

Posebna obilježja mreže pukotina u raspucanim ležištima Irana

S. Razzagh Famian i M. Masihi

STRUČNI ČLANAK

U raspucanim ležištima nafte zbog postojanja dva različita tipa porozne sredine, nazvane blokovi matriksa i pukotine, postoji više vrsti ponašanja ležišta. Zbog kompleksnosti strukture raspucanih ležišta, pridobivanje nafte je rezultat kombinacija nekoliko mehanizama proizvodnje kao što su gravitacijsko dreniranje i apsorpcija. Kapilarne i gravitacijske sile su dvije glavne sile koje kontroliraju ove mehanizme proizvodnje. Ovaj rad je usredotočen na utjecaj kapilarnog tlaka pukotina koji je različit od nule, relativnu propusnost pora koje nisu pravocrtne, pojavu reinfiltracije, visinu bloka matriksa i ponašanje aktivnih mehanizama u raspucanim ležištima za vrijeme prirodnog iscrpljivanja ležišta i injektiranja nemješljivog plina. Terenske studije simulacije polja napravljene su korištenjem simulatora ECLIPSE s formulacijom obične sirove nafte i opcijom dvostruke poroznosti. Rezultati simulatora, obzirom na relativnu propusnost pora koje nisu pravocrtne, pokazuju da utjecaj tog parametra na ponašanje ležišta ovisi ne samo o fizičkim svojstvima pukotina već i o kapilarnom tlaku praga matriksa i visini bloka matriksa.

Rezultati simulacije pokazuju da je na pridobivanje nafte utjecao, u rasponu od 1% do 2%, razmatrani kapilarni tlak praga matriksa od 0,007 bara (0,1 psi) do 0,214 bara (3,1 psi). Isto tako na pridobivanje nafte utječe, u rasponu od 1,5% do 0,5%, razmatrana visina bloka matriksa od 4,57 m (15 ft) do 18,29 m (60 ft). Naši rezultati simulacije sugeriraju da je za raspucana ležišta s malom visinom bloka ili velikim kapilarnim tlakom praga matriksa, neophodno iznaći adekvatnu, od nule različitu, krivulju kapilarnog tlaka pukotina. Nakon toga smo proučili djelovanje relativne propusnosti zakrivljenih pora na ponašanje ležišta. Rezultati su istaknuli ovisnost utjecaja relativne propusnosti nelinearnih pukotina na visinu bloka matriksa. Rezultati simulacije dobiveni primjenom različitih visina bloka matriksa pokazuju povećanje iscrpka u rasponu od 2,3% do 5,2%, primjenom injektiranja nemješljivog plina. Stoga su ovi rezultati pokazali da ležišta s najvišim blokom matriksa mogu biti dobri kandidati za primjenu injektiranja nemješljivog plina.

Ključne riječi: raspucana ležišta, kapilarni tlak, reinfiltracija, interakcija između blokova

1. Uvod

Raspucana ležišta sastoje se od dva različita tipa porozne sredine tj. matriksa i pukotina. U takvom složenom sustavu, gravitacijske i kapilarne sile su važne u mehanizmu proizvodnje, iako na ponašanje ležišta mogu djelovati i druge sile kao što su širenje fluida, viskoznost i difuzija, ovisno o tlaku, temperaturi i sastavu ležišnih fluida. U sustavu nafta – voda prilikom izmjene fluida između bloka matriksa i pukotina, kapilarna sila može djelovati kao sila usporavanja nasuprot gravitaciji. Takav se proces može desiti ako rezultantna gravitacijska sila prelazi kapilarni tlak praga matriksa. U sustavu nafta – voda istiskivanje nafte vodom ovisi o močivosti bloka matriksa. Za jako hidrofilne matrikse, gravitacijske i kapilarne sile djeluju u istom smjeru, dok u bloku hidrofobnog matriksa kapilarna sila djeluje u smjeru suprotnom od gravitacije.

