Procjena dnevnog utisnog kapaciteta sustava za trajno skladištenje CO_2 u relativno plitka iscrpljena ležišta plina SJ-XY i SJ-Z lokaliteta Sjeverni Jadran

Daily Injection Capacity Assessment of the North Adriatic Relatively Shallow Gas Depleted Reservoirs SJ-XY and SJ-Z CCS Injection System



dr. sc. Goran Lešković
INA-Industrija nafte d.d., Zagreb
goran.leskovic@ina.hr

Ključne riječi: procjena dnevnog utisnog kapaciteta CO_2, relativno plitka iscrpljena ležišta plina, operativna ovojnica bušotine, integrirani injekcioni model (IIM), hvatanje i trajno skladištenje CO_2 u geološke formacije.

Key words: daily CO_2 injection capacity assessment, relatively shallow depleted gas reservoirs, well operating envelope, integrated injection model (IIM), carbon capture and storage (CCS).

Sažetak

U procesu analize potencijala iscrpljenih plitkih ležišta plina za permanentno skladištenje CO_2 na lokalitetu Sjeverni Jadran, ležišta SJ-XY i SJ-Z izdvojila su se kao potencijalno pogodna. Zbog toga je izvršena procjena dnevnog utisnog kapaciteta sustava za trajno skladištenje CO_2 u predmetna ležišta. Ležišta SJ-XY i SJ-Z relativno su plitka, cca 600 m vertikalne dubine mjereno od razine mora, iscrpljena ležišta suhog plina sa snažno izraženim vodonapornim režimom. Procjenjuje se da je ležišni tlak blizak početnom i iznosi oko 60 BARg. U svrhu procjene dnevnog utisnog kapaciteta odobalnog CCS sustava ležišta SJ-XY i SJ-Z analizirane su injektivne mogućnosti istog pod pretpostavkom da će se postojeća, inače proizvodna infrastruktura, koristiti kao injekciona. Procjena dnevnog utisnog kapaciteta sustava izvršena je uz pomoć statičkog IIM-a (bez aktivnog ležišnog modela) kroz osam mogućih scenarija dnevnog utisa svrstanih u tri grupe A, B i C. Za izradu IIM-a korišten je softverski paket IPM ver. 13.5 tvrtke Petroleum Experts. Grafički prikaz sučelja IIM-a CCS sustava ležišta SJ-XY i SJ-Z prikazan je na Slika 2.

Inicijalno je izvršena procjena injektivnosti i analiza operativnih mogućnosti kompletnog bušotinskog fonda pomoću operativnih ovojnica bušotina. Operativne ovojnice izrađene su temeljem rezultata sistemske analize bušotina. Konstrukcija operativnih ovojnica bušotina izvršena je sukladno proceduri prikazanoj u literaturi: Lešković (2024). Za izračun injektivnih karakteristika bušotina/ležišta uzete su tipične vrijednosti efektivnih propusnosti, debljine i ostalih petrofizikalnih parametara za ležišta odobalnog lokaliteta Sjeverni Jadran. Ove vrijednosti temeljene su na petrofizikalnim i hidro-

dinamičkim mjerenjima provedenim tijekom početne faze proizvodnje plina. U radu je dan primjer komparativne analize operativnih ovojnica bušotina za grupu scenarija A.

Abstract

In the process of analysing the potential of shallow depleted gas reservoirs for permanent CO_2 storage in the North Adriatic area, the SJ-XY and SJ-Z reservoirs were singled out as potentially suitable. For this reason, an assessment of the daily injection capacity of the system for permanent CO_2 storage in targeted reservoirs was made.

The SJ-XY and SJ-Z reservoirs are dry gas depleted, relatively shallow, approx. 600 m of vertical depth subsea level reservoirs with a strong water drive regime. It is estimated that the reservoir pressure is close to the initial one and is around 60 BARg. In order to assess the daily injection capacity of the offshore CCS system of the SJ-XY and SJ-Z reservoirs, the injection possibilities of the system were analysed under the assumption that the existing, otherwise production infrastructure, will be utilized. The assessment of the daily inflow capacity of the CCS systems of the SJ-XY and SJ-Z reservoirs was carried out with the help of a static IIM (without an active reservoir model) through eight possible scenarios classified into three groups A, B and C. The IIM is created utilizing software package IPM ver. 13.5 of Petroleum Experts. A graphic representation of the IIM interface of the CCS system of the SJ-XY and SJ-Z reservoirs is shown in Figure 2.

Initially, an injectivity assessment and an analysis of the operational possibilities of the complete well fund was performed by utilising operating well envelopes. Operating well envelopes were created based on the results of the wells system analysis. Construction of operating well envelopes was carried out in accordance with the procedure presented in the literature: Lešković (2024). To calculate the injection characteristics of wells/reservoirs, typical values of effective permeability, thickness and other petrophysical parameters for reservoirs in the offshore location of the Northern Adriatic were taken. These values are based on actual petrophysical and hydrodynamic measurements carried out during the initial phase of gas production. The paper also presents an example of a comparative analysis of operating well envelopes for scenario group A.

1. Uvod

U ovom radu se pod pojmom sustava za trajno skladištenje CO_2 u geološke formacije (*eng. Carbon Capture and Storage – CCS*) podrazumijeva jedinstvena cjelina koju čine bušotinski fond koji preko sustava priključnih cjevovoda i pripadajuće armature povezuje geološku strukturu/ležište i izvor CO_2, ovdje pumpnu/kompresorsku stanicu. Za injekcioni sustav se često koristi i naziv pripadajuća infrastruktura.

Integrirani injekcioni model (IIM) sustava za trajno skladištenje CO_2 u geološke formacije predstavlja jedinstveni matematički opis hidrodimačkog i termodinamičkog ponašanja geološke strukture/ležišta i pripadajuće infrastrukture sustava za skladištenje CO_2. Zasniva se na integraciji matematičkih modela nadzemnih komponenti sustava (kompresorska/pumpna stanica i mreže površinskih/podvodnih cjevovoda) i pripadajućih bušotina te modela geološke strukture/ležišta (numeričkih i/ili analitičkih) u jednu jedinstvenu cjelinu. Važnost integracije svih komponenti sustava očituje se u činjenici da u razmatranom vremenu i prostoru promjene u jednoj točki sustava neminovno uzrokuju promjene u cjelokupnom sustavu. IIM se može koristiti i parcijalno samo za analizu utisne infrastrukture. U tom slučaju odabere se ležišni tlak i temperatura u određenom vremenu i prostoru čime je za svaku od pripadajućih bušotina određen ležišni rubni uvjet modela. Ulazni rubni uvjet modela su tlak i temperatura izlaza kompresorske/pumpne stanice. Ovakav tip analize može se još nazvati i statičkim injekcionim modeliranjem iz kojeg proizlazi i proračun dnevnog utisnog kapaciteta. Upravo je to slučaj korištenja IIM-a u ovom radu.

Operativna ovojnica bušotine (*eng. Well Operating Envelope*) svoju snažnu primjenu nalazi u procesu proračuna dnevnog utisnog kapaciteta. Stavljanjem operativnih ovojnica pojedinih bušotina pri nekom ležišnom tlaku (u nekom vremenu i prostoru) i očekivanim rubnim uvjetima u komparativni odnos, prepoznaju se operativne mogućnosti i ograničenja svake od bušotina u odnosu na ostale. Uporabna vrijednost komparativnog prikaza očituje se u mogućnosti analize različitih injekcionih scenarija, odnosno odabira prikladnog bušotinskog fonda i uvjeta pod kojima će se vršiti utis na pojedinim bušotinama, sve vezano za pojedine scenarije koji su predmet potonje analize IIM-a. U ovom radu dan je primjer uporabe horizontalnog komparativnog prikaza operativnih ovojnica bušotina u funkciji

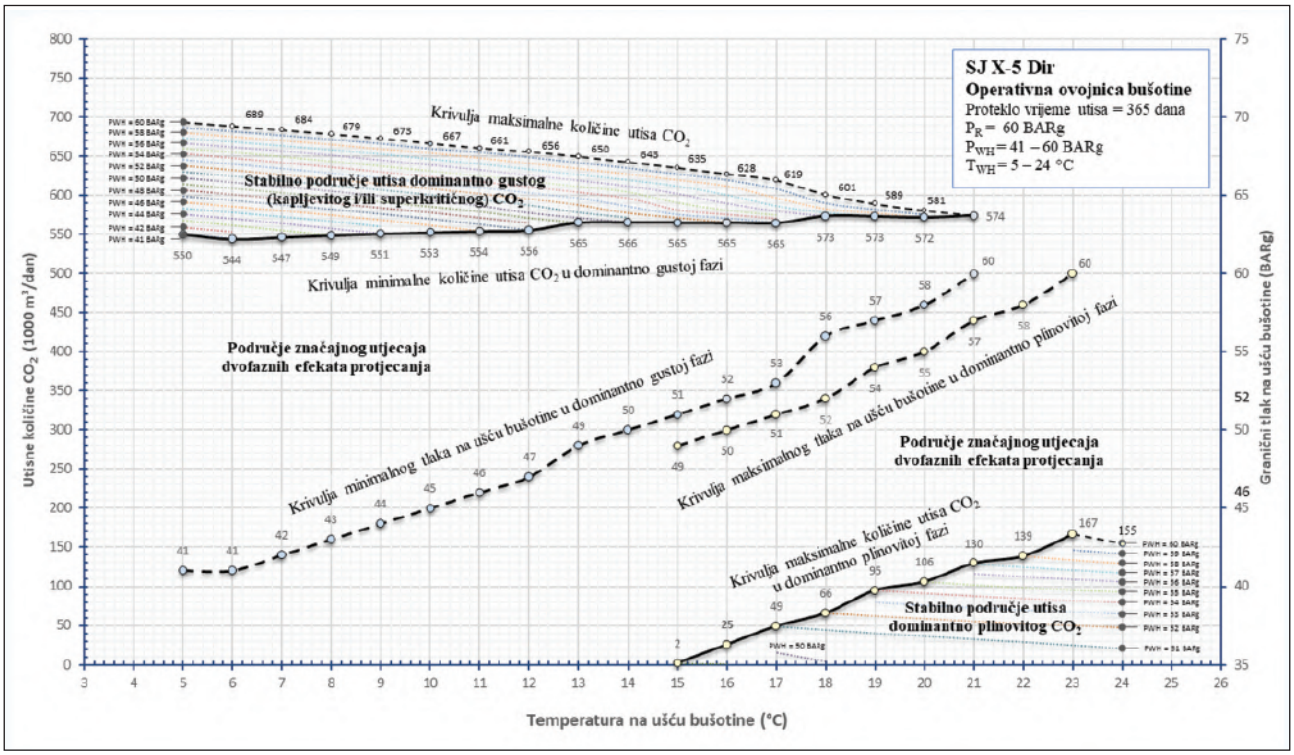
integriranog injekcionog modela CCS sustava ležišta SJ-XY i SJ-Z.

