

Homogenizacija podataka specijalnih analiza jezgara usklađivanjem s empirijskim korelacijama

Biljanović, Tamara

Master's thesis / Diplomski rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:159671>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij naftnog rudarstva

**HOMOGENIZACIJA PODATAKA SPECIJALNIH
ANALIZA JEZGARA USKLADIVANJEM S
EMPIRIJSKIM KORELACIJAMA**

Diplomski rad

Tamara Biljanović

N-196

Zagreb, 2017.

HOMOGENIZACIJA PODATAKA SPECIJALNIH ANALIZA JEZGARA USKLAĐIVANJEM S EMPIRIJSKIM KORELACIJAMA

TAMARA BILJANOVIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za naftno inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

U diplomskom radu testiran je postupak za određivanje reprezentativnih krivulja kapilarnog tlaka i relativne propusnosti na temelju eksperimentalnih podataka s tri polja, svakog zastupljenog s nekolicinom uzoraka. Pretpostavka jest da oni eksperimentalni podaci koji se slabo poklapaju s općim korelacijama i nakon podešavanja njihovih parametara mogu biti eliminirani iz razmatranja. Pokazalo se kako nesustavno mjereni podaci pokazuju i velika odstupanja od korelacija. Podaci kapilarnih tlakova Polja-3 su najsustavnije, tj. najpreciznije mjereni i poklapanje korelacija s tim podacima je najbolje. Relativna propusnost je mjerena metodom ustaljenog i neustaljenog protoka na istom polju, a poteškoće prilikom eksperimentalnog određivanja su se potvrdile i na lošem poklapanju s korelacijama. Usporedbom krajnjih točaka iz korelacije i eksperimenta, izdvojilo se prilično točno kritično zasićenje vodom, što je ključni parametar za poklapanje proračuna zavodnjavanja s povijesti proizvodnje u tom periodu. Korelacija sama za sebe, kao i eksperiment sam za sebe, daju manje kvalitetne podatke nego na ovaj način usklađeni podaci. Bilo je dovoljno tri analize kapilarnog tlaka na uzorcima s istog polja da se postigne izvrsno poklapanje s korelacijom, pa se može zaključiti kako bi bilo potrebno barem isto toliko mjerenja relativne propusnosti i da bi se tada uskladili te homogenizirali podaci specijalnih analiza jezgara potrebni za simulaciju ležišta ili navedene analitičke proračune.

Ključne riječi: reprezentativnost uzorka, specijalne analize jezgara, homogenizacija podataka

Diplomski rad sadrži: 57 stranica, 13 tablica, 28 slika, 9 dodataka, 22 reference.

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: Dr. sc. Domagoj Vulin, izvanredni profesor RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Domagoj Vulin, izvanredni profesor RGNF
Dr. sc. Vladislav Brkić, docent RGNF
Dr. sc. Luka Perković, docent RGNF

Datum obrane: 20.10.2017., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

SPECIAL CORE ANALYSIS DATA UPSCALING BY MATCHING WITH EMPIRICAL CORRELATIONS

TAMARA BILJANOVIĆ

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Petroleum Engineering
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

In this paper, the procedure for determining the representative capillary pressure and relative permeability curves has been tested, based on experimental data from three oil-fields and several samples from each field. The assumption was that experimental data, which show bad matching with general correlations, and after the regression of correlation parameters, can be excluded from further considerations. It was shown that nonsystematically measured data shows great discrepancies from those calculated by correlations. At Field-3, the data were measured in the most systematic way and correlations for capillary pressure were matched most successfully. Relative permeability was measured by unsteady state and steady state method on samples from the same field, with known technical problems that can be detected by bad matching with correlated values. End-points calculated by correlation and those determined experimentally indicate that critical water saturation can be predicted by correlation, which is crucial for waterflood predictions and their matching with historical data from that production period. Correlations and experimental studies for themselves provide data of lesser quality than when they are mutually synchronized. Three analyses of capillary pressure were sufficient to achieve a satisfying match with correlations, from which it can be concluded that at least three relative permeability measurements are required to match and upscale special core analysis data required for further reservoir simulations or analytical predictions.

Keywords: representative samples, special core analysis, data upscaling

Thesis contains: 57 pages, 13 tables, 28 figures, 9 appendixes, 22 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited at: The Library of the Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Associate Professor Domagoj Vulin, PhD

Reviewers: Associate Professor Domagoj Vulin, PhD
Assistant Professor Vladislav Brkić, PhD
Assistant Professor Luka Perković, PhD

Date of defense: October 20, 2017, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
University of Zagreb

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA	III
POPIS OZNAKA	IV
1. UVOD	1
2. KAPILARNI TLAK	3
2.1. Metode laboratorijskog mjerenja kapilarnog tlaka	6
2.1.1. Metoda polupropusne membrane	6
2.1.2. Metoda saturacije živom	9
2.1.3. Centrifugalna metoda	10
2.2. Korelacije za određivanje kapilarnog tlaka	14
3. RELATIVNA PROPUSNOST	18
3.1. Metode određivanja	19
3.2. Korelacije za određivanje relativnih propusnosti iz kapilarnih tlakova	20
3.2.1. Purcellov model	20
3.2.2. Burdineov model	21
3.2.3. LET model	22
4. ODREĐIVANJE RELATIVNIH PROPUSNOSTI ZA UZORKE POLJA-1	24
4.1. Analiza dostupnih podataka	24
4.2. Testiranje korelacija za određivanje krivulje kapilarnog tlaka	26
4.3. Određivanje relativnih propusnosti iz kapilarnog tlaka	29
5. ODREĐIVANJE RELATIVNIH PROPUSNOSTI ZA UZORKE POLJA-2	32
5.1. Analiza dostupnih podataka	32
5.2. Testiranje korelacija za određivanje krivulje kapilarnog tlaka	33
5.3. Određivanje relativnih propusnosti iz kapilarnog tlaka	35
6. ODREĐIVANJE RELATIVNIH PROPUSNOSTI ZA UZORKE POLJA-3	38
6.1. Analiza dostupnih podataka	38

6.2.	Testiranje korelacija za određivanje krivulje kapilarnog tlaka	38
6.3.	Određivanje relativnih propusnosti iz kapilarnog tlaka	40
6.4.	Usporedba laboratorijskih i koreliranih podataka.....	43
7.	ZAKLJUČAK.....	44
8.	REFERENCE	46
9.	DODACI.....	48

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Kontaktni kut za sustav voda-nafta	3
Slika 2-2. Odnos visina dizanja iznad kontakta nafta-voda i kapilarnog tlaka.....	4
Slika 2-3. Krivulje kapilarnog tlaka u procesu primarnog i sekundarnog dreniranja i imbibicije	5
Slika 2-4. Shema laboratorijskog mjerenja kapilarnog tlaka metodom polupropusne membrane	7
Slika 2-5. Krivulje kapilarnog tlaka pri početnoj desaturaciji (1) i naknadnoj saturaciji (2) a) u slučaju vodomochive stijene, b) u slučaju naftomochive stijene	8
Slika 2-6. Shema laboratorijskog mjerenja kapilarnog tlaka metodom saturacije živom	9
Slika 2-7. Krivulja kapilarnog tlaka pri početnoj saturaciji živom (1) i histereza krivulje pri daljnjem postupku (2,3).....	10
Slika 2-8. Shema laboratorijskog mjerenja kapilarnog tlaka centrifugalnom metodom, a) u slučaju istiskivanja vode naftom; b) u slučaju istiskivanja nafte vodom	11
Slika 2-9. Krivulje kapilarnih tlakova dobivene centrifugalnom metodom – krivulje 2 i 4 su pretpostavljene.....	12
Slika 2-10. Krivulje kapilarnog tlaka i zasićenja vodom pri centrifugalnom mjerenju u ovisnosti o duljini jezgre	14
Slika 2-11. Ponašanje krivulje kapilarnog tlaka za Skjaevelandovu korelaciju	16
Slika 3-1. Krivulje relativnih propusnosti za močivu i nemočivu fazu, ovisno o smjeru zasićenja.....	18
Slika 4-1. Aparatura za mjerenje kapilarnih tlakova metodom polupropusne membrane ..	24
Slika 4-2. Krivulje kapilarnih tlakova mjerene na jezgrama iz jedne bušotine (dubine 1527,64 - 1528,9 m)	25
Slika 4-3. Određivanje parametra λ za uzorke s Polja-1	26
Slika 4-4. Usporedba korelacija s mjerenim podacima o kapilarnom tlaku za uzorke s Polja-1.....	28
Slika 4-5. Krivulje relativnih propusnosti za vodu (k_{rw}) i za naftu (k_{ro}) dobivene primjenom Purcellovog i Burdineovog modela, Polje-1.....	30
Slika 4-6. Usporedba odabranih krivulja relativnih propusnosti Purcellovog i Burdineovog modela s korigiranim krivuljama LET modela, Polje-1	31
Slika 5-1. Krivulje kapilarnih tlakova mjerene na dva uzorka trima metodama.....	32
Slika 5-2. Određivanje parametra λ za uzorke s Polja-2	33

Slika 5-3. Usporedba korelacija s mjerenim podacima za uzorke s Polja-2.....	34
Slika 5-4. Krivulje relativnih propusnosti za vodu (k_{rw}) i za naftu (k_{ro}) dobivene primjenom Purcellovog i Burdineovog modela, Polje-2.....	36
Slika 5-5. Usporedba odabranih krivulja relativnih propusnosti Purcellovog i Burdineovog modela s korigiranim krivuljama LET modela, Polje-2	37
Slika 6-1. Krivulje kapilarnih tlakova mjerene na dva uzorka dvijema metodama	38
Slika 6-2. Određivanje parametra λ za uzorke s Polja-3	39
Slika 6-3. Usporedba korelacija s mjerenim podacima za uzorke s Polja-3.....	39
Slika 6-4. Krivulje relativnih propusnosti za vodu (k_{rw}) i za naftu (k_{ro}) dobivene primjenom Purcellovog i Burdineovog modela, Polje-3.....	41
Slika 6-5. Usporedba odabranih krivulja relativnih propusnosti Purcellovog i Burdineovog modela s korigiranim krivuljama LET modela, Polje-3	42

POPIS TABLICA

Tablica 4-1. Propusnosti i poroznosti uzoraka	25
Tablica 4-2. Vrijednosti kapilarnog tlaka uzorka 4407 korigirane Brooks-Coreyevom korelacijom	29
Tablica 4-3. Vrijednosti parametara LET modela, Polje-1	30
Tablica 4-4. Relativne propusnosti za vodu i naftu uzorka s Polja-1	31
Tablica 5-1. Vrijednosti kritičnog tlaka mjerenja, P_{cd} [bar]	33
Tablica 5-2. Vrijednosti kapilarnog tlaka uzorka 2716 korigirane Brooks-Coreyevom korelacijom	35
Tablica 5-3. Vrijednosti parametara LET modela, Polje-2	36
Tablica 5-4. Relativne propusnosti za vodu i naftu uzorka s Polja-2	37
Tablica 6-1. Vrijednosti kapilarnog tlaka uzorka 1215A korigirane Burdineovom korelacijom	40
Tablica 6-2. Vrijednosti parametara LET modela, Polje-3	41
Tablica 6-3. Relativne propusnosti za vodu i naftu uzorka s Polja-3	42
Tablica 6-4. Usporedba rubnih uvjeta dobivenih pojedinom metodom	43
Tablica 6-5. Raspon za odabir relativne propusnosti pri S_{wc} i S_{or}	43

POPIS OZNAKA

A	- centrifugalna akceleracija [cm/s^2]
a_w, c_w	- parametri Skjaevelandove korelacije za pozitivni dio krivulje
a_o, c_o	- parametri Skjaevelandove korelacije za negativni dio krivulje
B	- parametar modela za određivanje relativnih propusnosti
F_{cd}	- faktor potrebitosti korištenja kritičnog tlaka u LET korelaciji
G	- gravitacijska konstanta [m/s^2]
H	- visina iznad zone zasićenja [m]
K	- apsolutna propusnost [m^2]
k_w	- efektivna propusnost za vodu [m^2]
k_o	- efektivna propusnost za naftu [m^2]
k_r	- relativna propusnost
k_{rw}	- relativna propusnost za vodu
k_{ro}, k_{rnw}	- relativna propusnost za naftu, odnosno nemočivu fazu
k_{rw}^0	- krajnja vrijednost relativne propusnosti za vodu
k_{rnw}^x	- krajnja vrijednost relativne propusnosti za naftu
L	- duljina jezgre [cm]
L, E, T	- parametri LET korelacija za određivanje krivulje kapilarnog tlaka
L_w, E_w, T_w	- parametri LET modela za određivanje rel. propusnosti za močivu fazu
L_o, E_o, T_o	- parametri LET modela za određivanje rel. propusnosti za nemočivu fazu
m	- parametar modela za određivanje relativnih propusnosti
N	- broj okretaja pri centrifugalnom mjerenju [min^{-1}]
P_c	- kapilarni tlak [Pa]
$P_{c(max)}$	- maksimalni kapilarni tlak [Pa]
$P_{c(min)}$	- minimalni kapilarni tlak [Pa]
P_{cD}	- kapilarni tlak na vanjskom obodu jezgre pri centrifugalnom mjerenju [Pa]
P_{cI}	- kapilarni tlak na unutarnjem kraju jezgre pri centrifugalnom mjerenju [Pa]

P_{cd}	- kritični tlak za početak dreniranja [Pa]
P_{ci}	- kritični tlak za početak imbibicije [Pa]
P_w	- tlak močive faze [Pa]
P_{wn}	- tlak nemočive faze [Pa]
R	- srednji radijus kapilare [mm]
r	- radijus rotacije pri centrifugalnom mjerenju [cm]
r_e	- vanjski radijus rotacije pri centrifugalnom mjerenju [cm]
r_i	- unutarnji radijus rotacije pri centrifugalnom mjerenju [cm]
S_o	- zasićenje naftom [%]
S_o^*	- normalizirana vrijednost zasićenja naftom
S_{or}	- rezidualno zasićenje naftom [%]
S_w	- zasićenje vodom (močivom fazom) [%]
S_w^*	- normalizirana vrijednost zasićenja vodom
S_{wc}	- kritično zasićenje vodom [%]
S_{wi}	- početno zasićenje vodom [%]
S_{wirr}	- ireducibilno zasićenje vodom [%]
S_{wr}	- rezidualno zasićenje vodom [%]
$S_{w(max)}$	- maksimalno zasićenje vodom [%]
$S_{w(min)}$	- minimalno zasićenje vodom [%]
v_θ	- centrifugalna brzina [cm/s]
θ	- kut močivosti između faza [°]
λ	- parametar korelacija za određivanje kapilarnog tlaka
ρ_{nw}	- gustoća nemočive faze [kg/m ³]
ρ_w	-gustoća močive faze [kg/m ³]
σ	- međupovršinska napetost [N/m]
ϕ	- poroznost [%]

1. UVOD

Stijene koje su ležišta ugljikovodika uvijek su zasićene s minimalno dvije faze. Faze koje se razmatraju u ležišnom inženjerstvu su slojna voda, nafta, plin te fluid koji se utiskuje u sekundarnoj (zavodnjavanje) i tercijarnoj fazi (utiskivanje otapala, pare, pjena itd). Sile adhezije u porama će za svaku od spomenutih faza biti različite, što se manifestira različitim iznosima kapilarnog tlaka i različitim oblicima krivulja relativnih propusnosti (Brown, 1951). Odnos močivosti, krivulje kapilarnog tlaka i relativne propusnosti je matematički u teoriji vrlo jasno opisiv. Međutim, u stvarnosti, tj. kada se rade specijalne analize jezgara (engl. *Special Core Analysis*, SCAL), ta „izravna“ veza kapilarnog tlaka (na temelju koje se rade analize gravitacijskog odvajanja fluida, tj. kapilarnog dizanja težih faza) i relativne propusnosti nije uočljiva (Slobod et al. 1951). Zapravo, zbog nehomogenosti sastava stijene i vrlo složene geometrije pora (koje u stvarnosti nisu povezane kao cjevčice, nego kao razgranat kompleksan sustav šupljina), često je teško matematički povezati kapilarni tlak i relativnu propusnost. Upravo zbog takve heterogenosti sastava stijena, te heterogenosti oblika i veličine pora, odabir reprezentativnih mjerenja provedenih na više uzoraka nije lagan. Močivost i kapilarni tlak se, ovisno o metodi mjerenja, mjere danima ili čak tjednima, pa i mjesecima. Mjerenje relativne propusnosti, s pripremom uzorka, traje također danima. Nakon jednog mjerenja, npr. mjerenja kapilarnog tlaka metodom polupropusne membrane, uzorak se danima suši i čisti te zasićuje za novo mjerenje, npr. relativnih propusnosti. Pri višestrukom zasićivanju uzorka mijenjaju se odnosi močivosti procesima primarne i sekundarne imbibicije, odnosno dreniranja. Često uzorak nakon jednog mjerenja više nije niti upotrebljiv – narušavanjem integriteta tj. mehaničkim oštećenjem uzorka, koje nastaje zbog npr. prevelike sile prilikom mjerenja kapilarnog tlaka centrifugalnom metodom ili metodom utiskivanja žive, a ponekad i zbog mjerenja propusnosti pri ležišnim uvjetima tlakova i temperatura. Zbog svega navedenog, mogućnost uspostave veze između teoretskih matematičkih opisa i više specijalnih analiza na istom uzorku je rijetka.

