

Kapilarni tlak i relativna propusnost

Dok su poroznost i propusnost isključivo svojstva stijene, i mjere se kao dio rutinskih analiza stijena (engl. *routine core analysis*, RCAL), u ležištu zapravo dolazi do interakcije fluida i stijena na mikroskopskoj tj. pornoj razini. Takva svojstva je moguće analizirati laboratorijski, međutim teško ih je prenijeti na razinu ležišta. 40-ih i 50-ih godina intenzivno se analiziralo upravo te fenomene, koji nastaju zbog kapilarnih karakteristika tj. geometrije pornog sustava u stijeni, međupovršinskih napetosti među fluidima i kuta močenja. Nakon velikog broja publiciranih rezultata laboratorijskih ispitivanja, usvojen je princip koji se u ležišnom inženjerstvu upotrebljava danas kao standard – mjere se podatci o promjeni efektivnih propusnosti za svaki fluid na uzorku stijene (najčešće na jezgri duljine 5-10 cm. i promjera 1.5") s promjenom zasićenja fluidima te podatci o promjeni kapilarnog tlaka, također s promjenom zasićenja. Te analize spadaju u specijalne analize stijena (engl. *special core analysis*, SCAL), prije svega zbog složenijeg postupka eksperimenata, skuplje izvedbe aparature za mjerenje, ali i zbog činjenice da se takva mjerenja izvode puno sporije te su zbog svega navedenog skuplja.

U okviru kolegija Osnovna svojstva ležišnih stijena i fluida (OSLSiF) bilo bi preopširno opisivati kapilarne fenomene i detaljnu fiziku zbog kojih nastaje pojedini oblik krivulje kapilarnog tlaka i krivulje relativnih propusnosti. Stoga će biti dat najjednostavniji primjer, koji ujedno predstavlja i česti slučaj primjene ovih podataka. Sve detaljnije teorijske postavke, principe interpretacije i primjene dotičnih krivulja biti će obrađene u okviru kolegija Višefazni protok u poroznoj stijeni (diplomski studij naftnog rudarstva) te se u samoj primjeni spominju i upotrebljavaju u nizu kolegija na diplomskom studiju te unutar kolegija Razrada ležišta ugljikovodika na trećoj godini preddiplomskog studija naftnog rudarstva.

Kapilarni tlak

Kapilarni tlak nastaje zbog sila adhezije između fluida i kapilare. Kako je u ležištima ugljikovodika u porama skoro uvijek prisutno 2 fluida, ovaj fenomen postaje interesantan zbog određivanja raspodjele zasićenja fluidima.

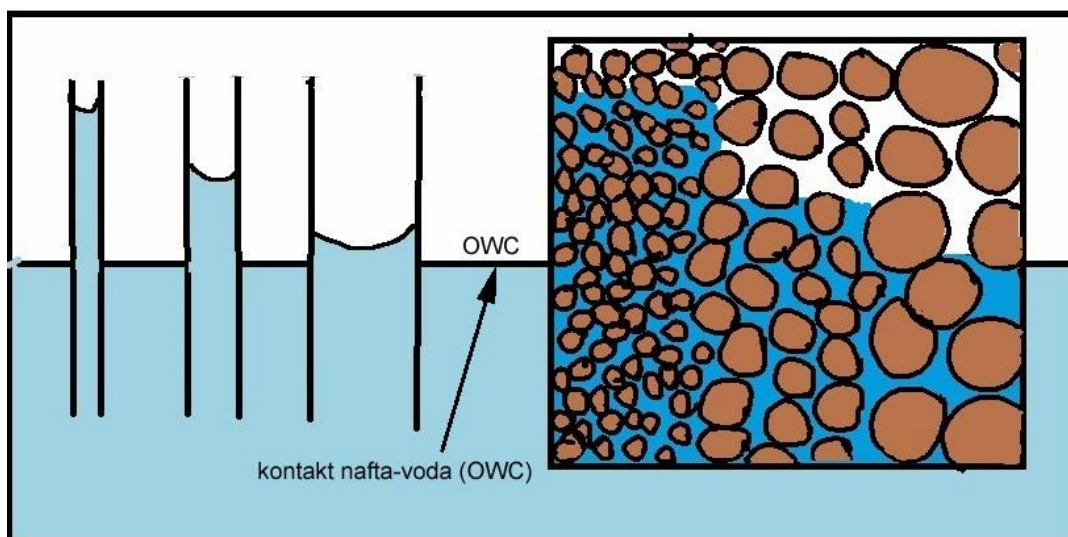
Temeljna formula kod tako postavljenog problema jest