2. Operativna ovojnica injekcione bušotine za CO_2

Operativna ovojnica bušotine grafički je prikaz operativnih karakteristika injekcione bušotine za CO_2 pri nekom ležišnom tlaku, tako da možemo reći i da je to prikaz zamrznut u nekom vremenu i prostoru. Također se koristi za identifikaciju područja stabilnog procesa utiskivanja CO_2 u dominantno gusto i dominantno plinovitom stanju u funkciji promjene tlaka i temperature na ušću bušotine, važećeg ležišnog tlaka i količina CO_2 koje se utiskuju u ležište (Lešković, 2024). Pomoću operativne ovojnice bušotine jasno se omeđuje područje mogućih nestabilnosti protoka uvjetovanih faznim promjenama fluida u bušotini. Ovo područje karakterizira mogućnost pojave neustaljenog stanja protjecanja koje se manifestira u vidu značajnih pulzacija tlaka i fluktuacija temperatura zbog čega se u operativnom smislu izbjegava (Lešković, 2024). Slika 1 prikazuje operativnu ovojnicu injekcione bušotine SJ X-5 za vrijednost ležišnog tlaka 60 BARg (preuzeto iz Lešković, 2024). Izrada operativnih ovojnica za kompletan utisni bušotinski fond razmatrane geološke strukture/ležišta, i stavljanjem u komparativni odnos, korak je koji prethodi izradi IIM-a. Grafički prikaz komparativnog odnosa može biti vertikalan kao što je prikazano na Slika 3, ili horizontalan kao što je prikazano na Slika 4 i Slika 5. Zbog bolje preglednosti i komparabilnosti predmetnog bušotinskog fonda prednost se daje horizontalnom prikazu.

3. Procjena dnevnog utisnog kapaciteta odobalnog sustava CCS ležišta SJ-XY i SJ-Z

Procjena dnevnog utisnog kapaciteta CCS sustava ležišta SJ-XY i SJ-Z izvršena je uz pomoć statičkog IIM-a (bez aktivnog ležišnog modela). Glavne pretpostavke modela su da će zbog dužine cjevovoda (45,6 km) fluid na ušću bušotine uglavnom poprimiti ambijentalnu temperaturu (temperaturu morskog dna), tako da je očekivani cjelogodišnji temperaturni raspon fluida na ušću iznosi 11 – 16 °C. Proračun je proveden za vrijednost izlaznog tlaka kompresorske/pumpne stanice 60 BARg i temperature 15 °C. Regulacija rada injekcionog sustava vrši se pomoću regulatora protoka postavljenog na ulazu u glavni cjevovod sustava, dok je regulacija rada pojedinih bušotina omogućena pomoću regulatora protoka (podesivih sapnica) postavljenih na uščima bušotina. Prije regulatora protoka na uščima bušotina ugrađeni su i grijači fluida. Princip rada grijača je da se fluid prije



Slika 1. Operativna ovojnica injekcione bušotine SJ X-5 za vrijednost ležišnog tlaka 60 BARg (preuzeto iz Lešković, 2024).

sapnice dovoljno zagrije kako bi temperatura iza sapnice nakon prigušenja poprimila traženu vrijednost. Glavna ograničenja modela svode se na C-faktor erozije cijevi čija je vrijednost postavljena na maksimalni iznos 200.

Procjena dnevnog utisnog kapaciteta izvršena je kroz osam mogućih scenarija dnevnog utisa svrstanih u tri grupe:

– A grupa scenarija odnosi se na utis CO_2 u iznosu od 600 000 m^3/dan (cca 450 000 t/god) porijeklom iz obližnje tvornice cementa. Redom to su scenariji:
  - A1. Utis 600 000 m^3/dan gustog (tekućeg) CO_2 isključivo u ležište SJ-XY;
  - A2. Utis 600 000 m^3/dan plinovitog CO_2 isključivo u ležište SJ-XY;
  - A3. Utis 600 000 m^3/dan plinovitog CO_2 u oba ležišta SJ-XY i SJ-Z.

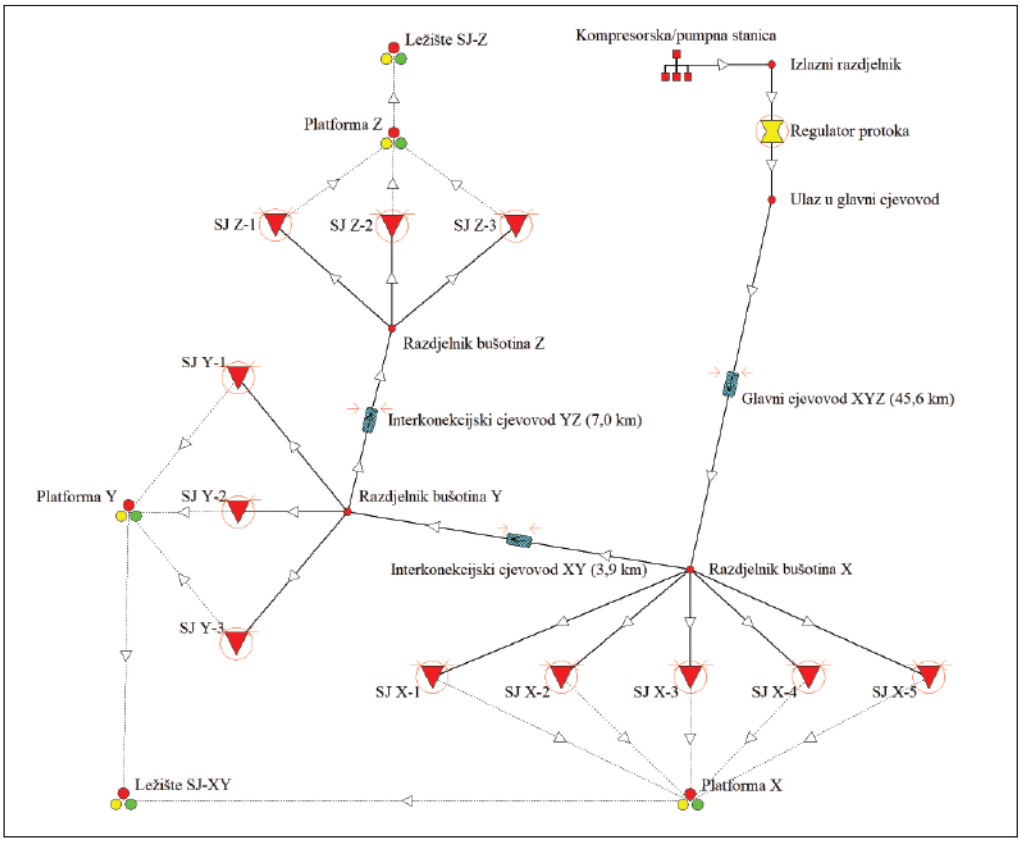
– B grupa scenarija odnosi se na količine utisa CO_2 iz grupe scenarija A te dodatnih količina utisa porijeklom iz obližnje rafinerije nafte u dva moguća scenarija, sve isključivo u ležište SJ-XY:
  - B1. Utis gustog CO_2 u ukupnom iznosu od 1 780 000 m^3/dan (cca 1 260 000 t/god);
  - B2. Utis gustog CO_2 u ukupnom iznosu od 2 350 000 m^3/dan (cca 2 200 000 t/god).

– C grupa scenarija odnosi se na dnevni maksimalno mogući kapacitet utisa CO_2. Ovom grupom scenarija pretpostavlja se raspoloživost neograničenih količina CO_2, a jedina ograničenja su utisni kapaciteti bušotinskog fonda, odnosno pripadajuće infrastrukture. U operativnom smislu to znači da su svi regulatori protoka sustava utisa (sapnice) u potpunosti otvoreni. Redom to su scenariji:
  - C1. Maksimalno mogući kapacitet utisa gustog CO_2 isključivo u ležište SJ-XY;
  - C2. Maksimalno mogući kapacitet utisa gustog CO_2 isključivo u ležište SJ-Y;
  - C3. Maksimalno mogući kapacitet utisa gustog CO_2 u oba ležišta SJ-XY i SJ-Z.

U sklopu procjene dan je primjer uporabe operativnih ovojnica bušotina kao sastavnog dijela analize nekoliko scenarija utisa sustava.

3.1. Integrirani injekcioni model CCS sustava ležišta SJ-XY i SJ-Z

Za izradu IIM-a korišten je softverski paket IPM ver. 13.5 tvrtke Petroleum Experts. Grafički prikaz sučelja IIM-a CCS sustava ležišta SJ-XY i SJ-Z prikazan je na Slika 2. Ulazni podaci modela prikazani su u Tablica 1, Tablica 2, Tablica 3, Tablica 4, Tablica 5, Tablica 6 i Tablica 7.



Slika 2. Integrirani injekcioni model CCS sustava ležišta SJ-XY i SJ-Z.

pVT model:		NIST RefProp (Span & Wagner)										
Temperaturni model:		Enthalpy Balance										
Model protoka u cijevima:		Petroleum Experts 5 Extended										
Platforma:		Platforma X					Platforma Y			Platforma Z		
Ležište:		Ležište SJ-XY								Ležište SJ-Z		
IPR model:		Petroleum Experts (Forchheimer)				Horizontalna bušotina			Petroleum Experts (Forchheimer)			
Bušotina:		SJ X-2	SJ X-3	SJ X-4	SJ X-5	SJ X-1	SJ Y-2	SJ Y-3	SJ Y-1	SJ Z-1	SJ Z-2	SJ Z-3
Vrijeme od početka utisa:	dana	365										
Dubina ležišta (sredina perforacija):	m (vertikalne dubine)	625,05	621,96	623,05	620,88	628,94	630,45	617,30	611,03	642,15	642,87	643,41
	m (mjerene dubine)	848,45	936,20	949,20	637,20	1206,20	1100,00	1117,96	763,21	815,55	790,56	762,60
Ležišni tlak:	BARg	60										
Temperatura ležišta:	°C	22,89	22,81	22,84	22,78	22,20	22,87	22,80	22,63	22,88	22,88	22,88
ne-Darcyev koeficijent:	$bar^2/(Pa{\cdot}s)\ (m^3/dan)^2$	0	2,158E-07	1,04E-06	1,147E-06	3,698E-05	1,473E-08	0	4,79E-08	0	0	1,669E-07
Darcyev koeficijent:	$bar^2/(Pa{\cdot}s)\ (m^3/dan)$	7,9370	9,2787	11,5656	12,5131	3,4848	1,1403	2,4031	8,3559	7,5165	4,5347	7,8107
Toplinska vodljivost zaštitnih cijevi:	W/(m·K)	45,00										
Toplinska vodljivost cementa:	W/(m·K)	0,865										
Dubina pete tubinga:	m (mjerene dubine)	786,76	880,91	891,60	585,60	1106,20	973,67	990,82	732,78	781,19	752,20	727,02
Toplinska vodljivost tubinga:	W/(m·K)	25,96										
Dubina pakera:	m (mjerene dubine)	785,76	880,91	891,60	585,60	1055,67	971,69	990,82	746,82	781,19	752,20	727,02
Gustoća paker fluida:	kg/m^3	1250										
Toplinska vodljivost paker fluida:	W/(m·K)	0,597										
Dubina mora:	m (vertikalne dubine)	42,0					41,3			42,5		
Temperatura na dnu mora:	°C	12,7										
Temperatura na površini mora:	°C	11,4										
Brzina strujanja mora:	m/s	0,01										
Visina ušća bušotine iznad razine mora:	m (vertikalne dubine)	17,2					12,96			13,3		
Temperatura zraka:	°C	15										
Vlažnost zraka:	%	25										
Brzina strujanja zraka:	m/s	1										
Duljina glavnog cjevovoda XYZ 18":	m	45559										
Unutarnji promjer glavnog cjevovoda XYZ 18":	mm	438,15										
Duljina interkonekcijskog cjevovoda XY 14":	m	3913,50										
Unutarnji promjer interkonek. cjevovoda XY 14":	mm	336,55										
Duljina interkonekcijskog cjevovoda YZ 14":	m	7010,86										
Unutarnji promjer interkonek. cjevovoda YZ 14":	mm	355,60										
Toplinska vodljivost cjevovoda:	W/(m·K)	1,09										

Tablica 1: Glavni ulazni podaci integriranog injekcionog modela CCS sustava ležišta SJ-XY i SJ-Z.

