

Projekti kaptiranja i geološkog skladištenja CO2 s aspekta procjene rizika migracije

Oberoi Dražić, Arya Olga

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:169:137634>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-12**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij naftnog rudarstva

**PROJEKTI KAPTIRANJA I GEOLOŠKOG SKLADIŠTENJA CO₂ S
ASPEKTA PROCJENE RIZIKA MIGRACIJE**

Diplomski rad

Arya Olga Oberoi Dražić

N387

Zagreb, 2023.

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

PROJEKTI KAPTIRANJA I GEOLOŠKOG SKLADIŠTENJA CO₂ S ASPEKTA PROCJENE
RIZIKA MIGRACIJE

Arya Olga Oberoi Dražić

Rad izrađen: Sveučilište u Zagreb

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku

Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

SAŽETAK

Kao učinkovite mjere ublažavanja klimatskih promjena, ističu se projekti kaptiranja i skladištenja ugljikovog dioksida (CCS) i projekti kaptiranja, korištenja i skladištenja ugljikovog dioksida (CCUS), koji s povećanjem tržišne cijene CO₂ postaju sve prihvatljivije rješenje. Pravni okvir za regulaciju aktivnosti geološkog skladištenja CO₂ u EU-u je Direktiva 2009/31/EZ, koja je prenesena u nacionalno zakonodavstvo svake države članice. Pouzdanost geoloških skladišta predstavlja kritičan element kod mogućnosti realizacije CCS i CCUS projekata, a temelji se na sveobuhvatnoj procjeni rizika. Procjena rizika provodi se kroz: karakterizaciju opasnosti, procjenu izloženosti, procjenu učinaka, te karakterizaciju rizika. Karakterizacija opasnosti uključuje sagledavanje svih komponenata sustava koje predstavljaju potencijalne puteve migracije CO₂. Izloženosti CO₂ definirana je okolišem u koji je plin migrirao dok se procjena učinaka migriranog plina utvrđuje prema osjetljivosti pojedinih staništa. Karakterizacija rizika predstavlja alat koji se koristi kod definiranja kratkoročnog i dugoročnog integriteta skladišta i daje opis rješenja za smanjenje rizika. U svrhu analize rizika istjecanja CO₂ iz geoloških formacija, u radu su definirani mogući putevi migracije CO₂ kao glavne opasnosti koje mogu dovesti do njegova istjecanja. Dan je pregled metoda koje se koriste kod karakterizacije rizika, a na primjeru analize rizika za projekte Otway u Australiji i In Salah u Alžiru prikazana je i analizirana njihova primjenjivost.

Ključne riječi: kaptiranje i geološko skladištenje CO₂, identifikacija opasnosti, analiza rizika migracije CO₂

Diplomski rad sadrži: 75 stranica, 12 tablica, 21 sliku, 62 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Karolina Novak Mavar, docentica RGNf-a

Ocjenjivači: Dr. sc. Karolina Novak Mavar, docentica RGNf-a,

Dr. sc. Nediljka Gaurina-Međimurec, prof. emerita RGNf-a,

Dr. sc. Domagoj Vulin, red. prof. RGNf-a

Datum obrane: 17.02.2023., Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

CO₂ CAPTURE AND GEOLOGICAL STORAGE PROJECTS FROM THE ASPECT OF
MIGRATION RISK ASSESSMENT

Arya Olga Oberoi Dražić

Thesis completed at: University of Zagreb

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Department of Petroleum and gas engineering and energy

Pierottijena 6, 10 000 Zagreb

ABSTRACT

Carbon Capture and Storage (CCS) and Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) projects are effective climate change mitigation measures that are increasingly acceptable solutions as the market price of CO₂ rises. The legal framework for regulating CO₂ geological storage activities in the EU is Directive 2009/31/ EC, which has been transposed into the national legislation of each member state. As defined by the Directive, the reliability of geological storage is a crucial element for the possibility to implement CCS and CCUS projects and is based on a comprehensive risk assessment. The risk assessment is carried out through: Hazard Characterization, Exposure Assessment, Impact Assessment, and Risk Characterization. Hazard characterization includes consideration of all system components that represent potential pathways for CO₂ migration. Exposure to CO₂ is defined by the environment to which the gas has migrated, while assessment of the impact of the migrated gas is determined by the sensitivity of each habitat. Risk characterization is a tool for defining the short- and long-term integrity of the repository and provides a description of risk mitigation solutions for the analysis of the risk of CO₂ leakage from geological formations, the paper defines possible migration pathways as the main hazards that may lead to leakage. An overview of the methods used in risk characterization is provided, and their applicability is presented and analyzed on the examples of risk analysis for the Otway in Australia and In Salah in Algeria projects.

Keywords: CO₂ capture and geological storage, hazard identification, CO₂ migration risk assessment

Thesis contains: 75 pages, 12 tables, 21 images, 62 references.

Original in: Croatian

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

Supervisor: Ass. Prof. Karolina Novak Mavar, PhD

Reviewers: Ass. Prof. Karolina Novak Mavar, PhD

Prof. Emer. Nediljka Gaurina-Međimurec, PhD

Full Prof. Domagoj Vulin, PhD

Defence date: 17/02/2023, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA	II
POPIS KORIŠTENIH KRATICA	III
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I MJERNIH JEDINICA	V
1. UVOD	1
2. PRAVNI OKVIR I AKTIVNOSTI EUROPSKE UNIJE U POGLEDU POVEĆANJA KONKURETNOSTI TEHNOLOGIJA	6
2.1. <i>Zakonska regulativa u RH na području geološkog skladištenja</i>	8
3. KAPTIRANJE I GEOLOŠKO SKLADIŠTENJE CO₂: TEHNOLOGIJA I PROJEKTI	14
3.1. <i>Status skladištenja CO₂ u svijetu</i>	16
4. KRITERIJI SIGURNOSTI U POGLEDU SKLADIŠTENJA CO₂	26
4.1. <i>Odabir lokacije i uvjeti utiskivanja CO₂</i>	27
4.2.1. <i>Očuvanje integriteta bušotine</i>	31
4.2.2. <i>Očuvanje integriteta utisne formacije</i>	34
5. POSTUPAK PROCJENE RIZIKA OD ISTJECANJA CO₂ IZ GEOLOŠKOG SKLADIŠTA	37
5.1. <i>Identifikacija opasnosti</i>	39
5.2.2. <i>Preliminarna procjena rizika migracije CO₂ utisnutog u ležište pomoću „POS“ metodologije</i>	42
5.3. <i>Kvantitativne tehnike za analizu rizika</i>	47
5.3.2. <i>Kvantitativna procjena rizika migracije CO₂ kroz bušotine</i>	49
6. PRIMJERI PROCJENA RIZIKA MIGRACIJE CO₂ IZ GEOLOŠKOG SKLADIŠTA	53
6.1. <i>Primjer kvantitativne procjene rizika migracije CO₂ iz geološkog skladišta i analize osjetljivosti provedene za projekt CO₂CRC Otway, Australija</i>	53
6.2. <i>Procjena rizika migracije za projekt In Salah u Alžiru</i>	58
6.2.1. <i>Procjena rizika migracije CO₂ pomoću informacija prikupljenih prije postupka utiskivanja</i>	62
6.3. <i>Naknadna procjena rizika migracije CO₂</i>	63
6.4. <i>Preporuke za ublažavanje rizika pojave neželjenih događaja</i>	63
7. NADZOR RADA GEOLOŠKIH SKLADIŠTA CO₂	65
8. ZAKLJUČAK	68
9. POPIS LITERATURE	70

POPIS SLIKA

Slika 1-1. Grafički prikaz koncentracije CO ₂ u atmosferi mjereno na mjernoj stanici Mauna Loa (Hawaii) (a) i Prikaz godišnje stope rasta koncentracije CO ₂ u atmosferi (b)	2
Slika 3-1. Faze CCS projekta	14
Slika 3-2. Prikaz CCS projekata (provedenih, aktivnih, budućih) po regijama.....	16
Slika 3-3. Područje Sjeverne Hrvatske s prikazom najvećih emitera CO ₂ , trasa plinovoda, te potencijalnih skladišnih prostora	23
Slika 3-4. Distribucija kapaciteta geološkog skladištenja u DHF	24
Slika 4-1. Ponašanje CO ₂ nakon utiskivanja u geološku formaciju	28
Slika 4-2. Potencijalni putevi migracije utisnutog CO ₂ u pliće slojeve	30
Slika 4-3. Putevi migracije CO ₂ kroz aktivnu (a) i napuštenu bušotinu (b)	33
Slika 4-4. Mehanizmi uzamčivanja	36
Slika 5-1. Učinak migracije CO ₂ na vegetaciju kod značajnog (lijevo) i smanjenog (desno) istjecanja	40
Slika 5-2. Prikaz grafičkog odlučivanja CF metodom	49
Slika 5-3. Grafički model procesa analiziranja integriteta bušotine	51
Slika 6-1. Prikaz projekta CRCCO ₂ Ottway	55
Slika 6-2. Rezultati prvotne procjene rizika RISQUE metodom iz 2005., provedenom prije bušotine CRC-1	57
Slika 6-3. Rezultat RISQUE metode za projekt CO ₂ CRC Otway Faza 1 iz 2007. godine...57	57
Slika 6-4. Prikaz potencijalnih puteva migracije CO ₂ iz podzemnog skladišta	58
Slika 6-5. Grafički prikaz metode kvantitativne procjene rizika kroz određeni vremenski period (QRRT)	59
Slika 6-6. Prikaz plinskog polja Krechba, Alžir	61
Slika 6-7. Zasićenost ležišta prirodnim plinom (prikazano crveno)	62
Slika 6-8. Molni udio CO ₂ u plinu (crveno)	62
Slika 7-1. Raspon dostupnih metoda za praćenje raznih komponenti sustava skladištenja CO ₂	67

POPIS TABLICA

Tablica 3-1. Popis operativnih projekata za kaptiranje i skladištenje CO ₂	20
Tablica 3-2. Pojedini projekti kaptiranja i geološkog skladištenja u fazi izgradnje	21
Tablica 3-3. Pojedini projekti u fazi razrade projektne dokumentacije	21
Tablica 3-4. CCS projekti čiji je rad obustavljen	22
Tablica 3-5. Kapacitet skladištenja u DSA	24
Tablica 5-1. Usporedba rizika iz CCS-a i ostalih industrija	39
Tablica 5-2. Prikaz opasnosti povezanih uz istjecanja CO ₂	41
Tablica 5-3. Primjer kvalitativne matrice procjene rizika	43
Tablica 5-4. Klasifikacija događaja prema POS-u	44
Tablica 5-5. Potkategorije i vjerojatnosti pojave zamke	45
Tablica 5-6. Klasifikacija ležišta	46
Tablica 5-7. Kategorizacija ležišta i podkategorija s prikazom vjerojatnosti neželjenih događaja	47

POPIS KORIŠTENIH KRATICA

BECCS - bioenergija s hvatanjem i skladištenjem ugljika (*engl. Bioenergy with Carbon Capture and Storage*)

CBL - mjerenja kvalitete cementne veze (*engl. Cement Bond Log*)

CCfD - ugovori za kompenzaciju razlika u odnosu na ugljik (*engl. Carbon Contracts for Differences*)

CCS – kaptiranje i skladištenje CO₂ (*engl. Carbon Capture and Storage*)

CCU – kaptiranje i korištenje CO₂ (*engl. Carbon Capture and Usage*)

CCUS – kaptiranje, upotreba i skladištenje CO₂ (*engl. Carbon Capture, Usage and Storage*)

CF – certifikacijski okvir (*engl. The Certification Framework*)

CO₂ – ugljikov dioksid

COP 21 - 21. zasjedanje Konferencije stranaka (*engl. the 21st Conference of the Parties*)

DACCS – izdvajanje CO₂ iz atmosfere i skladištenje (*engl. Direct Air Carbon Capture and Storage*)

DHF – iscrpljena naftna polja (*engl. Depleted Hydrocarbon Fields*)

DSA – duboki slani vodonosnici (*engl. Deep saline Aquifers*)

EGR – unaprijeđeno dobivanje prirodnog plina (*engl. Enhanced Gas Recovery*)

EOR – unaprijeđeno dobivanje nafte (*engl. Enhanced Oil Recovery*)

ETS – sustav trgovanja emisijskim jedinicama (*engl. Emission Trading System*)

EU – Europska Unija (*engl. European Union*)

IEA - Međunarodna agencija za energiju (*engl. International Energy Agency*)

IPCC – Međuvladin panel o klimatskim promjenama (*engl. International Panel on Climate Change*)

NU - niskougljično

OIE – obnovljivi izvori energije

PBS – Panonski bazenski sustav

POS – vjerojatnost uspjeha (*engl. Probability of Success*)

QRA – kvantitativna procjena rizika (*engl. Quantative Risk Assesment*)

QRTT - metodologija kvantitativne procjene rizika kroz određeni vremenski period (*engl. Quantitative Risk Through Time*)

RISQUE - metoda identifikacije rizika i strategije eliminacije istog uporabom kvantitativne tehnike (*engl. The Risk Identification and Strategy Using Quantitative Evaluation*)

ROM – modeli reduciranog poretka (*engl. Reduced Order Models*)

SAD – Sjedinjene Američke Države

UNFCCC - Okvirna konvencija Ujedinjenih naroda o promjeni klime (*engl. United Nations Framework Convention on Climate Change*)

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I MJERNIH JEDINICA

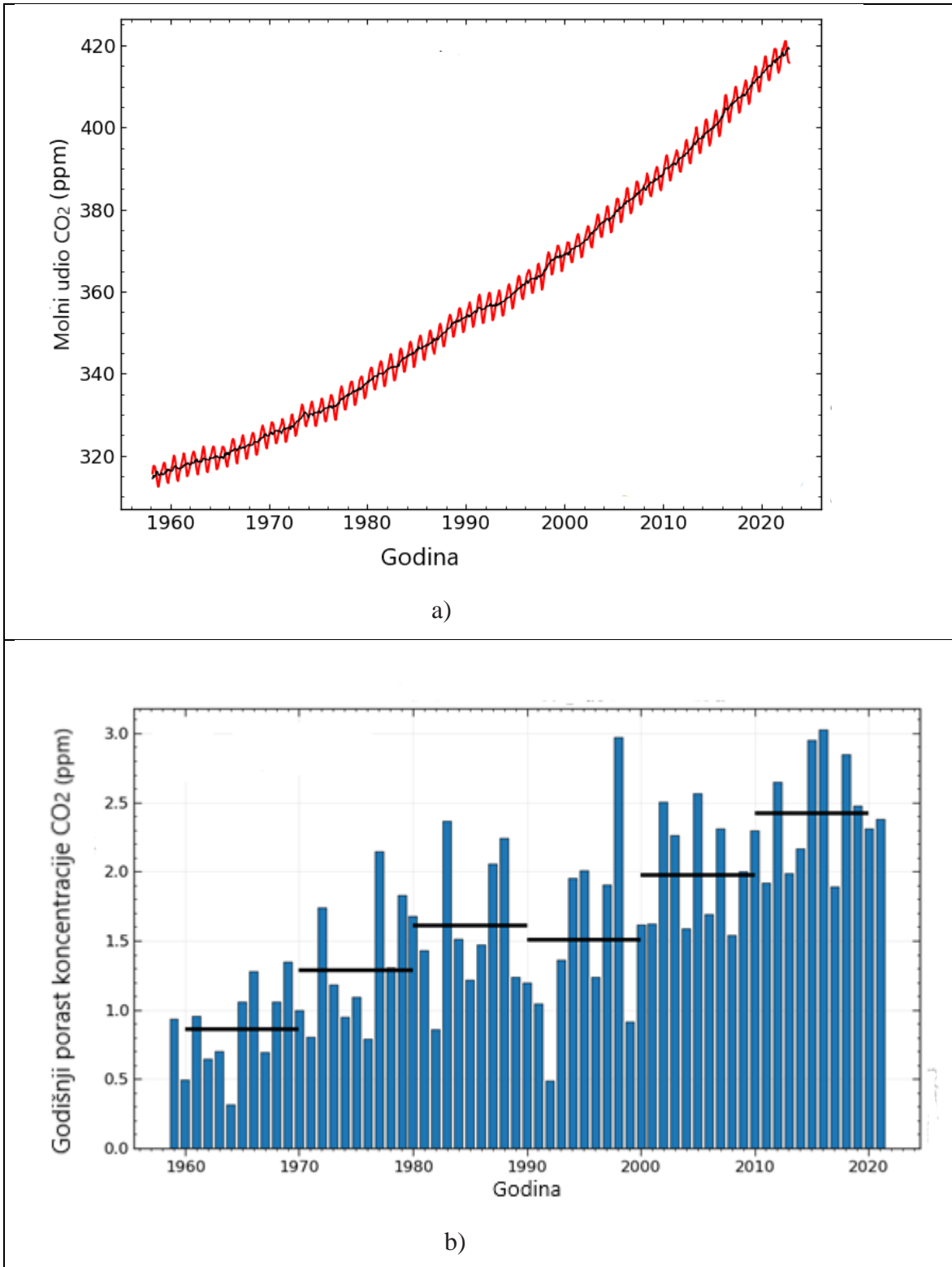
Oznaka	Jedinica	Opis
°C	-	stupanj Celzijus
C	-	posljedice nakon neželjenog događaja
CLR	-	rizik istjecanja CO ₂
CLR _{max}	-	najveća dopuštena vrijednost istjecanja CO ₂
m(t)	t/t	emitirana masa CO ₂ po jedinici vremena t
P	-	vjerojatnost
P	bar	mjerna jedinica za tlak izvan SI sustava = 10 ⁵ Pa
P(kvaliteta i debljina pokrovnih stijena)	-	karakteristike pokrovne stijene
P(strat. zamka)	-	vjerojatnost pojave stratigrafske zamke,
P(strukt.zamka)	-	vjerojatnost pojave strukturne zamke,
P(zamka)	-	vjerojatnost od pojave zamke,
p _i	Pa	ležišni tlak
P _{ic}	-	vjerojatnost migracije fluida kroz ležište
P _{wf}	-	vjerojatnost migracije kroz rasjed ili frakture
r(A)	-	očekivani novčani gubitak
T	god.	procijenjeno vrijeme izlaganja emisijama CO ₂
T _i	K	ležišna temperatura
V(fluid-pov)	m ³	volumen fluida pri površinskim uvjetima
V(fluid-utis)	m ³	volumen utisnutog fluida
V(kaptiranja)	Mt/god	kapacitet kaptiranja
λ	-	učestalost pojavljivanja neželjenog događaja

1. UVOD

Kruženje ugljika prirodni je ciklus izmjene ugljika između litosfere, biosfere, hidrosfere i atmosfere. Antropogeni procesi smatraju se uzrokom njegovog poremećaja. Emisije CO₂ posljedica su izgaranja fosilnih goriva, industrijskih procesa i prenamjene zemljišta te acidifikacije oceana (Caldeira ar., 2005; Orr et al., 2004). Koncentracija CO₂ u zraku instrumentalno se prati u sklopu istraživačkog programa praćenja stakleničkih plinova (engl. *Global Greenhouse Gas Reference Network Research Program*), koji uključuje kontinuirana mjerenja na mjernim stanicama smještenim na Aljasci (Barrow), Havajima (Mauna Loa), Američkoj Samoju (Cape Matatula) i Južnom polu, na dovoljnoj udaljenosti od velikih industrijskih klastera (Andrews et al., 2014). Mjerenja na mornoj stanici Mauna Loa započela su 1957. godine (Global Monitoring Laboratory [GML], 2022). Prosječne koncentracije CO₂ u atmosferi i prosječni godišnji porast u atmosferi za cijelo razdoblje mjerenja prikazani su na Slici 1-1.

Potreba za ublažavanjem klimatskih promjena prepoznata je na međunarodnoj razini, te je 1988. godine osnovan Međuvladin panel o klimatskim promjenama (engl. *Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*). IPCC objavljuje izvještaje koordiniranog programa istraživanja koji se provode od strane nekoliko tisuća stručnjaka u više od stotinu zemalja, u kojima se ističe činjenica da klimatske promjene poprimaju sve veće razmjere, što zahtjeva poduzimanje promptnih mjera s ciljem sprječavanja globalne klimatske krize (Working Group III, 2022). Države članice EU-a potpisale su i ratificirale Pariški sporazum, a u skladu s tom obavezom, članice su se usuglasile da će EU usmjeriti k cilju da do 2050. godine postane prvo klimatsko neutralno društvo. Pariški sporazum donesen je 2015. godine, kao plan djelovanja za ublažavanje globalnog zagrijavanja. Glavni elementi Sporazuma odnose se na (Vijeće EU, 2020):

- porast prosječne svjetske temperature mora biti manji je od 2°C u usporedbi s predindustrijskim razdobljem,
- zemlje potpisnice donose nacionalne planove za borbu protiv klimatskih promjena,
- svakih pet godina vlade izvještavaju o akcijskim planovima,
- transparentnost,
- solidarnost.



Slika 1-1. Grafički prikaz koncentracije CO₂ u atmosferi mjereno na mjernoj stanici Mauna Loa (Hawaii) (a) i Prikaz godišnje stope rasta koncentracije CO₂ u atmosferi (b) (GML, 2022)

Prema Međunarodnoj agenciji za energiju (engl. *International Energy Agency*, IEA), da bi se postigli klimatski ciljevi, oko $4 \cdot 10^9$ tona CO₂ godišnje mora biti kaptirano i uskladišteno do 2040. godine (International Energy Agency [IEA], 2016).

Uz drastično smanjenje emisija stakleničkih plinova, zahtijeva se provođenje sekvestracije. Sekvestracija podrazumijeva dugoročnu izolaciju CO₂ iz atmosfere putem prirodnih ili antropogenih fizičkih, kemijskih, bioloških ili inženjerskih procesa (Herzog i Golomb, 2004). Za postizanje željenog ugljično neutralnog gospodarstva EU-a, bit će potrebno izdvajati CO₂ i upotrebljavati ga kao sirovinu za proizvodnju goriva, kemikalija ili građevinskog materijala. Uklanjanje ugljika iz atmosfere bit će sve važnije i doći će u fokus nakon postizanja klimatske neutralnosti, kada će se zahtijevati neto negativne vrijednosti industrijskih emisija (industrije posjeduju mehanizme kaptiranja proizvedenog CO₂) kako bi se stabilizirao porast temperature u svijetu (Novak Mavar et al., 2021). Slijedom navedenog, prihvatljivo je prijelazno rješenje kod kojeg se postojeće tehnologije koriste na način minimiziranja emisija. Jedna od takvih opcija je kreiranje zatvorenog kruga u sustavu proizvodnje energije s pomoću kojeg se CO₂ eksploatira iz geoloških formacija u obliku plina, nafte i ugljena, te ponovno vraća u podzemne formacije prenamijenjene za skladištenje CO₂. Europa podupire razvoj projekta hvatanja i skladištenja ugljika (Carbon Capture and Storage, CCS). Uvođenjem koncepta kružnog gospodarstva, u kojem se resursi koriste maksimalno, a nastanak otpada se svodi na najmanju moguću razinu, sve je veći naglasak na tehnologije koje iskorištavaju kaptirani CO₂ (engl. *Carbon Capture and Usage*, CCU). CCU i CCS projekti predstavljaju mogućnosti za ublažavanje industrijskih emisija, ali i uklanjanja ugljika izravno iz atmosfere (engl. *Direct Air Carbon Capture and Storage*, DACCS) ili ugljičnu negativnu proizvodnju energije iz biomase i otpada (engl. *Bioenergy with Carbon Capture and Storage*, BECCS) (Terlouw et al., 2021). Projekti skladištenja CO₂ u geološke formacije posebno su privlačni jer se volumen CO₂, nakon što je utisnut u podzemlje, značajno smanjuje. Tako se primjerice 1000 m³ CO₂ pri površinskim uvjetima u skladišnom prostoru, na dubinama od oko 2000 m komprimira na otprilike 2,7 m³, zbog postizanja nadkritičnog stanja, odnosno stanja guste tekućine (Arts et al., 2011).

CCS koncept podrazumijeva odvajanje CO₂ od ostalih plinova na velikim nepokretnim izvorima kao što su npr. elektrane na fosilna goriva i različita industrijska postrojenja (čeličane, cementare, rafinerije, i dr.). Jakobsen et al. (2011) navode niz čimbenika koji utječu na konačnu realizaciju CCS i CCUS projekata, od kojih se ističu:

1. dostupnost tehnologije (plinovodi, itd.),

2. poslovna ekonomija kompanija zainteresiranih za projekte,
3. utjecaji na okoliš povezani s realizacijom projekata,
4. rizici povezani s realizacijom projekata,
5. tržišna situacija CCS i CCUS projekata (javno mnijenje, zakonska regulativa, poticaji).

Prije pristupanja skladištenju CO₂ potrebno je pomno proučiti prirodne sustave u koje će se isti utiskivati. Nakon što se CO₂ komprimira i transportira cjevovodom ili brodom, slijedi njegovo utiskivanje u odgovarajuću geološku formaciju pogodnu za dugoročno skladištenje. Stijene pogodne za geološko skladištenje CO₂ trebaju imati visoku poroznost i propusnost (duboki slani vodonosnik, iscrpljena naftna ili plinska ležišta, duboki slojevi ugljena). Takve geološke formacije rezultat su taloženja sedimenata kroz različita razdoblja geološke prošlosti, a obično se nalaze u tzv. sedimentnim bazenima. Sedimentni bazeni kao propusne formacije izmjenjuju se s nepropusnim formacijama koje djeluju kao pokrovni izolator. Iscrpljena ležišta nafte i plina predstavljaju optimalnu mogućnost skladištenja CO₂, zbog značajnih skladišnih kapaciteta, postojeće infrastrukture koja ekonomski opravdava provedbu ovakvih projekata, ali i zbog prihvatljivog rizika migracije CO₂ zahvaljujući sposobnosti ležišnih stijena da zadrži fluid u svojim porama.

