

Koncept operativne ovojnice injekcije bušotine za CO₂

CO₂ Injection Well Operating Envelope Concept

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



Ključne riječi: operativna ovojnica bušotine, fazno ponašanje CO₂, sistemska analiza utisne bušotine za CO₂, hvatanje i trajno skladištenje CO₂ u geološke formacije.

Key words: well operating envelope, CO₂ phase behaviour, CO₂ injection well system analysis, carbon capture and storage (CCS).



Sažetak

Operativna ovojnica bušotine (*eng. Well Operating Envelope*) novi je pojam kojim se opisuje operativno područje rada injekcije bušotine za CO₂. Posebno je zanimljiva u kontekstu tehnologija CCS i CO₂-EOR. Očituje se kao grafički prikaz zavisnosti kretanja injekcionih količina CO₂ u odnosu na tlak i temperaturu ušća bušotine (P_{WH} i T_{WH}). Izrađuje se za određenu vrijednost ležišnog tlaka (P_R).

Operativna ovojnica bušotine se koristi za identifikaciju područja stabilnog procesa utiskivanja CO₂ u dominantno gusto i dominantno plinovitom stanju u funkciji promjene tlaka i temperature na ušću bušotine, važećeg ležišnog tlaka i količina CO₂ koje se utiskuju u ležište. 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.

Cilj ovoga rada je prikazati uporabnu vrijednost operativne ovojnice bušotine kao vrijednog alata u procesu razumijevanja operativnih karakteristika bušotine unutar sustava za injektiranje CO₂. Prikazana je i metodologija konstrukcije operativne ovojnice temeljena na sistemskoj analizi bušotine (Nodal analizi) s osvrtom na važnost razumijevanja termodinamičkog ponašanja CO₂ i odabira primjerenog pVT matematičkog modela.

Metodologija izrade, analize i načina uporabe operativne ovojnice dana je na primjeru tipske bušotine SJ X-5 Dir odobalnog lokaliteta Sjeverni Jadran.



Abstract

Well Operating Envelope is a new term used to describe the operating area of a CO₂ injection well. It is particularly interesting in the context of CCS and CO₂-EOR technologies. It manifests itself as a graphical representation of the dependence of the movement of the CO₂ injection quantities in relation to the pressure and temperature at the wellhead (P_{WH} and T_{WH}). It is made for a specific value of reservoir pressure (P_R).

Well Operating Envelope is used to identify the area of the stable CO₂ injection in the dominantly dense and dominantly gaseous state as a function of the change in pressure and temperature at the wellhead, the specific reservoir pressure and the amount of CO₂ that is injected into the reservoir. Using the Well

Operating Envelope, the area of possible flow instabilities caused by phase changes of the fluid in the well is clearly demarcated. This area is characterized by the possibility of an unstable flow condition, which manifests itself in the form of significant pressure pulsations and temperature fluctuations, which needs to be avoided in an operational sense.

The aim of this paper is to show the utility value of the Well Operating Envelope as a valuable tool in the process of understanding the operational characteristics of the well within the entire CO₂ injection system. The methodology for the construction of the operating envelope is presented based on the system analysis of the well with reference to the importance of understanding the thermodynamic behaviour of CO₂ and choosing an adequate pVT mathematical model.

The methodology of construction, analysing, and using the operational envelope is given on the example of the typical offshore North Adriatic well SJ X-5 Dir.

1. Uvod

Karakteristika pVT ponašanja CO₂ je da u dvofaznom pojasu promjene stanja (od 100 % plinovite do 100 % kapljevite faze i obrnuto) dolazi do dramatične promjene vrijednosti gustoće (Tablica 1), kao i transportnih svojstava fluida koje isto tako dramatično utječu na utisne mogućnosti bušotine u cjelini. Karakteristika dvofaznog područja protjecanja u bušotini je da se mogu (ali i ne moraju) javiti nestabilnosti u protoku u vidu pulzacija tlaka (hidrauličkih udara) i naglih promjena temperatura, što se zbog niza tehničkih razloga želi izbjeći. Acevedo i Tucker (2022) pokazali su da je upravljanje faznim ponašanjem CO₂ u kontekstu tehnologije CCS u iscrpljenim plinskim ležištima glavni tehnički izazov, i svodi se u suštini na izbjegavanje uvjeta pod kojim dolazi do nekontroliranog utisa CO₂. Ustvrdili su da su nestabilnosti protjecanja vezane uz uvjete pojave višefaznog protjecanja i posljedično naglih i značajnih promjena temperature zbog Joule-Thomsonova efekta. Ovakva neustaljena stanja protjecanja obično se analiziraju u sklopu zasebne studije o stabilnosti protoka (*eng. Flow Assurance Study*) i kao takva nisu predmet razmatranja u ovom radu.

Veličina ekspanzije CO₂ i sniženja temperature, kao posljedice fazne promjene stanja, uglavnom zavisi o veličini dinamičkog tlaka u bušotini, odnosno o le-

žišnom tlaku. Što je tlak niži, to je razina pothlađenja veća. Utjecaj ovakvog ponašanja naročito je izražen kod iscrpljenih ležišta ugljikovodika. Tada je otpor ležišta u odnosu na infrastrukturu najmanji moguć, ali i represija na ležište najviša moguća, posebice u slučaju utisa dominantno gustog fluida. Tehnički razlozi zbog kojih se žele izbjeći nestabilnosti prilikom injektiranja poglavito su vezani su uz pojave niskih temperatura što za posljedicu može imati smrzavanje paker fluida, p-T uvjete protjecanja ispod dozvoljenog temperaturnog / operativnog raspona bušotinske opreme, pucanja cementne veze iza kolone zaštitnih cijevi i/ili stvaranja fraktura u stijenama pribušotinske zone. Tu su i problemi koje mogu uzrokovati hidrati u koliko se stvore uvjeti za to. Autori su u tom smislu predložili dvije grupe rješenja za upravljanje faznim ponašanjem CO₂ u bušotinama. Prva grupa odnosi se na intervencije u bušotinama u koje spadaju:

- povećanje veličine trenja u uzlaznom nizu cijevi (ugradnjom tubinga malog promjera i/ili relativno velikim protokom fluida u odnosu na promjer cijevi);
- ugradnja dubinske sapnice;
- namjerno reduciranje injektivnosti ležišta (primjerice djelomično raskrivanje ležišta).

Druga grupa odnosi na integralna rješenja koja uključuju intervencije na injekcionoj infrastrukturi u koje spadaju:

- termička izolacija sustava priključnih cjevovoda bušotina u svrhu što manjeg gubitka temperature fluida u utisnoj infrastrukturi;
- grijanje fluida u svrhu podizanja temperature na ušću bušotina.

Zbog svega navedenog jedan od glavnih zadataka prilikom projektiranja/analiziranja CCS sustava je identificirati granična područja tlakova i temperatura ušća bušotine i utisnih količina kod kojih započinju i završavaju mogući neustaljeni uvjeti protjecanja. Konkretno to znači odrediti koje su to maksimalne količine utisa u dominantno plinovitoj fazi, odnosno koje su to minimalne količine utisa u dominantno gustoj fazi (kapljevitom i/ili u superkritičnom stanju) i pri kojim se tlakovima i temperaturama na ušću bušotine ta transformacija faza događa. Sve u zavisnosti o trenutnom tlaku ležišta. Upravo je operativna ovojnica bušotine alat pomoću kojeg postaje moguće na jednom mjestu identificirati operativne mogućnosti bušotine uvažavajući spomenuta ograničenja.

2. Važnost razumijevanja faznog ponašanja CO₂

Osobitosti faznog ponašanja CO₂ uvelike određuju da li će neka geološka struktura/ležište biti pogodno i/ili u kojoj mjeri za skladištenje CO₂. Mehanizam protoka CO₂ kroz sustav cijevi i ležište kompleksan je termodinamički proces i zbog toga je od vitalne važnosti poznavati termodinamičke odnose stanja CO₂. Tradicionalno se u naftnoj industriji za pVT karakterizaciju kompleksnih smjesa ugljikovodičnih komponenti koriste simulacijski algoritmi bazirani najčešće na Peng-Robinson (PR) i Soave-Redlich-Kwong (SRK) kubnim jednadžbama stanja. Uz primjereno usklađivanje korekcijskih parametara jednadžbi prema rezultatima laboratorijskih analiza pVT ponašanja razmatranih smjesa, uglavnom dobro oponašaju fazne promjene i odnosna fizikalna svojstva fluida. Rezultati proračuna provedeni pomoću PR i SRK jednadžbi stanja za čisti (ili uglavnom čisti) CO₂ pokazali su jako dobro slaganje u predikciji krivulje zasićenja. Međutim nisu u mogućnosti reproducirati dvofazno područje karakteristično za samu putanju krivulje zasićenja faznog (p-T) dijagrama CO₂. Zbog toga, prilikom proračuna gradijenata tlaka i temperature, kod uporabe ovih modela dolazi do naglih skokova budući da isti

prepoznaju samo stanja 100 % plinske faze, 100 % kapljevite faze i superkritično područje. Posljedica su velike razlike u izračunatim gustoćama pri stanjima vrlo malih promjena u zoni prijelaza krivulje zasićenja p-T dijagrama.