Općenito, postoje različiti parametri koji unutar sustava voda – nafta i plin – nafta utječu na mehanizme proizvodnje, uključujući visinu bloka matriksa, svojstva stijene, vanjske sile istiskivanja, kapilarni kontinuitet između blokova matriksa i reinfiltraciju nafte iz pukotina u blokove matriksa

Firoozabadi and Hauge¹ su otkrili da kapilarni kontinuitet između matriksa ovisi o veličini otvora pukotine. Rezultati simulacije Vicencia i suradnika⁹ su pokazali da je na pridobivanje nafte utjecao faktor

raspona 1 do 2,2 ovisno o veličini otvora pukotina, koja se kreće između 10 do 300 mikrona.

Reinfiltracija nafte iz pukotina u matriks je proces kod kojeg nafta prolazi kroz različite blokove matriksa prije nego što bude proizvedena. Saidi⁷ je istaknuo da taj fenomen postoji i mora biti uzet u razmatranje prilikom predviđanja ponašanja ležišta.

Relativna propusnost pukotina je drugi ključni parametar koji može regulirati proces protjecanja fluida kroz pukotine. Laboratorijske studije Romma⁵ kod kojih su korištene dvije paralelne staklene ploče koje predstavljaju pukotine, pokazale su linearnu ovisnost relativne propusnosti pukotina o faznom zasićenju. Dvadeset godina kasnije su Rossen i Kumar⁶ upotrijebili su metodu Effective Medium Approximation (EMA), kako bi pokazali da relativna propusnost pukotina nije linearna funkcija zasićenja. Oni su odredili bezdimenzijski parametar (bezdimenzijsku visinu pukotine, H_D) i prikazali krivulje relativne propusnosti kao funkciju tog bezdimenzijskog parametra.

U ovoj studiji ispitujemo utjecaj visine bloka matriksa i kapilarnog kontinuiteta na parametre ponašanje ležišta tijekom prirodnog istiskivanja i procesa injektiranja nemiscibilnog plina, budući da se raspravlja o pretpostavci kapilarnog diskontinuiteta između blokova matriksa. Generirana je serija krivulja kapilarnog tlaka za različite otvore pukotina u proučavanom ležištu, prema studiju baziranom na prije objavljenim

modelima.¹ Nakon toga ispitujemo utjecaj kapilarnog kontinuiteta na koeficijent pridobivanja nafte i glavne mehanizme proizvodnje.

Osim toga ispitujemo utjecaj nelinearne relativne propusnosti pukotina na parametre ponašanja ležišta na osnovi modela koji su predložili Rossen i Kumar⁶ za prosječnu polovicu otvora pukotine u ležištu. Reinfiltracija je drugi ispitani fenomen koji utječe na koeficijent pridobivanja nafte i glavne mehanizme proizvodnje, prilikom procesa injektiranja nemiscibilnog plina.

2. Teorijska podloga i modeliranje

S teorijskog stajališta postoji nekoliko osnovnih koncepata u studiji pridobivanja nafte iz raspucanih ležišta, koji moraju biti predstavljeni kao prvi. To su:

2.1 Visina blokova matriksa

Pojednostavljeni model pojedinačnog matriksa neovisnog djelovanja u dva sustava voda – nafta i plin – nafta, prikazan je na sl. 1

Slijedeći navedene pojednostavljene pretpostavke8 navedene u daljnjem tekstu, fluid za istiskivanje može se opisati jednadžbama 1 i 2, pod uvjetom da su zadovoljene slijedeće pojednostavljene pretpostavke (a) smatra se da je strujanje jednodimenzionalno, (b) kapilarni tlak na razdjelnim površinama je konstantan, (c) relativna propusnost je konstantna, (d) slobodno istjecanje je moguće na dnu i vrhu blokova matriksa dok su bočne površine nepropusne, (e) u okolnim pukotinama distribucija tlaka aproksimirana je hidrostatičkim odnosom i zato korištenjem potencijala $\phi = P + \rho gz$, (f) Darcyjev zakon je primjenljiv na strujanje moćee i nemoćee faze, (g) fluidi su nestlačivi tj. $u_w = u_{nw} = u$.

