

Optimiranje transporta ugljikovog dioksida u sklopu EOR projekta pomoću programskog paketa HYSYS

Častek, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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:169:395714>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-25**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij naftnog rudarstva

**OPTIMIRANJE TRANSPORTA UGLJIKOVOG DIOKSIDA U SKLOPU EOR
PROJEKTA POMOĆU PROGRAMSKOG PAKETA HYSYS**

Diplomski rad

Marko Častek

N 156

Zagreb, 2017.

OPTIMIRANJE TRANSPORTA UGLJIKOVOG DIOKSIDA U SKLOPU EOR PROJEKTA
POMOĆU PROGRAMSKOG PAKETA HYSYS

MARKO ČASTEK

Diplomski rad je izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za naftno inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

Sažetak

Usljed starenja i visoke iscrpljenosti postojećih naftnih ležišta, tercijarne metode pridobivanja nafte (EOR) postaju sve značajnije i u Republici Hrvatskoj. U projektu utiskivanja ugljikovog dioksida, značajnu ulogu predstavlja površinski transportni sustav. O njemu uvelike ovisi mogućnost provedbe projekta kao i njegova učinkovitost i ekonomska isplativost. U ovome je radu za optimiranje transporta ugljikovog dioksida, korišten programski paket Aspen HYSYS. Pomoću programa, provedeno je modeliranje kako bi se odabrali optimalni operativni parametri za glavni transportni cjevovod.

Ključne riječi: EOR, ugljikov dioksid, transportni sustav, Aspen HYSYS

Diplomski rad sadrži: 46 stranica, 19 tablica, 18 slika i 17 referenci

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentor: Dr. sc. Katarina Simon, redovita profesorica RGNF

Ocjenjivači: 1. Dr. sc. Katarina Simon, redovita profesorica RGNF
2. Dr. sc. Lidia Hrnčević, izvanredna profesorica RGNF
3. Dr. sc. Vladislav Brkić, docent RGNF

Datum obrane: 17.2.2017., Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet

OPTIMIZATION OF CARBON DIOXIDE TRANSPORTATION FOR EOR PROJECT BY
HYSYS SOFTWARE

MARKO ČASTEK

Thesis completed in: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Petroleum Engineering
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

Abstract

Due to aging and depletion of the existing oil reservoirs, tertiary methods (EOR) have become more significant in Republic of Croatia. As a part of project of carbon dioxide injection, an important part represents the surface transportation optimization. The ability of the project as well as its efficiency and economic effectiveness largely depends on transportation system. In this thesis, Aspen HYSYS software was used for design of the transportation system for carbon dioxide. In order to select optimum operating parameters, modelling of main transportation pipeline has been conducted by software.

Keywords: EOR, carbon dioxide, transportation system, Aspen HYSYS

Thesis contains: 46 pages, 19 tables, 18 pictures and 17 references

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Full Professor Katarina Simon, PhD

Reviewers: 1. Full Professor Katarina Simon, PhD
2. Associate Professor Lidia Hrnčević, PhD
3. Assistant Professor Vladislav Brkić, PhD

Date of defense: February 17, 2017., University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and
Petroleum Engineering

SADRŽAJ:

POPIS TABLICA	I
POPIS SLIKA	II
1. UVOD.....	1
2. FIZIKALNA SVOJSTVA UGLJIKOVOG DIOKSIDA	4
2.1. Utjecaj primjesa na svojstva ugljikovog dioksida	6
3. TEHNOLOŠKI OPIS PROJEKTA	11
3.1. Glavni cjevovod za transport ugljikovog dioksida od OF Ivanić Grad do eksploatacijskog polja	13
3.2. Sustav utisnog cjevovoda za ugljikov dioksid.....	15
3.3. Sustav slanovoda	16
3.4. Objekti na eksploatacijskom polju ugljikovodika	16
3.4.1. Sabirna stanica.....	17
3.4.2. Opis bušotinskog radnog prostora	19
4. PROJEKTIRANJE TRANSPORTNOG SUSTAVA U PROGRAMU HYSYS	20
4.1. Proračun glavnog transportnog cjevovoda	22
4.1.1. Proračun cjevovoda za pretpostavljene ulazne tlakove	22
4.1.2. Proračun cjevovoda za protok ugljikovog dioksida u superkričnom stanju....	30
4.1.3. Utjecaj promjera cjevovoda na izlazne vrijednosti tlaka i temperature.....	34
4.2. Proračun utisnog cjevovoda za CO ₂ od glavnog cjevovoda do utisnih bušotina	36
4.3. Proračun slanovoda za utiskivanje vode.....	40
5. ZAKLJUČAK.....	44
6. POPIS LITERATURE.....	45

POPIS TABLICA

Tablica 1-1. Pregled „velikih“ CO ₂ projekata na području SAD-a.....	2
Tablica 2-1. Osnovna fizikalna svojstva ugljikovog dioksida.....	4
Tablica 2-2. Svojstva ugljikovog dioksida u različitim fazama.....	6
Tablica 2-3. Sastav ugljikovog dioksida pri transportu u okviru nekih EOR projekata.....	10
Tablica 3-1. Sastav ugljikovog dioksida za utiskivanje u bušotine.....	12
Tablica 4-1. Ulazni parametri smjese transportiranog fluida.....	23
Tablica 4-2. Rezultati proračuna transportnog cjevovoda za ulazni tlak od 180 bar i protok od 100 000 Sm ³ /dan.....	24
Tablica 4-3. Rezultati proračuna transportnog cjevovoda za ulazni tlak od 150 bar i protok od 100 000 Sm ³ /dan.....	25
Tablica 4-4. Rezultati proračuna transportnog cjevovoda za ulazni tlak od 120 bar i protok od 100 000 Sm ³ /dan.....	26
Tablica 4-5. Rezultati proračuna transportnog cjevovoda za ulazni tlak od 150 bar i protok od 70 000 Sm ³ /dan.....	28
Tablica 4-6. Rezultati proračuna transportnog cjevovoda za ulazni tlak od 120 bar i protok od 70 000 Sm ³ /dan.....	29
Tablica 4-7. Ulazni parametri za toplinski proračun cjevovoda.....	31
Tablica 4-8. Rezultati toplinskog proračuna.....	31
Tablica 4-9. Cjeloviti proračun cjevovoda DN 200.....	32
Tablica 4-10. Odabrani operativni parametri cjevovoda.....	34
Tablica 4-11. Utjecaj promjera cjevovoda na izlazne vrijednosti tlaka i temperature ugljikovog dioksida.....	35
Tablica 4-12. Ulazni parametri proračuna cjevovoda za utiskivanje CO ₂	38
Tablica 4-13. Rezultati proračuna cjevovoda za utiskivanje CO ₂	38
Tablica 4-14. Rezultati proračuna slanovoda za utiskivanje slane vode.....	42

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Fazni dijagram ugljikovog dioksida.....	5
Slika 2-2. Fazni dijagram ugljikovog dioksida i metana te njihovih smjesa.....	7
Slika 2-3. Fazni dijagram ugljikovog dioksida, metana i dušika te njihovih smjesa.....	8
Slika 2-4. Fazni dijagram smjese plina i čistog ugljikovog dioksida.....	9
Slika 3-1. Planirana trasa transportnog cjevovoda DN 200.....	13
Slika 3-2. Elevacijski profil cjevovoda.....	14
Slika 3-3. Trasa utisnog cjevovoda za utiskivanje ugljikovog dioksida.....	15
Slika 3-4. Trasa utisnog cjevovoda za utiskivanje vode.....	16
Slika 3-5. Shema objekata koji će se koristiti za utiskivanje na eksploatacijskom polju.....	17
Slika 3-6. Shema objekata na sabirnoj stanici i stanici slane vode na eksploatacijskom polju.....	18
Slika 4-1. Model cjevovoda u modulu HYSYS.....	21
Slika 4-2. Grafički prikaz rezultata za cjevovod DN 200.....	33
Slika 4-3. Shema utisnog sustava cjevovoda za utiskivanje CO ₂ u utisne bušotine.....	37
Slika 4-4. Grafički prikaz rezultata za bušotinu A.....	39
Slika 4-5. Grafički prikaz rezultata za bušotinu B.....	39
Slika 4-6. Shema utisnog sustava slanovoda za utiskivanje slane vode.....	41
Slika 4-7. Grafički prikaz rezultata za bušotinu A.....	43
Slika 4-8. Grafički prikaz rezultata za bušotinu B.....	43

1. UVOD

Primjenom konvencionalnih metoda proizvodnje nafte, moguće je ostvariti iscrpak iz ležišta do 40%. Kako je istraživanje s ciljem otkrivanja novih ležišta vremenski i financijski zahtjevno, razvijena je tercijarna metoda iscrpka (*engl. Enhanced Oil Recovery - EOR*) postojećih ležišta. Ona se najčešće zasniva na utiskivanju fluida koji reagiraju s naftom i mijenjaju njena svojstva, povećavajući joj pokretljivost. Iscrpak ugljikovodika kod primjene EOR metode, kreće se u rasponu od 30 do 60%, ovisno o svojstvima ležišta i fluida te o primijenjenoj EOR metodi (Al-Jarba i Al-Anazi, 2009).

Problem relativno malog iscrpka postojećih naftnih ležišta prvo je prepoznat u Sjedinjenim Američkim Državama (SAD) već 1972. godine, kada je pokrenut prvi EOR projekt utiskivanja ugljikovog dioksida (CO₂) u ležište na polju SACROC (Scurry Area Canyon Reef Operators Committee), na području Teksasa. Projekt je pokrenut s ciljem ublažavanja prirodnog pada proizvodnje te dodatnog iscrpka nafte. Desetak godina nakon početka projekta, uočeno je značajno povećanje proizvodnje čime je dokazano da je moguće ostvariti povećanje iscrpka nafte utiskivanjem ugljikovog dioksida u ležište. Na temelju uspjeha na polju SACROC, u SAD - u su osamdesetih godina prošlog stoljeća, započeti brojni veliki CO₂ projekti, što je vidljivo iz priložene tablice 1-1. Situacija je slična i danas, a potražnja za ugljikovim dioksidom u SAD – u premašuje dostupne količine. Stoga se razmatraju načini kako količine povećati uz zadržavanje cijene CO₂ ispod 40\$/t, pri kojoj je njegovo utiskivanje ekonomski opravdano (Rassenfoss, 2014).

Zbog starenja i visoke iscrpljenosti postojećih naftnih ležišta, EOR projekti unazad nekoliko godina sve su značajniji i u Republici Hrvatskoj. Prvenstveno se to odnosi na kontinentalni dio koji pripada Panonskom bazenu gdje je prije nekoliko godina izveden pilot projekt utiskivanja ugljikovog dioksida. Na polju Ivanić je nakon pilot projekta, 2015. godine započeo projekt utiskivanja CO₂ u ležišta, a učinak projekta tek treba utvrditi dodatnim praćenjima proizvodnje.

Unatoč tome, usporedi li se podatke iz tablice 1-1. s EOR projektom utiskivanja ugljikovog dioksida koji se trenutno provodi na polju Ivanić i kod kojeg se predviđa dodatna proizvodnja nafte od 3,4 milijuna tona kroz 24 godine (Petrović, 2014), može se zaključiti kako očekivano povećanje proizvodnje nafte od oko 450 m³/dan premašuje povećanje proizvodnje ostvarene tijekom nekih velikih projekata iz tablice, pa bi takav konačni rezultat potvrdio uspješnost projekta. Tome ide u prilog i činjenica da je planirani ukupni utrošak

CO₂ od 3,55 milijardi m³, što daje utrošak od relativno niskih 900 m³ CO₂ po m³ pridobivene nafte. Ako se uzmu u obzir navedene brojke, unatoč činjenici da se radi o predviđanju povećanja iscrpka od samo 4-7 %, može se reći kako se radi se značajnom projektu.

Tablica 1-1. Pregled „velikih“ CO₂ projekata na području SAD-a (Martin i Taber, 1992)

NAZIV POLJA	POČETAK PROJEKTA (godina)	POVRŠINA LEŽIŠTA (km ²)	DUBINA LEŽIŠTA (m)	PROIZVODNJA NAFTE		PREDVIĐENO POVEĆANJE ISCRPKA (% REZERVI)	UTROŠAK CO ₂ (m ³ /m ³)
				UKUPNO (m ³ /dan)	POVEĆANJE (m ³ /dan)		
SACROC	1972.	198,3	1951	4060,54	2190,85	7,5	1158
Wasson (Denver)	1983.	80,94	1585	6534,38	4133,67	16	534
Seminole	1983.	63,54	1669	7122,63	4769,62	9,6 - 15,4	837 - 1443
Rangely	1986.	60,7	1981	5564,55	1881,30	7,5	891
McElmo Creek Unit	1985.	54,39	1707	947,56	374,42	8,6	1158
Means	1983.	34,8	1341	2384,81	nema podataka	7,1	1959
Wasson (Willard)	1986.	32,37	1554	690,80	327,51	12,3	926
Wasson (ODC)	1984.	31,57	1554	2384,81	1271,90	15 - 18	1425 - 1781
Slaughter (Central Mallet)	1984.	25,95	1519	651,85	190,78	8	1069
Little Creek	1985.	25,09	3243	620,05	620,05	23,5	891 - 1069
Dollarhide	1985.	25,02	2377	349,77	111,29	14	427
West Mallalleu	1986.	23,31	3159	238,48	238,48	18 - 19	891 - 1069
Slaughter (Estate)	1984.	23,08	1519	1399,09	683,65	15	1069
East Vacuum	1981.	19,83	1372	1430,89	nema podataka	9	1122
Twofreds	1974.	17,78	1469	108,11	108,11	15,6	1425

U sklopu projekta utiskivanja CO₂, značajnu ulogu predstavlja površinski transportni sustav. O njemu uvelike ovisi mogućnost provedbe projekta kao i njegova učinkovitost i ekonomska

isplativost. Ovaj rad bavi se modeliranjem pretpostavljenih transportnih sustava CO₂ u okviru pretpostavljenog EOR projekta za utiskivanje CO₂ u staro naftno ležište u Republici Hrvatskoj. Površinski sustav transporta u projektu čine glavni transportni cjevovod, utisni sustav za ugljikov dioksid i slanovod za utiskivanje vode. Za svaki od ta tri sustava biti će proveden proračun u simulacijskom programu Aspen HYSYS. U poglavlju koje slijedi, provesti će se modeliranje i optimiranje samog sustava u istom programu, te će se, na temelju dobivenih rezultata, dati prijedlozi i moguće modifikacije s ciljem povećanja učinkovitosti cjelokupnog sustava.

2. FIZIKALNA SVOJSTVA UGLJIKOVOG DIOKSIDA

Ugljikov dioksid kemijski je spoj sastavljen od dva atoma kisika kovalentno vezanih za atom ugljika. Pri standardnim uvjetima tlaka i temperature, nalazi se u plinovitom agregatnom stanju i teži je od zraka. Bezbojan je plin, neutralnog mirisa, ne gori, ne podržava gorenje i slabo je toksičan. Sastavni je dio atmosfere s udjelom od 0,04% (400 ppm) koji se, ovisno o godišnjem dobu, mijenja tijekom godine u rasponu do 6 ppm.

U tablici 2-1. prikazana su osnovna svojstva ugljikovog dioksida, njihove vrijednosti i jedinice kojima se navedena svojstva iskazuju.