Uvažavajući činjenicu da je tijekom modeliranja, simulacija i projektiranja sustava injektiranja CO₂ u geološke strukture od vitalne važnosti točno oponašanje njegovih termodinamičkih i transportnih svojstava, odabir primjerenog pVT matematičkog modela od prvorazrednog je značenja. Specifičnosti CO₂ modeliranja vezane su uz značajne termalne efekte koji se javljaju pri protoku kroz suženja i sapnice, pri kompresiji/dekompresiji CO₂, te promjena stanja u ležištu, naročito u pribušotinskoj zoni. Također, tu su značajne i nagle promjene gustoće koje su vezane uz fazno ponašanje CO₂ što ima naročit utjecaj na ponašanje gradijenta tlaka i temperature u bušotinama.

Zbog toga je u ovom radu za izračun svih relevantnih volumetrijskih i termalnih svojstva CO₂ korištena parametarska jednadžba stanja Span i Wagnera (1996) u Helmholtz-ovom obliku koja se smatra industrijskim standardom za pVT modeliranje CO₂. Glavna snaga jednadžbi stanja u Helmholtz-ovom obliku je sposobnost izračuna značajnog broja termodinamičkih vrijednosti stanja razmatranih fluida.

Tablica 1. Rubne vrijednosti entalpije i gustoće čistog CO₂ pri karakterističnim temperaturama i odnosnim tlakovima zasićenja (izvor: literatura 2 i 3, prilagodio G. Lešković).

Temperatura (°C)	Tlak zasićenja (bar)	Entalpija (kJ/kg)	Gustoća (kg/m ³)	Faza (% plina)
0	34,85	430,89	97,65	plin (100 %)
		200,00	927,43	kapljevina (0 %)
5	39,70	427,48	114,62	plin (100 %)
		212,50	896,03	kapljevina (0 %)
10	45,02	422,88	135,16	plin (100 %)
		225,73	861,12	kapljevina (0 %)
15	50,87	416,64	160,73	plin (100 %)
		239,99	821,21	kapljevina (0 %)
20	56,28	407,87	194,20	plin (100 %)
		255,87	773,39	kapljevina (0 %)
25	64,34	394,43	242,73	plin (100 %)
		274,78	710,50	kapljevina (0 %)
30	72,14	365,13	345,10	plin (100 %)
		304,55	593,31	kapljevina (0 %)
30,98	73,77	332,25	467,60	Kritična točka

Osim međuzavisnosti tlaka, temperature i gustoće, tu su brzina zvuka, izotermalni i izobarni toplinski kapaciteti, tlakovi para, gustoće kod tlakova isparavanja i rošenja, entalpije isparavanja, entropije, Joule-Thomsonova koeficijenta, itd., sve u zadanim vrijednostima pogreške u odnosu na mjerene/publicirane vrijednosti (Marcia i dr.; 2022).

Iako postoje modeli koji izravno preko entropije povezuju jednadžbu stanja i transportna svojstva fluida, tradicionalno se za izračun transportnih svojstva koriste modeli razvijeni nezavisno od jednadžbi stanja kao funkcije gustoće i temperature (Marcia i dr.; 2022). Ovaj princip primijenjen je i u ovom radu tako da je za izračun viskoznosti korišten model Laesecke i Muzny (2017), toplinske vodljivosti model Huber i dr. (2016) i površinske napetosti model Mulero i dr. (2012). Pri tome ulazne vrijednosti tlaka, temperature i gustoće za izračun transportnih svojstava dolaze od glavnog modela Span i Wagnera (1996). Više o pVT programu korištenom u ovom radu može se naći u literaturi 6.

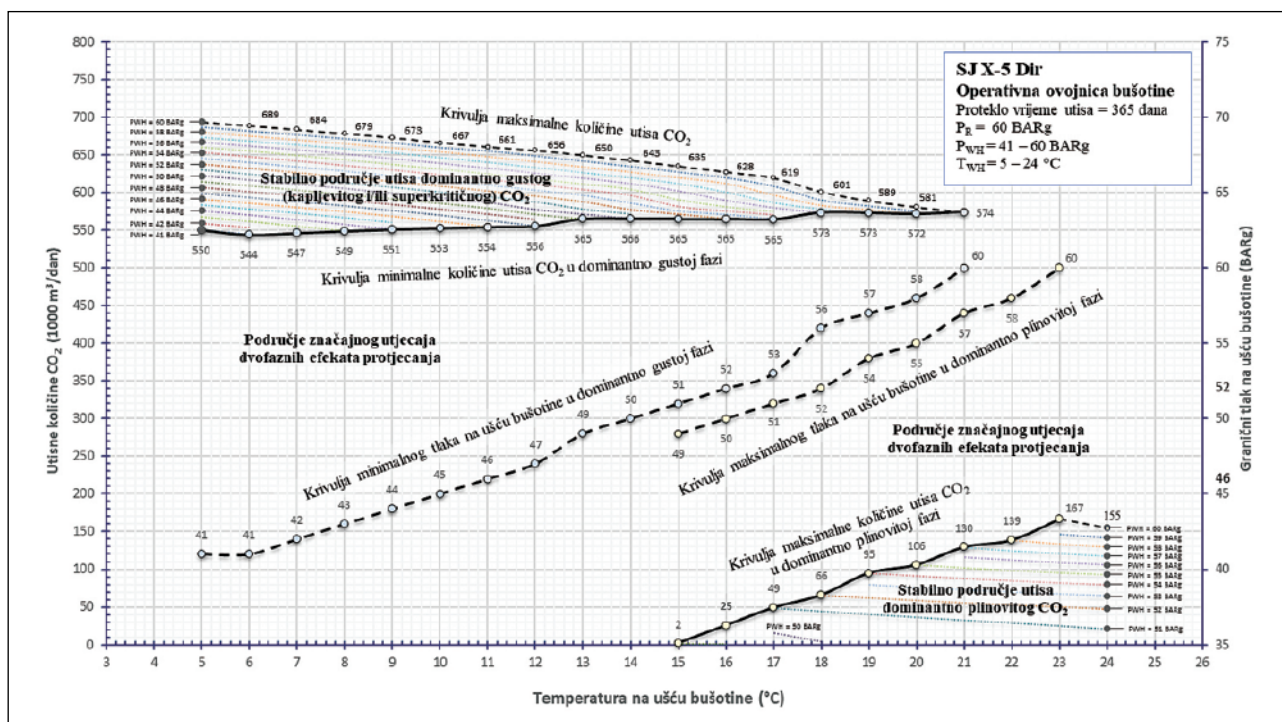
Prilikom pVT modeliranja vrlo je važno razumjeti fazno ponašanje CO₂. Fazno ponašanje uzrokovano je promjenama stanja entalpije kod tlaka i temperature zasićenja, poznatim još i pod nazivom diskontinuitet entalpije. Budući da u standardnom p-T dijagramu ne postoji način kako prikazati diskontinuitet entalpije, fazno ponašanje primjerenije je prikazati pomoću p-H dijagrama. Slika 10 prikazuje p-H dijagram čistog CO₂.

Pogleda li se поближе Slika 10, može se primijetiti da u područjima gdje egzistira jedna faza, bilo kapljevita, plinovita ili se nalazimo u superkritičnom području, jedna jedinstvena vrijednost tlaka, temperature i entalpije određuju termodinamičko stanje fluida. U dvofaznom području raspona temperatura i tlakova (ispod kritične točke omeđenom krivuljom isparavanja i krivuljom rošenja), za neku konstantnu vrijednost temperature i tlaka zasićenja, postoji točno određeni raspon vrijednosti entalpije unutar kojeg se događa fazna tranzicija u punom rasponu, od 100 % kapljevite do 100 % plinovite faze. Razlike u entalpiji pri tome korespondiraju latentnoj toplini (energiji potrebnoj za prijelaz iz kapljevite u plinovitu fazu). Na ovaj način, uvođenjem p-H dijagrama, moguće je pratiti fazno ponašanje čistog CO₂ u injekcionoj infrastrukturi i u ležištu. Tablica 1 prikazuje rubne vrijednosti entalpije i gustoće čistog CO₂ pri karakterističnim temperaturama i odnosnim tlakovima zasićenja.