$$u = \frac{g(H-z)(\rho_o - \rho_g) - P_{cm} + P_{cf}}{kk_{rg} [MH + (1-M)z]} \quad (1)$$

$$u = \frac{g(H-z)(\rho_w - \rho_o) + P_{cm} - P_{cf}}{kk_{rw} z + \frac{\mu_o}{kk_{ro}} (H-z)} \quad (2)$$

Jednadžbe 1 i 2 prikazuju ulogu visina bloka matriksa na mehanizam istiskivanja. Budući da je razlika gustoće u sustavu plin – nafta veća od one u sustavu voda – nafta, gravitacija je u sustavu plin – nafta naglašenija od one u sustavu voda – nafta. Zbog istog razloga povećanje visine bloka u sustavu voda – nafta nema velikog utjecaja na proces istiskivanja, ali to nije tako za sustav plin – nafta.

2.2 Kapilarni kontinuitet

Postojanje kapilarnog kontinuiteta između blokova matriksa proizlazi iz prisutnosti kapilarnog tlaka u pukotinama. Međutim, u praksi se pretpostavlja kapilarni diskontinuitet ($P_{cf} = 0$) između blokova matriksa. Prema jednadžbi 1, kapilarni tlak pora igra ulogu akceleratora u sustavu plin – nafta dok je u sustavu voda – nafta parametar sprječavanja gibanje fluida za istiskivanje (jednadžba 2).

Tablica 1. Ekonomska ograničenja postavljena za proizvodne bušotine

Minimalni tlak na dnu bušotine)	Maksimalni dozvoljeni plinski faktor (GOR)	Maksimalni dozvoljeni udjel vode (stbw/stbo)	Minimalni kapacitet proizvodnje nafte
3 447 378 Pa (500 psia)	350 000 m ³ /m ³ 2 Mscf/stb	0.2	31,8 m ³ /d (200 stb/day)

2.3 Reinfiltracija

Uzevši u obzir zbroj blokova matriksa, nafta koja istječe iz gornjeg bloka matriksa može biti apsorbirana od nezasićenih donjih blokova. Ovaj fenomen uzrokuje prolaz nafte kroz različite blokove matriksa prije proizvodnje što uzrokuje kašnjenje proizvodnje i pad koeficijenta konačnog iscrpka nafte.

U ovoj analizi slučaja korišten je komercijalni simulator ECLIPSE s formulacijom obične sirove nafte i opcijom dvostruke poroznosti. Proučavano raspucano ležište na početku je nezasićeno i nikada ne pada ispod tlaka zasićenja zbog ekonomskih ograničenja nametnutih proizvodnim bušotinama (Tablica 1). Zato u toku prirodnog iskorištavanja postoje dvije zone tj. voda i nafta. Proces injektiranja nemješljivog plina primijenjen je kako bi se inicirao mehanizam gravitacijskog dreniranja plinom koji omogućava proučavanje utjecaja različitih parametara na taj mehanizam.

Zbog toga naša analiza slučaja uključuje sustav voda-nafta kod prirodnog iskorištavanja i sustav voda-nafta-plin kod injektiranja plina s početnim zasićenjem vodom od 0,26 za cijelo ležište. Za proizvodnju je izrađeno i opremljeno šest injekcijskih bušotina u sloju koji leži ispod krovinskog dijela ležišne serije a 18 proizvodnih bušotina je izrađeno i opremljeno u podinskom dijelu ležišne serije. Dimenzije mreže su bile 157 x 40 x 6. Treba primijetiti da gornje tri rešetke u smjeru z pripadaju matriksu a donje pukotinama. Geometrija ugaone točke korištena je za stvaranje mreže. Prosječna permeabilnost i poroznost pukotina je 88,56 mD odnosno 0,1% dok su za matrikse ti parametri 0,22 mD i 8,12%.

3. Rezultati i diskusija

Ispitivana su djelovanja slijedećih parametara na pridobivanje nafte, kao i djelujući mehanizmi u proučavanom ležištu.