Računske analize u radu su provedene na temelju laboratorijskih podataka provedenih u petrofizikalnom laboratoriju INA d.d. te na temelju podataka kapilarnih tlakova utiskivanja žive u *Laboratoriju za rutinske i specijalne analize stijena* na RGN fakultetu. Ti podaci su mjereni na uzorcima pješčenjaka s tri naftna polja u Savskoj depresiji, karakterizirana visokim stupnjem homogenosti. Na prvom setu uzoraka već su rađene analize u smislu određivanja reprezentativnog uzorka na temelju usporedbe karotažnog mjerenja i mjerenja kapilarnih tlakova (Vulin et al., 2016). Analiza je imala suprotstavljen odnos zasićenja fluida

u naftonosnom sloju, koja su određena karotažnim dijagramom, zatim kapilarnih tlakova određenih metodom polupropusne membrane u laboratoriju, te srednje propusnosti sloja. Ustanovljeno je kako početna zasićenja iz karotažnog dijagrama i svakog pojedinačnog mjerenja na uzorku nisu u skladu s prosječnom propusnoti koja bi u tom sloju trebala biti puno veća kako bi se matematički poklopili svi navedeni parametri. Analiza upućuje na to da jedan od dva podatka – srednja propusnost ili srednje zasićenje iznad kontakta nafta-voda u dotičnom ležištu ne može biti točan. Većim brojem analiziranih uzoraka bila bi uspostavljena bolja korelacija, ili bi se barem pouzdano moglo odrediti koji od dva parametra je točan (Brooks i Corey, 1964).

Na setu uzoraka s drugog polja mjereni su močivost te kapilarni tlak pomoću centrifugalne metode, metode polupropusne membrane i metode utiskivanja žive. Radi se o uzorcima iz negativne bušotine, pa se moglo testirati metode koje razaraju uzorak (utiskivanje žive, ponekad centrifugalna metoda).

Na trećem setu uzoraka mjerene su močivosti i kapilarni tlakovi pomoću centrifugalne metode i metode polupropusne membrane, te relativna propusnost sustava ulje-voda.

Pretpostavka tj. hipoteza koja je postavljena prije izrade ovog diplomskog rada jest da je moguće uspostaviti poklapanje matematičkih opisa kapilarnog tlaka i relativne propusnosti s njihovim mjerenim podacima. Ukoliko je čak moguće istovremeno za neki uzorak poklopiti matematički opis kapilarnih tlakova i relativnih propusnosti, uz slične korelacijske parametre, to bi značilo da je dotični uzorak reprezentativan za daljnje korištenje.

2. KAPILARNI TLAK

Kapilarni tlak u stijenama definira odnos zasićenja fluidima u pornim kanalima. Kapilarne sile određuju zadržavanje fluida u pornom prostoru, djelujući suprotno od gravitacijske sile. Tako gušći fluid (npr. slojna voda) može biti prisutan u velikim količinama iznad zone potpunog zasićenja vodom. Kapilarni tlak je definiran kao razlika tlakova između močive i nemočive faze

$$P_c = (P_{nw} - P_w) \quad (2-1)$$

gdje je P_c kapilarni tlak [Pa], P_{nw} tlak nemočive (engl. *non-wetting*) faze [Pa], a P_w tlak močive faze [Pa].

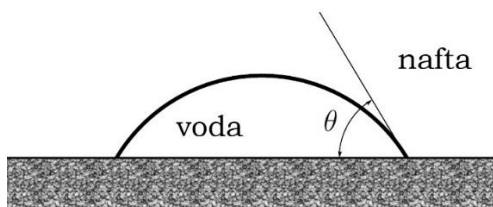
Kako su gravitacijske sile uravnotežene s kapilarnima, kapilarni tlak na određenoj dubini u ležištu može se izraziti pomoću visine iznad zone potpuno zasićene močivom fazom (slojnom vodom) i razlike u gustoćama faza (slika 2.2, jedn. 2.2.):

$$P_c = (\rho_w - \rho_{nw}) gh \quad (2-2)$$

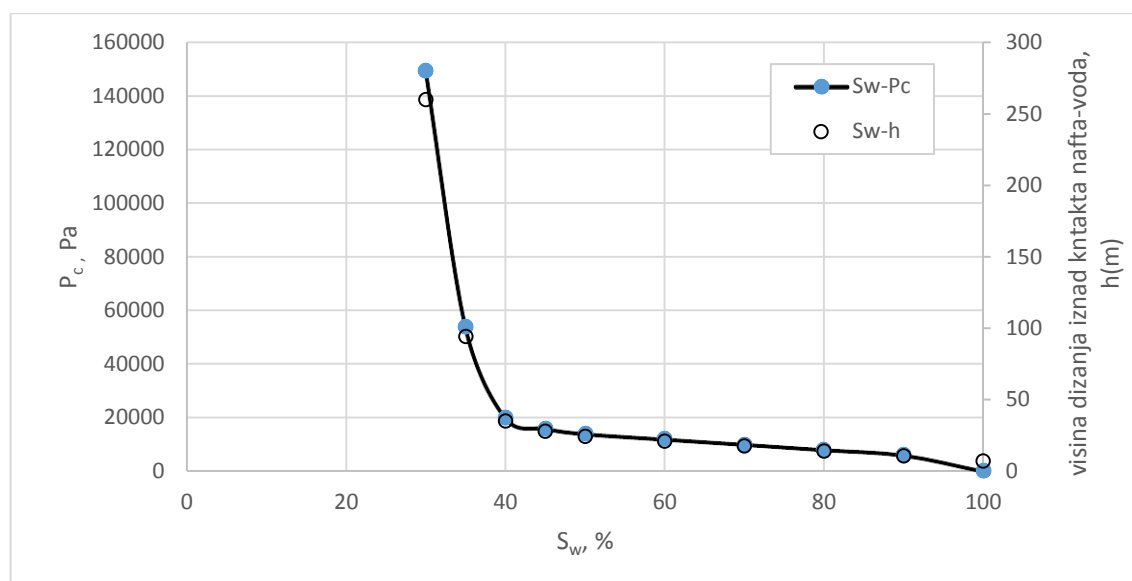
gdje je ρ_w gustoća močive faze [kg/m^3], ρ_{nw} gustoća nemočive faze [kg/m^3], g gravitacijska konstanta [m/s^2], a h visina iznad zone zasićenja [m].

Isto kapilarno dizanje na pornoj razini posljedica je kontaktnog kuta (močivosti) između dvije faze θ [°] i stijene, međupovršinske napetosti σ [N/m] i srednjeg radijusa kapilare R [m] (slika 2-1).

$$P_c = \frac{2\sigma \cos \theta}{R} \quad (2-3)$$



Slika 2-1. Kontaktni kut za sustav voda-nafta (Vulin, 2016)



Slika 2-2. Odnos visina dizanja iznad kontakta nafta-voda i kapilarnog tlaka (Vulin, 2016)

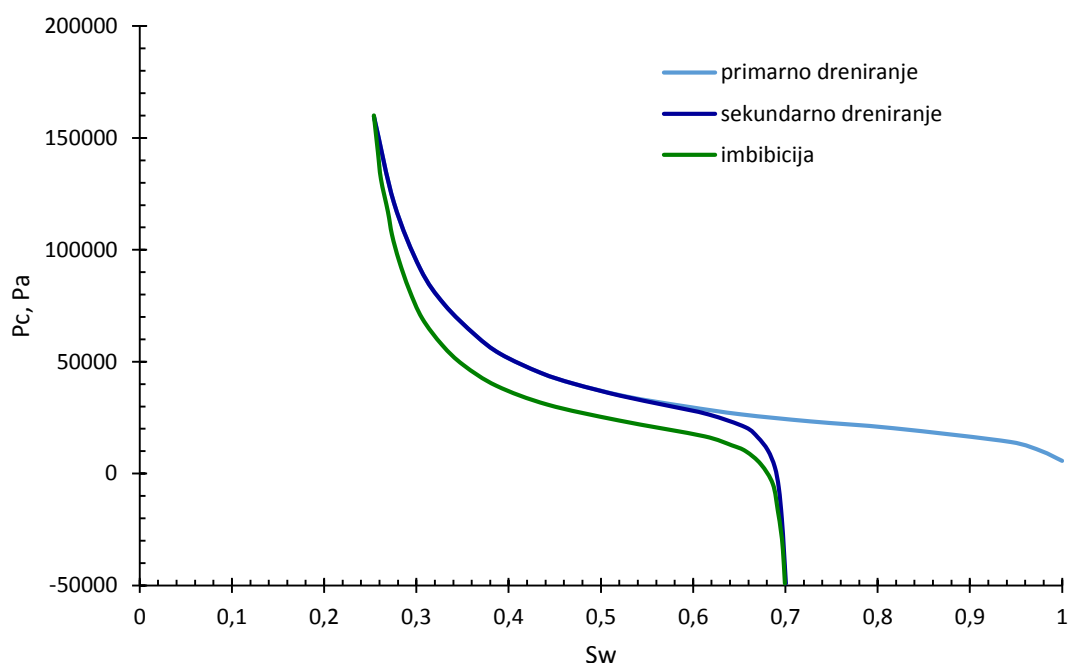
Kada bi porozni prostor bio homogen (tj. imao jednake radijuse pora), postojala bi i jedinstvena krivulja kapilarnog tlaka za isti porozni prostor (Leverett, 1941). Kapilarni tlak mjeri se na uzorcima stijene u kojima postoji stanovita distribucija dimenzija pora. Oblik mjerene krivulje kapilarnog tlaka u odnosu na zasićenje ovisi o raspodjeli vrijednosti parametara iz jednadžbe 2-3, prije svega o raspodjeli radijusa pora, tj. geometriji pora.

Krivulju kapilarnog tlaka prije svega određuje ireducibilno zasićenje močivom fazom te kritični (engl. *critical, threshold*) tlak. Ireducibilno zasićenje ovisi o srednjem radijusu najmanjih kapilara, a u idealnom slučaju bi bilo jednako kritičnom zasićenju na krivulji relativnih propusnosti, tj. vrijednosti zasićenja pri kojoj u mjerenjima relativnih propusnosti močiva faza postaje mobilna. U stvarnosti, te vrijednosti se ne poklapaju, već se razlikuje ireducibilno zasićenje (S_{wirr}) i kritično zasićenje (S_{wc}). Kapilarni tlak je linearno proporcionalan visini dizanja iznad kontakta nafta-voda, međutim promatrajući jednadžbu 2-2, očito je kako početno zasićenje u ležištu (S_{wi}) praktički nikad ne može biti jednako vrijednosti S_{wirr} ili S_{wc} , nego u stvarnosti poprima veću vrijednost. Stoga pri interpretaciji mjerenih kapilarnih tlakova, ali i relativnih propusnosti, posebno treba posvetiti pažnju krajnjim točkama (engl. *end points*), jer će one poslužiti matematičkom formuliranju dotičnih podataka.

Krivulja kapilarnog tlaka različita je kad se radi o procesu dreniranja (istiskuje se močiva faza) od one kad se radi o imbibiciji (istiskuje se nemočiva faza).

Ukoliko se pretpostavi da je ležište nafte vodomohivo, s obzirom da su stijene u početku bile 100% zasićene s vodom, migracija nafte predstavljala je primarni proces dreniranja (engl. *primary drainage*). Početna zasićenja konatnom vodom se tada najbolje mogu opisati krivuljom kapilarnog tlaka. Pomicanje dubine granice nafta-voda za vrijeme proizvodnje (ili utiskivanje vode), mijenja raspodjelu zasićenja fluidima u tranzicijskoj zoni procesom imbibicije, tj. istiskivanja nemoćive faze (nafte).

U realnom slučaju, ležište nikad nije potpuno moćiv sustav, kao niti potpuno nemoćiv. Zbog promjena u kemijskom sastavu stijena, dio stijene će biti više, a dio manje vodomohiv. Tijekom proizvodnje, nakon duljeg vremena novog zasićenja npr. vodom, nova krivulja dreniranja će biti različita od one primarne (slika 2-3).



Slika 2-3. Krivulje kapilarnog tlaka u procesu primarnog i sekundarnog dreniranja i imbibicije (Vulin, 2016)

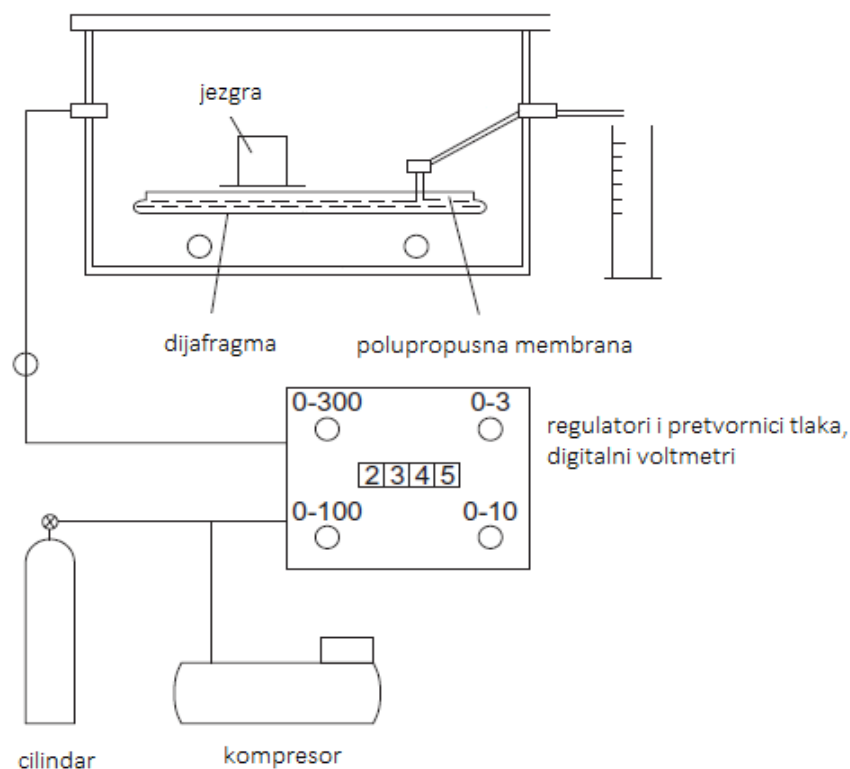
2.1. METODE LABORATORIJSKOG MJERENJA KAPILARNOG TLAKA

Procese migracije fluida u ležištu moguće je tumačiti i uz pomoć specijalnih analiza u laboratoriju. Stijene u ležištu su početno bile u potpunosti zasićene vodom, te je migracijom ugljikovodika voda, tj. močiva faza istisnuta, što predstavlja proces primarne drenaže. Istisnuta voda se akumulira ovisno o geološkoj strukturi, formira zamku za ugljikovodike i definira granice ležišta ugljikovodika. Proizvodnjom ugljikovodika dolazi do procesa imbibicije, tj. istiskivanja ugljikovodika kao nemočive faze iz ležišta. Oba procesa je moguće ponoviti u laboratoriju saturacijom ili desaturacijom jezgara iz ležišta, te iz dobivenih rezultata odrediti vrijednosti kapilarnih tlakova u funkciji zasićenja vodom za opisivanje samoga ležišta. Najčešće primjenjivane metode su metoda polupropusne membrane, centrifugalna metoda, Purcellova metoda saturacije živom, metoda tlaka para i metoda gravitacijskog uravnoteženja. Dobiveni rezultati su uobičajeno u sustavu drugačijih fluida od onih koji su zaista u ležištu, te ih je stoga potrebno preračunati iz laboratorijskih u ležišne uvjete. Određivanje kapilarnog tlaka laboratorijskim metodama se smatra najpreciznijim načinom, no ipak se pojavljuju određeni problemi u primjeni laboratorijski dobivenih podataka. Naime, korektnost procjena stvarnih ležišnih uvjeta ovisi prvenstveno o:

1. heterogenosti ležišta tj. reprezentativnosti uzoraka
2. kvaliteti pojedinih ispitivanja
3. vrsti statističke obrade kojom se osrednjava podatak za određeni segment ležišta, tj. metodologiji homogenizacije (engl. *upscaling*) s razine jezgre na segment ležišta.

2.1.1. Metoda polupropusne membrane

Metoda polupropusne membrane temelji se na desaturaciji uzorka saturiranog slanom vodom, najčešće utiskivanjem dušika ili zraka. Uzorci jezgara se ekstrahiraju tj. očiste od fluida prisutnih prilikom vađenja, zatim se potpuno osuše i zasite modelom slane vode (model je najčešće destilirana voda zasićena NaCl-om kako bi se postigao ekvivalentan salinitet mjeren na originalnom uzorku), te se postavljaju na membranu zasićenu istim fluidom (slika 2-4).