3. Sistemska analiza bušotine

Cilj optimalizacije rada (projektiranja) utisnog sustava je utisnuti fluid u ležište uz što manje gubitke raspoložive/uložene energije (tlaka i temperature). Kako bi se u cijelosti mogli sagledati svi aspekti tog gubitka nužno je poznavati fizikalne procese što se odvijaju na tom putu pri čemu se isti sustav sagledava kao jedinstvena cjelina u kojoj promjene u jednoj točki sustava neminovno uzrokuju promjene u cjelokupnom sustavu. Sistemska analiza sveobuhvatan je postupak koji se temelji na raspodjeli utisnog sustava bušotine na karakteristična čvorišta, od kojih se neka i ne moraju nalaziti u realnom modelu, i računanja promjene tlaka i temperature u njima (Slika 1), sve u zavisnosti o kretanju injekcionih količina. Dvije krajnje točke, srednji ležišni tlak i temperatura (P_R i T_R) i tlak i temperatura ušća bušotine (P_{WH} i T_{WH}) konstantne su (rubne) vrijednosti u razmatranoj točki vremena. Ostale točke karakteristične su po specifičnoj fizici protjecanja fluida i za njih su definirani fizikalni obrasci koji opisuju funkcionalnu zavisnost tlaka i temperature o trenutnom protoku fluida u čvoru. S fizikalnog stajališta karakteristična su sljedeća područja protjecanja fluida u prikazanom modelu i odnosni gubici tlaka i temperature u njima:

- područje protjecanja fluida iz bušotine u ležište (*eng. Inflow Performance*). U ovom području računa se injektivnost bušotine. Vrijednost injektivnosti bušotine iskazuje se kroz Indeks injektivnosti i odnosnu IPR krivulju (*eng. IPR – Inflow Performance Relationship*). IPR krivulja pokazatelj je zavisnosti kretanja injekcionih količina CO₂ o dinamičkom tlaku ispred perforacija u bušotini (P_{WF}) kod nekog ležišnog tlaka (P_R);
- područje protjecanja fluida u bušotini iskazuje se kroz VLP krivulju (*eng. VLP – Vertical Lift Performance*). VLP krivulja pokazatelj je zavisnosti kretanja injekcionih količina CO₂ o dinamičkom tlaku ispred perforacija u bušotini (P_{WF}) kod nekog tlaka i temperature ušća bušotine (P_{WH} i T_{WH}). U ovom području računa se distribucija tlaka i temperature po dubini bušotine, uvažavajući sve promjene trajektorije bušotine, konstrukcije bušotine, unutarnjeg promjera cijevi i instaliranih restrikcija u vidu dubinskog sigurnosnog ventila ili dubinskih regulatora protoka ako postoje. Također, ovdje se provodi proračun/kontrola eventualne



Slika 2. Operativna ovojnica injekcione bušotine SJ X-5 Dir za vrijednost ležišnog tlaka 60 BARg.

plinovite faze i 100 % kapljevite faze zasebno. Naime, svojstvo je korištenog pVT-modela da je uz spomenuti rubni tlak i temperaturu kao varijable proračuna potrebno postaviti i treću varijablu. To je ili udio faza ili vrijednost entalpije (jedno isključuje drugo). Razlog ovakvog postupka je što u dvofaznom području (Slika 10), kod istog tlaka i temperature, odabir jedne varijable uvjetuje vrijednost druge što u jednofaznim područjima nije slučaj. Kada se kao ulazna varijabla odabere primjerice da je ulazni fluid u 100 % plinovitom stanju, a ulazna varijabla u isto vrijeme je neka temperatura i tlak fluida kod koje je takvo stanje nemoguće, tada alat traži (mijenja) ulaznu temperaturu sustava kod istog/zadanog tlaka, do postizanja vrijednosti entalpije koja će zadovoljiti uvjet 100 % plinske faze na ulazu u bušotinu. Isti princip vrijedi i za slučaj kada je ulazni fluid u 100 % tekućem stanju. Posljedica ovog procesa je da u rješenjima sistemske analize postoje i ona za koja je temperatura na ulazu u bušotinu drugačija od rubne zadane. Eliminacijom tih rješenja eliminiraju se i tlakovi ušća bušotine kod kojih je kod zadane temperature jednofazni fluid nemoguć. Ovdje se mora napomenuti da činjenica da se u sustav ulazi s jednofaznim fluidom, ne znači da se kasnije u utisnom sustavu ne događaju fazne promjene. One se događaju u skladu s p-T-H uvjetima, međutim jasno se u matematičkom modelu može pratiti stanje entalpije čime je isti sustav (model)

jednoznačno određen. Na taj način, mogu se identificirati tri karakteristična područja utisa s obzirom na njegovo termodinamičko stanje (Slika 2):

- stabilno područje utisa dominantno plinovitog CO₂;
- područje značajnog utjecaja dvofaznih efekata protjecanja;
- stabilno područje utisa dominantno gustog (kapljevito i/ili superkritičnog) CO₂.

Spajanjem točaka graničnih rješenja tlaka i odnosnih protoka u razmatranom rasponu temperatura na ušću bušotine i kod nekog ležišnog tlaka određuju se tzv. granične krivulje bušotine. To su:

- krivulja maksimalne količine utisa CO₂ u dominantno plinovitoj fazi;
- krivulja maksimalnog tlaka na ušću bušotine u dominantno plinovitoj fazi;
- krivulja minimalne količine utisa CO₂ u dominantno gustoj fazi;
- krivulja minimalnog tlaka na ušću bušotine u dominantno gustoj fazi;
- krivulja maksimalne količine utisa CO₂.

Područja grafa između graničnih krivulja dvaju faza označava se kao područje značajnog utjecaja dvofaznih efekata protjecanja. Ovo područje karakterizira mogućnost pojave neustaljenog stanja protjecanja

koje se manifestira u vidu već spomenutih pulzacija tlaka i fluktuacija temperatura zbog čega se u operativnom smislu izbjegava. Područje grafa ispod graničnih krivulja koje se odnose na protok u dominantno plinovitoj fazi predstavlja stabilno područje utisa dominantno plinovitog CO₂, odnosno područje iznad graničnih krivulja koje se odnose na protok u dominantno gustoj fazi predstavlja stabilno područje utisa dominantno gustog (kapljevito i/ili superkritičnog) CO₂.

Dodatno, uz određivanje graničnih krivulja potrebno je identificirati koji je to granični dinamički tlak na razini ležišta (dinamički tlak u bušotini) iznad kojih može doći do narušavanja integriteta ležišta i/ili cementne veze za bušotinu. Pri tome se uspoređuju rješenja sistemske analize tlakova u bušotini i izračunate vrijednosti tlaka frakturiranja ležišta umanjenog za neki sigurnosni postotak. Rješenja analize kod kojih dinamički tlak prelazi vrijednost umanjenog tlaka frakturiranja svrstavaju se van operativnog područja bušotine i naziva se još i područjem utisa limitirano frakturnim gradijentom ležišta.

Ovdje se za svako rješenje također provjerava da li odnosna vrijednost C-faktora erozije uzlaznih cijevi

vi bušotine (tubinga) premašuje odabranu graničnu vrijednost. U slučaju da je vrijednost C-faktora veća, odnosna rješenja analize svrstavaju se van operativnog područja bušotine i naziva se još i područjem utisa limitirano C-faktorom cijevi.

5. Operativna ovojnica bušotine SJ X-5 Dir

U procesu analize potencijala ležišta plina za permanentno skladištenje CO₂ na lokalitetu Sjeverni Jadran ležište SJ-X izdvojilo se kao potencijalno pogodno. U tu svrhu analizirane su injektivne mogućnosti pripadajućih bušotina u postojećem stanju površinske infrastrukture i proizvodne/injektivne opreme bušotina. Bušotina SJ X-5 Dir po svojoj je konstrukciji i proizvodnom opremanju tipična za lokalitet Sjeverni Jadran i kao takva je za potrebe ovog rada odabrana kao pokazni primjer procjene injektivnosti i analize operativnih mogućnosti bušotine pomoću operativne ovojnice bušotine. Ciljano ležište SJ-X iscrpljeno je ležište suhog plina sa snažno izraženim vodonapornim režimom. Procjenjuje se da je ležišni tlak blizak početnom i iznosi oko 60 BAR_g. Za izračun injektivnih

Tablica 2. Opći podaci modela bušotine SJ X-5 Dir.

Fluid :	CO ₂	
Tip bušotine :	CO ₂ injektor	
pVT model :	NIST RefProp (Span & Wagner)	
Temperaturni model :	Enthalpy Balance	
IPR model :	Petroleum Experts (Forchheimer)	
VLP model :	Petroleum Experts 5 Extended	
Vrijeme od početka utisa :	365	dana
Dubina ležišta (sredina perforacija) :	637,2	m (mjerene dubine)
Dubina ugradnje proizvodne kolone zaštitnih cijevi bušotine :	951,19	m
Toplinska vodljivost zaštitnih cijevi :	45	W/(m·K)
Toplinska vodljivost cementa :	0,86537	W/(m·K)
Dubina pete tubinga :	585,6	m
Toplinska vodljivost tubinga :	25,96	W/(m·K)
Dubina pakera :	585,62	m
Gustoća paker fluida :	1250	kg/m ³
Toplinska vodljivost paker fluida :	0,5971	W/(m·K)
Dubina mora :	42	m
Temperatura na dnu mora (siječanj) :	12,7	°C
Temperatura na površini mora (siječanj) :	11,4	°C
Brzina strujanja mora :	0,01	m/s
Visina ušća bušotine (vješalice tubinga) iznad razine mora :	17,2	m
Temperatura zraka :	15	°C
Vlažnost zraka :	25	%
Brzina strujanja zraka :	0,9144	m/s

Tablica 3. Ulazni podaci IPR modela bušotine SJ X-5 Dir.