Tablica 2: Tipska trajektorija horizontalne i koso usmjerene bušotine lokaliteta Sjeverni Jadran (primjer bušotina SJ X-1 i SJ X-5).

SJ X-1				SJ X-5			
Mjerena dubina bušotine (m)	Vertikalna dubina bušotine (m)	Otklon od vertikalne osi bušotine (m)	Otklon od vertikalne osi bušotine (°)	Mjerena dubina bušotine (m)	Vertikalna dubina bušotine (m)	Otklon od vertikalne osi bušotine (m)	Otklon od vertikalne osi bušotine (°)
0	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00
25	25,20	0,15	0,34	40	40,00	0,20	0,29
45	45,20	0,53	1,08	60	60,00	0,38	0,52
85	85,02	4,23	5,32	359	358,90	7,20	1,31
148	146,75	16,84	11,54	388	387,70	10,40	6,40
177	174,25	26,04	18,50	417	416,40	14,80	8,70
234	226,92	47,83	22,47	446	444,90	20,10	10,40
262	251,12	61,91	30,20	475	473,20	26,50	12,90
344	319,59	107,04	33,39	504	501,20	34,20	15,30
460	409,19	180,71	39,43	532	527,70	43,20	18,80
517	448,07	222,40	47,00	561	554,20	54,90	23,70
546	465,60	245,50	52,80	590	579,80	68,50	28,00
604	496,40	294,64	57,92	654	635,50	100,10	29,60
719	548,49	397,17	63,07	683	659,40	116,60	34,60
747	557,88	423,55	70,40	740	707,40	147,20	32,50
903	603,94	572,59	72,83	769	732,70	161,30	29,20
1018	624,49	685,74	79,70	827	784,10	188,30	27,70
1111	629,20	778,62	87,10	942	886,80	240,00	26,71
1286	631,51	953,61	89,24	970	911,90	252,40	26,30
1306	632,55	973,58	87,00				

Tablica 3: Tipska konstrukcija i zacijevljenje horizontalne i koso usmjerene bušotine lokaliteta Sjeverni Jadran (primjer bušotina SJ X-1 i SJ X-5).

Bušotina	Mjerena dubina bušenja (m)	Promjer kanala (inch)	Mjerena dubina pete cijevi (m)	Nazivni promjer cijevi (inch)	Masa cijevi (lb/ft)	Visina cementa (m)	Vrh kolone cijevi (m)	Gustoća isplake/ otež.vode (kg/m^3)
SJ X-1	127,65	26,00	127,65	26,00	267,00	45,20	2,45	1030
	299,20	16,00	299,20	13,38	61,00	0,00	2,27	1160
	872,20	12,25	872,20	9,63	43,50	300,00	1,32	1250
	1106,20	8,50	1106,20	7,00	23,00	600,00	0,00	1310
	1306,20	6,125	Nezacijevljeni horizontalni kanal (pješčani zasip)					1300
SJ X-5	127,65	26,00	127,65	26,00	267,00	45,20	2,45	1030
	286,78	16,00	286,78	13,38	61,00	116,00	2,27	1160
	601,20	12,25	601,20	9,63	43,50	300,00	1,32	1250
	970,00	8,50	951,19	7,00	23,00	615,00	0,00	1310

Tablica 4: Statički temperaturni profil bušotina lokaliteta Sjeverni Jadran (primjer bušotine SJ X-5).

Naziv	Mjerena dubina bušotine (m)	Vertikalna dubina bušotine (m)	Statička temperatura (°C)
Vješalica tubinga	0,00	0,00	15,00
Razina mora	17,20	17,20	11,40
Morsko dno	59,14	59,14	12,70
Formacija (Lapor)	100,01	100,00	9,40
	200,04	200,00	12,06
	300,06	300,00	14,71
	400,40	400,00	17,37
	502,79	500,00	20,03
	613,19	600,00	22,68
	731,19	700,00	25,34
	844,80	800,00	27,99
	956,70	900,00	30,65
	1068,24	1000,00	33,31

Tablica 5: Termalne karakteristike okoline bušotina lokaliteta Sjeverni Jadran (primjer bušotine SJ X-5).

Vrsta okoline bušotine	Do mjerene dubine (m)	Gustoća okoline bušotine (kg/m^3)	Toplinska vodljivost okoline bušotine (W/m·K)	Specifični toplinski kapacitet okoline bušotine (kJ/kg·K)
Arbitrarna vrijednost	59,14	2610	1,90	0,200
Lapor	1068,24	2400	1,21	0,224

Tablica 6: Tipska injekciona oprema horizontalne bušotine lokaliteta Sjeverni Jadran (primjer bušotina SJ X-1).

Naziv injekcione opreme u bušotini	Mjerena dubina bušotine (m)	Unutarnji promjer opreme (inch)	Vanjski promjer opreme (inch)	Hrapavost opreme (m)	Toplinska vodljivost opreme (W/m·K)
Vješalica tubinga	0,00				
Tubing nazivnog promjera 2-3/8"	1106,20	2,00	2,38	1,52E-05	25,96
Paker pješčanog zasipa 7"	1057,11	2,44	6,36	1,52E-05	31,15
Ekstenzija pakera pješčanog zasipa	1066,90	4,00	5,00	1,52E-05	45,00
Sigurnosna spojnica sustava pješčanog zasipa	1067,70	3,54	4,00	1,52E-05	45,00
Slijepe cijevi sustava pješčanog zasipa 4"	1098,64	3,54	4,00	1,52E-05	45,00
Premium filtri pješčanog zasipa 4"	1206,20	3,54	4,00	1,52E-05	31,15

Tablica 7: Tipska injekciona oprema koso usmjerene bušotine lokaliteta Sjeverni Jadran (primjer bušotina SJ X-5).

Naziv injekcione opreme u bušotini	Mjerena dubina bušotine (m)	Unutarnji promjer opreme (inch)	Vanjski promjer opreme (inch)	Hrapavost opreme (m)	Toplinska vodljivost opreme (W/m·K)
Vješalica tubinga	0,00				
Tubing nazivnog promjera 2-3/8"	585,60	2,00	2,38	1,52E-05	25,96
Paker pješčanog zasipa 7"	586,30	2,00	6,36	1,52E-05	31,15
Gornja ekstenzija pakera pješčanog zasipa	587,50	4,80	5,50	1,52E-05	45,00
Perforirana spojnica s kliznim vratima	588,30	3,88	5,82	1,52E-05	45,00
Brtvenica sustava pješčanog zasipa	589,50	3,88	5,30	1,52E-05	45,00
Donja ekstenzija pakera pješčanog zasipa	592,50	4,27	5,04	1,52E-05	45,00
Sigurnosna spojnica sustava pješčanog zasipa	593,20	3,50	5,30	1,52E-05	45,00
Slijepe cijevi sustava pješčanog zasipa 4"	631,70	3,48	4,05	1,52E-05	45,00
Filtri pješčanog zasipa 4"	637,20	3,55	4,75	1,52E-05	31,15

3.2. Komparativna analiza injekcionih mogućnosti bušotina ležišta SJ-XY i SJ-Z pomoću operativnih ovojnica bušotina

Za potrebe komparativne analize injekcionih mogućnosti bušotina ležišta SJ-XY i SJ-Z izrađene su operativne ovojnice pripadajućeg bušotinskog fonda oba ležišta. Operativne ovojnice izrađene su temeljem rezultata sistemske analize bušotina. Glavni ulazni podaci sistemske analize prikazani su u Tablica 1. Analiza osjetljivosti sistemske analize provedena kod slijedećih karakterističnih varijabli operativne ovojnice: udjela faza na ušću bušotine (100% kapljevina i 100% plin zasebno), tlaka i temperature na ušću bušotine (P_{WH} i T_{WH}) i vrijednosti ležišnog tlaka (P_R). Vrijednosti varijabli analize osjetljivosti prikazani su u Tablica 8. Konstrukcija operativnih ovojnica bušotina izvršena je sukladno proceduri prikazanoj u literaturi: Lešković (2024). Konačno, vertikalni prikaz operativnih ovojnica injekcionih bušotina ležišta SJ-XY i SJ-Z za vrijednost ležišnih tlakova 60 BARg prikazan je na Slika 3.

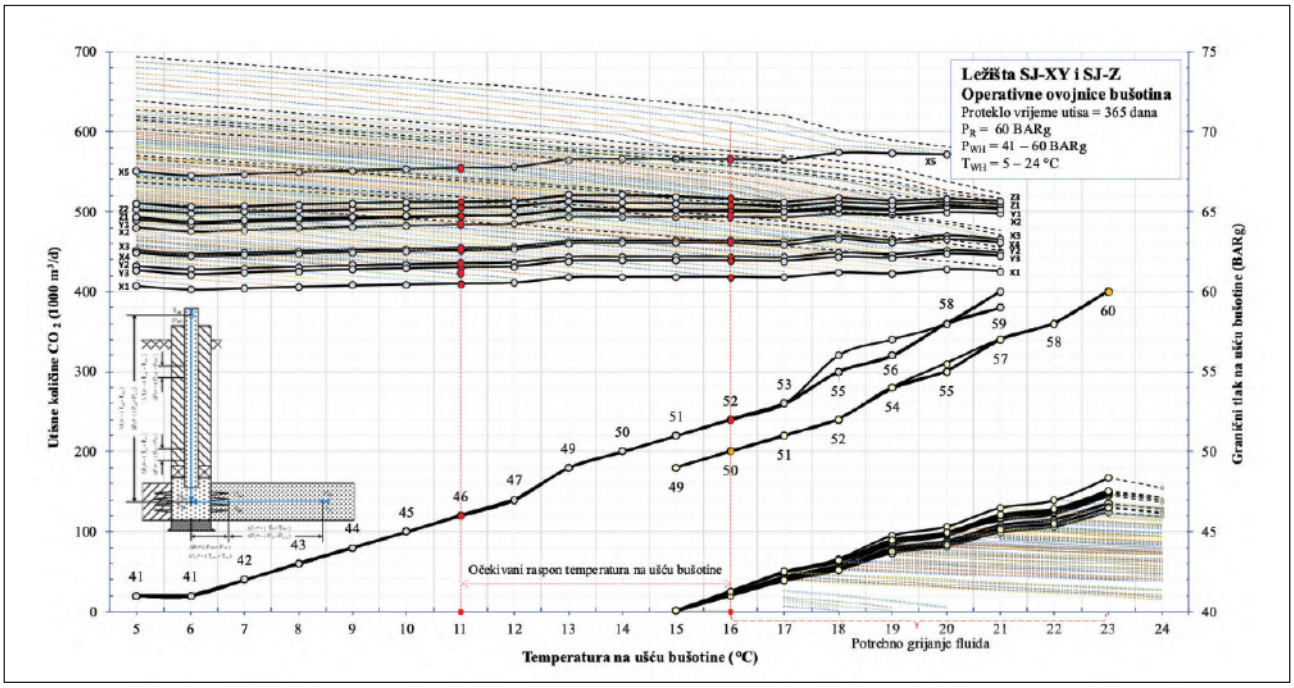
Horizontalni prikaz dan je na Slika 4 i Slika 5. Uporabna vrijednost horizontalnog prikaza najbolje se očituje kroz komparativnu analizu injektivnih mogućnosti bušotina za grupu scenarija A.