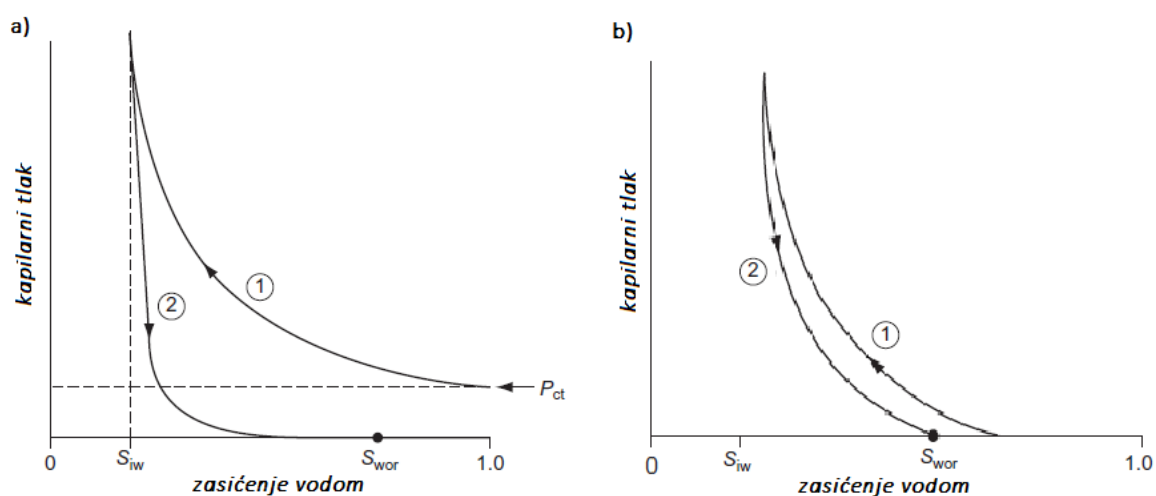


Slika 2-4. Shema laboratorijskog mjerenja kapilarnog tlaka metodom polupropusne membrane (modificirano od Tiab i Donaldson, 2012)

Propusnost membrane je značajno manja od propusnosti uzoraka stijene (trebala bi biti barem 10 puta manja) kako bi se spriječilo prodiranje nemoćive faze, tj. zraka, u membranu prije negoli je fluid u potpunosti istisnuo vodu iz jezgre, tj. prije nego je postignuto ireducibilno zasićenje vodom u jezgi. Uzorak se zatvara u tlačnu komoru te se ostvaruje određeni tlak do vrijednosti kritičnog (P_{ct}), kada zrak prodire u pore jezgre, istiskujući vodu. Moćiva faza će tada prolaziti kroz membranu, dok se nemoćiva zadržava u komori ostvarujući potreban tlak. Čeka se na stabilizaciju zasićenja, odnosno prestanak istiskivanja vode, te se postepeno u malim koracima povećava tlak utiskivanja zraka. Sa svakim korakom povećanja tlaka se prati količina istisnute vode, tj. promjena zasićenja uzorka slanom vodom, vaganjem i zapisivanjem promjene mase uzorka nakon pojedinog koraka desaturacije. Pri svakom povećanju tlaka može se odrediti kapilarni tlak pri pripadajućem zasićenju, sve do vrijednosti ireducibilnog zasićenja, tj. do vrijednosti kritičnog tlaka polupropusne membrane.

Navedeni proces se odvija u slučaju da je stijena vodomoguća, a kao istiskujući fluid se koristi zrak. Tada je potrebno ostvariti kritičan tlak u komori kako bi se pokrenula voda

iz jezgre (slika 2-5 a). No, ukoliko je stijena naftomočiva, a kao istiskujući fluid se koristi nafta, tada će istiskivanje vode iz jezgre započeti kada je vrijednost kapilarnog tlaka jednaka nuli (slika 2-5 b). Mjerenje je zatim moguće izvesti i reverzibilno – jezgre zasićene naftom se postavljaju na polupropusnu membranu zasićenu naftom, te se vodom ostvaruje tlak i istiskuje nafta. U slučaju vodomochive stijene, imbibicijom će voda ući u stijenu i istisnuti naftu do vrijednosti rezidualnog zasićenja S_{or} ($S_{or} = 1 - S_{wr}$). Takvo ponašanje kapilarnog tlaka uslijed promjene zasićenja opisuje krivulja 2 na slici 2-5 (a), odnosno slika 2-5 (b) za slučaj naftomočive stijene.



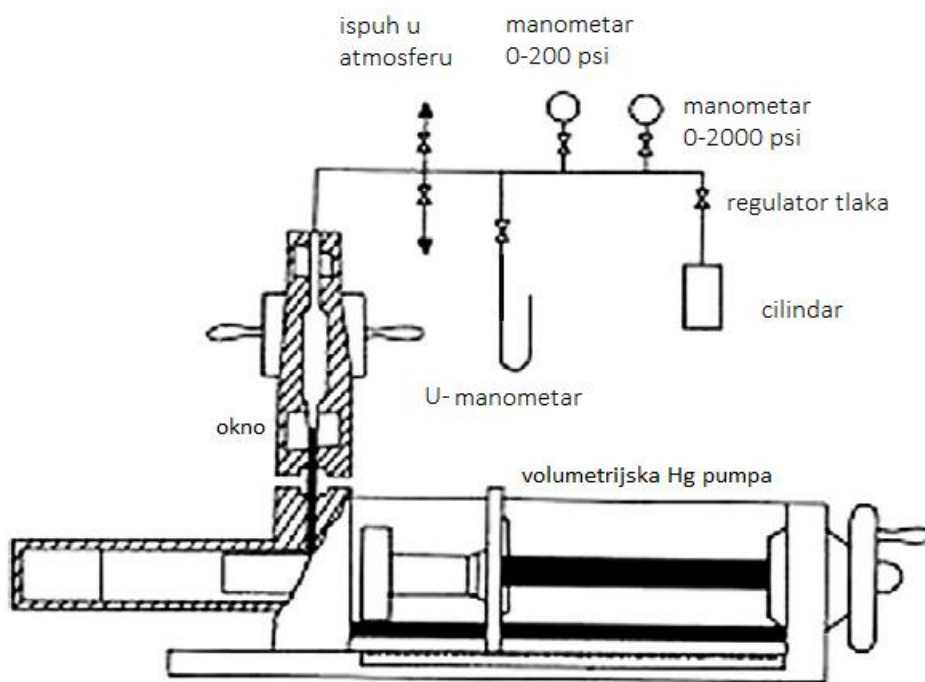
Slika 2-5. Krivulje kapilarnog tlaka pri početnoj desaturaciji (1) i naknadnoj saturaciji (2) a) u slučaju vodomochive stijene, b) u slučaju naftomočive stijene (modificirano od Tiab i Donaldson, 2012)

Ova metoda se ipak u većini slučajeva izvodi u sustavu voda-plin (najčešće zrak), te je stoga rezultate potrebno preračunati u ležišne uvjete. Moguće je provesti mjerenje i u sustavima voda – nafta i zrak – nafta, na način da se membranu prilagodi u odnosu na močivost za vodu, zrak i naftu. Unatoč preciznosti rezultata dobivenih putem metode polupropusne membrane, ona nije smatrana najboljim rješenjem određivanja kapilarnog tlaka, primarno zbog vremena potrebnog za dobivanje podataka. Vrijednosti tlaka mjerenja su ograničene na oko 15 – 20 bar, često i manje, a stabilizacija zasićenja nakon svakog pojedinog povećanja ponekad nastupa tek nakon nekoliko dana, zbog čega cjelovito mjerenje može potrajati i tjednima, što se smatra glavnim nedostatkom ove metode.

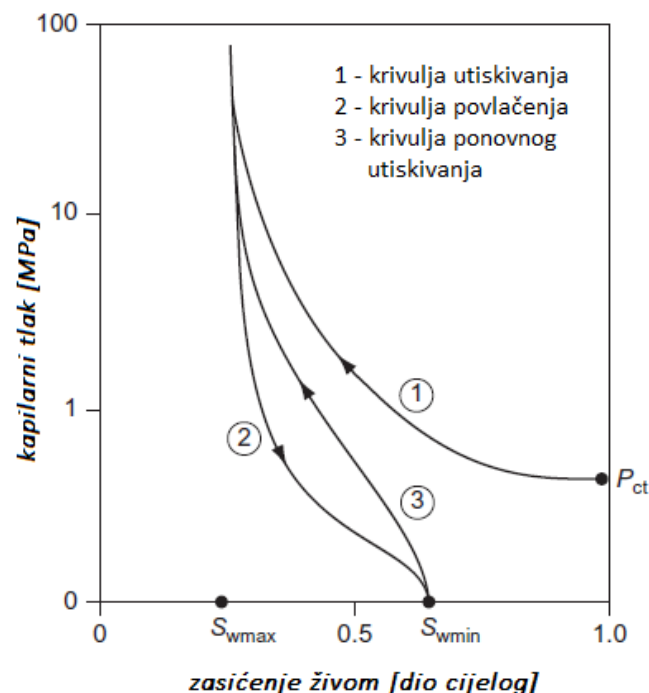
2.1.2. Metoda saturacije živom

Utiskivanje žive u uzorke jezgre iz ležišta je često korišteno u svrhu determinacije krivulje kapilarnog tlaka stijene, ponajviše zbog glavnih prednosti ove metode – brzine i jednostavnosti provođenja. Dobivenim podacima moguće je odrediti ne samo ponašanje kapilarnog tlaka, nego i geometriju pora, odnosno njihovu veličinu i raspored. Močivost stijene živom se poprilično razlikuje od onih naftom, plinom ili vodom, te je i u ovoj metodi potrebno dobivene rezultate preračunati u sustav nafta-voda, odnosno plin-voda.

Mjerenje se provodi na način da se očišćena i potpuno osušena, dakle nezasićena jezgra smješta u spremnik ispunjen živom, te se postupno povećava tlak u spremniku, pri čemu se živa počinje utiskivati u uzorak (slika 2-6). Mjeri se volumen žive koji je ušao u jezgru, te se kapilarni tlak utiskivanja žive prikazuje u ovisnosti o pornom volumenu ispunjenom živom. Kada zasićenje živom dosegne maksimalnu vrijednost u odnosu na povećanje tlaka (S_{wmax}), slijedi reverzibilni postupak, iz kojega se dobiva druga krivulja kapilarnog tlaka – postupno smanjenje tlaka i praćenje povlačenja žive iz uzorka (slika 2-7). Kako se vrijednost tlaka približava nuli, dosegnut će se limit desaturacije žive, odnosno određena količina žive će ostati u pornom prostoru jezgre kao minimalno zasićenje živom (S_{wmin}). Treća krivulja kapilarnog tlaka se određuje ponovnim utiskivanjem žive u jezgru do vrijednosti prethodno postignutog najvećeg tlaka iz prvog koraka utiskivanja.



Slika 2-6. Shema laboratorijskog mjerenja kapilarnog tlaka metodom saturacije živom (modificirano od Tiab i Donaldson, 2012)



Slika 2-7. Krivulja kapilarnog tlaka pri početnoj saturaciji živom (1) i histereza krivulje pri daljnjem postupku (2,3) (modificirano od Tiab i Donaldson, 2012)

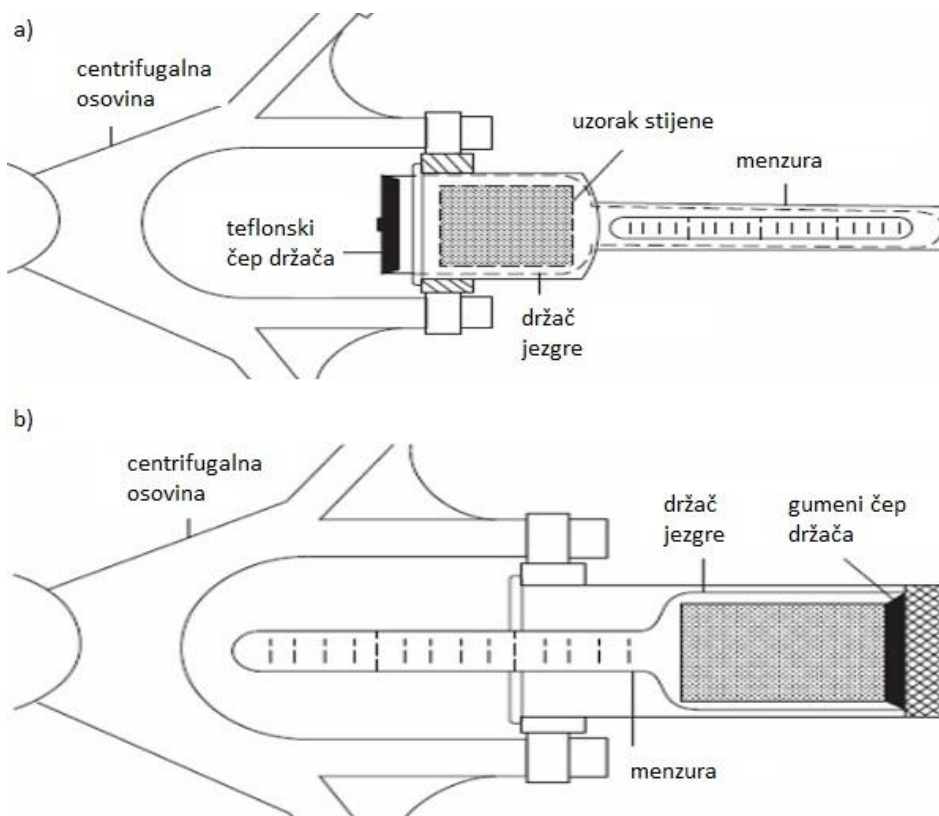
Bitno je napomenuti i da su tlakovi korišteni pri provedbi ove metode mjerenja znatno većih vrijednosti od onih pri metodi polupropusne membrane – mogu ići i do 140 bara. Također, još jedna od prednosti ove metode je mogućnost vršenja mjerenja na uzorku nepravilnog oblika, tj. krhotini, dakle uzorak ne mora nužno biti cilindrična jezgra kao što je slučaj u ostalim metodama.

2.1.3. Centrifugalna metoda

Centrifugalna metoda se temelji na desaturaciji uzorka zbog centrifugalne sile. Prvotno se uzorak saturira vodom i stavlja u držač jezgre ispunjen naftom, te se držač spaja na centrifugalni uređaj na način da je os uzorka okomita na os vrtnje (slika 2-8 a). Istovremeno je na uređaj moguće spojiti više osovine s držačima jezgri. Pri vrtnji određenom kutnom brzinom, voda iz uzorka se uslijed djelovanja centrifugalne sile istiskuje prema obodnom kraju uzorka te skuplja u menzuri, dok nafta prodire u jezgru. Vrijednost kapilarnog tlaka na poprečnom presjeku uzorka tada je jednaka razlici atmosferskog tlaka i tlaka fluida u uzorku. Postupnim povećanjem kutne brzine nastavlja se desaturacija jezgre vodom, te istovremena saturacija naftom, a mjerenjem volumena istisnutog fluida pri svakoj pojedinoj kutnoj brzini lako se izračuna prosječna vrijednost zasićenja jezgre. Brzina rotacije se povećava dokle god sva voda nije istisnuta iz jezgre, odnosno postupak se nastavlja do

postizanja ireducibilnog zasićenja jezgre vodom. Krivulja kapilarnog tlaka dobivena istiskivanjem vode naftom prikazana je na slici 2-9 (krivulja 1).

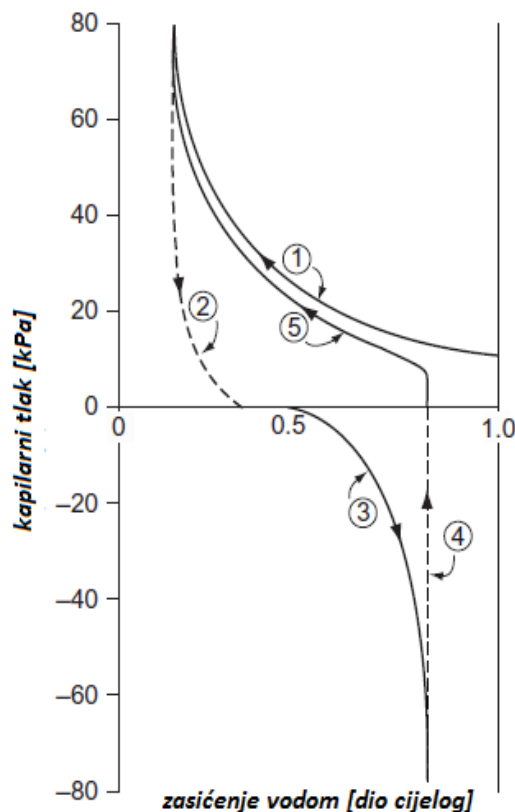
Nakon završetka ovog dijela mjerenja, jezgre su zasićene naftom te vodom u vrijednosti ireducibilnog zasićenja. Vade se iz svojih držača i stavljaju u držače sa suprotnom orijentacijom u odnosu na os vrtnje, odnosno namjenjene reverzibilnom postupku desaturacije nafte. Držać se u potpunosti ispuni vodom u ovom slučaju, a proces izmjene držača je potrebno obaviti u što bržem roku kako bi se izbjegao ikakav gubitak fluida iz uzorka uslijed mogućeg isparavanja. Istovjetno prvotnom procesu, rotacijske brzine se povećavaju, a količina istisnute nafte prati u menzuri koja je u ovom slučaju usmjerena prema centru vrtnje (slika 2-8 b).



Slika 2-8. Shema laboratorijskog mjerenja kapilarnog tlaka centrifugalnom metodom, a) u slučaju istiskivanja vode naftom; b) u slučaju istiskivanja nafte vodom (modificirano od Tiab i Donaldson, 2012)

Mjerenje se provodi dokle god se pri povećanju brzine više ne izdvaja nafta iz uzorka, i tada je zasićenje uzorka određeno rezidualnim zasićenjem naftom ($S_{wr} = 1 - S_{or}$). Ovaj proces karakterizira negativna krivulja kapilarnog tlaka (slika 2-9., krivulja 3). U posljednjoj fazi mjerenja, ponavlja se prvi korak istiskivanja vode naftom. U jezgru koja je sada na

vrijednosti zasićenja S_{wr} , ponovno ulazi nafta sve do postizanja vrijednosti ireducibilnog zasićenja vodom, odnosno njome određenim zasićenjem naftom, S_{or} (krivulja 5).