IPR model :	Petroleum Experts	
Ležišni tlak :	60	BARg
Temperatura ležišta :	22,78	°C
Efektivna propusnost za CO ₂ :	598,7	mD
Debljina ležišta (vertikalne duljine) :	7,8	m
Drenažna površina :	282743	m ²
Dietz-ov faktor oblika :	31	
Radius bušotine :	0,108	m
Duljina perforacija (mjerene duljine) :	6,96	m
Porozitet ležišta :	0,3168	dio jedinice
Zasićenje konatnom vodom :	0,2	dio jedinice
D - faktor turbulentnog protoka	7,4669E-06	1/(m ³ /dan)
Mehanički/geometrijski skin (pretpostavka) :	10	
Efektivna propusnost pješčanog zasipa za CO ₂ :	40000	mD
Promjer perforacija :	0,01524	m
Gustoća perforiranja :	12	1/ft
Efikasnost perforiranja :	1	dio jedinice
Srednji nagib bušotine u području perforacija :	34	°
Duljina pješčanog zasipa :	0,051	m
β - koeficijent turbulentnog protoka pješčanog zasipa :	141961	1/m

karakteristika 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 hidrodinamičkim mjerenjima provedenim tijekom početne faze proizvodnje plina.

5.1. Sistemska analiza – analiza osjetljivosti

Sistemska analiza bušotine SJ X-5 Dir provedena je sukladno principima opisanim u poglavljima 2 i 3 pomoću komercijalnog računalnog programa PROSPER ver. 17.5 tvrtke Petroleum Experts i uz pomoć NIST RefProp pVT programa kojeg je sastavni dio.

Opći i ulazni podaci sistemske analize prikazani su redom u Tablica 2, Tablica 3, Tablica 4, Tablica 5, Tablica 6, Tablica 7 i Tablica 8.

U svrhu izrade operativne ovojnice bušotine provedena je sistemska analiza – analiza osjetljivosti karakterističnih varijabli operativne ovojnice bušotine. Varijable osjetljivosti su: udjeli faza na ušću bušotine (100 % kapljevina i 100 % plin zasebno), tlak i temperatura na ušću bušotine (P_{WH} i T_{WH}) i vrijednost ležišnog tlaka (P_R). Vrijednosti varijabli analize osjetljivosti prikazani su u Tablica 9.

Rezultati provedene sistemske analize dani su grafički pomoću VLP/IPR dijagrama na Slika 3 i Slika 4.

Tablica 4. Trajektorija bušotine SJ X-5 Dir.

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
40	40,00	0,20	0,29
60	60,00	0,38	0,52
359	358,90	7,20	1,31
388	387,70	10,40	6,40
417	416,40	14,80	8,70
446	444,90	20,10	10,40
475	473,20	26,50	12,90
504	501,20	34,20	15,30
532	527,70	43,20	18,80
561	554,20	54,90	23,70
590	579,80	68,50	28,00
654	635,50	100,10	29,60
683	659,40	116,60	34,60
740	707,40	147,20	32,50
769	732,70	161,30	29,20
827	784,10	188,30	27,70
942	886,80	240,00	26,71
970	911,90	252,40	26,30

Tablica 5. Zacijevljenje bušotine SJ X-5 Dir.

Dubina bušenja (m)	Promjer kanala (inch)	Dubina pete cijevi (m)	Vanjski promjer cijevi (inch)	Masa cijevi (lb/ft)	Visina cementa (m)	Vrh kolone cijevi (m)	Gustoća isplake/otež.vode (kg/m ³)
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
951,19	8,50	951,19	7,00	23,00	615,00	0,00	1310

Tablica 6. Statički temperaturni profil bušotine SJ X-5 Dir.

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 7. Termalne karakteristike okoline bušotine SJ X-5 Dir.

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 8. Injekciona oprema u bušotini SJ X-5 Dir.

Naziv injekcijske 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 spojica 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 spojica 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

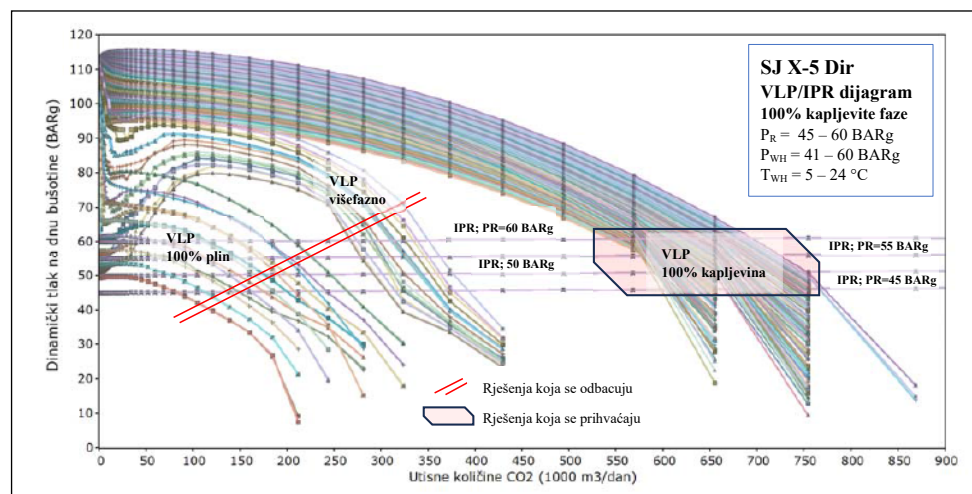
Tablica 9. Varijable osjetljivosti sistemske analize bušotine SJ X-5 Dir.

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

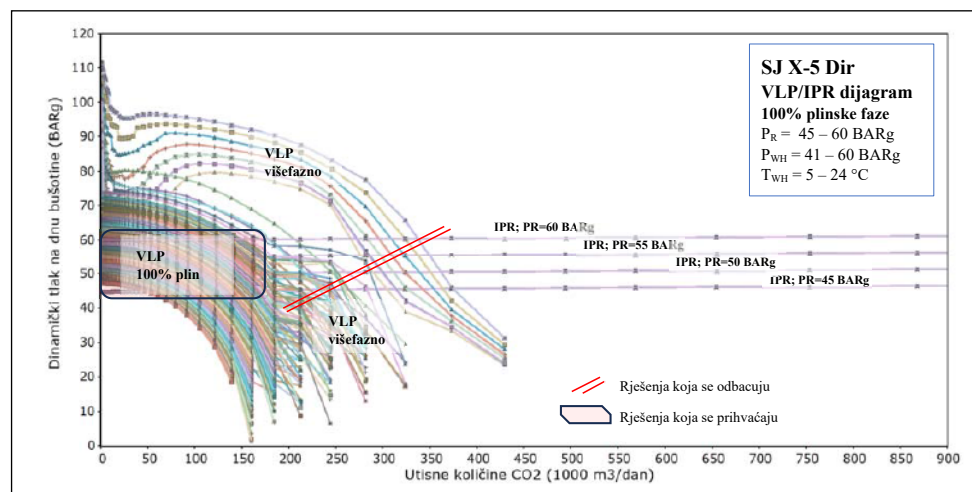
5.2. Konstrukcija operativne ovojnice bušotine

Prvi korak pri konstrukciji operativne ovojnice bušotine je odbacivanja neprihvatljivih rješenja sistemske analize sukladno razlozima i postupku opisanima u poglavlju 4. Grafički ekvivalent ovog postupka prikazan je na Slika 3 i Slika 4 gdje su označena rješenja VLP/IPR krivulja koja se odbacuju, odnosno prihvaćaju.

Odbacivanje neprihvatljivih rješenja vrši se uz pomoć alata karakterističnih za relacijske baze podataka i raspoloživih unutar tabličnog kalkulatora (Power Pivot). Tu se prvo u trodimenzionalnom prostoru kombiniraju rješenja za 100 % plinske i 100 % kapljevite faze te se nakon toga pomoću filtracijskih alata zaokretne tablice (eng. *Pivot Table*) odbacuju rješenja sistemske analize za koja je temperatura na ušću bušotine drugačija od rubne zadane. 3D grafički prikaz prihvaćenih/filtriranih rješenja sistemske analize bušotine SJ X-5 Dir prikazan je na Slika 5.



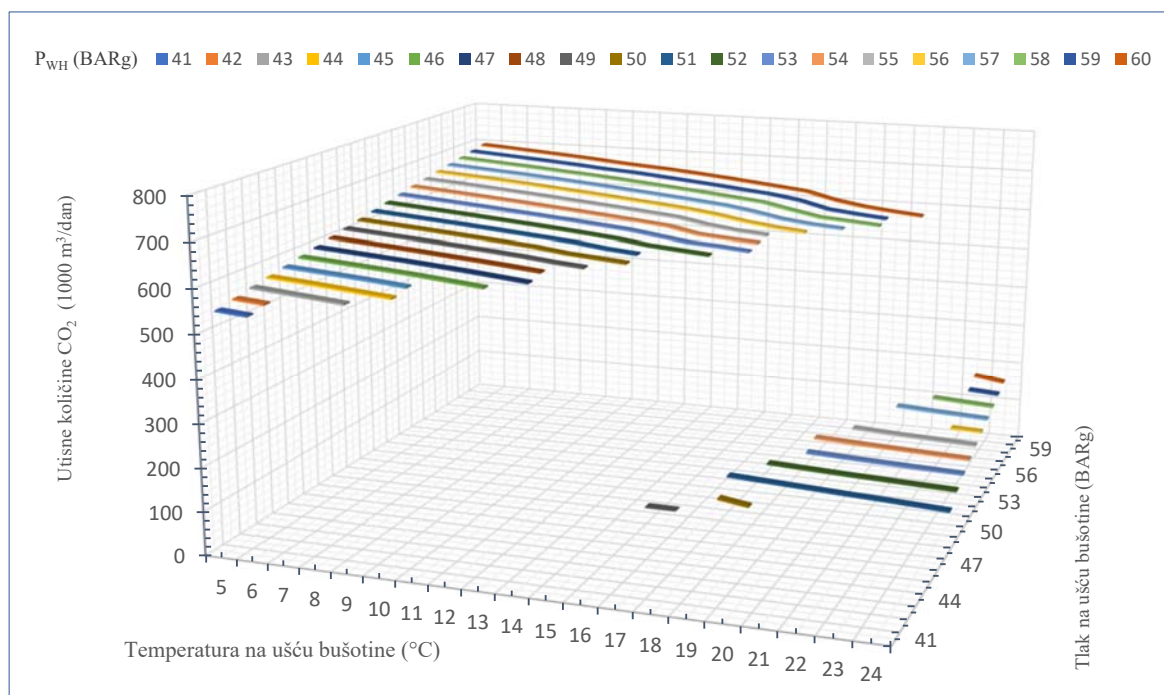
Slika 3. VLP/IPR dijagram sistemske analize bušotine SJ X-5 Dir za slučaj odabira 100 % kapljevite faze na ušću bušotine.