Slijedi akumulacija CO₂ u porama i u pukotinama zamjenjujući pritom bilo koji postojeći fluid (plin, vodu ili naftu), te započinje odvijanje niza mehanizama koji utječu na uzamčivanje CO₂ i sprečavanje migracije istog prema površini. Mogući putovi migracije su ili povezani s tehnički izvedbenim objektima (npr. duboke bušotine) ili prirodne pojave (npr. sustavi pukotina i rasjeda).

U slučaju omogućene migracije CO₂ prema plićim slojevima i površini, posljedice na ljude i okoliš mogu poprimiti razmjere visokih rizika. Mogući rizik za ljude predstavlja propuštanje CO₂ u topografskim depresijama gdje koncentracije mogu poprimiti vrijednosti koje su kobne po život. Koncentracije CO₂ u zraku veće od 50 000 ppm mogu dovesti do gušenja. Na području EU-a uobičajena koncentracija CO₂ u okolnom zraku ruralnog područja iznosi 400 ppm, dok je u urbanim sredinama u rasponu od 600 ppm do 900 ppm. (Küçükhüseyin, 2021). Mogući rizici za okoliš variraju ovisno o okruženju. Kod odobalnih lokaliteta, istjecanje CO₂ u morski okoliš se očituje u smanjenju pH vrijednosti i uz to vezane posljedice na morski svijet. Radi posebnosti morskog okruženja, posljedice su prostorno ograničene i oporavak se primjećuje ubrzo nakon smanjenja propuštanja CO₂. Na kopnu,

istjecanje CO₂ ostavlja posljedice na integritet stijenskih masa, kvalitetu podzemne vode te vegetaciju. Metode praćenja integriteta podzemnog skladišta CO₂ mogu biti direktne i indirektne. Direktne metode primjenjuju se na način izravnih mjerenja koja uključuju analize fluida iz dubokih bušotina ili mjerenja koncentracije plina u tlu ili atmosferi. Indirektne metode uključuju geofizička istraživanja i praćenja promjena tlaka u bušotinama ili promjene pH podzemnih voda (Arts et al., 2011).

Cilj ovog diplomskog rada je dati prikaz i analizu statusa projekata utiskivanja CO₂ u svijetu, kao i predstaviti pravni okvir i aktivnosti EU-a u pogledu povećanja konkurentnosti projekata skladištenja CO₂. Odluke o provođenju ovakvih projekata temelje se na detaljnim analizama rizika, koje moraju pokazati da su rizici po zdravlje ljudi, okoliš, prirodu i imovinu u prihvatljivom području. Slijedom navedenog, u radu će se identificirati opasnosti koje dovode do istjecanja CO₂ iz geoloških formacije u koje je utisnut i dati pregled prirodnih i inženjerskih barijera. Procjena rizika migracije CO₂ iz ležišta u koje je utisnut zasniva se na identifikaciji mogućih puteva migracije (rasjedi, pukotine, bušotine, krovinski i bočni izolatori). Putovi migracije CO₂ kroz bušotinu, rasjede i pukotine sprječavaju se očuvanjem integriteta bušotine te očuvanjem mehaničke stabilnosti ležišta. Postizanjem trajnog očuvanja integriteta podzemnog skladišta rizik od migracije utisnutog CO₂ iz geološkog skladišta dovodi se u područje prihvatljivosti.

Za procjenu rizika migracije na raspolaganju su različite kvalitativne i kvantitativne tehnike opisane u ovom radu. Na temelju literaturnih podataka izrađene su procjene rizika za očuvanje integriteta geološkog skladišta CO₂CRC Otway, Australija i potencijalnu migraciju CO₂ iz geološkog skladišta u sklopu projekta In Salah predstavljene su metode praćenja ponašanja utisnutog CO₂. Prikazana je metodologija dviju kvantitativnih procjena rizika. Za slučaj analize geološkog skladišta CO₂CRC Otway u Australij, Bowden et al. (2012) razvili su metodu identifikacije rizika i strategije eliminacije istog uporabom kvantitativne tehnike, tzv. RISQUE. Za određivanje potencijalne migracije CO₂ iz geološkog skladišta u sklopu projekta In Salah korištena je interna metoda tvrtke British Petrol-a, tzv. QRRT metoda. Obje metode detaljnije su opisane u ovome radu.

2. PRAVNI OKVIR I AKTIVNOSTI EUROPSKE UNIJE U POGLEDU POVEĆANJA KONKURETNOSTI TEHNOLOGIJA

Parški sporazum o klimatskim promjenama, potpisan na 21. zasjedanju Konferencije stranaka (engl. *The 21st Conference of the Parties, COP 21*) Okvirne konvencije Ujedinjenih naroda o promjeni klime (engl. *United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC*), 2015. godine, nameće potrebu ograničenja prosječnog porasta temperature ispod 2°C u usporedbi s razinama prije industrijalizacije, putem dekarbonizacije gospodarstva (Pariški sporazum o klimatskim promjenama, 2015). Prema sažetku izvješća IPCC-a, CCS tehnologija ima nezamjenjivu ulogu kod ublažavanja klimatskih promjena, a odlučujući faktor za njenu komercijalizaciju je porast cijena ugljika na tržištu.

Istraživački programi kaptiranja i geološkog skladištenja provode se u svijetu i Europi od 1990-ih godina. Stečena su znanja na prvim opsežnim demonstracijskim projektima u kojima je CO₂ utiskivan duboko u podzemlje tijekom nekoliko godina (Ringrose et al., 2013). Uz tehnički razvoj, bilo je potrebno definirati regulatorni, ekonomski i politički okvir, kao i postići društvenu osviještenost i prihvatljivost ovih projekata.

Direktiva 2003/87/EZ (Direktive EU ETS) i Direktiva 2009/31/EZ o geološkom skladištenju CO₂ čine prvu fazu mehanizma smanjenje emisija CO₂ proizašlim iz Kyotskog protokola sklopljenog 1997. godine. Nakon dugogodišnjih istraživanja i praćenja, donesena je Direktiva (EU) 2018/410 o izmjeni Direktive 2003/87/EZ koja daje jasne i transparentne temelje za daljnju trgovinu emisijskim jedinicama, unapređenje tehnologija koje imaju za cilj smanjene emisije CO₂, te potporu energetske sektorima za uvođenje novih tehnologija kao što su CCS i CCUS projekti (Direktiva EU 2018/410). Daje se pregled ključnih mjera za potporu gospodarstvima u svrhu hvatanja, upotrebe i skladištenja CO₂, koja uključuju:

- razvijanje metodologije za kvantificiranje klimatskih koristi ulaganja u procese koji imaju potencijal skladištenja ugljika,
- pružanje potpore za uklanjanje ugljika u industriji u okviru Inovacijskog fonda,
- podupiranje kaptiranja, transporta, upotrebe i skladištenja CO₂ u industriji pozivima u okviru programa Obzor Europa (2023/24)
- pokretanje studije o razvoju mreže za transport CO₂,
- ažuriranje smjernica na području upravljanja rizikom, nadziranja i financiranja,
- organizacija godišnjeg foruma o CCUS-u

Kompanije u sklopu čijih industrijskih postrojenja je integrirana CCUS tehnologija moraju na odgovarajući način pratiti količinu i podrijetlo CO₂ koji obrađuju, te o tome izvještavati. Takav učinkovit sustav nadziranja kaptiranog CO₂ prati količine fosilnog, biogenog i atmosferskog CO₂ koji se svake godine transportira, obrađuje, skladišti i potencijalno vraća u atmosferu., dajući jasan uvid u industrijska rješenja te njihovu efikasnost. Ovakav sustav, uz poštivanje već postojećeg pravnog europskog okvira trgovanja emisijskim jedinicama (engl. *European Emission Trading System*, EU ETS), pružao bi temelj za certificiranje uklanjanja ugljika u industriji. Izazovi na području održive tehnologije kaptiranja ugljika u industriji vežu se uz postizanje troškovno učinkovitog i okolišno prihvatljivog načina kaptiranja i skladištenja ugljika, kroz ostvarenje sljedećeg (Europska komisija, 2021):

- svaka tona CO₂ koja je kaptirana, transportirana, upotrijebljena i uskladištena, mora biti evidentirana i obračunata prema podrijetlu (fosilni, biogeni ili atmosferski CO₂) do 2028. godine,
- najmanje 20% ugljika koji je u sastavu kemijskih i plastičnih proizvoda treba potjecati iz održivih nefosilnih izvora do 2030. godine,
- uklanjanje iz atmosfere i trajno uskladištenje 5 milijuna tona CO₂ godišnje, do 2030. godine.

Krajem 2019. godine, Europska komisija predstavila je Europski zeleni plan (engl. *EU Green Deal*) s mjerama za unapređenje učinkovitog iskorištavanja resursa prelaskom na čisto kružno gospodarstvo te za zaustavljanje klimatskih promjena, obnovu biološke raznolikosti i smanjenja onečišćenja (Europska komisija, 2019).

Izdavanjem Uredbe (EU) 2021/1119, tzv. "Europskog zakona o klimi", EU je definirala svoj cilj klimatske neutralnosti na razini gospodarstva do 2050. godine. Putem pretpostavljenih ključnih mjera koje uključuju strategiju dekarbonizacije, recikliranje ugljika, te hvatanje CO₂ iz atmosfere i njegovo dugoročno skladištenje, cilj je postaviti održive cikluse ugljika otporne na klimatske promjene. Strategija dekarbonizacije predstavlja smjernice za postizanje ciljeva smanjena emisija stakleničkih plinova u EU do 2030. godine za 55% u usporedbi s razinama iz 1990. Naglasak se stavlja na povećanje energetske učinkovitosti zgrada, vrste prijevoza i industrija, smanjenje potrošnje primarnih resursa i prelazak na kružno gospodarstvo te povećavanje upotrebe energije iz obnovljivih izvora. Promiče se recikliranje ugljika iz tokova otpada, iz održivih izvora biomase ili

izravno iz atmosfere, kako bi nadomjestio fosilni ugljik u sektorima gospodarstva koja su neizbježno ovisi o ugljiku. Razmatraju se kružno gospodarstvo i sektori održivog biogospodarstva kao glavni izvori ugljika. Fokus je i na povećavanju primjene geološkog skladištenja CO₂, pri čemu treba osigurati sprječavanje negativnog utjecaja na bioraznolikost ili pogoršanja stanja ekosustava u skladu s načelima predstrožnosti (Europska komisija, 2021).

Predložene su smjernice kojima je cilj premošćivanje financijskog jaza za CCUS i CCS projekte. Postojeći procesi zahtijevaju modernizaciju kako bi se povećala učinkovitost. Modernizacija je karakterizirana prijelazom energetske sektora i sustava s procesima koji imaju povećanu emisiju CO₂ na procese s niskim emisijama CO₂. U tu svrhu dani su mehanizmi financiranja kao potpora gospodarstvima (Hrnčević i Grgić, 2020).

Kako bi se ubrzala komercijalizacija inovativnih tehnologija, kao što su CCUS i CCS, Europska komisija je predložila povećanje Inovacijskog fonda i uključivanje mogućnosti ugovora za kompenzaciju razlika u odnosu na ugljik (engl. *Carbon Contracts for Differences*, CCfD) (Europska komisija, 2021).

Primjena ovih tehnologija suočava se s nedostatnim kapacitetima za transport i skladištenje CO₂. Transportne mreže bi trebale omogućiti povezivanje postojećih i budućih izvora CO₂ s dostupnim skladišnim geoprostorima i proizvodnim lokacijama u kojima se upotrebljava CO₂. Infrastrukturom otvorenog tipa osigurava se tržišna vrijednost, što potiče tržišno natjecanje između različitih prijevoznika i operatora skladištenja, čime se želi doprinijeti smanjenju troškova. Nemaju sve države članice EU na raspolaganju odgovarajuće skladišne geoprostore i razvojne centre za CCUS, čija je svrha omogućiti emiterima CO₂ upotrebu zajedničke infrastrukture. U tom slučaju, otvorena međunarodna transportna mreža je od iznimnog značaja (Jones, 2021).

2.1. Zakonska regulativa u RH na području geološkog skladištenja

Razvoj energetske sektora Republike Hrvatske usklađen je s europskim zahtjevima, normativima i pravilnicima, koji su doneseni u svrhu ublažavanja klimatskih promjena. Postavljene smjernice uobličene su u Strategiju energetske razvoja RH do 2030. godine s pogledom na 2050. godinu (NN 63/21), čiji je cilj niskougljična (NU) energija kako bi se osiguralo novo razdoblje energetske politike. Prema navedenoj strategiji Republika Hrvatska

ima tehničke i prirodne preduvjete za korištenje tehnologije kaptiranja i skladištenja CO₂ (CCS). Razvoj sustava za kaptiranje i geološko skladištenje CO₂ smatra se prijelaznim rješenjem, koje će u predstojeća tri do četiri desetljeća omogućiti nastavak korištenja fosilnih goriva u ukupnoj proizvodnji električne energije, uz istovremeno postupno smanjenje emisije stakleničkih plinova, dok se ne postignu tehnološki i organizacijski uvjeti za niskougljični razvoj. Glavni ciljevi niskougljične politike iz navedene Strategije:

1. Znanja i politike o niskougljičnom gospodarstvu kao temelj održivog razvoja gospodarstva RH,
2. Povećavanje sigurnosti opskrbe energijom, povećavanje dostupnosti energije i smanjenje energetske ovisnosti gospodarstva,
3. Izvršavanje obaveza RH prema međunarodnim sporazumima u okviru politike EU,
4. Smanjenje onečišćenje zraka emisijama stakleničkih plinova.

Odabrane su mjere koje će se primjenjivati za ostvarivanje ciljeva niskougljične politike u različitim sektorima gospodarstva: sektoru proizvodnje električne energije i topline, sektoru proizvodnje i prerade fosilnih goriva, sektoru transporta, sektoru opće potrošnje dobara i usluga, sektoru poljoprivrede, korištenja zemljišta i šumarstva, te sektoru za gospodarenje otpadom.

Strategijom niskougljičnog razvoja Republike Hrvatske (NN 63/21) prikazana su tri scenarija koja objedinjuju mjere za smanjenje emisija stakleničkih plinova:

1. Referentni scenarij (NUR) - pretpostavlja nastavak postojeće prakse i ciljeve do 2030. godine. Ovaj scenarij sagledava tehnološki napredak i rast udjela obnovljivih izvora energije (OIE) i energetske učinkovitosti temeljem globalne tržišne situacije. Očekivana smanjenja emisija u 2030. godini i 2050. godini iznose 28,9%, odnosno 46,3% u odnosu na 1990. godinu. Udio OIE u bruto neposrednoj potrošnji energije za 2030. iznosi 35,7%, a za 2050. godinu 45,5%.
2. Scenarij postupne tranzicije (NU1) - opisuje smanjenje emisija kroz primjenu troškovno učinkovitih mjera, poticanje energetske učinkovitosti i primjenu OIE. Naveden je rast cijena emisijskih jedinica kao glavni motiv energetske tranzicije. Očekivana smanjenja iznose: 33,5% i 56,8%, za 2030. odnosno 2050. godinu, u

odnosu na 1990. godinu. Udio OIE u bruto neposrednoj potrošnji u 2030. godini iznosi 36,4%, a u 2050. godinu 53,2%.

3. Scenarij snažne tranzicije (NU2) - ima za cilj smanjenje emisija stakleničkih plinova u 2050. godini za 80% u odnosu na 1990. godinu. Udio OIE u bruto neposrednoj potrošnji za 2030. godinu iznosi 36,4%, a u 2050. godini 65,6%. Dominantan izvor emisija ostaju transport, industrija i poljoprivreda.

Cilj niskougljične politike je da putanja emisija stakleničkih plinova bude u rasponu scenarija NU1 i NU2. Scenarij NU1 ostvariv je bez CCS-a, a u scenariju NU2 pojavljuje se potreba za CCS-om na plinskim elektranama i cementnoj industriji u godinama nakon 2040. godine.

Pravni okvir za geološko skladištenje CO₂ u Republici Hrvatskoj uspostavljen je kroz Zakon o istraživanju i eksploataciji ugljikovodika (NN 52/18, 52/19, 30/21) koji među ostalim, sadrži i odredbe koje su u skladu s Direktivom 2009/31/EZ o geološkom skladištenju ugljikova dioksida. Na temelju Zakona o istraživanju i eksploataciji ugljikovodika (NN 52/18, 52/19, 30/21) donesen je Pravilnik o trajnom zbrinjavanju CO₂ u geološkim strukturama (NN 95/18, 87/22). Pravilnik određuje provođenje aktivnosti i ispitivanja kojima je svrha utvrditi mogućnost trajnog zbrinjavanja ugljikovog dioksida u geološkim strukturama. Definira korake, procese i aktivnosti čija je svrha kaptiranje i trajno skladištenje CO₂ u geološkim strukturama na području RH. Karakterizacija i procjena ponašanja budućeg geološkog skladišta provode se u tri etape, koje podrazumijevaju sljedeće (Pravilnik o trajnom zbrinjavanju CO₂ u geološkim strukturama, NN 95/18, 87/22):

- prikupljanje podataka,
- izradu trodimenzionalnog statičkog geološkog modela,
- karakterizaciju dinamičkog ponašanja skladišta, karakterizaciju osjetljivosti i procjenu rizika.

U Pravilniku o trajnom zbrinjavanju CO₂ u geološkim strukturama (NN 95/18) definirani su: karakterizacija opasnosti (članak 10), procjena izloženosti (članak 11), procjena učinaka (članak 12) i karakterizacija rizika (članak 13). U nastavku se citiraju spomenuti članci.

Članak 10.

“(1) Karakterizacija opasnosti uključuje procjenu opasnosti koja se provodi karakterizacijom potencijala za istjecanje iz skladišnog kompleksa, kako je utvrđeno dinamičkim modeliranjem i opisanom karakterizacijom sigurnosti. To obuhvaća razmatranje, između ostalog, sljedećeg:

- a) potencijalnih putova istjecanja ugljikova dioksida
- b) potencijalnog razmjera slučajeva istjecanja za utvrđene putove istjecanja, brzinu i količinu istjecanja ugljikova dioksida
- c) kritičnih parametara koji imaju utjecaja na potencijalno propuštanje, primjerice maksimalni tlak u ležištu, maksimalna brzina utiskivanja, temperatura, osjetljivost na razne pretpostavke u statičkom geološkom modelu ili modelima
- d) sekundarnih učinaka skladištenja ugljikova dioksida, uključujući pomaknute formacijske fluide i nove tvari nastale skladištenjem ugljikova dioksida
- e) svih drugih čimbenika koji bi mogli predstavljati opasnost za prirodu, okoliš i zdravlje ljudi.

(2) Karakterizacijom opasnosti treba obuhvatiti sve moguće uvjete eksploatacije, skladištenja ugljikova dioksida kako bi se ispitala sigurnost čitavog skladišnog kompleksa.”

Članak 11.

Procjena izloženosti obavlja se na osnovi karakteristika okoliša te distribucije i aktivnosti ljudske populacije iznad skladišnog kompleksa, kao i na osnovi potencijalnog ponašanja i sudbine ugljikova dioksida koji je istekao kroz potencijalne putove utvrđene u etapi karakterizacije opasnosti.

Članak 12.

(1) Procjena učinaka obavlja se na osnovi osjetljivosti pojedinih vrsta, zajednica ili staništa na potencijalne slučajeve propuštanja utvrđene u etapi karakterizacije opasnosti.

(2) Kad je to relevantno, ta procjena obuhvaća učinke izlaganja povišenim koncentracijama ugljikova dioksida u biosferi (uključujući tlo, morske sedimente i vode i snižene pH vrijednosti u tim okolišima kao posljedice propuštanja ugljikova dioksida).

(3) Obuhvaća i procjenu učinaka drugih tvari koje mogu biti prisutne u tokovima ugljikova dioksida koji istječu (bilo nečistoće prisutne u toku koji se utiskuje ili nove tvari nastale uslijed skladištenja ugljikova dioksida).

(4) Učinke iz stavaka 1., 2. i 3. ovoga članka treba uzeti u obzir u vremenskom i prostornom rasponu i povezati s nizom slučajeva istjecanja različitih jačina.”

Članak 13.

(1) Karakterizacija rizika obuhvaća procjenu kratkoročne i dugoročne sigurnosti i integriteta lokacije, uključujući procjenu rizika u predloženim uvjetima uporabe i s najlošijim mogućim učincima na, prirodu, okoliš i zdravlje ljudi.

(2) Karakterizacija rizika provodi se na temelju procjene opasnosti, izloženosti i učinaka.

(3) Karakterizacija rizika obuhvaća procjenu izvora nesigurnosti utvrđenih tijekom karakterizacije po etapama, procjenu skladišnog kompleksa i kad je to provedivo, opis mogućnosti za smanjivanje nesigurnosti.”

Također, Pravilnik o trajnom zbrinjavanju CO₂ u geološkim strukturama (NN 95/18, 87/22) nalaže kontinuiran nadzor geološkog skladišta u glavnim fazama rada, uključujući provođenje nadzora tijekom trajnog zbrinjavanja CO₂ u geološkom skladištu, kao i nadzora nakon zatvaranja geološkog skladišta. Plan nadzora utvrđuje se prema analizi procjene rizika te ažurira kako bi se zadovoljili zahtjevi za nadzorom.

Plan nadzora mora sadržavati kontinuirani ili povremeni nadzor pojedinih parametara kako slijedi:

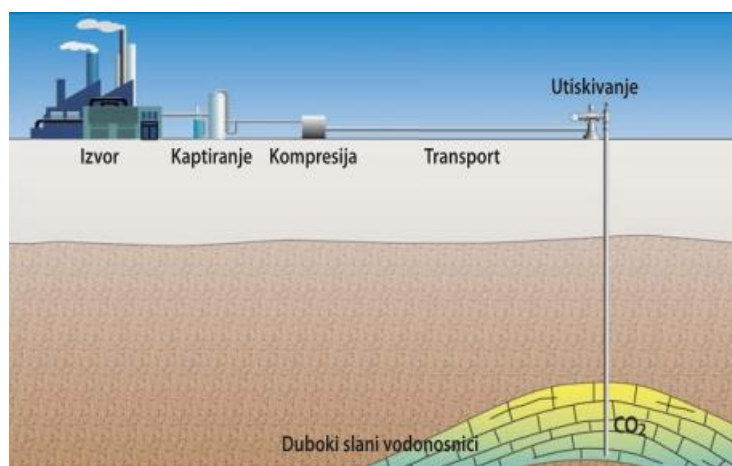
- emisije CO₂ na razini "postrojenja" za utiskivanje (utisna bušotina),
- volumetrijski protok na ušću utisne bušotine,
- tlak i temperatura na ušću utisne bušotine,
- kemijska analiza utisnutog fluida,
- ležišni tlak i temperatura, kako bi se odredilo ponašanje utisnutog CO₂.

Tehnologija nadzora mora biti jasno navedena za svaku fazu projekta, a preporuka je odabir tehnologije na temelju dobre prakse u vrijeme izrade projekta, koja uključuje:

- tehnologije pomoću kojih je moguće otkriti migracijske puteve CO₂ ispod površine i na površini,
- tehnologije koje daju podatke o horizontalnoj/vertikalnoj distribuciji oblaka utisnutog CO₂. Podaci su potrebni za podešavanje numeričke simulacije trodimenzionalnih geoloških modela skladišnih formacija,
- tehnologije koje osiguravaju široki horizontalni raspon za dobivanje podataka o eventualno prethodno neotkrivenim potencijalnim putovima migracije iz skladišnog prostora.

3. KAPTIRANJE I GEOLOŠKO SKLADIŠTENJE CO₂: TEHNOLOGIJA I PROJEKTI

Kaptiranje i geološko skladištenje ugljika u smislu geološke sekvencije predstavlja proces hvatanja CO₂ iz velikih točkastih izvora, kao što su termoelektrane, postrojenja za gospodarenje otpadom, rafinerije nafte i dr., njegovog transporta do mjesta skladištenja i njegovog utiskivanja u duboke geološke slojeve. CO₂ se trajno može odložiti u: iscrpljena ležišta nafte i plina, duboke slane vodonosnike, kao i slojeve ugljena koji nisu pogodni za eksploataciju. Ležišta ugljikovodika predstavljaju dobro poznate skladišne komplekse, zahvaljujući prethodnom istraživanju i eksploataciji ugljikovodika, duboki slani vodonosnici imaju ogroman skladišni potencijal, dok ležišta ugljena predstavljaju buduću opciju, nakon premoštavanja problema utiskivanja znatnih količina CO₂ u slabopropusne slojeve. Tri su osnovne faze CCS projekta: kaptiranje, transport i utiskivanje u pogodne geološke formacije (Slika 3-1.)



Slika 3-1. Faze CCS projekta (Arts et al. et al., 2011)

Tehnologije za kaptiranje CO₂ primjenjive su na različitim industrijskim postrojenjima, kao što su elektrane na fosilna goriva ili biomasu, rafinerije plina, postrojenja za proizvodnju etanola, petrokemijska postrojenja, postrojenja za proizvodnju vodika iz fosilnih goriva, postrojenja za proizvodnju cementa, željeza itd. (Europska komisija, 2021). Ovisno o vrsti goriva iz koje je izdvojen CO₂, koncentraciji CO₂ u struji plina i tlaku, primjenjuje se jedan od sustava za kaptiranje (Gaurina-Međimurec et al., 2018; Sood et al., 2022):

- sustavi za kaptiranje prije izgaranja (engl. *Pre-Combustion Capture System*),

- sustavi za kaptiranje nakon izgaranja (engl. *Post Combustion Capture System*),
- sustavi za izgaranje goriva uz prisustvo kisika (engl. *Oxyfuel Combustion System*),
- industrijsko izdvajanje CO₂ (engl. *Industrial Separation*).