Slika 2-9. Krivulje kapilarnih tlakova dobivene centrifugalnom metodom – krivulje 2 i 4 su pretpostavljene (modificirano od Tiab i Donaldson, 2012)

U obradi ove metode korišten pojam „zasićenosti jezgre“ zapravo predstavlja prosječnu zasićenost jezgre, s obzirom da ona nije ista duž cijele jezgre – djelovanje centrifugalne sile nije jednako u svakoj točki jezgre, pa stoga nije ni vrijednost kapilarnog tlaka, niti zasićenja (Forbes, 1997). Vrijednost kapilarnog tlaka se dakle smanjuje od kraja jezgre bližeg središtu rotacije prema daljem kraju, dok se vrijednost zasićenja povećava u tom smjeru. Te vrijednosti se mogu izračunati za svaki poprečni presjek jezgre kao razlika hidrostatskog tlaka između dviju faza. Posebno je zanimljiv kapilarni tlak na unutarnjem kraju jezgre, gdje ima maksimalnu vrijednost. Slobod et al. (1951) su razvili metodu izračunavanja tog kapilarnog tlaka temeljenu na osnovnoj Plateauovoj jednadžbi kapilarnog tlaka koja vrijedi u slučaju kapilarnog podizanja u pravilnoj kapilari. Uvođenjem elementa centrifugalne brzine v_θ [cm/s] i akceleracije a [cm/s²] jednadžbu su prilagodili utjecaju centrifugalnog polja, u ovisnosti o polumjeru rotacije r [cm] i broju okretaja u minuti N :

$$a = \frac{(v_\theta)^2}{r} = \frac{\left(\frac{2\pi r N}{60}\right)^2}{r} = \frac{4\pi^2 r N^2}{3600} \quad (2-4)$$

Promjenu kapilarnog tlaka u slučaju centrifuge dakle određuje omjer centrifugalne i gravitacijske akceleracije, odnosno jednažba 2-4 se dijeli s gravitacijskom konstantom g :

$$\frac{a}{g} = \frac{4\pi^2 r N^2}{981 \cdot 3600}, \quad (2-5)$$

te se supstituira u jednažbu hidrostatskog tlaka:

$$P_c = \rho g h = \rho h \frac{a}{g} = 1.1179 \cdot 10^{-5} \Delta \rho \cdot N^2 h \cdot r, \quad (2-6)$$

određujući kapilarni tlak (ovdje izražen u g/cm^2) u jezgri na bilo kojoj njenoj visini h [cm], tijekom rotacije od N okretaja u minuti pri polumjeru rotacije r . Ukoliko se jednažbu 2-6 integrira po visini jezgre, odnosno od unutarnjeg polumjera rotacije r_i do vanjskog r_e , dobiva se vrijednost kapilarnog tlaka na unutarnjem kraju jezgre:

$$P_{ci} = P_{cd} + 1.1179 \cdot 10^{-5} \Delta \rho N^2 \left[\frac{r_e^2 - r_i^2}{2} \right], \quad (2-7)$$

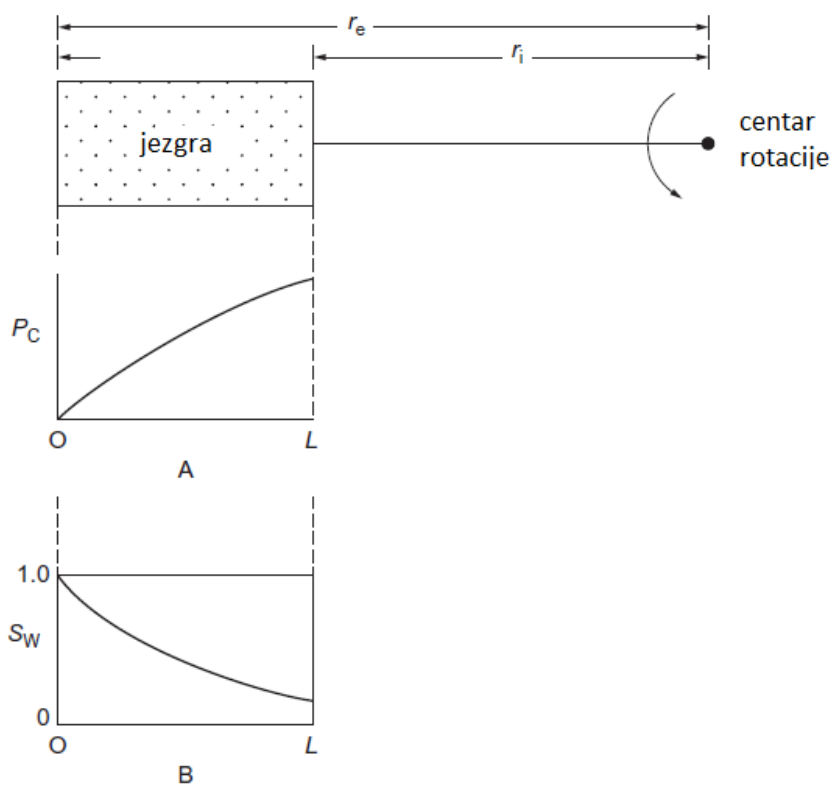
gdje je P_{cd} kapilarni tlak na vanjskom kraju jezgre.

Jednako kako je prisutan gradijent kapilarnog tlaka uslijed djelovanja centrifugalne sile duž jezgre, tako je prisutan i gradijent zasićenja jezgre. Uz poznato prosječno zasićenje jezgre vodom, $\bar{S}_w$ [%], izmjereno centrifugalnom metodom, koristi se pretpostavka graničnog uvjeta za vanjski kraj jezgre, koja kaže da će na udaljenosti r_e zasićenje vodom uvijek biti 100%, neovisno o brzini rotacije (Hassler i Brunner, 1945). Posljedično, vrijednost kapilarnog tlaka na toj visini, P_{cd} , će uvijek biti nula (slika 2-10).

Iz praktičnih razloga je od koristi preoblikovati jednažbu 2-7 u ovisnosti o duljini jezgre L umjesto udaljenosti od centra rotacije, te izraziti kapilarni tlak u kPa umjesto g/cm^2 , i u konačnici jednažba kapilarnog tlaka na početku jezgre, odnosno maksimalnog kapilarnog tlaka, jest sljedeća:

$$P_{cl} = \frac{(1.096 \times 10^{-6}) \Delta \rho N^2 \left(r_e - \frac{L}{2} \right)}{L}, \quad (2-8)$$

gdje je P_{cl} kapilarni tlak na početku jezgre [kPa], ρ gustoća fluida [g/cm³], r_e vanjski polumjer vrtnje, N broj okretaja [min⁻¹], a L duljina jezgre [cm].



Slika 2-10. Krivulje kapilarnog tlaka i zasićenja vodom pri centrifugalnom mjerenju u ovisnosti o duljini jezgre (modificirano od Tiab i Donaldson, 2012)

Centrifugalna metoda je u dugo vremena bila u najvećoj upotrebi, prvenstveno jer daje rezultate veće točnosti nego prethodno objašnjene metode saturacije živom i polupropusne membrane (Ayappa et al., 1989), te je i u današnje vrijeme prilično zastupljena. Vrijeme trajanja mjerenja ovisi o broju različitih kutnih brzina za koje je potrebno izračunati kapilarni tlak, a kreće se između 4 i 24 sata za jednu kutnu brzinu.

2.2. KORELACIJE ZA ODREĐIVANJE KAPILARNOG TLAKA

Osim laboratorijskim mjerenjima, kapilarni tlak je moguće odrediti i pomoću empirijski ustanovljenih korelacija. Ovdje objašnjene korelacije vrijede za sustav voda-nafta, ali se mogu smatrati primjenjivim i za sustave voda-plin i nafta-voda.

Burdineova (1953) korelacija za krivulju kapilarnog tlaka u slučaju dreniranja glasi:

$$P_c = \begin{cases} P_{cd}(S_w^*)^{-\frac{1}{\lambda}}, & P_{cd} > 0 \\ (S_w^*)^{-\frac{1}{\lambda}} - 1, & P_{cd} = 0 \end{cases}, \quad (2-9)$$

gdje
je

$$S_w^* = \frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{wi}}. \quad (2-10)$$

P_{cd} označava kritični tlak pri kojem počinje proces dreniranja [Pa], odnosno vrijednost tlaka pri čijem djelovanju močiva faza postaje mobilna, S_w zasićenje vodom [%], S_{wi} početno zasićenje [%], S_w^* normaliziranu vrijednost zasićenja vodom, λ je koeficijent ovisan o raspodjeli radijusa pora, a predstavljen je nagibom pravca kad se P_c i S_w^* prikažu u log-log dijagramu.

Brooks i Corey (1966) su također dali korelaciju za slučaj primarnog dreniranja, koja je prihvaćena kao općeniti oblik za većinu vodomogućih sustava:

$$P_c = \frac{P_{cd}}{(S_w^*)^\lambda} \quad (2-11)$$

gdje se S_w^* računa na isti način kao u prethodnoj korelaciji. Ovom korelacijom moguće je opisati velik dio tipičnih ležišta, no slabo opisuje primjerice jako propusna ili frakturirana ležišta (Li i Horne, 2003).

Bentsen i Anlie (1977) su predstavili još jednu korelaciju za slučaj dreniranja, baziranu na istraživanju centrifugalne metode za određivanje kapilarnog tlaka (Hassler i Brunner, 1945.):

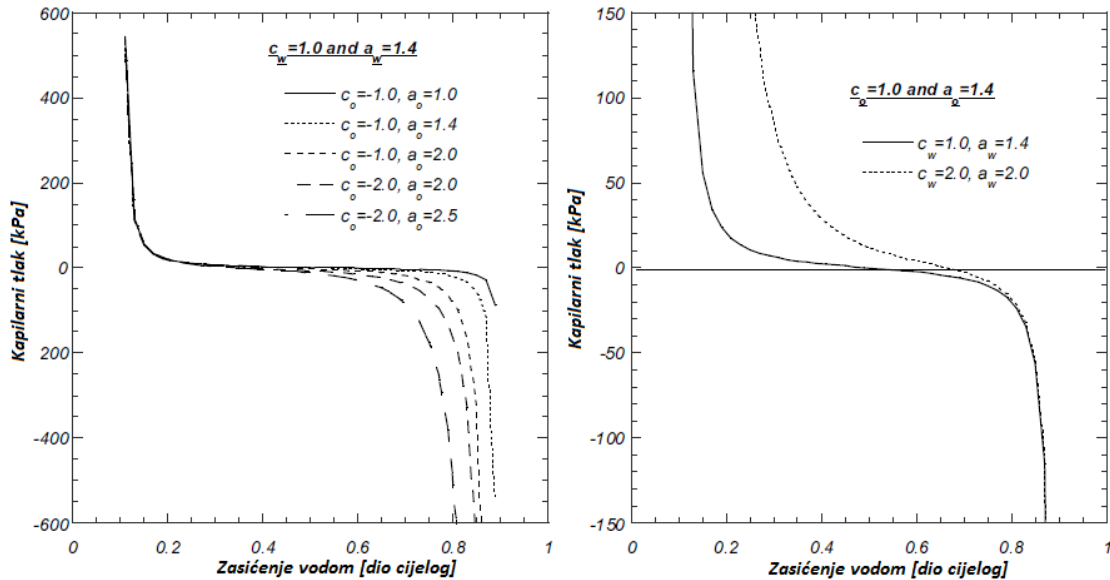
$$P_c = P_{cd} - \lambda \log(S_w^*) \quad (2-12)$$

Skjaevelandova (2000) korelacija daje krivulju kapilarnog tlaka za slučaj fluida jednake močivosti, odnosno za sustave koji se ne mogu okarakterizirati kao vodomočivi. Proširuje Brooks-Coreyevu korelaciju uvodeći četiri nova bezdimenzionalna parametra – dva kojima opisuje pozitivan dio krivulje (c_w i a_w) i dva kojima opisuje negativan (c_o i a_o):

$$P_c = \frac{c_w}{(S_w^*)^{a_w}} + \frac{c_o}{(S_o^*)^{a_o}}, \quad (2-13)$$

$$\text{gdje se } S_o^* \text{ računa analogno } S_w^*: \quad S_o^* = \frac{S_o - S_{or}}{1 - S_{or}}, \quad (2-14)$$

S_o predstavlja zasićenje naftom [%], dok S_{or} predstavlja rezidualno zasićenje naftom [%]. Mijenjanje negativnih parametara rezultira najvećim razlikama u vrijednostima kapilarnog tlaka, dok promjena pozitivnih parametara utječe na pomicanje nultočke, koja označava zasićenje vodom kada kapilarni tlak ima vrijednost 0 (slika 2-11).



Slika 2-11. Ponašanje krivulje kapilarnog tlaka za Skjaevelandovu korelaciju (modificirano iz Sendra User guide, 2015)

Svrha ove korelacije jest da se prilagođavanjem parametara postigne fleksibilnost krivulje kapilarnog tlaka koja je potrebna za opisivanje većine slučajeva mjerenja centrifugalnom metodom.

LET korelacije (prema inicijalima autora – Lomeland, Ebeltoft i Hammervold Thomas, 2008) koriste tri nova parametra, L, E i T, čije vrijednosti su uvijek pozitivne. Osim što su aplikabilne na sustave u kojima ne dominira moćivost jednim fluidom, razlikuju se i za tri moguća slučaja moćivosti: slučaj primarnog dreniranja, imbibicije i sekundarnog dreniranja.

LET korelacija za primarno dreniranje:

$$P_c = \frac{(P_{c(max)} - P_{cd})(1 - S_w^*)^L}{(1 - S_w^*)^L + E * S_w^{*T}} - \frac{(1 - F_{cd})P_{cd}S_w^{*L}}{S_w^{*L} + E(1 - S_w^*)^T} + P_{cd} \quad (2-15)$$

gdje su $P_{c(max)}$ maksimalni kapilarni tlak [Pa], L , E i T korelacijski parametri, a F_{cd} faktor čije moguće vrijednosti su 1 ili 0, ovisno o potrebitosti korištenja kritičnog tlaka.

LET korelacija za imbibiciju odvađa parametre u dvije grupe, one koji vrijede za dio spontane imbibicije, i one za dio prisilne imbibicije.

$$E^s = \left(\frac{(P_{c(max)} - P_{c(min)})(S_{wn}^{L^f} + E^f(1 - S_{wn})^{T^f})}{-P_{ci}S_{wn}^{L^f} - P_{c(min)}E^f(1 - S_{wn})^{T^f}} - 1 \right) \frac{(1 - S_{wn})^{L^s}}{S_{wn}^{T^s}} \quad (2-16)$$

gdje su L^s , E^s , T^s parametri za spontanu imbibiciju, L^f , E^f , T^f parametri za prisilnu imbibiciju, S_{wn} nultočka krivulje [%], P_{ci} kritični tlak pri imbibiciji [Pa], a $P_{c(min)}$ minimalni kapilarni tlak [Pa].

LET korelacija za sekundarnu drenažu koristi jednaku podjelu parametara koji vrijede za spontani i prisilni proces dreniranja, a opisana je jednažbom

$$P_c = \frac{(P_{cd} - P_{c(min)})(1 - S_w^*)^{L^f}}{(1 - S_w^*)^{L^f} + E^f S_w^{*T^f}} - \frac{(-P_{c(max)} + P_{c(min)})S_w^{*L^s}}{S_w^{*L^s} + E^s(1 - S_w^*)^{T^s}} \quad (2-17)$$

Parametar spontane drenaže E^s definiran je jednažbom

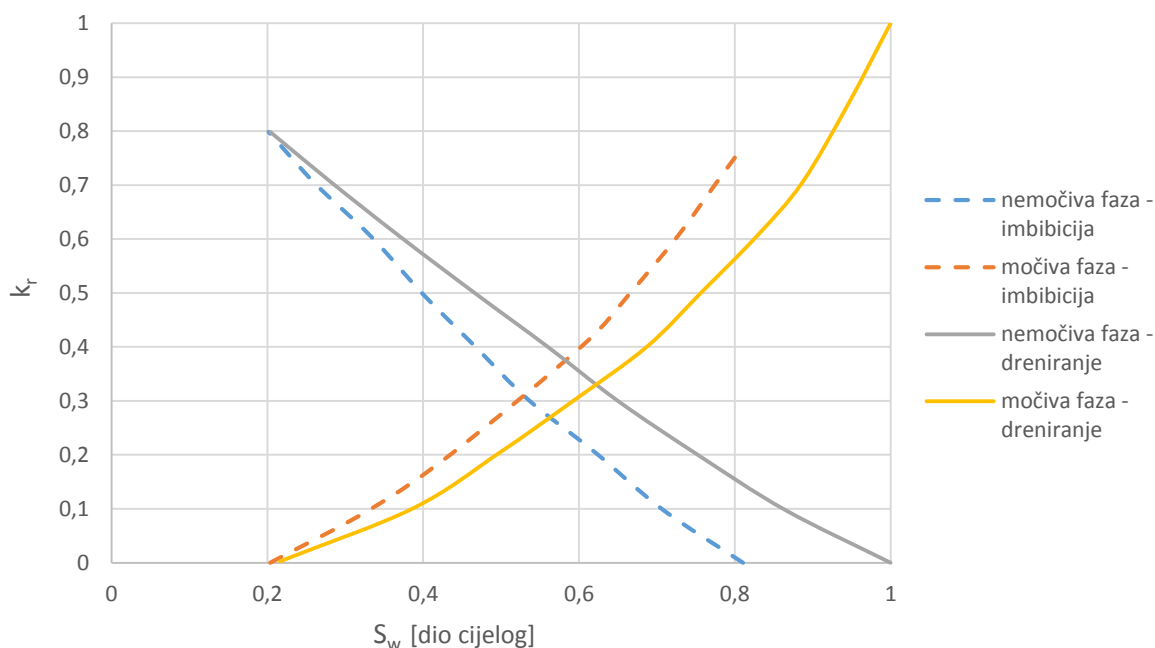
$$E^s = \left(\frac{(-P_{c(max)} + P_{c(min)})(1 - S_{wn})^{L^f} + E^f(1 - S_{wn})^{T^f}}{P_{cd}(1 - S_{wn})^{L^f} + P_{c(min)}E^f S_{wn}^{T^s}} - 1 \right) \frac{S_{wn}^{L^s}}{(1 - S_{wn})^{T^s}} \quad (2-18)$$

Najveća prednost korištenja LET korelacija je mogućnost prilagođavanja vrijednosti nultočke te minimalnog i maksimalnog kapilarnog tlaka u svrhu postizanja željenih rezultata. Promjena parametra L utječe na promjenu donjeg dijela krivulje, odnosno onog najbližeg apscisi, parametar T određuje nagib gornjeg dijela, dok se promjenom parametra E prilagođava položaj i visina same krivulje u cjelini.