$$P_c = \frac{2\gamma \cos(\alpha)}{r} \quad (1)$$

Pri tome je P_c kapilarni tlak (Pa) γ međupovršinska (interfacijalna) napetost (N, ali u stručnoj literaturi se često koristi din, tj. N⁻⁵), α je kontaktni kut, tj. kut močenja, a r predstavlja prosječni radijus kapilare (pornog otvora, m).

Kapilarni tlak se mjeri u laboratoriju, utiskivanjem jednog fluida u jezgri 100% zasićenu drugim fluidom. U svakom koraku mjerenja bilježi se promjena zasićenja i tlak. Rezultantno, dobije se krivulja zasićenja i tlaka koji bi bio potreban da se zasićenje tim fluidom još smanji. Zasićenje pri kojem je potreban praktički beskonačan tlak da bi se još smanjilo zasićenje zove se **ireducibilno zasićenje** (S_{wirr}). Ovo zasićenje se može odrediti jedino u laboratoriju. Raspodjelu zasićenja u neposrednoj blizini bušotina pokušava se odrediti posrednim metodama, poput karotaže. Međutim, takve metode daju podatke koji nisu izravno mjereni, a najpouzdaniji podatci iz karotaže (vezani uz zasićenje) su podatci o kontaktima nafta-voda i općenito dubine na kojima se nalaze slojevi zasićeni ugljikovodicima ili samo vodom.

Kada je određen kontakt nafta voda, **reprezentativna** krivulja kapilarnog tlaka može poslužiti određivanju zasićenja fluidima iznad kontakta nafta voda. Na slici 1 zorno je prikazano kako zasićenje vodom u dijelu stijene gdje je manji kapilarni tlak odgovara dizanju vode u kapilari manjeg promjera. Pozicija gdje su kapilarne sile jednake razlici tlakova stupca nemoćive (nafte) i moćive (vode) faze odgovara dubini na kojoj se nalazi kontakt nafta-voda u ležištu.



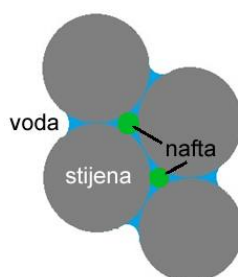
Slika 1. Dizanje vode u kapilarama različitog promjera te veće zadržavanje vode u porama manjeg prosječnog promjera.

Kako se kapilarnom stupcu suprotstavlja hidrostatski stupac nafte i vode, iz reprezentativne krivulje kapilarnog tlaka može se odrediti kapilarno dizanje vode u naftno područje:

$$P_c = (\rho_w - \rho_o)gh \quad (2)$$

Gdje je P_c kapilarni tlak u funkciji zasićenja vodom, ρ_w i ρ_o su gustoća vode i nafte (kg/m^3), g je gravitacijska akceleracija (9.80665 m/s^2) i h je visina iznad kontakta nafta voda (m). Pri tome je bitno ponoviti da se kontakt nafta-voda može odrediti jedino karotažnim mjerenjem.

U konsolidiranim stijenkama, u kakvima se najčešće nalaze ugljikovodici, dolazi do kapilarnog zarobljavanja određene faze (slika 2).



