

Multiscenarijska analiza tehničkog, fizikalnog i ekonomskog potencijala skladištenja CO2

Vargić, Marcela

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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:169:851591>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**



Repository / Repozitorij:

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



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

**MULTISCENARIJSKA ANALIZA TEHNIČKOG, FIZIKALNOG I
EKONOMSKOG POTENCIJALA SKLADIŠTENJA CO₂**

Završni rad

Marcela Vargić

N4495

Zagreb, 2024.

MULTISCENARIJSKA ANALIZA TEHNIČKOG, FIZIKALNOG I EKONOMSKOG POTENCIJALA
SKLADIŠTENJA CO₂

Marcela Vargić

Završni rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku

Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Razmatranje različitih scenarija hvatanja i skladištenja CO₂ postaje posebno privlačno u posljednje vrijeme budući da postaje sve važnije uklopiti ovu metodu smanjenja emisija u okvire klimatskih planova Europske unije. Kako je utiskivanje u geološke formacije nesumnjivo najučinkovitiji način uklanjanja CO₂ s aspekta kapaciteta, u ovom radu je ispitan ekonomski učinak hvatanja emitiranog CO₂ na točkastim izvorima odabranih emitera, transporta cjevovodom do najbližih podzemnih skladišta te utiskivanja u realističnim fizikalnim uvjetima. U dva scenarija je promatrano utiskivanje isključivo u duboke slane akvifere, a u dva scenarija je osim akvifera razmatrano i utiskivanje u napušteno ležište ugljikovodika. Za analizu scenarija je korišten alat prethodno razvijen u sklopu znanstvenog projekta STRATEGY CCUS (Grant Agreement No 837754) provedenog u okviru međunarodnog projekta Obzor 2020.

Ključne riječi: hvatanje CO₂, skladištenje CO₂, transport CO₂, ekonomska analiza CCS

Završni rad sadrži: 20 stranica, 5 tablica, 14 slika, 9 referenci

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Voditelj: Dr. sc. Domagoj Vulin, redoviti profesor RGNF-a

Suvoditelj: Dr. sc. Lucija Jukić, viša asistentica

Ocjenjivači: Dr. sc. Domagoj Vulin, redoviti profesor RGNF-a

Dr. sc. Daria Karasalihová Sedlar, redovita profesorica RGNF-a

Dr. sc. Iva Kolenković Močilac, docentica RGNF-a

Datum obrane: 8. srpnja 2024., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagreb

Sadržaj

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | UVOD..... | 1 |
| 2 | METODE..... | 2 |
| 2.1 | Hvatanje CO ₂ (modul <i>Capture</i>)..... | 5 |
| 2.2 | Transport (modul <i>Transport</i>)..... | 6 |
| 2.3 | Skladišta (modul <i>Storage units</i>)..... | 8 |
| 2.4 | Utilizacija (modul <i>Utilization</i>)..... | 10 |
| 2.5 | Ekonomski proračun..... | 10 |
| 3 | REZULTATI..... | 12 |
| 3.1 | Scenarij A-1..... | 12 |
| 3.2 | Scenarij A-2..... | 14 |
| 3.3 | Scenarij B-1..... | 15 |
| 3.4 | Scenarij B-2..... | 17 |
| 3.5 | EU ETS analiza..... | 18 |
| 4 | ZAKLJUČAK..... | 19 |
| 5 | Popis literature..... | 20 |

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 2-1 Geografski prikaz istočnog klastera | 2 |
| Slika 2-2 Isječak uspješne kontrole usklađenosti u modulu ScenarioManager | 4 |
| Slika 2-3 Isječak iz modula ScenarioManager koji prikazuje razliku između uhvaćenog i skladištenog CO ₂ | 6 |
| Slika 2-4 Profil tlaka u cjevovodu..... | 7 |
| Slika 2-5 Prikaz praćenja rasta tlaka i ukupno utisnutog CO ₂ u modulu StorageUnit..... | 9 |
| Slika 2-6 Varijable u ekonomskim proračunima prilagođene Hrvatskoj regiji..... | 11 |
| Slika 3-1 Dijagram cjevovoda u scenariju A-1 | 13 |
| Slika 3-2 Rezultati ekonomskog proračuna za scenarij A-1 | 14 |
| Slika 3-3 Dijagram cjevovoda u scenariju A-2 | 14 |
| Slika 3-4 Rezultati ekonomskog proračuna za scenarij A-2 | 15 |
| Slika 3-5 Dijagram cjevovoda u scenariju B-1 | 16 |
| Slika 3-6 Rezultati ekonomskog proračuna za scenarij B-1 | 16 |
| Slika 3-7 Dijagram cjevovoda u scenariju B-2 | 17 |
| Slika 3-8 Rezultati ekonomskog proračuna za scenarij B-2 | 18 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 2-1 Sažeti opis modula unutar programa | 3 |
| Tablica 2-2 Podaci o emiterima korišteni u scenarijima..... | 5 |
| Tablica 2-3 Sažeti prikaz podataka u skladištima korištenih u proračunima kapaciteta i tlaka | 9 |
| Tablica 3-1 Sažeti pregled scenarija i kalendar utiskivanja..... | 12 |
| Tablica 3-2 Pregled troškova i ušteđenih emisijskih jedinica po scenarijima | 18 |

1 UVOD

Hvatanje, korištenje i skladištenje ugljikovog dioksida (engl. *Carbon capture, utilisation and storage*, CCUS) je proces hvatanja ugljikovog dioksida (CO₂) emitiranog u industrijskim procesima i tijekom izgaranja fosilnih goriva u cilju njegove ponovne upotrebe i trajnog skladištenja. Moguće je i direktno trajno zbrinjavanje bez ponovne upotrebe uhvaćenog CO₂ (engl. *Carbon capture and storage*, CCS).

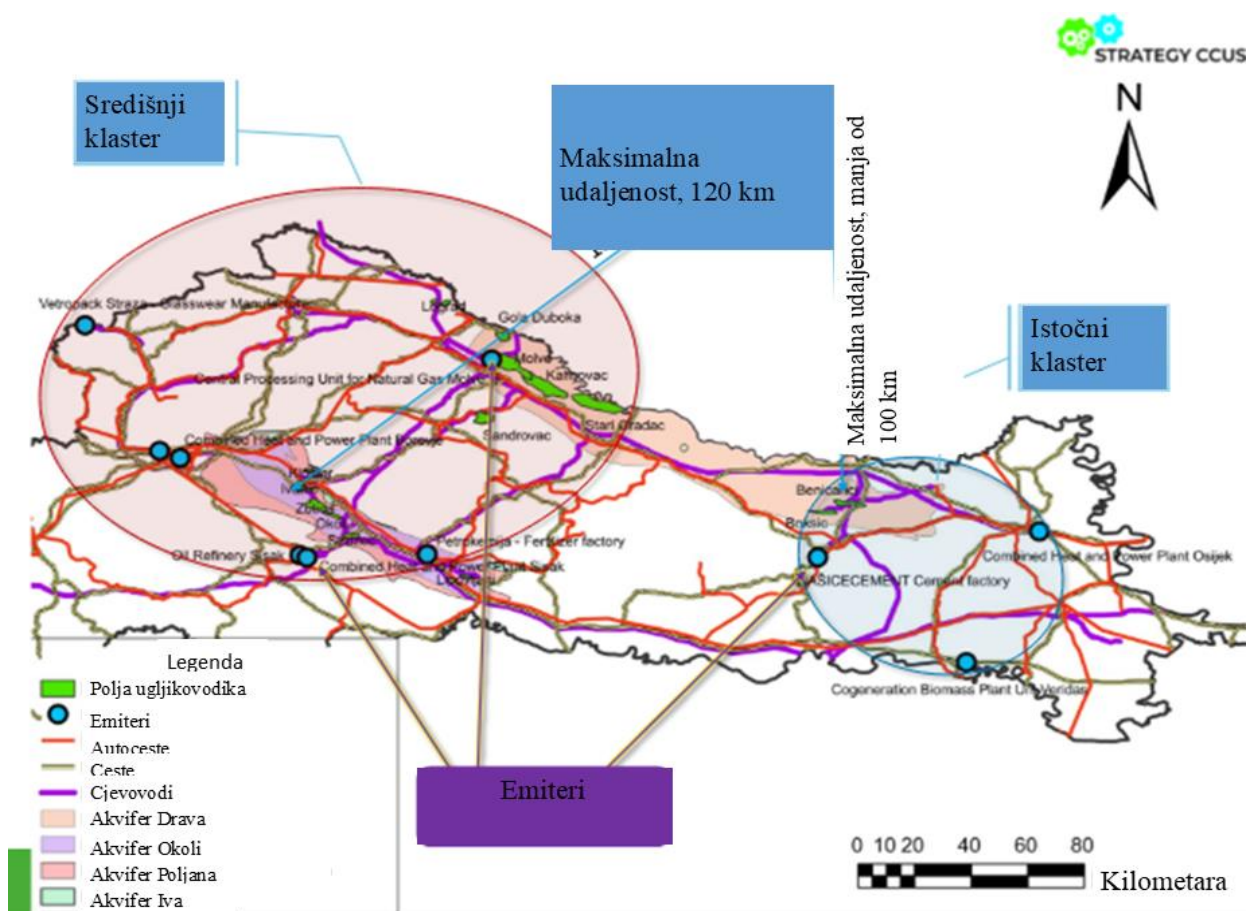
Europska unija je odredila klimatske strategije i ciljeve s time da je prvi plan da se do 2030. godine smanje staklenički plinovi za najmanje 55 %. Nakon toga plan za 2040. godinu je da se dodatno smanje emisije stakleničkih plinova za 90 % u usporedbi s 1990. godinom. Tako bi Europska unija bila na dobrom putu da Europa do 2050. godine postane prvi klimatski neutralan kontinent, kako je predviđeno Europskim zelenim planom (engl. *Green Deal*) (European Union, 2024).