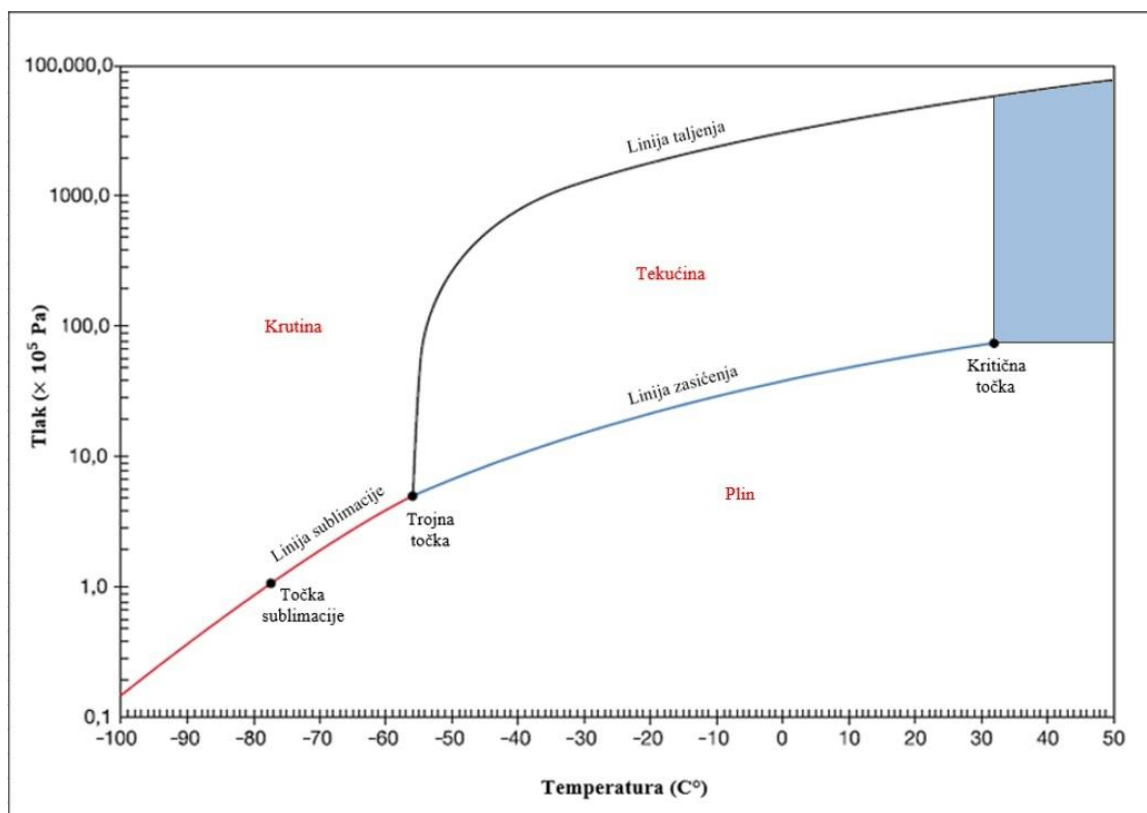
Tablica 2-1. Osnovna fizikalna svojstva ugljikovog dioksida (IPCC, 2005)

FIZIKALNO SVOJSTVO	VRIJEDNOST	JEDINICA
MOLARNA MASA	44,01	<i>kg/kmol</i>
KRITIČNA TEMPERATURA	31,1	°C
KRITIČNI TLAK	73,9	<i>bar</i>
KRITIČNA GUSTOĆA	467	<i>kg/m³</i>
TEMPERATURA TROJNE TOČKE	-56,5	°C
TLAK TROJNE TOČKE	5,18	<i>bar</i>
TOČKA VRELIŠTA (@ 1,01325 bar)	-78,5	°C

Ugljikov dioksid se nalazi i u ležištima ugljikovodika i pridobiva crpljenjem zajedno s ugljikovodicima. Također, nastaje i sagorijevanjem fosilnih goriva u industrijskim pogonima, vulkanskom aktivnošću, fermentacijom šećera u alkoholnim pićima, biološkim djelovanjem organskog materijala te staničnim disanjem ljudi i životinja. Važan je za biljni svijet u procesu fotosinteze gdje ga biljke koriste, a kao nusprodukt ispuštaju kisik. Njegova koncentracija se tijekom života na Zemlji konstantno povećava što neupitno dovodi do globalnog zatopljenja.

Kao što je vidljivo iz faznog (p-T) dijagrama (Slika 2-1.), ovisno o vrijednostima tlaka i temperature, ugljikov dioksid može postojati u tri agregatna stanja. Trojna točka i kritična točka, kao i linije sublimacije, zasićenja i taljenja, definiraju granične uvjete prijelaza između agregatnih stanja. Trojna točka ugljikovog dioksida definirana je vrijednostima tlaka i

temperature od 5,18 bar i -56,5 °C. Kod nižih vrijednosti tlaka i kod temperatura manjih od navedenih -56,5 °C, ugljikov dioksid se nalazi u krutom stanju te ga se naziva suhim ledom.



Slika 2-1. Fazni dijagram ugljikovog dioksida (IPCC, 2005)

Analogno trojnoj točki, kritična točka ugljikovog dioksida definirana je vrijednostima tlaka i temperature od 73,9 bar i 31,1 °C. Između temperatura koje određuju trojnu i kritičnu točku, postoji granična linija koja se naziva linija zasićenja. Ona definira granične vrijednosti tlaka kod kojih će, između navedenih temperatura, doći do prijelaza iz tekućeg u plinovito agregatno stanje, i obrnuto. Iznad vrijednosti tlaka i temperature kojima je definirana kritična točka, ugljikov dioksid će poprimiti svojstva superkritičnog fluida (osjenčano područje). Pri tome će se njegova viskoznost smanjiti na razinu karakterističnu za plinsku fazu, a gustoća povećati na razinu karakterističnu za tekuću fazu, koja može biti i veća od gustoće vode.

U tablici 2-2. prikazana su svojstva i termodinamičke veličine koja su karakteristične za pojedinu fazu kao i njihove vrijednosti i jedinice. Oznaka "SU" u tablici označava standardne uvjete. Oni su definirani kako slijedi (Čikeš, 2013):

- standardni tlak, $p_{sc} = 1,013250$ bara
- standardna temperatura, $T_{sc} = 15$ °C = 288,15 K

Tablica 2-2. Svojstva ugljikovog dioksida u različitim fazama (IPCC, 2005)

PLINSKA FAZA		
GUSTOĆA (@ -78,5 °C ; 1,01325 bar)	2,814	<i>kg/m³</i>
GUSTOĆA (@ SU)	1,976	<i>kg/m³</i>
SPECIFIČNI VOLUMEN (@ SU)	0,506	<i>m³/kg</i>
C _p (@ SU)	0,827	<i>kJ/(kgK)</i>
C _v (@ SU)	0,632	<i>kJ/(kgK)</i>
C _p /C _v (@ SU)	1,309	-
VISKOZNOST (@ SU)	0,00001372	<i>Pa s</i>
TOPIVOST U VODI (@ SU)	1,716	<i>vol/vol</i>
ENTALPIJA (@ SU)	117,2	<i>mol/K</i>
TEKUĆA FAZA		
GUSTOĆA (@ -20 °C ; 19,7 bar)	1032	<i>kg/m³</i>
VISKOZNOST (@ SU)	0,000099	<i>Pa s</i>
KRUTA FAZA		
GUSTOĆA PRI TOČKI SMRZAVANJA	1562	<i>kg/m³</i>

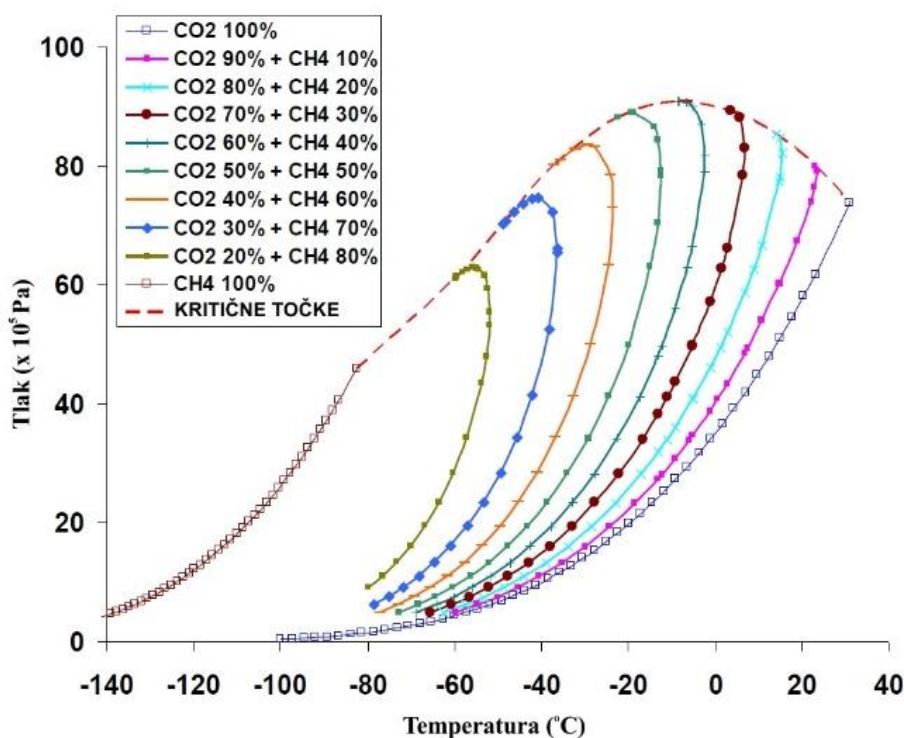
2.1. Utjecaj primjese na svojstva ugljikovog dioksida

Fazni dijagram ugljikovog dioksida na slici 2-1. prikazuje p-T odnose čiste komponente. Međutim, u praksi se takav idealan slučaj rijetko susreće. Razlog tomu je ušteda energije ili manje rigorozni zahtjevi s obzirom na specifikaciju sastava. Primjese u malim količinama u sastavu smjese obično ne utječu bitno na svojstva te smjese. Međutim, ponekad male količine primjese ipak mogu utjecati na određena svojstva i stoga je od izuzetne važnosti provjeriti njihov utjecaj za pojedini slučaj.

S energetskeg stajališta, prilikom transporta ugljikovog dioksida, bitno ga je zadržati cijelo vrijeme transporta u jednofaznom području. U okviru projekta koji je tema ovog rada, CO₂ će se transportirati cjevovodom u tekućem stanju, od mjesta ukapljivanja do mjesta utiskivanja. Pojava dvofaznog protjecanja na bilo kojoj dionici transportnog sustava, značila bi i promjenu svojstava ugljikovog dioksida. To se posebice odnosi na gustoću, čija bi promjena rezultirala velikim i naglim padovima tlaka duž trase cjevovoda. Kako bi se

izbjegao navedeni problem, potrebno je provjeriti komponentni sastav smjese i njezina svojstva u odnosu na čisti ugljikov dioksid.

Na slici 2-2. prikazan je p-T dijagram ugljikovog dioksida i metana (CH_4), te njihovih binarnih smjesa u različitim omjerima. Za razliku od čistih tvari, krivulje ključanja i rosišta za smjese se ne poklapaju, već tvore dvofazno područje. Iz priloženog dijagrama vidljiv je utjecaj metana na svojstva smjese koju tvori s ugljikovim dioksidom. U razmatranom slučaju, utjecaj druge komponente (u ovom slučaju metana) očituje se u sniženju temperature točke ključanja, odnosno rosišta. Pri tome je utjecaj na sniženje temperature točke ključanja/rosišta izraženiji što je veći postotak druge komponente u smjesi. Prisutnost druge komponente utječe i na kritičnu točku. Kod smjese CO_2 i CH_4 , najveće odstupanje kritične točke s obzirom na tlak u odnosu na čisti CO_2 , uočava se kod smjese s omjerom 60% CO_2 i 40% CH_4 . Kritični tlak te smjese je 89,5 bar, a temperatura $-6,92^\circ\text{C}$. Međutim, takva smjesa je ekstremni slučaj koji u praksi, pri transportu ugljikovog dioksida, nije realno očekivati što potvrđuju i podaci u tablici 2-3.



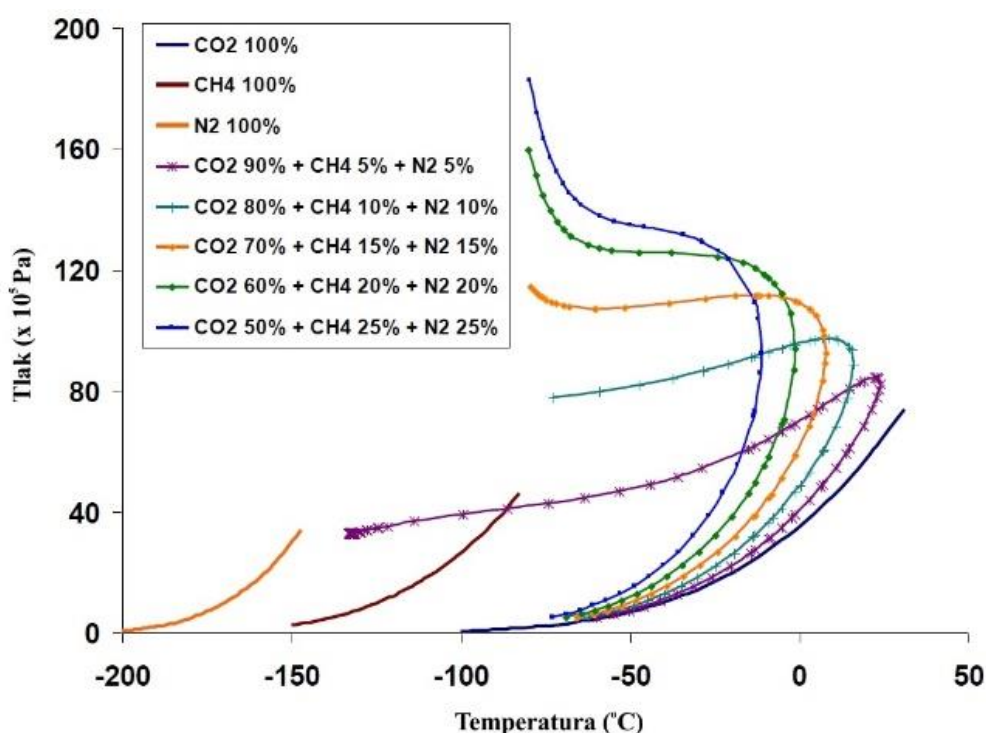
Slika 2-2. Fazni dijagram ugljikovog dioksida i metana te njihovih smjesa (Jung i Nicot, 2010)

Ukoliko se razmotre krivulje na dijagramima koje prikazuju slučaj koji je u praksi prihvatljiv

(90% CO₂ i 10% CH₄), zaključuje se da će takva promjena sastava također dovesti do promjena kritičnih vrijednosti, odnosno povećanja vrijednosti kritičnog tlaka, uz smanjenje vrijednosti kritične temperature. Kritična točka ovog sustava definirana je tlakom od 79,39 bar i temperaturom od 23,25 °C.

Slika 2-3. prikazuje fazni dijagram tri čiste komponente – ugljikov dioksid, metan i dušik (N₂), te njihovu kombinaciju.

Omjer koji je kod ove smjese najrealnije očekivati je 90 % CO₂ , 5% CH₄ i 5% N₂ i ona je prikazana krivuljom ljubičaste boje. Vidljivo je kako ove tri komponente u navedenom omjeru „zatvaraju“ relativno veliko dvofazno područje. Kritični tlak smjese je 83,69 bar, dok kritična temperatura iznosi 23,43 °C. Kao i u prethodnom, i u ovom slučaju se javlja sniženje temperature u točki ključanja i rosišta u odnosu na čisti CO₂ , što potvrđuju i druga istraživanja (Raimondi, 2014).



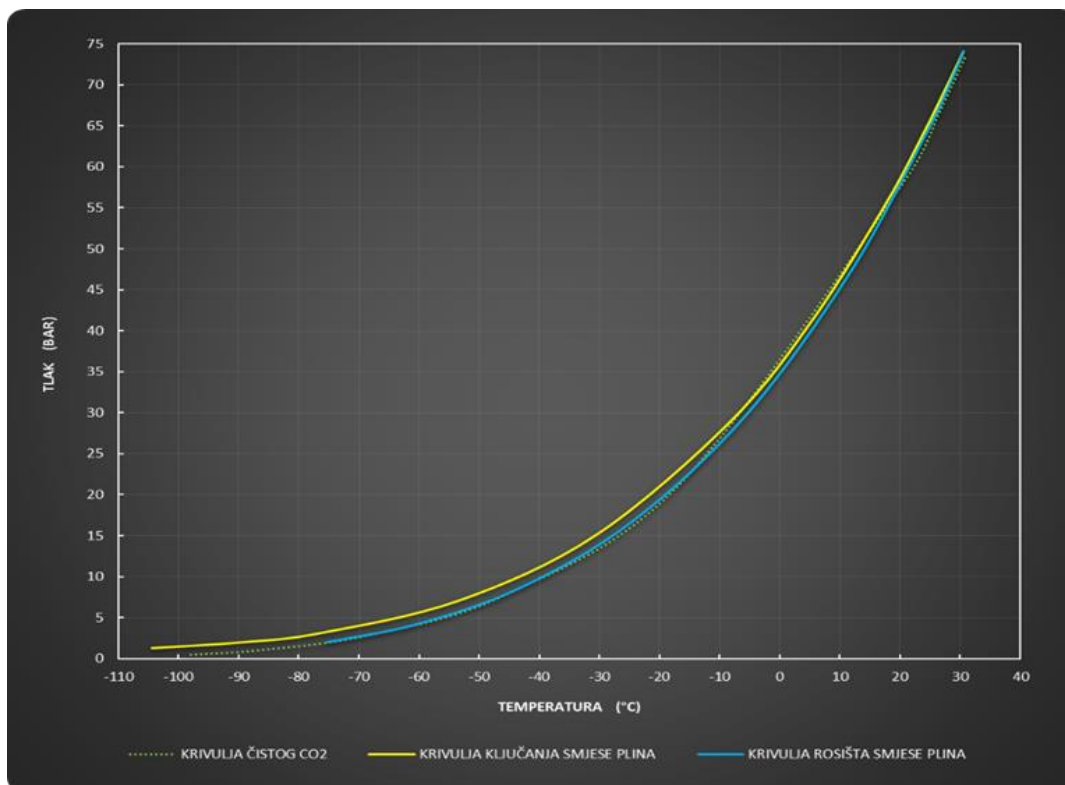
Slika 2-3. Fazni dijagram ugljikovog dioksida, metana i dušika te njihovih smjesa (Jung i Nicot, 2010)

Iz navedenih primjera je vidljiv utjecaj primjesa na p-T svojstva ugljikovog dioksida. Stoga je, pomoću modula HYSYS, napravljen fazni dijagram smjese koja će se utiskivati u ležište u nekom budućem EOR projektu. Komponentni sastav smjese je sljedeći: 99,37%

ugljkovog dioksida (CO_2), 0,55% metana (CH_4), 0,04% etana (C_2H_6), 0,02% dušika (N_2) i 0,02% sumporovodika (H_2S) (Novak, 2015).