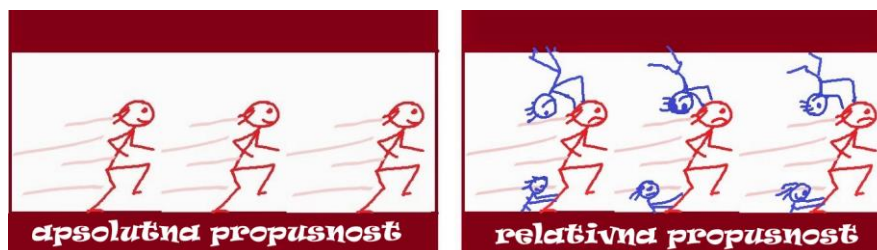
Slika 2. Kapilarno zarobljavanje nafte u pori

Općenito, prekidi kontinuiranog zasićenja unutar kompleksnog pornog prostora (složenijem od cijevčice, tj. poput onog na slici 1-desno) manifestiraju se prilikom mjerenja propusnosti za svaki fluid. Efektivna propusnost za svaki fluid mijenja se smanjenjem zasićenja tim istim fluidom, a odnos između efektivne propusnosti i zasićenja određuje se iz krivulje relativnih propusnosti (jedn. 2, slika 4)

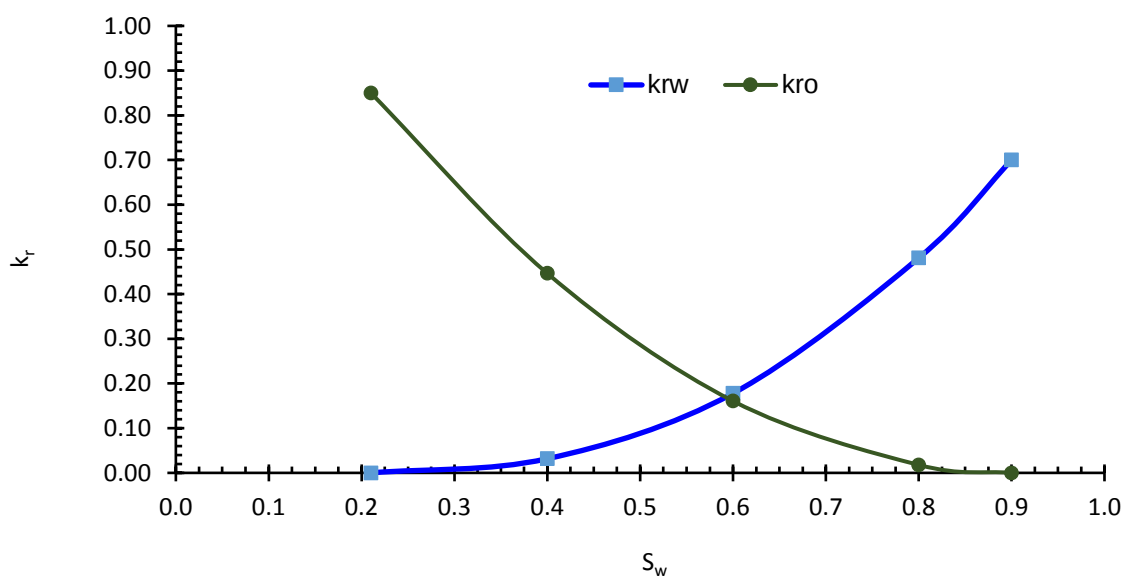
$$k_r = \frac{k_{ef}}{k} \quad (2)$$

Gdje je k_r relativna propusnost, k_{ef} efektivna propusnost (m^2 ili mD) i k apsolutna propusnost (m^2 ili mD). U sustavu naftonosnoj zoni je dakle potrebno poznavati relativne propusnosti za naftu i vodu (k_{ro} i k_{rw}) kako bi se iz poznatih podataka apsolutne propusnosti (k) mogla odrediti efektivna propusnost za svaki fluid (k_o , k_w) za računanje protoka Darcyevom jednačinom.

