizveden za generaciju električne energije. Drugi razlog većeg zadžavanja, retencije CO<sub>2</sub> u ležištu jest manji volumen proizvodnje zbog veće gustoće CO<sub>2</sub>, pri zadanim uvjetima. Kako bi se pridobio jednaki volumen CO<sub>2</sub> kao i zraka potrebno je ostvariti puno veću depresiju tlaka na dnu bušotine, i samim time ukoliko je depresija tlaka na dnu bušotine

jednaka kao i u slučaju zraka, više CO<sub>2</sub> će se zadržati u ležištu. Također na vrijednost hidrostatskog stupca CO<sub>2</sub> utječe količina vode koja se porizvodi. Iako je kvantitativno količina proizvedene vode u sustavima CO<sub>2</sub> manja, pad proivodnje vode u slučaju CO<sub>2</sub> je manji nego u slučaju zraka, i samim time potrebno je duže vremena da se utjecaj proizvedene vode smanji na minimum, što smanjuje mogućnost maksimalne porizvodnje CO<sub>2</sub> iz ležišta i povećava količinu CO<sub>2</sub> koje se zadržavaju u ležištu. Slika 6-3. prikazuje promjene retencije CO<sub>2</sub> sa promjenom debljine ležišta.



**Slika 6-3.** Analiza retencije CO<sub>2</sub> pokazuje kako će deblji sloj istog volumena davati veću retenciju

Vidljivo je da je retencija najveća za ležište najveće debljine upravo zbog veće mogućnosti otapanja CO<sub>2</sub> u ležištu veće debljine zbog veće kontaktne površine između slojne vode i CO<sub>2</sub> koji se utiskuje u ležište.

## 7. ZAKLJUČAK

Usporedba podzemnih skladišta plina sa zrakom i CO<sub>2</sub> kao radnim medijem složen je postupak na koji utječu brojni parametri vezani uz fiziku ležišta i fiziku fluida. Evidentne su prednosti PM-CAES sustava, u usporedbi s postojećim postrojenjima za skladištenje energije u naslagama soli, poput većeg maksimalnog tlaka i većeg raspoloživog volumena skladištenja. Faktori koji ograničavaju implementaciju PM-CAES sustava su potreba za „početnom“ energijom kod stvaranja plinskog jastuka u akviferu, propusnost ležišta te proizvedena voda koja se proizvodi iz ležišta i koju bi trebalo odvajati te zbrinjavati.

Za sustav s CO<sub>2</sub> mogu se navesti sljedeći nedostaci:

- CO<sub>2</sub> se u većoj količini otapa u vodi i može reagirati s ležišnom vodom tako da nastane ugljična kiselina H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, koja može izazvati koroziju površinske opreme poput turbine i kompresora, čime je potrebno višestruko skuplje opremanje bušotine.
- CO<sub>2</sub> pokazuje daleko manju efikasnost sustava (2.5 do 3 puta), a taj odnos efikasnosti je poveziv s gustoćom CO<sub>2</sub> i gustoćom zraka pri uvjetima utiskivanja.
- Kako bi se u punom smislu moglo implementirati CO<sub>2</sub>, kao radni plin za CAES tehnologiju nužno je konstruirati zatvoreni sustav cirkuliranja CO<sub>2</sub>, iz razloga što njegovo ispuštanje, u količinama potrebnim za CAES operaciju nije dopustivo. Kreiranjem zatvorenog sustava prema atmosferi, u odnosu na sustave u kojima se koristi zrak, kapitalni i operativni troškovi CAES postrojenja značajno su veći.
- Za CO<sub>2</sub> bi bilo potrebno ugraditi sustav nadgledanja i kontrole radi potencijalnog propuštanja CO<sub>2</sub> do površine, koje je moguće uz cementirani dio oko bušotine ili kroz prirodne pukotine i zone visoke propusnosti u podzemnim strukturama.

Hipoteza rada potvrđena je kroz uočene prednosti sustava s CO<sub>2</sub>:

- Financijska korist od trajnog skladištenja CO<sub>2</sub>
- Mogućnost pohranjivanja, tj. vraćanja veće količine energije u istom pornom volumenu u odnosu na sustav utiskivanja i izvlačenja zraka, bez obzira na višestruko manju efikasnost.