Dijagram na slici 2-4. prikazuje fazni dijagram navedene smjese i čistog ugljikovog dioksida. Krivulje na slici znače sljedeće: žuta krivulja predstavlja krivulju ključanja (engl. *Bubble Point Curve*) smjese ugljikovog dioksida i primjesa (CH_4 , C_2H_6 , N_2 , H_2S), plava krivulja predstavlja krivulju rosišta (engl. *Dew Point Curve*) te iste smjese, dok je zelena točkasta krivulja dana kao usporedba i predstavlja p-T odnos čistog CO_2 .

Iz dijagrama je vidljivo kako prisutnost primjesa (CH_4 , C_2H_6 , N_2 , H_2S) snižava temperaturu točke ključanja kao i temperaturu točke rosišta u odnosu na čistu komponentu. Iako je to smanjenje relativno malo, s obzirom na mali udio primjesa, zbog mogućnosti pojave dvofaznog protjecanja, bitno je tijekom transporta pri određenom tlaku, temperaturu održavati ispod temperature ključanja za taj tlak. Isto tako, važno je primijetiti kako je opasnost od dvofaznog protjecanja bitno smanjena kod visokih tlakova koji se uobičajeno koriste kod transporta CO_2 u tekućem stanju (85 – 150 bar) (Serpa et al., 2011) iz razloga što je nerealno očekivati vrijednosti temperature unutar cjevovoda iznad temperature okoline, uz pad tlaka smjese ispod kritične vrijednosti (74,03 bar).



Slika 2-4. Fazni dijagram smjese plina i čistog ugljikovog dioksida

Tablica 2-3. prikazuje šest projekata utiskivanja ugljikovog dioksida na području SAD – a s tipičnim sastavom utiskivanog fluida pri transportu. U sastavu smjese, osim glavne komponente, CO₂, prikazane su i primjese koje su uz njega prisutne. Bitno je uočiti kako je ugljikov dioksid dominantna komponenta s udjelom iznad 95%. Jedino odstupanje zabilježeno je na projektu Canyon Reef SACROC, gdje je dozvoljen nešto veći udio CH₄ komponente.

S obzirom na visoke udjele ugljikovog dioksida, a sukladno tome i relativno male udjele primjesa, transport cjevovodima je olakšan zbog smanjene mogućnosti pojave dvofaznog protjecanja. Također, omogućen je transport većih količina ugljikovog dioksida, što ujedno povećava i energetska učinkovitost transporta.

Tablica 2-3. Sastav utiskivanog fluida pri transportu u okviru nekih EOR projekata

(Jung i Nicot, 2010)

KOMPONENTA	Canyon Reef SACROC	Weyburn EOR	Bravo Dome	Cortez Pipeline	Sheep Mountain	Central Basin
CO ₂	85 – 98 %	96 %	99,7 %	95 %	96,8 – 97,4 %	98,5 %
H ₂ S	<200 ppm	0,9 %	-	0,002 %	-	<20 ppm
CH ₄	2 – 15 %	0,7 %	-	1 – 5 %	1,7 %	0,2 %
C ₂₊	C ₆ H ₁₄	2,3 %	-	u tragovima	0,3 – 0,6 %	-
CO	-	0,1 %	-	-	-	-
N ₂	-	<300 ppm	0,3 %	4 %	0,6 – 0,9 %	1,3 %
O ₂	-	<50 ppm	-	-	-	<10 ppm
H ₂ O	50 ppm	<20 ppm	-	257 ppm	129 ppm	257 ppm

3. TEHNOLOŠKI OPIS PROJEKTA

Nakon uspješno provedenih pilot projekata, EOR projekt utiskivanja ugljikovog dioksida već se nekoliko godina aktivno provodi na eksploatacijskim poljima Ivanić i Žutica. Korišteni ugljikov dioksid doprema se cjevovodom sa Centralne plinske stanice (CPS) Molve u količinama od 600 000 Sm^3 dnevno (Petrović, 2014). Puštanjem u proizvodnju tri plinska polja u okviru projekta Međimurje – Vučkovec, Vukanovec i Zebanec, i izgradnjom cjevovoda prema Molvama, znatno se povećala količina izdvojenog ugljikovog dioksida na CPS – u (<http://www.ina.hr>, 2016). Umjesto ispuštanja u atmosferu, dodatnu količinu CO₂ bilo bi korisno utrošiti za nove EOR projekte. Na taj način, uz smanjenje emisija ugljikovog dioksida u atmosferu, produljuje se proizvodni vijek starih naftnih ležišta.

Budući da se pretpostavlja nastavak primjene metode utiskivanja CO₂ u naftna ležišta, u radu je pretpostavljeno da će se on utiskivati u jedno od dva obližnja naftna ležišta, pa je za jedno od njih projektiran transportni sustav, odnosno modelirano ponašanje CO₂.

Prema *Studiji o utjecaju na okoliš rudarskih objekata i eksploatacije nafte i plina na eksploatacijskim poljima Stružec, Mramor Brdo, Voloder i Okoli*, dostupnoj na stranici Ministarstva zaštite okoliša i prirode, proizlazi da će jedno od tih polja biti eksploatacijsko polje Stružec. U studiji je pretpostavljena opcija transporta ugljikovog dioksida cisternama od Ivanić Grada do Mjerne stanice 3 na polju Stružec i dalje do definiranih utisnih bušotina s pripadajućim duljinama utisnih cjevovoda i slanovoda (RGNF i Eccomission d.o.o., 2016). U ovom diplomskom radu je pretpostavljena opcija transporta ugljikovog dioksida cjevovodom koji se u tekstu naziva glavnim transportnim cjevovodom (DN 200), a čiji je pretpostavljeni početak na izlaznom čvoru pumpaonice na Objektu frakcionacije (OF) Ivanić Grad, a završetak na sekcijском čvoru 1 na eksploatacijskom polju ugljikovodika Stružec.

S obzirom da je razmatrano eksploatacijsko polje ugljikovodika u proizvodnji više od 50 godina, njegovim kontinuiranim crpljenjem, došlo je do pada proizvodnje nafte. Nakon što je primjena sekundarnih metoda pridobivanja nafte (utiskivanje vode) dosegla svoju ekonomsku granicu, javila se potreba za primjenom EOR metode. Na temelju karakteristika ležišta i ležišnog fluida, ocijenjeno je da je ležište kandidat za primjenu EOR metode utiskivanja ugljikovog dioksida (Smontara i Bilić-Subašić, 2014).

Zbog smanjenja troškova i raspoložive infrastrukture, ugljikov dioksid bi se transportirao cjevovodom u tekućem stanju od Objekta frakcionacije Ivanić Grad do utisnih bušotina na

razmatranom ležištu.

Izvor CO₂ za potrebe ovog projekta je također CPS Molve, gdje se ugljikov dioksid izdvaja u procesu obrade prirodnog plina. Iz struje ulaznog plina se izdvajaju ugljikov dioksid i sumporovodik kemijskom apsorpcijom otopinom metildietanolamina, tzv. aminskim procesom. Izdvojeni kiseli plinovi se dalje šalju na postrojenje za odsumporavanje, tzv. Lo-Cat postrojenje, gdje se kiseli plinovi dovode u kontakt s Lo-Cat otopinom koja apsorbira sumpor koji se u daljnjem procesu pretvara u sumporni mulj. Ugljikov dioksid, sada odvojen od sumporovodika, odvodi se do jedinice za regenerativnu termičku oksidaciju (RTO) (Simon, 2015). Nakon termičke oksidacije preostalih sumpornih spojeva, očišćeni CO₂ se komprimira, dehidrira i cjevovodom otprema do OF. Tamo se ugljikov dioksid dodatno stlačuje te ga se nakon toga hladi ispod temperature ukapljivanja. Tekući ugljikov dioksid se nakon toga otprema do pumpanice gdje mu se povećava tlak na potreban za transport i utiskivanje.

U tablici 3-1. prikazan je sastav smjese plina koji će se utiskivati u bušotine (Novak, 2015).

Tablica 3-1. Sastav ugljikovog dioksida za utiskivanje u bušotine (Novak, 2015)

SASTAV PLINA		SVOJSTVA KOMPONENTA SMJESE PLINA	
KOMPONENTA	FORMULA	M (kg/kmol)	Molni udio y_i (-)
METAN	CH ₄	16,030	0,00550
ETAN	C ₂ H ₆	30,070	0,00040
UGLJIKOV DIOKSID	CO ₂	44,010	0,99370
DUŠIK	N ₂	28,016	0,00020
SUMPOROVODIK	H ₂ S	34,080	0,00020
		SUMA =	1,00000

Pretpostavlja se da će se u okviru projekta CO₂ utiskivati u dvije bušotine dok će se u dvije utiskivati voda.

Dnevno se za potrebe EOR projekta planira koristiti 70 000 Sm³ plina navedenog sastava. Ta količina odgovara masenom protoku od 5 409 kg/h tekućeg ugljikovog dioksida.

3.1. Glavni cjevovod za transport ugljikovog dioksida od OF Ivanić Grad do eksploatacijskog polja

Od postrojenja za ukapljivanje ugljikovog dioksida do utisnih bušotina eksploatacijskog polja, ugljikov dioksid će se transportirati glavnim transportnim cjevovodom koji će se izgraditi za potrebe ovog projekta (Slika 3-1).



Slika 3-1. Planirana trasa transportnog cjevovoda DN 200

Trasu cjevovoda na dionici od Objekta frakcionacije Ivanić Grad do utisnih bušotina na eksploatacijskom polju ugljikovodika (EPU) Žutica definira postojeći transportni sustav. Od EPU Žutica do eksploatacijskog polja gdje će se CO₂ utiskivati, kroz šumu Žutica, pretpostavljena trasa prati postojeće cestovne puteve kako bi se prilikom ukopavanja

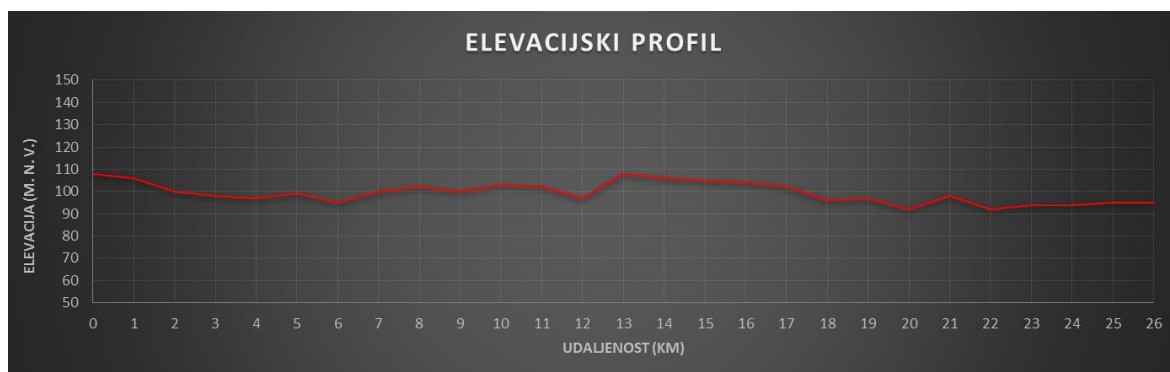
cjevovoda utjecaj na okoliš sveo na minimum. Trasa od šume Žutica do izlaznog čvora transportnog cjevovoda, odabrana je kako bi se lakše premostio vodotok i izbjegli kanali za navodnjavanje, a pritom osigurala najkraća moguća udaljenost.

Oznaka cjevovoda prema nominalnom promjeru je DN 200 i ta oznaka će biti korištena kod označavanja navedenog cjevovoda u ovom projektu.

Odabrane karakteristike cjevovoda su:

- vanjski promjer 219,1 mm (8")
- debljina stijenke 8,2 mm
- čelik kvalitete X52 (API 5L)
- radni tlak cjevovoda 110 – 200 bar
- duljina 26 000 m

Profil trase cjevovoda s obzirom na promjene visine (elevacijski profil) na slici 3-2. prikazuje promjenu visine u odnosu na udaljenost. Ulazna točka cjevovoda je na 108 m.n.v. (metara nadmorske visine), dok je krajnja točka na 95 m.n.v., pa ukupna promjena visine (elevacija) iznosi -13 m. Dubina ukopavanja cjevovoda je 1,0 m.



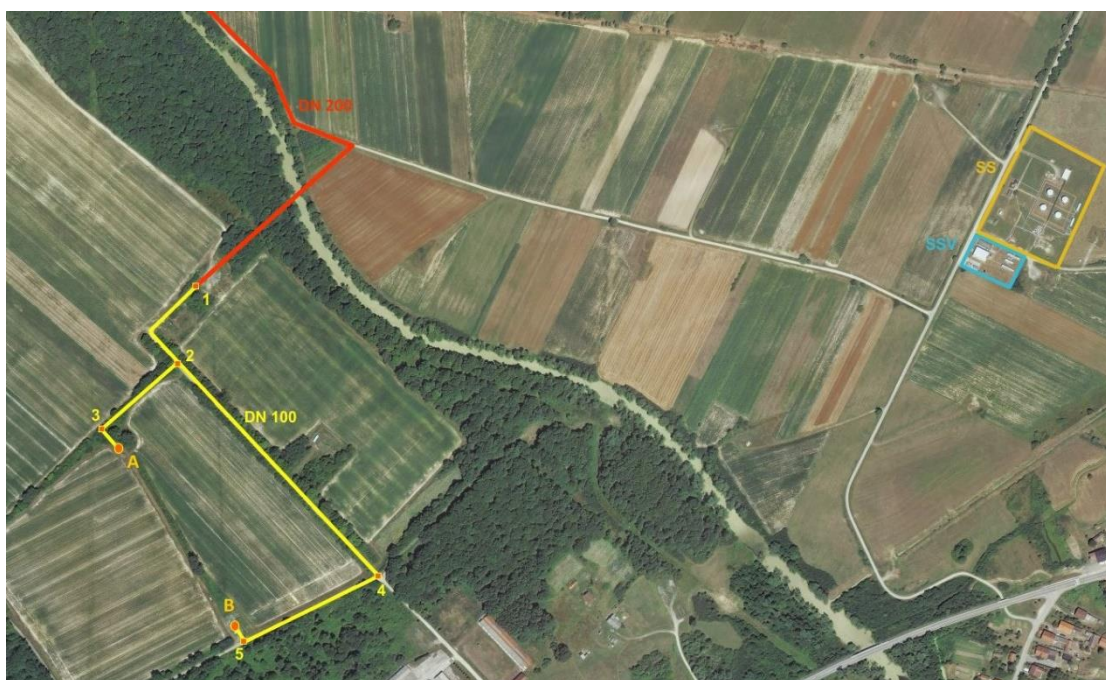
Slika 3-2. Elevacijski profil cjevovoda

U sustav transportnog cjevovoda uključeno je i 6 sekcijskih čvorova (SČ – 1, SČ – 2, SČ – 3, SČ – 4, SČ – 5 i SČ – 6) koji će biti opremljeni zapornim organima za odvajanje pojedine sekcije u slučaju tehnoloških potreba, održavanja ili sanacije propuštanja. Sustav cjevovoda će se opremiti automatskim sustavom nadzora od istjecanja CO₂. Plan trase cjevovoda sa sekcijskim čvorovima prikazan je na slici 3-1.

Glavni transportni cjevovod za transport ugljikovog dioksida završava na izlaznom čvoru SČ – 1 koji se nalazi u sklopu eksploatacijskog polja ugljikovodika.

