

Usporedna studija u literaturi opisanih korelacija fizikalnih svojstava CO₂-nafta primjenom Visual Basic modela

M. Al-Jarba and B. D. Al-Anazi

STRUČNI RAD

Ključan parametar u procesu istiskivanja nafte korištenjem CO₂ je topivost plina jer on pridonosi smanjenju viskoznosti i bubrenju nafte, koji zajedno povećavaju mobilnost nafte i relativnu propusnost za naftu. Često se fizički parametri utisnute mješavine plina i nafte određuju dugotrajnim eksperimentalnim metodama ili uporabom korelacija koje su dostupne u literaturi. No, valja imati na umu da su takve korelacije za predviđanje fizikalnih svojstava injektirane smjese CO₂ i nafte obično primjenjive za određeni raspon podataka i uvjete koji su specifični za to nalazište.

U ovom radu predstavljena je usporedba korelacija iz literature za fizikalna svojstva smjese CO₂ i nafte, koje su dobivene korištenjem proračunskih tablica Excel i računalnog programa Visual Basic. Korelacije Emere i Sarne⁶ dale su mnogo preciznija predviđanja, uz manje pogreške nego uz druge testirane modele, i to za sva testirana fizikalna svojstva (topivosti CO₂, bubrenje nafte pod utjecajem CO₂, gustoća mješavine CO₂ i nafte i viskoznost mješavine CO₂ i nafte). Nadalje, za razliku od modela iz literature koji su bili primjenjivi na ograničen raspon podataka i uvjeta, modeli Emere i Sarne mogli su se primijeniti na širi raspon i uvjete. Uspoređujući u literaturi navedene korelacije, razvijeni Visual Basic software može se primijeniti za ispitivanja koja su najtočnija za određivanje fizikalnih svojstava mješavine CO₂ i nafte, a nakon odabira najbolje korelacije korisnik se njome može poslužiti kako bi predvidio svojstva (topivost CO₂, bubrenje nafte zbog CO₂, gustoća mješavine CO₂ i nafte i viskoznost mješavine CO₂ i nafte) u slučaju da eksperimentalni podaci nisu dostupni.

Ključne riječi: EOR, istiskivanje uporabom CO₂, topivost zbog CO₂, gustoća, viskoznost

Uvod

Razrada i proizvodnja sirove nafte iz ležišta može uključiti tri različite faze pridobivanja: primarnu, sekundarnu i tercijarnu (povećanje iscrpka). Za vrijeme primarne proizvodnje nafta se pridobiva prirodnim tlakom ležišta ili gravitacijskim režimom u kanalu bušotine u kombinaciji s tehnikama umjetnog podizanja nafte (pumpe), koje izvlače naftu na površinu. Primarnim pridobivanjem proizvede se samo 10% početne količine nafte iz ležišta. Sekundarne tehnike pridobivanja nafte za vrijeme produktivnog života polja uglavnom uključuju injektiranje vode ili plina kako bi se nafta istisnula i dovela do kanala bušotine, što rezultira povećanim pridobivanjem nafte u ležištu, i to od 20 do 40%. Međutim, budući da je većina lako pridobive nafte iz ležišta već proizvedena, proizvođači su pokušali s nekoliko tercijarnih metoda povećanja iscrpka nafte (EOR). To su tehnike koje nude mogućnost povećanja konačne proizvodnje početne količine nafte u ležištu za 30 do 60%, ili čak i više. Otkrivene su tri glavne kategorije povećanja iscrpka nafte, različitih komercijalnih stupnjeva učinkovitosti:

- Termičko pridobivanje, koje uključuje zagrijavanje injektiranjem pare kako bi se snizila viskoznost teške nafte te poboljšao protok kroz ležište;
- injektiranje plina, pri čemu se koriste plinovi poput prirodnoga plina, dušika, ili ugljikovog dioksida, koji se šire u ležištu i tako istiskuju više nafte u proizvodni kanal. Koriste se i drugi plinovi koji se otapaju u nafti

kako bi se smanjila viskoznost i poboljšao protok. Injektiranje plina obuhvaća gotovo 50 % proizvodnje metodom povećanja iscrpka nafte;