Sustavi za kaptiranje prije izgaranja omogućuju dekarbonizaciju fosilnih goriva, korištenjem procesa parnog reformiranja, parcijalne oksidacije ili rasplinjavanja. U prvom stupnju reakcije nastaje sintetski plin (smjesa vodika, H₂ i ugljikovog monoksida, CO). Daljnjom reakcijom CO i pare u katalitičkom reaktoru (engl. *Shift Reactor*) nastaje smjesa H₂ i CO₂, s koncentracijom CO₂ od 5-15 % vol. Izdvajanje CO₂ temelji se na principu fizikalne ili kemijske apsorpcije. Iako su početni koraci obrade goriva složeniji i skuplji nego u sustavima za hvatanje nakon izgaranja, dobivene visoke koncentracije CO₂ u drugom reaktoru (15-60% vol.) i primijenjeni visoki tlakovi prikladniji su za odvajanje i predstavljaju prednost ove tehnologije (IPCC, 2005.; IEA, 2013; Biagio et al., 2018).

Sustav za hvatanje nakon izgaranja podrazumijeva hvatanje CO₂ iz dimnog plina različitim metodama kao što su: kemijskim otapalima, fizikalna i kemijska adsorpcija, odvajanje membranama i kriogeno odvajanje. Nakon odvajanja, CO₂ se komprimira za transport, dok se otapalo reciklira. Prednost procesa naknadnog izgaranja je u mogućnosti njegove nadogradnje u proces postojećih termoelektrana na ugljen ili plin, industrijske objekte itd. (IPCC, 2005; IEA, 2013; Ochoa Robles et al., 2018).

Sustav za izgaranje goriva u struji kisika, tzv. "Oxyfuel" koristi čisti kisik u procesu izgaranja fosilnih goriva, za postizanje koncentriranijeg toka CO₂ (> 80 % vol.), što pogoduje njegovom lakšem odvajanju. Uklanjanje vodene pare postiže se hlađenjem i komprimiranjem struje plina. U teoriji, ova tehnologija je jednostavna i jeftinija od složenijih procesa apsorpcije u sustavima naknadnog izgaranja i može postići visoku učinkovitost uklanjanja CO₂. Međutim, ono što je čini nekonkurentnom metodom u odnosu na druge su visoki troškovi dobivanja kisika (IPCC, 2005; IEA, 2013; Ghasemzadeh et al., 2020).

Industrijsko odvajanje provodi se u različitim granama industrije više od 50 godina, u procesima kao što su pročišćavanje prirodnog plina, proizvodnja vodika i sintetskog plina koji se koristi za proizvodnju amonijaka, alkohola i sintetskih tekućih goriva (Ochoa Robles et al., 2018).

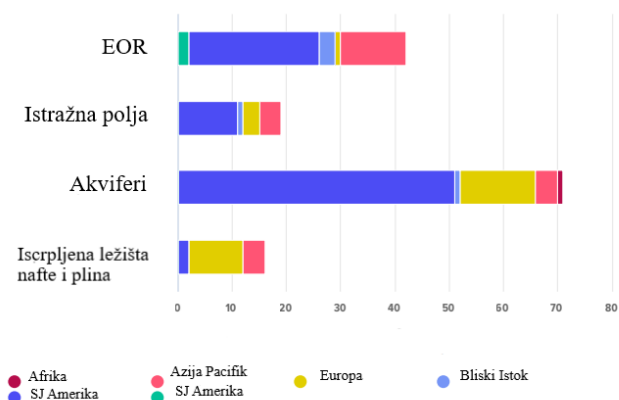
Uhvaćeni CO₂ može se transportirati u čvrstom ili tekućem stanju, te kao superkritični fluid. Moguće je odabrati jednu od opcija transporta: cjevovodima ili

brodovima. Transport cjevovodima smatra se najpraktičnijim rješenjem u slučaju komercijalnih CCS projekata s velikim kapacitetima utiskivanja koji mogu doseći milijune čak i milijarde tona CO₂ godišnje (Biagio et al., 2018).

3.1. Status skladištenja CO₂ u svijetu

Trenutno, kapacitet skladištenja CO₂, iznosi oko 40 milijuna tona godišnje. Kako bi se ispunili postavljeni ciljevi za ublažavanje klimatskih promjena, kapacitet skladištenja mora doseći više milijardi tona godišnje (Steyn et al., 2022).

Praćenje ponašanja utisnutog CO₂ u sklopu EOR projekata (engl. *Enhanced Oil Recovery*, EOR) postavilo je temelj za razvoj CCS projekata. Geološko skladištenje CO₂ u dubokim slanim vodonosnicima (akviferi) sve je češće, uz više ostvarenih projekata u Sjevernoj Americi i u Sjevernom moru (Velika Britanija). Skladištenje u iscrpljenim naftnim poljima dominira u Velikoj Britaniji te u Australiji i jugoistočnoj Aziji. U Izvješću globalnom statusu CCS projekata iz 2022. godine navedena su dva ključna razloga kao prednosti skladištenja CO₂ u akviferima – dostupne tehnologije omogućavaju veće kapacitete utiskivanja koje ovakva ležišta podržavaju u odnosu na iscrpljena ležišta nafte/plina, te veća prostorna rasprostranjenost akvifera u odnosu na ostale formacije na području SAD-a, Velike Britanije i Europe (Steyn et al., 2022). Na Slici 3-2. dan je prikaz rasprostranjenosti postrojenja CCS-a s obzirom na vrstu ležišta.



Slika 3-2. Prikaz CCS projekata (provedenih, aktivnih, budućih) po regijama (Steyn et al., 2022)

**Azija Pacifik označuje zemlje u istočnoj Aziji, jugoistočnoj Aziji i Oceaniji koje graniče s Tihim oceanom.*

Pojedini istraživački programi CCS-a provodili su se u SAD-u, Kanadi, Australiji i Japanu. Mnogo godina rada velikih demonstracijskih projekata, kao što su Sleipner u Norveškoj, Weyburn u Kanadi i In Salah u Alžiru (injektiranje obustavljeno 2011. godine) rezultiralo je značajnom bazom podataka i važnom platformom znanja (Bennaceur et al., 2004). Uspostavljene su brojne baze podataka o CCS projektima prikupljene od strane različitih organizacija, koje pružaju korisne podatke i informacije za daljnje usavršavanje CCS projekata kao što su: tehnologije za kaptiranje i uklanjanje ugljika na Tehničkom institutu u Massachusetts-u (engl. *Carbon Capture and Sequestration Technologies na Massachusetts Institute of Technology, MIT*), baza podataka Međunarodnog Instituta za CCS projekte (engl. *Global CCS Institute*), Međunarodna agencija za energiju (engl. *International Energy Agency, IEA*), Nacionalni laboratorij za energetske tehnologije (engl. *National Energy Technology Laboratory, NETL*) i dr. (Gaurina-Međimurec, i Novak Mavar, 2017).

Različite faze CCS projekata (planiranje i razvoj, izgradnja, rad i zatvaranje) dane su modelom životnog ciklusa projekta. Izgradnja novog CCS postrojenja ili naknadno opremanje postojećih industrijskih postrojenja s tehnologijom za kaptiranje i transport CO₂ do predviđenog skladišta predstavljaju važne industrijske projekte koji zahtijevaju skup različitih pravnih i inženjerskih studija. U prosjeku, procjenjivanje budućeg skladišta CO₂ traje deset i više godina, radi složenosti procedure (Steyn et al., 2022). Konačne investicijske odluke i odluke o stavljanju izvan pogona najvažnije su točke u životnom vijeku projekta. Drugu krajnost predstavljaju manje složeni projekti koji se mogu realizirati u periodu kraćem od pet godina. Ovakvi projekti karakterizirani su vertikalnom integracijom emitera CO₂, sustava za kaptiranje CO₂, transportnog sustava.

Postrojenje se može deklarirati kao veliko integrirano CCS postrojenje ako uhvati minimalno 0,8 Mt CO₂ godišnje iz elektrane na ugljen ili minimalno 0,4 Mt CO₂ godišnje iz drugih izvora industrijskih postrojenja (Global CCS Institute, 2016.). Postrojenja na ovoj razini trajno deponiraju antropogeni CO₂ u geološku skladišnu formaciju ili ga utiskuju u podzemlje sa svrhom povećanja iscrpka nafte i plina (engl. *Enhanced Oil Recovery, EOR* i *Enhanced Gas Recovery, EGR*) (Steyn et al., 2022).

Projekt Sleipner u Norveškoj predstavlja jedan od najpoznatijih velikih projekata utiskivanja CO₂ u geološko skladište. CO₂ se izdvaja iz proizvodne struje prirodnog plina, njegova koncentracija u sastavu prirodnog plina smanjuje se s 9% na 2,5% kako bi se izbjegle visoke naknade za emisije u okoliš. Godišnje se ovim projektom uskladišti 1 Mt CO₂. Utisna stijena definirana je oštrim litološkim granicama s zadovoljavajućim izolatorskim svojstvima, te se za utiskivanje koristi jedna koso usmjerena bušotina. Dostupni ležišni kapacitet procijenjen je na $660 \cdot 10^6$ Mt. Od 1996. godine, norveško odobalno postrojenje za skladištenje kaptiralo je i utisnulo više od 25 Mt CO₂ u iscrpljena pješčenjačka ležišta na dubini 800-1000 m (Chadwick i Eiken, 2013).

Izvrstan primjer manje složenog CCS projekta je Cooper Basin CCS projekt tvrtke Santos u Australiji, koji bi trebao početi s radom 2024. godine. Moomba je centralna plinska stanica u južnoaustralskom dijelu Basin Cooper-a, gdje se pridobiveni prirodni plin obrađuje prije distribucije u Južnu Australiju, Novi Južni Wales i Queensland. Jedan od koraka obrade u centralnoj plinskoj stanici Moombi je ukloniti CO₂ iz struje prirodnog plina. Cilj CCS projekta je kaptirati izdvojeni CO₂ i uskladištiti ga u iscrpljeno plinsko ležište. Tvrtka Santos je 2020. godine izvršila je test utiskivanja u ležište pri čemu je utisnuto 100 t CO₂. Izdvojeni CO₂ se komprimira na tlak od približno 13 MPa što osigurava transport 50 km dugim plinovodom, zatim utiskivanje u iscrpljeno plinsko ležište. U početnoj radnoj fazi Santos ima za cilj kaptirati i uskladištiti 1,7 Mt CO₂ godišnje (Evans, 2021). Kompanija Santos će upravljati svakim elementom projekta, koji se nalazi u nenaseljenom dijelu Australije, što znači da niti u slučaju neželjenih događaja, istjecanje CO₂ iz sustava ne može utjecati na kvalitetu življenja (Steyn et al., 2022).

Britanska kompanija Drax započela je na poluotoku Humber realizaciju prvog bioenergetskog projekta s tehnologijom hvatanja i skladištenja ugljika (BECCS) za 2027. godinu. Prvi pilot projekt izveden je 2019. godine, a ostvario je kapacitet kaptiranja od 1 t/god. A drugi pilot projekt iz 2020. godine, ostvario je kapacitet kaptiranja od 0,3 t/god. Komercijalni BECCS projekt kompanije Drax dio je čvorišta CCUS projekata na poluotoku Humber čiji je cilj energetske nulte emisije CO₂. Predviđeno je kaptiranje CO₂ iz energetske postrojenja na području poluotoka, transportiranje istog približno 100 km dugim plinovodom do odobalnog ležišta u Sjevernom moru. Početni kapacitet utiskivanja iznosi 17 Mt CO₂ godišnje (IEA, 2021).

Kapacitet skladištenja CCS projekata u 2021. godini iznosio je 49,4 Mt/god, dok je u 2022. godini povećao na 97,6 Mt/god. Prema rastu broja CCS postrojenja, SAD nastavlja voditi na globalnoj razini, s 34 nova projekta u 2022. godini. Ostale vodeće države su Kanada (19 novih projekata), Velika Britanija (13), Norveška (8), te Australija, Nizozemska (6) i Island (6). Značajan broj komercijalnih i pilot-demonstracijskih CCS projekata relevantnih za industriju, dani su u Tablici 3-1. Podaci su preuzeti iz godišnjeg izvješća za 2022. godinu Međunarodnog instituta za CCS projekte (Steyn et al., 2022). Brojne tvrtke iz Europe (npr. MOL, Eni, E.ON, itd.), Australije (CS Energy, itd.), Azije (Sinopec Kina) i SAD (Tampa Electric, Powerspan, itd.) bile su uključene u provođenju CCS projekata diljem svijeta.

Postrojenja u sklopu projekata CCS klasificirana su kao komercijalna (engl. *Commercial CCS Facilities*) te pilot-demonstracijska postrojenja (engl. *Pilot-Demonstration Facilities*) Komercijalna postrojenja namijenjena su za kaptiranje, transport i trajno geološko skladištenje CO₂. Pilot-demonstracijska postrojenja služe za testiranje i razvijanje CCS tehnologije, a kaptirani CO₂ može i ne mora biti trajno uskladišten prilikom izvođenja projekata. Općenito radni vijek pilot-demonstracijskih postrojenja ograničen je na predviđeno vrijeme potrebno da se utvrdi efikasnost CCS tehnologije. Ukupan broj operativnih projekata geološkog skladištenja CO₂ u svijetu je 30 s ukupnim kapacitetom utiskivanja od $244 \cdot 10^6$ t/god, dodatnih 11 projekata je u procesu izgradnje, dok je oko stopedeset projekata u stadiju evaluacije dokumentacije i lokacije (Steyn et al., 2022). Sjedinjene Američke Države, Ujedinjeno Kraljevstvo, Kanada, Australija imaju najveći dostupni kapacitet geološkog skladištenja s volumenom većim od $100 \cdot 10^6$ t CO₂ (Steyn et al., 2022). Prema podacima iz Tablice 3-1. Najviše operativnih projekata nalazi se u SAD-u, a dominiraju projekti EOR-a.

Tablica 3-1: Popis operativnih projekata za kaptiranje i skladištenje CO₂ (Steyn et al., 2022)

NAZIV POSTROJENJA	DRŽAVA	POČETAK RADA	KAPACITET (Mt/god)	SVRHA
Postrojenje za preradu prirodnog plina Terrel	SAD	1972	0,5	EOR
Postrojenje za proizvodnju umjetnog gnojiva Enid		1982	0,2	EOR
Postrojenje za preradu plina Shute Creek		1986	7	EOR
Core Energy CO ₂ -EOR		2003	0,35	EOR
Postrojenje za uplinjavanje Coffeyville		2013	0,90	EOR
PSC Nitrogen		2013	0,3	EOR
Industrijski CCS projekt Illinoisu		2017	1	CCS
Red Trail Energy CCS		2022	0,18	CCS
Quest		Kanada	2015	1,3
Alberta Canon Trunk Line (ACTL)	2020		1,6	EOR
Elektrana MCCS	2022		0,2	CCS
Projekt Sleipner	Norveška	1996	1	CCS
Snohvit CO ₂		2008	0,7	CCS
ORCA	Island	2021	0,004	CCS

Tablica 3-2. Pojedini projekti kaptiranja i geološkog skladištenja u fazi izgradnje (Steyn et al., 2022)

NAZIV POSTROJENJA	DRŽAVA	POČETAK RADA	KAPACITET (Mt/god)	SVRHA
Projekt Santos Cooper Basic CCS	Australija	2023	1,7	CCS
Mammoth	Island	2024	0,03	CCS
Norcem Brevik – tvornica cementa	Norveška	2024	0,4	CCS
Norcem Brevik – brodska ruta		2024	/	CCS
Kompleks čiste energije Louisiana	SAD	2026	5	CCS

Tablica 3-3. Pojedini projekti u fazi razrade projektne dokumentacije (Steyn et al., 2022)

NAZIV POSTROJENJA	DRŽAVA	POČETAK RADA	KAPACITET (Mt/god)	SVRHA
Huaneng Longdong CCUS	Kina	2023	1,5	CCS
Rafinerija Rotterdam	Nizozemska	2024	3	CCS
Louisiana Kompleks Čiste Energije	SAD	2026	5	CCS
Sekverstacija ugljika Wabash CO ₂		2022	1,75	CCS
Bridgeport Energy Moonie CCUS	Australija	2023	0,2	EOR

Tablica 3-4. CCS projekti čiji je rad obustavljen (Steyn et al., 2022)

NAZIV POSTROJENJA	DRŽAVA	OBUSTAVLJENO	KAPACITET (Mt/god)	SVRHA
Postrojenje za obradu plina Lost Cabin	SAD	2013	0,9	EOR
Petra Nova CCS	SAD	2017	1,4	EOR

Prema bazi podataka Globalnog instituta za kaptiranje i skladištenje CO₂ iz 2022. godine, trenutno postoje 30 velikih CCS objekata u funkciji ili u izgradnji (primjer najpoznatijih dan je u Tablici 3-1 i 3-2) s kapacitetom kaptiranja CO₂ oko 42,58 Mt/god, 78 projekata je u fazi razrade projektne dokumentacije (pregled najpoznatijih dan je u Tablici 3-3.) s kapacitetom kaptiranja od 97,6 Mt/god. Obustavljena su dva projekta (Tablica 3-4.) ukupnog kapaciteta 2,3 Mt/god. Pregledom danih podataka ukupno 69% projekata u svim fazama rada smješteno je na području SAD-a i Kanade. EU je regulirala razvoj CCS projekata Direktivom 2009/31/EC, trenutno dva najpoznatija europska CCS projekta provode se na području Norveške (Sleipner i Snohvit). S obzirom na vrstu skladištenja, većina postojećih projekata povezani su s EOR aktivnostima (76% svih operativnih projekata). Kako se procesom EOR-a proizvode ugljikovodici, za koje se smatra da su odgovorni za značajnu emisiju stakleničkih plinova, obveza smanjenja emisija nalaže poticaje za ulaganja u CCS projekte.

3.2. Sagledavanje projekata kaptiranja i skladištenja CO₂ u Republici Hrvatskoj

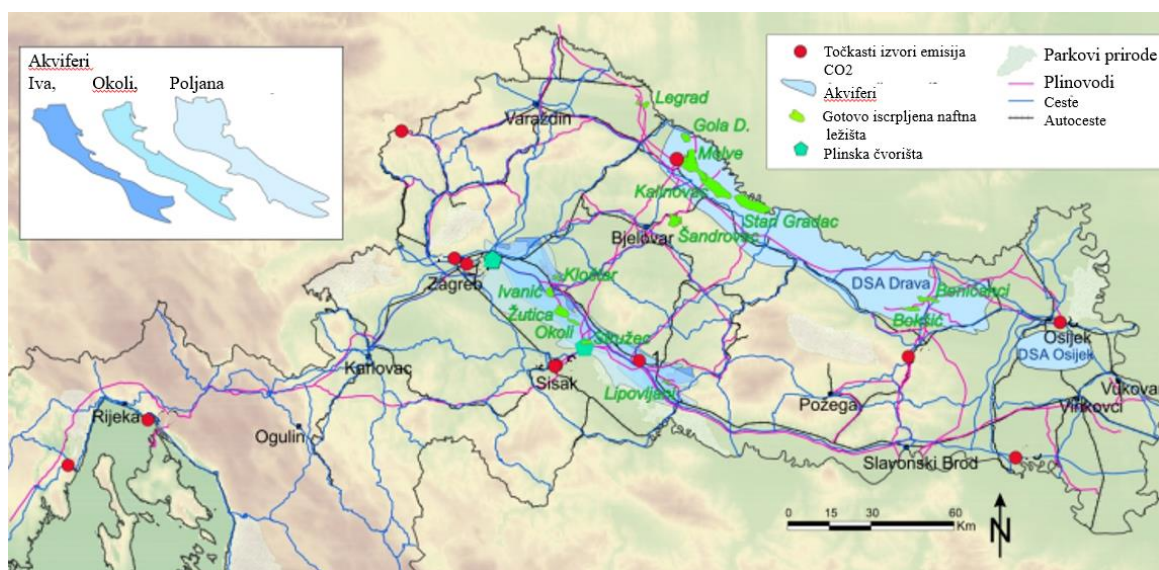
Područje Sjeverne Hrvatske predstavlja područje najvećih emisija CO₂, te se sastoji od ukupno 10 najistaknutijih emitera (Vulin et al., 2022):

1. Emisije CO₂ od 1 Mt/god:
 - a. TE Plomin, termoelektrana na ugljen
 - b. Rafinerija Rijeka
2. Emisije CO₂ od 0,75 Mt/god:
 - a. Petrokemija, proizvodnja umjetnog gnojiva
3. Emisije CO₂ od 0,65 Mt/god:

- a. Tvornica cementa Našice
- 4. Emisije CO₂ od 0,29 Mt/god:
 - a. Centralna plinska stanica Molve

Među najvećim industrijskim gradovima u Hrvatskoj, Zagreb i Sisak, okarakterizirani su kao gradovi s više od jednog izvora emisija CO₂ (Vulin et al., 2022). Tako se u Zagrebu nalaze “EL-TO Zagreb” i “TE-TO Zagreb”, a u Sisku se nalaze rafinerija i “TETO Sisak”.

Postojeće transportna infrastrukture tj. plinovodi, na područje Hrvatske, prolaze kroz područja koja su središta emisija CO₂. Takva infrastruktura poticaj je za ulaganja u CCUS tehnologiju. Postojeća mreža plinovoda još uvijek se primjenjuje samo za transport prirodnog plina, a naknadno opremanje plinovoda za transport CO₂ nije uzeto u obzir radi ekonomičnosti. Vulin et al. (2022) predlažu izgradnju dodatnog plinovoda za transport CO₂, čija trasa bi pratila postojeći plinovod za prirodni plin (Slika 3-3.).

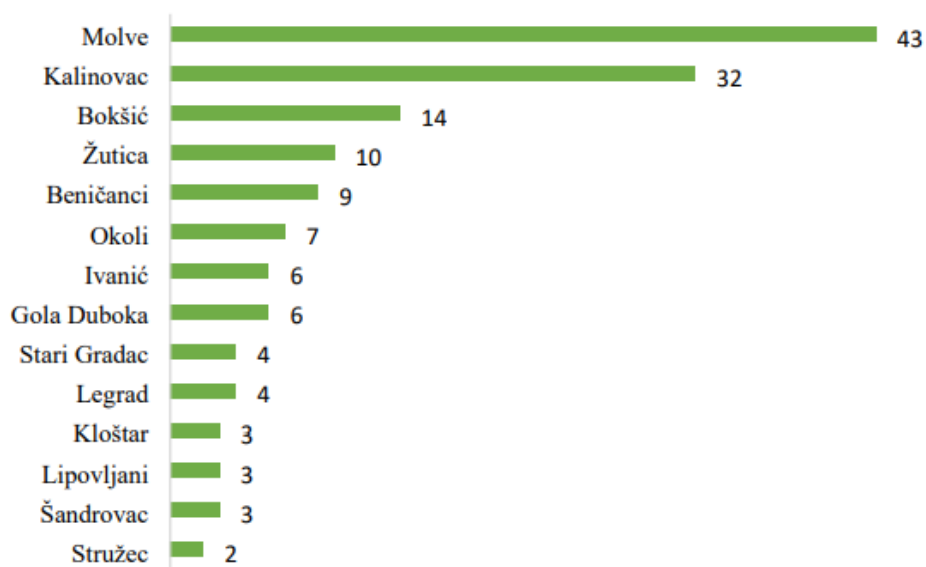


Slika 3-3. Područje Sjeverne Hrvatske s prikazom najvećih emitera CO₂, trasa plinovoda, te potencijalnih skladišnih prostora (Vulin et al., 2022)

Predstavljene su dvije vrste geoloških skladišnih objekata kao potencijalnih na području Hrvatske: iscrpljena ležišta ugljikovodika i akviferi koji zahtijevaju daljnje istraživanje. Mogućnosti iskorištenja kaptiranog CO₂ fokusirana su na primjenu metode EOR-a.

Skladišni objekti u Sjevernoj Hrvatske nalaze se u Savskoj i Dravskoj depresiji koje su

dio Panonskog bazenskog sustava (PBS). Savska i Dravska depresija čine sloj neogenih sedimentata čije je taloženje rezultat srednjomiocenske tektonike, te naknadnog slijeganja u PBS (Lucić et al., 2001; Malvić et al., 2013) Depresije uključuju 14 gotovo iscrpljenih naftnih polja (engl. *Depleted Hydrocarbon Fields*, DHF) (Žutica, Okoli, Lipovljani, Gola Duboka, Kloštar, Ivanić, Stružec, Kalinovac, Molve, Stari Gradac, Beničanci, Bokšić, Lengrad, Šandrovac) i 5 akvifera (engl. *Deep Saline Aquifers*, DSA) (Poljana, Okoli, Iva, Drava, Osijek) (Slika 3-3.). Na Slici 3-4. vidi se distribucija kapaciteta geološkog skladištenja po pojedinim iscrpljenim naftnim poljima, s ukupnim kapacitetom skladištenja od 146 Mt, a Tablica 3-5. prikazuje kapacitet skladištenja u akviferima s ukupnim kapacitetom od 2854,5 Mt. (Vulin et al., 2022).