Relativne, tj. efektivne propusnosti kad su pokretljiva 2 fluida su obrnuto proporcionalne (slika 3).



Slika 3. Za razliku od apsolutne propusnosti, kod relativne jedan fluid usporava protjecanje drugog.



Slika 4. Krivulja relativnih propusnosti vode (k_{rw}) i nafte (k_{ro}) u ovisnosti o zasićenju vodom (S_w).

Primjer:

U laboratoriju je određena krivulja kapilarnog tlaka te je preračunata u ležišne uvjete interfacijalnih napetosti za sustav nafta-voda. Također su dostupni podatci mjerenja zavodnjavanja jezgre u laboratoriju (engl. *coreflood*) iz kojih je potrebno odrediti krivulju relativnih propusnosti. Potrebno je izračunati protok nafte na sredini proizvodnog intervala i frakcijski protok vode.

Tablica 1. Podatci o proizvodnom intervalu i fluidima u njemu

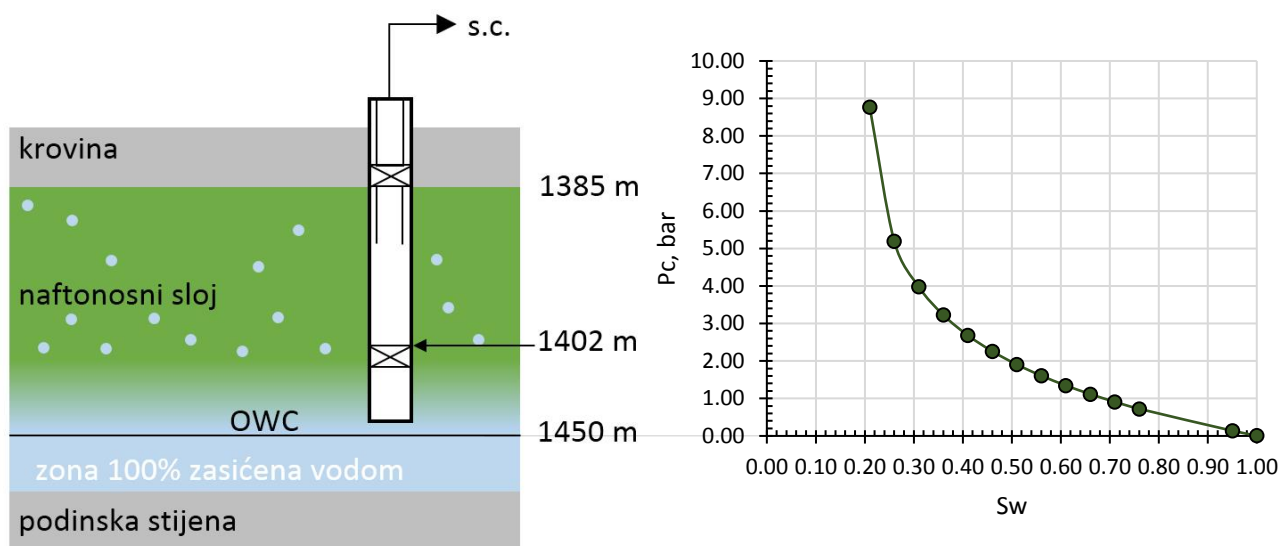
dubina kontakta-nafta-voda	OWC	1450	m
najveća dubina proizvodnje	h_b	1402	m
dubina krovine	h_T	1385	m
ležišni tlak	p_r	159	bar
dinamički tlak u bušotini	p_w	135	bar
viskoznost ležišne nafte	μ_o	1.3	mPas
viskoznost ležišne vode	μ_w	1.1	mPas
drenažni radijus	r_e	280	m
radijus bušotine	r_w	0.175	m
volumni faktor nafte	B_o	1.35	m ³ /m ³