Europska unija stoga financira znanstveno-istraživačke projekte kojima je fokus smanjenje emisija u raznim sektorima, kao što je projekt STRATEGY CCUS (Grant Agreement No 837754) pokrenut 2019. godine u sklopu programa Obzor 2020 (engl. *Horizon 2020*). Ideja projekta je bila razviti strateški plan za regije i teritorije u Europi za smanjenje emisija ugljikova dioksida u području industrije i proizvodnje energije pomoću razvijenog alata za ispitivanje isplativosti pojedinih scenarija smanjenja emisija. Projekt je trajao tri godine i primarno je osmišljen s ciljem smanjenja emisija Južnoj i Istočnoj Europi. Osam obećavajućih regija je odabrano u Španjolskoj, Francuskoj, Poljskoj, Grčkoj, Rumunjskoj, Portugalu i Hrvatskoj, jer su navedene zemlje zajedno odgovorne za 45% Europskih emisija CO₂ (STRATEGY CCUS, 2024).

U sklopu projekta, provedene su analize scenarija za regiju sjeverne Hrvatske gdje su prema položaju industrijskih emitera izdvojeni središnji klaster (engl. *Central cluster*) i istočni klaster (engl. *Eastern cluster*).

2 METODE

U ovom završnom radu je izrađeno nekoliko scenarija hvatanja, transporta i skladištenja CO₂ pomoću alata razvijenog u sklopu projekta Strategy CCUS kako bi se ispitala tehničko-ekonomska prihvatljivost raspoloživih opcija, s obzirom na položaj emitera i potencijalnih skladišta u podzemnim geološkim strukturama u Republici Hrvatskoj. U prvom koraku su kreirani scenariji s različitom dinamikom uključivanja pojedinih elemenata (emitera i skladišta), a zatim je za svaki od njih ispitan utjecaj različitih ekonomskih uvjeta s obzirom na neizvjesnost njihovih budućih kretanja (cijena CO₂, diskontna stopa). Rad je fokusiran na istočni klaster te su svi odabrani akteri na tom području (Slika 2-1).



Slika 2-1 Geografski prikaz istočnog klastera (*Strategy CCUS, 2022*)

Korišteni alat se sastoji od niza međusobno povezanih Excel datoteka (Tablica 2-1) čijim popunjavanjem se u konačnici izračunavaju ekonomski pokazatelji pojedinih scenarija.

Tablica 2-1 Sažeti opis modula unutar programa

| Ime datoteke | Excel | Zadani ulazni podaci | Korisnički unos |
|-------------------------|--------------|---|---|
| Scenario Manager | | Diskontna stopa, stopa inflacije, cijena električne energije, cijena CO ₂ , popis svih mogućih emitera s odgovarajućim emisijama, popis skladišta s odgovarajućim kapacitetima (uključujući i geološke karakteristike bitne za procjenu dinamike utiskivanja), popis potencijalnih planiranih čvorišta | Odabir željenih emitera i skladišta te transportne opcije (cjevovod/brod/kamion) između povezanih emitera i skladišta, kao i eventualnih čvorišta i utilizacijskih scenarija uz zadavanje početne i završne godine rada svakog aktera |
| Capture | | Baza svih mogućih emitera i pripadajući detalji nužni za proračun dinamike i troškova hvatanja CO ₂ | Odabir željenih emitera za konkretni scenarij, uključujući i godinu početka i završetka rada; rezultira sumarnom tablicom s emisijama, odnosno uhvaćenim godišnjim količinama koje se koriste za daljnji proračun |
| Storage Units | | Posebna datoteka za svako skladište, računa se kretanje ležišnog tlaka tijekom utiskivanja ovisno o karakteristikama pojedinih lokaliteta | Nakon što su u Scenario Manageru korektno definirani svi akteri, otvaranjem pojedinih datoteka skladišnih jedinica se automatski pokreće proračun ležišnog tlaka |
| Transport | | Temeljem definiranih transportnih opcija (uključujući i eventualna čvorišta) se računaju udaljenosti i količine koje se planiraju transportirati u određenom vremenu | Nakon što su korektno odabrani svi akteri, otvaranjem ove datoteke se automatski računaju parametri transporta (npr. pad tlaka duž trase u slučaju cjevovoda) važni za daljnji proračun troškova, odnosno za ekonomsku analizu |
| Utilization | | Nudi mogućnost 6 vrsta utilizacije za koje se automatski računaju troškovi i prihodi proizašli iz korištenja CO ₂ u komercijalne svrhe | Količine CO ₂ koje bi se koristile u pojedinoj opciji utilizacije, a automatski se povlače u Scenario Manager (kada se u njemu na odgovarajućem mjestu definira tip i lokacija utilizacije) |
| KPIs | | Računa se cijena pokrića troškova i prva godina pozitivnog poslovanja temeljem svih parametara specifičnih za konkretni scenarij uz zadanu diskontnu stopu, stopu inflacije, pretpostavljeni scenarij kretanja cijena električne energije i CO ₂ i slično. | Nakon što je scenarij potpuno definiran kroz sve prethodne datoteke, otvaranjem ove datoteke se automatski prikazuju svi ekonomski pokazatelji od interesa, ali i usporedba emisija CO ₂ bez primjene CC(U)S |

Koristeći alat razvijen u MS Excelu u sklopu projekta STRATEGY CCUS izrađena su četiri scenarija utiskivanja ugljikovog dioksida s ciljem trajnog skladištenja. U scenarijima A-1 i B-1 se razmatra mogućnost utiskivanja ugljikovog dioksida uhvaćenog iz tri emitera CO₂ (radni list Factory: Našicecement d.d., kogeneracijsko postrojenje Viridas

Biomass i hibridna termoelektrana Slavonski Brod), u napušteno ležište ugljikovodika (plina) Bokšić ili u duboke slane akvifere Osijek i Drava. U scenariju B-1 se razmatra prvo mogućnost iskorištavanja napuštenog ležišta Bokšić zbog geografske blizine, a nakon popunjavanja kapaciteta se skladištenje preusmjerava u akvifer Osijek te na kraju u akvifer Drava, dok se u scenariju A-1 odmah kreće sa skladištenjem u akvifere Osijek i Drava. Razlog takvog redoslijeda punjenja je veličina skladišta, a kreće se od najmanjeg do najvećeg. U scenarijima A-2 i B-2 je raspored utiskivanja u skladišta jednak kao u scenarijima A-1 i B-1, ali u hvatanju CO₂ se iz emitera izuzima hibridna termoelektrana Slavonski Brod.

Općenito govoreći, cilj svakog scenarija je da se sav uhvaćeni CO₂ trajno utisne ili iskoristi u određenom procesu u kojem je potreban, kao pročišćeni CO₂ za korištenje u industrijskim procesima, CO₂ koji se koristi za proizvodnju metanola i "zelenih" goriva te za EOR procese. Sav uhvaćeni CO₂ mora biti skladišten, kao i CO₂ koji je nastao kao produkt utrošene energije za hvatanje tog CO₂ te je količina CO₂ koja se skladišti uvećana za CO₂ nastao uslijed utrošene energije za hvatanje. U scenarijima razvijenim u sklopu ovog rada se ne predviđa korištenje CO₂. U glavnom dokumentu (*ScenarioManager*) pri kreiranju scenarija radi se i provjera da bi se vidjelo je li sve uskladišteno (Slika 2-2). Da kontrola usklađenosti uhvaćenog, dodatno nastalog i uskladištenog CO₂ daje vrijednost koja nije nula, značilo bi da ishod scenarija nije moguć, točnije da je potrebna izmjena aktera.

| | | | | | | | |
|---------------------------------|---------|---------------------|-------|----------------------------------|------|-------------------------------------|------|
| Ukupan kapacitet skladišta (Mt) | 2048,83 | Ukupno uskladišteno | 36,61 | Ukupno iskorišteno (utilizirano) | 0,00 | Kontrola usklađenosti (mora biti 0) | 0,00 |
|---------------------------------|---------|---------------------|-------|----------------------------------|------|-------------------------------------|------|

Slika 2-2 Isječak uspješne kontrole usklađenosti u modulu *ScenarioManager*

Prilikom samog utiskivanja CO₂ gleda se kapacitet skladišta, ali i tlak u skladištu. U scenarijima gdje se utiskuje u iskorišteno ležište ugljikovodika Bokšić se to i vidi; skladište ima dovoljno kapaciteta, ali zbog presporog utiskivanja zbog održavanja ležišnog tlaka na procijenjenoj maksimalnoj vrijednosti (maksimalni dopušteni tlak) stvara se zaostatak CO₂ koji se registrira kao višak. Može se dogoditi da je u varijanti scenarija vrijednost kontrole usklađenosti nula, ali provjerom tlakova u dokumentu *StorageUnits*, vidi se da je tlak u skladištu prešao maksimalni dopušteni tlak. Taj scenarij ima nepoželjan ishod te se opet moraju mijenjati akteri ili njihov raspored uključivanja u scenarij.