3.2. Sustav utisnog cjevovoda za ugljikov dioksid

Za potrebe ovog projekta izgradit će se sustav utisnih cjevovoda koji će služiti za utiskivanje ugljikovog dioksida iz glavnog transportnog cjevovoda u utisne bušotine. Planirani cjevovod od SČ – 1 do utisnih bušotina A i B izrađen je od ugljičnog čelika, vanjskog promjera 114,3 mm (oznake DN 100) i radnog tlaka 110 – 200 bar. Ukupna duljina mu je 800 m. Na trasi cjevovoda, izgraditi će se 5 sekcijских čvorova od kojih će sekcijски čvor SČ – 1 služiti za povezivanje glavnog transportnog cjevovoda i sustava utisnog cjevovoda za ugljikov dioksid dok će ostali čvorovi služiti za preusmjeravanje ugljikovog dioksida do dvije odabrane utisne bušotine. Trasa utisnog cjevovoda za ugljikov dioksid s razmještajem sekcijских čvorova prikazana je na slici 3-3. Oznake SS i SSV označavaju sabirnu stanicu, odnosno stanicu slane vode. Linija žute boje označava utisni cjevovod DN 100, a linijom crvene boje s oznakom DN 200 označen je glavni transportni cjevovod za CO₂. Brojčane oznake od 1 do 5 označavaju sekcijске čvorove, dok su slovnim oznakama A i B označene utisne bušotine.



Slika 3-3. Trasa utisnog cjevovoda za utiskivanje ugljikovog dioksida

3.3. Sustav slanovoda

Projektom povećanja iscrpka predviđeno je naizmjenično utiskivanje ugljikovog dioksida i vode. Iz tog je razloga potrebno izgraditi sustav slanovoda za utiskivanje vode. Na eksploatacijskom polju se već nalazi glavni kolektorski slanovod koji je spojen sa stanicom slane vode (SSV). Potrebno je od sekcijских čvorova na glavnom slanovodu do bušotinskog radnog prostora izgraditi utisni slanovod. Pretpostavka je da će to biti polietilenski cjevovod duljine 250 m i vanjskog promjera 114,3 mm (DN 100). Uz to, planira se izgraditi i 5 pripadajućih sekcijских čvorova. Radni tlak sustava za utiskivanje vode iznositi će 10 bar. Projektirana trasa slanovoda s pripadajućim sekcijским čvorovima prikazana je na slici 3-4. Na slici je projektirana trasa slanovoda označena linijom plave boje i oznakom DN 100, brojčanim oznakama od 1 do 5 označeni su sekcijски čvorovi, a slovnim bušotine A i B. Sabirna stanica označena je kao SS, dok se oznaka SSV odnosi na stanicu slane vode.



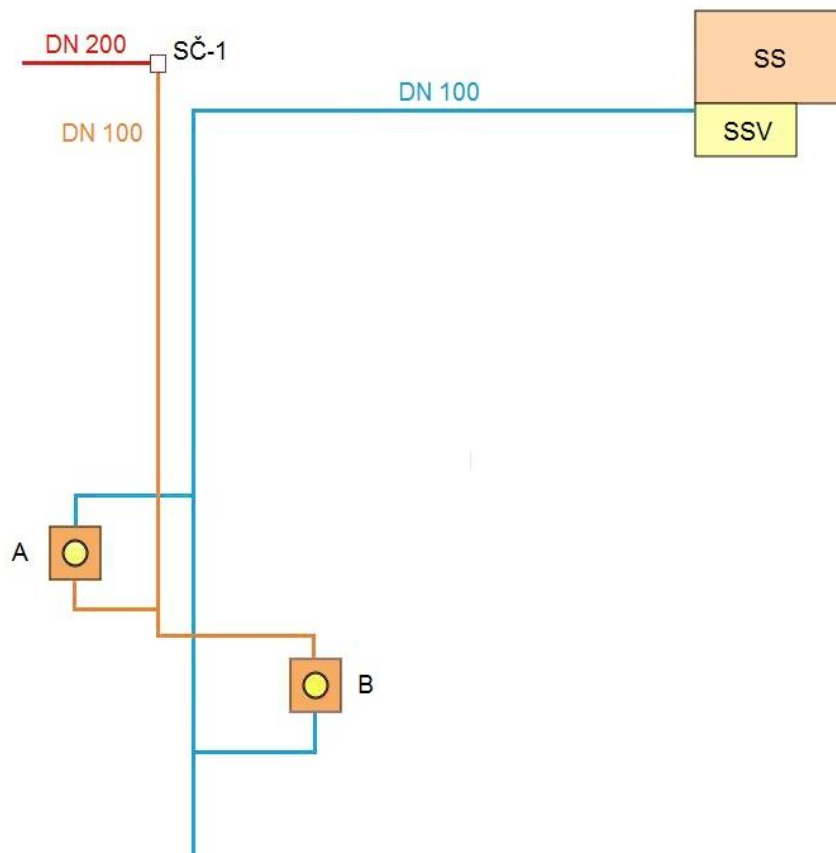
Slika 3-4. Trasa utisnog cjevovoda za utiskivanje vode

3.4. Objekti na eksploatacijskom polju ugljikovodika

Na eksploatacijskom polju u sklopu EOR projekta koristit će se sljedeći objekti: sabirna stanica i stanica slane vode. Za utiskivanje su odabrane dvije bušotine, čiji odabir definira

duljinu utisnih sustava cjevovoda za CO₂ od 800 m i utisnih slanovoda 250 m.

Na slici 3-5. shematski je prikazan položaj navedenih objekata. Sabirna stanica označena je kao SS, a stanica slane vode kao SSV. Slovnim oznakama A i B označene su utisne bušotine, dok je oznakom SČ-1 označen sekcijski čvor 1. Narančastom linijom i oznakom DN 100 označen je utisni sustav za ugljikov dioksid dok je plavom linijom i oznakom DN 100 označen utisni sustav za slanu vodu. Crvena linija i oznaka DN 200 označavaju cjevovod za transport ugljikovog dioksida.

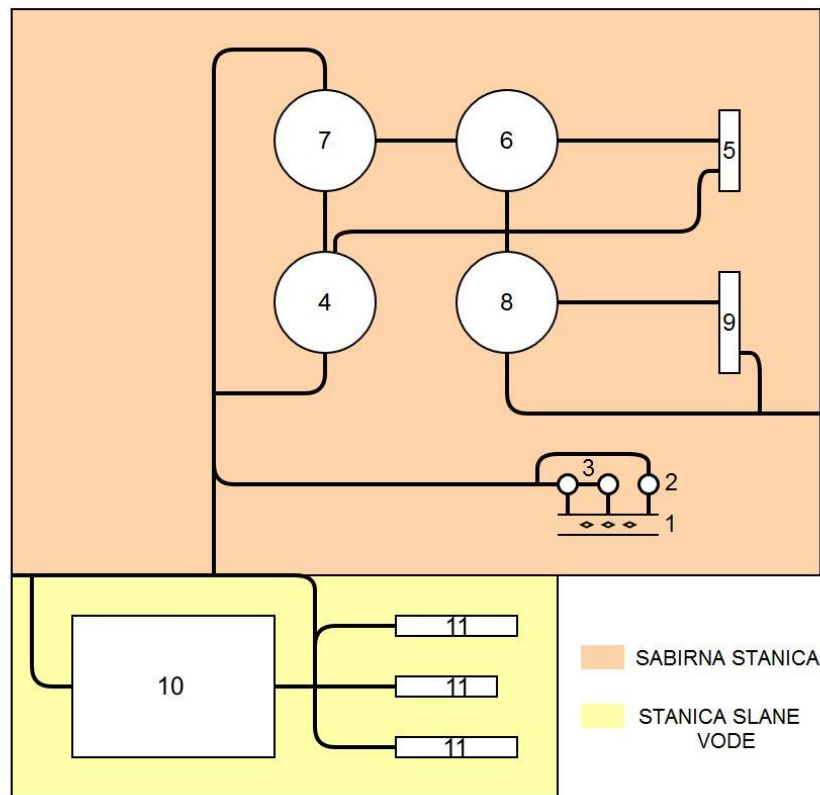


Slika 3-5. Shema objekata koji će se koristiti za utiskivanje na eksploatacijskom polju

3.4.1. Sabirna stanica

Tijekom dosadašnjeg radnog vijeka, SS je služila za prikupljanje fluida, njihovo odvajanje i mjerenje količina nafte, plina i vode. U krugu sabirne stanice nalazi se i stanica slane vode koja služi za prihvatanje izdvojene slojne vode na sabirnoj stanici i njen daljnji transport

slanovodima do utisnih bušotina. Na slici 3-6. je shematski prikazan razmještaj objekata na SS kao i na pripadajućoj SSV.



Slika 3-6. Shema objekata na sabirnoj stanici i stanici slane vode na eksploatacijskom polju

Oznake na slici 3-6. znače sljedeće:

1. Ulazni razdjelnik
2. Mjerni separator
3. Zbirni separatori
4. Odvajač slobodne vode
5. Izmjenjivač topline
6. Taložnik – dehidrator
7. Spremnik slojne vode
8. Spremnik suhe nafte 1
9. Spremnik suhe nafte 2
10. Pumpaonica slane vode
11. Spremnici slane vode

3.4.2. Opis bušotinskog radnog prostora

Tijekom provedbe EOR projekta, predviđeno je utiskivanje ugljikovog dioksida i vode u dvije bušotine – bušotinu A i bušotinu B. Za utiskivanje slojne vode, na svaku od bušotina potrebno je instalirati po dvije pumpe snage 50 kW, od kojih je jedna radna, a druga rezervna. Kako bi se bušotinska oprema zaštitila od korozivnog djelovanja ugljične kiseline, bušotinska glava i erupcijski uređaj izvedeni su od nehrđajućeg čelika 316 SS. Iz istog razloga je proizvodni niz cijevi (tubing), nazivnog promjera 60,32 mm (2 3/8") i kvalitete čelika N-80, s unutarnje strane dodatno prevučen specijalnom plastikom (*engl. Internally Plastic Coated (IPC)*).

4. PROJEKTIRANJE TRANSPORTNOG SUSTAVA U PROGRAMU HYSYS

Aspen HYSYS predstavlja vodeći programski paket, koji svoju primjenu nalazi u različitim industrijskim simulacijskim procesima. Prvenstveno se koristi u naftnoj industriji za simulaciju prikupljanja, obrade, prerade i transporta nafte i prirodnog plina. Program omogućuje optimiranje postojećih i planiranje budućih procesnih postrojenja, dimenzioniranje opreme te poboljšanje energetske učinkovitosti, uz zadržavanje visokog stupnja sigurnosti.

Za proračune u ovom radu, korištena je verzija Aspen HYSYS 8.6.

Ulazni podaci potrebni za simulaciju uključuju sastav fluida, odabir jednadžbe stanja (*engl. Equation of State – EOS*) i komponente transportnog sustava.

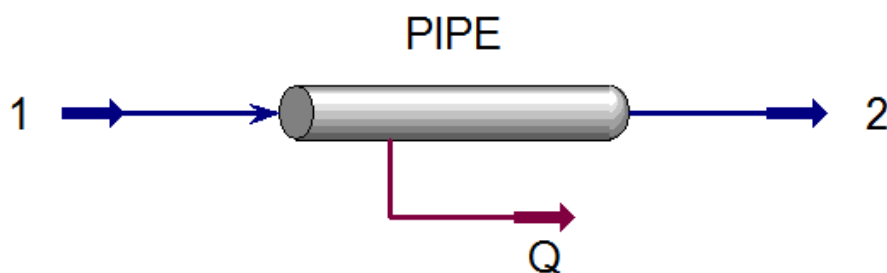
U bazi podataka nalaze se tvari koje se susreću u naftnoj i kemijskoj industriji koje je moguće jednostavno odabrati. Međutim, ukoliko se komponenta ne nalazi u bazi, moguće ju je u procesu koristiti na način da se upišu njena svojstva. Ukoliko se radi o fluidu, potrebno je unijeti temperaturu vrelišta, molarnu masu, gustoću, kritične vrijednosti tlaka, temperature i molarnog volumena te acentrični faktor, dok je, ukoliko se radi o krutini, potrebno navesti molarnu masu i pripadajuću gustoću tvari. Također, moguće je učitati i koristiti bazu komponentata modula Aspen Properties ukoliko se u bazi modula HYSYS ne nalazi tražena komponenta.

Drugi traženi podatak, prije pokretanja simulacije, je odabir odgovarajuće jednadžbe stanja za modeliranje ponašanja odabrane tvari. Kao i kod sastava fluida, i ovdje je moguće izabrati između poznatih jednadžbi stanja. Međutim, valja imati na umu da neće svaka jednadžba stanja jednako kvalitetno modelirati ponašanje fluida određenog sastava, što sugerira i sam HYSYS. Jednadžbe stanja koje se najčešće koriste u naftnom inženjerstvu su Peng – Robinson (PR) i Soave – Redlich – Kwong (SRK). Za proračune u ovom radu, jednadžba Peng – Robinson biti će korištena za slučaj modeliranja ponašanja ugljikovog dioksida u području u kojem se on ponaša kao tekućina, dok će za modeliranje ponašanja ugljikovog dioksida u superkritičnom području biti korištena jednadžba Soave – Redlich – Kwong. Korištenje ovih jednadžbi preporuča se u znanstvenim radovima koji se bave ovim područjem za proračun utiskivanja CO₂ u pilot projektu na polju Ivanić (Novosel, 2010).

Nakon odabira komponentnog sastava i odgovarajuće jednadžbe stanja, pristupa se simulaciji protjecanja fluida cjevovodom. Za početak je potrebno unijeti ulazne podatke.

Prvi podatak u nizu je udio pojedine komponente u sastavu fluida, u ovom slučaju CO₂, koji se može izraziti kao molni ili maseni udio ili pak kao molni, maseni ili volumni protok. Ostali traženi podaci su tlak i temperatura, te protok smjese. Protok može biti definiran kao molarni, maseni ili volumni izražen u standardnim uvjetima.

Za proračun ponašanja fluida u cjevovodu koristi se model PIPE shematski prikazan na slici 4-1. Proračun podrazumijeva izračun vrijednosti svojstava fluida na izlazu iz pojedinog segmenta cjevovoda. Svojstva fluida čije se vrijednosti prate su: tlak, temperatura, gustoća, brzina i viskoznost. Proračun se temelji na definiranju vrijednosti ulaznih (1) ili izlaznih (2) podataka. Ulazni/izlazni podaci koji su potrebni su: tlak, temperatura i protok smjese te udio pojedine komponente u sastavu fluida. Na taj način, ukoliko se zadaju podaci na ulazu u cjevovod, program izračunava vrijednosti na izlazu iz cjevovoda. Pritom se, ukoliko je cjevovod podijeljen na više segmenata, izlazni podaci na kraju prvog segmenta koriste kao ulazni podaci za proračun drugog segmenta, a izlazni podaci drugog segmenta kao ulazni podaci za treći segment itd. Analogno, moguće je uz definirani komponentni sastav i protok zadati izlazne podatke (tlak i temperaturu) na kraju cjevovoda, a HYSYS pritom daje izračun (tlaka, temperature, gustoće, brzine i viskoznosti fluida) na ulazu u cjevovod.



Slika 4-1. Model cjevovoda u modulu HYSYS

Za proračun svakog segmenta cjevovoda, potrebno je definirati pripadajuće podatke: duljinu segmenta, visinsku promjenu (elevaciju), nominalni promjer cijevi te odabrati vrstu cijevi (čelik, plastična masa...). Vrsta cijevi može se izabrati iz postojeće baze ili pak korisnik može definirati parametre, kao što su hrapavost cijevi i njena toplinska vodljivost. S aspekta gubitka toplote (Q), potrebno je definirati dubinu ukopavanja cjevovoda i vrstu tla određene

toplinske vodljivosti, kao i odabrati toplinsku izolaciju ukoliko ona postoji. Također, važan podatak predstavlja i prosječna temperatura okoline, bilo da se radi o ukopanom ili nadzemnom cjevovodu.

4.1. Proračun glavnog transportnog cjevovoda

Za proračun cjevovoda DN 200 u modulu HYSYS, cjevovod je podijeljen na 26 segmenata duljine pojedinog segmenta 1 000 m i za svaki je utvrđena njegova ulazna i izlazna nadmorska visina.