Slika 3-4. Distribucija kapaciteta geološkog skladištenja u DHF (Vulin et al., 2022)

Tablica 3-5. Kapacitet skladištenja u DSA (Vulin et al., 2022)

DSA	Kapacitet (Mt)
DSA Poljana	251,6
DSA Iva	229
DSA Okoli	55,1
DSA Drava	1938,9
DSA Osijek	109,9

Sagledavanje udaljenosti između najvećih emitera CO₂ i potencijalnih geoloških skladišnih lokacija, uključujući njihove kapacitete daje podlogu za razmatranje CCUS projekata kao jedan od ključnih stavki ka dekarbonizaciji gospodarstva. U Hrvatskoj već

postoji zakonodavno rješenje za uporabu tehnologija CCU-a, CCS-a i CCUS-a. Zakon o istraživanju i eksploataciji ugljikovodika (NN 52/18, 52/19, 30/21) regulira trajno zbrinjavanje CO₂ njegovim utiskivanjem u duboke ležišne stijene. U prijelaznom razdoblju do niskougljičnog gospodarstva CCUS tehnologiju treba promatrati kao sredstvo za relativno brzo postizanje prvih ciljeva dekarbonizacije.

4. KRITERIJI SIGURNOSTI U POGLEDU SKLADIŠTENJA CO₂

Postupak skladištenja CO₂ provodi se kroz nekoliko faza (Arts et al. et al., 2011):

- faza odabira lokacije,
- faza karakterizacije lokacije,
- faza projektiranja i izgradnje skladišta,
- faza utiskivanja, faza zatvaranja skladišta,
- faza nakon zatvaranja skladišta.

Svaka od faza provodi se uz poštivanje kriterija sigurnosti. Kriterij sigurnosti trebaju biti prilagođeni svakoj pojedinoj lokaciji skladištenja, a posebno su važni zbog javnog mnijenja i ključni su u postupku certificiranja uklanjanja ugljika u industriji.

Postojeće znanje na kojemu se zasniva utiskivanje CO₂ u bušotine temelji se na standardnim postupcima u naftnoj i plinskoj industriji, a to su izrada, opremanje i održavanje bušotina, smanjenje tlaka pri utiskivanju, djelomično ili potpuno povlačenje plina iz skladišta, crpljenje vode radi smanjenja tlaka, crpljenje plina iz plitkih slojeva itd.

Kada je utiskivanje završeno, započinje faza zatvaranja bušotine i napuštanje radova.

Glavna pitanja sigurnosti vežu se uz operativnu fazu, budući da po završetak utiskivanja, lokacija postaje sigurnija zbog pada tlaka, odnosno djelovanja mehanizama uzamčivanja CO₂ u ležištu. Glavni parametri kontrole već su poznati naftnim inženjerima iz različitih projekata EOR-a, a to su (Arts et al. et al., 2011):

1. utisni tlak i protok: vrijednost tlaka utiskivanja treba biti manja od tlaka frakturiranja pokrovne stijene,
2. utisnuti volumen, kako bi se utvrdila realizacija predviđanja definirana simulacijama,
3. sastav utisnutog CO₂,
4. integritet utisnih bušotina i bušotina smještenih unutar ili u blizini radijusa širenja oblaka CO₂,
5. širenje oblaka CO₂ i otkrivanje propuštanja,
6. stabilnost formacije.

EU je smjernicama na području CCU-a, CCS-a, CCUS-a i ETS-a definirala kriterije koji se odnose na ljudsko zdravlje i lokalni okoliš u smislu zahtjeva zakonodavnih vlasti

prema kompanijama koje planiraju provoditi, odnosno, provode ovakve projekte, kako bi učinci na okoliš, sigurnost i zdravlje ljudi, kako kratkoročno tako i dugoročno, bili zanemarivi. Jedan od vodećih kriterija prilikom projektiranja je očuvanje integriteta, odnosno trajnost geološkog skladišta. Nakon što se utvrdi da je razina rizika dovoljno niska, odgovornost za skladište prelazi na operatera skladišta i plan praćenja može biti okarakteriziran kao regularan plan praćenja ponašanja skladišta CO₂ (Matanović et al., 2013). Nakon zatvaranja geološkog skladišta, bitno je sastaviti strategiju praćenja, koja se temelji na kontinuiranom vođenju i praćenju geoloških i inženjerskih sigurnosnih parametara specifičnih za svaku pojedinu lokaciju (Arts et al. et al., 2011). Metode praćenja mogu biti direktne tj. one kojima se izravno prati CO₂, te indirektne tj. one kojima se posredno opaža njegov utjecaj na stijene, fluide i okoliš.

Plan korektivnih mjera i ublažavanja mogućih posljedica posljednja je komponenta procjene sigurnosti s ciljem detaljnog popisa korektivnih radnji koje treba poduzeti u slučaju gubitka integriteta pokrovne stijene i bušotine, tijekom i nakon utiskivanja, te uzima u obzir ekstremna rješenja kao što je pražnjenje skladišta (Arts et al. et al., 2011).

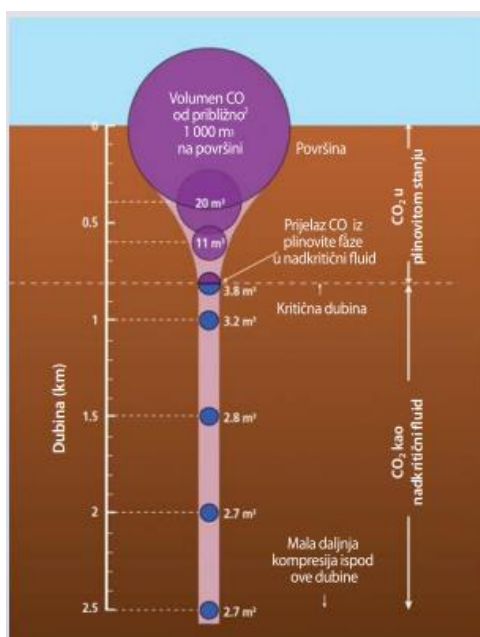
4.1. Odabir lokacije i uvjeti utiskivanja CO₂

Pogodnost geoloških struktura mora se procijeniti pri planiranju dugoročnog skladištenje CO₂. Procjena uključuje procjenu kapaciteta, injektivnosti i zadržavanja forme geološkog skladišta. Nadalje u obzir je potrebno uzeti poroznost, propusnost, i dubinu geoloških struktura. Glavne geološke značajke budućeg skladišta CO₂ uključuju visoko nepropusne pokrovne stijene, geološku stabilnost, odsutnost putova migracije i učinkovite mehanizme uzamčivanja (Arts et al. et al., 2011).

Prikupljanje i obrada podataka o geološkoj građi i uvjetima koji vladaju u podzemlju predstavlja važan korak. Osobito su važni podaci prikupljeni tijekom prethodnih radova bušenja u istom području, jer naučena lekcija može pomoći u pripremanju preventivnih mjera za minimiziranje propuštanja opreme za utiskivanje CO₂. Vrsta dostupnih podataka uključuje: karotažne podatke, izvješća bušenja, porne tlakove i gradijente frakturiranja geoloških formacija, dozvoljena naprezanja stijena, litološku i stratigrafsku analizu (Gaurina-Međimurec et al., 2015). Ranije, tijekom izrade bušotina, dobiveni podaci o gubljenju isplake u stijene pribušotinske zone daju predodžbu o litološkim uvjetima koji vladaju na tom području, a koji će u kasnijim projekcijama ležišta biti od značaja za procjenu

sigurnosti ležišta za skladištenje CO₂. Najvjerojatnije zone gubljenja bušačkog fluida uključuju: visokopropusne stijene, visokoporozne stijene, kavernozone stijene, te frakturirane stijene s prirodnim ili umjetno izazvanim pukotinama i iscrpljene formacije. Tijekom utiskivanja ponašanje CO₂ se uspoređuje s predviđenim simuliranim ponašanjem. U slučaju otkrivanja anomalija u ponašanju prilikom utiskivanja, potrebno je ažurirati program praćenja s podacima dobivenim na terenu i ako je potrebno, donijeti odluke o korektivnim radnjama te iste primijeniti (Matanovic et al., 2013).

Nakon što se CO₂ izdvoji iz struje dimnih plinova, visokokonzentrirani CO₂ se dehidrira i komprimira za transport i skladištenje. Za potrebe utiskivanja CO₂ može se izraditi nova bušotina ili se koristiti postojeća. Tlak fluida zarobljenog u porama utječe na integritet ležišta, pokrovnih stijena i rasjeda. Visok tlak utiskivanja može dovesti do mehaničkog propuštanja ležišta i/ili krovinskih naslaga (Loizzo et al., 2011). Preporučuje se utiskivanje CO₂ u superkritičnom stanju. Niska viskoznost superkritične tekućine omogućuje laku migraciju kroz porni prostor ležišta, ali zbog velike gustoće svojstvene ovoj fazi, njegov volumen je značajno smanjen. Superkritično stanje CO₂ je definirano tlakom iznad 73,9 bar i temperaturom preko 31,1 ° C. Ovi uvjeti su osigurani ako se CO₂ utiskuje slojeve na dubinama većim od 800 m. Na Slici 4-1. prikazano je ponašanje CO₂ nakon što se utisne u podzemlje. Njegov volumen značajno se smanjuje pa se tako 1000 m³ pri površinskim uvjetima svede na 2,7 m³ na dubini od 2 km.



Slika 4-1. Ponašanje CO₂ nakon utiskivanja u geološku formaciju (Arts et al. et al., 2011)

4.2. Potencijalni putevi migracije CO₂ i postizanje mehaničkog integriteta geološkog skladišta

Demonstracija sigurnosti projekta utiskivanja CO₂ u geološku formaciju ključan je korak prije same realizacije utiskivanja. Glavne komponente koje treba ispitati su (Arts et al. et al., 2011):

- ležišna i pokrovna stijena,
- ostale naslage u krovini, posebno nepropusni slojevi koji mogu djelovati kao sekundarni izolator,
- prisutnost propusnih rasjeda ili bušotina koje predstavljaju moguće putove migracije prema površini,
- vodonosnici pitke vode,
- populacija i ograničenja okoliša na površini.

Migracija CO₂ iz skladišta može se definirati na sljedeći način jednadžbom (1) (IPCC, 2005):

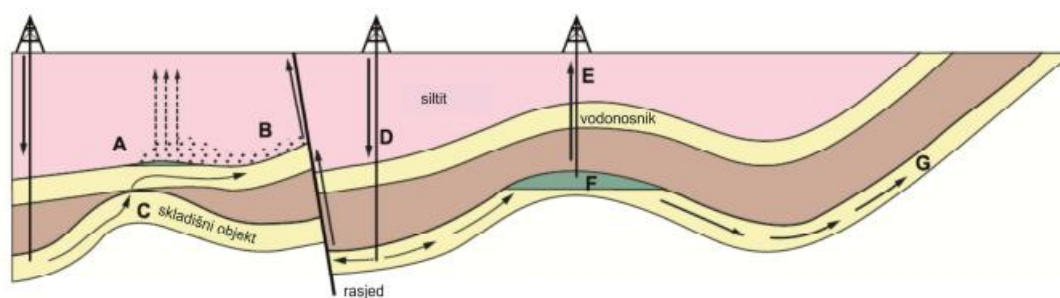
$$\text{Emisije CO}_2 \text{ iz podzemnog skladišta} = \int_0^T m(t)dt \quad (1)$$

Gdje su:

$m(t)$ = masa CO₂ koja je emitirana u atmosferu po jedinici vremena t

t = procijenjeno vrijeme izlaganja

U početnoj fazi projekta razmatra se postojanje nepropusne krovine, barijere koja će onemogućiti migraciju utisnutog CO₂ u pliće vodonosne slojeve i dalje prema površini. Krovinske naslage trebaju zadržati CO₂ na dubini u koju je utisnut, a shodno tome nužna je detaljna karakterizacija pokrovnih naslaga. Na Slici 4-2 dani su potencijalni putevi migracije utisnutog CO₂ iz skladišne formacije u pliće slojeve. (IPCC, 2005)



Slika 4-2: Potencijalni putevi migracije utisnutog CO₂ u pliće slojeve (IPCC, 2005)

Neki od slučajeva koji mogu dovesti do migracije CO₂ iz podzemnog skladišta (Kolenković, 2012):

- tlak utisnutog plina veći je od kapilarnog tlaka i CO₂ prolazi kroz pore pokrovnih stijena,
- slobodni CO₂ prolazi prema površini duž rasjedne plohe,
- CO₂ migrira kroz dio pokrovnih stijena čija je debljina smanjena uslijed diskordancije,
- utisnuti CO₂ pod djelovanjem uzgona migrira prema plićim dijelovima vodonosnika, lokalno povećava ležišni tlak i djeluje na aktiviranje rasjeda,
- CO₂ migrira prema površini kroz nepravilno napuštenu proizvodnu ili istražnu bušotinu,
- CO₂ se otapa u slojnoj vodi i kao otopina migrira izvan predviđenih granica podzemnog skladišta,
- otopljeni CO₂ se uslijed sniženja tlaka izdvaja iz slojne vode i migrira prema površini.

Za svaki mogući put migriranja potrebno je provesti numeričko modeliranje da bi se procijenila vjerojatnost događaja i ozbiljnost situacije. Vrlo čest je scenarijski pristup u svrhu određivanja kritičnih parametara sustava. Svaki scenarij je kombinacija specifičnog skupa parametara koji opisuju statički i dinamički model ponašanja promatranog sustava unutar raspona situacija. Radi se simulacija migracije CO₂ za svaki od scenarija za određeno vremensko razdoblje. Rezultirajuća količina migriranog CO₂ u plitke vodonosnike ili u atmosferu koristi se za kvantificiranje rizika migracije CO₂. Prema IPCC (2005), mogu se izdvojiti dva tipa scenarija u kojima može doći do migracije CO₂:

1. Scenarij uključuje migraciju kroz nehermetičnu utisnu bušotinu, uslijed pukotina, ili kroz tehnički nepravilno napuštenu bušotinu. U tom slučaju, CO₂ migrira pri velikim brzinama pa je vjerojatnost za otkrivanje veća. Opasnost koja proizlazi iz prvog scenarija su utvrđena koncentracija migriranog CO₂ iznad maksimalno dopuštene u sredinama gdje ljudi borave ili rade. Zaustavljanje migracije u ovakvom slučaju može potrajati satima ili čak danima.
2. Scenarij uključuje migraciju kroz rasjede i pukotine. Pri tome se istjecanje odvija na širem području i rezultira manjim koncentracijama CO₂. Opasnost je u ovom slučaju primarno vezana za pliće vodonosnike i ekosustave kada se CO₂ nakuplja u zoni između vodnog lica i površine terena (nesaturirana zona). Podzemna voda može biti ugrožena i propuštanjem utisnutog CO₂ direktno u vodonosnik.

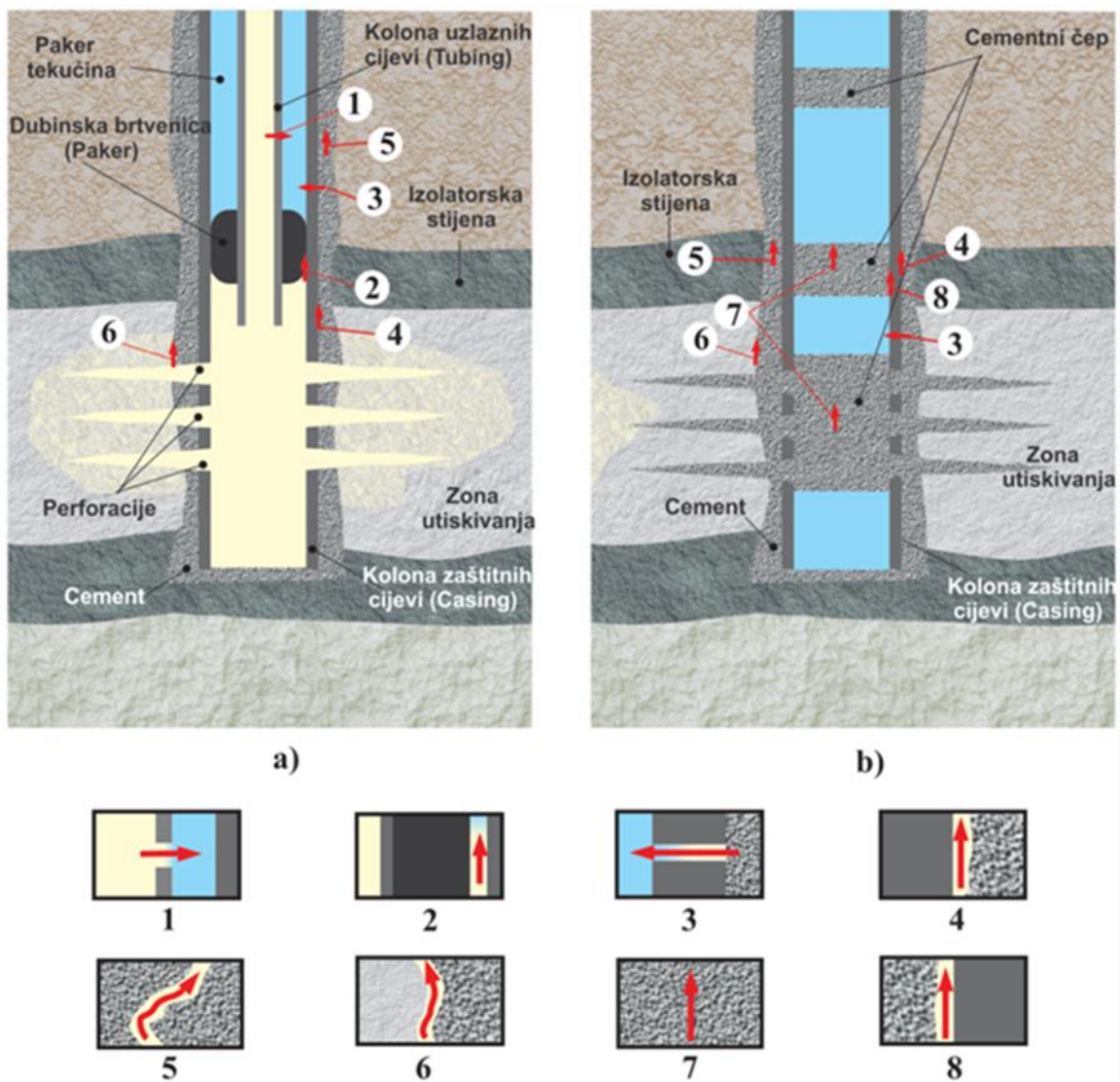
4.2.1. Očuvanje integriteta bušotine

Pojam "integritet bušotine" uključuje odsutnost značajnih propuštanja unutar zaštitnih cijevi, unutar utisnih cijevi te oko pakera (unutarnji mehanički integritet) i odsutnost propuštanja izvan zaštitnih cijevi (vanjski mehanički integritet) (Gaurina – Međimurec i Novak Mavar, 2017). Starost bušotine obrnuto je proporcionalna kompaktnosti bušotine. Korozija, temperaturne promjene, zamor materijala uslijed utiskivanja, promjena tlakova uslijed eksploatacije, zatvaranja, te ponovnog otvaranja bušotina i utiskivanja fluida i dr. mogu smanjiti čvrstoću zaštitnih cijevi i dovesti do oštećenja cementne veze. Stoga treba posvetiti posebnu pozornost procjeni integriteta bušotine (Yousuf et al., 2021).

Utisne bušotine predstavljaju jedini intruzivni element skladišnog sustava koji je stvorio čovjek. Za potrebe utiskivanja CO₂ mogu se koristiti postojeće bušotine na napuštenim naftnim i plinskim poljima ili se izrađuju nove bušotine, prilikom čije izrade zaštitne cijevi i cementna kaša trebaju biti projektirane na predviđeni vijek trajanja utiskivanja. Opremanje novih bušotina treba uključivati materijale otporne na koroziju (Gaurina-Međimurec i Novak Mavar, 2017). Dokaz da bušotina predstavlja sigurnu barijeru koja neće dovesti do migracije CO₂ predstavlja glavnu kariku zatvorenog sustava skladištenja. Migracija CO₂ može biti uzrokovana nepravilnostima u jednoj ili više barijera unutar bušotine, kao što su oštećenje na zaštitnim cijevima, loše cementirana kolona zaštitnih cijevi i prethodno nepropisno napuštanje ležišta. Putevi migracije CO₂ u aktivnoj i napuštenoj bušotini prikazani su na Slici 4-3 i uključuju migraciju: (1) kroz korozijom

oštećen dio tubinga, (2) uz paker, (3) kroz korozijom oštećen dio kolone zaštitnih cijevi, (4) migraciju između kolone zaštitnih cijevi i cementnog kamena, (5) migraciju kroz pukotine u cementnom kamenu, (6) migraciju u prstenasti prostor između cementnog kamena i stjenke bušotine, (7) migraciju kroz cementni čep, (8) migraciju između cementnog kamena i unutarnje stjenke kolone zaštitnih cijevi (Gaurina-Međimurec et al., 2011).

Prethodno navedene pojave migracije mogu se prevenirati održavanjem unutarnjeg integriteta bušotine koji je postignut odabirom materijala koji će odoljeti uvjetima korozije i uvjetima povećanih tlačnih naprezanja uslijed procesa utiskivanja. Tipični materijali otporni na koroziju su nehrđajući čelik 316, stakloplastika (fiberglas) i ugljični čelik. Održavanje vanjskog mehaničkog integriteta provodi se kroz upotrebu adekvatnog cementa i ispravno provedenu cementaciju. S ciljem očuvanja vanjskog mehaničkog integriteta bušotine, Američki institut za naftu objavio je veći broj specifikacija i za provođenje cementacije i testiranje cementnog kamena kod bušotina za utis CO₂ (*CO₂API RP 10B-2 – Recommended Practice for Testing Well Ce-ments, API Specification 10A – Specification on Cements and Materials for Well Cementing*) (Gaurina-Međimurec et al., 2011).



Slika 4-3. Putevi migracije CO₂ kroz aktivnu (a) i napuštenu bušotinu (b) (Gaurina-Međimurec et al., 2011)

Tradicionalno, u naftnoj industriji se za pripremu cementne kaše koriste Portland cement i odgovarajući aditivi. Cementacijom se postiže učvršćenje ugrađene kolone zaštitnih cijevi, stabilnost kanala bušotine te sprječava komunikacija ležišnih fluida između probušenih stijena i njihova migracija prema površini.

Procesom cementacije prstenasti se prostor iza zaštitnih cijevi ispunjava cementnom kašom. Prilikom cementacije buduće utisne bušotine za CO₂, cementna kaša se utiskuje cijelom duljinom prostora između proizvodne i tehničke kolone zaštitnih cijevi, zatim cijelom duljinom prostora između tehničke i uvedne kolone zaštitnih cijevi, te cijelom duljinom prostora između uvedne kolone i stjenki bušotine. Slučajevi prilikom cementacije koji dovode do migracije CO₂ kroz cementni kamen:

- cementacija nije izvedena čitavom duljinom kanala bušotine,
- nekvalitetna cementna veza duž kanala bušotine,
- pukotine u cementnom kamenu,
- promjena sastava cementnog kamena.

Mehanička čvrstoća cementnog kamena doprinosi geomehaničkoj stabilnosti bušotine tijekom njezina radnog vijeka. Portland cement je u najširoj primjeni u naftnoj industriji, međutim on pokazuje termodinamičku nestabilnost u kontaktu s CO₂. U kontaktu sa slojnom vodom utisnuti CO₂ se otapa. Proces rezultira stvaranjem ugljične kiseline s pH nižim od 6. Slana otopina bogata CO₂ može reagirati s mineralima prisutnima u ležišnoj formaciji, u krovinskoj formaciji ili cementnom kamenu. Slojna voda bogata s CO₂ će procesom difuzije prolaziti kroz cementni kamen, pri čemu uzrokuje migraciju topljivog gela, kalcijevog silikat hidrata, iz cementnog matriksa, što rezultira smanjenjem tlačne čvrstoće i povećavanjem poroznosti i propusnosti te posljedično do gubitka izolacijskih svojstava. Degradacija cementa u blizini ležišta i u blizini krovinske formacije može utjecati na integritet bušotine. Čimbenici koji utječu na smanjenju kvalitete cementnog kamena povezani su ponajviše s pripremom cementne kaše te koncentracijom CO₂. Uključuju omjer vode i cementa te prisutnost oteživača prilikom izrade kaše, uvjete otvrdnjavanja cementa, tlak, temperaturu, koncentraciju CO₂, pH, uvjete protoka, okolinu (npr. prisutnost slojne vode) i vrijeme izlaganja. Utisne bušotine podvrgnute su značajno višim tlakovima, što rezultira povećavanjem tlaka iza kontakta cementnog kamena i ležišne formacije, a posljedično dovodi do smanjena efektivnog naprezanja oko kanala bušotine. Ove promjene povećavaju smična naprezanja na kontaktu bušotine i ležišne stijene, što bi moglo dovesti do stvaranja pukotina u cementnom kamenu, osiguravajući put migracije za CO₂ (Jahanbakhsh et al., 2021).

4.2.2. Očuvanje integriteta utisne formacije

U fazi utiskivanja bitno je uzeti početni ležišni tlak kao maksimalnu vrijednost dozvoljenog tlaka pri utiskivanju u projektiranju budućeg skladišta CO₂ unutar iscrpljenih naftnih i plinskih polja. Najznačajniji mehanizma zadržavanja utisnutog CO₂ odnosi se na izolatorski potencijal pokrovnih stijena. Izolatorski potencijal je definiran sposobnošću krovinskih naslaga da zadržava CO₂ unutar ležišne stijene. Parametri koje je pri toj procjeni potrebno uzeti u obzir su: kapacitet izolacije, geometrija (debljina i duljina) i integritet

pokrovne stijene. Kapacitet izolacije definiran je visinom stupca CO₂ kojeg pokrovna stijena može zadržati u ležištu prije kritičnog djelovanja kapilarnih sila. Naime, utiskivanje CO₂ u ležišne stijene uzrokuje značajan porast tlaka oko utisne bušotine, a ovisno o propusnosti ležišnih stijena, područje povećanog tlaka se širi.