2.1 Hvatanje CO₂ (modul *Capture*)

Emiteri se u Excel alatu vode kao tvornice (*eng. factories*) ugljikovog dioksida. Za analizu ovih scenarija, odabrane su dvije vrste emitera u blizini potencijalnih mjesta utiskivanja CO₂ sa značajnom količinom emisija: tvornica cementa i termoelektrana. Našicecement d.d. kao tvornica cementa je jedan od najvećih proizvođača CO₂ u Hrvatskoj među tvornicama, dakle ne ubrajajući rafinerije i elektrane. Uz nju su odabrane kogeneracijsko postrojenje Viridas Biomass i hibridna termoelektrana Slavonski Brod. Viridas Biomass, u vlasništvu UNI VIRIDAS d.o.o. za energetiku je najveće kogeneracijsko postrojenje na biomasu u Hrvatskoj i proizvodi električnu i toplinsku energiju iz drvnih ostataka i otpada iz šumarsva i pilana (PEARL Capital Infrastructure, 2024). Hibridna termoelektrana Slavonski Brod je još uvijek projekt u nastajanju, ali u analizi je uzeta u obzir s početkom proizvodnje 2030. godine. Gledana je kao plinska termoelektrana koja će s početkom rada godišnje uhvatiti 500 000 tona CO₂.

Prilikom biranja emitera bitne su količine emisija, tlak i temperatura emisija (Tablica 2-2). U cilju je da tlak izlaznog ugljikovog dioksida bude kompatibilan s ulaznim tlakom u cjevovode da bi se izbjegla potreba za kompresijskim stanicama ili redukcijskim postajama s namjerom smanjenja troškova.

Tablica 2-2 Podaci o emiterima korišteni u scenarijima

| Emiter | Našicecement d.d., E#01 | Kogeneracijsko postrojenje Viridas Biomass, E#02 | Hibridna termoelektrana Slavonski Brod, E#03 |
|--|-------------------------|--|--|
| Trend emisija | Rastući | Rastući | Stabilan |
| Pretpostavljena efikasnost hvatanja u scenarijima | 0,90 | 0,70 | 0,80 |
| Evidentirana količina CO ₂ (t/god) | 645 090,22 | 102 168,53 | 500 000 |
| Stvarna količina proizvedenog CO ₂ (Mt/god) | 1,07 | 0,14 | 0,56 |
| Tlak izlaznog CO ₂ (bar) | 100 | 100 | Nepoznato |
| Temperatura izlaznog CO ₂ (°C) | 30 | 51 | Nepoznato |
| Emisije bez hvatanja CO ₂ (Mt/god) | 0,65 | 0,1 | 0,5 |

Razlika između evidentirane i stvarne količine proizvedenog CO₂ je količina proizvedena u samom procesu CCS kao što je prikazano u Excel datoteci *ScenarioManager* (Slika 2-3) gdje je prikaz svih korištenih emitera u scenarijima.

| Identifikacija emitera u scenariju | E#01 | E#02 | E#03 |
|---|-------------------|---|-----------------------|
| Level 1 - identifikacija | Factory#1 | Factory#2 | Factory#3 |
| Identifikacija emitera | HR.ES.002 | HR.ES.010 | HR.ES.013 |
| Naziv objekta | Našicecement d.d. | Kogeneracijsko postrojenje Viridas Biomass | Hybrid Power Plant SB |
| Sektor industrije | Cement | Power | Power |
| Geografska širina | 45,45 | 45,11 | 45,15 |
| Geografska dužina | 18,04 | 18,51 | 18,01 |
| Evidentirane emisije (Mt/y) | 0,65 | 0,10 | 0,50 |
| Identifikacija stupca u WP2 data bazi | 100 | 108 | 111 |
| Početna godina | 2025 | 2030 | 2030 |
| Završna godina | 2050 | 2050 | 2050 |
| Efikasnost | 0,90 | 0,70 | 0,80 |
| Godišnja stopa emisije (Mt/y) | 0,581 | 0,072 | 0,400 |
| Procjena ukupno uhvaćenog CO2 (Mt) | 15,10 | 1,50 | 8,40 |
| Procjena ukupno uhvaćenog CO2 u klasteru (Mt) | 25,00 | Ukupno uhvaćen CO2 nakon analize u prvom koraku, dodatna energija utrošena pri hvatanju(Mt) | 36,61 |

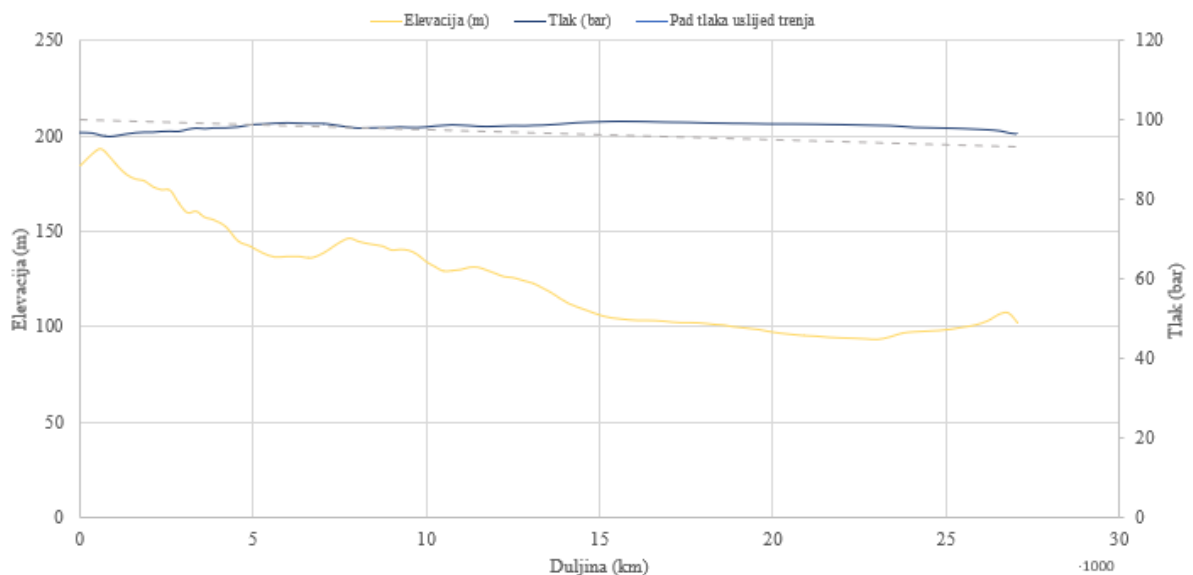
Slika 2-3 Isječak iz modula ScenarioManager koji prikazuje razliku između uhvaćenog i skladištenog CO₂

2.2 Transport (modul *Transport*)

Načini transporta CO₂ uključuju transport vodenim tokovima, željezničkim cisternama i cjevovodima, a zbog lokacija emitera i skladišta, u razmatranim scenarijima se predviđa isključivo transport cjevovodima. Prednost cjevovoda je to što se polažu najkraćim putem između početne i krajnje točke, transport se odvija u kontinuitetu i minimalni su gubici te su uz to dugotrajno ekonomski povoljnija opcija. Pouzdani su, imaju mali utjecaj na okoliš i unatoč velikoj investiciji imaju male operativne troškove (Simon, 2023). Uz to, u cilju projekta je koristiti već postojeće infrastrukture ili računati s budućim dugotrajnim rješenjima.

U korištenim alatima dani su parametri za izračune transporta vlakom, brodom i cjevovodima, prilagođeni regijama analiziranim u projektu (STRATEGY CCUS, 2024). Parametri se razlikuju ovisno o regiji i standardima prijevoza. Podaci za izračune ovise o odabranom emiteru i skladištu te je svaki scenarij transporta proračunat zasebno, uzimajući u obzir troškove infrastrukture i operativne troškove. Baza sadrži i geoprostorne (GIS)

podatke, tj. shape objekte skladišta, te koordinate čvorišta (hubova), emitera i odabranog mjesta za utiskivanje (*storage*). Izrađene su jednadžbe koje su međusobno povezane i pristupaju tim bazama. Odabirom specifičnih emitera i skladišta automatski se provode kalkulacije koje dimenzioniraju cjevovod, uzimaju u obzir pumpne stanice i računaju troškove cjevovoda. Kalkulacije uključuju duljinu cjevovoda, topografiju terena, te broj i raspored pumpnih stanica, optimizirajući veličinu i kapacitet cjevovoda. Također, računaju se ukupni troškovi izgradnje i održavanja, uključujući materijale i operativne troškove. Shodno tome je u izračunima dizajna cjevovoda, tako i troška infrastrukture uključena jednadžba koja uzima u obzir elevacije terena, a time i promjene u tlaku. Svi elementi zajedno daju profil tlaka u cjevovodu po stvarnoj nadmorskoj visini (Slika 2-4). Tako se može vidjeti da se vrijednosti tlaka kreću oko 100 bara od početne do krajnje točke odabranog cjevovoda.