Scenarij A1 pretpostavlja utis 600 000 m^3/dan tekućeg CO_2 u ležište SJ-XY. Povuče li se pravac vrijednosti 600 000 m^3/dan kao što je prikazano na Slika 4, vidi se da za vrijednost ležišnih tlakova 60 BARg i kod očekivanog raspona temperatura ušća bušotina

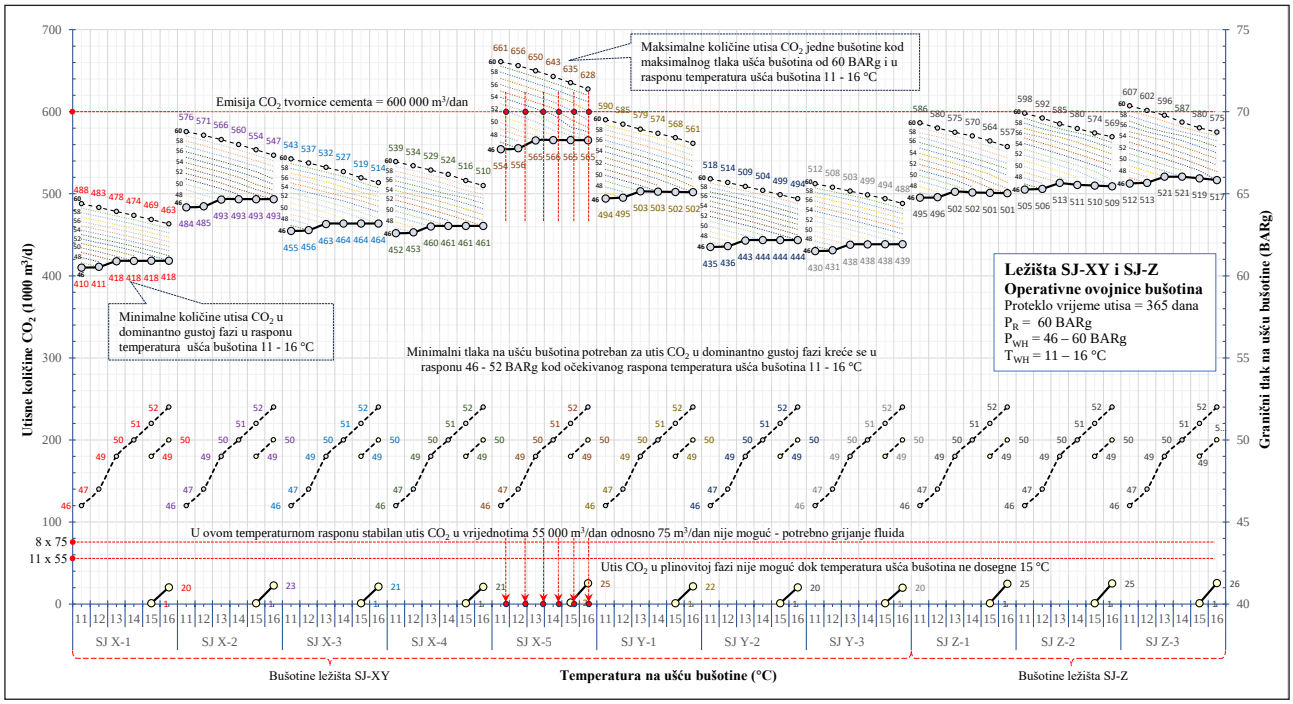
Tablica 8: Varijable osjetljivosti sistemske analize bušotina ležišta SJ-XY i SJ-Z.

Udio plinovite faze na ušću bušotine (%)	Ležišni tlak (BARg)	Temperatura na ušću bušotine (°C)	Tlak na ušću bušotine (BARg)
0	45	5	41
100	50	6	42
	55	7	43
	60	8	44
		9	45
		10	46
		11	47
		12	48
		13	49
		14	50
		15	51
		16	52
		17	53
		18	54
		19	55
		20	56
		21	57
		22	58
		23	59
		24	60

11 – 16 °C niti jedna bušotina ležišta SJ XY, osim bušotine SJ X-5, nije dovoljnog kapaciteta, odnosno injektivnih mogućnosti samostalno utisnuti predmetnu količinu. Vidi se da se minimalna stabilna količina utisa CO_2 u tekućoj fazi kreće od 410 000 m^3/dan pa do 418 000 m^3/dan (u slučaju bušotine SJ X-1) i više.



Slika 3. Vertikalni prikaz operativnih ovojnica injekcionih bušotina ležišta SJ-XY i SJ-Z za vrijednost ležišnih tlakova 60 BARg.

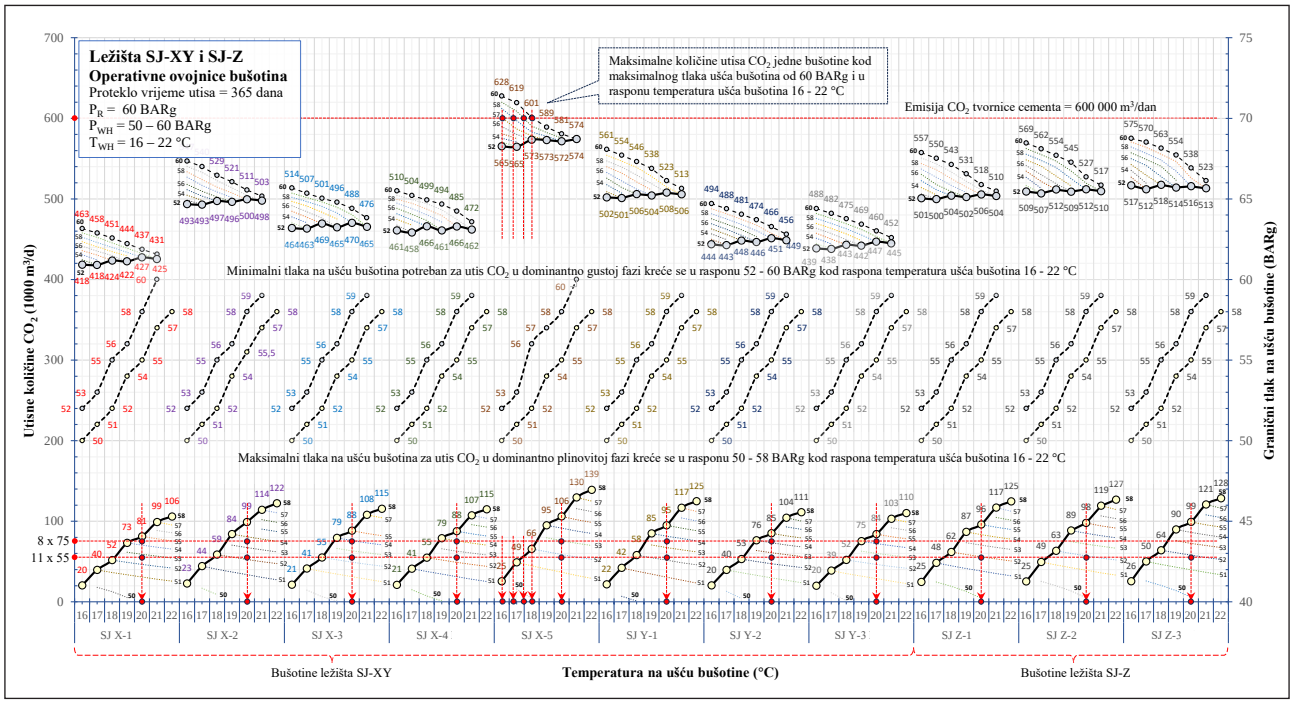


Slika 4. Horizontalni prikaz operativnih ovojnica injekcionih bušotina ležišta SJ-XY i SJ-Z za vrijednost ležišnih tlakova 60 BARg i kod očekivanog raspona temperatura ušća bušotina 11 – 16 °C.

Zbog toga kombinacija stabilnog utisa u tekućoj fazi preraspodjelom količina kroz dvije ili više bušotina nije moguća. Osim kod bušotine SJ X-5, gdje je kod maksimalnog tlaka na ušću od 60 BARg moguće utisnuti CO_2 u rasponu od 661 000 m³/dan pa do 628 000 m³/dan, idući maksimalni raspon vrijednosti je od 590 000 m³/dan pa do 561 000 m³/dan za bušotinu SJ Y-1. Što se tiče ležišta SJ-Z utis 600 000 m³/dan tekućeg CO_2 moguć je isključivo u slučaju bušotine SJ Z-3 i to kod najvišeg raspona tlakova cca 58 – 60 BARg i pri uskom rasponu temperatura ušća bušotine 11 – 12 °C. Važno je ovdje napomenuti da se za očekivani temperaturni raspon 11 – 16 °C minimalni (granični) tlakovi ušća bušotinskog fonda potrebni za stabilan protok fluida u dominantno gustoj fazi kreću u rasponu 46 – 52 BARg. Usporedbom operativnih ovojnica na Slika 4 također se može zaključiti da stabilan utis ukupno 600 000 m³/dan u plinovitoj fazi, u temperaturnom rasponu 11 – 16 °C nije moguć. Čak i ako se utisne količine ravnomjerno raspodjele unutar raspoloživog bušotinskog fonda, primjerice da se utis preraspodjeli na svih 8 bušotina ležišta SJ-XY, odnosno 8 x 75 000 m³/dan, ili pak da utis ide u oba ležišta SJ-XY i SJ-Z kroz kompletan bušotinski fond, odnosno 11 x 55 000 m³/dan, stabilan utis predmetnih količina nije moguć. Vidi se da je moguće utisnuti tek minimalne količine CO_2 u plinovitoj fazi u koliko temperatura ušća dosegne 15 °C, odnosno 16 °C kada u zavisnosti o utisnom kapacitetu bušotine postaje moguće utisnuti 20 000 – 26 000 m³/dan, što je sumarno znatno manje od traženog. Kako bi preraspodjelom utisa na više bušotina postalo moguće utisnuti tražene količine, isti se mora odvijati u plinovitoj fazi, zbog čega je potrebno posegnuti za grijanjem fluida na ušćima bušotina.