Za potrebe ovog proračuna, odabrana je prosječna godišnja temperatura tla na dubini od 1,0 m za područje Zagreba. Ona prema Derežić i Vučetić (2011) iznosi 12,7 °C, a uzeta je kao prosjek između prosječne ljetne temperature od 18,7 i zimske od 6,7 °C. Tlo u koje je cjevovod položen čini kombinacija suhe i vlažne gline. Prvih 6 km cjevovoda položeno je u suhu glinu toplinske vodljivosti 0,48 W/m°C, segmenti od 7-16 položeni su u vlažnu glinu toplinske vodljivosti 0,75 W/m°C, a preostali dio cjevovoda položen je opet u suhu glinu. Za potrebe ovog dijela proračuna, cjevovod nije dodatno obložen toplinskom izolacijom.

Modeliranje transporta ugljikovog dioksida u superkritičnom području cjevovodom DN 200 biti će provedeno za dva projektirana protoka ugljikovog dioksida i to od 100 000 Sm^3/dan i 70 000 Sm^3/dan . U obzir će se uzeti 3 pretpostavljene vrijednosti ulaznog tlaka – 180, 150 i 120 bar. Ulazni tlakovi pretpostavljeni su na temelju dva uvjeta. Gornja granica određena je maksimalnim izlaznim tlakom na pumpi na objektu frakcionacije, koji iznosi 200 bar. Donja granica od 120 bar odabrana je s obzirom na potrebni tlak utiskivanja u ležište, kako bi se izbjegli dodatni troškovi podizanja tlaka na potrebne vrijednosti u krugu eksploatacijskog polja.

4.1.1. Proračun cjevovoda za pretpostavljene ulazne tlakove

Za svaki od tri pretpostavljena ulazna tlaka proveden je proračun koji podrazumijeva izračunavanje vrijednosti tlaka, temperature, gustoće, brzine i viskoznosti transportiranog fluida na izlazima iz pojedinih segmenata. Proračun se provodi kako bi se uvidio utjecaj veličine ulaznog tlaka na ostale promatrane vrijednosti pri konstantnom protoku.

Jednadžba stanja koja je korištena za ovaj dio proračuna je Peng – Robinson. Razlog odabira te jednadžbe stanja leži u činjenici da je ugljikov dioksid cijelo vrijeme transporta u tekućem stanju.

Ulazni parametri za sve tri vrijednosti ulaznog tlaka prikazani su u tablici 4-1.

Tablica 4-1. Ulazni parametri smjese transportiranog fluida

ULAZNI PARAMETRI SMJESE				
TLAK	180	150	120	bar
TEMPERATURA	28	28	28	°C
KOLIČINA	100 000	100 000	100 000	Sm^3/dan
MASENI PROTOK	7 726	7 726	7 726	kg/h
GUSTOĆA	858,85	818,04	762,53	kg/m^3

Tablice 4-2., 4-3. i 4-4. prikazuju dobivene rezultate proračuna za svaku od tri ulaznih vrijednosti tlaka. Prvi stupac navedenih tablica prikazuje broj razmatranog segmenta. Drugi stupac prikazuje elevacijski profil cjevovoda po segmentima. Početna točka definirana je metrima nadmorske visine, dok sljedeće točke prikazuju razliku visine u odnosu na početnu 108 m.n.v., koja je uzeta kao referentna.

Treći stupac prikazuje tlak ugljikovog dioksida na izlazu iz pojedinog segmenta cjevovoda. Vidljivo je da tlak neznatno varira u odnosu na početni što se može tumačiti relativno malim protokom u odnosu na odabrani nominalni promjer glavnog cjevovoda. Promjene tlaka su ovdje ponajviše uzrokovane elevacijom cjevovoda. U sva tri slučaja, raspon promjene tlaka uslijed trenja je unutar 1,5 bar. Za ulazni tlak od 120 bar, razlika između najviše i najniže vrijednosti tlaka iznosi 1,42 bar i predstavlja najmanje odstupanje.

Pad temperature duž cjevovoda nije linearan i posljedica je izmjene topline s hladnijom okolinom. Zbog nepostojanja toplinske izolacije, na prvih par kilometara cjevovoda, gubitak topline je izraženiji, dok se na kasnijim dionicama vrijednost temperature CO₂ približava konstantnoj vrijednosti.

Podaci petog stupca („Gustoća“) pokazuju gustoću ugljikovog dioksida na cijeloj trasi cjevovoda. Iako tlak utječe na gustoću fluida, zbog njegovih malih odstupanja od početne vrijednosti, promjena vrijednosti gustoće fluida pod velikim je utjecajem promjene temperature, što se može zaključiti iz priloženih tablica.

Tablica 4-2. Rezultati proračuna transportnog cjevovoda za ulazni tlak od 180 bar i protok od 100 000 Sm³/dan

SEGMENT	VRIJEDNOSTI NA IZLAZU IZ SEGMENTA					
	ELEVACIJA	TLAK	TEMPERATURA	GUSTOĆA	BRZINA	VISKOZNOST
broj	m	bar	°C	kg/m ³	m/s	mPas
1	-2,00	180,17	25,24	878,91	0,07566	0,06901
2	-8,00	180,69	22,98	894,32	0,07436	0,07333
3	-10,00	180,86	21,08	906,77	0,07333	0,07678
4	-11,00	180,95	19,51	916,48	0,07256	0,07953
5	-9,00	180,77	18,20	923,91	0,07197	0,08175
6	-13,00	181,13	17,18	929,73	0,07152	0,08349
7	-8,00	180,67	15,89	936,07	0,07104	0,08561
8	-6,00	180,48	14,97	940,40	0,07071	0,08711
9	-8,00	180,67	14,34	944,02	0,07044	0,08818
10	-5,00	180,39	13,85	946,49	0,07026	0,08898
11	-6,00	180,48	13,53	948,25	0,07013	0,08952
12	-11,00	180,94	13,32	949,59	0,07003	0,08988
13	0,00	179,91	13,08	950,31	0,06998	0,09026
14	-2,00	180,10	12,98	950,90	0,06993	0,09042
15	-3,00	180,19	12,91	951,33	0,06990	0,09055
16	-4,00	180,28	12,85	951,65	0,06988	0,09064
17	-6,00	180,46	12,84	951,84	0,06986	0,09067
18	-12,00	181,02	12,85	952,09	0,06984	0,09067
19	-11,00	180,93	12,81	952,22	0,06983	0,09073
20	-16,00	181,39	12,83	952,42	0,06982	0,09072
21	-10,00	180,83	12,76	952,44	0,06982	0,09081
22	-16,00	181,39	12,79	952,60	0,06981	0,09079
23	-14,00	181,20	12,76	952,65	0,06980	0,09083
24	-14,00	181,20	12,75	952,71	0,06980	0,09085
25	-13,00	181,10	12,73	952,74	0,06980	0,09087
26	-13,00	181,10	12,72	952,77	0,06979	0,09088

Tablica 4-3. Rezultati proračuna transportnog cjevovoda za ulazni tlak od 150 bar i protok od 100 000 Sm^3/dan

SEGMENT	VRIJEDNOSTI NA IZLAZU IZ SEGMENTA					
	ELEVACIJA	TLAK	TEMPERATURA	GUSTOĆA	BRZINA	VISKOZNOST
broj	m	bar	°C	kg/m ³	m/s	mPas
1	-2,00	150,16	25,46	845,67	0,07863	0,06691
2	-8,00	150,66	23,33	863,43	0,07702	0,07112
3	-10,00	150,83	21,50	877,99	0,07574	0,07455
4	-11,00	150,92	19,96	889,59	0,07475	0,07734
5	-9,00	150,74	18,66	898,67	0,07400	0,07965
6	-13,00	151,09	17,62	905,89	0,07341	0,08146
7	-8,00	150,64	16,27	914,02	0,07275	0,08375
8	-6,00	150,46	15,30	919,63	0,07231	0,08538
9	-8,00	150,64	14,61	923,78	0,07198	0,08655
10	-5,00	150,36	14,07	926,77	0,07175	0,08744
11	-6,00	150,45	13,71	928,94	0,07158	0,08806
12	-11,00	150,91	13,47	930,60	0,07146	0,08848
13	0,00	149,90	13,18	931,55	0,07138	0,08892
14	-2,00	150,08	13,07	932,32	0,07132	0,08912
15	-3,00	150,17	12,97	932,90	0,07128	0,08928
16	-4,00	150,26	12,90	933,33	0,07125	0,08940
17	-6,00	150,44	12,88	933,57	0,07123	0,08944
18	-12,00	150,99	12,89	933,88	0,07121	0,08945
19	-11,00	150,89	12,85	934,05	0,07119	0,08952
20	-16,00	151,35	12,86	934,30	0,07117	0,08952
21	-10,00	150,80	12,78	934,34	0,07117	0,08962
22	-16,00	151,35	12,81	934,54	0,07116	0,08960
23	-14,00	151,16	12,78	934,62	0,07115	0,08965
24	-14,00	151,16	12,76	934,70	0,07114	0,08967
25	-13,00	151,06	12,74	934,74	0,07114	0,08970
26	-13,00	151,06	12,74	934,78	0,07114	0,08972

Tablica 4-4. Rezultati proračuna transportnog cjevovoda za ulazni tlak od 120 bar i protok od 100 000 Sm^3/dan

SEGMENT	VRIJEDNOSTI NA IZLAZU IZ SEGMENTA					
	ELEVACIJA	TLAK	TEMPERATURA	GUSTOĆA	BRZINA	VISKOZNOST
broj	m	bar	°C	kg/m ³	m/s	mPas
1	-2,00	120,15	25,78	800,80	0,08304	0,06402
2	-8,00	120,63	23,86	821,49	0,08095	0,06803
3	-10,00	120,79	22,15	838,88	0,07927	0,07143
4	-11,00	120,87	20,66	853,14	0,07795	0,07427
5	-9,00	120,70	19,36	864,65	0,07691	0,07668
6	-13,00	121,04	18,31	873,98	0,07609	0,07863
7	-8,00	120,60	16,90	884,93	0,07514	0,08114
8	-6,00	120,43	15,84	892,71	0,07449	0,08300
9	-8,00	120,60	15,07	898,35	0,07402	0,08435
10	-5,00	120,33	14,45	902,24	0,07370	0,08540
11	-6,00	120,42	14,02	905,12	0,07347	0,08614
12	-11,00	120,86	13,72	907,35	0,07329	0,08667
13	0,00	119,88	13,38	908,73	0,07318	0,08720
14	-2,00	120,06	13,22	909,85	0,07309	0,08748
15	-3,00	120,14	13,10	910,69	0,07302	0,08769
16	-4,00	120,23	13,00	911,33	0,07297	0,08785
17	-6,00	120,41	12,97	911,69	0,07294	0,08792
18	-12,00	120,94	12,97	912,10	0,07291	0,08795
19	-11,00	120,85	12,91	912,36	0,07289	0,08804
20	-16,00	121,30	12,92	912,69	0,07286	0,08805
21	-10,00	120,76	12,83	912,79	0,07285	0,08817
22	-16,00	121,29	12,86	913,05	0,07283	0,08815
23	-14,00	121,11	12,81	913,18	0,07282	0,08822
24	-14,00	121,11	12,79	913,29	0,07281	0,08825
25	-13,00	121,02	12,77	913,37	0,07280	0,08829
26	-13,00	121,01	12,76	913,44	0,07280	0,08831

Kod viših temperatura, ugljikov dioksid ima manju vrijednost gustoće, dok kod nižih temperatura, ona poprima više vrijednosti. Iz dobivenih rezultata primjećuje se kako na segmentima, kad vrijednosti temperature fluida manje osciliraju, isti uzorak pokazuju i vrijednosti gustoće fluida.

Zbog sporijeg hlađenja ugljikovog dioksida u trećem slučaju, raspon gustoća ugljikovog dioksida je veći. Primjetno je da u kasnijim segmentima, kako se temperatura ustalila, i gustoća CO₂ postaje konstanta. Ista povezanost se primjećuje i kod profila brzine fluida za sva tri slučaja. U početnim segmentima, gdje je očito smanjenje temperature i brzina se smanjuje. Kako je temperatura postala konstantna, tako se i brzina stabilizira na više – manje konstantnu vrijednost. To je posljedica promjene gustoće fluida, koja je pak, kako je navedeno, posljedica temperaturne promjene. Primjećuje se kako je u trećem slučaju brzina protjecanja ugljikovog dioksida najveća, što je rezultat njegove manje gustoće.

Zadnji stupac prikazuje promjenu viskoznosti fluida na trasi cjevovoda. I ovdje je vidljiv jasan uzorak ponašanja ugljikovog dioksida. U početnim segmentima, dok je temperatura relativno visoka, a gustoća manja, viskoznost poprima niže vrijednosti. Na većim udaljenostima od ulazne točke, pad temperature, a posljedično i porast gustoće, dovodi očekivano do povećanja viskoznosti fluida. Primjećuje se da pri konstantnoj temperaturi i konstantnoj gustoći, ugljikov dioksid poprima i konstantne vrijednosti viskoznosti. Zbog manjeg tlaka i gustoće fluida, u trećem slučaju, vrijednosti viskoznosti su najniže.

Na temelju proračuna provedenog za tri različite ulazne vrijednosti tlaka, najnepovoljnije rješenje predstavlja prvi slučaj s ulaznim tlakom od 180 bar. Razlog tomu je najveći gubitak topline u početnom dijelu cjevovoda, kao i najmanja temperatura na njegovom kraju. Iz toga proizlazi zaključak da će za transport pri većim tlakovima, ulazna temperatura trebati biti viša. Stoga će se proračun s radnim protokom od 70 000 Sm³/dan provesti samo za vrijednosti tlakova od 150 i 120 bar.

Na temelju odabranih ulaznih tlakova od 150 i 120 bar te radnog protoka CO₂ od 70 000 Sm³/dan, provest će se proračun cjevovoda kako je to opisano u prethodnom slučaju. Kao i u prethodnom slučaju, proračun se provodi za slučaj koji ne uključuje toplinsku izolaciju cjevovoda. Cilj ovoga dijela proračuna, čiji su rezultati prikazani u tablici 4-5. i tablici 4-6., je ustanoviti utjecaj smanjenja protoka na vrijednosti promatranih parametara – tlak, temperatura, gustoća, brzina i viskoznost fluida.

Tablica 4-5. Rezultati proračuna transportnog cjevovoda za ulazni tlak od 150 bar i protok od 70 000 Sm^3/dan

SEGMENT	VRIJEDNOSTI NA IZLAZU IZ SEGMENTA					
	ELEVACIJA	TLAK	TEMPERATURA	GUSTOĆA	BRZINA	VISKOZNOST
broj	m	bar	°C	kg/m ³	m/s	mPas
1	-2,00	150,16	24,49	853,50	0,05454	0,06884
2	-8,00	150,67	21,75	875,90	0,05314	0,07408
3	-10,00	150,84	19,59	892,22	0,05217	0,07800
4	-11,00	150,93	17,91	903,83	0,05150	0,08095
5	-9,00	150,75	16,61	912,01	0,05104	0,08317
6	-13,00	151,11	15,67	917,94	0,05071	0,08479
7	-8,00	150,66	14,57	924,07	0,05037	0,08662
8	-6,00	150,47	13,88	927,97	0,05016	0,08778
9	-8,00	150,66	13,46	930,46	0,05003	0,08848
10	-5,00	150,38	13,17	931,95	0,04995	0,08897
11	-6,00	150,47	13,00	932,92	0,04990	0,08924
12	-11,00	150,93	12,93	933,65	0,04986	0,08939
13	0,00	149,92	12,77	933,84	0,04985	0,08961
14	-2,00	150,10	12,76	934,03	0,04984	0,08964
15	-3,00	150,19	12,74	934,17	0,04983	0,08966
16	-4,00	150,28	12,73	934,28	0,04982	0,08968
17	-6,00	150,46	12,74	934,37	0,04982	0,08968
18	-12,00	151,01	12,77	934,55	0,04981	0,08965
19	-11,00	150,92	12,75	934,63	0,04980	0,08969
20	-16,00	151,38	12,77	934,80	0,04980	0,08967
21	-10,00	150,83	12,71	934,77	0,04980	0,08975
22	-16,00	151,38	12,75	934,91	0,04979	0,08970
23	-14,00	151,19	12,72	934,93	0,04979	0,08974
24	-14,00	151,19	12,72	934,96	0,04979	0,08975
25	-13,00	151,10	12,71	934,97	0,04979	0,08977
26	-13,00	151,10	12,70	934,97	0,04979	0,08977

Tablica 4-6. Rezultati proračuna transportnog cjevovoda za ulazni tlak od 120 bar i protok od 70 000 Sm^3/dan

SEGMENT	VRIJEDNOSTI NA IZLAZU IZ SEGMENTA					
	ELEVACIJA	TLAK	TEMPERATURA	GUSTOĆA	BRZINA	VISKOZNOST
broj	m	bar	°C	kg/m ³	m/s	mPas
1	-2,00	120,15	24,91	809,92	0,05747	0,06585
2	-8,00	120,64	22,38	836,38	0,05566	0,07096
3	-10,00	120,80	20,29	856,44	0,05435	0,07496
4	-11,00	120,89	18,61	871,30	0,05342	0,07807
5	-9,00	120,71	17,26	882,19	0,05276	0,08050
6	-13,00	121,06	16,25	890,26	0,05229	0,08231
7	-8,00	120,62	15,02	898,72	0,05179	0,08443
8	-6,00	120,44	14,22	903,82	0,05150	0,08579
9	-8,00	120,62	13,72	907,17	0,05131	0,08666
10	-5,00	120,35	13,35	909,27	0,05119	0,08727
11	-6,00	120,44	13,14	910,68	0,05111	0,08764
12	-11,00	120,88	13,02	911,72	0,05106	0,08785
13	0,00	119,90	12,83	912,12	0,05103	0,08813
14	-2,00	120,08	12,80	912,44	0,05102	0,08819
15	-3,00	120,17	12,77	912,68	0,05100	0,08824
16	-4,00	120,25	12,76	912,86	0,05099	0,08827
17	-6,00	120,43	12,76	912,99	0,05098	0,08828
18	-12,00	120,97	12,79	913,20	0,05097	0,08825
19	-11,00	120,88	12,76	913,31	0,05097	0,08829
20	-16,00	121,32	12,79	913,51	0,05096	0,08828
21	-10,00	120,79	12,72	913,50	0,05096	0,08836
22	-16,00	121,32	12,76	913,66	0,05095	0,08832
23	-14,00	121,14	12,73	913,70	0,05094	0,08836
24	-14,00	121,14	12,72	913,75	0,05094	0,08837
25	-13,00	121,05	12,71	913,76	0,05094	0,08839
26	-13,00	121,05	12,71	913,77	0,05094	0,08839

Uspoređujući dobivene podatke u tablicama 4-5. i 4-6., zaključuje se kako i uz smanjeni protok, postoji sporiji gubitak topline kod vrijednosti ulaznog tlaka od 120 bar. Također i odstupanje između najviše i najniže vrijednosti tlaka je manje kod vrijednosti ulaznog tlaka od 120 bar. To je i očekivano iz razloga što se kod viših vrijednosti tlakova, povećava i vrijednost gustoće fluida. I kod nižih vrijednosti protoka, zamjećuje se sličan uzorak na ostale promatrane parametre.