Slika 2-4 Profil tlaka u cjevovodu

Kada se odaberu skladišta i godine početka i kraja utiskivanja, dobije se geografska mreža cjevovoda za pojedini scenarij. Na slici su crvenim kvadratima označeni emiteri, dakle izvori CO₂, plavim kružnicama su označena skladišta, a narančastim trokutima su označena čvorišta gdje se spajaju cjevovodi. Čvorišta su odabrana kao prva postaja prije transporta u skladište radi promjene odabranog skladišta, utiskivanja u oba skladišta u isto vrijeme ili u slučaju naknadnog uključivanja novih emitera u budućnosti.

2.3 Skladišta (modul *Storage units*)

Odabir skladišta ovisi o lokaciji i svojstvima samog skladišta. Akviferi nude veći skladišni kapacitet, ali zbog svoje nepouzdanosti negativno utječu na ekonomski aspekt projekta, odnosno poslovne odluke i investicije. Iscrpljena ležišta su temeljito istražena jer je većina bušotina napravljena s ciljem crpljenja ugljikovodika te se i to uzima u obzir prilikom odabira same vrste skladišta. Bitno je da je izvor CO₂ blizu kako bi transport bio kraći, a time i jeftiniji, ali najvažniji je kapacitet samog ležišta ili akvifera (skladišta).

Kapacitet iscrpljenog ležišta Bokšić je izračunat po volumenu pridobivenog ugljikovodika pod pretpostavkom da će CO₂ zamijeniti taj volumen. Polje ugljikovodika Bokšić sadrži nekoliko ležišta na različitim dubinama pa bi bilo teže ustanoviti njihove pojedine granice i debljine, odnosno stvarni volumen, ali podaci o pridobivanju i izračuni kompresibilnosti CO₂ omogućuju izračun kapaciteta skladišta za drugu vrstu plina od iscrpljenog.

Metodologija računanja kapaciteta skladišta je kombinacija volumetrijske metode procjene kapaciteta i metode procjene kompresibilnosti zbog koje nastaje dodatni slobodni prostor tijekom porasta tlaka pri utiskivanju, a procjenjuje se pomoću definicije kompresibilnosti pornog prostora.

Korištenje akvifera kao skladišta CO₂ dolazi sa svojim ograničenjima. S obzirom na to da se voda iz akvifera ne pridobiva, kapacitet skladišta ovisi o slobodnom prostoru i kompresibilnosti vode i stijene koja je vrlo mala. Naravno, CO₂ se može više komprimirati nego voda i stijena, ali se i otapa u vodi te je pri visokim temperaturama otapanje veće. Procjena skladišnog kapaciteta akvifera analogna je procjeni rezervi ugljikovodika u ležištima (Pooladi-Darvish et al., 2011).

Za svako skladište postoji zasebna Excel datoteka. Te tablice sadrže informacije o površini, debljini, dubini, poroznosti, propusnosti i temperaturi skladišta kao i kompresibilnosti, viskoznosti, gustoći CO₂, te podatke o vodi i ostalim plinovima (metan i oktan). Uključene su i jedinice za pretvorbu, podaci o svim skladištima te sažeta tablica sa svim korištenim varijablama (Tablica 2-3). Sami izračuni uzimaju u obzir sve varijable u cilju što točnijeg izračuna za određeni scenarij uz korištenje nekih prijašnje izračunatih podataka iz baza kao što je EU Geocapacity (CGS Europe, 2019).

Tablica 2-3 Sažeti prikaz podataka u skladištima korištenih u proračunima kapaciteta i tlaka

| Skladište | Bokšić, SU#03 | Osijek, SU#02 | Drava, SU#01 |
|------------------------------|---------------|---------------|--------------|
| Površina (km ²) | 5,2 | 235,7208 | 2428,976 |
| Debljina (m) | 100 | 500 | 1000 |
| Dubina (m) | 1519 | 1000 | 900 |
| Temperatura (°C) | 95 | 70 | 75 |
| Temperatura utiskivanja (°C) | 20 | 20 | 20 |
| Tlak fluida (bar) | 160 | 125 | 140 |
| Poroznost (%) | 21 | 20 | 20 |
| Propusnost (m ²) | 6,00E-14 | 6,00E-14 | 6,00E-14 |
| Kompresibilnost (1/bar) | 5,02E-05 | 8,41E-05 | 8,41E-05 |
| Kompresibilnost vode (1/bar) | 5,00E-05 | 5,00E-05 | 5,00E-05 |
| Zasićenost vodom (%) | 60 | 100 | 100 |
| Kapacitet (Mt) | 13,65 | 109,89 | 1938,94 |

U Excel datoteci *StorageUnits* prate se rast tlaka u skladištu, tlak utiskivanja i kompresibilnost samog ležišta kroz godine utiskivanja (Slika 2-5). Svi ti proračuni prate efikasnost utiskivanja za svako skladište. Na slici je prikazan primjer kako se mijenjaju faktori kroz prve četiri godine utiskivanja za jedno skladište i pritom je vidljiv rast tlaka u skladištu te kako ni u samom početku tlak nije daleko od maksimalne dozvoljene vrijednosti, točnije maksimalnog tlaka skladišta. Prati se i kako kompresibilnost samog skladišta raste kroz godine.

| Godišnji izvještaj | | | | | |
|--|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Vrijeme | Jedinica ↓ Godina → | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 |
| Propisana brzina utiskivanja CO ₂ u skladište | Mt/god | 0,965 | 0,965 | 0,965 | 0,965 |
| Status skladišta | | Injecting | Injecting | Injecting | Injecting |
| Realizirana brzina utiskivanja u skladište | Mt/god | 0,965 | 0,965 | 0,965 | 0,965 |
| Ukupno utisnut CO ₂ u skladište | Mt | 0,965 | 1,930 | 2,896 | 3,861 |
| Tlak skladišta na kraju godine utiskivanja | bar | 124,74 | 126,44 | 127,87 | 129,07 |
| Maksimalni tlak skladišta | bar | 135,0 | 135,0 | 135,0 | 135,0 |
| Tlak akvifera | bar | 122,8 | 122,8 | 122,8 | 122,8 |
| Tlak utiskivanja u bušotini | bar | 137,48 | 137,48 | 137,48 | 137,48 |
| Ukupna kompresibilnost skladišta | 1/bar | 0,000134144 | 0,000143223 | 0,000151674 | 0,000158895 |

Slika 2-5 Prikaz praćenja rasta tlaka i ukupno utisnutog CO₂ u modulu StorageUnit

2.4 Utilizacija (modul *Utilization*)

Utilizacija (engl. *Carbon Utilization*) je koncept koji je u jednom razdoblju bio prepoznat u Europskoj uniji kao najefikasniji način ekonomske podrške skladištenju CO₂. S vremenom, formirani su okviri u kojima je općeprihvaćeno što spada u utilizaciju, iako još uvijek postoji prostor za definiranje zasebnih nacionalnih legislativnih okvira koji će na različite načine podržavati utilizaciju. U Republici Hrvatskoj, s obzirom na dugu tradiciju primjene CO₂-EOR metoda, u sklopu kojih se zadržava u podzemlju nekoliko redova veličine više CO₂ (uspoređujući s drugim metodama utilizacije), CO₂-EOR je jedina metoda utilizacije koja je razmatrana (STRATEGY CCUS, 2024). S obzirom na dinamične promjene vezano uz zelenu tranziciju, energetiku i CCS unutar EU, nove smjernice, uredbe i direktive nastale nakon objave Europskog zelenog plana (European Union, 2021), u ovom radu nije razmatran scenarij CO₂-EOR i potpuno je iz analize isključeno naftno polje Beničanci (uz pretpostavku da ima perspektivu proizvodnje nafte još dugi niz godina).

2.5 Ekonomski proračun

Svaki ranije spomenuti dio metode kojom se analiziraju scenariji uključuje i ekonomsku analizu. Za svaki scenarij i svaki modul izračunati su kapitalni izdaci (CAPEX) i operativni troškovi (OPEX), a u obzir su uzete diskontna stopa i prosječna stopa inflacije (Slika 2-6). Pri odabiru emitera i računanju količine i vrste emisija računa se i cijena hvatanja CO₂. Kod načina i odabira transporta računa se cijena izgradnje cjevovoda i cijena održavanja te se kod samih skladišta gleda cijena bušenja po bušotini i održavanja bušotine, efikasnost kompresora i postotak gubitka CO₂ pri utiskivanju.