Slika 4. VLP/IPR dijagram sistemske analize bušotine SJ X-5 Dir za slučaj odabira 100 % plinske faze na ušću bušotine.

Tablični prikaz rezultata ovog postupka dan je u Tablica 10, Tablica 11 i Tablica 12. U Tablica 10 izdvojene su i označene točke graničnih količina utisa CO₂

i odnosnih graničnih tlakova bušotine u odnosu na temperature ušća bušotine iz Tablica 11 i Tablica 12.



Slika 5. 3D grafički prikaz prihvaćenih rješenja sistemske analize bušotine SJ X-5 Dir za vrijednost ležišnog tlaka 60 BARg.

Tablica 10. Vrijednosti graničnih količina utisa CO₂ i odnosnih graničnih tlakova bušotine SJ X-5 Dir za vrijednost ležišnog tlaka 60 BARg.

T _{WH} (°C)	P _{WH,liq,min} (BARg)	H _{WH,liq,min} (kJ/kg)	q _{liq} CO _{2,min} (1000 m ³ /dan)	P _{WF,liq,min} (BARg)	P _{WHgas,max} (BARg)	H _{WH,gas,max} (kJ/kg)	q _{gas} CO _{2,max} (1000 m ³ /dan)	P _{WF,gas,max} (BARg)
5	41	212,30	550,175	60,69				
6	41	214,98	544,158	60,68				
7	42	217,47	546,547	60,69				
8	43	220,23	548,935	60,69				
9	44	222,90	551,004	60,69				
10	45	225,50	552,632	60,70				
11	46	228,38	554,259	60,70				
12	47	231,18	555,517	60,70				
13	49	233,85	564,979	60,71				
14	50	236,77	565,502	60,71				
15	51	239,58	565,394	60,71	49	419,78	1,804	60,00
16	52	242,80	565,286	60,71	50	419,24	25,387	60,03
17	53	245,93	564,594	60,71	51	418,73	48,969	60,06
18	56	248,46	573,408	60,72	52	418,26	65,697	60,08
19	57	251,56	572,954	60,72	54	414,01	94,927	60,12
20	58	255,11	571,571	60,72	55	413,60	105,990	60,13
21	60	257,85	574,234	60,72	57	408,86	129,501	60,16
22					58	408,56	138,899	60,17
23					60	403,19	166,726	60,21
24								

perforacija bušotine (Slika 7). Vrijednost ovog grafa očituje se u identifikaciji uvjeta utiskivanja kod kojih tlak ispred ležišta eventualno prelazi maksimalni dozvoljeni iznad kojeg može doći do narušavanja integriteta ležišta i/ili cementne veze za bušotinu. Tako je primjerice vrijednost maksimalnog tlaka u području bušotine SJ X-5 Dir kod ležišnog tlaka 60 BARg procijenjena na 74,64 BARg. Iz Slika 7 vidi se da operativno kretanje dinamičkog tlaka na razini perforacija bušotine SJ X-5 Dir niti u jednom trenutku ne prelazi tu vrijednost, tako da u tom smislu pri analiziranim uvjetima utiskivanja ne postoji ograničenje.

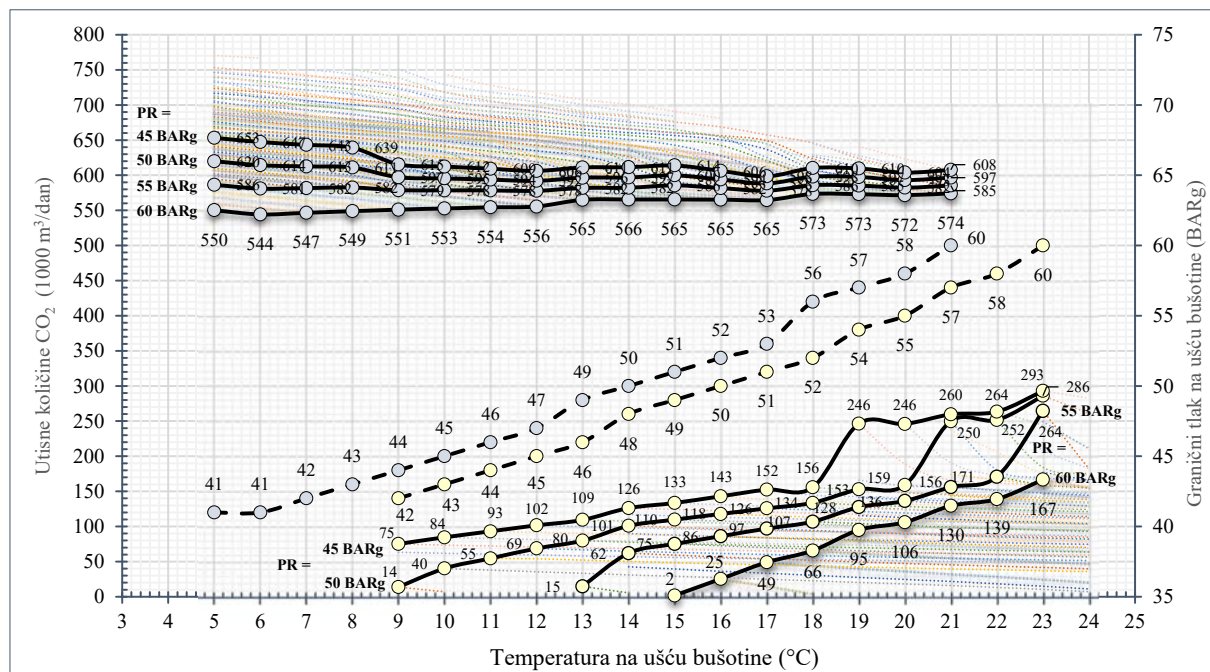
5.3. Kako čitati operativnu ovojnica bušotine

Slika 6 detaljizirani je prikaz je operativne ovojnice injekcije bušotine SJ X-5 Dir. Operativna ovojnica bušotine iščitava se na način da se na x-osi prvo odredi očekivani raspon temperatura na ušću bušotine (iza regulacijskog uređaja utisnih količina – podesive sapnice). U ovom slučaju to je raspon od 11–16 °C. Za odabrani raspon temperatura, na krivuljama graničnih tlakova, odnosno sekundarnoj y-osi, očitavaju se pripadajuće vrijednosti graničnih tlakova ušća bušotine. Na krivuljama graničnih količina, na primarnoj y-osi, očitavaju se pripadajuće vrijednosti graničnih količina utisa CO₂. U slučaju predmetne bušotine kod minimalne očekivane temperature na ušću bušotine od 11 °C, minimalni tlak na ušću bušotine potreban za stabilan utis u dominantno gustoj fazi iznosi 46 BARg. Pri tom tlaku moguće je minimalno utisnuti 554 000 m³/dan CO₂ u stabilnim uvjetima. Svaka količina ispod ove minimalne, kod iste temperature ušća, uzrokovala bi niži tlak ušća od minimalnog s posljedicom ulaska u nestabilno područje utisa. Pri ovoj temperaturi maksimalno je moguće utisnuti 661 000 m³/dan CO₂ ako pretpostavimo da maksimalni tlak ušća iznosi 60 BARg. Ovdje treba zamijetiti da kod temperature ušća od 11 °C ne postoje uvjeti za utis CO₂ u dominantno plinovitoj fazi. Najniža temperatura ušća bušotine kod koje se stječu uvjeti za stabilan utis CO₂ u dominantno plinovitoj fazi iznosi 15 °C. Ipak, radi se o minimalnim količinama, gdje već kod utisa većeg od 2 000 m³/dan CO₂ i tlaka ušća 49 BARg dolazi do ulaska u nestabilno područje.