Uspoređujući pak dobivene podatke u tablicama 4-3. i 4-4. s podacima iz tablica 4-5. i 4-6., zamjećuje se kako, za istu vrijednost ulaznog tlaka, smanjeni protok za posljedicu ima veći početni gubitak topline, odnosno brže smanjenje temperature na početnim dionicama. Pritom je krajnja temperatura ugljikovog dioksida veća pri većem protoku. Što se tiče vrijednosti tlaka ugljikovog dioksida duž cjevovoda, ona se neznatno razlikuje za obje vrijednosti protoka. Za obje vrijednosti ulaznog tlaka, kod manjih se protoka primjećuje viša početna vrijednost viskoznosti fluida dok su krajnje vrijednosti podjednake.

4.1.2. Proračun cjevovoda za protok ugljikovog dioksida u superkritičnom stanju

Transport ugljikovog dioksida smatra se najučinkovitijim u uvjetima pri kojima se on nalazi u tzv. superkritičnom području (Serpa et al., 2011), dakle pri tlakovima većim od 73,9 bar i vrijednostima temperature iznad 31,1°C. Navedeni uvjeti kritičnih vrijednosti vrijede za „čisti“ CO₂. Prisustvom primjese u smjesi, kritične vrijednosti se mijenjaju. Za sastav smjese koja je dana u tablici 3-1., kritične vrijednosti izračunate u programu HYSYS iznose: kritični tlak 74,01 bar i kritična temperatura 30,52°C.

Uz navedene vrijednosti superkritičnog stanja ugljikovog dioksida, u ovom poglavlju će biti modeliran transport ugljikovog dioksida u superkritičnom stanju od Objekta frakcionacije od sekcijskog čvora 1 na eksploatacijskom polju.

Za potrebe ovog proračuna korištena je Soave – Redlich – Kwong jednadžba stanja za dvije vrijednosti ulaznih tlakova – 150 i 120 bar.

Uz ulazni protok od 70 000 Sm³/dan i protjecanje cjevovodom bez izolacije, temperatura ugljikovog dioksida se tijekom transporta ne može zadržati iznad kritične vrijednosti. Razlog tome je mali protok u odnosu na promjer cjevovoda uz veliki koeficijent prijenosa topline. Zato je za ovaj slučaj razmotreno protjecanje izoliranim cjevovodom. Za toplinsku izolaciju cjevovoda odabrana je uretanska pjena, toplinske vodljivosti od 0,018 W/m°C i debljine

izolacijskog sloja 10 cm. Proračun cjevovoda je proveden za dvije različite vrijednosti ulaznog tlaka, a uz svaku vrijednost tlaka proračun obuhvaća tri ulazne vrijednosti temperature. Vrijednosti ulazne temperature su pretpostavljene vodeći se činjenicom da je za veći ulazni tlak potrebna veća ulazna temperatura. Ulazni podaci koji su korišteni za toplinski proračun dani su u tablici 4-7, a dobiveni rezultati prikazani su u tablici 4-8.

Tablica 4-7. Ulazni parametri za toplinski proračun cjevovoda

ULAZNI PARAMETRI SMJESE							
TLAK	150			120			bar
TEMPERATURA	55	60	65	45	50	55	°C
GUSTOĆA	550,51	510,21	471,79	541,42	483,44	427,59	kg/m ³
KOLIČINA	70 000						Sm ³ /dan
MASENI PROTOK	5 409						kg/h

Tablica 4-8. Rezultati toplinskog proračuna

REZULTATI PRORAČUNA							
TLAK	150			120			bar
TEMPERATURA NA ULAZU	55	60	65	45	50	55	°C
TEMPERATURA NA IZLAZU	29,91	32,44	35,71	27,80	31,15	34,52	°C

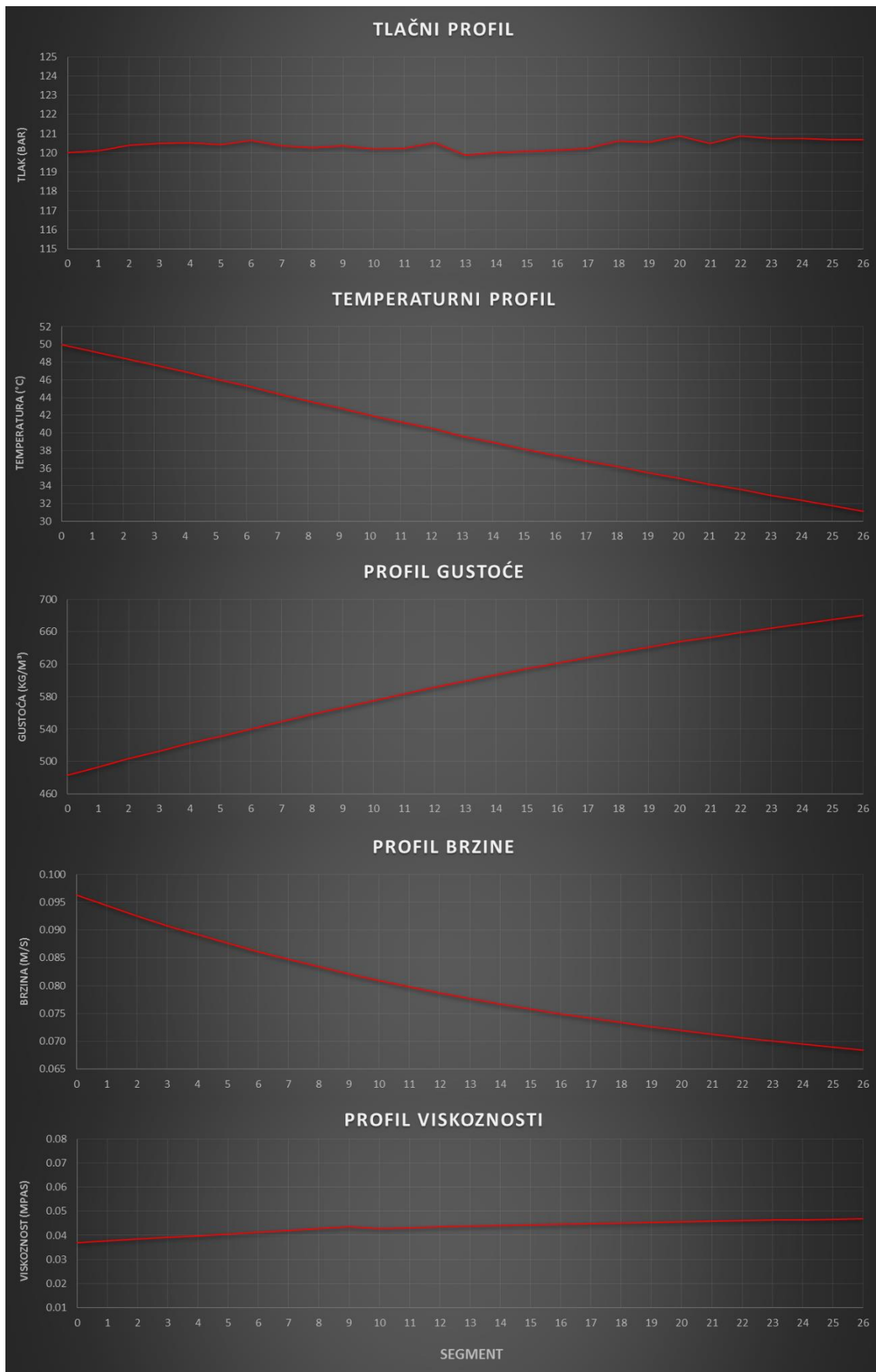
Temeljem dobivenih rezultata, optimalni izbor predstavlja ulazna temperatura fluida od 50°C, uz ulazni tlak od 120 bar. Kako vrijednosti tlaka i temperature ugljikovog dioksida ispred pumpaonice na Objektu frakcionacije iznose 100 bar i 25°C, potreban je manji utrošak energije za podizanje vrijednosti tlaka ugljikovog dioksida na 120 bar. Također je i energetski povoljnije ostvariti ulaznu temperaturu na početku cjevovoda od 50°C. Stoga će se taj rezultat uzeti kao mjerodavan za definiranje operativnih parametara protjecanja cjevovodom.

Ukoliko se u budućnosti, zbog povećavanja opsega EOR projekta, iskaže potreba za povećanjem protoka ugljikovog dioksida cjevovodom, zadovoljavajuća ulazna temperatura moći će biti i niža od navedene. Međutim, nju će svakako trebati proračunati za budući protok.

Cjeloviti proračun za odabrane ulazne vrijednosti prikazan je u tablici 4-9. Dobiveni rezultati su prikazani i ilustrativno na slici 4-2.

Tablica 4-9. Cjeloviti proračun cjevovoda DN 200

SEGMENT	VRIJEDNOSTI NA IZLAZU IZ SEGMENTA					
	ELEVACIJA	TLAK	TEMPERATURA	GUSTOĆA	BRZINA	VISKOZNOST
broj	m	bar	°C	kg/m ³	m/s	mPas
1	-2,00	120,09	49,20	493,31	0,09436	0,03764
2	-8,00	120,39	48,47	503,23	0,09250	0,03838
3	-10,00	120,48	47,68	512,80	0,09077	0,03911
4	-11,00	120,53	46,89	522,16	0,08915	0,03983
5	-9,00	120,43	46,06	531,20	0,08763	0,04055
6	-13,00	120,64	45,33	540,35	0,08615	0,04130
7	-8,00	120,37	44,44	549,24	0,08475	0,04203
8	-6,00	120,26	43,61	558,06	0,08341	0,04278
9	-8,00	120,37	42,84	566,86	0,08212	0,04355
10	-5,00	120,20	42,01	575,20	0,08093	0,04282
11	-6,00	120,25	41,25	583,50	0,07977	0,04316
12	-11,00	120,54	40,55	591,78	0,07866	0,04351
13	0,00	119,89	39,64	599,10	0,07770	0,04378
14	-2,00	120,01	38,92	606,78	0,07671	0,04409
15	-3,00	120,07	38,19	614,20	0,07579	0,04438
16	-4,00	120,13	37,48	621,40	0,07491	0,04466
17	-6,00	120,25	36,81	628,16	0,07410	0,04492
18	-12,00	120,62	36,21	634,90	0,07332	0,04518
19	-11,00	120,56	35,52	641,15	0,07260	0,04541
20	-16,00	120,87	34,92	647,47	0,07189	0,04565
21	-10,00	120,49	34,20	653,13	0,07127	0,04584
22	-16,00	120,87	33,63	659,11	0,07062	0,04606
23	-14,00	120,74	32,97	664,57	0,07004	0,04625
24	-14,00	120,74	32,36	669,94	0,06948	0,04643
25	-13,00	120,67	31,74	675,09	0,06895	0,04661
26	-13,00	120,67	31,15	680,11	0,06844	0,04678



Slika 4-2. Grafički prikaz rezultata za cjevovod DN 200

Tablica 4-9. prikazuje dobivene rezultate za odabrane ulazne vrijednosti tlaka od 120 bar i temperature od 50°C. Ugljikov dioksid se cijelo vrijeme transporta nalazi iznad kritičnih vrijednosti tlaka i temperature. Ukoliko se usporede rezultati prikazani tablicom 4-9. s onima u tablici 4-6., zaključuje se kako se pri transportu ugljikovog dioksida u superkritičnim uvjetima, javljaju manja odstupanja vrijednosti tlaka. U takvim uvjetima transporta, odstupanje tlaka između najniže i najviše vrijednosti iznosi 0,98 bar, dok je kod transporta ugljikovog dioksida u uvjetima kad je on u tekućem stanju, ta vrijednost 1,42 bar. Pritom je izlazna vrijednost tlaka u slučaju transporta ugljikovog dioksida u uvjetima kad je on u tekućem stanju viša, što je posljedica negativne elevacije cjevovoda. Pri transportu u uvjetima kad je ugljikov dioksid u superkritičnom području, vrijednosti gustoće, a posebno viskoznosti, mnogo su niže i mijenjaju se ovisno o promjeni temperature ugljikovog dioksida. Posljedično, brzina protjecanja je mnogo veća.

Odabrani parametri protjecanja ugljikovog dioksida cjevovodom DN 200 prikazani su u tablici 4-10.

Tablica 4-10. Odabrani operativni parametri cjevovoda

ODABRANI OPERATIVNI PARAMETRI CJEVOVODA		
TLAK NA ULAZU	120	bar
TEMPERATURA NA ULAZU	50	°C
KOLIČINA	70 000	Sm^3/dan
MASENI PROTOK	5 409	kg/h

4.1.3. Utjecaj promjera cjevovoda na izlazne vrijednosti tlaka i temperature

Na temelju malih odstupanja vrijednosti tlaka u odnosu na ulaznu vrijednost, zaključuje se kako je odabrani promjer cjevovoda prevelik s obzirom na količinu ugljikovog dioksida koja će se prema projektu transportirati. Stoga je proveden proračun kako bi se uvidio utjecaj smanjenja promjera cjevovoda na održavanje potrebnih vrijednosti izlaznog tlaka i temperature. U obzir su uzeta tri manja promjera cjevovoda i za svaki promjer je proveden proračun za dva različita protoka – 70 000 Sm^3/dan i 100 000 Sm^3/dan . Rezultati proračuna prikazani su u tablici 4-11.

Tablica 4-11. Utjecaj promjera cjevovoda na izlazne vrijednosti tlaka i temperature ugljikovog dioksida

KOLIČINA	VANJSKI PROMJER	IZLAZNE VRIJEDNOSTI	
		TLAK	TEMPERATURA
<i>Sm³/dan</i>	<i>mm</i>	<i>bar</i>	°C
70 000	168,3	120,53	33,73
	114,3	119,34	36,71
	88,9	115,16	37,72
100 000	168,3	120,34	38,16
	114,3	117,88	40,14
	88,9	109,06	39,59

Rezultati iz tablice 4-11. pokazuju kako je odabrani vanjski promjer cjevovoda od 219,1 mm (8") prevelik s obzirom na radni protok. Puno bolji rezultati postižu se korištenjem manjih promjera cjevovoda. Konkretno, za protok od 70 000 *Sm³/dan*, cjevovod vanjskog promjera 114,3 mm (4") omogućava zadržavanje više izlazne temperature ugljikovog dioksida, uz neznatno manji izlazni tlak od 119,34 bar. U slučaju većeg protoka od 100 000 *Sm³/dan*, izlazna temperatura ima još višu vrijednost, ali uz očekivano dosta manji izlazni tlak od 117,88 bar. Pri protoku od 70 000 *Sm³/dan*, cjevovod vanjskog promjera od 88,9 mm (3") omogućava zadržavanje izlazne temperature na još višoj vrijednosti od onog vanjskog promjera 114,3 mm (4"), dok je kod protoka od 100 000 *Sm³/dan* izlazna temperatura niža nego kod većeg promjera cjevovoda, što je posljedica znatnijeg pada tlaka. Na temelju dobivenih rezultata, zaključuje se kako bi za potrebe ovog projekta bilo ekonomičnije koristiti cjevovod manjeg promjera. Međutim, kako se EOR projekt utiskivanja ugljikovog dioksida planira provoditi dugoročno, za očekivati je i proširenje projekta, pa bi uz postojeće spoznaje o stvarnim potrebnim količinama i ponašanju CO₂ trebalo provesti modeliranje sustava i potvrditi odabir optimalnog promjera cjevovoda.