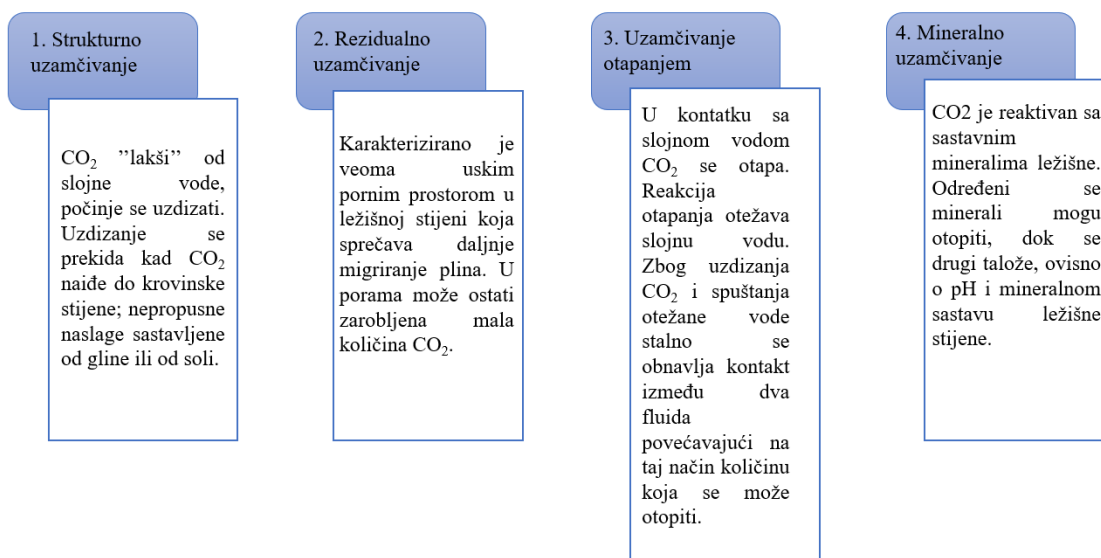
Istraživanja iz naftne i plinske industrije o ponašanju ležišnih fluida pri ležišnim uvjetima osigurava razumijevanje i predviđanje ponašanja utisnutog CO₂. Prepoznata su dva mehanizma koji dovode do migracije CO₂ iz podzemnog skladišta u pokrovne stijene (Lindeberg et al., 2003):

1. molekularna difuzija CO₂ kroz vodom zasićene pore pokrovne stijene,
2. spori tok slobodnog plina.

Molekularna difuzija termalno je kretanje čestica fluida na temperaturama iznad apsolutne nule. Brzina kretanja ovisi o temperaturi, viskoznosti fluida i masi čestica. Difuzija je proces kretanja molekula fluida iz područja s višom koncentracijom u područje s nižom koncentracijom, no difuzija je moguća i uslijed razlike u potencijalnoj energiji fluida. Rezultat difuzije je miješanje fluida. Proces molekularne difuzije CO₂ u krovinske stijene spor je proces i ne smatra se da narušava integritet krovinske stijene (Lindeberg et al., 2003).

Spori tok slobodnog plina uzrokovan je djelovanjem sile uzgona. Sila uzgona javlja se radi razlike u gustoći CO₂ i slojne vode. Na kontaktu slobodni CO₂ – pokrovna stijena, kapilarne sile sprječavaju prolazak CO₂. Uslijed porasta tlaka utisnutog, superkritičnog CO₂, javlja se razlika tlaka CO₂ na kontaktu s pokrovnim stijenama i tlaka porne vode u porama pokrovnih stijena, koja može premašiti iznos kapilarnog tlaka. Tada je ravnoteža između CO₂ i porne vode narušena te CO₂ ulazi u pore pokrovnih stijena, što za posljedicu uspostavlja spori tok CO₂ kroz pokrovne stijene (Hildenbrand et al., 2002).

Integritet pokrovne stijene određen je prisustvom rasjeda i sustava manjih pukotina koji predstavljaju potencijalni put migracije CO₂. U nekim slučajevima, rasjedi i pukotine, ako su cementirani, predstavljaju brtvene barijere koje drže fluide unutar ležišta. Uloga rasjeda i pukotina u kontroli migracije CO₂ procjenjuje se proučavanjem regionalnih geoloških karata, te hidroloških i geokemijskih uvjeta ležišta (Arts et al. et al., 2011). Vežanje CO₂ u podzemlju odvija se putem različitih mehanizama, opisanih na Slici 4-4, čije djelovanje je aktivno kroz različite vremenske periode.



Slika 4-4. Mehanizmi uzamčivanja (Arts et al. et al., 2011)

Ležišna stijena, kao buduća lokacija podzemnog skladišta CO_2 , u svojim porama u većini slučajeva sadržava slojnu vodu. Utisnuti CO_2 je u nadkritičnom stanju, što znači da se pri ležišnim uvjetima tlaka i temperature ponaša kao plin, iako ima gustoću tekućine. U nadkritičnom stanju CO_2 je lakši od slojne vode te migrira prema vrhu vodonosnika gdje se otapa. Postoje četiri mehanizma uzamčivanja CO_2 u podzemlju, a koji se pojavljuju netom nakon utiskivanja. Njihovo djelovanje nije istovremeno, već kako se oblak utisnutog CO_2 kreće unutar ležišta tako nailazi na pojedini mehanizam uzamčivanja (Slika 4-4), čije se djelovanje zbraja. Djelovanje mehanizama uvelike ovisi o tipu geološke lokacije te o uvjetima koji vladaju u podzemlju (prisutni fluidi, tlak, temperatura) (Steyn et al., 2022).

5. POSTUPAK PROCJENE RIZIKA OD ISTJECANJA CO₂ IZ GEOLOŠKOG SKLADIŠTA

Osim ekoloških dobrobiti, podzemno skladištenje CO₂ nosi i određene potencijalne rizike povezane s neželjenom migracijom CO₂ prema plićim vodonosnicima i na površinu, stoga mogućnost realizacije ovakvih projekata ovisi o mogućnosti smanjenja navedenih rizika na prihvatljivu razinu.

Procjena rizika predstavlja cjelokupni proces identifikacije, analize i vrednovanja rizika. Proces prepoznavanja i opisivanja opasnosti naziva se identifikacija opasnosti, dok se pojam analize rizika odnosi na sam proces razumijevanja prirode rizika i određivanja njihove razine. Kako bi se odredilo da li je razina rizika prihvatljiva ili ne, potrebno je napraviti postupak usporedbe rezultata analize rizika s pretpostavljenim kriterijima. U slučaju potrebe ide se u modifikaciju rizika, primjenom različitih dostupnih mjera.

Općenito, procjena rizika sastoji se od sljedećih pet koraka (IMO, 2002):

1. utvrđivanje najslabije karike sustava koja može dovesti do neželjenog događaja,
2. utvrđivanje učestalosti neželjenog događaja i njegovih posljedica,
3. utvrđivanje mjera za smanjenje rizika,
4. utvrđivanje troškova i koristi koje mogu proizaći iz poboljšanja,
5. utvrđivanje radnji koje je potrebno implementirati.

Slijedom navedenog, procjena rizika istjecanja CO₂ iz geološkog skladišta uključuje utvrđivanje opasnosti koje se pojavljuju u svezi s projektom, analizu i vrednovanje rizika od nastanka štete koja utječe na zdravlje zaposlenika i lokalnog stanovništva, okoliš i imovinu, te određivanje mjera za sprečavanje takvih šteta.

Migracija CO₂ prepoznata je kao glavni rizik povezan s CCS projektima, a može se dogoditi na površini ili ispod površine. U tu svrhu potrebno je provesti detaljnu procjenu i analizu rizika, koja služi kao osnova za plan praćenja projekta geološkog skladištenja CO₂. Dobro osmišljen i implementiran plan i program praćenja daju važne podatke o integritetu lokacije, injektivnosti bušotine i učinkovitosti cjelokupnog skladišnog kompleksa.

Priroda rizika koji se pojavljuju kod geološkog skladištenja CO₂ vrlo je slična onima iz industrije nafte i plina, ali postoje i određene sličnosti s rizicima iz nuklearne industrije, kemijske industrije i industrije gospodarenja otpadom (Tablica 5-1.). Stoga bi se dalo

zaključiti da su metode analize rizika koje se koriste u tim industrijama pouzdane za korištenje prilikom procjene i kvantificiranja rizika uključenih u CCS projekte (Oraee-Mirzamani et al., 2013).

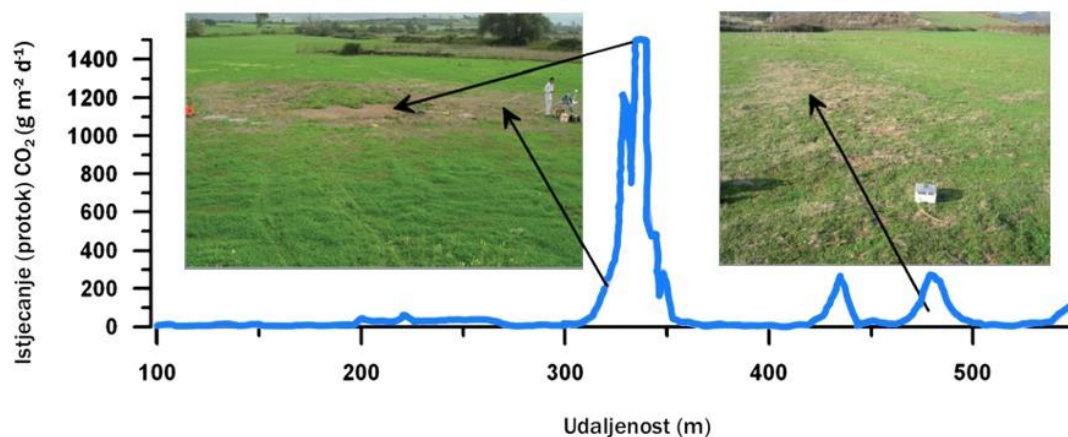
Siego et al (2014) definiraju pet kategorija rizika koje proizlaze iz CCS sustava:

1. toksikološki učinci CO₂ na ljude i životinje,
2. učinci na okoliš,
3. migracija CO₂ kroz rasjede ili pukotine,
4. inducirana seizmička aktivnost,
5. utjecaj na klimu.

Tablica 5-1: Usporedba rizika iz CCS-a i ostalih industrija (Oraee-Mirzamani et al., 2013)

Rizik	Kategorija rizika	Usporedne industrije
Odabir lokacije	Tehnički	Nuklearne elektrane s kapacitetom za zbrinjavanje radioaktivnog otpada i polje s vjetroagregatima
Proces utiskivanja		EOR, EGR
Zatvaranje bušotine		Naftna industrija
Nadzor i kontrola		Naftna industrija
Integritet plinske kape		EOR
Ekonomski profit	Financijski	Sve industrije
Sigurnost ulaganja		Sve industrije
Lokalne/regionalne nezgode	Okolišni	Naftna i plinska industrija, nuklearna industrija EOR, EGR, zbrinjavanja otpada
Kvantitativna analiza smanjenja emisije CO ₂		EOR
Sustav sigurnosti	Sigurnost, javna i institucionalna ograničenja	Sve industrije
Geotehnička sigurnost		EOR, EGR
Dugoročnost projekta		Nuklearne elektrane s kapacitetom za zbrinjavanje radioaktivnog otpada, naftna i plinska industrija
Legalizacija i regulativa		Sve industrije
Javne rasprave		Sve industrije

Procjena rizika treba uzeti u obzir cijeli raspon scenarija za buduće skladište CO₂. Posebno je važno predvidjeti putove migracije CO₂, izloženost i posljedice. Smjernice za upravljanje rizicima kroz faze projekta geološkog skladištenja predstavljene su u okviru „CCS Direktive“. Cijeli tehnološki proces pripreme, transporta i utiskivanja CO₂ u bušotine se nadzire odgovarajućim proceduralnim i sigurnosnim metodama, što znači da u normalnim uvjetima rada ne može doći do neželjene migracije CO₂. Moguća su samo istjecanja iz geoloških skladišta u slučaju incidenata. Migracija CO₂ kroz krovinu može uzrokovati zakiseljavanje plićih slojeva vodonosnika, što ostavlja posljedice na vegetaciju (Slika 5-1.) i nakupljanje plinovitog CO₂ na površini, utječući na ljudsko zdravlje i okoliš.



Slika 5-1. Učinak migracije CO₂ na vegetaciju kod značajnog (lijevo) i smanjenog (desno) istjecanja (Arts et al. et al., 2011.).

Analiza rizika može se provoditi kvalitativnim ili kvantitativnim metodama. Najčešće korištene tehnike uključuju primjenu matrica vjerojatnosti za opisivanje vjerojatnosti pojave određenog neželjenog događaja (vjerojatnost pojave incidenta) i težinu posljedica koju će taj događaj uzrokovati (veličinu štete koja bi se mogla dogoditi).

5.1. Identifikacija opasnosti

Prije same analize rizika istjecanja CO₂ iz sustava bitno je definirati postojeće opasnosti. Identifikacijom opasnosti dobit će se cjelokupna slika o takvim neželjenim događajima te opsegu štete koja nakon takvih događaja ostaje. Tek nakon što se definiraju opasnosti kreće

se s analizom rizika vezanih za svaki od neželjenih događaja. Manchao et al. (2011) su identificirali devet opasnosti (engl. *hazard*) povezanih uz istjecanja CO₂, temeljenih na nekoliko prethodno objavljenih publikacija (Tablica 5-2.).

Tablica 5-2: Prikaz opasnosti povezanih uz istjecanja CO₂ (Manchao et al., 2011)

OPASNOSTI	OPIS
H1	Istjecanje CO ₂ iz cjevovoda ili pumpnih stanica
H2	Istjecanje CO ₂ prilikom transporta
H3	Sporo istjecanje CO ₂ iz geološkog skladišta
H4	Brzo i značajno istjecanje iz geološkog skladišta
H5	Prodor CO ₂ u podzemne vode
H6	Prodor CO ₂ u ležišta ugljikovodika
H7	Migracija CO ₂ koja narušava integritet geološkog skladišta
H8	Inducirana seizmička aktivnost i frakturiranje
H9	Istjecanje iz napuštenih rudnika ugljena

Opasnosti povezane s tehničkim stanjem opreme, kao što je istjecanje iz cjevovoda ili pumpnih stanica te istjecanje prilikom transporta se prepoznaju u padu tlaka na različitim procesnim jedinicama. Takve opasnosti uočavaju se trenutno, a sanacija uključuje zamjenu neispravnog dijela opreme koji dovodi do istjecanja CO₂. Utiskivanje CO₂ vrši se pod visokim tlakovima te u slučaju da isti premaši tlak frakturiranja izolatorskih slojeva i aktivacijom rasjeda, dolazi do migracije CO₂ u pliće slojeve i podzemne vode. Neželjena migracija koja se odvija u podzemlju teža je za sanirati i vrlo često dovodi do značajnih posljedica na podzemni i površinski okoliš, te ljudsko zdravlje.

Prilikom provođenja CCS projekata, potrebna je kombinacija određenih uvjeta kako bi došlo do ispuštanja CO₂. Malo je vjerojatno da bi pažljivo projektirano skladište CO₂ imalo nepravilnosti u radu. Iako je mogućnost istjecanja CO₂ iz geoloških formacija mala, u potpunosti moraju biti razumljivi svi procesi i njihovi mogući učinci na rad skladišta kako bi se lokacija budućeg geološkog skladišta CO₂ izabrala i skladište vodilo na siguran način.

5.2. Postupak analize rizika

Preliminarna procjena rizika usmjerena je na prepoznavanje rizika migracije CO₂, kvantificiranje rizika u uvjete vjerojatnosti i ozbiljnosti prema matrici, kako bi se utvrdio program prevencije i plan smanjenja rizika. Glavna procjena se bazira na numeričkom modeliranju vjerojatnosti neželjenog događaja i ozbiljnost takvog događaja (kvantitativna analiza rizika). Potencijalne posljedice djelovanja CO₂ na ljude i okoliš procjenjuju se kroz studije utjecaja na okoliš.

Kvalitativne tehnike za analizu rizika koriste deskriptivne pojmove za opisivanje vjerojatnosti pojave neželjenih događaja te njihovih posljedice. Rezultati kvalitativne analize rizika obično se procjenjuju korištenjem formata matrice rizika. Prema Šegudoviću (2016), postoje četiri metode kvalitativne procjene rizika:

1. matrica predefiniраниh vrijednosti,
2. rangiranje prijetnji prema procjeni rizika,
3. procjena vjerojatnosti ostvarenja i mogućih posljedica,
4. odvajanje prihvatljivih i neprihvatljivih rizika.

5.2.1. Kvalitativne tehnike za analizu rizika

Kod kvalitativnog pristupa naglasak je na iskustvu, stručnosti i sposobnosti osoba koje provode procjenu rizika. Iako se procjena provodi kvalitativno, radi lakše interpretacije rezultata, parametri se kvantificiraju. U ovom slučaju, tako dobivene numeričke vrijednosti nisu apsolutne, već relativne. S obzirom da se kvalitativne veličine parametara procjenjuju subjektivno, za postizanje sljedivosti rezultata, vrlo je bitno da se način procjene može jednoznačno interpretirati i provoditi s istim ili sličnim rezultatima od strane više kompetentnih osoba. Tablica 5-3. prikazuje primjer formata kvalitativne matrice rizika za procjenu vjerojatnosti pojave neželjenih događaja i mogućih posljedica. Rizik treba rangirati kako bi se mogli uspostaviti prioriteti. Svaki rizik je kategoriziran u skladu s izrazima prikazanim u Tablici 5-3. kao ekstremni rizik (ER), visoki rizik (VR), umjereni rizik (UR) i nizak rizik (NR). Općenito, korektivne mjere za različite kategorije rizika su:

1. ekstremni rizik (ER): rad nije dopušten,
2. visoki rizik (VR): korektivne mjere trebale bi imati visoki prioritet,
3. umjereni rizik (UR): poduzeti korektivne mjere odgovarajuće vrijeme,
4. nizak (NR): rizik je prihvatljiv; korektivne mjere su diskrecijske.

Događaji sa značajnijim posljedicama prema matrici rizika se identificiraju kao više rizični i odabiru se za više prioritete preventivne akcije kako bi se smanjila vjerojatnost pojave neželjenog događaja ili smanjiti posljedice u slučaju pojave istog.

Tablica 5-3: Primjer kvalitativne matrice procjene rizika (Gaurina Međimurec et al., 2015.)

POSLJEDICE		VJEROJATNOST				
		Rijetke (R)	Nevjerojatne (N)	Moguće (M)	Vjerojatne (V)	Zasigurane (Z)
Teške	5	UR	VR	VR	ER	ER
Velike	4	UR	UR	VR	VR	ER
Umjerene	3	NR	UR	VR	VR	VR
Male	2	NR	NR	UR	UR	VR
Neprimjetne	1	NR	NR	UR	UR	VR
Rangiranje rizika: ER- graničan, VR - visok, UR - umjeren, NR – nizak						

5.2.2. Preliminarna procjena rizika migracije CO₂ utisnutog u ležište pomoću „POS“ metodologije

Pojava neželjenog događaja unutar naftno-plinske industrije može se smatrati ekvivalentom koncepta vjerojatnosti uspjeha (engl. *Probability of Success*, POS). Radi sličnosti procesa u naftnoj i plinskoj industriji s CCS projektima, POS metodologija može se primijeniti i u procjenama migracije CO₂. Promatraju se dvije geološke kategorije: (a) zamka i (b) ležište, ali se u tu svrhu POS dodatno modificira u skladu s kriterijima važnim za očuvanje cjelovitosti geološkog skladišta (Malvić i Rusan, 2009.). Navedene kategorije podijeljene su u potkategorije koje su dalje opisane nizom događaja. Vjerojatnost svake od kategorija određuje se odabirom odgovarajućeg događaja koji odgovara danom sustavu skladištenja u svakoj od potkategorija, te množenjem pridruženih vjerojatnosti koje su u rasponu od 0,05 do 1,00. Neke se kategorije ne mogu pouzdano procijeniti zbog nedovoljno poznatih podataka. Dobivene vrijednosti nakon množenja se dalje klasificiraju u jednu od pet kategorija vjerojatnosti (Tablica 5-4; Gaurina-Međimurec i Novak Mavar, 2017):

1. dokazan događaj (1,0),

2. vrlo vjerojatan događaj (0,75),
3. vjerojatan događaj (0,5),
4. događaj manje vjerojatnosti (0,25)
5. rijedak događaj (0,05)

Tablica 5-4: Klasifikacija događaja prema POS-u (Gaurina-Međimurec i Novak Mavar, 2017.)

1,00	Dokazan događaj
0,75	Vrlo vjerojatan događaj
0,50	Vjerojatan događaj
0,25	Događaj manje vjerojatnosti
0,05	Rijedak događaj (nedostaje parametar za procjenu)

Kategorija zamke je definirana kao ograničena geološka struktura omeđena nepropusnim slojevima, definirana potkategorijama i vjerojatnostima, kao što je prikazano u Tablici 5-5. Ukupna vjerojatnost kategorije, izračunava se množenjem vjerojatnosti njegove potkategorije s karakteristikama prisutne pokrovne stijene (Jednadžba (2)):

$$p(\text{zamka}) = [p(\text{strukturna zamka}) \text{ ili } p(\text{stratigrafska zamka})] \times p(\text{kvaliteta i debljina pokrovne stijene}) \quad (2)$$

Gdje su:

P (zamka) = vjerojatnost od pojave zamke,

P (strukturna zamka) = vjerojatnost pojave strukturne zamke,

P (stratigrafska zamka) = vjerojatnost pojave stratigrafske zamke,

P (kvaliteta i debljina pokrovnih stijena) = karakteristike pokrovne stijene.

Tablica 5-5: Potkategorije i vjerojatnosti pojave zamke (Gaurina-Međimurec i Novak Mavar, 2017)

Zamka	Strukturna zamka	Stratigrafska ili kombinirana zamka	Kvaliteta izolatorskih stijena
1,0	Antiklinala i erozijska izdignica	Algalni greben	Regionalno dokazane nepropusne pokrovne stijene
0,75	Rasjednuta antiklinala	Pješčenjak	Stijene bez ležišnih karakteristika
0,50	Strukturni nos zatvoren rasjedom	Sedimenti izmijenjeni dijagenezom	Stijene propusne za plin
0,25	Bilo koja pozitivna rasjednuta struktura, čiji rubovi nisu strogo određeni	Promjena petrofizikalnih svojstava (glina, različiti facijesi)	Propusne stijene s lokalno povećanim udjelom silta/gline
0,05	Nedefinirana struktura	Nedefinirana stratigrafija	Nedefinirane pokrovne stijene

Kategorija ležišta razmatra se kroz vrstu ležišnih stijena, poroznost i vrijednost ležišnog tlaka, kao što je prikazano u Tablici 5-6.

Tablica 5-6: Klasifikacija ležišta (Gaurina-Međimurec, Novak Mavar, 2017)

Ležište	Tip ležišne stijene	Opis poroznosti	Ležišni tlak
1,0	Pješčenjak, a podinske stijene se sastoje od minerala granita, gabra, dolomita.	Primarna poroznost: >15% D Sekundarna poroznost: > 5% D	> 80 bar
0,75	Pješčenjak bogat siltom i glinom. Podinske stijene sekundarne poroznosti. Grebeni algi sastavljeni od organskog otpada, blata i materijala morskog dna.	Primarna poroznost: 5 - 15% Sekundarna poroznost: 1-5%	< 80 bar
0,50	Pješčenjak s većim udjelom silta/gline, ograničenog pružanja.	Primarna poroznost: < 10% Propusnost: <10 ⁻³ m ²	/
0,25	Podinske stijene uključuje male sekundarne poroznosti i ograničenog pružanja.	Sekundarna poroznost: < 1%	/
0,05	Nedefinirana kategorija ležišta.	Nedefinirana vrijednost poroznosti.	/

Množenje potkategorija danih u Tablici 5-6. određuje vjerojatnost postojanja ležišta i njegov tip te prikladnost za utiskivanje CO₂ u geološku formaciju (Jednadžba (3)):

$$p(\text{ležište}) = p(\text{tip ležišta}) \times p(\text{opis poroznosti}) \times p(\text{ležišni tlak}) \quad (3)$$

Gdje je:

P (ležište) – vjerojatnost postojanja ležišta,

P (tip ležišta) – vjerojatnost tipa ležišta,

Konačno, uvođenjem nove jednadžbe (Jednadžba (4)) koja će ujediniti podatke dobivene jednadžbom (2) i jednadžbom (3) dobiva se POS:

$$POS = p(\text{zamka}) \times p(\text{ležište}) \quad (4)$$

Gdje su:

POS – vjerojatnost uspjeha (engl. *Probability of success*),

P (zamka) = vjerojatnost pojave zamke,

P (ležište) = vjerojatnost pojave ležišta.

Rezultat dobiven jednadžbom (4) treba biti u rasponu od 1,00 do 0,05, te se očitavanjem iz tablice 5-4. donosi zaključak postoji li vjerojatnost pojave incidenta. Ako procijenjena vjerojatnost pripada rasponu od 0,50 do 1,00, ležište je zadovoljavajuće kvalitete (kapacitet, debljina, poroznost, propusnost) te se lokacija može okarakterizirati kao mjesto s niskim do umjerenim rizikom od migracije utisnutog CO₂. Takva lokacija se može predložiti za daljnje razmatranje. Unakrsna povezanost dviju geoloških kategorija (zamka i ležište) koje su odabrane kao ključne u opisivanju podzemnog skladišta kao prikladnog za utiskivanje CO₂ prikazana je u Tablici 5-7.