Porastom temperature na maksimalnu očekivanu u iznosu od 16 °C, maksimalne količine utisa CO₂ u plinovitom stanju penju se na 25 000 m³/dan pri graničnom tlaku ušća 50 BARg kada ulazimo u nestabilno područje. Tu je važno zamijetiti da se transformacija faza događa u rasponu od svega 2 BAR-a unutar

kojeg egzistira nestabilno područje. Dostizanjem tlaka ušća u vrijednosti 52 BARg-a (kod iste temperature) prelazi se u stabilno područje utisa dominantno gustog fluida i dramatične promjene količine utisa na 565 000 m³/dan CO₂ što čini razliku od 540 000 m³/dan. Razlog je isto tako dramatična promjena gustoće i posljedično težine stupca CO₂ u bušotini. Iz operativne ovojnice vidi se da je pri temperaturi ušća bušotine od 16 °C i kod maksimalnog tlaka ušća od 60 BARg maksimalno moguće utisnuti 628 000 m³/dan CO₂.

S porastom temperature ušća bušotine povećavaju se maksimalno moguće količine utisa u dominantno plinovitoj fazi kao i odnosni maksimalni tlakovi ušća bušotine. Za razliku od slučaja dominantno plinovite faze, maksimalne količine utisa dominantno guste faze se smanjuju. S porastom temperature ušća krivulja minimalnog tlaka ušća bušotine u dominantno gustoj fazi prati trend rasta krivulje tlaka ušća bušotine u dominantno plinovitoj fazi. Transformacija faza se u ovom slučaju događa u rasponu razlike 2 – 4 BAR-a. Vrijednosti minimalne količine utisa gustog fluida s porastom temperature utisa pri tome minimalno rastu. Ovdje treba zamijetiti da postoji granična vrijednost temperature utisa dominantno gustog fluida kod koje dolazi do spajanja krivulje minimalne količine utisa u dominantno gustoj fazi i krivulje maksimalne količine utisa CO₂. Točka je to nakon koje injektiranje gustog fluida više nije moguće. Nemogućnost daljnjeg injektiranja uzrokovana je povećanim trenjem fluida u uzlaznim cijevima (tubingu) i istodobnim smanjenjem gustoće (težine stupca fluida) kao posljedice više temperature u bušotini. Zbog toga resultantni tlak na dnu bušotine više nije dovoljan za savladavanje otpora injektiranju u pribušotinskoj zoni i ležištu kod važećeg ležišnog tlaka. U našem slučaju granična vrijednost temperature utisa dominantno gustog fluida je 21 °C kod koje je maksimalno moguće utisnuti 574 000 m³/dan CO₂. Kod ove temperature moguće je stabilno u plinovitoj fazi utisnuti 130 000 m³/dan CO₂ i manje, pa do minimalnih količina. Sve to pri uvjetima graničnog tlaka ušća 57 BARg i niže, do minimalnog tlaka ušća nešto manjeg od 51 BARg. S daljnjim povećanjem temperature moguće je u stabilnim uvjetima utisnuti CO₂ isključivo u plinovitom stanju. Maksimalna temperatura ušća bušotine pri maksimalnom tlaku ušća je 23 °C. Kod ove temperature je moguće najviše stabilno utisnuti 167 000 m³/dan CO₂. Svako daljnje povećanje temperature kod istog tlaka ušća smanjuje količine utisa CO₂ tako da je pri temperaturi ušća bušotine od 24 °C i kod mak-



Slika 8. Operativne ovojnice bušotine SJ X-5 Dir za odabrane vrijednosti ležišnog tlaka.

simalnog tlaka ušća od 60 BARg maksimalno moguće utisnuti 155 000 m³/dan CO₂.

5.4. Granični tlakovi ušća bušotine kod različitih tlakova ležišta

Slika 8 daje komparativni prikaz operativnih ovojnica bušotine SJ X-5 Dir za različite vrijednosti ležišnog tlaka. Važno je zamijetiti da se pod pretpostavkom konstantne vrijednosti moćnosti ležišta ($k_{\text{CO}_2} \times h_{\text{ef}}$) vrijednosti graničnih tlakova na ušću bušotine, kod iste temperature ušća bušotine, bez obzira na veličinu ležišnog tlaka ne mijenjaju. Znači granični uvjeti tlaka utiskivanja na ušću bušotine ostati će isti, samo se injekcione količine mijenjaju, sve u skladu s veličinom gubitka tlaka u uzlaznom nizu cijevi (tubingu). Ovo svojstvo snažan je alat pri koncipiranju/projektiranju utisnog sustava budući da ukazuje na uvjete tlaka i temperature na ušću bušotine koje je potrebno osigurati za stabilan utis unutar razmatranog raspona kretanja ležišnog tlaka, odnosno tijekom punjenja ležišta.

5.5. Analiza operativnih mogućnosti bušotine kod zadanih utisnih količina CO₂

Pretpostavimo da će u početnoj fazi skladištenja biti ugovorena dnevna količina utisa (eng. *Daily Contract Quantity – DCQ*) od 600 000 m³/dan CO₂. Neka se sustav sastoji od 8 bušotina opremljenih za injektiranje u ležište SJ-X, istih ili vrlo sličnih utisno-ope-

rativnih karakteristika bušotini SJ X-5 Dir. Fluid se dovodi s kopna cjevovodom duljine nešto manje od 46 km te se pretpostavlja da će zbog toga na svom kraju poprimiti ambijentalnu temperaturu morskog okoliša-dna. Zbog toga je, u zavisnosti o godišnjem dobu, očekivani raspon kretanja temperature fluida na bušotinama prije podesivih sapnica u rasponu 11 – 16 °C. Maksimalni pretpostavljeni tlak je 60 BARg. Radi fleksibilnosti upravljanja utisnim količinama pretpostavimo da je svaka bušotina na svom ušću opremljena i sustavom grijanja utisnog fluida.

Pogledamo li operativnu ovojnicu bušotine SJ X-5 Dir (Slika 6) utis od 600 000 m³/dan moguće je ostvariti na dva načina. Prvi je da kompletan DCQ u kapljevitoj fazi utisnemo kroz bušotinu SJ X-5 Dir. Budući da u ovom slučaju nema interakcije s ostalim bušotinama, i kako bi izbjegli efekt dodatnog pothlađenja utisnog fluida, podesiva sapnica bušotine bit će u potpunosti otvorena, a regulacija utisnih količina vršit će se na kompresorskoj/pumpnoj stanici.

Drugi način je da preraspodijelimo utis u količini 75 000 m³/dan u plinovitoj fazi na svaku od osam raspoloživih bušotina. Regulacija količina vršila bi se tada uz pomoć bušotinskih sapnica i uz regulaciju temperature pomoću grijača fluida postavljenih na bušotinama.

Za slučaj da kompletan DCQ želimo utisnuti kroz bušotinu SJ X-5 Dir u kapljevitoj fazi, operativne mogućnosti bušotine moguće je odrediti povlačenjem pravca vrijednosti 600 000 m³/dan sa primarne y-osi

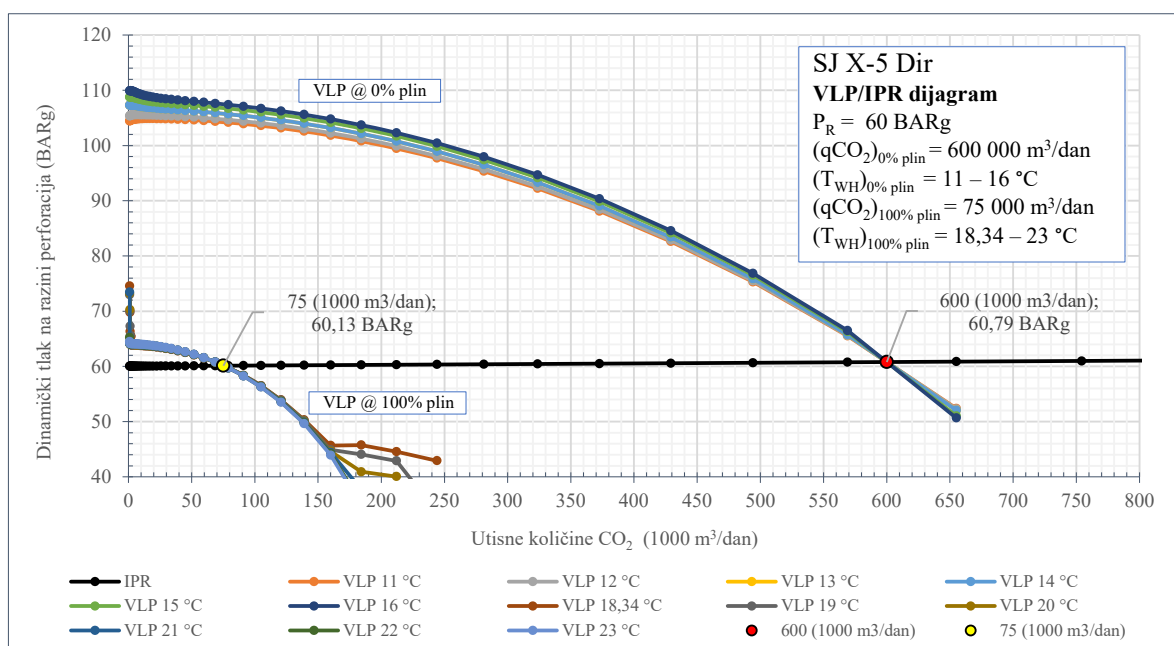
Tablica 13. Rješenja sistemske analize bušotine SJ X-5 Dir za 600 000 m³/dan i 75 000 m³/dan utisa CO₂ i vrijednost ležišnog tlaka 60 BARg.