Scenarij A2 pretpostavlja utis 600 000 m³/dan plinovitog CO_2 u ležište SJ-XY. Pretpostavlja se da je na ušćima svih bušotina utisni fluid zagrijan na vrijednost temperature od 20 °C. Radi što ravnomjernije raspodjele utisa po cjelokupnom volumenu ležišta razmatra se mogućnost utisa kroz kompletan bušotinski fond ležišta, odnosno 8 x 75 000 m³/dan CO_2 u plinovitoj fazi. Za analizu operativnih karakteristika poslužiti će Slika 5. Povuče li se pravac vrijednosti 75 000 m³/dan, kao što je prikazano na Slika 5, vidi se da je za vrijednost ležišnih tlakova 60 BARg i kod raspona temperature ušća bušotina 20 °C kompletan bušotinski ležišta SJ XY dovoljnog kapaciteta, odnosno injektivnih karakteristika sposobnih utisnuti predmetnu količinu CO_2 istovremeno. Pri tome se vrijednosti tlakova ušća bušotina kreću u rasponu 52,9 BARg u slučaju bušotine SJ X-3 pa do 54,4 BARg u slučaju bušotine SJ X-1.

Scenarij A3 sličan je scenariju A2 te pretpostavlja utis 600 000 m³/dan plinovitog CO_2 ali u oba ležišta SJ-XY i SJ-Z istovremeno. Također se pretpostavlja se



Slika 5. Horizontalni prikaz operativnih ovojnica injekcionih bušotina ležišta SJ-XY i SJ-Z za vrijednost ležišnih tlakova 60 BARg i kod raspona temperatura ušća bušotina 16 – 22 °C.

da je na ušćima svih bušotina utisni fluid zagrijan na vrijednost temperature od 20 °C. Zadržan je princip ravnomjernosti raspodjele utisa po cjelokupnom volumenu u oba ležišta tako da se pretpostavlja utis 11 x 55 000 m^3/dan CO_2 u plinovitoj fazi. Povuče li se pravac vrijednosti 55 000 m^3/dan kao što je prikazano na Slika 5, vidi se da je kompletan bušotinski ležišta SJ XY i ležišta SJ-Z dovoljnog kapaciteta, odnosno injektivnih karakteristika, sposobnih utisnuti predmetnu količinu CO_2 istovremeno. Pri tome se vrijednosti tlakova ušća bušotina kreću u rasponu 51,7 BARg u slučaju bušotine SJ Z-3 pa do 52,7 BARg u slučaju bušotine SJ X-1. Treba ovdje napomenuti da se za pretpostavljeni temperaturni raspon zagrijavanja fluida na ušću bušotine 16 – 22 °C minimalni (granični) tlakovi ušća bušotinskog fonda potrebni za stabilan protok fluida u dominantno plinovitoj fazi kreću u rasponu 50 – 58 BARg.

Na Slika 5 također se vidi da se za isti temperaturni raspon (granični) tlakovi ušća bušotinskog fonda potrebni za stabilan protok fluida u dominantno gustoj fazi kreću u rasponu 52 – 60 BARg. Vidi se da je 600 000 m^3/dan tekućeg CO_2 moguće utisnuti isključivo kroz bušotinu SJ X-5 u ležište SJ-XY u ograničenom temperaturnom rasponu do maksimalne vrijednosti 18 °C. Kombinacija stabilnog utisa u tekućoj fazi preraspodjelom količina kroz dvije ili više bušotina nije moguća budući da se raspon minimalnih stabilnih količina utisa u dominantno gustoj fazi događa u vrijednosti od 418 000 m^3/dan pa do 425 000 m^3/dan (u slučaju bušotine SJ X-1) i više.

Iz svega slijedi zaključak da je za grupu scenarija A stabilan utis 600 000 m^3/dan tekućeg CO_2 moguće ostvariti isključivo kroz bušotinu SJ X-5 u ležište SJ-XY i to u ograničenom temperaturnom rasponu do maksimalne vrijednosti 18 °C. Ovaj slučaj prezentiran je u scenariju A1 i smatra se nepovoljnim iz razloga neravnomjernog popunjavanja ležišta. Alternativna rješenja u vidu ravnomjernog popunjavanja ležišta javljaju se kroz mogućnost preraspodjele predmetnih količina na cjelokupni bušotinski fond. To je moguće postići grijanjem utisnog fluida radi utisa fluida u plinovitom stanju s rješenjima kako je prikazano u scenarijima A2 i A3.

Utjecaj operativnih karakteristika bušotinskog fonda na cjelokupni sustava utisa valorizira se uz pomoć IIM-a kroz različite scenarije.

4. Rezultati proračuna dnevnog utisnog kapaciteta odobalnog sustava CCS ležišta SJ-XY i SJ-Z

Rezultati proračuna dnevnog utisnog kapaciteta odobalnog CCS sustava ležišta SJ-XY i SJ-Z prikazani su grafički i tablično. Grafički prikaz modela i raspodjele injekcionih količina po bušotinama, platformama i ležištima za grupu scenarija A prikazan je na Slika 6,

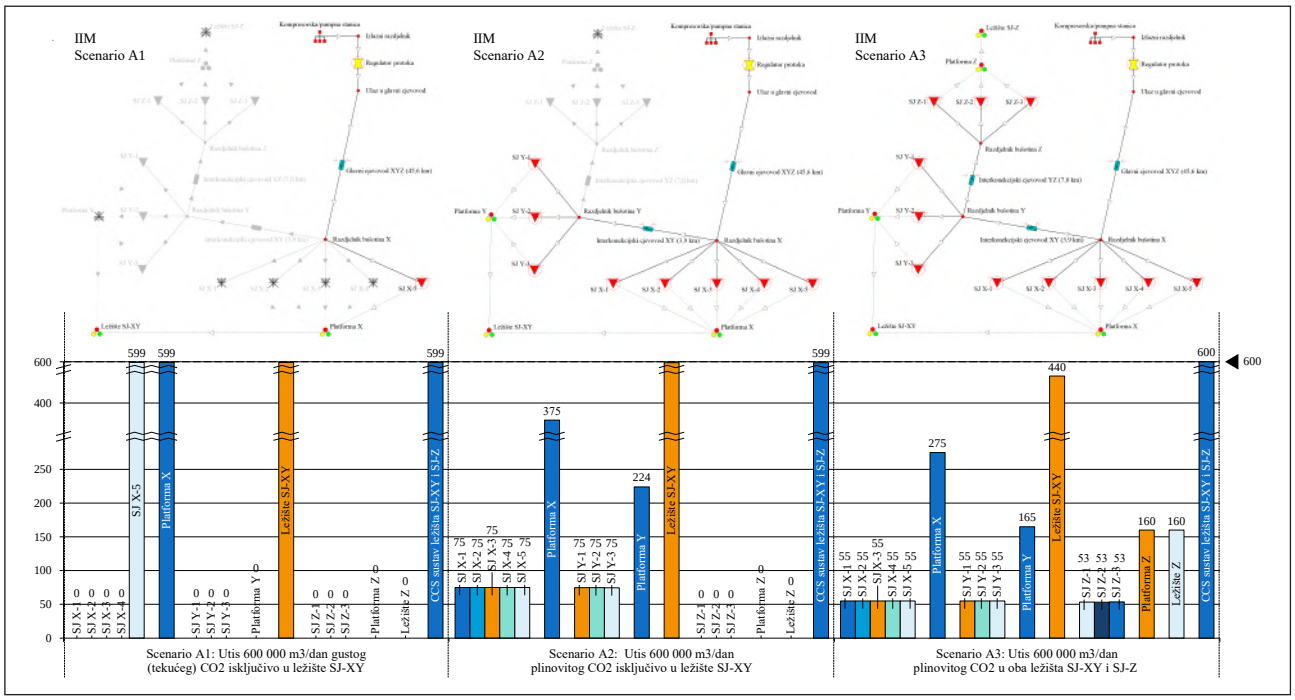
za grupu scenarija B na Slika 7 te za grupu scenarija C na Slika 8. Rezultati proračuna IIM-a u vidu distribucije tlaka i temperature unutar sustava prikazana je za grupu scenarija A u Tablica 9, Tablica 10 i Tablica 11, za grupu scenarija B u Tablica 12 i Tablica 13 te za grupu scenarija C u Tablica 14, Tablica 15 i Tablica 16.

Kada govorimo o scenariju A1 komparativna analiza operativnih ovojnica pokazuje da je utis 600 000 m^3/dan gustog (tekućeg) CO_2 moguć isključivo kroz bušotinu SJ X-5 u ležište SJ-XY (Slika 4), tako da je u ovom slučaju kompletna utisna infrastruktura podređena radu ove bušotine. Regulacija rada bušotine SJ X-5 u ovako postavljenom IIM-u (Slika 6) vrši se pomoću regulatora protoka postavljenog na ulazu u glavni cjevovod sustava. Regulator protoka na ušću bušotine u potpunosti je otvoren i ne predstavlja restrikciju u protoku. Rezultati proračuna IIM-a za scenarij A1 prikazani su Tablica 9. Ovo je nepovoljan scenarij budući da kompletnu količinu utiskuje u vrlo ograničeni volumen ležišta.

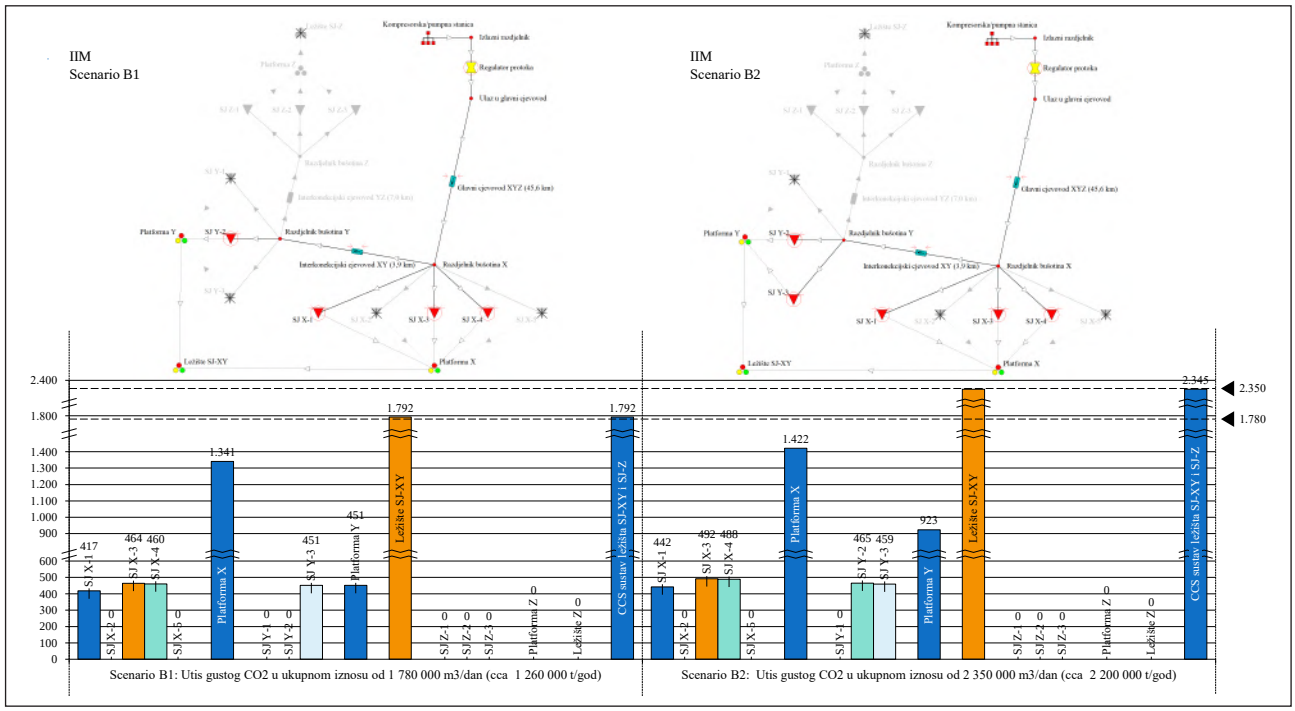
U slučaju scenarija A2 i A3 komparativna analiza operativnih ovojnica pokazuje da je utis 600 000 m^3/dan CO_2 isključivo u ležište SJ-XY, odnosno u oba ležišta SJ-XY i SY-Z moguć uz uvjet grijanja fluida na ušćima bušotina. Radi ravnomjernog popunjavanja ležišta aktiviran je cjelokupni bušotinski fond. Za scenarij A2 utis se vrši u ležište SJ-XY pomoću 8 pripadajućih bušotina gdje je svaka regulirana pomoću podesive sapnice na iznos utisa 75 000 m^3/dan CO_2. Za scenarij A3 utis se vrši u oba ležišta SJ-XY i SY-Z istovremeno pomoću 11 pripadajućih bušotina gdje je svaka regulirana pomoću podesive sapnice na iznos utisa 55 000 m^3/dan CO_2. Grijaći na bušotinama su programirani da održavaju temperaturu ušća bušotina iza podesivih sapnica na 20 °C. Na Slika 5 (horizontalni prikaz operativnih ovojnica injekcionih bušotina) dan je prikaz očekivanih rješenja dinamičkih tlakova na ušćima bušotina za scenarije A2 i A3 kod vrijednosti temperature utisa od 20 °C. Rezultati proračuna IIM-a za scenarij A2 prikazani su u Tablica 10 a za scenarij A3 u Tablica 11. Komparativni prikaz modela i raspodjele injekcionih količina po bušotinama, platformama i ležištima za grupu scenarija A dan je na Slika 6.