- injektiranje kemikalija, koje može uključivati uporabu dugolančanih molekula, tj. polimera, kako bi se povećala učinkovitost zavodnjavanja ili uporaba deterdženata kao što je surfaktant, koji pomažu u smanjivanju površinske napetosti koja često sprečava kretanje kapljica nafte kroz ležište.⁸

Istiskivanje nafte korištenjem CO₂ učinkovit je proces povećanja iscrpka. Počeo se primjenjivati 30-ih godina prošloga stoljeća, te se uvelike razvio 70-ih. U više od 30 godina proizvodne prakse istiskivanje nafte korištenjem CO₂ postalo je vodeća tehnika povećanja iscrpka za laku i srednje tešku naftu. Tom se tehnikom proizvodni život ležišta lake i srednje teške nafte, koja su pri primjeni zavodnjavanja blizu iscrpljenja, produžuje za 15 do 20 godina, a od početne količine nafte u ležištu može se pridobiti 15 do 25% (Hao, 2004).

Zavodnjavanje nafte uporabom CO₂

Fazno ponašanje sistema mješavine CO₂ i sirove nafte temeljito se proučava od 60-ih godina prošloga stoljeća. Pozornost je bila na vrhuncu u kasnim 70-ima i ranim 80-ima, kada su započeli mnogi projekti miscibilnog istiskivanja nafte uporabom CO₂ i kada je skočila cijena nafte. Zanimanje se nastavlja pojavom novih projekata i razvojem onih starijih. Studije koje ispituju razrade i predviđanje minimalnoga miscibilnog tlaka (MMP) za

injektiranje čistoga i nečistoga CO₂ traju više od 30 godina. (Quinones i suradnici, 1991).

U literaturi postoje razni pokušaji da se razviju metode mjerenja i izračunavanja MMP-a. Mnogi se temelje na pojednostavljenjima, kao što je ternarni prikaz komponentnog prostora. Poslije se pokazalo da pritom nije uzeto u obzir postojanje kombiniranih mehanizama koji kontroliraju razvoj miscibilnosti u stvarnim ležišnim fluidima. Zick¹⁷, a zatim i Stalkup (1987), opisali su postojanje mehanizma vaporizacija/kondenzacija. Pokazali su da se razvoj miscibilnosti (MMP) u multikomponentnim procesima istiskivanja nafte plinom može ispravno predvidjeti jednodimenzionalnim (1D) komponentnim simulacijama, neovisno o mehanizmu koji kontrolira razvitak miscibilnosti. Poslije su Wang i Orr (1997) predstavili poluanalitičku metodu predviđanja MMP-a, koja je odigrala važnu ulogu u razvoju i primjeni analitičke teorije procesa injektiranja plina (Jessen i suradnici).¹¹

Proces istiskivanja nafte uporabom CO₂

Ugljikov dioksid odgovarajućih pogodnih svojstava, koji je injektiran u iscrpljeno naftno ležište može postići povećanje iscrpka nafte primjenom jednog od dvaju procesa istiskivanja: miscibilnog ili nemiscibilnog. Miscibilan proces je učinkovitiji i najčešći u aktivnim projektima povećanja iscrpka nafte (Amarnath, 1999).

Sljedeći odlomci objašnjavaju oba procesa:

Nemiscibilno istiskivanje

Pri nemiscibilnom istiskivanju između dvaju fluida postoji granica, pa tako dolazi do nastanka kapilarnog tlaka uzrokovanog međupovršinskom napetošću između nafte i CO₂. Prednosti istiskivanja nafte proistječu ponajprije iz održavanja tlaka ležišta i istiskivanja fluida. Budući da su dva fluida imiscibilna, može se očekivati više rezidualno zasićenje naftom no što je to pri miscibilnom istiskivanju. Stoga se nemiscibilnim istiskivanjem dobiva manje nafte nego miscibilnim. Hoće li se koristiti miscibilno ili nemiscibilno istiskivanje ovisi o tlaku injektiranja i MMP-u plina s naftom.⁴