qCO ₂ (1000 m ³ /dan)	Udio plina	T _{WH} (°C)	P _{WH} (BARg)	H _{WH} (kJ/kg)	Ukupni skin	dP _{Skin} (bar)	P _{WF} (BARg)	T _{WF} (°C)	H _{WF} (kJ/kg)	dP _{Friction} (bar)	dP _{Gravity} (bar)	C-faktor
600	0%	11	51,76	226,95	10,62	0,44	60,79	13,82	233,26	-43,11	52,14	181,76
		12	52,64	229,75				14,74	235,98	-43,51	51,66	182,66
		13	53,52	232,52				15,60	238,68	-43,91	51,18	183,46
		14	54,46	235,31				16,48	241,41	-44,34	50,67	184,91
		15	55,86	238,11				17,19	244,13	-45,05	49,98	191,11
		16	56,96	240,94				17,65	246,90	-45,53	49,36	194,12
75	100%	18,34	52,62	416,88		0,05	60,13	27,96	421,89	-3,29	10,80	50,88
		19	52,77	418,46				28,49	423,40	-3,33	10,69	51,15
		20	52,98	420,87				29,29	425,69	-3,38	10,53	51,50
		21	53,17	423,02				30,00	427,74	-3,43	10,39	51,84
		22	53,35	425,22				30,83	429,83	-3,47	10,25	52,10
		23	53,53	427,33				31,64	431,82	-3,52	10,11	52,44

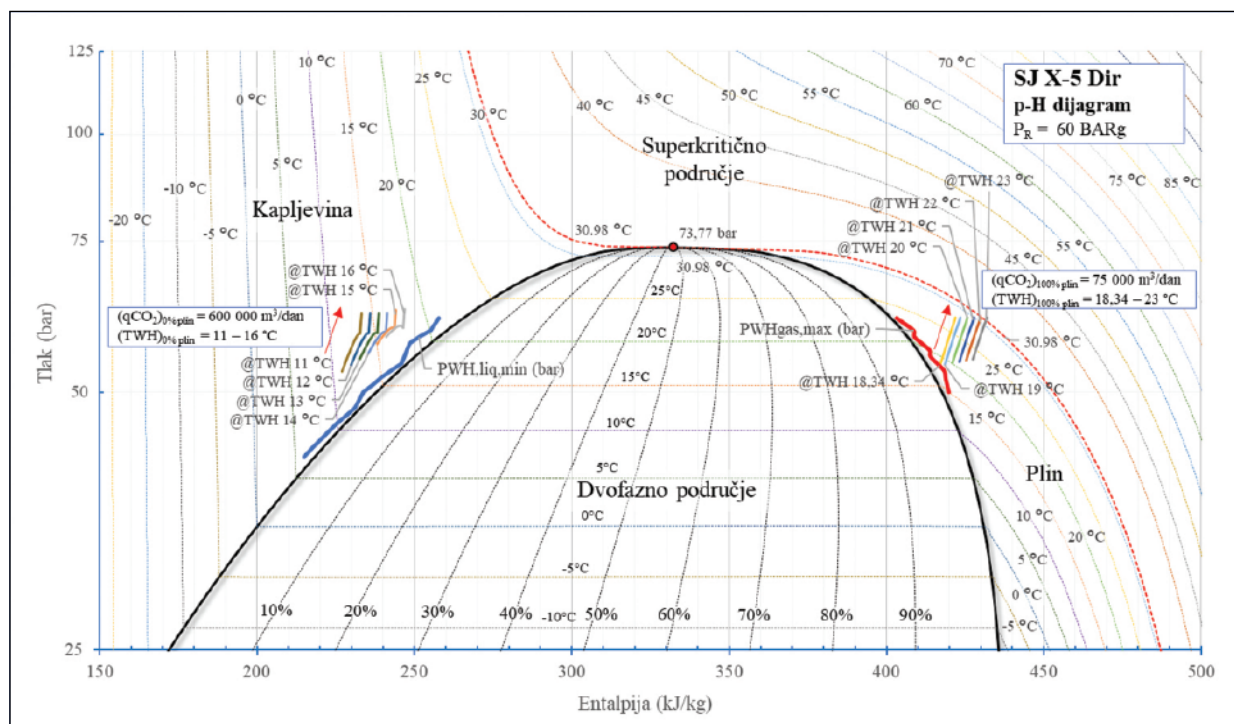
kroz područje stabilnog utisa dominantno gustog (kapljevito i/ili superkritičnog) CO₂. Povlačenjem okomitih pravaca vrijednosti očekivanog raspona temperatura na ušću bušotine od 11 – 16 °C, paralelno s osima y, i presijecanjem pravca DCQ očitavaju se vrijednosti veličine potrebnog tlaka ušća bušotine za utis 600 000 m³/dan individualno za svaku od razmatranih temperatura. Očitane vrijednosti P_{WH} korespondiraju s vrijednostima rješenja sistemske analize bušotine danima u Tablica 13. Iz Slika 6 i Tablica 13 očitava se tzv. operativni raspon tlaka na ušću bušotine P_{WH} u iznosu 51,76 – 56,96 BARg kod očekivanog temperaturnog raspona ušća bušotine T_{WH} od 11 – 16 °C.

Za slučaj da želimo preraspodijeliti utis po bušotini u količini 75 000 m³/dan, prvi stabilni uvjeti utisa

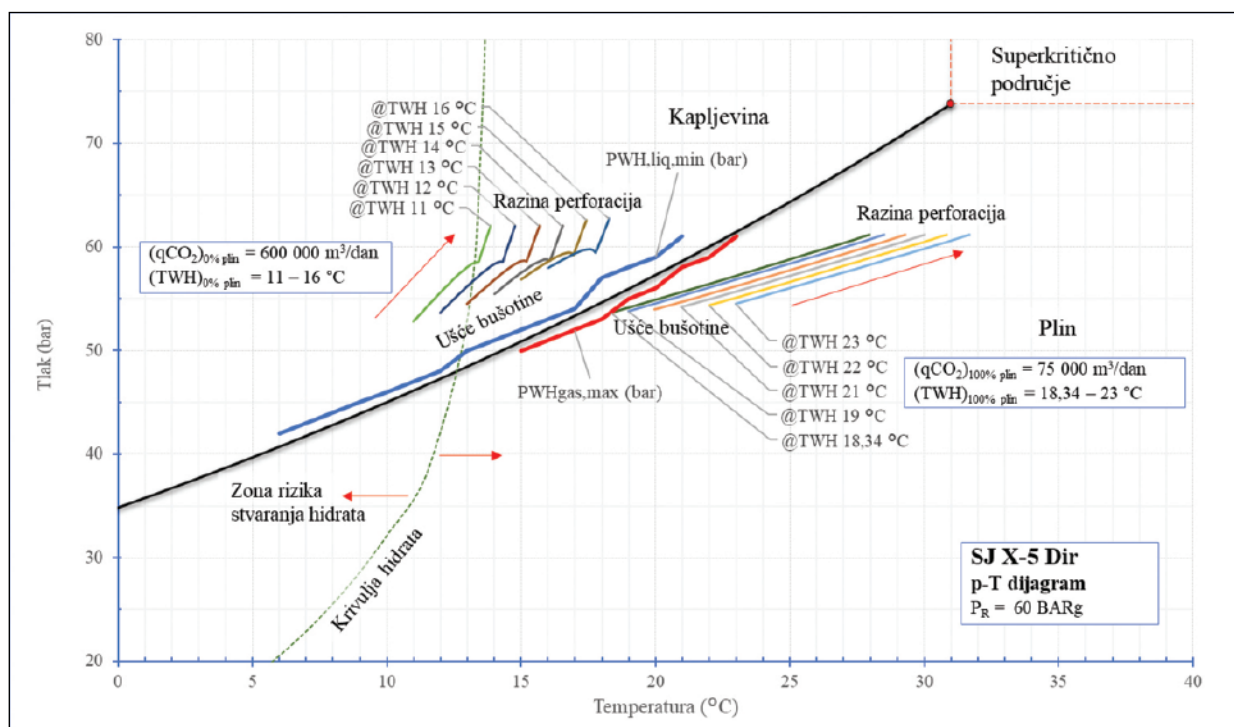
dominantno plinovitog CO₂ postižu se kod vrijednosti temperature ušća T_{WH} od 18,34 °C i tlaka ušća P_{WH} u iznosu 52,62 BARg. Ovi uvjeti mogu se postići tek uz uporabu grijača. Grijanje fluida vrši se na način da se fluid ispred podesive sapnice dovoljno zagrije kako bi nakon sapnice i eventualnog pothlađenja zbog Joule-Thomsonova efekta dosegao tražene vrijednosti temperature. S daljnjim zagrijavanjem/povećanjem temperature, za utis je iste količine od 75 000 m³/dan potreban i viši tlak ušća, upravo jednak onim vrijednostima prikazanim u Tablica 13. Tu se može vidjeti da ukoliko bi maksimalna temperatura nakon zagrijavanja fluida T_{WHmax} bila 23 °C tada bi potrebni operativni raspon tlaka na ušću bušotine P_{WH} bio u vrijednosti 52,62 – 53,53 BARg.



Slika 9. VLP/IPR dijagram sistemske analize bušotine SJ X-5 Dir za 600 000 m³/dan i 75 000 m³/dan utisa CO₂ i vrijednost ležišnog tlaka 60 BARg.