3.1 Visina bloka

Kako bi se ispitao utjecaj visine bloka matriksa na koeficijent iscrpka nafte i glavne djelujuće mehanizme prisutne u proučavanom ležištu, za visinu bloka matriksa uzete su tri različite vrijednosti: 4,57 m (15 ft), 9,14 m (30 ft) i 18,29 m (60 ft). Rezultati simulacije dani su u tablici 2.

Slike 2, 3 i 4 prikazuju utjecaj visine bloka matriksa na apsorpciju vode, gravitacijsko dreniranje i mehanizme ekspanzije nafte.

Tablica 2. Utjecaj visine bloka matriksa na konačni iscrpак nafte

Visina bloka matriksa m (ft)	Konačni iscrpак nafte pod djelovanje prirodnog režima (%)	Konačni iscrpак nafte pri nemješljivom istiskivanju s plinom	Povećanje iscrpka nafte (%)
4,57 (15)	14,4	16,7	2,3

Tablica 3. Odnos između P_{cfd} i zasićenja močee faze

S_i (%)	0	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	1
P_{cfd}	17,24	4,74	3,807	3,016	2,585	2,442	2,298	2,154	2,011	1,867	0,86

Tablica 4. Utjecaj kapilarnog kontinuiteta kod različitih scenarija na koeficijent konačnog iscrpka nafte

Različiti scenarij	Porast koeficijenta konačnog iscrpka nafte (prirodno iskorištavanje)	Porast koeficijenta konačnog iscrpka nafte (injektiranje plina)
Primjena krivulja kapilarnog tlaka	1,1%	1,2%
Zbroj blokova = jedan blok	9,7%	10%

3.2 Kapilarni kontinuitet

Kod proučavanja ovog fenomena primijenjena su dva različita pristupa:

a) izvođenje i primjena krivulja kapilarnog tlaka u pukotinama za otvore pukotina u proučavanom ležištu korištenjem bezdimenzijskog kapilarnog tlaka pukotina (P_{cfd}).¹

b) zbrojeni blokovi matriksa uzeti su kao jedan blok.

Prvi korak kod izvođenja krivulja kapilarnog tlaka predstavljenog u prvom pristupu je izvod veličina otvora pukotina, korištenjem jednadžbe 3.⁸ Veličine otvora su razvrstane u 9 razreda. Nakon toga su korištenjem jednadžbe 4 generirane odgovarajuće krivulje kapilarnog tlaka koje odgovaraju svakoj od generiranih vrijednosti. Tablica 3 prikazuje odnos između P_{cfd} i zasićenja močee faze.

$$b = \sqrt{\frac{k_f}{84,4 \times \varphi_f}} \quad (3)$$

$$P_{cfd} = 0,145 \times \frac{b \sigma_c P_c}{\gamma} \quad (4)$$

Osim toga u tablici 4 sabrani su različiti utjecaji kapilarnog kontinuiteta na koeficijent konačnog iscrpka nafte.

Slike 5, 6 i 7 prikazuju utjecaj kapilarnog kontinuiteta na apsorpciju vode, gravitacijsko dreniranje i mehanizme ekspanzije nafte.

Za ispitivanje utjecaja kapilarnog kontinuiteta na ponašanje ležišta s različitim kapilarnim tlakom matriksa i/ili različitim visinama bloka matriksa, primijenjene su krivulje kapilarnog tlaka pukotina u tri modela matrica s kapilarnim tlakom P_{co} (izvorni kapilarni tlak), $P_{co}+1,5$ psi. i $P_{co}+3$ psi. Promjene koeficijenta konačnog iscrpka nafte za ove slučajeve sumirane su u tablici 5. Slike 8 i 9 prikazuju utjecaj kapilarnog kontinuiteta na mehanizme proizvodnje ležišta s različitim kapilarnim tlakom matriksa. Osim toga krivulje kapilarnog tlaka primijenjene su u tri modela s različitim visinama blokova od 4,57 m (15 ft), 9,14 m (30 ft) i 18,29 m (60 ft). U tablici 6 sumirane su promjene koeficijenta konačnog iscrpka nafte za tri slučaja a na slikama 10 i 11 prikazano je njihovo djelovanje na gravitacijsko dreniranje i mehanizme apsorpcije vode.