Tablica 5-7: Kategorizacija ležišta i podkategorija s prikazom vjerojatnosti neželjenih događaja (Gaurina-Međimurec i Novak Mavar, 2017)

Vjerojatnost za utiskivanje CO ₂ u geološku formaciju određenog kapaciteta		Vjerojatnost zamke				
		1,00	0,75	0,50	0,25	0,05
Vjerojatnost za zadovoljavajući litofacijes	1,00	SD	VVD	VD	DMV	RD
	0,75	VVD	VD	DMV	RD	ND
	0,50	VD	DMV	DMV	RD	ND
	0,25	DMV	RD	RD	RD	ND
	0,05	RD	ND	ND	ND	ND
SD - Siguran događaj (1,00), VVD - Vrlo vjerojatan događaj (0,85 – 0,99), VD - Vjerojatan događaj (0,50 – 0,74), DMV - Događaj manje vjerojatnosti (0,05 – 0,24), RD - Rijedak događaj (0,05 – 0,24), ND - Nemoguć događaj (< 0,005)						

5.3. Kvantitativne tehnike za analizu rizika

U procjeni rizika kvantitativnim metodama najučestalija su dva pristupa: probabilistički i deterministički. Deterministički sustav je onaj koji je predvidljiv. U determinističkom sustavu, komponente sustava mogu se opisati za proizvoljnu vremensku točku. Probabilistički sustav pokazuje određeni stupanj neizvjesnosti tijekom rada budućeg skladišta (Glessner, 2008). U stohastičkom modelu, za dani skup ulaznih podataka, svaka obrada daje procjene izlaznih rezultata modela, stoga je potrebno više nezavisnih obrada za proučavanje rezultata. Ove tehnike se smatraju prikladnim i u procjeni skladištenja CO₂, iz razloga što se takav sustav ne može jednoznačno opisati i može se predvidjeti samo korištenjem dostupnih znanja ili stečenih iskustava u povijesti skladištenja. U svrhu analize rizika migracije CO₂ iz sustava najčešće se koriste sljedeće tehnike: analiza obrnutog stabla (engl. *Fault-Tree Analysis*, FTA), procjena životnog ciklusa projekta (engl. *Life-Cycle Analysis*, LCA), analiza utjecaja na okoliš (engl. *Environment Impact Analysis*, EIA) i proces analitičke hijerarhije (engl. *Analytic Hierarchy Process*, AHP) (Orae-Mirzamani et al., 2013).

Tehnike kvantitativne procjene rizika identificiraju neželjeni događaj, a posljedicama pristupaju u smislu relativnog opsega (veličina neželjenog događaja) ili u smislu specifičnih vrijednosti (npr. volumen migriranog CO₂, procijenjeni troškovi, broj prouzročenih ozljeda, šteta u okolišu). Cilj kvantitativne analize rizika je procijeniti ukupnu očekivanu štetu na ljude, imovinu, okoliš ili reputaciju kompanije i identificirati one elemente u sustavu koji najviše doprinose ukupnom gubitku. Kvantificiranje glavnih rizika projekata CCS daje informaciju za izračun vjerojatnosti pojave neželjenog događaja, identifikaciju sigurnosno-kritičnih komponenti sustava, te posljedice koje neželjeni događaji ostavljaju na ljude i okoliš dano je Jednadžbom 5 (Jakobsena et al., 2011):

$$r(A) = \lambda \times c \quad (5)$$

Gdje su:

$r(A)$ = očekivan (novčani) gubitak,

λ = učestalost pojavljivanja neželjenog događaja,

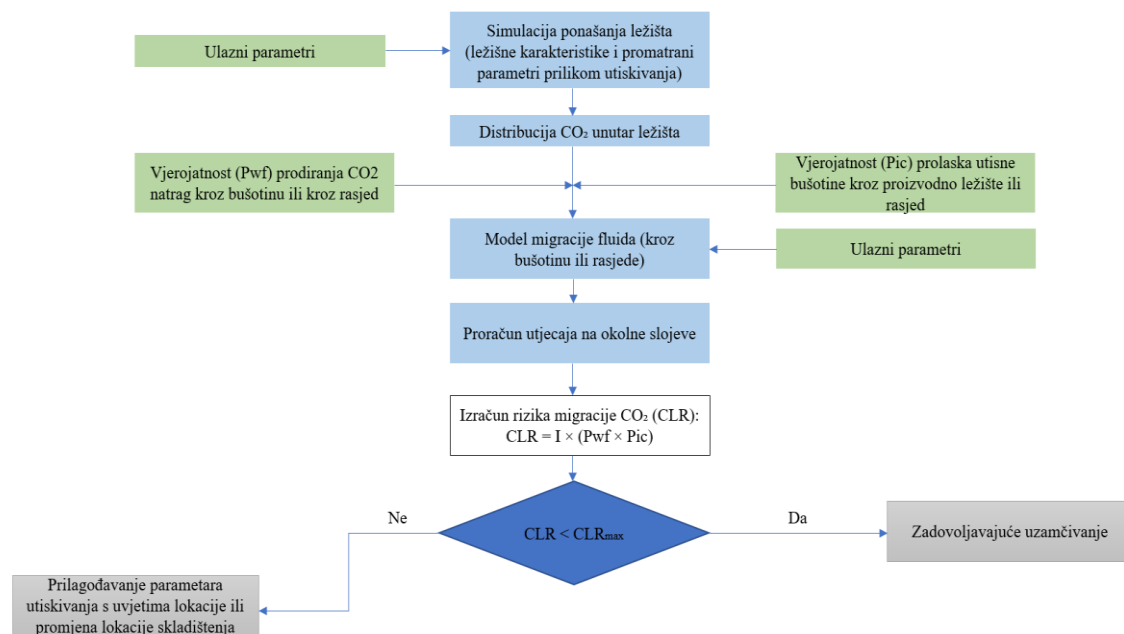
C = posljedice neželjenog događaja.

Učestalost pojavljivanja se odnosi na očekivani broj pojavljivanja određenog neželjenog događaja u određenom vremenskom periodu (obično se uzima vremenski okvir od godine dana). Učestalost se može utvrditi stručnom prosudbom podataka koji su dobiveni probabilističkom simulacijom ili izračunom prema jednadžbi (5).

5.3.1. Certifikacijski okvir

Certifikacijski okvir (engl. *The Certification Framework*, CF) jednostavan je pristup procjeni rizika migracije CO_2 i slojnih fluida unutar podzemnih formacija. Predstavlja primjer kvantitativne metode procjene rizika koja se temelji na probabilističkom pristupu procjeni rizika. Svrha CF metode je prikazati procjenu rizika migracije CO_2 (engl. *CO₂ Leakage Risk*, CLR) za svaki element sustava skladištenja kako bi se utvrdilo efektivno uzamčivanje. CF pristup prikazan je na Slici 5-2. Metodom CF, sustav skladištenja sveden je na glavne elemente koji su opisani na sljedeći način (Oldenburg et al., 2008):

1. geološka formacija - izvor migracije CO_2 ,
2. bušotine i rasjedi - model migracije fluida,
3. okolni i plići slojevi - elementi pod utjecajem migracije CO_2 .



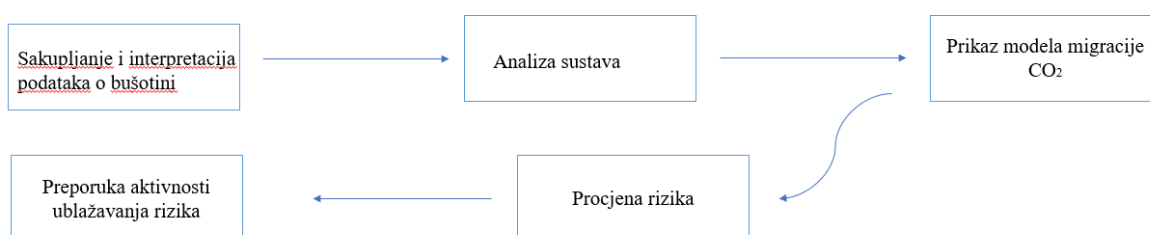
Slika 5-2. Prikaz grafičkog odlučivanja CF metodom (Oldenburg et al., 2008)

Vanjski parametri koji su potrebni za simulaciju ponašanja ležišta su: karakterizacija lokacije, opis ležišta, proces utiskivanja CO₂ i vremenski okvir projekta. Ulazni podaci za simulaciju ponašanja ležišta prikazuju uvjete koji vladaju u ležištu, što opisuje distribuciju CO₂ unutar ležišta i posljedičnu promjenu tlaka ležišta. Procjena se u ovom slučaju raščlanjuje na dvije pojavne vjerojatnosti. Prva vjerojatnost predstavlja migraciju CO₂ kroz bušotinu ili rasjede (P_{wf}), druga vjerojatnost je prolazak utisne bušotine kroz proizvodno ležište i rasjed (P_{ic}). Ulazni podaci potrebni za modeliranje migracije utisnutog fluida su: broj i dubina prisutnih bušotina i rasjeda. Model brzine utiskivanja CO₂ je rezultat simulacije ležišta. Rizik je tada izračunat kao umnožak utjecaja na element sustava, I (engl. *Impact*) i vjerojatnostima dva navedena scenarija migracije CO₂, P_{wf} i P_{ic} . Uspoređivanjem izračunatog CLR-a s predviđenom dopuštenom vrijednošću, CLR_{max} , utvrđuje prihvatljivost pojave rizika migracije CO₂. Ako je CLR iznad CLR_{max} ponavlja se izvedba plana utiskivanja CO₂ ili se izvode poboljšanja na karakterizaciji lokacije utiskivanja: ta dva procesa dovode do smanjenja vrijednosti CLR-a.

5.3.2. Kvantitativna procjena rizika migracije CO₂ kroz bušotine

Dugoročna procjena integriteta bušotine jedan je od ključnih koraka koji se moraju riješiti prije utiskivanja CO₂. Razlog tomu je što su bušotine u većini najslabija karika sustava CCS projekta u pogledu zadržavanja CO₂ u podzemnoj formaciji. Procjena rizika definira sposobnost bušotine da onemogući migraciju CO₂ ili barem osigura nemogućnost migracije u pliće slojeve (odnosno da ne dođe do prodora CO₂ do vodonosnih slojeva) (Gaurina-Međimurec i Novak Mavar, 2017). Koristeći alate za simulaciju i kvantifikaciju migracije potrebno je dokazati da bušotina predstavlja dugoročno sigurnu komponentu sustava. Analiza rizika integriteta bušotine obično počinje definiranjem opsega neželjenog događaja i sastoji se od tri komponente: neželjen događaj, osjetljive točke sustava i trajanje analize rizika. Neželjen događaj je definiran nepravilnostima u proizvodnom ili zaštitnom nizu cijevi, nezadovoljavajućim brtvljenjem pakera ili nezadovoljavajuće provedenom cementacijom. Osjetljive točke sustava predstavljaju vodonosnici pitke vode, tlo, zrak i okoliš koji mogu biti pogođeni gubitkom mehaničkog integriteta bušotina. Mnogi autori navodi da se proces analize rizika poziva na period od 1000 godina (Gaurina-Međimurec i Novak Mavar, 2017).

Radi postizanja sigurnog skladištenja CO₂ u podzemlju, integritet bušotine treba sagledati tijekom svih faza u radnom vijeku bušotine od planiranja, bušenja, opremanja, utiskivanja, održavanja te sve do njenog trajnog napuštanja (Gaurina-Međimurec et al., 2011). Tijek postupaka u procjeni rizika mehaničkog integriteta bušotine prikazan je na Slici 5-3.



Slika 5-3. Grafički model procesa analiziranja integriteta bušotine

Tijek procjene integriteta bušotine uključuje nekoliko važnih elemenata i glavnih koraka: prikupljanje i tumačenje svih dostupnih podataka o bušotinama (npr. CBL), stvaranje statičkog modela bušotine uključujući njezine geometrijske parametre i parametre cjelovitosti i prikaz okolnih naslaga, stvaranje dinamičkog modela uzimajući u obzir statički model bušotine i moguće procese koji se mogu odvijati u bušotini tijekom utiskivanja CO₂ (npr. degradacija cementnog kamena, korozija zaštitnih cijevi, migracija CO₂ i dr.), izračun volumena migriranog CO₂ i odgovarajuće vjerojatnosti, procjena ozbiljnosti (mreža posljedica, tablica ozbiljnosti, mapiranje rizika). Na kraju procesa procjene daju se preporuke i mjere za smanjenje rizika. Mjere za smanjenje rizika uključuju: pregled, dizajn sustava, operativne preporuke i preporuke za praćenje i mogućnosti ublažavanja prilagođene identificiranim izvorima rizika (Gaurina-Međimurec i Novak Mavar, 2017).

Analizirani pristup kvantitativnoj procjeni rizika (engl. *Quantitative Risk Assessment*, QRA) primjenjuje probabilističku metodu koja uzima u obzir nesigurnosti na prostornoj i na vremenskoj razini unutar programa nacionalnog partnerstva za procjenu rizika Ministarstva energetike SAD-a (engl. *U.S. Department of Energy National Risk Assessment Partnership*, The US DOE NRAP) za modeliranje integrirane procjene za simulaciju dugoročne učinkovitosti geološkog skladišta CO₂. Programom se predviđa reakcija okolnih geoloških formacija na utiskivanje CO₂. Polazna pretpostavka je da proces utiskivanja CO₂ može

izazvati seizmičke reakcije te na taj način utjecati na postojeće rasjede i frakture u stijenama, u slučaju da tlak utiskivanja premaši tlak frakturiranja stijena geološkog skladišta.

Ukupna seizmička djelovanja se predviđaju na temelju poznate i inducirane seizmičke aktivnosti. U ovom pristupu geološko skladište CO₂ prikazano je kao sustav sastavljen od komponenti kao što su ležište, bušotine i rasjedi (Pawar et al. 2015). Modeli reduciranog poretka (engl. *Reduced Order Models*, ROM) razvijeni su za praćenje kretanja CO₂ i kretanja podzemnih voda, što rezultira prikazom interakcija između svih komponenti sustava (Pawar et al., 2015). ROM-ovi se obično razvijaju iz rezultata prethodnih simulacija rada geoloških skladišta, a sve pomoću Monte Carlo simulacijske metode. Metoda Monte Carlo predstavlja široku skupinu računalnih algoritama, a temelji se na ponavljanju iterativnog postupka za dobivanje numeričkih rezultata. Osnovna ideja je da se uz pomoć slučajnih događaja rješavaju problemi koji mogu biti deterministički (Palisade, 2022). Rezultati Monte Carlo simulacija koriste se za razvoj vjerojatnosti pojavljivanja događaja povezanih s migracijom CO₂ u podzemne vode iz primarnog mjesta i utjecaja tog procesa u svrhu kvantificiranja rizika.

U slučaju dovoljnog broja dostupnih podataka s terena, simulacija se provodi sa stvarnim podacima. No, često to nije slučaj što se odražava na ROM-ovima. U konačnici, ROM-ovi su objedinjeni u integriranoj procjeni modela na način koji učinkovito obuhvaća povezanost svih komponenti sustava.

Ovaj pristup također omogućuje ispitivanje nesigurnosti unutar sustava i identifikaciju onih geoloških ili operativnih svojstava koja imaju najveći utjecaj na pojavu neželjenog događaja, bilo da se radi o svojstvima ležišta, bušotina, podzemne vode itd (Pawar et al., 2015).

Brzina utiskivanja CO₂ uvelike ima utjecaja na vrijednost tlaka, posebno u slabopropusnim stijenama. Tlak utiskivanja CO₂ ne smije biti viši od tlaka frakturiranja jer bi to dovelo do oštećenja ležišta ili okolnih stijena. Neodgovarajuća vrijednost tlaka utiskivanja (u slučaju kad je on veći od dozvoljenih vrijednosti) potencijalno inducira seizmičnost. Poznavanje položaja fraktura i rasjeda, te seizmičnosti područja od važnosti je za CCS projekte (Pawar et al, 2015). Do danas, različiti projekti utiskivanja CO₂ pokazali su inducirane mikrosezmičnih aktivnosti, bez pojave značajnih podrhtavanja na područjima gdje se CO₂ skladišti. Kako bi se zadovoljili zahtjevi IPCC-a postavljeni u pogledu smanjivanja emisija CO₂, u budućnosti će biti potrebno utiskivati sve veće količine CO₂ u

skladišta, što posljedično može izazvati povećanje seizmičke aktivnosti. Pawar et al. (2015) dali su listu opasnosti koje mogu biti uzrokovane induciranom seizmikom, a kao najznačajnija se izdvaja narušavanje integriteta geološkog skladišta.

6. PRIMJERI PROCJENA RIZIKA MIGRACIJE CO₂ IZ GEOLOŠKOG SKLADIŠTA

Prikazana je metodologija dviju kvantitativnih procjena rizika, provedenih za dva različita projekta geološkog skladištenja CO₂: projekt CO₂CRC Otway i projekt In Salah.

6.1. Primjer kvantitativne procjene rizika migracije CO₂ iz geološkog skladišta i analize osjetljivosti provedene za projekt CO₂CRC Otway, Australija

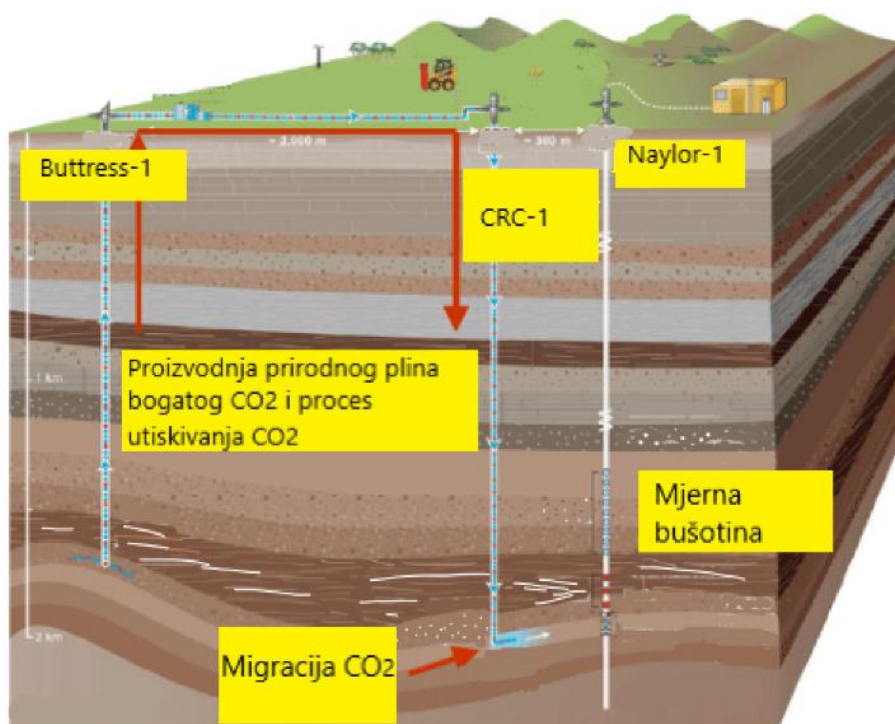
Bowden et al. (2012.) razvili su metodu identifikacije rizika i strategije eliminacije istog uporabom kvantitativne tehnike (engl. *The Risk Identification and Strategy Using Quantitative Evaluation*, RISQUE) za procjenu integriteta skladišta. Proces kvantifikacije rizika koji mogu narušiti integritet skladišta nalaže definiranje svakog pojedinog rizika kroz (Pawar et al., 2015):

1. vjerojatnost pojave migracije CO₂,
2. utjecaj na okolinu u smislu količine koja se emitira u okoliš (tona CO₂ godišnje),
3. trajanje neželjene migracije.

Procjena integriteta skladišta primjenom RISQUE metode provedena je na projektu CO₂CRC Otway. Predstavlja značajan istraživački projekt smješten u jugozapadnoj Viktoriji. Ispitivanja se vrše na svim elementima sustava: utiskivanje CO₂, transport, skladištenje i praćenje ponašanja utisnutog fluida, a od 2008. godine kroz CO₂CRC Otway utisnuto je 65 000 t CO₂ (Steeper, 2013).

U okviru projekta koriste se dva polja koja su kroz komercijalne pregovore, odabrana za pilot projekt: neistraženo polje Buttress (izvor CO₂) i iscrpljeno plinsko polje Naylor smješteno oko 2 km južno od polja Buttressa. Plinsko polje Naylor manjeg je kapaciteta s procijenjenom količinom zaliha prirodnog plina od $2,83 \cdot 10^8$ m³. Od svibnja 2002. do veljače 2004. godine polje je proizvelo ukupno $1,12 \cdot 10^8$ m³ prirodnog plina, kroz bušotinu Naylor-1. Pridobivanje plina je obustavljeno 2004. godine, nakon pojave značajnog udjela vode u proizvodnom fluidu. Polje Buttress je rasjedom ograničeno ležište CO₂ s jednom potencijalnom proizvodnom bušotinom, Buttress-1. Ova je bušotina izrađena 2002. godine, ali je zatvorena nakon što je raskrila ležište CO₂.

Koncept CO₂CRC Otway projekta prikazan je na Slici 6.1. Planirano je da se prirodni plin (80% CO₂; 20% metan) pridobiva postojećom bušotinom (Buttress-1), obradi i komprimira u posebno izgrađenom površinskom postrojenju prije faze transporta kroz novoizgrađi, podzemi, plinovod od inox čelika duljine 2,25 km. CO₂ se transportira do nove utisne bušotine, CRC-1. Utisna bušotina CRC-1 izbušena u djelomično iscrpljenom ležištu Waarre C (ležište CO₂) na dubini od 2050 metara. Bilo je planirano da se u navedeno ležište tijekom dvije godine utisne do 100 000 t CO₂, u superkritičnom stanju (Sharma et al., 2009).



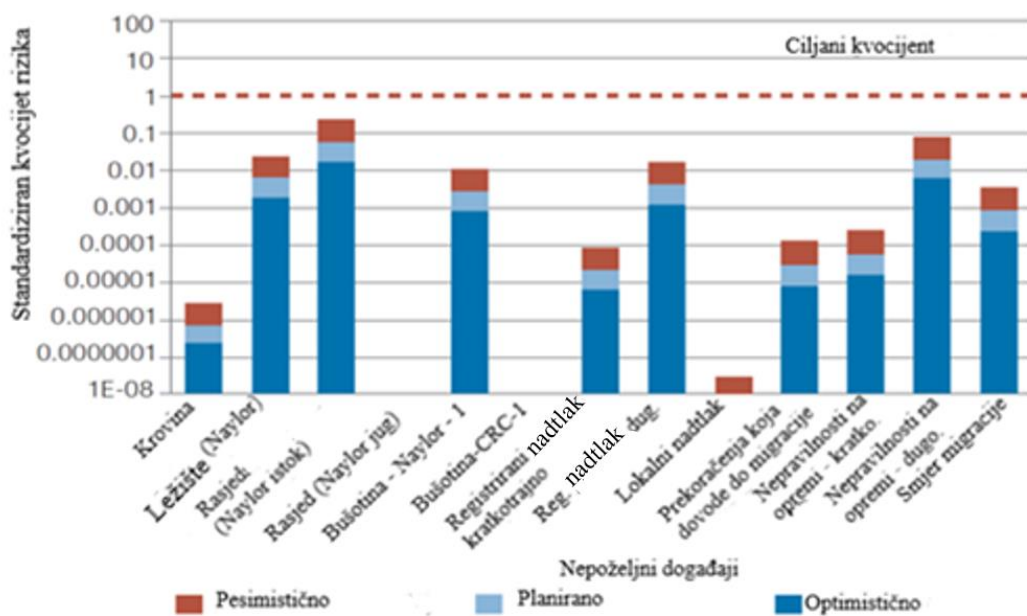
Slika 6-1. Prikaz projekta CRCCO₂ Ottway (Sharma et al., 2009)

U postupku analize rizika (Pawar et al., 2015) utvrđen je niz elemenata koji čine potencijalne puteve migracije (npr. frakture, bušotine). Utvrđeni rizici uspoređeni su s rizicima uslijed utiskivanja CO₂ koji dovode do pretpostavljene inducirane seizmičnosti koja narušava integritet skladišta. Za prvu fazu projekta CO₂CRC Otway izvršene su dvije procjene rizika. Procjena iz 2005. godine provedena je kako bi se procijenila održivost projekta. Procjena rizika iz 2007. godine provedena je nakon što je utisna bušotina (CRC-1) izbušena i uključivala je dodatne ulazne podatke. Rezultati procjena iz 2005. i 2007. godine prikazani su na grafikonima (Slike 6-2. i 6-3.), gdje je svakoj komponenti koja predstavlja potencijalni put migracije CO₂ pridružena odgovarajuća vjerojatnost pojave migracije. Vjerojatnosti su iskazane na logaritamskoj skali. Crvena isprekidana linija predstavlja vrijednost koja će dovesti do migracije u slučaju da vrijednost vjerojatnosti rizika dostigne

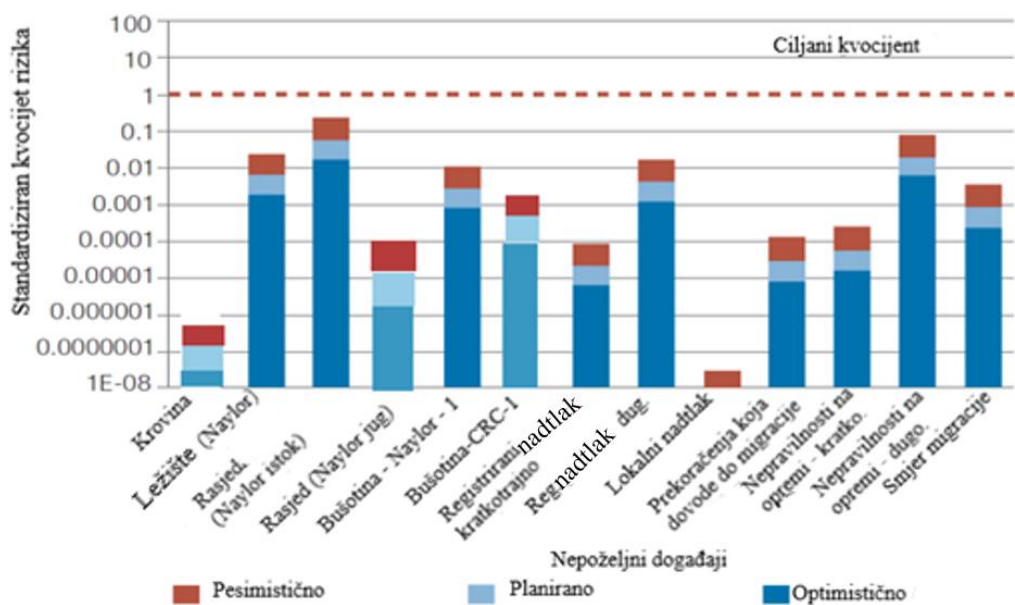
ciljani kvocijent. Ciljani kvocijent rizika je funkcija vjerojatnosti i utjecaja u odnosu na prihvatljivu količinu istjecanja od 1% tijekom 1000 godina. Optimistični, planirajući i pesimistični kvocijent rizika je dan za svaki promatrani element koji predstavlja promatranu komponentu RISQUE metode. Promatran je niz parametara od kojih su najkritičniji sljedeći (Slike 6-2. i 6-3; Pawar et al., 2015):

1. pokrovne stijene,
2. eksploatacijsko polje Naylor,
3. rasjed s istočne strane ležišta,
4. rasjed s južne strane ležišta,
5. likvidirana proizvodna bušotina Naylor,
6. utisna bušotina CRC-1,
7. kratkotrajno djelovanje registriranog nadtlaka,
8. dugotrajno djelovanje registriranog nadtlaka,
9. lokalni nadtlak,
10. prekoračenje vrijednosti tlaka koja dovodi do migracije,
11. kratkotrajna prisutnost nepravilnosti ili kvara na opremi,
12. dugotrajna prisutnost nepravilnosti ili kvara na opremi,
13. smjer migracije CO₂ iz ležišta.