Situacija se značajno mijenja kada u sustav ulaze dodatne količine CO_2 iz obližnje rafinerije nafte (grupa scenarija B). Prema scenariju B1 vrši se utis gustog CO_2 u ukupnom iznosu od 1 780 000 m^3/dan (cca 1 260 000 t/god) te prema scenariju B2 utis gustog CO_2 u ukupnom iznosu od 2 350 000 m^3/dan (cca 2 200 000 t/god). Utis se prema oba scenarija vrši isključivo u ležište SJ-XY. Za scenarij B1 utis se vrši pomoću 4 bušotine, 3 s platforme X (SJ X-1, SJ X-3 i SJ X-4) te bušotinom SJ Y-2 s platforme Y. Kod scenarija B2 utis se vrši pomoću 5 bušotina, 3 s platforme X (SJ X-1, SJ X-3 i SJ X-4) te bušotinama SJ Y-2 i SJ Y-3 s platforme Y. Regulacija ukupnih količina utisa vrši se pomoću regulatora protoka postavljenog na ulazu u glavni cjevovod sustava. Regulatori protoka na ušćima bušotina u potpunosti su otvoreni i ne predstavlja restrikciju u protoku. Rezultati proračuna IIM-a za scenarij B1 prikazani su u Tablica 12 a za scenarij B2 u Tablica 13. Komparativni prikaz modela i raspodjele injekcionih količina po bušotinama, platformama i ležištima za grupu scenarija B dan je na Slika 7.

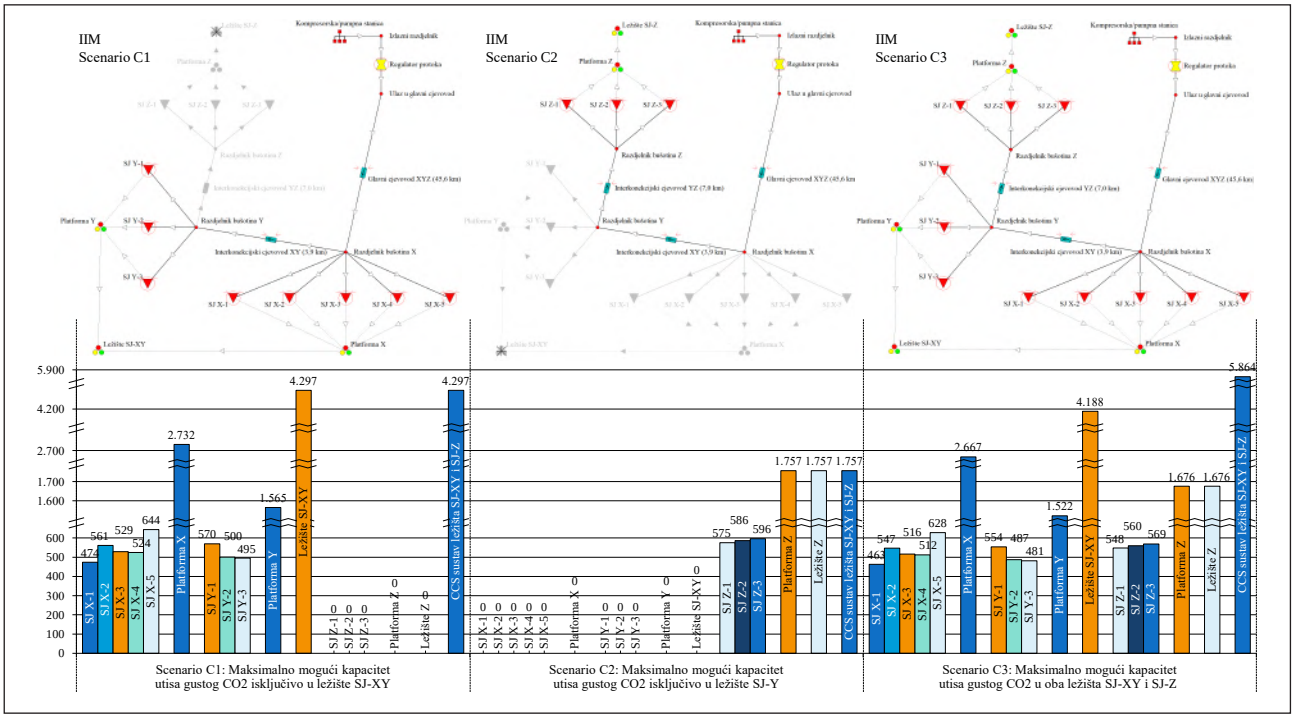
U operativnom smislu važno je utvrditi i maksimalni dnevni kapacitet utisa cjelokupnog sustava. U tu svrhu izvršen je proračun maksimalnog dnevnog kapaciteta utisa u ležišta SJ-XY i SY-Z zasebno, te istovremenog utisa u oba ležišta kroz grupu scenarija C. U ovoj grupi scenarija pretpostavlja se da su svi regulatori protoka sustava u potpunosti otvoreni i da ne postoje ograničenja u raspoloživim količinama utisa CO_2. Rezultati proračuna IIM-a za scenarij C1 pokazuju vrijednost 4 297 157 m^3/dan (cca 8 030 t/dan) maksimalno mogućeg kapaciteta utisa CO_2 i to isključivo u ležište SJ-XY. Raspodjela izračunatih količina utisa te tlakova i temperatura po svim segmentima sustava za scenarij C1 prikazana je u Tablica 14. Maksimalno mogući kapacitet utisa CO_2 isključivo u ležište SJ-Y (scenarij C2) iznosi 1 757 051 m^3/dan (cca 3 283 t/dan). Rezultati proračuna IIM-a za scenarij C2 prikazani su u Tablica 15. U koliko je za utis u oba ležišta istovremeno bez ograničenja otvoren kompletan bušotinski fond, kao što je predviđeno scenarijem C3, maksimalno mogući kapacitet utisa CO_2 CCS sustava ležišta SJ-XY i SJ-Z iznosi 5 864 353 m^3/dan (cca 10 958 t/dan). Rezultati proračuna IIM-a za scenarij C3 prikazani su u Tablica 16. Komparativni prikaz modela i raspodjele injekcionih količina po bušotinama, platformama i ležištima za grupu scenarija C dan je na Slika 8.



Slika 6. Komparativni prikaz modela i raspodjele injekcionih količina po bušotinama, platformama i ležištima za grupu scenarija A.



Slika 7. Komparativni prikaz modela i raspodjele injekcionih količina po bušotinama, platformama i ležištima za grupu scenarija B.



Slika 8. Komparativni prikaz modela i raspodjele injekcionih količina po bušotinama, platformama i ležištima za grupu scenarija C.

Tablica 9. Rezultati proračuna IIM-a za scenarij A1: Utis gustog (tekućeg) CO_2 isključivo u ležište SJ-XY.

	Protok CO_2 (1000 m^3/dan)	Protok CO_2 (t/dan)	Tlak u elementu sustava (BARg)	Temperatura u elementu sustava (°C)	Otvor sapnice (mm)	Pad tlaka kroz sapnicu (bar)	Pad tlaka kroz element (bar)	C-faktor erozije cijevi	Pad tlaka u ležištu (bar)	Tlak ležišta (BARg)	Temperatura na dnu bušotine (°C)	Tlak na dnu bušotine (BARg)	Temperatura na ušću bušotine (°C)	Tlak na ušću bušotine (BARg)
Kompresorska/pumpna stanica	599,063	1119,40	60,00	15,00										
Izlazni razdjelnik	599,063	1119,40	60,00	15,00										
Regulator protoka	599,063	1119,40	51,80	14,19	23,19	8,20								
Ulaz u glavni cjevovod	599,063	1119,40	51,80	14,19										
Glavni cjevovod XYZ (45,6 km)	599,063	1119,40	51,55	10,92			0,25	2,50						
Razdjelnik bušotina X	599,063	1119,40	51,54	10,92										
SJ X-5	599,063	1119,40			Potpun	0,00	-9,22	181,40	-0,77	60,00	13,76	60,76	10,92	51,54

Tablica 10: Rezultati proračuna IIM-a za scenarij A2: Utis plinovitog CO_2 isključivo u ležište SJ-XY.