Tablica 5. Promjena koeficijenta konačnog iscrpka nafte primjenom $P_{cf} \neq 0$ kod različitih kapilarnih tlakova

	P_{co}	$P_{co}+1,5$ psi	$P_{co}+3$ psi
Promjena koeficijenta konačnog iscrpka nafte primjenom P_{cf} (%)	1	1,5	2

Tablica 6. Promjena koeficijenta konačnog iscrpka nafte primjenom $P_{cf} \neq 0$ na matrikse različitih visina blokova

	$H = 4,57$ m (15 ft)	$H = 9,14$ m (30 ft)	$H = 18,29$ m (60 ft)
Promjena koeficijenta konačnog iscrpka nafte (%)	1,5	1	0,5

3.3 Relativna propusnost šupljina

Rossen i Kumar predstavili su model koji dovodi u vezu relativnu propusnost šupljina s gravitacijskim i kapilarnim silama u šupljini. Ovi su odnosi okupljeni u bezdimenzijskom parametru (H_D) predstavljenom u jednadžbi 5. Autori su prikazali podatke relativne propusnosti pukotine za odgovarajuće vrijednosti (H_D) u ležištu za različite vrijednosti distribucije logaritamske standardne devijacije polovice otvora šupljine.

$$H_D = 478,92 \cdot \frac{\Delta\rho \cdot H}{\left(\frac{\gamma}{b_o}\right)} \quad (5)$$

Za proučavano ležište pola otvora pukotina je izvedeno korištenjem jednadžbe 3 ($b_o = 20 \mu$). Otvora. Za studije osjetljivosti na visinu bloka matriksa, izračunate su vrijednosti H_D za sustav nafta-voda u proučavanom ležištu i dobivene su odgovarajuće krivulje relativne propusnosti pukotina. Kao što je preporučeno⁶ za bilo koji dvofazni sistem s vrijednošću $H_D > 10$ (tj. u sustavu plin-nafta) mogu se primijeniti podaci linearne relativne propusnosti. Na bazi toga u ovoj studiji izabran je slučaj prirodnog iskorištavanja ležišta za studij ovog slučaja u kojem se radi o sustavu nafta-voda. Odgovarajuće krivulje relativne propusnosti pukotina za slučaj $H_D = 5$ ($H = 4,57$ m; 15 ft) i $H_D = 1$ ($H = 0,91$ m; 3 ft) prikazane su na sl. 12.

Slika 13 prikazuje utjecaj nelinearne relativne propusnosti pukotina na ponašanje koeficijenta iscrpka nafte tijekom prirodnog iskorištavanja ležišta.

3.4 Reinfiltracija

Preporučeno je da se ova pojava uključi prilikom predviđanja ponašanja pukotinskih ležišta.² Prikazan je utjecaj reinfiltracije na koeficijent iscrpka nafte i na glavne aktivne mehanizme proizvodnje (Slike 15, 16 i 17)

3.5 Diskusija simulacije rezultata

Studija rezultata osjetljivosti visine bloka pokazala je porast koeficijenta iscrpka nafte s porastom visine bloka matriksa. Obzirom na podatke prikazane u tablici 2, porast koeficijenta iscrpka nafte injektiranjem plina je izrazitiji u ležištima s većim visinama blokova. Ispitivanje ponašanja različitih mehanizama (slike 2,3 i 4) pokazala su da povećanje visine bloka matriksa uzrokuje porast aktivnosti mehanizma gravitacijskog dreniranja. Zbog manjih razlika gustoće i sustavu voda-nafta, promjene visine bloka matriksa nema veliki utjecaj na proces apsorpcije vode. Neobična točka na sl. 4 bila je porast aktivnosti mehanizma gravitacijske drenaže uslijed pada visine bloka matriksa tijekom početnih godina proizvodnje. Ta se pojava može pripisati kašnjenju zbog opkoljavanja plinom pune visine bloka matriksa koja je izrazitija u visokim nego u kraćim blokovima.