3. RELATIVNA PROPUSNOST

Relativna propusnost je omjer efektivne propusnosti jednog od fluida u slučaju zasićenja sa više od jedne faze (npr. nafta i voda), i odabrane referentne propusnosti - najčešće Klinkenbergove apsolutne propusnosti (Vulin, 2016). Pri izradi simulacijskog ležišnog modela, relativna propusnost za pojedinu fazu ključan je parametar o kojem će ovisiti rezultati projektiranja proizvodnje. Problematika određivanja reprezentativne krivulje relativnih propusnosti slična je onoj krivulje kapilarnog tlaka – različitim metodama moguće je dobiti različite rezultate za isto ležište, a odabir stvarne krivulje bit će uvjetovan brojnim parametrima.

Na relativnu propusnost ponajviše utječu sastav i struktura stijene, zatim zasićenja pojedinim fluidima, te močivost stijene tim fluidima. Stoga će promjena relativne propusnosti unutar same stijene prije svega ovisiti o njoj heterogenosti, odnosno promjeni navedenih svojstava unutar same stijene. Ovisno o smjeru zasićenja, relativna propusnost će biti prikazana krivuljom dreniranja, odnosno krivuljom imbibicije (slika 3-1). Smanjenjem zasićenja močivom fazom (S_w – engl. *wetting*), smanjenje relativne propusnosti za močivu fazu (k_{rw}) se odvija brže nego smanjenje relativne propusnosti za nemočivu fazu (k_{rnw} – engl. *non-wetting*) smanjenjem zasićenja nemočivom fazom (S_{nw}). Relativna propusnost močive faze imat će vrijednost 0 pri kritičnom zasićenju močivom fazom.



Slika 3-1. Krivulje relativnih propusnosti za močivu i nemočivu fazu, ovisno o smjeru zasićenja (modificirano od Vulin, 2016)

U praksi, nemoćiva faza je u najvećem broju slučajeva nafta, odnosno ugljikovodici, a moćiva faza slojna voda. S poznatim podacima o efektivnoj i apsolutnoj propusnosti (iz laboratorijskih i karotažnih mjerenja), relativna propusnost za naftu, k_{ro} , računa se kao:

$$k_{ro} = \frac{k_o}{k}, \quad (3-1)$$

gdje k_o predstavlja efektivnu propusnost za naftu [m^2], a k apsolutnu propusnost [m^2].

Analogno tome računa se i relativna propusnost za vodu, k_{rw} :

$$k_{rw} = \frac{k_{wo}}{k}, \quad (3-2)$$

gdje k_w predstavlja efektivnu propusnost za vodu [m^2], a k apsolutnu propusnost [m^2].

3.1. METODE ODREĐIVANJA

Relativna propusnost najčešće se određuje laboratorijskim metodama: metodom ustaljenog protoka (engl. *steady state test*) ili metodom istiskivanja fluida iz jezgre (engl. *unsteady state test*). Za neke sustave i uvjete navedene metode ne daju zadovoljavajuće rezultate, te se za te slučajeve koriste analitičke metode: relativna propusnost se preračunava iz krivulje kapilarnog tlaka, ili iz podataka o proizvodnji (Honarpour et al., 1986).

Metoda ustaljenog protoka podrazumijeva protiskivanje dvije faze istovremeno kroz uzorak stijene, održavajući protoke konstantnima kroz svaku točku, dok se ne ostvari konstantan diferencijalni tlak. S izmjerenim vrijednostima za svaku od odabranih točaka protiskivanja ulazi se u proračun relativnih propusnosti, koji se bazira na Darcyjevom zakonu.

Metoda neustaljenog protoka je češće korištena od prethodne – za njeno provođenje potrebno je manje vremena, no proračun koji slijedi mjerenje je složeniji. Jezgra je početno zasićena jednom fazom (najčešće nemoćivom - naftom ili uljem), te se pristupa utiskivanju druge faze (vode), do trenutka postizanja ireducibilnog zasićenja prvom fazom (Honarpour et al., 1986).

Laboratorijske metode ograničene su nizom uvjeta – homogenošću jezgre, dovoljnom apsolutnom propusnosti i veličinom uzorka, te su najtočnije za sustav nafta – voda. Za druge sustave i jezgre nad kojima nije moguće provesti laboratorijsko mjerenje,

potrebno je koristiti neku od analitičkih metoda. Proračun iz proizvodnih podataka koristi se za sustave plin – nafta i plin – voda, a omjer relativnih propusnosti određuje se iz udjela slobodnog i otopljenog plina u proizvedenom plinu. Na isti sustav primjenjiva je i metoda proračuna iz poznatih kapilarnih tlakova, i to za slučaj dreniranja, odnosno istiskivanja močive faze (vode ili nafte) nemoćivom fazom (plinom). U ovom radu određivat će se krivulje relativnih propusnosti iz krivulja kapilarnih tlakova za uzorke s tri polja Savske Depresije.

3.2. KORELACIJE ZA ODREĐIVANJE RELATIVNIH PROPUSNOSTI IZ KAPILARNIH TLAKOVA

Metoda određivanja relativnih propusnosti ovom metodom nije uobičajen izbor, no pokazala se korisnom u slučajevima kada nije moguće izvesti laboratorijska mjerenja – primjerice kada je uzorak stijene premali za metode ustaljenog ili neustaljenog protoka. Većina laboratorijskih ispitivanja, kako relativnih propusnosti, tako i kapilarnih tlakova, ograničena je veličinom i pravilnosti oblika jezgri. Iznimka je, kao što je ranije navedno, metoda određivanja kapilarnog tlaka saturacijom živom (Purcellova metoda), čija najveća prednost je upravo neosjetljivost na veličinu i oblik jezgre nad kojom se ispitivanje provodi. Uobičajene metode također neće biti moguće provesti ukoliko je uzorak općenito male propusnosti, pa je uspostavljanje protoka teško izvedivo ili nepraktično, ili kad jezgre iz raznih razloga nisu dostupne za daljnja ispitivanja nakon određivanja kapilarnih tlakova (Honarpour et al., 1986).

Dva su glavna načina određivanja krivulje relativnih propusnosti iz kapilarnih tlakova: Purcellovim modelom (1949) i Burdineovim modelom (1953). U radu je razmotren i noviji LET model (2005), čija upotreba nije namijenjena samo određivanjem iz kapilarnih tlakova već je primjenjiv i na laboratorijske metode.

3.2.1. *Purcellov model*

Purcell (1949) je razvio numeričku metodu određivanja relativnih propusnosti iz kapilarnog tlaka za dvofazni protok, koja je jednostavno proširiva i na višefazni protok. Relativnu propusnost pojedine faze definirao je kroz integraciju odnosa zasićenja tom fazom i kapilarnog tlaka kroz cijeli raspon zasićenja, uzimajući u obzir i geometriju pora kroz korištenje ranije spomenutog koeficijenta λ . Krajnji oblik Purcellovog modela tako glasi:

$$k_{rw} = \frac{(1 - bS_w^*)^m - 1}{(1 - b)^m - 1}, \quad (3-3)$$

za močivu fazu, dok za nemočivu glasi

$$k_{rnw} = \frac{(1 - b)^m - (1 - bS_w^*)^m}{(1 - b)^m - 1}, \quad (3-4)$$

gdje su k_{rw} relativna propusnost za močivu fazu [m^2], k_{rnw} relativna propusnost za nemočivu fazu [m^2], S_w^* normalizirana vrijednost zasićenja močivom fazom, a koeficijenti m i b se računaju na sljedeći način:

$$m = \frac{2 + \lambda}{\lambda}, \quad b = 1 - \left(\frac{P_{cd}}{P_{c,max}} \right)^{-\lambda} \quad (3-5, 3-6)$$

gdje je λ određena nagibom pravca kad se P_c i S_w^* prikažu u log-log dijagramu, P_{cd} predstavlja kritičnu vrijednost tlaka pri čijem djelovanju močiva faza postaje mobilna [Pa], a $P_{c,max}$ najveću ostvarenu vrijednost kapilarnog tlaka [Pa]. Parametar m opisuje utjecaj heterogenosti uzorka, dok će na parametar b ponajviše utjecati radijus pora.

Iskustveno je pokazano da se ovim modelom može zadovoljavajuće opisati relativna propusnost za močivu fazu, no kod određivanja propusnosti za nemočivu fazu, model se pokazao u velikom broju slučajeva nedovoljno precizan (Li, 2004).

3.2.2. Burdineov model

Burdine (1953) je objavio modifikaciju dotada korištenog Purcellovog modela, s prvenstvenim fokusom na relativnu propusnost za nemočivu fazu. Pokazalo se da je ovaj model zamjetno točniji od Purcellovog za nemočivu fazu, a iako je za močivu vrlo sličan, Purcellov se smatra boljim rješenjem. Burdineov model za močivu i nemočivu fazu glasi:

$$k_{rw} = \frac{(S_w^*)^2[(1 - bS_w^*)^m - 1]}{(1 - b)^m - 1}, \quad (3-7)$$

$$k_{rnw} = \frac{(1 - S_w^*)^2[(1 - b)^m - (1 - bS_w^*)^m]}{(1 - b)^m - 1} \quad (3-8)$$

gdje se m i b računaju jednako kao u prethodnom modelu.

3.2.3. LET model

Glavni nedostatak prethodno navedenih modela jest taj što u obzir uzimaju samo krajnje vrijednosti kapilarnog tlaka, zbog čega dobivene krivulje relativnih propusnosti u nekim slučajevima mogu biti bliže teoretskima nego stvarnima (Li i Horne, 2004). Naime, i u Purcellovom i u Burdineovom modelu zbroj relativnih propusnosti obiju faza na određenoj vrijednosti zasićenja bit će jednak 1, što u praksi ne mora nužno odgovarati stvarnom stanju. Rubne točke su stoga neodgovarajuće opisane u prethodnim modelima, zbog čega su Lomeland, Ebeltoft i Hammervold (2005) razvili model koji će opisivati upravo točke pogođene rubnim efektima (engl. *end effects*). Kao i za određivanje krivulje kapilarnog tlaka, i u model relativnih propusnosti su uveli 3 bezdimenzionalna parametra, L , E , i T , čije podešavanje rezultira reprezentativnijim krivuljama relativnih propusnosti. Krivulje relativnih propusnosti su stoga određene njihovim krajnjim vrijednostima (engl. *endpoint*), za čiji izračun su također dali korelacije:

$$k_{rw}^0 = \frac{(1 - S_{nwr} - S_{wr})^{L_w}}{(1 - S_{nwr} - S_{wr})^{L_w} + E_w (S_{nwr})^{T_w}}, \quad (3-9)$$

$$k_{rnw}^x = \frac{(1 - S_{wr})^{L_o}}{(1 - S_{wr})^{L_o} + E_o (S_{wr})^{T_o}} \quad (3-10)$$

gdje su k_{rw}^0 krajnja vrijednost relativne propusnosti za močivu fazu [m^2], k_{rnw}^x krajnja vrijednost relativne propusnosti za nemočivu fazu [m^2], S_{nwr} rezidualno zasićenje nemočivom fazom [%], S_{wr} rezidualno zasićenje močivom fazom [%], L_w , E_w i T_w parametri za močivu, a L_o , E_o i T_o za nemočivu fazu.

LET model za krivulje relativnih propusnosti zatim glasi:

$$k_{rw} = k_{rw}^0 \frac{(S_w^*)^{L_w}}{(S_w^*)^{L_w} + E_w (1 - S_w^*)^{T_w}}, \quad (3-11)$$

$$k_{rnw} = k_{rnw}^x \frac{(1 - S_w^*)^{L_o}}{(1 - S_w^*)^{L_o} + E_o (S_w^*)^{T_o}} \quad (3-12)$$

gdje je S_w^* normalizirana vrijednost zasićenja močivom fazom, računata na ranije navedeni način.

Ovaj model je primjenjiv i na analitičke i na laboratorijske metode. Metode ustaljenog i neustaljenog protoka također mogu nailaziti na probleme u vezi točnog određivanja rubnih efekata pri određivanju relativnih propusnosti, te se zbog toga na laboratorijski dobivene rezultate primjenjuje model kako bi se došlo do finalnih rezultata, tj. reprezentativnih krivulja relativnih propusnosti.

4. ODREĐIVANJE RELATIVNIH PROPUSNOSTI ZA UZORKE POLJA-1

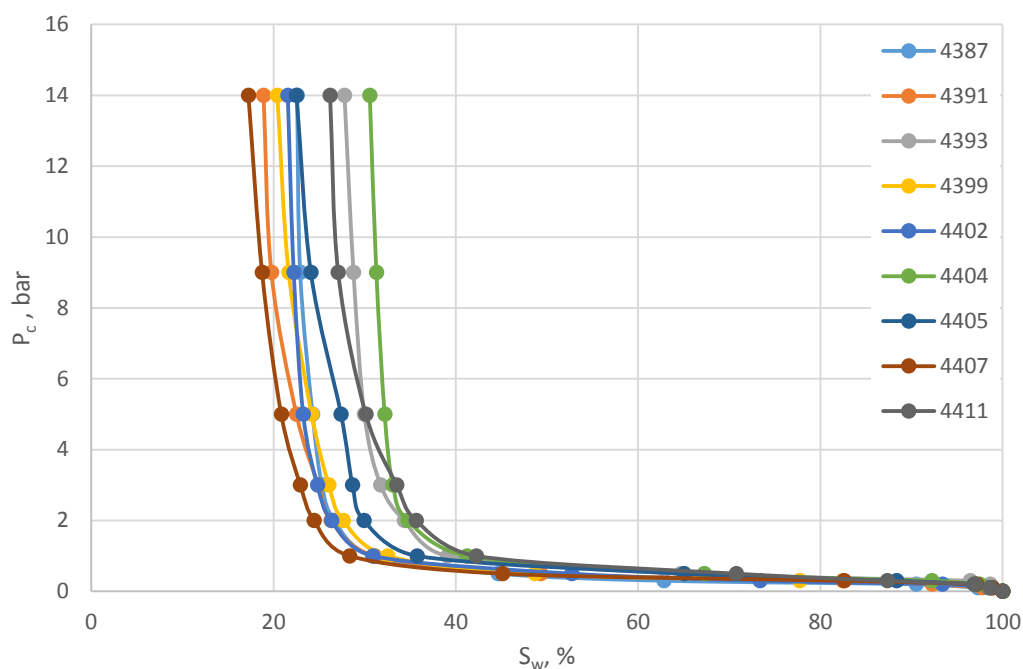
4.1. ANALIZA DOSTUPNIH PODATAKA

Temelj analize podataka činilo je 9 krivulja kapilarnih tlakova za jezgre iz osam bušotina Polja-1, analiziranih u laboratoriju INA d.d. metodom desaturacije vode pomoću polupropusne membrane (slika 4-1):



Slika 4-1. Aparatura za mjerenje kapilarnih tlakova metodom polupropusne membrane (Perković, 2011)

Uzorci su prvotno zasićeni slanom vodom, te je nad potpuno zasićenim uzorcima provedeno mjerenje istiskivanjem slane vode zrakom. Mjerenje je provedeno za 11 vrijednosti tlaka u rasponu od 0 do 14 bara. Na temelju izmjerenih vrijednosti zasićenja pri svakom mjerenom tlaku, određene su krivulje kapilariteta za svaki uzorak (slika 4-2).