4.2. Proračun utisnog cjevovoda za CO₂ od glavnog cjevovoda do utisnih bušotina

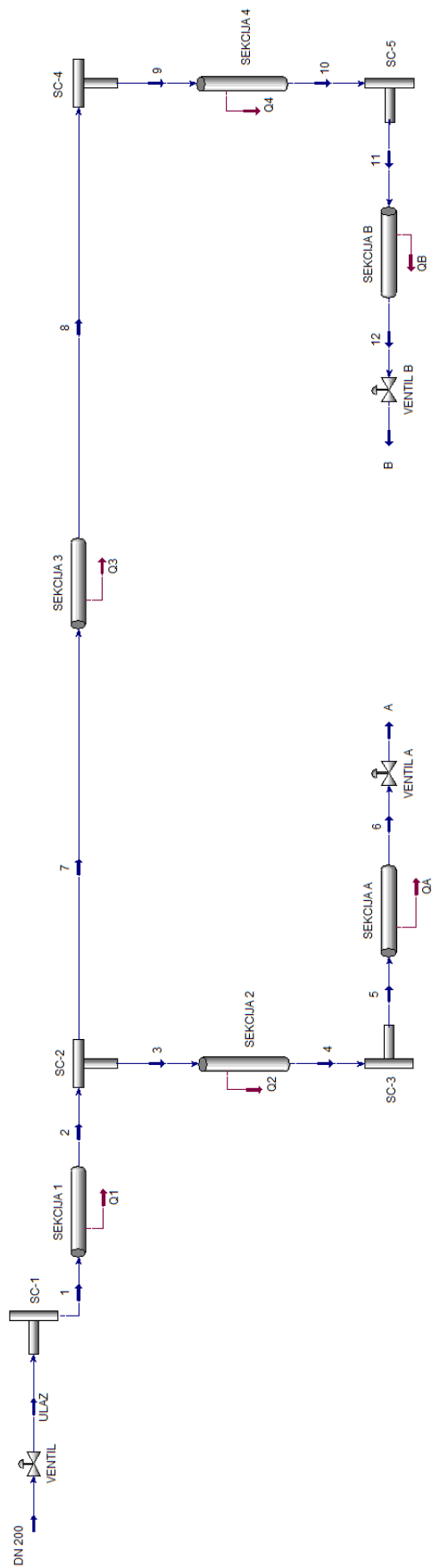
Na području eksploatacijskog polja ugljikovodika u dvije bušotine utiskivati će se ugljikov dioksid. Planirana trasa cjevovoda bi obuhvaćala ulaz na prvom sekcijском čvoru. On ujedno služi i kao krajnja, odnosno prihvatna točka glavnog cjevovoda DN 200. Dionica do sekcijского čvora 2 iznosi 130 m, nakon čega se cjevovod račva na dva kraka. Jedan krak cjevovoda ide prema sekcijском čvoru 3 u duljini od 110 m na koji se spaja nadzemni cjevovod duljine 20 m koji završava u radnom krugu bušotine A. Drugi krak od sekcijского čvora 2 proteže se u duljini od 350 m do čvora 4. Od njega u duljini od 180 m se pruža cjevovod do sekcijского čvora 5. Na njega se nastavlja 10 m nadzemnog cjevovoda koji završava u radnom krugu bušotine B.

Kako se ugljikov dioksid nalazi u tekućem stanju, za potrebe proračuna također je korištena jednadžba stanja Peng – Robinson. Za dubinu polaganja cjevovoda uzeta je dubina od 1,0 m i ona je konstantna cijelom trasom. Izuzetak su jedino cjevovodi od sekcijских čvorova SČ - 3 i SČ - 5 gdje su cjevovodi od njih prema bušotinama izvedeni nadzemno.

Na slici 4-3. shematski je prikazana trasa cjevovoda, gdje tok fluida započinje na sekcijском čvoru SČ - 1, dok izlazi predstavljaju bušotine A i B, a ulazni parametri za početak proračuna dani su u tablici 4-12.

Za proračun nadzemnog dijela cjevovoda, temperatura okoline iznosi 18,3 °C. Podatak je preuzet sa stranice Državnog hidrometeorološkog zavoda i predstavlja srednju godišnju temperaturu zraka za područje Zagreba (<http://www.dhmz.htnet.hr>, 2016). Ukopani dio cjevovoda položen je u suhu glinu toplinske vodljivosti 0,48 W/m°C, čija prosječna temperatura na dubini od 1,0 m iznosi 12,7 °C.

Ulaznu točku za proračun predstavlja sekcijский čvor 1. On ujedno predstavlja i krajnji, odnosno izlazni čvor glavnog transportnog cjevovoda DN 200. Iz tog razloga, ulazna temperatura proračuna iznosi 30,5 °C, što je i izlazna temperatura ugljikovog dioksida na kraju glavnog transportnog cjevovoda umanjena za pad temperature na prigušnom ventilu koji je na shemi na slici 4-3. označen kao VENTIL. Vrijednost tlaka na izlazu iz glavnog transportnog cjevovoda je 120,67 bar. Ta vrijednost, nakon pada na prigušnom ventilu, iznosi 115,65 bar, te je ona uzeta za ulaznu vrijednost tlaka.



Slika 4-3. Shema utisnog sustava cjevovoda za utiskivanje CO₂ u utisne bušotine

Tablica 4-12. Ulazni parametri proračuna cjevovoda za utiskivanje CO₂

ULAZNI PARAMETRI SMJESE		
VELIČINA	VRIJEDNOST	JEDINICA
MOLARNA MASA	43,85	kg/kmol
TLAK	115,65	bar
TEMPERATURA	30,50	°C
GUSTOĆA	748,95	kg/m ³
KOLIČINA	70 000	Sm ³ /dan
MASENI PROTOK	5 409	kg/h

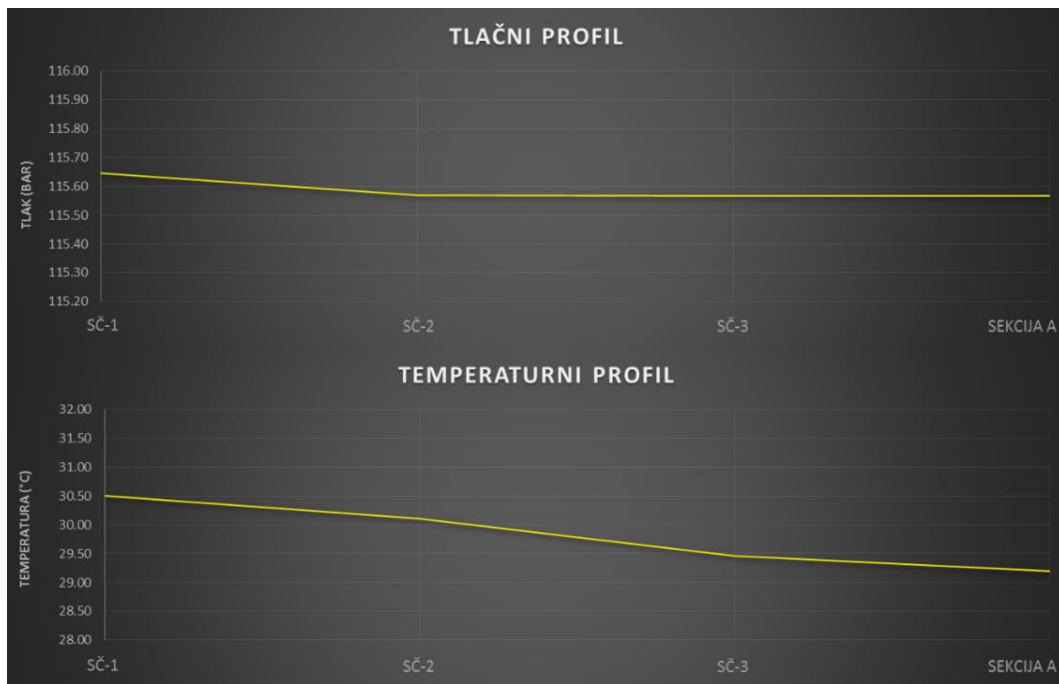
Kao i za slučaj proračuna glavnog transportnog cjevovoda, tablični rezultati uključuju elevaciju cjevovoda te tlak, temperaturu, gustoću, brzinu i viskoznost ugljikovog dioksida.

Tablica 4-13. prikazuje rezultate proračuna utiskivanja ugljikovog dioksida. Pripadajući grafički prikazi rezultata za tlak i temperaturu dani su na slikama 4-4. i 4-5.

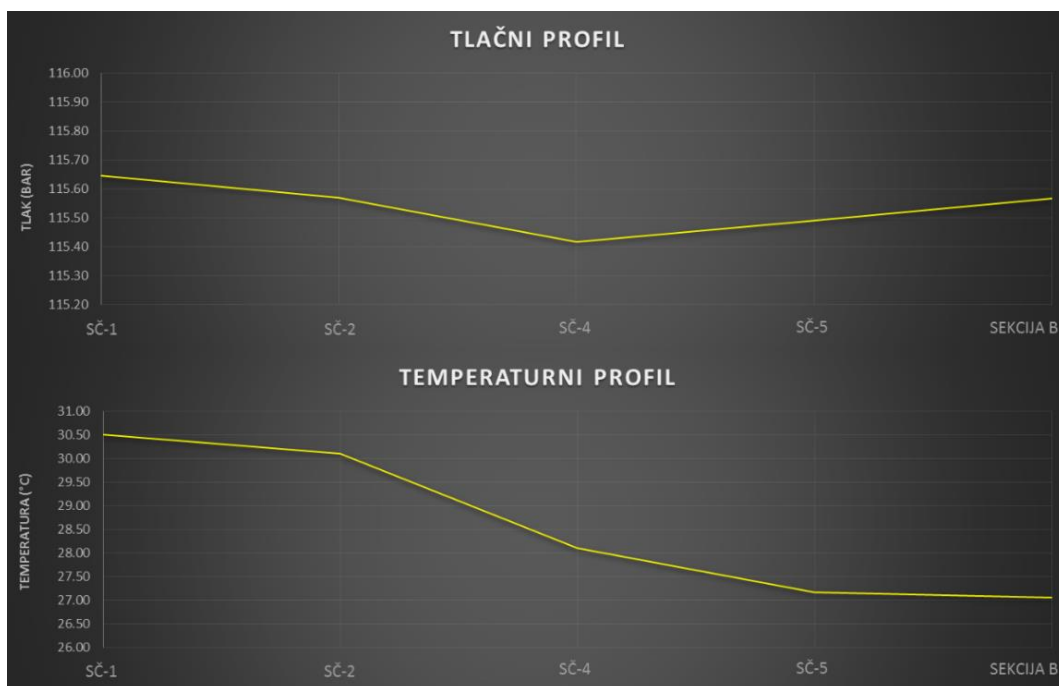
Tablica 4-13. Rezultati proračuna cjevovoda za utiskivanje CO₂

SEGMENT	VRIJEDNOSTI NA IZLAZU IZ SEGMENTA					
	ELEVACIJA	TLAK	TEMPERATURA	GUSTOĆA	BRZINA	VISKOZNOST
OBJEKT	m	bar	°C	kg/m ³	m/s	mPas
SČ-1	0,00	115,65	30,50	748,95	0,24424	0,04981
SČ-2	1,00	115,57	30,10	751,92	0,12164	0,05199
SČ-3	1,00	115,57	29,47	755,41	0,12108	0,05448
SEKCIJA A	1,00	115,57	29,20	757,55	0,12073	0,05531
SČ-4	3,00	115,42	28,10	767,58	0,11916	0,05824
SČ-5	2,00	115,49	27,16	777,62	0,11762	0,06050
SEKCIJA B	1,00	115,57	27,06	778,86	0,11743	0,06074

Bitno je napomenuti da sekcijski čvor 2 predstavlja mjesto razdvajanja smjese fluida na dva identična protoka. Iz tog razloga, vrijednosti brzine koje odgovaraju izlazu iz SČ – 2, predstavljaju brzinu samo jednog kraka tog čvora, iako SČ – 2 u stvarnosti ima dva identična kraka, čije su izlazne brzine jednake.



Slika 4-4. Grafički prikaz rezultata za bušotinu A



Slika 4-5. Grafički prikaz rezultata bušotinu B

SEKCIJA A i SEKCIJA B označavaju izlaz iz cjevovoda u krugu bušotine A, odnosno bušotine B.

Iz tablice je vidljivo da se vrijednosti tlaka ne mijenjaju previše, odnosno one su i očekivane s obzirom na promjer cjevovoda i maseni protok. Kod temperature, postoje mala odstupanja duž cjevovoda što je posljedica male duljine cjevovoda. Promjena gustoće i viskoznosti fluida obrnuto su proporcionalne promjeni temperature, dok pad vrijednosti brzine fluida prati pad njegove temperature.

Iz grafičkih prikaza na slikama 4-4. i 4-5. vidljivo je da su promjene tlaka uzrokovane prvenstveno elevacijom cjevovoda. Temperaturne promjene ovise o duljini trase, pa je stoga temperatura fluida na izlazu iz SEKCIJI B niža. Pritom se u oba slučaja primjećuje slabiji pad temperature na nadzemnom dijelu cjevovoda.

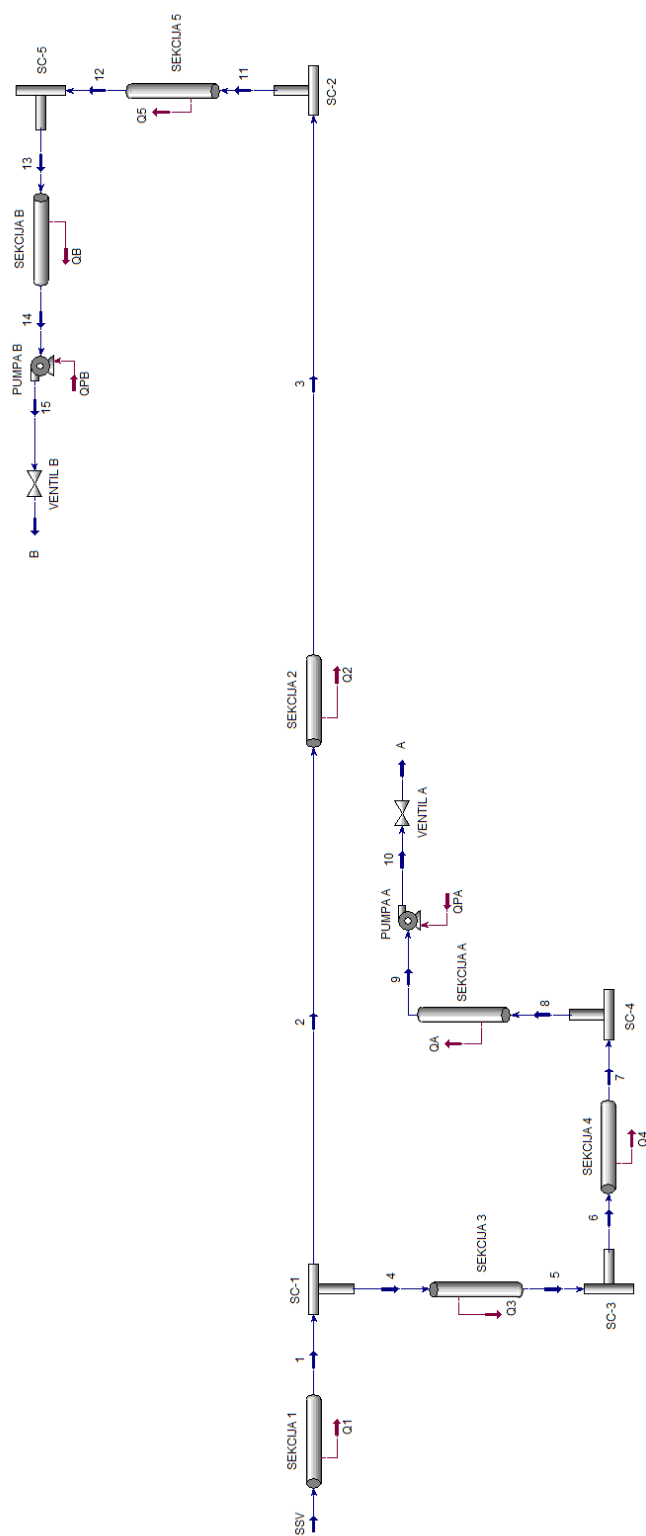
4.3. Proračun slanovoda za utiskivanje vode

Na eksploatacijskom polju ugljikovodika već od ranije postoji tzv. vodeni prsten, odnosno sustav glavnog razvodnog slanovoda koji se koristi za utiskivanje slojne vode u ležište. Glavna trasa slanovoda započinje na izlazu iz stanice slane vode u krugu sabirne stanice. Uz postojeći slanovod, projektom je predviđena izgradnja dodatnih utisnih kolektora u duljini od 250 m. Duljina postojećeg cjevovoda od SS, točnije SSV, do sekcijskog čvora 1 iznosi 1 220 m, dok udaljenost između sekcijskog čvora 1 i sekcijskog čvora 2 iznosi dodatnih 300 m. Od SČ - 1 do bušotinske glave bušotine A, duljina ukopanog cjevovoda iznosi 185 m, a duljina nadzemnog 20 m. Od SČ - 2 do bušotinske glave bušotine B ukopani cjevovod je duljine 35 m, dok je 10 m nadzemnog cjevovoda. Dnevno se planira utiskivati 200 m³ slane vode u dvije bušotine, pri čemu se ista količina utiskuje u obje bušotine.