	Protok CO_2 (1000 m^3/dan)	Protok CO_2 (t/dan)	Tlak u elementu sustava (BARg)	Temperatura u elementu sustava (°C)	Otvor sapnice (mm)	Pad tlaka kroz sapnicu (bar)	Pad tlaka kroz element (bar)	C-faktor erozije cijevi	Pad tlaka u ležištu (bar)	Tlak ležišta (BARg)	Temperatura na dnu bušotine (°C)	Tlak na dnu bušotine (BARg)	Temperatura na ušću bušotine (°C)	Tlak na ušću bušotine (BARg)
Kompresorska/pumpna stanica	598,644	1118,62	60,00	15,00										
Izlazni razdjelnik	598,644	1118,62	60,00	15,00										
Regulator protoka					Potpun	0,00								
Ulaz u glavni cjevovod	598,644	1118,62	60,00	15,00										
Glavni cjevovod XYZ (45,6 km)	598,644	1118,62	59,85	10,94			0,15	2,44						
Razdjelnik bušotina X	598,644	1118,62	59,85	10,94										
SJ X-1	74,942			27,18	3,87	5,43	-5,63	49,73	-0,05	60,00	27,18	60,05	20,00	54,42
SJ X-2	74,916			28,38	3,76	6,29	-6,50	50,74	-0,06	60,00	28,38	60,06	20,00	53,56
SJ X-3	74,936			29,22	3,68	6,94	-7,16	51,46	-0,07	60,00	29,22	60,07	20,00	52,91
SJ X-4	74,842			27,88	3,80	5,92	-6,15	50,24	-0,08	60,00	27,88	60,08	20,00	53,93
SJ X-5	74,989			29,23	3,69	6,92	-7,16	51,48	-0,09	60,00	29,23	60,09	20,00	52,93
Interkonekcijski cjevovod XY (3,9 km)	224,020	418,60	59,88	11,70			-0,03	1,52						
Razdjelnik bušotina Y	224,020	418,60	59,88	11,70										
SJ Y-1	74,802			28,43	3,75	6,37	-6,55	50,72	-0,06	60,00	28,43	60,06	20,00	53,51
SJ Y-2	74,616			27,53	3,82	5,77	-5,90	49,89	-0,01	60,00	27,53	60,01	20,00	54,11
SJ Y-3	74,603			27,42	3,83	5,69	-5,83	49,78	-0,02	60,00	27,42	60,02	20,00	54,19

Tablica 11: Rezultati proračuna IIM-a za scenarij A3: Utis plinovitog CO_2 u oba ležišta SJ-XY i SJ-Z.

	Protok CO_2 (1000 m^3/dan)	Protok CO_2 (t/dan)	Tlak u elementu sustava (BARg)	Temperatura u elementu sustava (°C)	Otvor sapnice (mm)	Pad tlaka kroz sapnicu (bar)	Pad tlaka kroz element (bar)	C-faktor erozije cijevi	Pad tlaka u ležištu (bar)	Tlak ležišta (BARg)	Temperatura na dnu bušotine (°C)	Tlak na dnu bušotine (BARg)	Temperatura na ušću bušotine (°C)	Tlak na ušću bušotine (BARg)
Kompresorska/pumpna stanica	599,933	1121,03	60,00	15,00										
Izlazni razdjelnik	599,933	1121,03	60,00	15,00										
Regulator protoka	599,933	1121,03	60,00	15,00	Potpun	0,00								
Ulaz u glavni cjevovod	599,933	1121,03	60,00	15,00										
Glavni cjevovod XYZ (45,6 km)	599,933	1121,03	59,85	10,94			0,15	2,44						
Razdjelnik bušotina X	599,933	1121,03	59,85	10,94										
SJ X-1	54,980	102,73			3,13	7,18	-7,36	37,97	-0,03	60,00	29,12	60,03	20,00	52,67
SJ X-2	55,021	102,81			3,09	7,69	-7,88	38,41	-0,04	60,00	29,88	60,04	20,00	52,16
SJ X-3	54,954	102,69			3,06	8,06	-8,26	38,66	-0,05	60,00	30,45	60,05	20,00	51,79
SJ X-4	55,004	102,78			3,11	7,44	-7,65	38,20	-0,06	60,00	29,55	60,06	20,00	52,41
SJ X-5	54,957	102,69			3,06	8,05	-8,27	38,65	-0,07	60,00	30,45	60,07	20,00	51,80
Interkonekcijski cjevovod XY (3,9 km)	325,021	607,33	59,88	11,71			-0,03	2,21						
Razdjelnik bušotina Y	325,021	607,33	59,88	11,71										
SJ Y-1	55,005	102,78			3,09	7,67	-7,84	38,37	-0,04	60,00	29,84	60,04	20,00	52,20
SJ Y-2	54,997	102,77			3,12	7,33	-7,47	38,09	-0,01	60,00	29,27	60,01	20,00	52,54
SJ Y-3	54,998	102,77			3,13	7,27	-7,40	38,04	-0,01	60,00	29,18	60,01	20,00	52,61
Interkonekcijski cjevovod YZ (7,0 km)	160,023	299,02	59,88	11,80			0,00	1,09						
Razdjelnik bušotina Z	160,023	299,02	59,88	11,80										
SJ Z-1	53,349	99,69			3,02	8,04	-8,20	37,49	-0,04	60,00	30,32	60,04	20,00	51,84
SJ Z-2	53,187	99,38			3,01	8,12	-8,26	37,44	-0,02	60,00	30,43	60,02	20,00	51,76
SJ Z-3	53,489	99,95			3,02	8,14	-8,31	37,67	-0,04	60,00	30,49	60,04	20,00	51,73

Tablica 12: Rezultati proračuna IIM-a za scenarij B1: Utis gustog CO_2 u ukupnom iznosu od 1 780 000 m^3/dan (cca 1 260 000 t/god).

	Protok CO_2 (1000 m^3/dan)	Protok CO_2 (t/dan)	Tlak u elementu sustava (BARg)	Temperatura u elementu sustava (°C)	Otvor sapnice (mm)	Pad tlaka kroz sapnicu (bar)	Pad tlaka kroz element (bar)	C-faktor erozije cijevi	Pad tlaka u ležištu (bar)	Tlak ležišta (BARg)	Temperatura na dnu bušotine (°C)	Tlak na dnu bušotine (BARg)	Temperatura na ušću bušotine (°C)	Tlak na ušću bušotine (BARg)
Kompresorska/pumpna stanica	1792,467	3349,38	60,00	15,00										
Izlazni razdjelnik	1792,467	3349,38	60,00	15,00										
Regulator protoka	1792,467	3349,38	50,04	15,00	38,27	9,96								
Ulaz u glavni cjevovod	1792,467	3349,38	50,05	15,00										
Glavni cjevovod XYZ (45,6 km)	1792,467	3349,38	45,60	10,68			4,45	13,08						
Razdjelnik bušotina X	1792,467	3349,38	46,97	10,68										
SJ X-1	417,324	779,81			Potpun	0,00	-13,79	126,45	-0,76	60,00	14,23	60,76	10,68	46,97
SJ X-3	464,023	867,07			Potpun	0,00	-13,45	140,60	-0,42	60,00	14,01	60,42	10,68	46,97
SJ X-4	459,979	859,51			Potpun	0,00	-13,57	139,42	-0,54	60,00	14,01	60,54	10,68	46,97
Interkonekcijski cjevovod XY (3,9 km)	451,141	843,00	47,00	11,58			-0,04	3,11						
Razdjelnik bušotina Y	451,141	843,00	47,00	11,58										
SJ Y-2	451,141	843,00			Potpun	0,00	-13,05	133,03	-0,05	60,00	14,81	60,05	11,58	47,00

Tablica 13: Rezultati proračuna IIM-a za scenarij B2: Utis gustog CO_2 u ukupnom iznosu od 2 350 000 m^3/dan (cca 2 200 000 t/god).

	Protok CO_2 (1000 m^3/dan)	Protok CO_2 (t/dan)	Tlak u elementu sustava (BARg)	Temperatura u elementu sustava (°C)	Otvor sapnice (mm)	Pad tlaka kroz sapnicu (bar)	Pad tlaka kroz element (bar)	C-faktor erozije cijevi	Pad tlaka u ležištu (bar)	Tlak ležišta (BARg)	Temperatura na dnu bušotine (°C)	Tlak na dnu bušotine (BARg)	Temperatura na ušću bušotine (°C)	Tlak na ušću bušotine (BARg)
Kompresorska/pumpna stanica	2345,192	4382,20	60,00	15,00										
Izlazni razdjelnik	2345,192	4382,20	60,00	15,00										
Regulator protoka	2345,192	4382,20	52,23	14,24	46,49	7,77								
Ulaz u glavni cjevovod	2345,192	4382,20	52,23	14,24										
Glavni cjevovod XYZ (45,6 km)	2345,192	4382,20	51,31	10,86			0,92	9,60						
Razdjelnik bušotina X	2345,192	4382,20	51,31	10,86										
SJ X-1	441,581	825,13			Potpun	0,00	-9,52	133,66	-0,83	60,00	14,01	60,83	10,86	51,31
SJ X-3	491,809	918,99			Potpun	0,00	-9,14	148,86	-0,45	60,00	13,80	60,45	10,86	51,31
SJ X-4	488,354	912,53			Potpun	0,00	-9,26	147,83	-0,57	60,00	13,82	60,57	10,86	51,31
Interkonekcijski cjevovod XY (3,9 km)	923,448	1725,54	51,30	11,67			0,004	6,32						
Razdjelnik bušotina Y	923,448	1725,54	51,30	11,67										
SJ Y-2	464,524	868,00			Potpun	0,00	-8,75	141,19	-0,05	60,00	14,59	60,05	11,67	51,30
SJ Y-3	458,921	857,53			Potpun	0,00	-8,81	139,48	-0,11	60,00	14,59	60,11	11,67	51,30

Tablica 14: Rezultati proračuna IIM-a za scenarij C1: Maksimalno mogući kapacitet utisa gustog CO_2 isključivo u ležište SJ-XY.

	Protok CO_2 (1000 m^3/dan)	Protok CO_2 (t/dan)	Tlak u elementu sustava (BARg)	Temperatura u elementu sustava (°C)	Otvor sapnice (mm)	Pad tlaka kroz sapnicu (bar)	Pad tlaka kroz element (bar)	C-faktor erozije cijevi	Pad tlaka u ležištu (bar)	Tlak ležišta (BARg)	Temperatura na dnu bušotine (°C)	Tlak na dnu bušotine (BARg)	Temperatura na ušću bušotine (°C)	Tlak na ušću bušotine (BARg)
Kompresorska/pumpna stanica	4297,157	8029,62	60,00	15,00										
Izlazni razdjelnik	4297,157	8029,62	60,00	15,00										
Regulator protoka	4297,157	8029,62	60,00	15,00	Potpun	0,00								
Ulaz u glavni cjevovod	4297,157	8029,62	60,00	15,00										
Glavni cjevovod XYZ (45,6 km)	4297,157	8029,62	57,35	10,87			2,65							
Razdjelnik bušotina X	4297,157	8029,62	57,35	10,87										
SJ X-1	474,015	885,74			Potpun	0,00	-3,59	143,17	-0,94	60,00	13,60	60,94	10,87	57,35
SJ X-2	560,788	1047,88			Potpun	0,00	-3,08	169,40	-0,43	60,00	13,36	60,43	10,87	57,35
SJ X-3	528,902	988,30			Potpun	0,00	-3,13	159,75	-0,48	60,00	13,38	60,48	10,87	57,35
SJ X-4	524,150	979,42			Potpun	0,00	-3,26	158,38	-0,61	60,00	13,38	60,61	10,87	57,35
SJ X-5	643,917	1203,22			Potpun	0,00	-3,47	194,50	-0,82	60,00	13,32	60,82	10,87	57,35
Interkonekcijski cjevovod XY (3,9 km)	1565,386	2925,06	57,27	11,68			0,08							
Razdjelnik bušotina Y	1565,386	2925,06	57,27	11,68										
SJ Y-1	569,875	1064,86			Potpun	0,00	-3,19	173,04	-0,46	60,00	14,03	60,46	11,68	57,27
SJ Y-2	500,435	935,11			Potpun	0,00	-2,79	152,48	-0,06	60,00	14,00	60,06	11,68	57,27
SJ Y-3	495,076	925,09			Potpun	0,00	-2,84	150,24	-0,12	60,00	14,14	60,11	11,68	57,27

Tablica 15: Rezultati proračuna IIM-a za scenarij C2: Maksimalno mogući kapacitet utisa gustog CO_2 isključivo u ležište SJ-Z.