Zaključno se može konstatirati koje su potrebe za budućim analizama, a koja bi premašile opseg ovog rada; potrebno je usporediti sustav s drugačijim vremenima utiskivanja i izvlačenja plina, zatim uključiti utisnu bušotinu za utiskivanje proizvedene vode, provjeriti da li su omjeri efikasnosti sustava s CO<sub>2</sub> i sustava sa zrakom slični kad se analizira sustav na različitim dubinama, te provjeriti odnos efikasnosti sustava pri različitim propusnostima ležišta.

Kada bi se dotične odnose moglo korelirati tako da nije potrebno svaki slučaj ponovo analizirati na temelju numeričke simulacije, tad bi bilo relativno jednostavno napraviti (na temelju više cijena el. Energije i cijena CO<sub>2</sub>) i ekonomsku analizu vremenskih serija podataka o retenciji, i dobiti od vraćene energije.



## 8. POPIS LITERATURE

- AGHAHOSEINI, A., BREYER, C., 2018. Assesment of geological resource potential for compressed air energy storage in global electricity supply. *Energy Conversion and Management*, str. 161-173.
- ALLEN, R., DOHERTY, T., ERIKSON, R., WILES, L.E., 1983. Factors Affecting Storage of Compressed Air in Porous Rock Reservoirs, *Springfield, United States Department of Energy*
- AMIRLATIFI, A. VAHEDIFARD, F., DEGTYAREVA, M., TURNER, R. N., SULIVAN, B., SANTRA, R., ESPOSITO, R.A., 2019. Reusing Abandoned Natural Gas Storage Sites for Compressed Air energy Storage. *Environmental Geotechnics*.
- BARBOUR, E., WILSON, G., RADCLIFFE, J., DING, Y., LI, Y., 2016. A review of pumped hydro energy storage development in significant international electricity markets. *Renewable and Sustainable Energiy Reviews*, str. 421-432.
- BUDT, M., WOLF, D., SPAN, R., YAN, J., 2016. A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments. *Applied Energy*, 170, str. 250-268.
- CARDENAS, B., PIMM, A., 2017.. Lowering the cost of large-scale energy storage: High temperature adiabatic compressed air energy storage. *Propulsion and Power (6,2)*.str 126-133.
- CARNEIRO, J. G., MATOS, C. R., VAN GESSEL, S., 2019. Opportunities for large-scale energy storage in geological formations in mainland Portugal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 99, str. 201-211.
- CHEN, L., ZHENG, T., MEI, S., XUE, X., LIU, B., LU, Q., 2016. *Review and Prospect of Compressed Air Energy Storage Systems*, Peking: State Grid Electric Power Research Insitute.
- DESAI, M. G., 2017. *Specifying Carbon Dioxide Centrifugal Compressor*,McDermott Middle East Incorporated
- ECLPSE Reference Manual, ECLIPSE Schlumberger, 2017.
- HABEL, R., 2011. *Advanced Compression Solutions for CCS, EOR and Offshore CO2*, OTC 22659, Offshore Technology Conference, Rio de Janeiro, Brasil, 4-6 listopad 2011.
- JACKSON, S., BRODAL, E., 2019. Optimization of the Energy Consumption of a Carbon Capture and Sequestration Related Carbon Dioxide Compression Processes. *Energies*, 12(9), str. 1603-1615.
- KRAUT, B., 1987. *Strojarski Priručnik*, 9. izdanje, Zagreb, Tehnička Knjiga
- KUMAR, S., ZARZOUR, O., KING, G., 2010. *Design of CO2 Dehydration and Compression Facilities*. SPE 137284, Abu Dhabi Internation Petroleum Exhibition and Conference, Abu Dhabi, UAE, 1-4 studeni 2010.