Shematski sustav za utiskivanje vode na eksploatacijskom polju ugljikovodika vidljiv je na slici 4-6.

Za potrebe proračuna utiskivanja slane vode, bilo je potrebno definirati njen sastav. U proračunu je korištena kombinacija čiste vode i soli, točnije natrijevog klorida (NaCl). Kako baza Aspen HYSYS-a ne sadrži natrijev klorid, komponenta soli je preuzeta iz baze Aspen Properties modula. Isto tako, kako se radi o kombinaciji vode i soli, korištenje PR i SRK jednadžbi dalo je krive rezultate već na samome početku proračuna. Tako, na primjer PR i SRK jednadžbe daju ulaznu gustoću čiste vode pri standardnim uvjetima od 1015 kg/m³, što već na samome početku predstavlja svojevrsnu pogrešku. Iz tog razloga, umjesto kubičnih

jednadžbi stanja, odabran je termodinamički paket Electrolyte NRLT koji je također preuzet iz Aspen Properties modula.



Slika 4-6. Shema utisnog sustava slanovoda za utiskivanje slane vode

Rezultat gustoće čiste vode pri standardnim uvjetima na ulazu od 998,6 kg/m³ predstavlja realnu vrijednost na temelju koje se mogu očekivati dobri rezultati. U proračunu je korištena slana voda čiji je salinitet 11,4 g NaCl/ dm³ H₂O.

Početna točka proračuna je izlazni čvor na stanici slane vode koji je označen sa SSV. Od sekcijских čvorova 1 i 2, napravljen je proračun prema bušotinama A i B. Do kruga bušotine A, odnosno bušotine B, voda je otpremana tlakom klipnih pumpi u stanici slane vode. Pumpe su dvije, svaka snage 50 kW. Samo utiskivanje vode u bušotine obavlja se pripadajućim pumpama A i B koje se nalaze u radnom krugu pojedine bušotine. Iza pumpi nalazi se protupovratni ventil koji regulira tlak utiskivanja. U tablici 4-14. prikazani su rezultati proračuna slanovoda za utiskivanje vode.

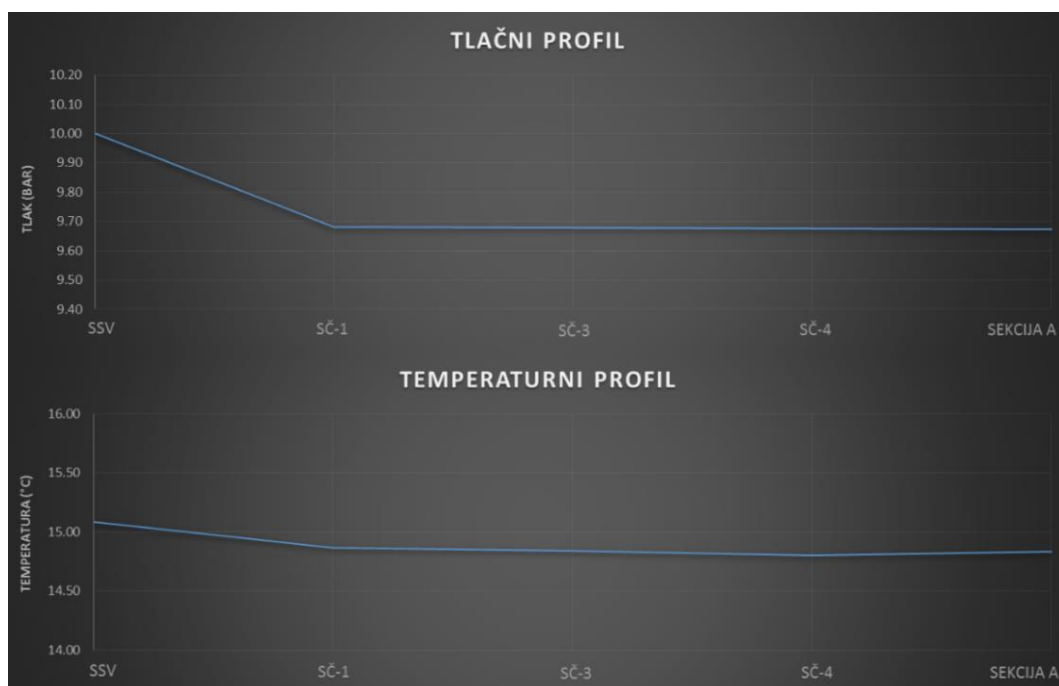
Tablica 4-14. Rezultati proračuna slanovoda za utiskivanje slane vode

SEGMENT	VRIJEDNOSTI NA IZLAZU IZ SEGMENTA					
	ELEVACIJA	TLAK	TEMPERATURA	GUSTOĆA	BRZINA	VISKOZNOST
OBJEKT	m	bar	°C	kg/m ³	m/s	mPas
SSV	0,00	10,00	15,08	1008,47	0,28193	1,29555
SČ-1	2,00	9,68	14,86	1008,49	0,14096	1,30267
SČ-2	3,00	9,57	14,76	1008,50	0,14096	1,30595
SČ-3	2,00	9,68	14,84	1008,50	0,14096	1,30345
SČ-4	2,00	9,67	14,80	1008,50	0,14096	1,30472
SEKCIJA A	2,00	9,67	14,83	1008,50	0,14096	1,30363
SČ-5	3,00	9,57	14,75	1008,50	0,14096	1,30633
SEKCIJA B	2,00	9,67	14,77	1008,51	0,14096	1,30577

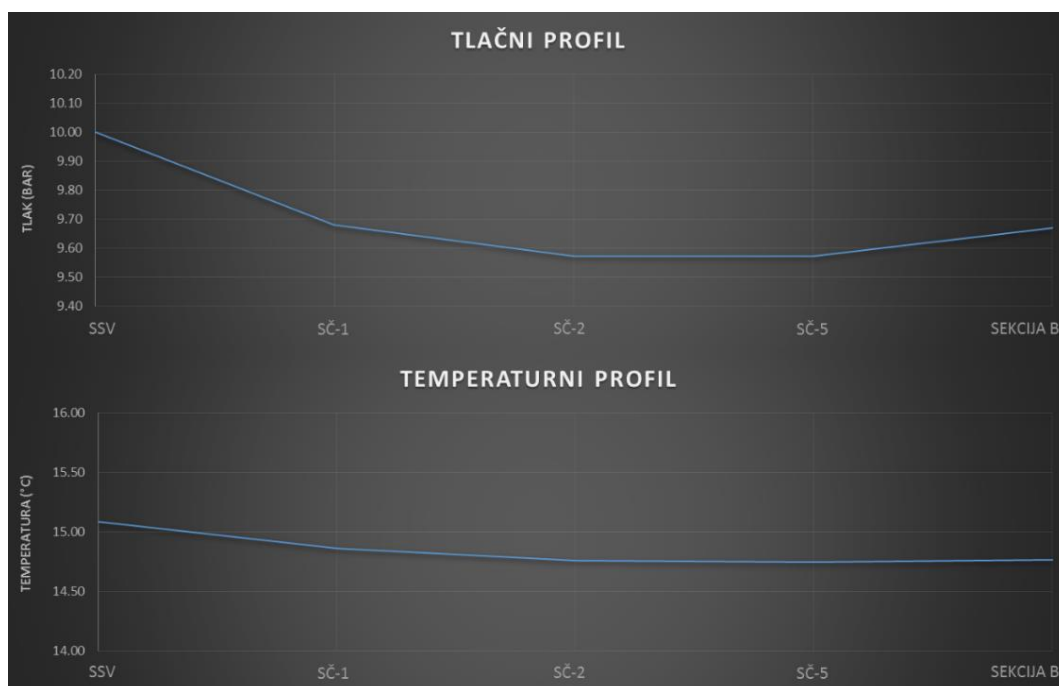
Slike 4-7. i 4-8. daju grafički prikaz rezultata rasporeda tlaka i temperature duž trase slanovoda.

Iz dobivenih rezultata je vidljivo kako je gubitak topline duž cijele trase relativno malen. Stoga i kod gustoće postoje mala odstupanja, koja neće imati veliki utjecaj na kolebanje tlaka. Najveći pad tlaka bilježi se između stanice slane vode i prvog sekcijskog čvora, što je i razumljivo s obzirom na najveću duljinu cjevovoda. Nakon sekcijskog čvora 1, polovica protoka ide prema bušotini A, a druga polovica prema bušotini B. Iza tog sekcijskog čvora,

gubitak tlaka je relativno malen, a zbog raspodjele protoka u tom čvoru, brzine protoka fluida prema bušotinama dvostruko manje.



Slika 4-7. Grafički prikaz rezultata za bušotinu A



Slika 4-8. Grafički prikaz rezultata za bušotinu B

5. ZAKLJUČAK

S obzirom na starost postojećih naftnih polja, a uzimajući u obzir visoku cijenu istražnog bušenja, primjena EOR metode za povećanje iscrpka nafte, sve je raširenija u svijetu. Prvenstveno se to odnosi na EOR metodu utiskivanja ugljikovog dioksida u naftna ležišta. Iz tog je razloga potražnja za ugljikovim dioksidom povećana. Kako se izvori CO₂ obično ne nalaze na mjestu gdje se on planira utiskivati, potrebno je omogućiti učinkoviti transport CO₂ cjevovodima. To se može postići modeliranjem transportnog sustava korištenjem programskih paketa.

Programski paket Aspen HYSYS korišten je za modeliranje transportnog sustava ugljikovog dioksida. Za slučaj mogućeg budućeg projekta utiskivanja na jednom našem polju ugljikovodika, HYSYS pruža uvid u vrijednosti velikog broja parametara tijekom protoka fluida, na bilo kojem dijelu cjevovoda. Na taj je način omogućeno praćenje i optimiranje tlaka i temperature, zadržavajući njihove vrijednosti iznad kritičnih, kako bi ugljikov dioksid tijekom transporta bio u superkritičnom području, čime se povećava učinkovitost transporta. Istovremeno se korištenjem programskog paketa povećava točnost rezultata i smanjuje mogućnost pogreške.

U radu je modelirano ponašanje ugljikovog dioksida tijekom njegovog transporta cjevovodom u superkritičnom stanju. Proračun je proveden za tri vrijednosti ulaznog tlaka i dvije vrijednosti protoka kako bi se uvidio njihov utjecaj na vrijednosti ostalih praćenih parametara. Na temelju rezultata odabrane su dvije vrijednosti ulaznog tlaka i jedna vrijednost protoka. Uz pretpostavljene tri vrijednosti ulazne temperature za obje vrijednosti tlaka, modeliran je transport ugljikovog dioksida cjevovodom zadržavajući ga pritom u superkritičnom stanju. Temeljem dobivenih rezultata, odabrani su optimalni operativni parametri cjevovoda.

S obzirom na značajne izvore antropogenog ugljikovog dioksida u Republici Hrvatskoj, za očekivati je porast broja EOR projekata utiskivanja ugljikovog dioksida u naftna ležišta. Na taj će se način smanjiti štetna emisija ugljikovog dioksida u atmosferu, ali i produljiti proizvodni vijek starih naftnih polja.

6. POPIS LITERATURE

1. AL-JARBA M., AL-ANAZI B.D., (2009): A Comparison Study of the CO₂-Oil Physical Properties Literature Correlations Accuracy Using Visual Basic Modelling Technique. *Nafta*, 60(5), str. 287-291.
2. ČIKEŠ M., (2013): Proizvodnja nafte i plina. Skripta. Rudarsko – geološko – naftni fakultet, Zagreb (neobjavljeno)
3. DAVID MARTIN F., TABER J.J., (1992): Carbon Dioxide Flooding. *Journal of Petroleum technology*, 44(04), str. 396-400.
4. DEREŽIĆ D., VUČETIĆ V., (2011): Tendencija povećanja srednje temperature tla u Hrvatskoj. *Hrvatski meteorološki časopis*, 46, str. 85-96.
5. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, (2005): Carbon Dioxide Capture And Storage. Izvješće, New York: Cambridge University Press
6. JUNG W., NICOT J.-P., (2010): Impurities in CO₂-Rich Mixtures Impact CO₂ Pipeline Design: Implications for Calculating CO₂ Transport Capacity, U: *SPE International Conference on CO₂ Capture, Storage, and Utilization, New Orleans, Louisiana, USA, 10-12 November*. SPE, 2010, str. 1-7.
7. NOVAK K., (2015): Modeliranje površinskoga transporta i geološki aspekti skladištenja ugljikova dioksida u neogenska pješčenjačka ležišta Sjeverne Hrvatske na primjeru polja Ivanić. Doktorski rad. Zagreb. Rudarsko – geološko – naftni fakultet
8. NOVOSEL D., (2010): Učinak ugljičnog dioksida u terciarnoj fazi iskorištavanja naftnih ležišta polja Ivanić. *Nafta*, 61(6), str. 300-307.
9. RAIMONDI L., (2014): CO₂ Transportation with Pipelines - Model Analysis for Steady, Dynamic and Relief Simulation., *Chemical Engineering Transaction*, 36, str. 619-624.
10. RASSENFOSS S., (2014): More Carbon Dioxide Means More Oil: But Building On That Can Get Complicated. *Journal of Petroleum Technology*, 66(02), str. 38-50.
11. RGNF, ECOMISSION D.O.O., (2016): *Studija o utjecaju na okoliš rudarskih objekata i eksploatacije nafte i plina na eksploatacijskim poljima Stružec, Mramor Brdo, Voloder i Okoli*. Zagreb
12. SERPA J., MORBEE J., TZIMAS E., (2011): Technical and Economic Characteristics of a CO₂ Transmission Pipeline Infrastructure. European Commission
13. SMONTARA N., BILIĆ – SUBAŠIĆ V., (2014): EOR potencijal naftnih polja u Hrvatskoj. *Nafta*, 65(3), str. 224-230.

14. SIMON K., (2015): Izdvajanje kiselih plinova. Bilješke s predavanja. Rudarsko – geološko – naftni fakultet, Zagreb (neobjavljeno)

Internetski izvori:

1. DHMZ

URL: <http://www.dhmz.htnet.hr/klima/klima.php?id=srednjaci¶m=> (18.11.2016.)

2. INA, Projekt Međimurje

URL: <http://www.ina.hr/o-kompaniji/temeljne-djelatnosti/istrazivanje-i-proizvodnja-nafte-i-plina/projekt-medjimurje/9806> (07.10.2016.)

3. PETROVIĆ S., svibanj 2014. Povećanje iscrpka ugljikovodika utiskivanjem CO₂ u naftna polja Ivanić i Žutica

URL: <http://www.hkis.hr/Upload/Documents/SSU/ZagrebackiEnergetskiTjedan/Petrovic-EOR%20projekt-Povecanje%20iscrpka%20ugljikovodika%20utiskivanjem%20CO2.pdf> (8.10.2016.)

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno.

Marko Častek