Europska Unija po Europskom zelenom planu ima u cilju svake godine smanjiti količinu emisija pa je tako uveden EU ETS (*Emission trading system*), sustav „cap and trade“. Ograničenje (eng. *cap*) je granica godišnjih emisija koju mogu emitirati industrije obuhvaćene sustavom. Ograničenje je definirano emisijskim jedinicama, pri čemu svaka jedinica omogućava emisiju jedne tone ekvivalenta CO₂. Tvrtke svake godine moraju predati dovoljan broj jedinica kako bi pokrile svoje emisije, inače su suočene s visokim kaznama. Unutar ovog ograničenja, tvrtke uglavnom kupuju emisijske jedinice na tržištu ugljika EU, a također dobivaju i određeni broj jedinica besplatno. Mogu trgovati jedinicama prema potrebi, a ako smanje emisije, višak jedinica mogu zadržati za buduću upotrebu ili ih prodati. Sniženje granica emisija osigurava dugoročnu nestašicu jedinica, što im daje tržišnu vrijednost (Energy, Climate change, Environment, 2024).

U zadnjem koraku analize tako se gleda koliko je emisijskih jedinica uštedeno utiskivanjem, što je izraženo preko ETS kredita (eng. *ETS credit savings*). Porez na CO₂ isti je za sve regije (75 €/t) i ne raste s godinama nego ostaje konstantan. Određene vrijednosti korištene u računima variraju s godinama i nisu iste u svim regijama, kao poslovni porezi, emisije CO₂ za proizvodnju električne energije i cijena električne energije (Slika 2-6).

| | | |
|---|--------|------------------------|
| Referentna godina | 2024 | |
| Diskontna stopa | 5,0 % | |
| Stopa inflacije | 2,5 % | |
| CAPEX trošak hvatanja, faktor redukcije zbog učenja | -1,0 % | |
| Poslovni porezi (porez na dobit) | 28,0 % | |
| | | |
| Regionalne emisije CO ₂ za proizvodnju električne energije | 277 | gCO ₂ e/kWh |
| Regionalna cijena električne energije | 100 | €/MWh |
| Porez na CO ₂ | 75,00 | €/t |

Slika 2-6 Varijable u ekonomskim proračunima prilagođene Hrvatskoj regiji

3 REZULTATI

U Tablica 3-1 prikazani su akteri po pojedinim scenarijima i kalendar njihovog uključivanja u određene scenarije. Scenariji A-1 i B-1 imaju iste količine ukupno uhvaćenog CO₂ koji se skladišti, kao i A-2 i B-2, zbog istog odabira emitera. U scenarijima se razlikuje raspored utiskivanja u skladišne jedinice i povezanost cjevovoda.

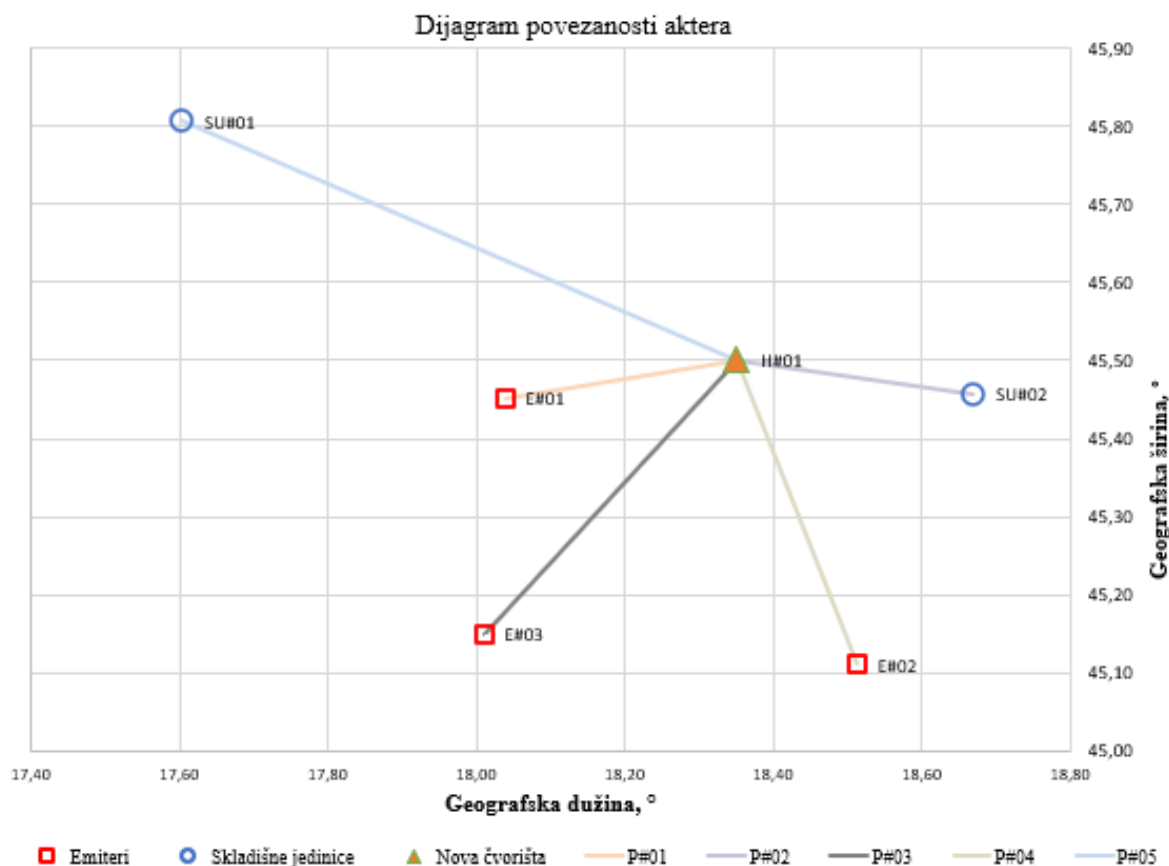
Tablica 3-1 Sažeti pregled scenarija i kalendar utiskivanja

| Scenarij | Skladište | Početak utiskivanja (god) | Kraj utiskivanja (god) | Emiteri i početak priključivanja | Procjena ukupno uhvaćenog CO ₂ (Mt) | Ukupno uhvaćen CO ₂ uz dodatne emisije (Mt) |
|----------|-----------|---------------------------|------------------------|---|--|--|
| A-1 | Osijek | 2025. | 2039. | Našicecement dd., 2025. | 15,10 | 36,61 |
| | Drava | 2040. | 2050. | Viridas Biomass, 2030. | 1,5 | |
| | | | | Hibridna termoelektrana SB, 2030. | 8,4 | |
| A-2 | Osijek | 2025. | 2039. | Našicecement d.d., 2025. | 15,10 | 27,16 |
| | Drava | 2040. | 2050. | Viridas Biomass, 2030. | 1,5 | |
| B-1 | Bokšić | 2030. | 2050. | Viridas Biomass, 2030. | 1,5 | 36,61 |
| | Osijek | 2025. | 2039. | Našicecement d.d., 2025. | 15,10 | |
| | Drava | 2040. | 2050. | Hibridna termoelektrana Slavonski Brod, 2030. | 8,4 | |
| B-2 | Bokšić | 2030. | 2050. | Viridas Biomass, 2030. | 1,5 | 27,16 |
| | Osijek | 2025. | 2039. | Našicecement d.d., 2025. | 15,10 | |
| | Drava | 2040. | 2050. | | | |

3.1 Scenarij A-1


U scenariju A-1 utiskivanje u skladište akvifer Osijek počinje 2025. s utiskivanjem CO₂ iz emitera Našicecement d.d., a 2030. se priključuju Viridas Biomass i Hibridna termoelektrana Slavonski Brod i utiskuje se sve do 2050. godine. S obzirom na to da je procijenjeno da su ukupne emisije koje se trebaju skladištiti 36,61 Mt, scenarij kreće s

utiskivanjem u akvifer Osijek koji ima kapacitet 109,89 Mt s ciljem potpunog utiskivanja u samo jedno skladište. Međutim, makar kapacitet nije iskorišten u cijelosti, 2040. dolazi do previsokog tlaka u skladištu tako da se 2039. prestaje utiskivati u akvifer Osijek i kreće utiskivanje emisija iz svih emitera u akvifer Drava. S obzirom da su cjevovodi od emitera spojeni u čvorište potreban je još samo jedan cjevovod do drugog skladišta (Slika 3-1).