Miscibilno istiskivanje

CO₂ miscibilni proces (miscibilnost prvim kontaktom ili miscibilnost višestrukim kontaktom) prikazan je na slici 1. Kako bi se mobilizirala i istisnula rezidualna nafta, utiskuje se određena količina relativno čistog CO₂. Višestrukim kontaktima između CO₂ i naftne faze, ugljikovodici srednje i više molekularne težine izlučuju se u bogatu CO₂ fazu. U odgovarajućim uvjetima, prikazanim u tablicama 1 i 2, ta bogata CO₂ faza postići će sastav koji je miscibilan (mješljiv) s početnom naftom u ležištu. Od tog trenutka na granici istiskivanja postoje miscibilni ili gotovo miscibilni uvjeti (Green i suradnici 1998). Postoje dva tipa miscibilnosti – miscibilnost prvim kontaktom i miscibilnost višestrukim kontaktom, kako slijedi:

Tablica 1. Kritične temperature CO₂ i utvrđeni uvjeti miscibilnosti (Ahmad, 1997.)

Kriterij	Uvjet	Komentari
$T_{res} < 30 \text{ }^\circ\text{C}$	Nemješljivo	
$30 \text{ }^\circ\text{C} < T_{res} < 32,2 \text{ }^\circ\text{C}$	Mješljivo/ Nemješljivo	Oboje moguće $T_{CO_2} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$
$T_{res} > 32,2 \text{ }^\circ\text{C}$	Mješljivost moguća	

Tablica 2. Kritični tlak CO₂ i utvrđeni uvjeti miscibilnosti (Ahmad, 1997.)

Kriterij	Uvjet	Komentari
$p_{res} < 1000 \text{ psia}$	Nemješljivo	
$1000 \text{ psia} < p_{res} < 1200 \text{ psia}$ $6,9 \text{ MPa} < p_{res} < 8,3 \text{ MPa}$	Mješljivo/ Nemješljivo	Oboje moguće $p_{CO_2} = 1073 \text{ psia}$ $p_{CO_2} = 7,4 \text{ MPa}$
$p_{res} > 1200 \text{ psia}$ $p_{res} > 8,3 \text{ MPa}$	Mješljivost moguća	

Korelacija fizikalnih svojstava CO₂-nafta

Poznavanje fizikalnih i kemijskih interakcija između CO₂ i nafte iz ležišta te njihov utjecaj na pridobivanje nafte vrlo su važni za svaki projekt istiskivanja nafte. Glavni parametar koji utječe na istiskivanje plinom je topivost plina u nafti jer to rezultira smanjenjem viskoznosti nafte i povećanjem bubrenju nafte, što pak povećava mobilnost nafte i učinkovitost pridobivanja. Stoga je bolje razumijevanje toga parametra i njegovih učinaka na fizikalna svojstva nafte ključno u svakome uspješnom projektu istiskivanja pomoću CO₂.

Učinci injektiranog plina na fizikalna svojstva nafte određeni su laboratorijskim istraživanjima i dostupnim paketima modeliranja. Laboratorijska istraživanja su skupa i dugotrajna, pogotovo kada valja analizirati širok spektar podataka. S druge strane, dostupni paketi modeliranja mogu se koristiti samo u određenom broju slučajeva, pa nisu uvijek primjenjivi.

Potrebno je poznavati fizikalna svojstva poput bubrenja nafte pod utjecajem CO₂, viskoznost, gustoću i topivost CO₂ u nafti kako bi se konstruirao i simulirao proces pridobivanja nafte. Mora se utvrditi djelovanje CO₂ na fizikalna svojstva sirove nafte kako bi se projektirao učinkovit proces nemiscibilnog istiskivanja. Metoda predviđanja svojstva mješavine teške sirove nafte i CO₂ korisna je za proces dizajniranja i odabira. Fizikalna svojstva mješavine CO₂ i nafte mogu se odrediti korištenjem dviju metoda: metodom eksperimentiranja i predviđanjem korelacijama.³

U ovome su radu razvijene korelacije kako bi se predviđela topivost CO₂, faktor bubrenja, viskoznost mješavine teške sirove nafte i CO₂ i gustoće za modele Emere i Sarma⁶, Simona i Grauea (1965) Mehrotre i Svrceka (1982) i Chunga i suradnika (1986). Paket predviđanja svojstava zahtijeva samo podatke o temperaturi, tlaku, specifičnoj težini nafte i viskoznosti nafte pri bilo kojim uvjetima tlaka i temperature.