- McCOLLUM, D. L., OGDEN, J. M., 2006. *Techno-Economic Models for Carbon Dioxide Compression, Transport and Storage & Correlations for Estimating Carbon Dioxide Density and Viscosity*. Davis, University of California.
- MUHAMMAD, H. A., LEE, G., CHO, J., BHATTI, U.H., BAIK, Y., LEE, B., 2019. Design and optimization of CO<sub>2</sub> pressurization system integrated with a supercritical CO<sub>2</sub> power cycle for the CO<sub>2</sub> capture and storage system. *Energy Conversion and Management*, str. 600-609.
- PARKES, D., EVANS, D., WILIAMSON, P., WILIAMS, J., 2018. Estimating Available Salt Volume for Potential CAES development: A case Study Using the Northwich Halite of the Cheshire Basin. *Journal of Energy Storage*, str. 50-61.
- PENG, D.Y., ROBINSON, D. B., 1976. *A New Two-Constant Equation of State*, Edmonton, Kanada
- ROMEO, L. M., BOLEA, I., LARA, Y., ESCOSA, J. M., 2009. Optimization of intercooling compression in CO<sub>2</sub> capture system. *Applied Thermal Engineering*, str. 1744-1751.
- SHENGI, Z., ZHANG, J., WENJI, S., FENG, Z., 2018. Comparison Analysis of Different Compressed Air Energy Storage Systems. *Energy Procedia*, str. 162-167.
- SMITH, G., WILES, L., LOSCUTOFF, W., 1979. *Numerical Analysis of Temperature and Flow Effects in a Dry, One-Dimensional Aquifer Used for Compressed Air Energy Storage*. Springfield: United States Department of Energy.
- SOTTLEMYRE, J., 1978. *Preliminary Stability Criteria for Compressed Air Energy Storage in Porous Media Reservoirs*. Springfield: United States Department of Energy.
- TOLA, V., MELONI, V., SPADACCINI, F. & CAU, G., 2017. Performance assessment of Adiabatic Compressed Air Energy Storage (A-CAES) power plants integrated with packed-bed thermocline storage systems, *Energy Conversion and Management*, 151, str. 343-356.
- VULIN, D., SAFTIĆ, B., MACENIĆ, M., 2018. *Estimate of dynamic change of fluid saturation during CO<sub>2</sub> injection- Case study of a regional aquifer in Croatia*, Zagreb: Society of Exploration Geophysicists and American Association of Petroleum Geologists.
- WANG, B., BAUER, S., 2017.. Pressure response of large-scale compressed air energy storage in porous formations. *Energy Procedia*, 125, str. 588-595.
- WANG, J., LU, K., MA, L., WANG, J., DOONER, M., MIAO, S., LI, J., WANG, D., 2017. Overview of Compressed Air Energy Storage and Technology Development, *Energies*, 10, str. 991-1013.
- WEI, H., WANG, J., 2018.. Optimal selection of air expansion machine in Compressed Air Energy Storage: A review. *Renewable and Sustainable Energy reviews*, 87, str. 77-95.
- WILES, L., McCANN, R., 1981 a. *Prediction of the Thermohydraulic Performance of Porous-Media Reservoirs for Compressed Air Energy Storage*, Richland.

WILES, L. & McCANN, R., 1981 b. *Water Coning in Porous Media Reservoirs for Compressed Air Energy Systems*. Springfield.

YANG, K., ZHANG, Y., LI, X., XU, J., 2016. Design and calculation of advanced adiabatic compressed air energy storage system. *Themophys*, str. 725-728.

## Web izvori

American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Thermophysical Properties of Refrigerants (I-P), URL: [https://www.techstreet.com/ashrae/standards/f30-thermophysical-properties-of-refrigerants-i-p?gateway\\_code=ashrae&product\\_id=1974815](https://www.techstreet.com/ashrae/standards/f30-thermophysical-properties-of-refrigerants-i-p?gateway_code=ashrae&product_id=1974815)  
(25.10.2019.)

National Institute of Standards and Technology, NIST Chemistry Webbook SRD69, URL: [https://webbook.nist.gov/cgi/fluid.cgi?ID=C124389&TUnit=C&PUnit=bar&DUnit=kg%2Fm3&HUnit=kJ%2Fkg&WUnit=m%2Fs&VisUnit=uPa\\*s&STUnit=N%2Fm&Type=IsoTherm&RefState=DEF&Action=Page](https://webbook.nist.gov/cgi/fluid.cgi?ID=C124389&TUnit=C&PUnit=bar&DUnit=kg%2Fm3&HUnit=kJ%2Fkg&WUnit=m%2Fs&VisUnit=uPa*s&STUnit=N%2Fm&Type=IsoTherm&RefState=DEF&Action=Page)

(28.9.2019)

Peace Software. URL: [https://www.peacesoftware.de/einigewerte/luft\\_e.html](https://www.peacesoftware.de/einigewerte/luft_e.html)

(05.11.2019.)

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam ovaj rad samostalno izradio.

---

Ivan Bikić