Slika 3-1 Dijagram cjevovoda u scenariju A-1

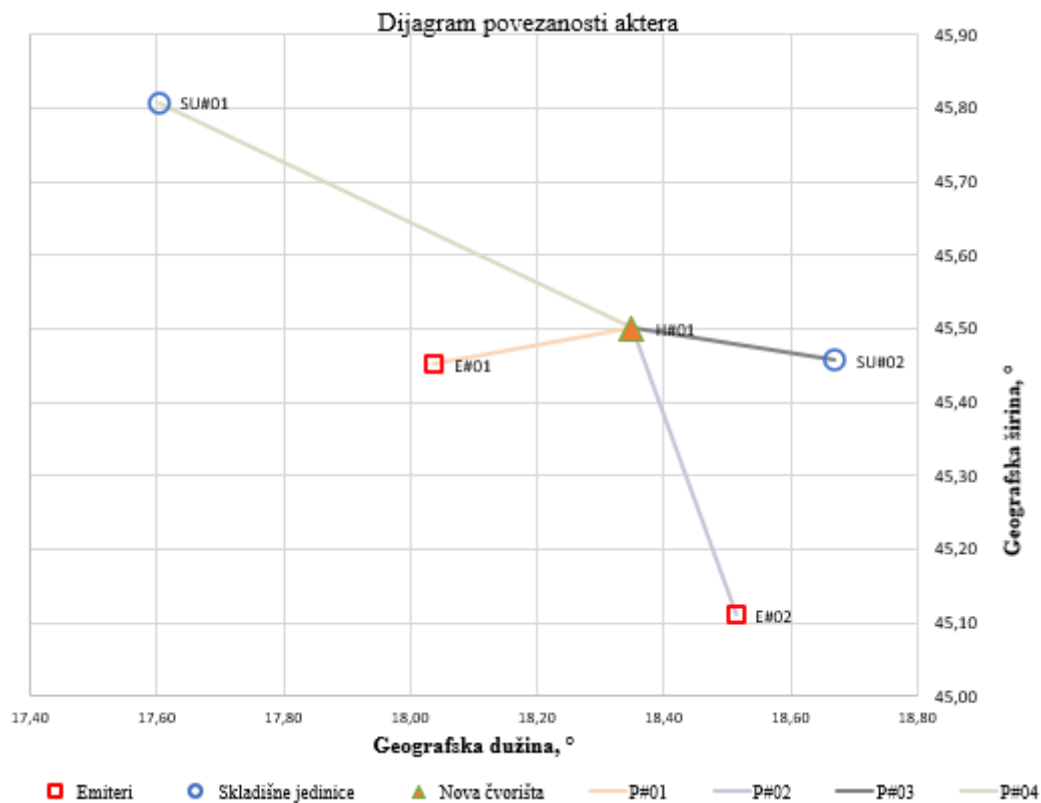
Ukupna vrijednost CCS lanca ovog scenarija je 21 €/t. Kapitalni i operativni troškovi iznose ukupno 20 €/t izbjegnuto^g CO₂ od čega je na transport utrošeno 1,44 €/t, na skladištenje 8 €/t, a na hvatanje 11,2 €/t te je 1,3 €/t utrošeno dodatno na transport. Točka pokrića za cijenu CO₂ iznosi 26 €/tCO₂.

| Analiza CCS sistema | | Analiza volumena CO2 (Mt) | | Analiza ETS emisijskih jedinica | | | |
|---|--------|---|-----------|--|--------------|---|-------------|
| Ukupna vrijednost CCS lanca | | | | EU ETS parametri | | | |
| Vrijednost lanca CCS-a (€/tCO ₂) izbjegnuto | -21 | Ukupno uhvaćeni CO ₂ | 36,6 | Cijena jedinica - 2025. (€/tonCO ₂) | 70 | | |
| Ukupni CAPEX po modulu | | Utilizirani CO ₂ | 0,0 | Cijena jedinica - 2045. (€/tonCO ₂) | 212 | | |
| Trošak hvatanja (€/tonCO ₂ izbjegnuto) | -9 | CO ₂ za mineralizaciju (trajno izbjegnuto) | 0,0 | Ukupan regionalni trošak bez CCUS-a | | | |
| Trošak transporta (€/tonCO ₂ izbjegnuto) | -6 | Uskladišten | 29,4 | Cijena ETS bez CCUS (M€) | 2.760,2 | | |
| Trošak skladištenja (€/tonCO ₂ izbjegnuto) | -2 | Ukupne emisije s CCS-om | 6,0 | Ukupan regionalni trošak sa CCUS-om | | | |
| OPEX po modulu | | Ukupne izbjegnute emisije | 36,5 | Trošak ETS sa CCUS, preostale emisije (M€) | -26,0 | | |
| Trošak hvatanja (€/tonCO ₂ izbjegnuto) | -11 | BIO CO ₂ uhvaćen, negativne emisije | 0,0 | Trošak CCUS-a (M€) | 751,4 | | |
| Trošak transporta (€/tonCO ₂ izbjegnuto) | -5,2 | Ukupna količina CO₂ u transportnoj mreži | 37 | UKUPAN trošak sa CCUS-om (M€) | 725,4 | | |
| Trošak skladištenja (€/tonCO ₂ izbjegnuto) | -0,44 | CCUS Nacionalni ciljevi | 200 | Razlika koštanja, sa CCUS minus bez CCUS (M€) | | | |
| Utilizacija (prihod od prodaje CO₂) (M€) | | Udio u nacionalnom cilju | 18,2 % | Razlika koštanja, sa CCUS minus bez CCUS (M€) | -2.035,0 | | |
| Uštedene ETS emisijske jedinice u regiji (M€) | 2786,2 |  | | Prosječna godišnja energija koja je potrebna, TWh | 1,60 | | |
| Trošak transporta (€/tonCO₂ transportirano) | | | | | | Najveća potreba za energijom, TWh/god | 1,87 |
| | | | | | | Točka pokrića za cijenu CO ₂ (€/tonCO ₂) | 26 |
| | | | | | | Prva godina profita | 2025 |

Slika 3-2 Rezultati ekonomskog proračuna za scenarij A-1


3.2 Scenarij A-2

Scenarij A-2 prati iskorištavanje istih skladišta kao scenarij A-1, ali izuzima hibridnu termoelektranu Slavonski Brod. S obzirom na manju količinu emisija, točnije 27,16 Mt, opet se kreće s utiskivanjem u manje skladište koje je akvifer Osijek s ciljem korištenja samo jednog skladišta. Kao i u prošlom scenariju, dolazi do previsokog tlaka u skladištu 2040. godine, dakle 15 godina nakon početka utiskivanja. S obzirom na isti trend, ponovljen je isti postupak te se 2040. godine iz čvorišta prestaje utiskivati u skladište Osijek i kreće se utiskivati u skladište Drava.



Slika 3-3 Dijagram cjevovoda u scenariju A-2

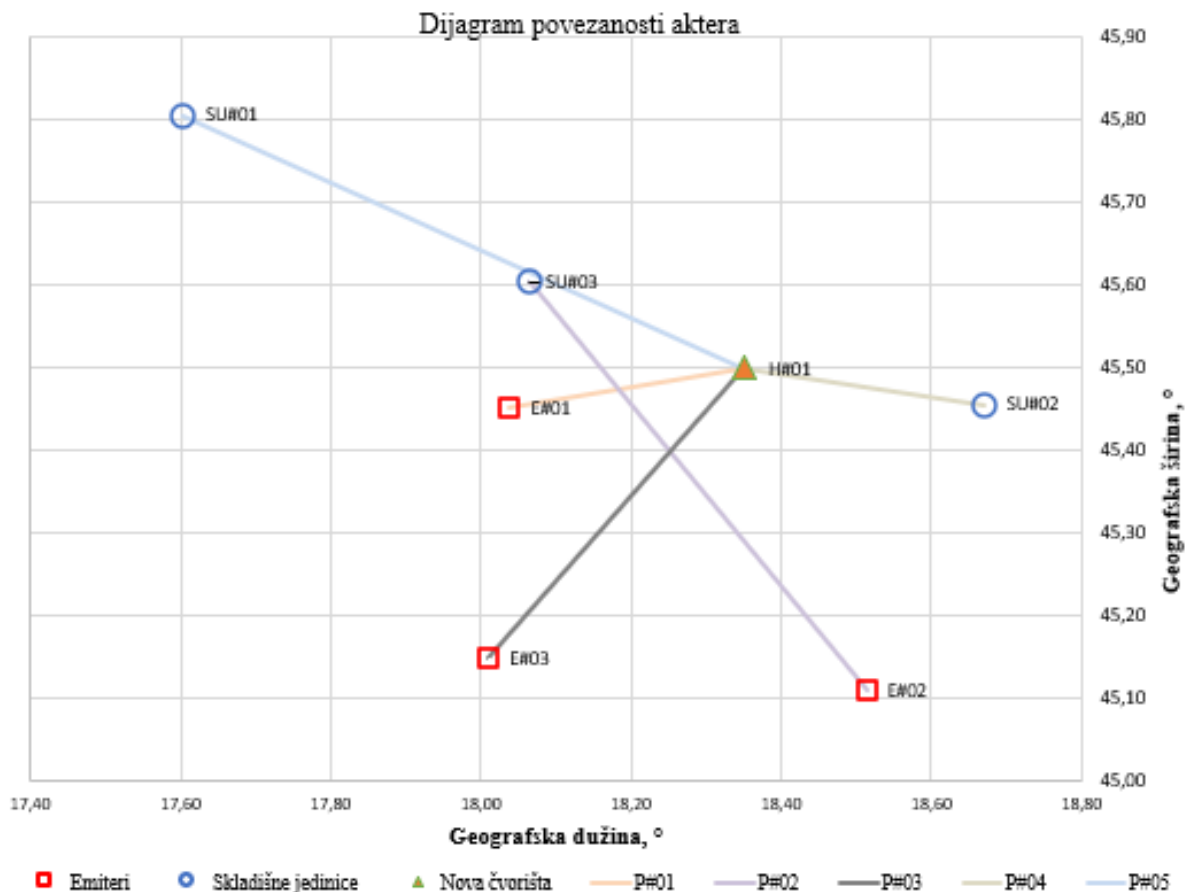
Ukupna vrijednost CCS lanca scenarija A-2 je 17 €/t. CAPEX i OPEX zajedno iznose 17 €/t izbjegnuto CO₂ od čega je na transport utrošeno 1,59 €/t, na skladištenje 7 €/t, a na hvatanje 8,7 €/t te je 1,7 €/t utrošeno dodatno na transport. Točka pokrića za cijenu CO₂ iznosi 22 €/tCO₂.