Topivost CO₂

Kao što je prikazano u tablici 3 i na slici 2, Emera i Sarma⁶ dali su točnije vrijednosti korelacija u usporedbi s rezultatima koje su iznijeli Simon i Graue (1965), Mehrotra i Svrcek (1982) te Chung i suradnici (1986). Osim veće točnosti u usporedbi s drugim dostupnim korelacijama, model Emere i Sarma⁶ primjenjiv je na veći raspon uvjeta.

Tablica 4 predstavlja sažet opseg eksperimentalnih podataka korištenih u ovoj studiji za testiranje korelacija topivosti CO₂ u nafti.

Korelacije	Broj podataka	Srednja pogreška %	Stand. dev %
Emera and sarma, (2006)	106	4,0	5,6
Simon and Graue (1965)	49	5,72	10,8
Mehrotra and Svrcek (1982)	106	32,6	36,6
Chung et al. (1986)	106	83,7	150,3

Varijabla	Minimum value	Maximum value
Tlak zasićenja, (MPa)	0,5	27,4
Temperatura, (°C)	18,33	140
Molekularna težina (kg/mol)	88,9	222,3
Gustoća nafte, (kg/m ³)	985,1	837,5

Faktor bubrenja nafte

U tablici 5 i na slici 3 prikazana je usporedba točnosti korelacija faktora bubrenja nafti. Vidljivo je da model Emere i Sarma⁶ daje točnije vrijednosti od modela Simona i Grauea. Ujedno, taj se model može primijeniti za veći raspon uvjeta. U tablici 6 iskazan je raspon eksperimentalnih podataka korištenih u ovoj studiji za testiranje korelacija faktora bubrenja nafti.

Korelacije	Broj podataka	Srednja pogreška, %	Standardna devijacija, %
Emera and sarma (2006)	85	0,61	0,94
Simon and Graue (1965)	83	1,0	1,7

Parametri	Minimalna vrijednost	Maksimalna vrijednost
Tlak zasićenja, (MPa)	0,1	27,4
Temperatura, (°C)	23	121,1
Molekularna tež., (kg/mol)	93,0	210,0
Gustoća nafte, (kg/m ³)	985,8	837,5

Gustoća mješavine CO₂ i nafte

Za gustoću mješavine CO₂ i nafte, kao što je vidljivo iz tablice 7 i slike 4, model Emere i Sarma rezultirao je mnogo manjim pogreškama od modela Quaila i suradnika (1988). Osim toga, model se može primijeniti na veći raspon uvjeta. Tablica 8 prikazuje sažetak eksperimentalnog opsega podataka korištenih u ovoj studiji za testiranje korelacije gustoće mješavine CO₂ i nafte.

Korelacije	Broj podataka	Srednja pogreška, %	Standardna devijacija, %
Emera i Sarma (2006)	136	0,29	0,43
Quail i suradnici(1988)	129	3,0	4,8

Parametri	Minimalna vrijednost	Maksimalna vrijednost
Saturation pressure, (MPa)	0,1	34,5
Temperature, (°C)	18,33	121,4
Molekularna tež., (kg/mol)	111,6	222,3
Gustoća nafte, (kg/m ³)	985,8	837,5
Početna gustoća, (g/cm ³)	0,789	0,9678

Viskoznost CO₂- nafta

Pri izračunavanju viskoznosti mješavine CO₂ i nafte, korelacije Emere i Sarma⁶ ostvarile su mnogo točnije rezultate od korelacije Beggsa i Robinsona (1975) te Mehrotre i Svrceka (1982). To je prikazano u tablici 9 i na slici 5. Usto, one se mogu uspješno primijeniti na veći raspon uvjeta, npr. bile su primijenjene za vrijednosti do 12 086 mPa·s. Tablica 10 predstavlja sažet prikaz eksperimentalnog raspona podataka korištenih u ovoj studiji za testiranje korelacija viskoznosti mješavine CO₂ i nafte.