Studije osjetljivost kapilarnog kontinuiteta pokazale su da primjena kapilarnog kontinuiteta uzrokuje porast koeficijenta konačnog iscrpka nafte u rasponu od 1,1% do 10% ovisno o primijenjenom scenariju (tablica 4). Ta pojava ne djeluje značajno na proces apsorpcije vode (sl. 5) ali uzrokuje povećanje količine proizvedene nafte postupkom gravitacijskog dreniranja. (sl. 6). Na sl. 7 je prikazano ponašanje mehanizma ekspanzije nafte u kojem kapilarni tlak različit od nule uzrokuje veći pad tlaka ležišta i kao rezultat toga povećanje proizvodnje nafte.

Ležišta s većim kapilarnim tlakom matriksa i/ili malim visinama bloka matriksa su osjetljivija na kapilarni tlak pukotina. Prema tablici 5, primjena P_{cf} raličitog od nule u ležištima s kapilarnim tlakom od $P_{co} + 3$ psi, je uzrok da se taj učinak udvostručuje u odnosu na onaj kod

kapilarnog tlaka P_{co} , tj. prvobitnog kapilarnog tlaka. U tablici 6 prikazano je rast učinka kapilarnog tlaka pukotina za 1% u bloku matriksa visine $H = 4,57$ m (15 ft) u odnosu na blok visine $H = 18,29$ m (60 ft).

Kao što je prikazano na sl. 13, nelinearna relativna propusnost pukotina je uzrok da se ležište tijekom prirodnog iskorištavanja ponaša na dva različita načina. Tijekom prvih 35 godina proizvodnje, primjena nelinearne relativne propusnosti pukotina uzrokuje porast koeficijenta iscrpka nafte (u odnosu na slučaj linearnog k_{rf}). Nakon tog perioda, stopa porasta koeficijenta iscrpka nafte pada i na koncu je koeficijent konačnog iscrpka nafte manji nego u slučaju linearnog k_{rf} . Ova se fenomen može opisati uzevši u obzir omjer relativne propusnosti za vodu u odnosu na naftu za različite slučajeve prikazane na sl. 18.

Primjena reinfiltracije u studijama predviđanja ponašanja ležišta pokazala je pad koeficijenta konačnog iscrpka nafte. Prema sl. 14, učinak je veći tijekom procesa injektiranja plina. Na slikama 15 i 17 se vidi da taj fenomen ima veći učinak na gravitacijsko dreniranje i mehanizme ekspanzije nafte.

4. Zaključci

1. Primjenom gravitacijskog dreniranja raspucana ležišta imaju veliki potencijal proizvodnje nafte. Injektiranje plina u takva ležišta može aktivirati/ubrzati taj mehanizam i rezultirati povećanjem koeficijenta konačnog iscrpka nafte.
2. Rast visine bloka matriksa uzrokuje porast koeficijenta konačnog iscrpka nafte.
3. Visina bloka matriksa ima veći učinak na mehanizam gravitacijskog dreniranja ali je njezin učinak na mehanizam apsorpcije vode zanemariv.
4. Primjena kapilarnog kontinuiteta između blokova matriksa uzrokuje porast koeficijenta konačnog iscrpka nafte u rasponu od 1,1% do 10%. To djelovanje je jače u ležištima s kratkim blokovima matriksa i/ili matriksima s većim kapilarnim tlakom.
5. Primjena krivulje nelinearne relativne propusnosti uzrokuje smanjenje koeficijenta konačnog iscrpka nafte.
6. Reinfiltracija nafte u blokove matriksa uzrokuje smanjenje koeficijenta konačnog iscrpka nafte.



Autori:

Saeed Razzagh Famian, Department of Chemical & Petroleum Engineering, Sharif University of Technology, Azadi Ave., Tehran, Iran, PO Box 11365-9465
e-mail: saeed_razzagah@yahoo.com

M. Masihi, Department of Chemical & Petroleum Engineering, Sharif University of Technology, Azadi Ave., Tehran, Iran, PO Box 11365-9465
e-mail: masihi@sharif.edu

UDK : 550.8 : 553.98 (55)

550.8 geološka istraživanja
553.98 ležišta nafte i plina
(55) IRAN