	Protok CO_2 (1000 m^3/dan)	Protok CO_2 (t/dan)	Tlak u elementu sustava (BARg)	Temperatura u elementu sustava (°C)	Otvor sapnice (mm)	Pad tlaka kroz sapnicu (bar)	Pad tlaka kroz element (bar)	C-faktor erozije cijevi	Pad tlaka u ležištu (bar)	Tlak ležišta (BARg)	Temperatura na dnu bušotine (°C)	Tlak na dnu bušotine (BARg)	Temperatura na ušću bušotine (°C)	Tlak na ušću bušotine (BARg)
Kompresorska/pumpna stanica	1757,051	3283,21	60,00	15,00										
Izlazni razdjelnik	1757,051	3283,21	60,00	15,00										
Regulator protoka	1757,051	3283,21	59,98	15,00	Potpun	0,00								
Ulaz u glavni cjevovod	1757,051	3283,21	59,98	15,00										
Glavni cjevovod XYZ (45,6 km)	1757,051	3283,21	59,40	10,89			0,58	7,16						
Razdjelnik bušotina X	1757,051	3283,21	59,40	10,89										
Interkonekcijski cjevovod XY (3,9 km)	1757,051	3283,21	59,29	11,67			0,11	11,93						
Razdjelnik bušotina Y	1757,051	3283,21	59,29	11,67										
Interkonekcijski cjevovod YZ (7,0 km)	1757,051	3283,21	59,04	11,91			0,25	11,95						
Razdjelnik bušotina Z	1757,051	3283,21	59,04	11,91										
SJ Z-1	575,123	1074,67			Potpun	0,00	-1,38	177,26	-0,42	60,00	13,95	60,42	11,91	59,04
SJ Z-2	586,020	1095,03			Potpun	0,00	-1,22	181,28	-0,26	60,00	13,93	60,26	11,91	59,04
SJ Z-3	595,909	1113,51			Potpun	0,00	-1,42	181,35	-0,46	60,00	14,25	60,46	11,91	59,04

Tablica 16: Rezultati proračuna IIM-a za scenarij C3: Maksimalno mogući kapacitet utisa gustog CO_2 u oba ležišta SJ-XY i SJ-Z.

	Protok CO_2 (1000 m^3/dan)	Protok CO_2 (t/dan)	Tlak u elementu sustava (BARg)	Temperatura u elementu sustava (°C)	Otvor sapnice (mm)	Pad tlaka kroz sapnicu (bar)	Pad tlaka kroz element (bar)	C-faktor erozije cijevi	Pad tlaka u ležištu (bar)	Tlak ležišta (BARg)	Temperatura na dnu bušotine (°C)	Tlak na dnu bušotine (BARg)	Temperatura na ušću bušotine (°C)	Tlak na ušću bušotine (BARg)
Kompresorska/pumpna stanica	5864,353	10958,06	60,00	15,00										
Izlazni razdjelnik	5864,353	10958,06	60,00	15,00										
Regulator protoka	5864,353	10958,06	60,00	15,00	Potpun	0,00								
Ulaz u glavni cjevovod	5864,353	10958,06	60,00	15,00										
Glavni cjevovod XYZ (45,6 km)	5864,353	10958,06	55,28	10,85			4,72	23,89						
Razdjelnik bušotina X	5864,353	10958,06	55,28	10,85										
SJ X-1	462,933	865,03			Potpun	0,00	-5,62	139,92	-0,90	60,00	13,72	60,90	10,85	55,28
SJ X-2	547,116	1022,33			Potpun	0,00	-5,14	165,40	-0,42	60,00	13,48	60,42	10,85	55,28
SJ X-3	516,495	965,12			Potpun	0,00	-5,19	156,10	-0,47	60,00	13,51	60,47	10,85	55,28
SJ X-4	512,191	957,07			Potpun	0,00	-5,32	154,84	-0,60	60,00	13,50	60,60	10,85	55,28
SJ X-5	628,088	1173,64			Potpun	0,00	-5,52	189,86	-0,80	60,00	13,44	60,80	10,85	55,28
Interkonekcijski cjevovod XY (3,9 km)	3197,531	5974,87	54,85	11,57			0,43	21,79						
Razdjelnik bušotina Y	3197,531	5974,87	54,85	11,57										
SJ Y-1	553,534	1034,33			Potpun	0,00	-5,60	167,86	-0,45	60,00	14,13	60,45	11,57	54,85
SJ Y-2	487,072	910,14			Potpun	0,00	-5,20	147,72	-0,05	60,00	14,25	60,05	11,57	54,85
SJ Y-3	481,023	898,83			Potpun	0,00	-5,26	145,89	-0,11	60,00	14,25	60,11	11,57	54,85
Interkonekcijski cjevovod YZ (7,0 km)	1675,902	3131,57	54,63	11,90			0,23	11,44						
Razdjelnik bušotina Z	1675,902	3131,57	54,63	11,90										
SJ Z-1	547,634	1023,30			Potpun	0,00	-5,77	166,50	-0,40	60,00	14,57	60,40	11,90	54,63
SJ Z-2	559,570	1045,61			Potpun	0,00	-5,62	170,12	-0,25	60,00	14,56	60,25	11,90	54,63
SJ Z-3	568,698	1062,66			Potpun	0,00	-5,80	172,87	-0,43	60,00	14,58	60,43	11,90	54,63

5. Zaključak

Komparativnom analizom operativnih ovojnica bušotinskog fonda ležišta SJ-XY i SJ-Z pokazano je da je u zavisnosti o odabranom scenariju utisa moguće stabilno injektirati CO_2 u plinovitom ili tekućem stanju. Pokazano je da je integriranim injekcionim modeliranjem moguće kod neke veličine utisa kvantificirati međuzavisnost utjecaja pojedinih segmenata injekcione infrastrukture u vidu distribucije tlaka i temperature unutar sustava. Zbog toga je za pojedine scenarije utiskivanja CO_2, uvažavajući sva ograničenja injekcione infrastrukture, moguće odrediti optimalan odabir injekcionih uvjeta i u konačnosti aktivnog bušotinskog fonda.

Rezultati proračuna integriranog injekcionog modela CCS sustava ležišta SJ-XY i SJ-Z prema odabranim scenarijima pokazuju:

- da je za scenarij A1 (Slika 6) utis 600 000 m^3/dan gustog (tekućeg) CO_2 moguć isključivo kroz bušotinu SJ X-5 (Slika 4) u ležište SJ-XY. Ovo je nepovoljan scenarij budući da kompletnu količinu utiskuje u ograničeni volumen ležišta;
- da je za scenarije A2 i A3 (Slika 6) utis 600 000 m^3/dan plinovitog CO_2 isključivo u ležište SJ-XY, odnosno u oba ležišta SJ-XY i SY-Z istovremeno, moguć jedino uz uvjet grijanja fluida na ušćima bušotina i regulacijom utisnih količina pomoću regulatora protoka na ušćima bušotina. Na ovaj način aktiviran je cjelokupni bušotinski fond što značajno pridonosi ravnomjernom popunjavanju ležišta;
- da je za scenarij B1 (Slika 7) utis gustog CO_2 u ležište SJ-XY u ukupnom iznosu od 1 780 000 m^3/dan (cca 1 260 000 t/god) moguće ostvariti pomoću 4 bušotine, 3 s platforme X (SJ X-1, SJ X-3 i SJ X-4) te bušotinom SJ Y-2 s platforme Y, regulacijom pomoću regulatora protoka postavljenog na ulazu u glavni cjevovod sustava;
- da je za scenarij B2 (Slika 7) utis gustog CO_2 u ležište SJ-XY u ukupnom iznosu od 2 350 000 m^3/dan (cca 2 200 000 t/god) moguće ostvariti pomoću 5 bušotina, 3 s platforme X (SJ X-1, SJ X-3 i SJ X-4) te bušotinama SJ Y-2 i SJ Y-3 s platforme Y, regulacijom pomoću re-

gulatora protoka postavljenog na ulazu u glavni cjevovod sustava;
- da za scenarij C1 (Slika 8) vrijednost maksimalno mogućeg dnevnog kapaciteta utisa CO_2 (utis isključivo u ležište SJ-XY) iznosi 4 297 157 m^3/dan (cca 8 030 t/dan);
- da za scenarij C2 (Slika 8) vrijednost maksimalno mogućeg dnevnog kapaciteta utisa CO_2 (utis isključivo u ležište SJ-Z) iznosi 1 757 051 m^3/dan (cca 3 283 t/dan);
- da za scenarij C3 (Slika 8) vrijednost maksimalno mogućeg dnevnog kapaciteta utisa CO_2 (istovremeni utis u oba ležišta) iznosi 5 864 353 m^3/dan (cca 10 958 t/dan).

I na kraju, može se zaključiti da je integrirano injekciono modeliranje sveobuhvatan postupak kojeg treba koristiti kako pri projektiranju tako i pri analizi rada već izgrađenih injekcionih sustava.

Popis korištenih oznaka i jedinica

P_R – tlak ležišta, BARg;
P_{WH} – dinamički tlak na ušću bušotine, BARg;
T_{WH} – dinamička temperatura na ušću bušotine, °C;

Popis pojmova i skraćenica

BARg – relativni (manometarski) tlak;
bar – apsolutni tlak;
CCS – hvatanje i trajno skladištenje CO_2 u geološke formacije (*eng. Carbon Capture and Storage*);
C-faktor – faktor erozije cijevi;
IIM – integrirani injekcioni model (*eng. Integrated Injection Model*);
IPR – indikatorska krivulja (*eng. Inflow Performance Relationship*);
NIST – National Institute of Standards and Technology;
pVT – odnos tlak-volumen-temperatura (*eng. Pressure-Volume-Temperature*);
VLP – krivulja dinamičkih tlakova na dnu bušotine (*eng. Vertical Lift Performance*);

Literatura

1. Acevedo, L. and Owain Tucker.: Managing CO_2 Phase Behaviour in Depleted Reservoirs, Paper presented at the ADIPEC, Abu Dhabi, UAE, October 2022., doi: https://doi.org/10.2118/210796-MS.
2. Lešković, G.: Koncept operativne ovojnice injekcione bušotine za CO_2, Nafta i Plin, broj 182 /2024.
3. Marcia L, Huber, Eric W, Lemmon, Ian H, Bell, and Mark O, McLinden.: The NIST REFPROP Database for Highly Accurate Properties of Industrially Important Fluids, Industrial & Engineering Chemistry Research 2022 61 (42), 15449-15472, doi: 10,1021/acs, iecr,2c01427.
4. Span, R., Wagner, W.: 'A new Equation of State for Carbon Dioxide Covering the Fluid Region from the Triple Point Temperature to 1100 K at Pressures up to 800 MPa', J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 25, No. 6, 1996.