Općenito, metoda RISQUE procijenila je rizik od migracije CO₂ za projekt CO₂CRC Otway kao nizak (Pawar et al., 2015). Rezultati i preporuke iz metode RISQUE dovele su do daljnje geološke karakterizacije i dinamičkog modeliranja.



Slika 6-2. Rezultati prvotne procjene rizika RISQUE metodom iz 2005. godine, provedenom prije bušotina CRC-1 (Watson, 2014)



Slika 6-3. Rezultat RISQUE metode za prvu fazu projekta CO₂CRC Otway iz 2007. godine (Watson, 2014)

Analiza osjetljivosti komponenti sustava procjenjuje konačnu vjerojatnost rizika migracije utisnutog CO₂ iz geološkog skladišta prema jednom od podkriterija danih na Slici 6-4. Predstavljena analiza omogućuje kvantificiranje rizika koji dovode do migracije CO₂. Na primjer, vjerojatnost već postojeće frakture pokrovne stijene je vrlo mala jer u većini slučajeva prvotne procjene podzemlja (geofizičke i seizmičke metode) daju sliku o kritičnim točkama koje će se morati dodatno analizirati prije nego što se na istom području krene s utiskivanjem CO₂. Stoga se može zaključiti da ukupni rizik od propuštanja budućeg skladišta nije osjetljiv na spomenuti rizični element.



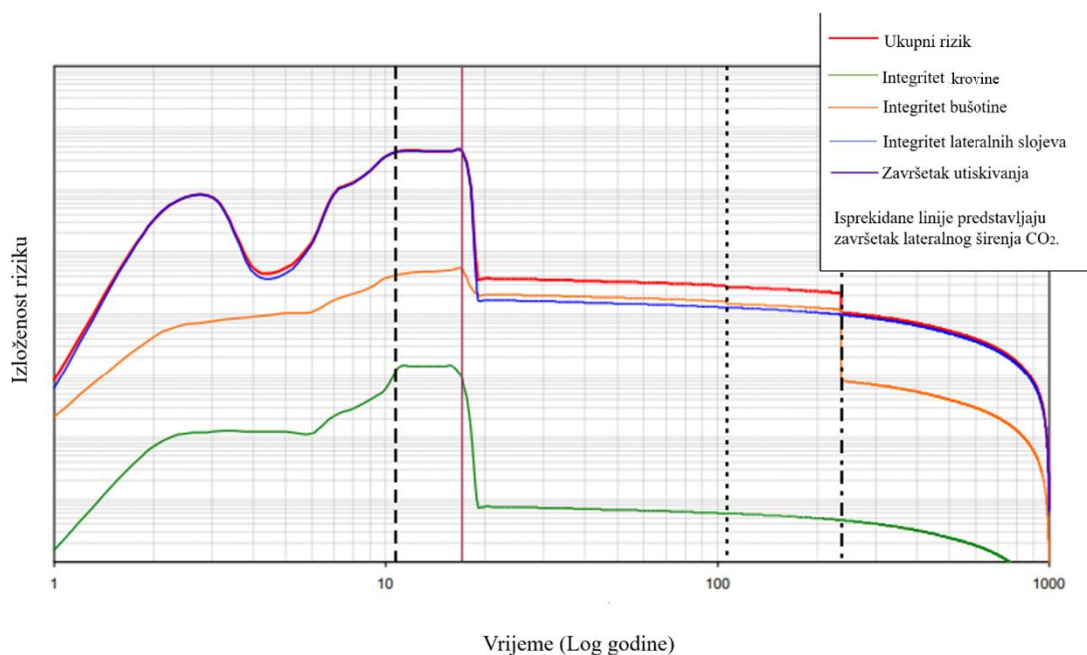
Slika 6-4. Prikaz potencijalnih puteva migracije CO₂ iz podzemnog skladišta (Oraee-Mirzamani et al., 2013)

Često je korištena funkcionalna metoda za analizu karakteristika komponenti sustava koje doprinose neželjenom scenariju. Funkcionalna metoda uzima u obzir komponentne bušotine, način na koji dolazi do nepravilnosti nekog od elemenata bušotine, kao i potencijalne posljedice takvih nepravilnosti. Uzroci koji narušavaju integritet kolone zaštitnih cijevi i cementnog kamena su korozija, erozija i promjena geometrijskih svojstava uslijed velikih temperaturnih varijacija. Spomenuti uzroci dovode do gubitka mehaničke

otpornosti, gubitka brtvenih svojstva i pojavu nadtlaka (Gaurina-Međimurec i Novak Mavar, 2017).

6.2. Procjena rizika migracije za projekt In Salah u Alžiru

Metodologija kvantitativne procjene rizika kroz određeni vremenski period (engl. *Quantitative Risk Through Time*, QRRT) alat je za internu procjenu rizika korišten u kompaniji British Petrol (BP). Tehnika QRRT je korištena za procjenu rizika migracije CO₂ za projekt In Salah (Dodds et al., 2011). Procjenjivan je odnos između rizika migracije CO₂ (izvedeno na sličan način kao i RISQUE) i iskustveno predviđene dinamike ponašanja skladišnog sustava, odnosno promjene tlaka (Pawar et al., 2015). Na Slici 6-5. krivuljama je prikazano ispitivanje tri migracijska puta (integritet lateralnih izolatorskih slojeva, integritet bušotine, integritet pokrovnih stijena), te predviđeno ponašanje za tri različite utisne bušotine za razdoblje od 1000 godina.



Slika 6-5. Grafički prikaz metode kvantitativne procjene rizika kroz određeni vremenski period (QRRT) (Pawar et al., 2015)

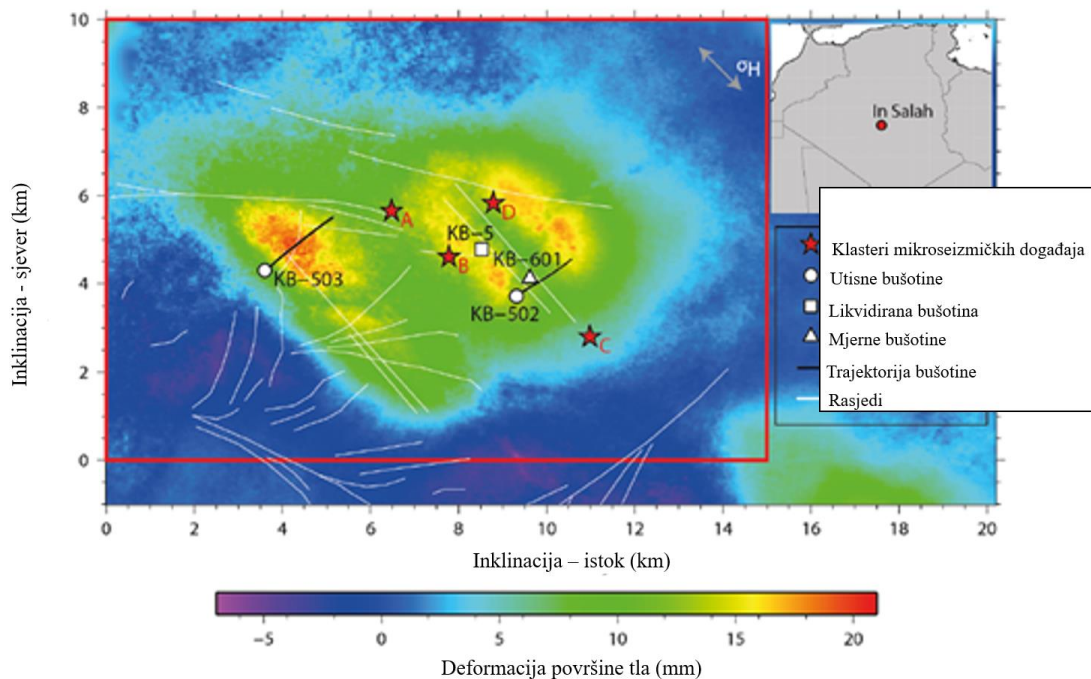
Navedene tehnike, uz niz drugih, korištene su za procjenu rizika migracije utisnutog CO₂ iz geološkog ležišta na polju Krechba u središnjem Alžiru, u sklopu projekta In Salah.

Projekt CCS In Salah jedan je od najvažnijih pokaznih kopnenih projekata kaptiranja i skladištenja CO₂.

Statički geološki model polja Krechbe predstavlja asimetričnu antiklinalu s dva maksimuma. Na zapadnom dijelu antiklinale dominira rasjedni sustav pružanja istok-zapad, dok se na istočnom krilu antiklinale pojavljuje nekoliko pojedinačnih rasjeda koji su povezani s rasjednima prisutnima na većim dubinama.

Na eksploatacijskom polju Krechba eksploatirao se prirodni plin iz tri ležišta. Prirodni plin sadržavao je oko 10% CO₂ koji se odvajao u postrojenju za preradu aaminskim postupkom. Izdvojeni CO₂ se komprimirao i ponovno utiskivao u pješčenjačko ležište niske propusnosti što je zahtijevalo utiskivanje CO₂ pod visokim tlakom. Utiskivanje je započelo 2004. godine i tijekom projekta, u geološko skladište je utisnuto 3,8 Mt CO₂. Utiskivanje CO₂ je obustavljeno 2011. godine, zbog gubitka integriteta pokrovnih stijena. Iskustvo dobiveno provedbom projekta In Salah ilustrira važnost prikupljanja podataka uporabom niza metoda u svrhu nadziranja (In Salah: Project Details, 2017). Na takav način razvija se detaljno razumijevanje ovisnosti između injektivnosti ležišta, brzine utiskivanja CO₂ i promjene tlaka za vrijeme rada geološkog skladišta.

U projektu geološkog skladištenja CO₂ na polju Krechba, CO₂ je utiskivan kroz tri horizontalne utisne bušotine na dubini od 1800 m. Polje Krechba sastoji se od ukupno 16 bušotina, uključujući mjerne bušotine (najstarije), bušotine za proizvodnju plina i bušotine za utiskivanje CO₂ (novije). Pet bušotina za proizvodnju prirodnog plina i tri bušotine za utiskivanje CO₂ izvedene su kao horizontale bušotine unutar ležišta, a u funkciji su povećavanja iscrpka plina utiskivanjem CO₂. Slika 6-6. prikazuje polje Krechba; lokaciju dviju horizontalnih bušotina za utiskivanje CO₂ (KB-502 i KB-503), jednu likvidiranu istražnu bušotinu na tom području (KB-5) i vertikalnu bušotinu za mikro seizmičko praćenje (KB-601). Utisna bušotina KB-501 nalazi se izvan ove regije na jugu (nije prikazano). Lokacije klastera mikro seizmičkih događaja (A-D) prikazane su crvenim zvjezdicama. Rasjedi interpretirani na temelju 3D seizmičkih podataka prikazani su do 2000 m dubine (bijele linije). Smjer najvećeg horizontalnog naprezanja σ_H označen je sivom strelicom. Boja pozadine označava uočenu površinsku deformaciju uslijed utiskivanja CO₂. Crveni okvir prikazuje promatranu regiju (Goertz-Allmanna et al. 2007).

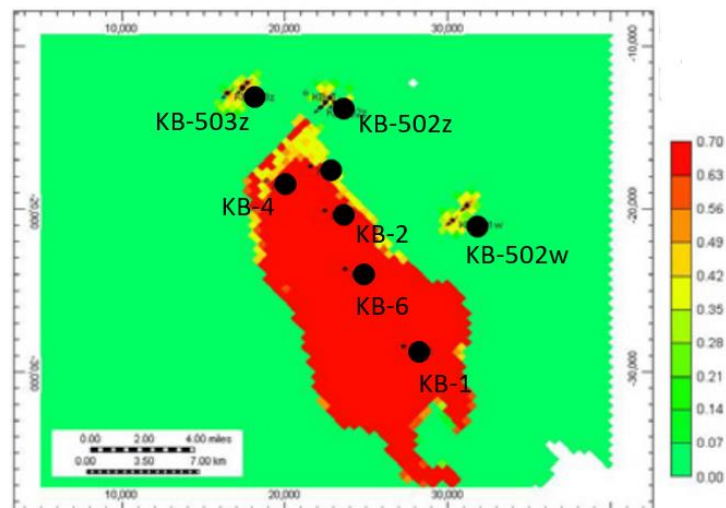


Slika 6-6. Prikaz plinskog polja Krechba, Alžir (Goertz-Allmanna et al. 2007.)

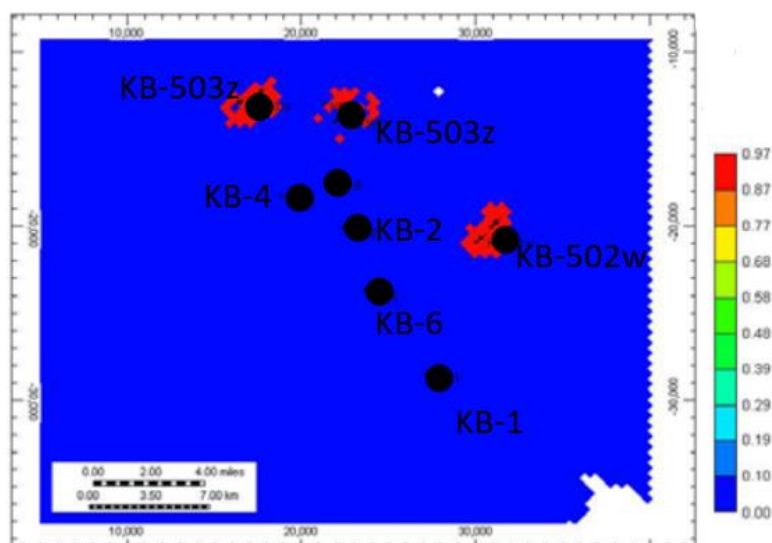
Funkcioniranje podzemnog skladišta CO₂ moguće je pratiti mnogim metodama koje su prisutne na tržištu ili se tek razvijaju. Kretanje CO₂ utisnutog u polje praćeno je u okviru zajedničkog istraživačkog programa (engl. *Joint Industry Program, JIP*), koji su provodile kompanije British Petrol (BP), Sonatrach-a i Equinor-a, uz sufinanciranje Ministarstva energetike SAD-a (engl. *U.S. Department of Energy, US DOE*) i Glavne uprave za istraživanje i inovacije u Europskoj uniji (engl. *EU Directorates-General Research and Innovation, EU DG Research*). Tijekom godina provedena su opsežna istraživanja koja su bila temelj za procjenu rizika.

Povijest utiskivanja na polju, dostupni podaci o karakterizaciji geološkog skladišta, izrađeni geološki modeli te dostupnost satelitskih podataka o tlu (s podacima o slojevitosti tla) pružaju jedinstvenu priliku za uvid u procjenu rizika (Oldenburg et al., 2008). Nekoliko je metoda praćenja ponašanja skladišta primjenjivano u ovom projektu, uključujući satelitsku interferometriju, mikro seizmičko praćenje te 4D seizmičko kartiranje (Ringrose et al., 2013). Zbog površinskog pustinjskog okoliša (Sahara), interferometrijski radar sa sintetičkim otvorom (InSAR) pokazao se posebno uspješan. Prilikom utiskivanja CO₂ u podzemlje, dolazi do uzdizanja površine, a odziv površinske deformacije na utiskivanje na dubini može se numerički simulirati pomoću protoka CO₂ i geomehaničkih modela (Goertz-

Allmanna et al., 2007). Simulacija utiskivanja CO₂ provedena je korištenjem programa Nanocem CMG-GEM WebApp-a za predviđanje opsega migracije CO₂ i promjene tlaka. Rezultati su pokazali da je migracija CO₂ ograničena i da ne dolazi do prodiranja CO₂ u slojni fluid (Slika 6-7. i 6-8.; Oldenburg et al., 2011). Promjena tlaka u ležištu također je neznatna. Prilikom pridobivanje prirodnog plina iz ležišta dolazi do prirodnog pada ležišnog tlaka, dok radi utiskivanja CO₂ dolazi do porasta tlaka unutar ležišta, uslijed čega je promjena tlaka kompenzirana. Vidi se da nakon 30 godina istovremenog pridobivanja prirodnog plina i utiskivanja CO₂ nema značajne migracije CO₂ niti miješanja s prirodnim plinom (Oldenburg et al., 2008). Općenito se pokazalo da utisne bušotine predstavljaju potencijalne puteve migracije CO₂.



Slika 6-7. Zasićenost ležišta prirodnim plinom (prikazano crveno) (Oldenburg et al., 2008)



Slika 6-8. Molni udio CO₂ u plinu (crveno) (Oldenburg et al., 2008)

Područje skladištenja CO₂ za planiranih 20 godina njegovog utiskivanja (2004. - 2024. godine) zahtijevalo je definiranje granica promatranog sustava unutar geološkog skladišta. To su (Oldenburg et al., 2008):

1. granica definirana rubom plinske kape i
2. granica definirana prodorom CO₂.

Podinske stijene predstavljene su jedinicom D55, a pokrovne stijene jedinicom C20.7. Uz ovako definirane granice geološkog skladišnog prostora jedini putovi migracije CO₂ koje treba uzeti u obzir su utisne bušotine i rasjedi kroz koje bi bi CO₂ migrirao prema plićim vodonosnim slojevima te bočna migracija tijekom pretpostavljenih 20 godina u ležište plinsko prizvodno ležište (Krechba). Nakon 20 godina, potrebno je razmotriti površinu unutar ležišta koju je prethodno zauzimao iscrpljeni prirodni plin, a koja će naknadno biti popunjena utisnutim CO₂ (Oldenburg et al., 2008).

6.2.1. Procjena rizika migracije CO₂ pomoću informacija prikupljenih prije postupka utiskivanja

Na temelju statističkih podataka o erupcijama ugljikovodika prilikom pridobivanja nafte/plina (svako nekontrolirano istjecanje ugljikovodika iz bušotine, bez obzira na volumen) općenito se može procijeniti vjerojatnosti od približno 1% da će bušotina za utiskivanje CO₂ dovesti do migracije CO₂ prema površini tijekom trajanja projekta (Jordan i Benson, 2009). Ne očekuje se da napuštene bušotine omoguće migraciju CO₂ tijekom narednih nekoliko desetljeća. Izuzetak su bušotine KB-5 (registrirana vrlo mala nekontrolirana migracija koja iznosi < 1t CO₂) i KB-4; koje su u neposrednoj blizini utisnih bušotina KB-502 i KB-503 . Iako statistički podaci upućuju da je erupcija fluida iz napuštene bušotine vrlo malo vjerojatna, integritet ovih bušotina treba procijeniti i periodički provjeravati.

Mogućnost migracije kroz frakture i rasjede nije zabrinjavajuća radi prirodne akumulacije prirodnog plina u ležištu (nije utvrđena migracija prirodnog plina kroz iste frakture i rasjede) i očekivanog dugoročnog pada tlaka u sustavu zbog proizvodnje plina. Međutim, razdoblje utiskivanja može dovesti do pojave nadtlak uz aktiviranje fraktura. Na temelju ove strategije i dubine ležišta, gornja granica tlaka utiskivanja je postavljena na 24 MPa ili 29 MPa (3,500 psi ili 4,200 psi). Prva vrijednost od 24 MPa je ekvivalent tlaku fluida

gustoće 1300 kg/m^3 na dubini ležišta, a druga vrijednost od 29 MPa je ekvivalent tlaku fluida gustoće 1640 kg/m^3 na dubini ležišta. Utiskivanje CO_2 može izazvati pojavu fraktura, koje će se protezati do pokrovnih stijena, čijim daljnjim širenjem frakture mogu biti zahvaćeni okolni slojevi. Pojava migracije duž frakture/rasjeda procjenjuje se kao malo vjerojatna, ali dovodi se u vezu s velikim potencijalnim utjecajima na vodonosnike pitke vode (Oldenburg et al., 2008).

6.3. Naknadna procjena rizika migracije CO_2

Mjerenja kvalitete cementne veze (engl. *Cement Bond Log*, CBL) za bušotine na polju Krechba provedena su 2006. godine (nakon početka utiskivanja). Utisne bušotine sa zadovoljavajućom cementom vezom ne predstavljaju potencijalni put migracije CO_2 . Mjerenjima je u pojedinim intervalima bušotina utvrđena loša cementna veza. Iako je 2007. godine na ušću utisne bušotine KB-5 primijećen dotok CO_2 , zbog lokacije bušotine u pustinjskom području (nenaseljeno područje, bez vegetacije), posljedica ovog nekontroliranog dotoka bila je zanemariva. Pojava dotoka iz bušotine KB-5 je očekivanu vjerojatnost incidenta koja je bila na razini "vjerojatan događaj" podigla na višu razinu, tj. "vrlo vjerojatan događaj". Migracija CO_2 kod ovakvih incidenata još uvijek ne dovodi do emitiranja CO_2 iz litosfere u atmosferu (engl. *Emission Credits and Atmosphere*, ECA), ali će migracije CO_2 imati utjecaj na pliće vodonosne slojeve. Pan et al. (2009) razvili su metodu koja je korištena za modeliranje tlaka na dnu bušotine za KB-501 pri različitim uvjetima tlaka na ušću i pri različitim brzinama utiskivanja CO_2 . Rezultati metode sugeriraju tlak utiskivanja veći od 24 MPa (3500 psi); što je granični tlak utiskivanja koji ne dovodi do frakturiranja pokrovnih stijena, zbog čega je rizik od migracije CO_2 kroz frakture i rasjede porastao na "vrlo vjerojatan" za razdoblje prije rujna 2008. Posljedično, periodi utiskivanja CO_2 smanjeni su kako bi se rizik doveo u dozvoljene vrijednosti. Istraživanja su dala detaljniju sliku o situaciji u podzemlju, izbušene su dodatne mjerne bušotine kako bi se migracija CO_2 kontrolirala u većim razmjerima (Oldenburg et al., 2008).

6.4. Preporuke za ublažavanje rizika pojave neželjenih događaja

S obzirom na pojavu migracije CO_2 kroz bušotine KB-502 do KB-5 duž orijentacije fraktura, utvrđena je mogućnost bržeg probijanja CO_2 od bušotine KB-503 do KB-4, te se preporučuje monitoring utisnih bušotina KB-2, -4 i -8. Nadzor je potrebno fokusirati na protok. Nastavak utiskivanja pri 29 MPa dovodi do mogućnosti pojave fraktura i migracije CO_2 prema plićim vodonosnicima, zbog čega je bilo potrebno ograničiti tlakove u sve tri

utisne bušotine na donju graničnu vrijednost tlaka frakturiranja pokrovne stijene. Bilo je potrebno definirati vrijednost odgovarajućeg sigurnosnog faktora koji treba primijeniti na temelju mjerenja gradijenta tlaka frakturiranja stijena koje su prisutne u podzemlju, a zatim je bilo potrebno postaviti gornju graničnu vrijednost tlaka, dijeljenjem razlike tlaka frakturiranja i početnog ležišnog tlaka slojnog fluida s faktorom sigurnost (Oldenburg et al., 2008).