Slika 10. p-H dijagram kretanja tlaka i temperature u bušotini SJ X-5 Dir za 600 000 m³/dan i 75 000 m³/dan utisa CO₂ i vrijednost ležišnog tlaka 60 BARg.



Slika 11. p-T dijagram kretanja tlaka i temperature u bušotini SJ X-5 Dir za 600 000 m³/dan i 75 000 m³/dan utisa CO₂ i vrijednost ležišnog tlaka 60 BARg.

Prošireni prikaz rješenja i relevantnih parametara systemske analize bušotine SJ X-5 Dir za 600 000 m³/dan i 75 000 m³/dan utisa CO₂ i vrijednost ležišnog tlaka 60 BARg dan je u Tablica 13. Odnosni VLP/IPR dijagram dan je na Slika 9.

Jedan od parametara systemske analize bušotine prikazanih u Tablica 13 koji se analizira je i C-faktor erozije uzlaznih cijevi bušotine (tubinga). U našem slučaju odabrana granična vrijednost iznad koje postoji rizik je 200. Iz Tablica 13 vidi se da ova vrijednost ni u jednom analiziranom slučaju nije prijeđena.

Za svako od razmatranih rješenja iz Tablica 13 i Slika 9 prikazan je i termodinamički profil kretanja tlaka, entalpije i temperature po dubini bušotine u vidu p-H dijagrama na Slika 10 i p-T dijagrama na Slika 11. Na oba dijagrama prikazane su i krivulja minimalnog tlaka na ušću bušotine u dominantno gustoj fazi ($P_{WH,liq,min}$) i krivulja maksimalnog tlaka na ušću bušotine u dominantno plinovitoj fazi ($P_{WHgas,max}$). Na Slika 11 prikazana je krivulja hidrata koja omeđuje područje kretanja tlaka i temperature kod kojeg, u koliko ima vode u utisnom fluidu, postoji rizik od stvaranja hidrata. Lijevo od te krivulje područje je rizika. Iz prikazanoga može se zaključiti da za slučaj da kompletan DCQ želimo utisnuti kroz bušotinu SJ X-5 Dir u kapljevitoj fazi, kod uvjeta T_{WH} jednak 11 °C, 12 °C i 13 °C rizik od hidrata postoji. Zbog toga je pri projektiranju sustava potrebno planirati implementaciju neke od tehnologija za prevenciju i/ili borbu protiv ovog fenomena.

6. Zaključak

Specifičnosti CO₂ modeliranja vezane su uz osobitosti faznog ponašanja CO₂ i značajne termalne efekte koji se javljaju pri protoku CO₂ kroz injekcioni sustav. Zbog toga je za izračun svih relevantnih volumetrijskih i termalnih svojstva i opis faznog ponašanja CO₂ preporučeno koristiti parametarsku jednadžbu stanja Span i Wagnera (1996) koja se ujedno i smatra standardom za pVT modeliranje CO₂.

Operativna ovojnica bušotine koristan je alat kojim se opisuje operativno područje rada injekcije bušotine za CO₂. Grafički je prikaz zavisnosti kretanja injekcionih količina CO₂ u odnosu na tlak i temperatura ušća bušotine (P_{WH} i T_{WH}). Izrađuje se za određenu vrijednost ležišnog tlaka (P_R). Zbog specifične kombinacije varijabli i načina prikaza preporuča se za:

- identifikaciju područja stabilnog procesa utiskivanja CO₂ u dominantno gustom i dominantno plinovitom stanju u funkciji promjene tlaka i temperature na ušću bušotine, važećeg ležišnog tlaka i količina CO₂ koje se utiskuju u ležište;
- identifikaciju područja značajnog utjecaja dvofaznih efekata protjecanja (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);
- analizu operativnih mogućnosti bušotine kod različitih utisnih količina CO₂.

Iz primjera konstrukcije i analize operativne ovojnice bušotine SJ X-5 Dir može se zaključiti slijedeće:

- da u razmatranim uvjetima utisa CO₂ dinamički tlak ispred ležišta niti u jednom trenutku ne prelazi maksimalni dozvoljeni iznad kojeg može doći do narušavanja integriteta ležišta i/ili cementne veze za bušotinu;
- da je u očekivanom rasponu temperatura ušća bušotine i utisnom kapacitetu pripadajuće infrastrukture moguće stabilno u dominantno gustoj fazi utisnuti pretpostavljeni DCQ;
- da je u očekivanom rasponu temperatura ušća bušotine i utisnom kapacitetu pripadajuće infrastrukture utis CO₂ u plinovitoj fazi moguć tek pri najvišim očekivanim temperaturama (u ljetnim mjesecima) i u zanemarivim količinama;
- da je u uz grijanje fluida na ušćima bušotina moguće postići uvjete za stabilni utis dostatnih količina CO₂ u plinovitoj fazi u koliko se razmatra slučaj da se DCQ raspodjeli na raspoloživi bušotinski fond (ovdje 8 bušotina istih ili sličnih operativnih karakteristika predmetnoj bušotini) radi ravnomjernog punjenja ležišta;
- da je potrebno planirati implementaciju neke od tehnologija za prevenciju i/ili borbu protiv stvaranja hidrata;
- da u razmatranim uvjetima utisa CO₂ ni u jednom slučaju nije prijeđena granična vrijednost C-faktora iznad koje postoji rizik erozije uzlaznih cijevi bušotine (tubinga);
- da se pod pretpostavkom konstantne vrijednosti moćnosti ležišta ($k_{CO_2} \times h_{ef}$), kod iste temperature ušća bušotine, vrijednosti graničnih tlakova na ušću bušotine bez obzira na veličinu ležišnog tlaka ne mijenjaju.

Popis korištenih oznaka i jedinica

H_{WF}	entalpija na dnu bušotine (ispred ležišta – perforacija), kJ/kg;
H_{WH}	entalpija na ušću bušotine, kJ/kg;
h_{ef}	efektivna debljina ležišta, m;
k_{CO_2}	efektivna propusnost ležišta za CO_2 , mD;
q_{CO_2}	utisne količine CO_2 , m ³ /dan;
P_R	tlak ležišta, bar, BARg;
P_{WF}	dinamički tlak na dnu bušotine (ispred ležišta – perforacija), bar, BARg;
P_{WH}	dinamički tlak na ušću bušotine, bar, BARg;
$dP_{Friction}$	gubitak tlaka u cijevima uslijed trenja, bar, BARg;
$dP_{Gravity}$	dobitak tlaka u cijevima uslijed težine stupca fluida, bar, BARg;
dP_{Skin}	gubitak tlaka zbog skin efekta, bar, BARg;
T_R	temperatura u ležištu, °C;
T_{WF}	dinamička temperatura na dnu bušotine (ispred ležišta – perforacija), °C;
T_{WH}	dinamička temperatura na ušću bušotine, °C;
T_{WHmax}	maksimalna temperatura nakon zagrijavanja fluida, °C;

Popis pojmova i skraćenica

BARg	relativni (manometarski) tlak;
bar	apsolutni tlak;
CO_2 -EOR	tercijarna metoda povećanja iscrpka ležišta nafte uz pomoć CO_2 (eng. <i>CO₂-Enhanced Oil Recovery</i>);
CCS	hvatanje i trajno skladištenje CO_2 u geološke formacije (eng. <i>Carbon Capture and Storage</i>);
C-faktor	faktor erozije uzlaznih cijevi bušotine (tubinga);
DCQ	ugovorena dnevna količina utisa (eng. <i>Daily Contract Quantity</i>);
IPR	indikatorska krivulja (eng. <i>Inflow Performance Relationship</i>);
NIST	National Institute of Standards and Technology;
pVT	odnos tlak-volumen-temperatura (eng. <i>Pressure-Volume-Temperature</i>);
$P_{WH,liq,min}$	krivulja minimalnog tlaka na ušću bušotine u dominantno gustoj fazi;
$P_{WHgas,max}$	krivulja maksimalnog tlaka na ušću bušotine u dominantno plinovitoj fazi;
VLP	krivulja dinamičkih tlakova na dnu bušotine (eng. <i>Vertical Lift Performance</i>);

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. Eds. P. J. Linstrom and W. G. Mallard, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg MD, 20899, <https://doi.org/10.18434/T4D303>, (retrieved March 10, 2024).
3. Eric W. Lemmon, Ian H. Bell, Marcia L. Huber, and Mark O. McLinden.: Thermophysical Properties of Fluid Systems, in NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69,
4. Huber, M. L.; Sykioti, E. A.; Assael, M. J.; Perkins, R. A.: Reference Correlation of the Thermal Conductivity of Carbon Dioxide from the Triple Point to 1100 K and up to 200 MPa. *J. Phys. Chem. Ref. Data* 2016, 45, 013102.
5. Laesecke, A.; Muzny, C. D.: Reference Correlation for the Viscosity of Carbon Dioxide. *J. Phys. Chem. Ref. Data* 2017, 46, 013107.
6. 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.
7. Mulero, A.; Cachadiña, I.; Parra, M. I.: Recommended Correlations for the Surface Tension of Common Fluids, *J. Phys. Chem. Ref. Data* 2012, 41, 043105.
8. 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.