Slika 4-2. Krivulje kapilarnih tlakova mjerene na jezgrama iz jedne bušotine (dubine 1527,64 - 1528,9 m)

Za svaki mjereni uzorak određena je i efektivna poroznost te apsolutna propusnost (tablica 4-1):

Tablica 4-1. Propusnosti i poroznosti uzoraka

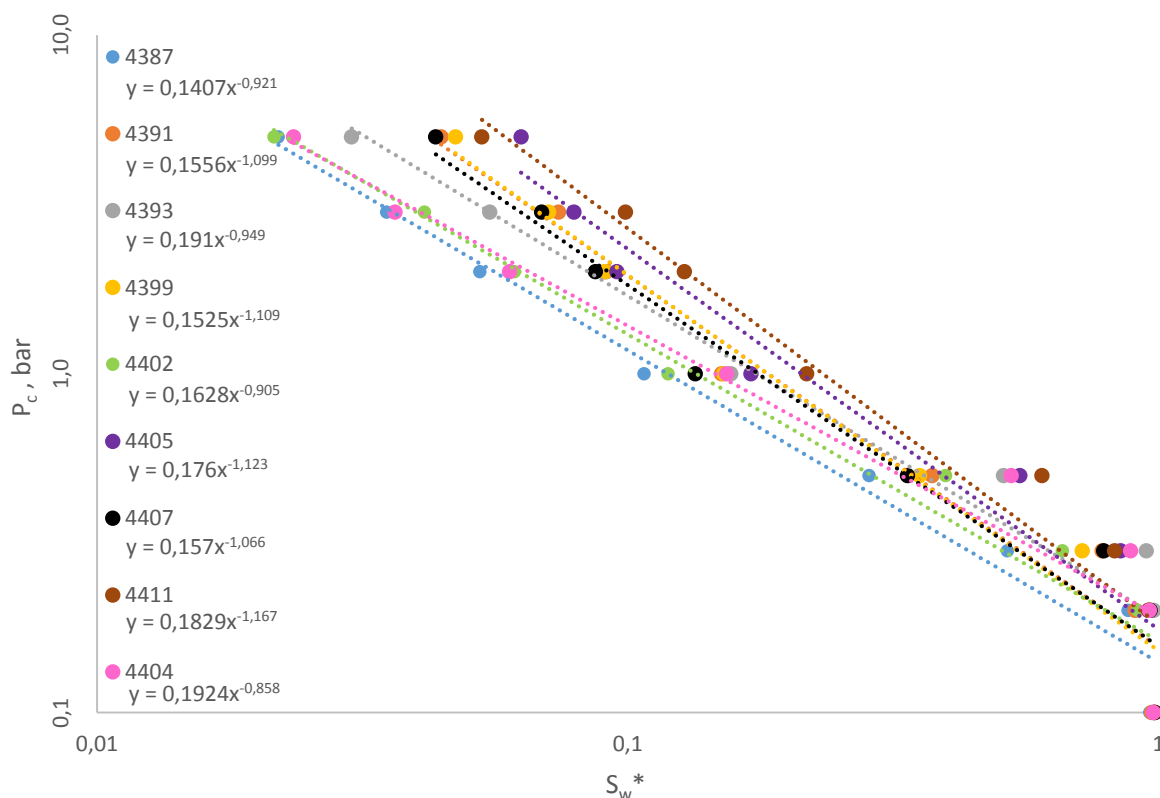
Uzorak	Dubina [m]	k [mD]	Φ [%]
4411	1528.9	10.32	20.13
4404	1528.44	14.49	20.24
4393	1526.97	15.21	21.05
4387	1526.55	45.53	21.62
4405	1528.55	23.3	21.89
4391	1526.86	33.95	22.06
4399	1527.64	34.79	22.25
4407	1528.65	38.07	22.29
4402	1528.34	71.5	25.4

Prosječna propusnost $\bar{k}$ [mD] iznosi 31,9 mD. Povlačenjem asimptota na mjerene krivulje kapilarnog tlaka u točkama najvećih izmjerenih vrijednosti kapilarnog tlaka, može se zaključiti kako ireducibilno zasićenje na vrhu intervala (oko 1527 m) varira od 16% (uzorak 4407) do 31% (uzorak 4404) (slika 4-1).

4.2. TESTIRANJE KORELACIJA ZA ODREĐIVANJE KRIVULJE KAPILARNOG TLAKA

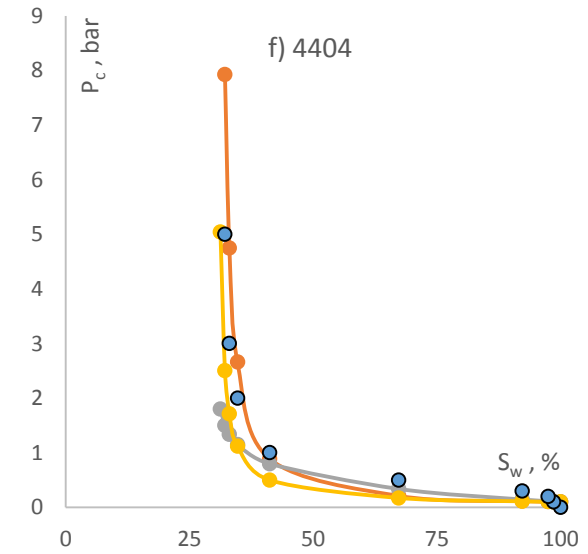
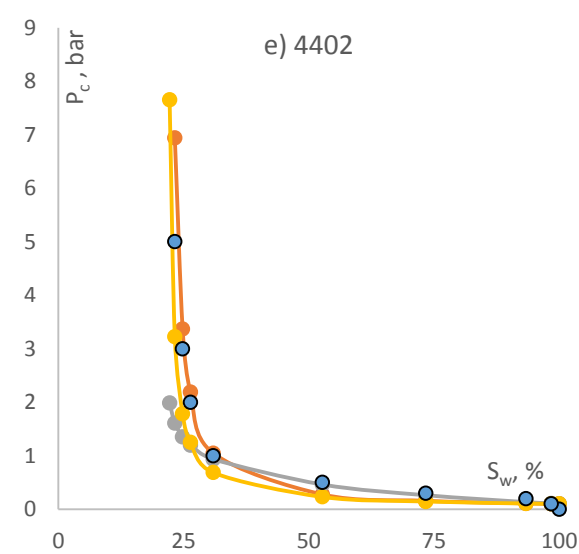
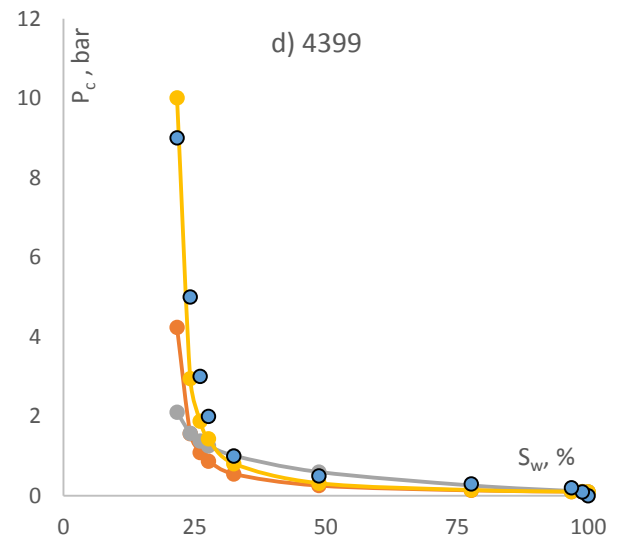
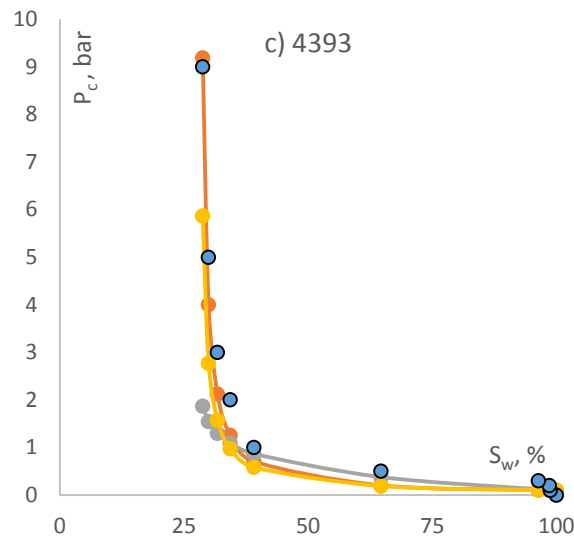
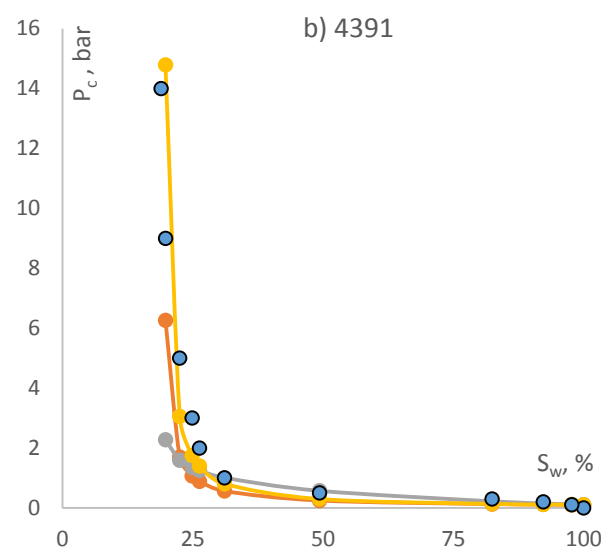
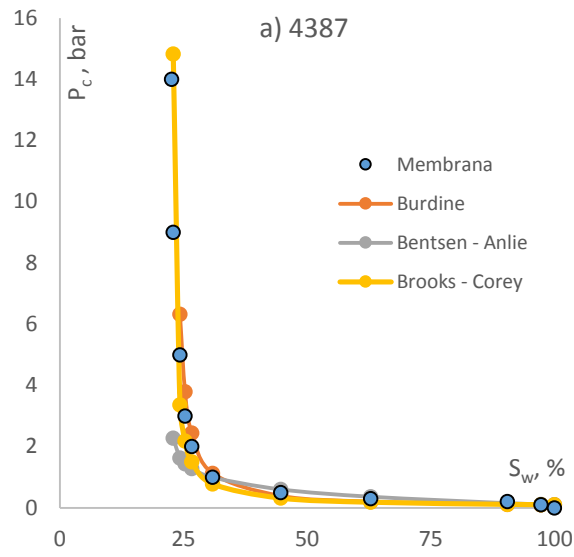
Kapilarni tlak mjeren je u sustavu voda – zrak, pri čemu je zrakom iz uzorka istiskivana voda. S obzirom da je stanje močivosti uzorka pojedinim fluidom evidentno, i da se radi o procesu dreniranja, mjerene vrijednosti bit će usuglašavane s Burdineovom, Bentsen–Anliejevom i Brooks–Coreyevom korelacijom (poglavlje 2.2).

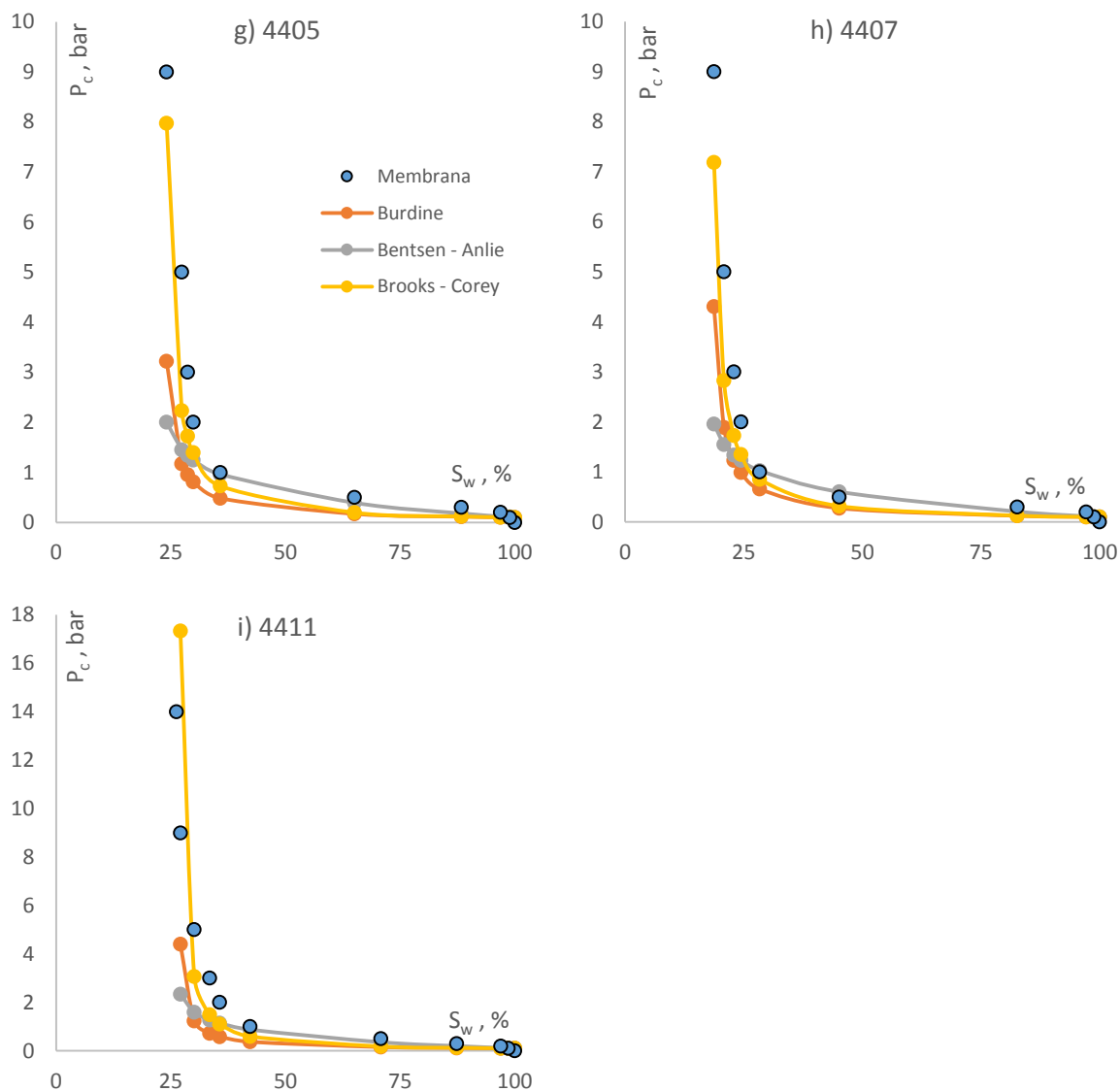
Svaka od njih koristi parametar λ , koji opisuje utjecaj raspodjele radijusa pora, a kao što je ranije navedeno, predstavlja nagib pravca kad se P_c i S_w^* prikažu u log-log dijagramu, čija jednadžba je oblika $y = ax^{-\lambda}$. Parametar λ je na taj način određen za svaki pojedini uzorak (u rasponu je od 0,858 za uzorak 4404 do 1,167 za uzorak 4411), te se s njim dalje ulazilo u proračune (slika 4-3).



Slika 4-3. Određivanje parametra λ za uzorke s Polja-1

Kao kritični tlak pri kojem počinje istiskivanje močive faze uzeta je najniža vrijednost pri kojoj je vršeno mjerenje, koja iznosi 0,1 bar. Rezultati testiranih korelacija prikazani su grafički (slika 4-4, a-i). Može se uočiti da raspon kapilarnih tlakova na apscisi nije jednak za svaki uzorak, a valja napomenuti i da je legenda jednaka za svaki grafički prikaz.





Slika 4-4. Usporedba korelacija s mjenim podacima o kapilarnom tlaku za uzorke s Polja-1

Kao što je vidljivo iz grafičkih prikaza, u većini slučajeva je najbolje poklapanje postignuto korištenjem Brooks-Coreyeve korelacije, koja je uz najmanju prosječnu relativnu pogrešku vrlo blisko opisala mjerene podatke. S obzirom da je korelacija Bentsen-Anlie specijalizirana za točnije opisivanje krivulja dobivenih centrifugalnom metodom, ne čudi slabo poklapanje s ovim skupom podataka.

4.3. ODREĐIVANJE RELATIVNIH PROPUSNOSTI IZ KAPILARNOG TLAKA

Na temelju prethodnih istraživanja (Vulin et al, 2016) ustanovljeno je da se kao reprezentativnu krivulju kapilarnog tlaka za uzorke s Polja-1 može uzeti krivulja uzorka 4407 (slika 4-4 h). Laboratorijski podaci tog uzorka uspješno su korigirani pomoću Brooks – Coreyeve korelacije za određivanje stvarne krivulje kapilarnog tlaka, te se kao konačni skup podataka za ulazak u proračun relativnih propusnosti uzimaju njene vrijednosti (tablica 4-2).