| <u>Analiza CCS sistema</u> | | <u>Analiza volumena CO₂ (Mt)</u> | | <u>Analiza ETS emisijskih jedinica</u> | |
|--|------------|---|-----------|---|-----------------|
| Ukupna vrijednost CCS lanca | | | | EU ETS parametri | |
| Vrijednost lanca CCS-a (€/tCO ₂) izbjegnuto | -17 | Ukupno uhvaćeni CO ₂ | 27,2 | Cijena jedinica - 2025. (€/tonCO ₂) | 70 |
| Ukupni CAPEX po modulu | -8 | Utilizirani CO ₂ | 0,0 | Cijena jedinica - 2045. (€/tonCO ₂) | 212 |
| Trošak hvatanja (€/tonCO ₂ izbjegnuto) | -4 | CO ₂ za mineralizaciju (trajno izbjegnuto) | 0,0 | Ukupan regionalni trošak bez CCUS-a | |
| Trošak transporta (€/tonCO ₂ izbjegnuto) | -1 | Ukladišten | 18,8 | Cijena ETS bez CCUS (M€) | 1.653,7 |
| Trošak skladištenja (€/tonCO ₂ izbjegnuto) | -3 | Ukupne emisije s CCS-om | 3,7 | Ukupan regionalni trošak sa CCUS-om | |
| OPEX po modulu | -9 | Ukupne izbjegnute emisije | 27,1 | Trošak ETS sa CCUS, preostale emisije (M€) | -405,8 |
| Trošak hvatanja (€/tonCO ₂ izbjegnuto) | -4,7 | BIO CO ₂ uhvaćen, negativne emisije | 0,0 | Trošak CCUS-a (M€) | 462,9 |
| Trošak transporta (€/tonCO ₂ izbjegnuto) | -0,59 | Ukupna količina CO₂ u transportnoj mreži | 27 | UKUPAN trošak sa CCUS-om (M€) | 57,1 |
| Trošak skladištenja (€/tonCO ₂ izbjegnuto) | -4 | CCUS Nacionalni ciljevi | 200 | Razlika koštanja, sa CCUS minus bez CCUS (M€) | -1.597,0 |
| Trošak transporta (€/tonCO ₂ transportirano) | -1,7 | Udio u nacionalnom cilju | 13,5 % | Prosječna godišnja energija koja je potrebna, TW | 1,03 |
| Utilizacija (prihod od prodaje CO₂) (M€) | 0,0 |  STRATEGY CCUS A viable solution for a sustainable future | | Najveća potreba za energijom, TWh/god | 1,21 |
| Uštedene ETS emisijske jedinice u regiji | 2059,5 | | | Prosječna godišnja energija koja je potrebna, TW | 1,03 |
| | | | | Točka pokrića za cijenu CO₂ (€/tonCO₂) | 22 |
| | | | | Prva godina profita | 2025 |

Slika 3-4 Rezultati ekonomskog proračuna za scenarij A-2

3.3 Scenarij B-1

U scenariju B-1 istraženo je može li se skladište Bokšić efikasno iskoristiti za skladištenje CO₂ i kakve su razlike u ekonomskom proračunu između dvije vrste skladišta. Zbog malog kapaciteta prvo je istražena mogućnost utiskivanja iz emitera Viridas Biomass i Hibridne termoelektrane Slavonski Brod jer je zbroj njihovih kapaciteta manji od kapaciteta skladišta Bokšić. Međutim, brzina utiskivanja je prevelika te dolazi do previsokog tlaka u skladištu prije iskorištenja kapaciteta skladišta. Utiskivanje samo iz Hibridne termoelektrane je dovelo do istih rezultata, samo nekoliko godina kasnije. U odabranom scenariju se emisije iz Viridas Biomass utiskuju od početka uključivanja kogeneracijskog postrojenja u scenarij do samog kraja. Zbog male količine godišnjih emisija ne dolazi do prevelikog rasta tlaka ni do iskorištenja kapaciteta u 20 godina predviđenog utiskivanja. Emiteri Našicecement d.d. i Hibridna termoelektrana Slavonski Brod prate isti trend utiskivanja u skladišta kao u scenariju A-1.



Slika 3-5 Dijagram cjevovoda u scenariju B-1

CCS lanac scenarija B-1 iznosi 24 €/t. Kapitalni i operativni troškovi iznose ukupno 23 €/t izbjegnuto^g CO₂ od čega je na transport utrošeno 1,44 €/t, na skladištenje 11 €/t, a na hvatanje 11,2 €/t te je 1,3 €/t utrošeno dodatno na transport. Točka pokrića za cijenu CO₂ iznosi 29 €/tCO₂.

| Analiza CCS sistema | | Analiza volumena CO₂ (Mt) | | Analiza ETS emisijskih jedinica | |
|--|--------|--|--------|---|--------------|
| Ukupna vrijednost CCS lanca | | Ukupno uhvaćeni CO₂ | | EU ETS parametri | |
| Vrijednost lanca CCS-a (€/tCO ₂) izbjegnuto | -24 | Ukupno uhvaćeni CO ₂ | 36,6 | Cijena jedinica - 2025. (€/tonCO ₂) | 70 |
| Ukupni CAPEX po modulu | | Utilizirani CO ₂ | 0,0 | Cijena jedinica - 2045. (€/tonCO ₂) | 212 |
| Trošak hvatanja (€/tonCO ₂ izbjegnuto) | -11 | CO ₂ za mineralizaciju (trajno izbjegnuto) | 0,0 | Ukupan regionalni trošak bez CCUS-a | |
| Trošak transporta (€/tonCO ₂ izbjegnuto) | -6 | Uskladišten | 15,7 | Cijena ETS bez CCUS (M€) | 2.760,2 |
| Trošak skladištenja (€/tonCO ₂ izbjegnuto) | -4 | Ukupne emisije s CCS-om | 6,0 | Ukupan regionalni trošak sa CCUS-om | |
| OPEX po modulu | | Ukupne izbjegnute emisije | 36,5 | Trošak ETS sa CCUS, preostale emisije (M€) | -31,4 |
| Trošak hvatanja (€/tonCO ₂ izbjegnuto) | -13 | BIO CO ₂ uhvaćen, negativne emisije | 0,0 | Trošak CCUS-a (M€) | 877,6 |
| Trošak transporta (€/tonCO ₂ izbjegnuto) | -5,2 | Ukupna količina CO₂ u transportnoj mreži | | UKUPAN trošak sa CCUS-om (M€) | 846,2 |
| Trošak skladištenja (€/tonCO ₂ izbjegnuto) | -0,44 | CCUS Nacionalni ciljevi | 37 | Razlika koštanja, sa CCUS minus bez CCUS (M€) | |
| Trošak transporta (€/tonCO ₂ transportirano) | -7 | Udio u nacionalnom cilju | 18,3 % | -1.914,0 | |
| Utilizacija (prihod od prodaje CO₂) (M€) | | | | Prosječna godišnja energija koja je potrebna, TW | |
| Uštedene ETS emisijske jedinice u regiji | 2791,6 | | | Najveća potreba za energijom, TW/god | |
| | | | | Točka pokrića za cijenu CO ₂ (€/tonCO ₂) | |
| | | | | Prva godina profita | |
| | | | | 29 | |
| | | | | 2025 | |

Slika 3-6 Rezultati ekonomskog proračuna za scenarij B-1


3.4 Scenarij B-2

Prateći raspored utiskivanja iz scenarija B-1 i A-2, u scenariju B-2 emisije iz Viridas Biomass utiskuju se u skladište Bokšić cijeli vijek predviđenog utiskivanja, dok se emisije iz Našicecement d.d. utiskuju u skladište Osijek do 2039. godine, zatim u skladište Drava od 2040. do 2050. godine. U ovom scenariju nije korišteno čvorište zato što se emisije iz različitih emitera ni u jednom trenutku ne utiskuju u isto skladište.