Tablica 2. Podatci za računanje zasićenja i krivulje relativne propusnosti

<i>površina jezgre</i>	A	11.4	cm ²
<i>duljina jezgre</i>	L	6	cm
<i>poroznost</i>	ϕ	0.16	dij.jed
<i>kritično zasićenje vodom</i>	S_{wc}	0.21	dij.jed
<i>razlika tlaka u coreflood analizi</i>	Δp	6	bar
<i>apsolutna propusnost</i>	k	60	mD
<i>viskoznost vode</i>	μ_w	1.1	mPas
<i>viskoznost ulja</i>	μ_o	20	mPas
<i>gustoća vode</i>	ρ_w	997	kg/m ³
<i>gustoća nafte</i>	ρ_o	745	kg/m ³

Tablica 3. Podatci mjerenja protoka (coreflood analiza). Mjerene su promjene brzine protoka (Q_o , Q_w) proizvedenog volumena nafte, V_o i ukupnog fluida (V_o+V_w)

t	S_w	Q_w	Q_o
s		cm ³ /s	cm ³ /s
100	0.21	0.00000	0.02907
300	0.4	0.01970	0.01526
500	0.6	0.11068	0.00550
700	0.8	0.29893	0.00061
900	0.9	0.43527	0.00000



Slika 5. Shematski prikaz odnosa zasićenja i proizvodnog intervala.

Postupak proračuna:

1. Zasićenje vodom na sredini proizvodnog intervala

Visina sredine proizvodnog intervala od kontakta nafta voda:

$$h_{sr} = 1450 - \frac{1402+1385}{2} = 56.5 \text{ m}$$

Sada je potrebno preračunati tu visinu u kapilarni tlak:

$$P_c = (\rho_w - \rho_o) \cdot g \cdot h = (997 - 745) \cdot 9.80665 \cdot 56.5 = 139627.1 \text{ Pa} = 1.396 \text{ bar}$$

Očitano zasićenje vodom: $S_w=0.6$

2. Računanje relativne propusnosti pri očitanoj zasićenju.

Potrebno je izraditi krivulju relativnih propusnosti (rezultantni proračun relativnih propusnosti je prikazan u tablici 4)

Stupac 1. se računa iz zadanih ukupnih mjerenih vremena ($\Delta t = t_i - t_{i-1}$).

Stupac 3 i 4. računa se za svaki korak efektivna brzina protjecanja efektivna propusnost za vodu (k_w , mD) i naftu (k_o , mD, potrebno je paziti na jedinice, a najlakše je sve raditi u SI sustavu):

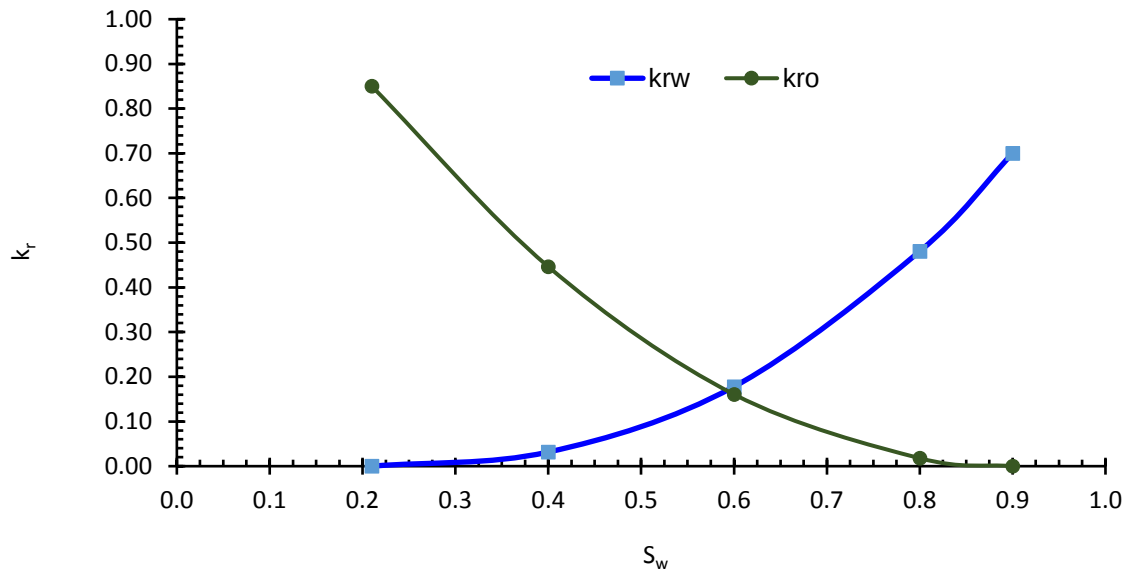
$$k_w = \frac{Q_w \mu_w L}{A \Delta p} = \frac{0.11 \cdot 6}{11.4 \cdot 6} = 0 \text{ mD}$$