Korelacije	Broj podataka	Srednja pogreška, %	Standardna devijacija, %
Emera and Sarma (2006)	130	6,0	8,8
Beggs and Robinson (1975)	130	56,8	62,7
Mehrotra and Svrcek (1982)	130	94,3	95,2
Quail i suradnici(1988)	130	208,9	376,43

Tablica 10. Eksperimentalni opseg podataka korištenih u ovoj studiji za testiranje korelacija viskoziteta CO₂ i nafte

Parametri	Minimalna vrijednost	Maksimalna vrijednost
Tlak zasićenja, (MPa)	0,1	34,48
Temperatura, (°C)	21	140
Molekularna tež., (kg/mol)	93	240,4
Gustoća nafte, (kg/m ³)	499,0	837,5
Topljivost, molni udjel	0,0	0,768

Prijedlozi i zaključci

Visual Basic softver razvijen u ovoj studiji i uspješno promijenjen kao alat za usporedbu i predviđanje fizičkih svojstava CO₂-nafta. Softver je testiran i njime je potvrđena usporedba i predviđena svojstva na podacima iz literature.

Eksperimentalni podaci dostupni kao opće dobro (public domain) korišteni su za testiranje raznih korelacija svojstava mješavine CO₂ i nafte. Na osnovu podataka korištenih u ovoj studiji i imajući u vidu ograničenja tih podataka, doneseni su slijedeći zaključci:

1. Visual Basic softver razvijen u ovoj studiji potvrđen je kao efikasna metoda testiranja različitih modela iz literature (topljivost CO₂, faktor bubrenja nafte, gustoća mješavine CO₂ i nafte i viskoznost mješavine CO₂ i nafte). Software se može upotrijebiti kao alat za predviđanje, koristeći korelacije iz literature za predviđanje fizičkih svojstava mješavine CO₂ i nafte.
2. Modeli za predviđanje mješavine CO₂ i nafte Emera and Sarma⁵ predstavljaju mnogo pouzdanije predviđanje s većom točnošću od drugih modela ispitanih u ovoj studiji.
3. Osim boljih rezultata predviđanja s većom točnošću, modeli Emera i Sarma⁵ mogu se uspješno primijeniti na veći raspon svojstava nafte, obzirom na specifičnu težinu nafte, tlak do 34,5 MPa, naftu molekularne težine >490 lb/mol, viskoznost do 12 000 mPa·s i temperature do 140 °C.
4. U slučaju nepostojanja bilo kakvih izmjerenih podataka interakcija, specifičnih za lokaciju i kada je u pitanju financijska situacija projekta, korelacije Emera i Sarma⁶ se mogu koristiti kao efikasni alat za predviđanje od oka fizičkih svojstava mješavine CO₂ i nafte, za početna izračunavanja. Mogu se koristiti za brzi odabir projekta istiskivanja nafte plinom. Dodatno tome, one mogu pridonijeti dizajniranju efikasnijih i ekonomičnijih eksperimentalnih programa.

Zahvala

Zahvaljujemo se dr.sc. Mohmmadu Emeri iz Shell Co. na njegovim poticajima, konstruktivnoj kritici, pomoći i podršci da napišemo ovaj članak.



Authors

Mohsin Al-Jarba, Drilling Supervisor Assistant LUKOIL Saudi Arabia Energy, mjrbaa@luksar.com.sa

Bandar Duraya Al-Anazi, Research Assistant, King Abdulaziz City for Science & Technology, bandar.alanazi@gmail.com

UDK : 622.24.063 : 622.276/.279 : 546.264-31 : 54.03/.04

622.24.063 rudarstvo, bušotine, iscrpljivanje ležišta
 622.276/.279 pridobivanje nafte i plina
 546.264-31 ugljik dioksid
 54.03/.04 fizičko-kemijska svojstva