Slika 3-7 Dijagram cjevovoda u scenariju B-2

Ukupna vrijednost CCS lanca scenarija B-2 iznosi 26 €/t. Kapitalni i operativni troškovi iznose ukupno 26 €/t izbjegnuto CO_2 od čega je na transport utrošeno 1,59 €/t, na skladištenje 16 €/t, a na hvatanje 8,7 €/t te je 1,7 €/t utrošeno dodatno na transport. Točka pokrića za cijenu CO_2 iznosi 30 €/t CO_2 .

| <u>Analiza CCS sistema</u> | | <u>Analiza volumena CO2 (Mt)</u> | | <u>Analiza ETS emisijskih jedinica</u> | |
|---|--------|---|-----------|---|--------------|
| Ukupna vrijednost CCS lanca | | Ukupno uhvaćeni CO2 | | EU ETS parametri | |
| Vrijednost lanca CCS-a (€/tCO ₂) izbjegnuto | -26 | Utilizirani CO2 | 27,2 | Cijena jedinica - 2025. (€/tonCO ₂) | 70 |
| Ukupni CAPEX po modulu | | CO ₂ za mineralizaciju (trajno izbjegnuto) | 0,0 | Cijena jedinica - 2045. (€/tonCO ₂) | 212 |
| Trošak hvatanja (€/tonCO ₂ izbjegnuto) | -10 | Uskladišten | 15,3 | Ukupan regionalni trošak bez CCUS-a | |
| Trošak transporta (€/tonCO ₂ izbjegnuto) | -4 | Ukupne emisije s CCS-om | 3,7 | Cijena ETS bez CCUS (M€) | 1.653,7 |
| Trošak skladištenja (€/tonCO ₂ izbjegnuto) | -5 | Ukupne izbjegnute emisije | 27,1 | Ukupan regionalni trošak sa CCUS-om | |
| OPEX po modulu | | BIO CO ₂ uhvaćen, negativne emisije | 0,0 | Trošak ETS sa CCUS, preostale emisije (M€) | -407,3 |
| Trošak hvatanja (€/tonCO ₂ izbjegnuto) | -16 | Ukupna količina CO₂ u transportnoj mreži | 27 | Trošak CCUS-a (M€) | 713,7 |
| Trošak transporta (€/tonCO ₂ izbjegnuto) | -4,7 | CCUS Nacionalni ciljevi | 200 | UKUPAN trošak sa CCUS-om (M€) | 306,4 |
| Trošak skladištenja (€/tonCO ₂ izbjegnuto) | -0,59 | Udio u nacionalnom cilju | 13,5 % | Razlika koštanja, sa CCUS minus bez CCUS (M€) | |
| Trošak skladištenja (€/tonCO ₂ izbjegnuto) | -11 |  | | -1.347,0 | |
| Trošak transporta (€/tonCO ₂ transportirano) | -1,7 | | | Prosječna godišnja energija koja je potrebna, TW | |
| Utilizacija (prihod od prodaje CO ₂) (M€) | 0,0 | | | 1,03 | |
| Uštedene ETS emisijske jedinice u regiji | 2060,9 | | | Najveća potreba za energijom, TWh/god | |
| | | | | 1,21 | |
| | | | | Točka pokrića za cijenu CO₂ (€/tonCO₂) | |
| | | | | 30 | |
| | | | | Prva godina profita | |
| | | | | 2025 | |

Slika 3-8 Rezultati ekonomskog proračuna za scenarij B-2

3.5 EU ETS analiza

Svi izrađeni scenariji predviđaju prvu godinu pokrića u 2025., koja je ujedno i prva godina utiskivanja. Na početku projekta, emisije CO₂ za proizvodnju električne energije iznosile su 230 gCO₂e/kWh, što je prvu godinu pokrića pomaknulo na 2035., deset godina nakon početka utiskivanja. Povećanjem te vrijednosti na 277 gCO₂e/kWh, prva godina pokrića dolazi znatno ranije, što implicira rast emisija i njihovih troškova.

Može se primijetiti da su troškovi scenarija A-1 i B-1 te A-2 i B-2 bez CCS-a jednaki, što znači da bez intervencija troškovi poreza na emisije ostaju isti, ali se s vremenom povećavaju zbog rasta emisija. Korištenjem CCS lanaca, troškovima se može upravljati i omogućiti dugoročno povoljnije rješenje utiskivanja, iako se u početku zbog visokih inicijalnih troškova možda ne čini kao povoljna opcija (Tablica 3-2).

Tablica 3-2 Pregled troškova i uštedenih emisijskih jedinica po scenarijima

| Scenarij | Regionalni trošak bez CCS-a (M€) | Regionalni trošak sa CCS-om (M€) | Razlika koštanja (sa CCS-om minus bez CCS-a) (M€) | Ukupno uštedene emisijske jedinice (M€) |
|------------|----------------------------------|----------------------------------|---|---|
| A-1 | 2760,2 | 725,4 | 2035,0 | 2786,2 |
| A-2 | 1653,7 | 57,1 | 1597,0 | 2059,5 |
| B-1 | 2760,2 | 846,2 | 1914,0 | 2791,6 |
| B-2 | 1653,7 | 306,4 | 1347,0 | 2060,9 |

4 ZAKLJUČAK

Na temelju četiri izrađena scenarija utiskivanja ugljikovog dioksida s ciljem trajnog skladištenja, može se zaključiti da Republika Hrvatska posjeduje fizikalni potencijal za skladištenje CO₂, dok tehnički potencijal ovisi o ekonomskim uvjetima. Svi scenariji su pokazali zadovoljavajuće rezultate, pri čemu je sav uhvaćeni CO₂ uspješno utisnut i svi scenariji u klasteru funkcioniraju jer je točka pokrića CO₂ veća od troška CCS lanca.

Međutim, treba napomenuti da su rezultati produkt simulacija koje se temelje na poznatim sadašnjim podacima i pretpostavljenim budućim vrijednostima, tako da su odstupanja od realnih vrijednosti moguća, tj. očekivana. Podaci o emiterima ovise o prijavljenim emisijama same industrije i neki podaci nisu dostupni, kapaciteti skladišta su procijenjeni s različitim stupnjem pouzdanosti, a ne izmjereni te ekonomski proračuni ovise o volatilnim faktorima.

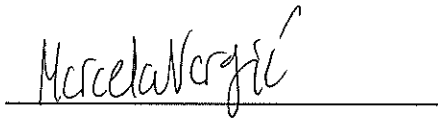
Unatoč ovim ograničenjima, može se zaključiti da je upotreba CC(U)S lanaca dugoročno financijski isplativa i neizbježna u narednim desetljećima zbog postavljenih regulativa Europske unije. Osim toga, primjena CCS tehnologije može značajno pridonijeti smanjenju emisija stakleničkih plinova, čime se Hrvatska približava Europskim klimatskim ciljevima i obvezama. Daljnja istraživanja i napredak tehnologija za hvatanje i skladištenje ugljika mogu povećati efikasnost i smanjiti troškove, što ovu opciju čini još privlačnijom za industriju.

5 Popis literature

- CGS Europe. (2019). *EU Geocapacity*. Dohvaćeno iz CGS Europe: <http://www.cgseurope.net/Sections.aspx?section=491.492.494>
- Energy, Climate change, Environment*. (2024). Dohvaćeno iz European Union: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/what-eu-ets_en?prefLang=hr
- European Union. (2024). *European Commission*. Dohvaćeno iz Climate action: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets_en
- European Union, E. (2021). *Europska unija*. Dohvaćeno iz Europska komisija: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_hr
- PEARL Capital Infrastructure. (2024). *PEARL Capital Infrastructure*. Dohvaćeno iz CROATIA – UNI VIRIDAS: <https://www.pearlinfracap.eu/en/uni-viridas/>
- Pooladi-Darvish, M., Moghdam, S., & Xu, D. (2011). Multiwell injectivity for storage of CO₂ in aquifers. *ScienceDirect*.
- Simon, K. (2023). Polaganje i kontrola cjevovoda. U *Sabiranje i transport nafte i plina 1*.
- Strategy CCUS. (2022). *Regional Event - Northern Croatia*.
- STRATEGY CCUS. (2024). *Regions*. Dohvaćeno iz STRATEGY CCUS Project: <https://strategyccus.brgm.fr/about-project/regions>

IZJAVA

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

A handwritten signature in black ink, reading "Marcela Vargić", written over a horizontal line.

Marcela Vargić



KLASA: 602-01/24-01/89
URBROJ: 251-70-12-24-2
U Zagrebu, 27. 6. 2024.

Marcela Vargić, studentica

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/24-01/89, URBROJ: 251-70-12-24-1 od 06.06.2024. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

MULTISCENARIJSKA ANALIZA TEHNIČKOG, FIZIKALNOG I EKONOMSKOG POTENCIJALA SKLADIŠTENJA CO₂

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

Mentor

(potpis)

Prof. dr. sc. Domagoj Vulin

(titula, ime i prezime)

Predsjednica povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Karolina
Novak Mavar

(titula, ime i prezime)

(potpis)

Lucija Jukić

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)