Tablica 4-2. Vrijednosti kapilarnog tlaka uzorka 4407 korigirane Brooks-Coreyevom korelacijom

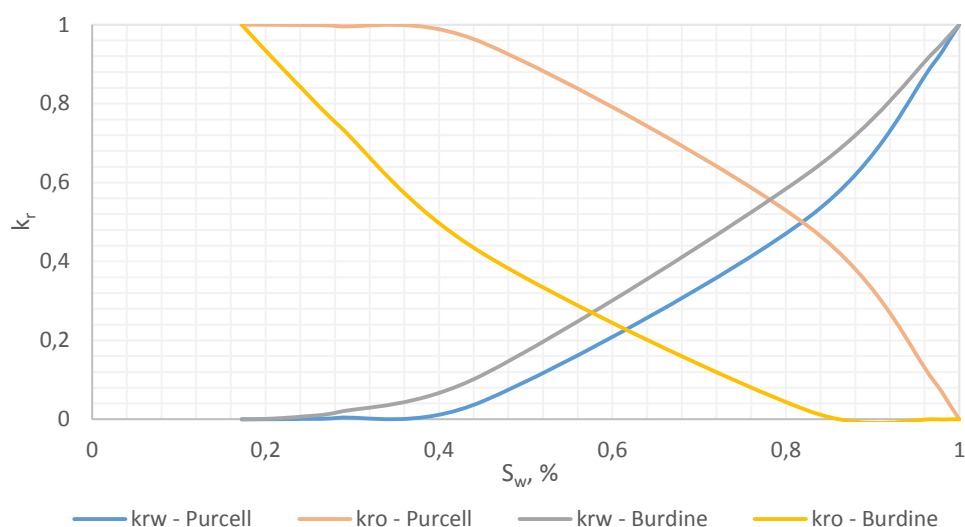
$S_w, \%$	P_c, bar
100,00	0,1
98,80	0,101
97,15	0,103
82,61	0,128
45,13	0,318
28,34	0,851
24,44	1,350
22,94	1,732
20,84	2,827
18,74	7,189

Iz poznatog parametra $\lambda = 1,066$ (slika 4-3) uz korištenje jednadžbi 3-5 i 3-6 izračunate su vrijednosti parametara m i b :

$$m = 2,876$$

$$b = - 92,759$$

Relativne propusnosti za vodu i naftu najprije su izračunate primjenom Purcellovog i Burdineovog modela (poglavlja 3.2.1. i 3.2.2.), te prikazane grafički (slika 4-5). Kao što je ranije objašnjeno, pokazalo se da Purcellov model više odgovara za određivanje krivulje relativne propusnosti za vodu (k_{rw}), dok Burdineov uspješnije opisuje krivulju relativne propusnosti za naftu (k_{ro}) (Li i Horne., 2004). Posljedično, te krivulje su uzete kao temelj za određivanje reprezentativne krivulje.



Slika 4-5. Krivulje relativnih propusnosti za vodu (k_{rw}) i za naftu (k_{ro}) dobivene primjenom Purcellovog i Burdineovog modela, Polje-1

Niti jedan od tih modela ne opisuje rubne točke na zadovoljavajuć način, stoga se pristupa korekciji odabranih krivulja primjenom LET modela (poglavlje 3.2.3.). Izračunate su krajnje vrijednosti relativnih propusnosti za vodu (k_{rw}^0) i za naftu (k_{ro}^x) (jednadžbe 3-9 i 3-10). Njihove vrijednosti su sljedeće:

$$k_{rw}^0 = 0,852095$$

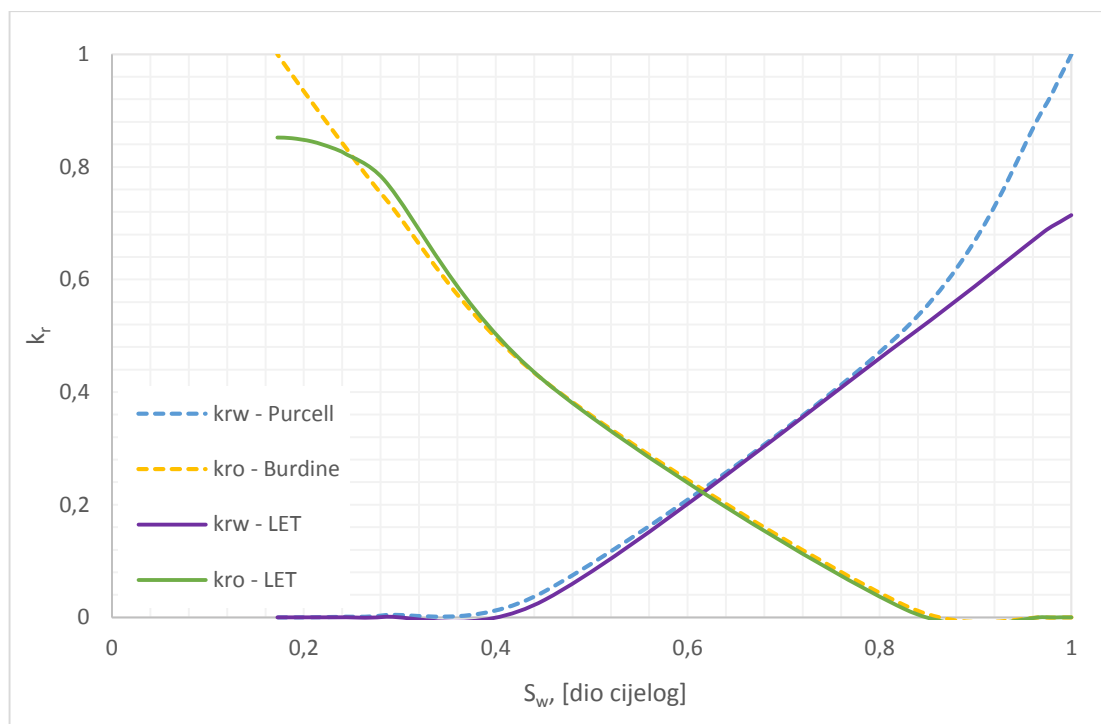
$$k_{ro}^x = 1$$

Početne vrijednosti parametara L , E i T bile su definirane njihovim graničnim uvjetima, koji glase $L \geq 1$, $E > 0$ i $T \geq 0,5$ (Lomeland et al., 2005). Korištenjem jednadžbi 3-11 i 3-12, određene su početne krivulje relativnih propusnosti, koje uz korištenje vrijednosti $L = 1$, $E = 0,1$ i $T = 0,5$ nisu odgovarale ranije odabranim krivuljama. Mijenjanjem tih parametara postignuto je poklapanje s krivuljama Purcellovog i Burdineovog modela, a njihove konačne vrijednosti prikazane su u tablici 4-3.

Tablica 4-3. Vrijednosti parametara LET modela, Polje-1

	Voda	Nafta
L	5	2
E	0,4	4
T	1	2

Konačne krivulje relativnih propusnosti prikazane su slikom 4.6, a pripadajuće vrijednosti su u tablici 4-4.



Slika 4-6. Usporedba odabranih krivulja relativnih propusnosti Purcellovog i Burdineovog modela s korigiranim krivuljama LET modela, Polje-1

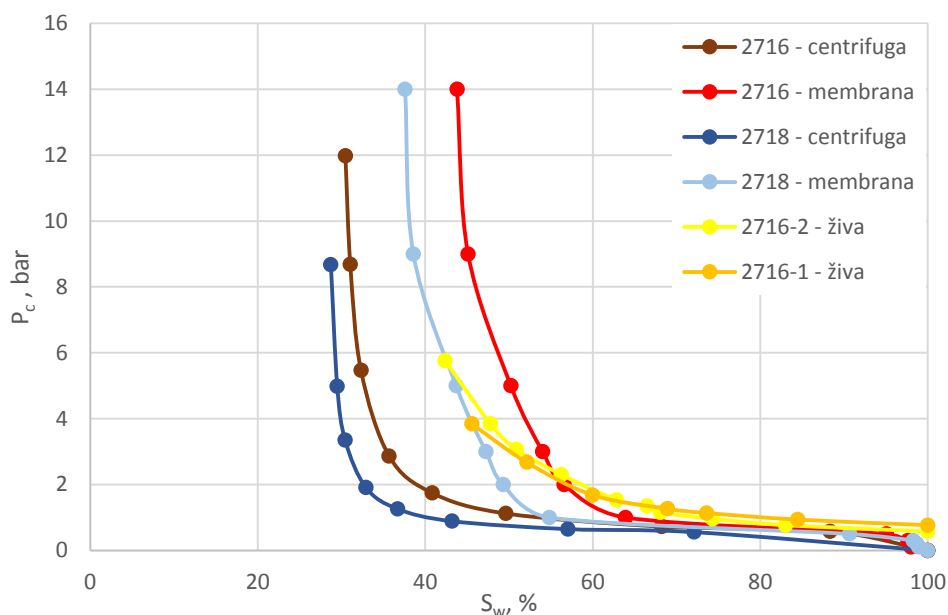
Tablica 4-4. Relativne propusnosti za vodu i naftu uzorka s Polja-1

$S_w, \%$	k_{ro}	k_{rw}
100	0	0,714
98,8	$4,61 \cdot 10^{-5}$	0,702
97,15	$2,71 \cdot 10^{-4}$	0,685
82,61	0,015	0,493
45,13	0,419	0,031
28,34	0,777	0,001
24,44	0,822	$1,43 \cdot 10^{-4}$
22,94	0,834	$5,63 \cdot 10^{-5}$
18,74	0,851	$0,03 \cdot 10^{-5}$

5. ODREĐIVANJE RELATIVNIH PROPUSNOSTI ZA UZORKE POLJA-2

5.1. ANALIZA DOSTUPNIH PODATAKA

Za razliku od Polja-1, gdje je na puno uzoraka rađeno jedno mjerenje, za Polje-2 dostupna su samo 2 uzorka jezgre, međutim u ovom slučaju, mjerenja kapilarnog tlaka su rađena metodom polupropusne membrane, zatim centrifugalnom metodom, i naposljetku Purcellovom metodom saturacije živom. Krivulje kapilarnih tlakova dobivene ovim mjerenjima prikazane su na slici 5-1.



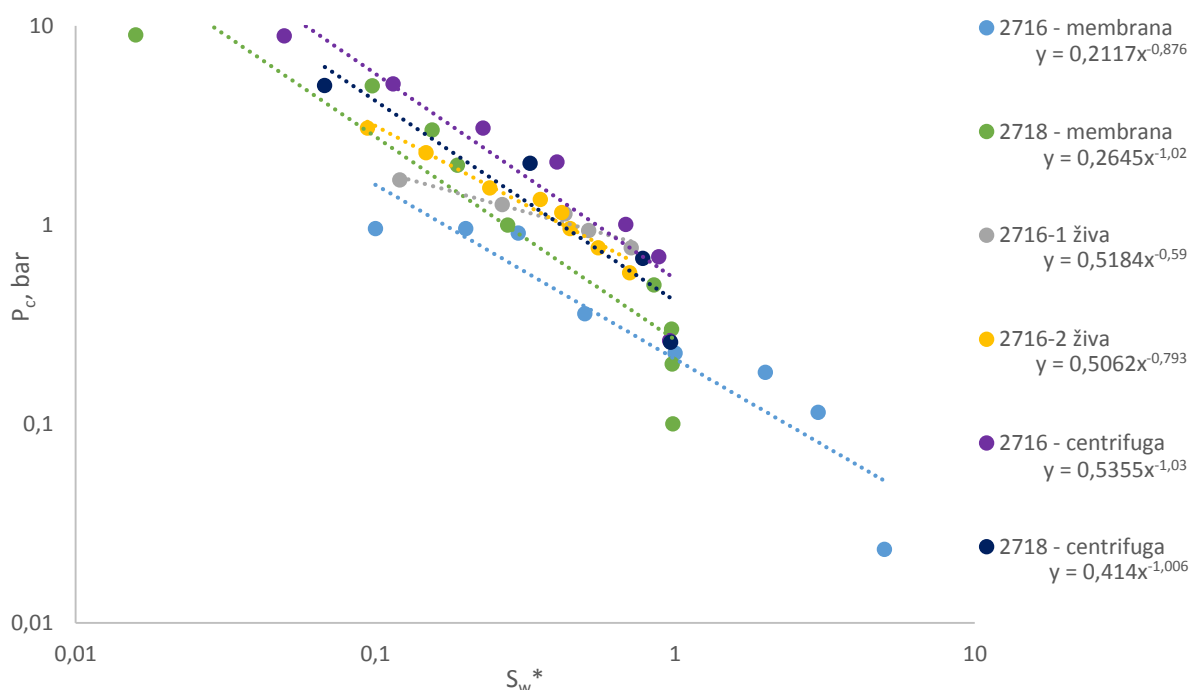
Slika 5-1. Krivulje kapilarnih tlakova mjerene na dva uzorka trima metodama

Na ovom primjeru se jasnije vidi problematika točnog određivanja krivulje kapilarnog tlaka. Isti uzorci pokazali su drugačije ponašanje pri protoku, ovisno o korištenoj metodi. Mjerenja na membrani rađena su za tlakove od 0 do 14 bara (jednako kao u slučaju Polja-1), a centrifugalnom metodom mjerilo se zasićenje pri 8 brzina rotacije u rasponu od 480 do 3200 okretaja u minuti. Mjerenje Purcellovom metodom vršilo se za 10 vrijednosti tlaka od 0 do 5,7 bara. Ireducibilna zasićenja se za isti uzorak kreću u rasponu od oko 30 do 43% (2716), odnosno od 28 do 37% (2718). Propusnosti uzoraka su 6,501 mD za uzorak 2716, i 6,573 mD za uzorak 2718, dok su poroznosti 15,74 i 16,24%. S obzirom da se radi o

vrlo homogenom pješčenjaku, rezultati laboratorijskih mjerenja su se tim više pokazala nepouzdanima.

5.2. TESTIRANJE KORELACIJA ZA ODREĐIVANJE KRIVULJE KAPILARNOG TLAKA

Jednako kao i za Polje-1, određivat će se krivulja kapilarnog tlaka testiranjem Burdineove, Bentsen – Anliejeve i Brooks – Coreyeve korelacije. Za svaku pojedinu krivulju određen je parametar λ (slika 5-2).



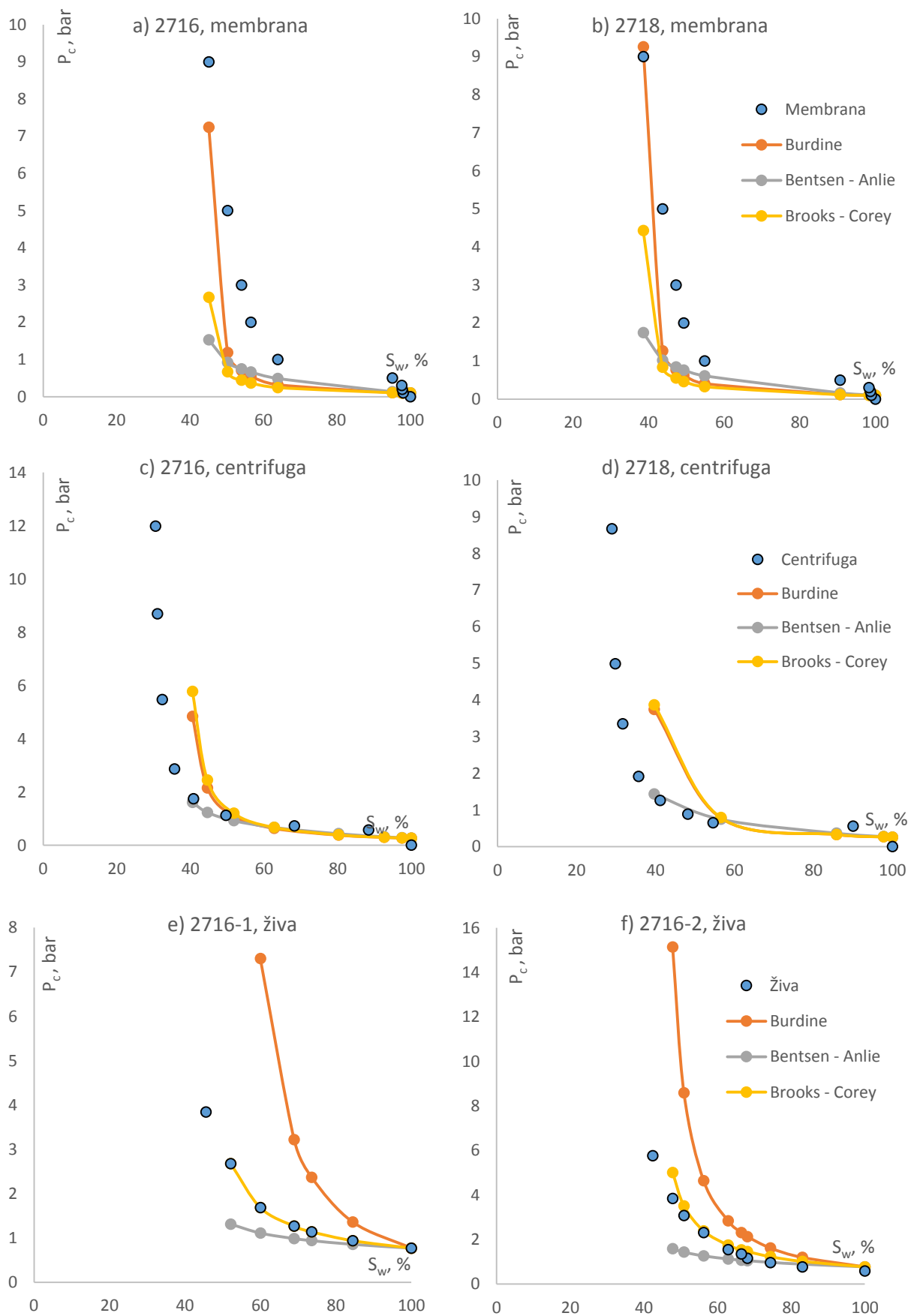
Slika 5-2. Određivanje parametra λ za uzorke s Polja-2

Kritični tlakovi pri kojima je započelo istiskivanje fluida pri pojedinom mjerenju prikazani su u tablici 5-1.

Tablica 5-1. Vrijednosti kritičnog tlaka mjerenja, P_{cd} [bar]

	2716	2718
Membrana	0,1	0,1
Centrifuga	0,262	0,258
Živa	0,768	-

Rezultati testiranih korelacija prikazani su grafički (slika 5-3, a-f). Legenda je jednaka za svaki grafički prikaz unutar iste metode.