$$k_o = \frac{Q_o \mu_o L}{A \Delta p} = \frac{0.02907 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 20 \cdot 0.001 \text{ Pas} \cdot 6 \cdot 0.01 \text{ m}}{11.4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot 6 \cdot 10^5 \text{ Pa}} = 51 \cdot 10^{-15} \text{ m} = 51 \text{ mD}$$

Relativna propusnost se računa dijeljenjem s maksimalnom vrijednosti efektivne propusnosti (normirana) ili dijeljenjem s apsolutnom propusnosti (tablica 4, slika 6)

Tablica 4. Relativne propusnosti

Δt s	S_w	k_w mD	k_o mD	k_{rw}	k_{ro}
0					
100	0.21	0.00	51.0	0.0000	0.8500
200	0.40	1.90	26.78	0.0317	0.4463
200	0.60	10.68	9.64	0.1780	0.1607
200	0.80	28.84	1.07	0.4807	0.0179
200	0.90	42.00	0.00	0.7000	0.0000



Slika 6. Krivulja ovisnosti relativne propusnosti o zasićenju

3. Očitavanje relativne propusnosti pri prethodno određenom zasićenju $S_w=0.6$:

$k_{rw} = 0.178$ i $k_{ro} = 0.161$, te pomnoživši s apsolutnom propusnosti $k = 60$ mD dobije se:

$$k_o = 9.5145 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2 \text{ i } k_w = 1.0541 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$$

4. Proračun radijalnog protoka u bušotinu

Proizvodni interval ima debljinu od krovine (gornji pakler) do donjeg pakera i iznosi $h = 1402 - 1385 = 17$ m.

Razlika dinamičkog i ležišnog tlaka $\Delta p = p_r - p_w = 24 \cdot 10^5$ Pa

Tada je jednostavno izračunati protok za svaki fluid:

$$Q_w = \frac{2\pi k_w h \Delta p}{\mu_w \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} = 0.00033295 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 28.767 \frac{\text{m}^3}{\text{dan}}$$

Potrebno je uočiti da se u laboratoriju često mjeri s laboratorijskim uljem, ali krivulja svejedno može biti primijenjena na fluid druge viskoznosti, tj. viskoznost ležišne nafte je znatno manja ($\mu_o = 1.3$ mPas):

$$Q_o = \frac{2\pi k_o h \Delta p}{\mu_o \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} = \frac{2.4391 \cdot 10^{-6}}{1.3 \cdot 10^{-3} \cdot 7.378} = 0.0002543 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 21.972 \frac{\text{m}^3}{\text{dan}}$$

Za procjenu kolika bi to bila proizvodnja na površini, potrebno je vrijednost protoka podijeliti s volumnim faktorom. Pri i tome je bitno napomenuti da se promjenom tlaka u pribušotinskoj zoni mijenja i volumni faktor $B_o = f(p)$:

$$Q_{o(s.c.)} = \frac{Q_o}{B_o} = 16.28 \frac{\text{m}^3}{\text{dan}}$$

5. Frakcijski protok vode

Frakcijski protok je udio vode u ukupnom protoku:

$$f_w = \frac{Q_w}{Q_w + Q_o} = 0.567$$