7. NADZOR RADA GEOLOŠKIH SKLADIŠTA CO₂

Svrha nadziranja rada geološkog skladišta je sprječavanje potencijalnih rizika. Praćenje pojedinih parametara mora se provoditi u skladu s odobrenim planom, a dobiveni podaci uspoređuju se s onima predviđenim modeliranjem i procjenom rizika. Geološko skladištenje CO₂ mora se pratiti kroz dulje vrijeme zbog sporih geokemijskih reakcija. Razlozi za nadziranje rada geološkog skladišta su (Saftić i Kolenković, 2011):

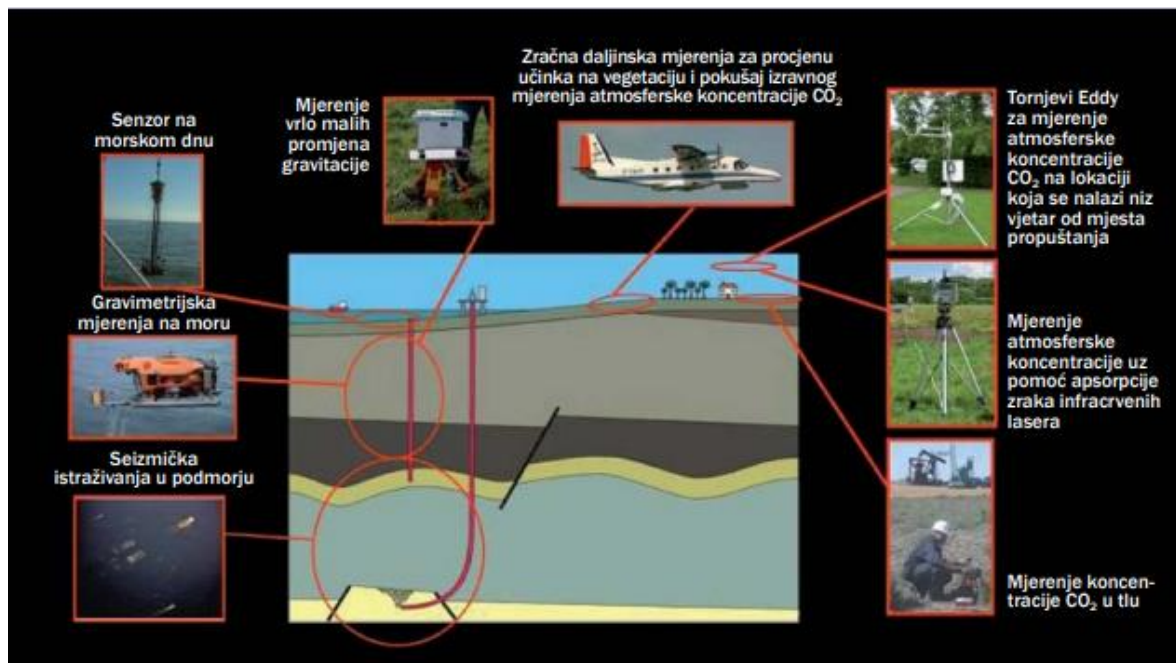
- operativni, za kontrolu i optimizaciju procesa utiskivanja,
- zaštita ljudskog zdravlja i okoliša, za minimiziranje ili sprječavanje posljedica neželjenih situacija na ljudsko zdravlje i ekosustave u blizini skladišta i kako bi se osiguralo ublažavanje globalnih klimatskih promjena,
- društveni, za informiranje javnosti o poslovanju skladišta u svrhu pridobivanja njihovog povjerenja,
- financijski, za predstavljanje projekata CCS tržištu te dokazivanja da geološki uskladištene količine CO₂ predstavljaju "izbjegnute emisije".

Praćenje se mora provoditi zbog nekoliko tehničkih razloga (IPCC, 2005; Gaurina-Međimurec i Novak Mavar, 2017):

1. određivanje volumena istisnutog CO₂ praćenjem i mjerenjem brzine utiskivanja, tlaka u bušotini i tlaka u ležištu,
2. određivanje količine CO₂ pohranjene različitim mehanizmima uzamčivanja,
3. poznavanje stvarnih podataka o volumenu skladišta, dozvoljenim tlakovima na ušću i na dnu bušotine,
4. demonstracija pravilnog rada skladišta,
5. otkrivanje putova migracije u svrhu primjene korektivnih mjera,
6. određivanje stanja bušotine (utisne, mjerne, likvidirane),
7. mikro seizmička detekcija povezana s procesima skladištenja.

Prije početka utiskivanja CO₂, potrebno je izvršiti mjerenje niza parametara potrebnih za pravilno izvođenje projekta, kako bi isti poslužili kao osnova za buduća mjerenja. Sezonska varijabilnost nekih svojstava podrazumijeva da se neka mjerenja moraju testirati tijekom različitih godišnjih doba. Mjerenje parametara utiskivanja uobičajena je praksa u eksploataciji nafte i plina. Općenito se provode mjerenja: tlaka na površini i u

ležištu, protok, mjerenje utisnute količine CO₂ te trajanje utiskivanja. Spomenuta mjerenja u kombinaciji s mjerenjima temperature daju informacije o stanju CO₂ (superkrično, tekuće ili plinovito). Za praćenje moguće migracije CO₂ iz geoloških skladišta mogu se koristiti direktne metode mjerenja, geokemijske metode i detektori CO₂ ili nedirektne metode mjerenja praćenje oblaka utisnutog CO₂ (Slika 7-1.). Direktne metode primjenjuju se na način izravnih mjerenja koja uključuju analize fluida iz dubokih bušotina ili mjerenja koncentracije plina u tlu ili atmosferi. Indirektne metode uključuju različita geofizička istraživanja i praćenja promjena tlaka u bušotinama ili promjene pH vrijednosti podzemnih voda. Većina metoda koje se primjenjuju dobro su razrađene u naftnoj i plinskoj industriji (Arts et al., 2011). Za praćenje geoloških skladišta na kopnu koriste se tornjevi Eddy za mjerenje atmosferske koncentracije CO₂ na lokaciji koja se nalazi niz vjetar od mjesta propuštanja; mjerenje atmosferske koncentracije uz pomoć apsorpcije zraka infracrvenih lasera; mjerenje koncentracije CO₂ u tlu. Praćenje odobalnih geoloških skladišta uključuju senzore na morskom dnu, gravimetrijska mjerenja na moru, te seizmička istraživanja u podmorju. Mjerenja se provode tijekom i nakon utiskivanja CO₂, kako bi se provjerila učinkovitost skladištenja.



Slika 7-1. Raspon dostupnih metoda za praćenje raznih komponenti sustava skladištenja CO₂ (Arts et al., 2011)

Mjerni podaci i dobivene informacije koriste se za ocjenu predviđanja numeričkog modela ležišta. Ako predviđanja nisu u skladu sa stvarnim ponašanjem, model se korigira kako bi se dobila preciznija procjena (Arts et al., 2011).

Kod planiranja strategije monitoringa, odluke koje se donose ovise o geološkim i inženjerskim specifičnostima (dubina i oblik ležišta, očekivano širenje oblaka CO₂, potencijalni putovi migracije, geološke značajke pokrovnih stijena, brzina utiskivanja, trajanje utiskivanja), kao i površinskim faktorima (topografija, lokacija, gustoća naseljenosti, infrastruktura i ekosustavi). Plan i program monitoringa moraju biti prilagodljivi s obzirom na nove uvjete kako bi se razvijao zajedno s procesom skladištenja (Arts et al., 2011.).

8. ZAKLJUČAK

Upravljanje rizikom potrebno je u svim fazama životnog vijeka geološkog skladišta, kako bi se osigurao siguran proces rada bez štetnih učinaka na zdravlje ljudi i okoliš, stoga je vrlo važno odrediti sve potencijalne rizike i napraviti plan za njihovo otklanjanje ili ublažavanje. Prije primjene projekata geološkog skladištenja CO₂ potrebno je utvrditi jesu li identificirani rizici prihvatljivi.

Iscrpljena ležišta nafte i plina predstavljaju perspektivnu mogućnosti sekvencijacije ugljika, zbog značajnih skladišnih kapaciteta, postojeće infrastrukture koja ekonomski opravdava provedbu ovakvih projekata, ali i zbog prihvatljivog rizika migracije CO₂ zahvaljujući sposobnosti ležišta da zadrži fluide. Skladišni objekti u Sjevernoj Hrvatske nalaze se u Savskoj i Dravskoj depresiji koje su dio Panonskog bazenskog sustava (PBS), s ukupnim kapacitetom skladištenja od 146 Mt. Akviferi kao ležišta visokih kapaciteta, predstavljaju drugu kategoriju perspektivnih ležišta za geološko skladištenje CO₂. Poznati dostupni kapacitet geološkog skladištenja CO₂ u Hrvatskoj iznosi 2854,5 Mt.

Kako bi se ispunilo smanjenje emisije stakleničkih plinova koje zahtijeva Europska komisija, bilo je potrebno povećati cijenu CO₂ na tržištu, potičući ulaganja u projekte sigurne i učinkovite tehnologije za trajno uklanjanje CO₂ iz atmosfere. Prema EU Direktivi o geološkom skladištenju ugljičnog dioksida 2009/31/EZ, obveze povezane s izloženošću CO₂ bave se njegovim utjecajem na klimu u slučaju da CO₂ migrira na površinu.

Niz je kvalitativnih i kvantitativnih metoda koje se koriste u procjeni rizika migracije CO₂. Na primjerima obrađenim u ovom radu korištena je kombinacija kvalitativnih i kvantitativnih metoda za procjenu rizika. Tako je za projekt CO₂CRC Otway korištena metoda identifikacije rizika i strategija eliminacije istog uporabom kvantitativne tehnike tzv. RISQUE. U postupku analize rizika utvrđeni su potencijalni putevi migracije kroz frakture i bušotine, te rizik pojave inducirane seizmičnosti uslijed utiskivanja CO₂. Promatranjem i analizom elemenata sustava geološkog skladišta za projekt CO₂CRC Otway utvrđeno je da je rizik migracije nizak. Metodologijom kvantitativne procjene rizika kroz određeni vremenski period, tzv. QRRT, procjenjivan je integritet geološkog skladišta In Salah. Procjenjivan je odnos između rizika migracije CO₂ i iskustveno predviđene dinamike ponašanja geološkog skladišnog sustava, odnosno promjene tlaka. Utvrđeno je da utiskivanje CO₂ dovodi do pojave nadtlaka što može inducirati frakturiranje pokrovne stijene, a mogućnost migracije kroz već postojeće frakture i bušotine nije zabrinjavajuća radi

prirodne akumulacije prirodnog plina na polju Krechba. Nadziranjem protoka i ograničavanjem tlaka utiskivanja na donju graničnu vrijednost tlaka frakturiranja (24 MPa) rizik migracije se svodi na "događaj manje vjerojatnosti".

Praćenje moguće migracije CO₂ iz geoloških skladišta izvodi se direktnim metodama mjerenja, geokemijskim metodama i detektorima CO₂ ili indirektnim metodama, kao što je praćenje oblaka utisnutog CO₂. Mjerenja se vrše prije utiskivanja i nakon utiskivanja CO₂ kako bi rezultati dali uvid u integritet geološkog skladišta. Plan monitoringa rada geološkog skladišta te plan sanacija mogućih anomalija u radu treba biti prilagodljiv s obzirom na prisutne uvjete rada.

9. POPIS LITERATURE

1. ANDREWS, A. E., J. D. KOFLER, M. E. TRUDEAU, J. C. WILLIAMS, D. H. NEFF, K. A. MASARIE, D. Y. CHAO, D. R. KITZIS, P. C. NOVELLI, C. L. ZHAO, E. J. DLUGOKENCKY, P. M. LANG, M. J. CROTWELL, M. L. FISCHER, M. J. PARKER, J. T. LEE, D. D. BAUMANN, A. R. DESAI, C. O. STANIER, S. F. J. DE WEKKER, D. E. WOLFE, J. W. MUNGER AND P. P. TANS, 2014. *CO₂, CO, and CH₄ measurements from tall towers in the NOAA Earth System Research Laboratory's Global Greenhouse Gas*, Atmospheric Measurement Techniques, 7, 2, 647-687
2. ARTS., R., BEAUBIEN, S., BENEDICTUS, T., CZERNICHOWSKI-LAURIOL, I., FABRIOL, H., GASTINE, M., GUNDOGAN O., KIRBY Z., LOMBARDI, S., MAY, F., PEARCE, J., PERSOGLIA, S., REMMELTS, G., RILEY, N., SOHRABI, M., STEAD, R., VERCELLI, S., VIZIKA-KAVVADIAS, O., 2011. "Što zapravo znači geološko skladištenje CO₂?", CO₂GeoNet.: Europska mreža izvrsnosti za geološko skladištenje CO₂
3. BENNACEUR, K., NEERAJ, G., MONEA M., RAMAKRISHNAN J.S., 2004. CO₂ Capture and Storage – a Solution Within, Oilfield Review 16(3), 44-61
4. BIAGIO, M., SPINEL, L. C., BRAUER, H., ; KASSEL, C., KALWA C., ERDELEN-PEPPLER M., COOPER R., WESSEL, W., VOUDOURIS, N., SAYSSET, S., JÄGER, S., 2018. *Requirements for safe and reliable CO₂ transportation pipeline (SARCO₂)*, Directorate-General for Research and Innovation (European Commission)
5. CALDEIRA K., WICKETT M., 2005. *Ocean model predictions of chemistry changes from carbon dioxide emissions to the atmosphere and ocean*, Center for Applied Computation Science, Nacionalna knjižnica Lawrence Livermore, Livermore, Kalifornija, SAD
6. CHADWICK R.A.; EIKEN O., 2013. *Offshore CO₂ storage: Sleipner natural gas field beneath the North Sea*, Geoscience, technologies, environmental aspects and legal frameworks, Cambridge, Velika Britanija, 227-253
7. Direktiva (EU) 2018/410 Europskog parlamenta i Vijeća od 14. ožujka 2018. o izmjeni Direktive 2003/87/EZ radi poboljšanja troškovno učinkovitih smanjenja emisija i ulaganja za niske emisije ugljika te Odluke (EU) 2015/1814
8. DIREKTIVA 2003/87/EZ EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA o uspostavi sustava trgovanja emisijskim jedinicama stakleničkih plinova unutar Zajednice i o izmjeni Direktive Vijeća 96/61/EZ

9. Direktiva 2009/31/EZ Europskog parlamenta i Vijeća o geološkom skladištenju ugljikova dioksida: EUR-Lex (Hrvatska): (15) 026: 158 – 179
10. DODDS, K., WATSON, M., WRIGHT, I., 2011. "Evaluation of risk assessment methodologies using the In Salah CO₂ Storage Project as a case history", *Energy Procedia*, Vol. 4: 4162–416
- engineering, *Advances in Environmental Engineering and Green Technologies*, 1-22
11. GAURINA-MEĐIMUREC N., NOVAK MAVAR K., 2017, "Depleted hydrocarbon reservoirs and CO₂ injection wells – CO₂ leakage assessment", *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik* 32(2):15-26
12. GAURINA-MEĐIMUREC N., NOVAK MAVAR K., MAJIĆ M., 2018. *Carbon Capture and Storage (CCS): Technology, Projects and Monitoring Review*, Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet
13. GAURINA-MEĐIMUREC N., PAŠIĆ B., MIJIĆ P. 2015. "Risk Planning and Mitigation in Oil Well Fields: Preventing Disasters", *International Journal of Risk and Contingency Management*, 4(4): 27-48
14. GHASEMZADEH, K., SADATI, T., NASIRINEZHAD, M., BASILE, A., 2018., *Cost Estimation of an Integrated System for Co-production of Electricity and Methanol*, Methanol - Science and Engineering
15. GOERTZ-ALLMANN B., KÜHN D., OYE V., BOHLOLI B., 2014. *Combining microseismic and geomechanical observations to interpret storage integrity at the In Salah CCS site*, *Geophysical Journal International* 198(1)
16. HERZOG, H. AND GOLOMB, D., 2004. Carbon Capture and Storage from Fossil Fuel Use, *Encyclopedia of Energy*, 1-19
17. HILDENBRAND A., SCHLÖMER S., KROOSS B. M., 2002. " Gas breakthrough experiments on fine-grained sedimentary rocks", *Geofluids*, Volume 2, Issue 1: 3-23
18. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), 2011., 2013., 2021., *Technology Roadmap Carbon Capture and Storage in Industrial Application*, OECD
19. JAKOBSENA J.P., BRUNSVOLDA A., HUSEBYEA J., HOGNESA E.S., MYHRVOLDB T., HANSEN P., HEKTORB E., TORVANGERC A. 2011. "Comprehensive assessment of CCS chains—Consistent and transparent methodology", *Energy Procedia*, Volume 4: 2377-2384
20. JORDAN, P. D., BENSON, S. M., 2009. *Well blowout rates and consequences in California Oil and Gas District 4 from 1991 to 2005: implications for geological storage of carbon dioxide*, *Environ. Geol.* 57, 1103–1123

21. KOLENKOVIĆ I., 2012. Mogućnosti za geološko skladištenje CO₂ u gornjomiocenskim pješčenjacima zapadnog dijela savske depresije, Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet
22. KÜÇÜKHÜSEYİN Ö., 2021. "CO₂ monitoring and indoor air quality", *REHVA Journal*, 54-59
23. LINDEBERG E., BERGAMO P., MOEN A., 2003. "The long term fate of CO₂ injected into an aquifer", *Proceedings of the 6th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*, 489-494.
24. LOIZZO, M., AKEMU, O.A.P., JAMMES, L., DESROCHES, L., LOMBARDI, S. AND ANNUNZIATELLIS, A., 2011. *Quantifying the Risk of CO₂ Leakage Through Wellbores*. SPE Drilling & Completion, 324-331
25. LUČIĆ, D., SAFTIĆ, B., KRIZMANIĆ, K., PRELOGOVIĆ, E., BRITVIĆ, V., MESIĆ, I., TADEJ, J., 2001. *The neogene evolution and hydrocarbon potential of the Pannonian Basin in Croatia*, Marine and petroleum Geology, 8113-8172
26. MALVIĆ T., RUSAN I., 2009. " Investment risk assessment of potential hydrocarbon discoveries in a mature basin. Case study from the Bjelovar Sub-Basin, Croatia", Zagreb, Rudarsko-geološko-naftni fakultet
27. MATANOVIĆ, D., GAURINA-MEĐIMUREC, N., SIMON, K., 2013. Risk analysis for prevention of hazardous situations in petroleum and natural gas
28. NOVAK MAVAR, K.; GAURINA-MEDIMUREC, N.; HRNČEVIĆ, L., 2021. Significance of Enhanced Oil Recovery in Carbon Dioxide Emission Reduction. Sustainability, znanstveni rad, Zagreb, RGNf
29. OCHOA ROBLES, J., DE-LEÓN, S., AZZARO-PANTEL, A. C., 2018, *Hydrogen Supply Chain Design: Key Technological Components and Sustainable Assessment*, Hydrogen Supply Chains - Design, Deployment and Operation, 37-79
30. ORAEE-MIRZAMANIA B., COCKERILLA T., MAKUCHA Z., 2013. Risk assessment and management associated with CCS, *Energy Procedia*, Volume 37: 4757-4764
31. ORR G. , HADAR Y., SIVAN A., 2004. *Colonization, biofilm formation and biodegradation of polyethylene by a strain of Rhodococcus ruber*, Faculty of Agriculture, Food and Environmental Quality Sciences, Sveučilište Jeruzalem, Izrael
32. PAN, L., OLDENBURG C.M., WU, Y., PRUESS K., 2009. *Wellbore flow model for carbon dioxide and brine*, Energy Procedia 1, 71-78
33. PAWARA R., BROMHALB G., CAREYC W., FOXALLD W., KORREE A., RINGROSEF P., TUCKERG O., WATSONH M., WHITE J., 2015. Recent advances in

- risk assessment and risk management of geologic CO₂ storage, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Volume 40: 292-311
34. Pravilnik o trajnom zbrinjavanju CO₂ u geološkim strukturama, NN 95/18
 35. Pravilnik o trajnom zbrinjavanju ugljikova dioksida u geološkim strukturama, NN 95/2018
 36. RINGROSEA P., MATHIESON A., WRIGHT W., SELAMAC O., HANSENA R., 2013. The In Salah CO₂ Storage Project: Lessons Learned and Knowledge Transfer, *Energy Procedia*, Volume 37: 6226-6236
 37. SAFTIĆ B., KOLENKOVIĆ I., 2011. CCS Actions and Storage Options in Croatia, Zagreb, Rudarsko-geološko-naftni fakultet
 38. SHARMA, S., COOK, P., BERLY, T., LEES, M., 2009. *The CO₂CRC Otway Project: Overcoming Challenges from Planning to Execution of Australia's first CCS project*, *Energy Procedia*. 1. 1965-1972.
 39. SIEGO L'ORANGE S., ARVARI J., DOHLE S., SIEGRIST M., 2014. Predictors of risk and benefit perception of carbon capture and storage (CCS) in regions with different stages of deployment, Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
 40. SOOD A., AHUJA S., THAKUR A., 2022. Review on recent technological advances in carbon dioxide capture sequestration/storage, *Tianjin Daxue Xuebao (Ziran Kexue yu Gongcheng Jishu Ban)/Journal of Tianjin University Science and Technology*, Vol. 55, 350-379
 41. STEEPER T., 2013. CO₂CRC Otway Project Social Research: Assessing CCS Community Consultation, *Energy Procedia*, Vol. 37, 7454-7461
 42. STEYN M., OGLESBY J., TURAN G., ZAPANTIS A., GEBREMEDHIN R., NOORA A., HAVERCROFT I., IVORY-MOORE R., STEYN M., YANG X., GEBREMEDHIN R., ABU ZAHRA M., PINTO E., RASSOOL D., WILLIAMS E., CONSOLI C., 2022. Evolution of Storage, *Global Status of CCS 2022*, 42-44
 43. Strategija energetskeg razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu, NN 25/2020
 44. Strategija niskougljičnog razvoja Niskougljičnom strategijom Republike Hrvatske (NN 63/2021)
 45. TERLOUW, T., BAUER M., 2021. Life Cycle Assessment of Direct Air Carbon Capture and Storage with Low-Carbon Energy Sources, *Environmental science technology*

46. WATSON M., 2014. Containment risk assessment. In: Cook, P. (Ed.), *Geologically Storing Carbon: Learning from the Otway Project Experience*, CSIRO Publishing: 129-140
47. WORKING GROUP III, 2022. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*, Izvješće IPCC
48. YOUSUF, N., OLAYIWOLA, O., GUO, B., LIU, N., 2021. *A comprehensive review on the loss of wellbore integrity due to cement failure and available remedial methods*, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume 207
49. Zakon o istraživanju i eksploataciji ugljikovodika, NN 52/18, 52/19, 30/21


Internetski izvori:

50. Europska komisija, Europski zeleni plan, 2019, (URL: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_hr) (19.01.2023)
51. EVANS, H., 2021. *Santos Moomba to Cross-Border Carbon Capture and Storage Pipeline* (URL: <https://az659834.vo.msecnd.net/eventsairaueprod/production-conferenceco-public/c757843dd00049caaa46099aae2c28b9>) (19.01.2023)
52. Global Monitoring Laboratory - Earth System Research Laboratories (URL: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>) (11.11.2022)
53. HRNČEVIĆ, L. I GRGIĆ, I., 2020. Europski sustav trgovine emisijskim dozvolama. *Nafta i Plin*, 40. (163. - 164.), 70-83. (URL: <https://hrcak.srce.hr/239675>) (22.12.2022)
54. IN SALAH: PROJECT DETAILS (2017), (URL: <https://www.geos.ed.ac.uk/sccs/project-info/22>) (23.12.2022)
55. JAHANBAKHS, A., SHAHROKHI, O. & MAROTO-VALER, M.M., 2021. *Understanding the role of wettability distribution on pore-filling and displacement patterns in a homogeneous structure via quasi 3D pore-scale modelling*, *Sci Rep* 11, 17847 (URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97169-8>) (7.11.2022)
56. JONES, C., PIEBALGS, A., 2021, *Forum o CCUS*, (URL: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_hr) (12.11.2022)

57. EUROPSKA KOMISIJA, Komunikacija Komisije Europskom parlamentu i vijeću, 2021., *Održivi ciklusi ugljika*, (URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0800&from=NL>) (09.10.2022)
58. OLDENBURG C., BRYANT S., NICOT J.-P., 2008. Certification Framework Based on Effective Trapping for Geologic Carbon Sequestration (URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/959420>) (12.11.2022)
59. Palisade, What is Monte Carlo Simulation?, (URL: <https://www.palisade.com/monte-carlo-simulation>) (12.12.2022)
60. Pariški sporazum o klimatskim promjenama, 2015., Okvirna konvencija o klimatskim promjenama Ujedinjenih naroda, (URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>) (10.10.2022)
61. Vijeće EU, 2020, Environmental statement 2020:2019 (URL: <https://data.europa.eu/doi/10.2860/253212>) (02.01.2023)
62. VULIN D., KOLENKOVIĆ MOČILAC I., JUKIĆ L., ARNAUT M., VODOPIĆ F., SAFTIĆ B., KARASALIHović SEDLAR D., CVETKOVIĆ M., 2022. *Development of CCUS clusters in Croatia* (URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4137899) (20.01.2023)

IZJAVA

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

Arya O.O. 

potpis



KLASA: 602-01/23-01/12
URBROJ: 251-70-12-23-2
U Zagrebu, 9.2.2023.

Arya Olga Oberoi Dražić, studentica

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/23-01/12, URBROJ: 251-70-12-23-1 od 26.01.2023. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

PROJEKTI KAPTIRANJA I GEOLOŠKOG SKLADIŠTENJA CO₂ S ASPEKTA PROCJENE RIZIKA MIGRACIJE

Za mentoricu ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada doc. dr. sc. Karolina Novak Mavar nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentorica:

(potpis)

doc. dr. sc. Karolina Novak
Mavar

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)