Slika 5-3. Usporedba korelacija s mjerenim podacima za uzorke s Polja-2

Iz priloženog je vidljivo sljedeće:

- za podatke o kapilaritetima dobivenima metodom polupropusne membrane nije ostvareno poklapanje niti s jednom od testiranih korelacija; Burdineova korelacija donekle pogađa krajnju vrijednost (ireducibilno zasićenje vodom), no neusuglasiva je sa ostatkom raspona zasićenja,
- za podatke o kapilaritetima dobivenima centrifugalnom metodom ostvareno je djelimično poklapanje s korelacijom Bentsen – Anlie, za tlakove od 0 do 2 bara; korelacija ipak ne opisuje ponašanje promjene zasićenja pri ostalim vrijednostima tlaka,
- za podatke o kapilaritetima dobivenima metodom saturacije živom ostvareno je odlično poklapanje laboratorijskih podataka s korelacijom Brooks – Corey; relativna pogreška je manja za uzorak 2716-1 nego za 2716-2.

Kao reprezentativna krivulja kapilarnog tlaka za Polje-2 odabrana je krivulja uzorka 2716-1, dobivena metodom saturacije živom (slika 5-3 (e)).

5.3. ODREĐIVANJE RELATIVNIH PROPUSNOSTI IZ KAPILARNOG TLAKA

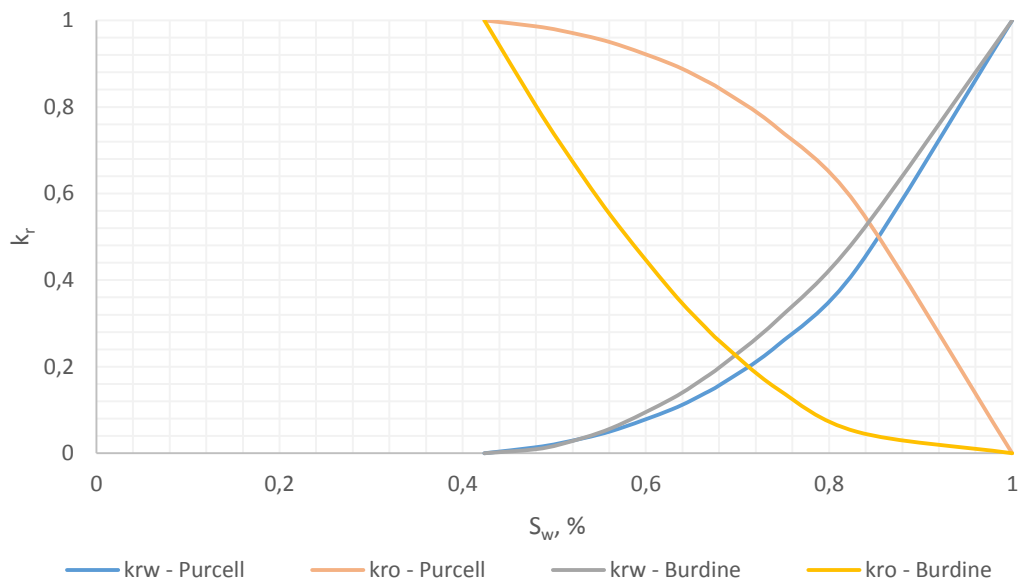
Konačne vrijednosti kapilarnog tlaka na Polju-2 prikazane su u tablici 5-2.

Tablica 5-2. Vrijednosti kapilarnog tlaka uzorka 2716 korigirane Brooks-Coreyevom korelacijom

S_w , %	P_c , bar
100,00	0,768
84,47	0,936
73,58	1,136
68,93	1,264
59,97	1,682
52,12	2,674
45,55	3,841

Vrijednost parametra λ za ovaj uzorak iznosi 0,59 (slika 5-2), m iznosi 3,522, a b iznosi - 2,552. Postupak određivanja relativnih propusnosti je istovjetan ranije objašnjenom

postupku korištenom za Polje-1 – prikaz krivulja dobivenih korištenjem Purcellovog i Burdineovog modela priložen je na slici 5-4:



Slika 5-4. Krivulje relativnih propusnosti za vodu (k_{rw}) i za naftu (k_{ro}) dobivene primjenom Purcellovog i Burdineovog modela, Polje-2

Određivanje rubnih podataka može biti poboljšano korištenjem LET modela. Krajnje vrijednosti relativnih propusnosti za vodu (k_{rw}^0) i za naftu (k_{ro}^x) iznose:

$$k_{rw}^0 = 1$$

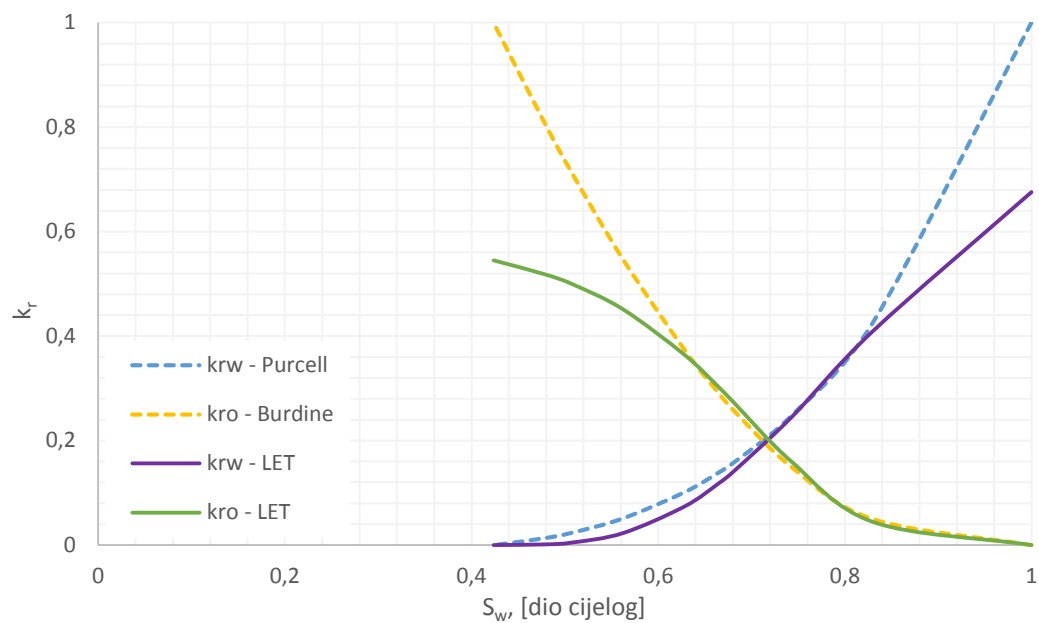
$$k_{ro}^x = 0,544986391$$

Kao početne vrijednosti parametara L , E i T uzete su iste granične vrijednosti kao što je ranije rečeno, a njihove konačne vrijednosti prikazane su u tablici 5-3.

Tablica 5-3. Vrijednosti parametara LET modela, Polje-2

	Voda	Nafta
L	7	3,2
E	0,48	0,31
T	3,85	0,9

Konačne krivulje relativnih propusnosti prikazane su slikom 5.5, a njihove vrijednosti tablicom 5-4.



Slika 5-5. Usporedba odabranih krivulja relativnih propusnosti Purcellovog i Burdineovog modela s korigiranim krivuljama LET modela, Polje-2

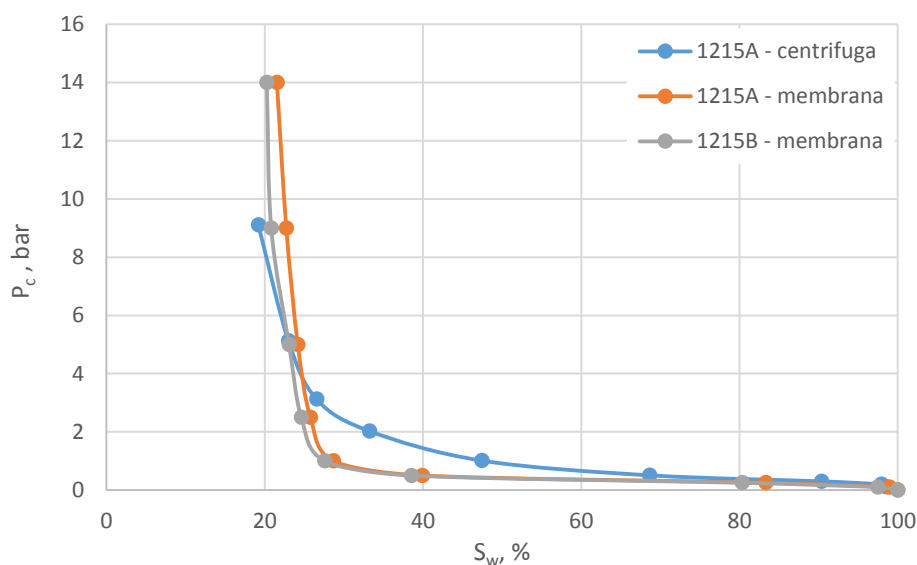
Tablica 5-4. Relativne propusnosti za vodu i naftu uzorka s Polja-2

S_w , %	k_{ro}	k_{rw}
100	0	0,6756
83,04	0,04412	0,4099
74,31	0,1594	0,2450
68,07	0,2736	0,1406
66,48	0,3025	0,1180
62,83	0,3641	0,0739
56,23	0,4513	0,0228
50,87	0,4989	0,0049
47,79	0,5187	0,0012

6. ODREĐIVANJE RELATIVNIH PROPUSNOSTI ZA UZORKE POLJA-3

6.1. ANALIZA DOSTUPNIH PODATAKA

S Polja-3 dostupna su bila 2 uzorka, od kojih nad jednim obavljeno samo mjerenje metodom polupropusne membrane (1215B), a nad drugim je prethodno obavljeno i centrifugalno mjerenje (1215A). Mjerenje metodom polupropusne membrane vršilo se pri tlakovima od 0 do 14 bara, a mjerenje centrifugalnom metodom pri brzinama rotacije od 410 do 3690 okretaja u minuti. Dobivene krivulje kapilariteta prikazane su na slici 6-1.

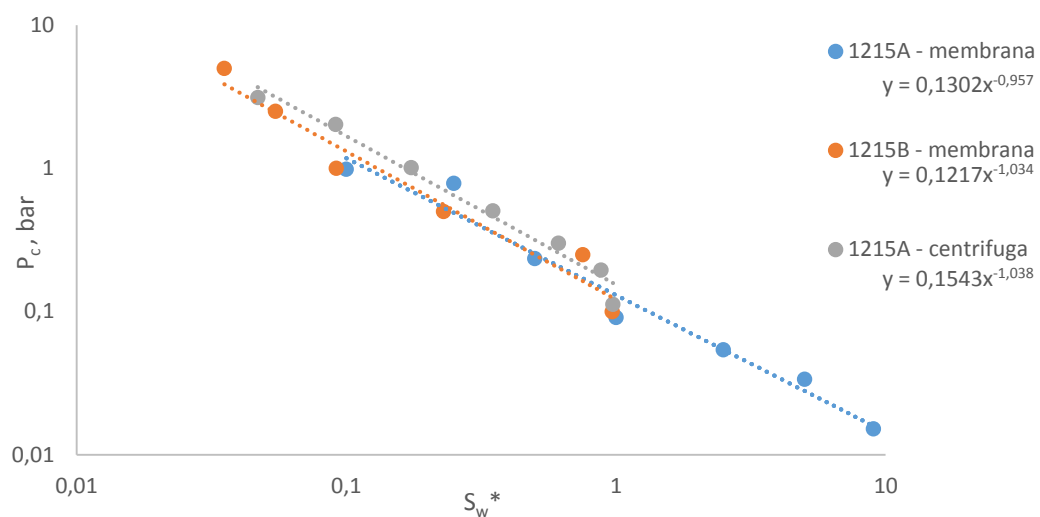


Slika 6-1. Krivulje kapilarnih tlakova mjerene na dva uzorka dvjema metodama

Propusnost uzorka 1215A iznosi 48,5 mD, a njegova poroznost iznosi 20,62%. Propusnost uzorka 1215B iznosi 50,3 mD, a poroznost 20,59%. Dobivene vrijednosti ireducibilnog zasićenja su za uzorke s Polja-3 približne jedna drugoj, a nalaze se u rasponu od oko 19 do 21,5%.

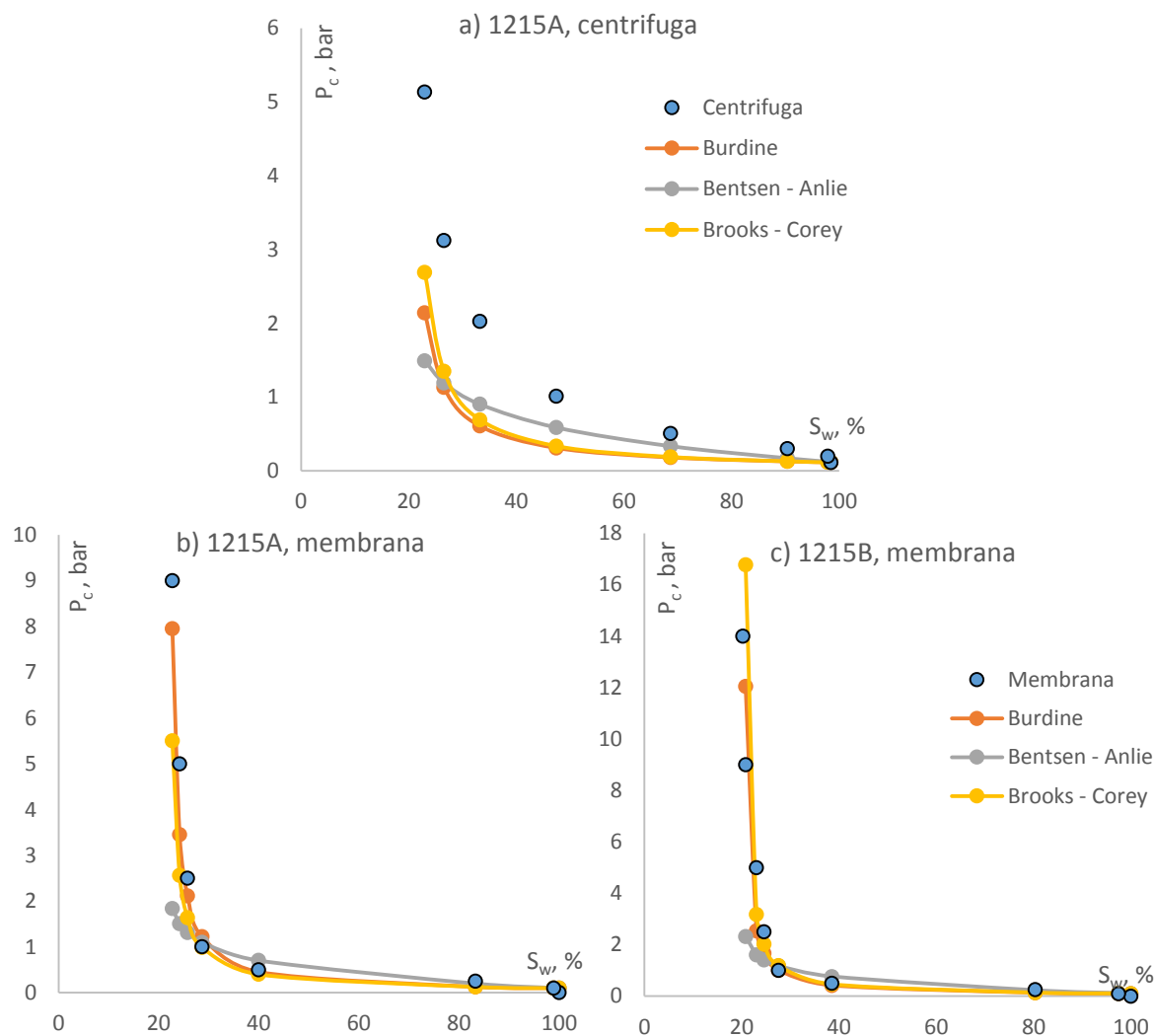
6.2. TESTIRANJE KORELACIJA ZA ODREĐIVANJE KRIVULJE KAPILARNOG TLAKA

Za Polje-3 su također testirane Burdineova, Bentsen – Anliejeva i Brooks – Coreyeva korelacija. Prije samog proračuna korelacija, određen je parametar λ (slika 6-2). Kritični tlakovi su za mjerenje polupropusnom membranom iznosili 0,1 bar, a za centrifugalnu metodu 0,112 bara.



Slika 6-2. Određivanje parametra λ za uzorke s Polja-3

Rezultati testiranih korelacija prikazani su grafički (slika 6-3 (a-c)).



Slika 6-3. Usporedba korelacija s mjerenim podacima za uzorke s Polja-3

Iz prikaza slike 6-3 (a) očito je da sa podacima centrifugalnog mjerenja nije moguće usuglasiti niti jednu od testiranih korelacija. S druge strane, podaci s membrane se vrlo dobro poklapaju sa svakom od korelacija, posebice s Burdineovom, a i Brooks – Coreyeva pokazuje minimalna odstupanja.

S obzirom na najmanje odstupanje od ponuđenih krivulja, za daljnji proračun odabrana je krivulja uzorka 1215A izmjerena metodom polupropusne membrane, korigirana Burdineovom korelacijom.

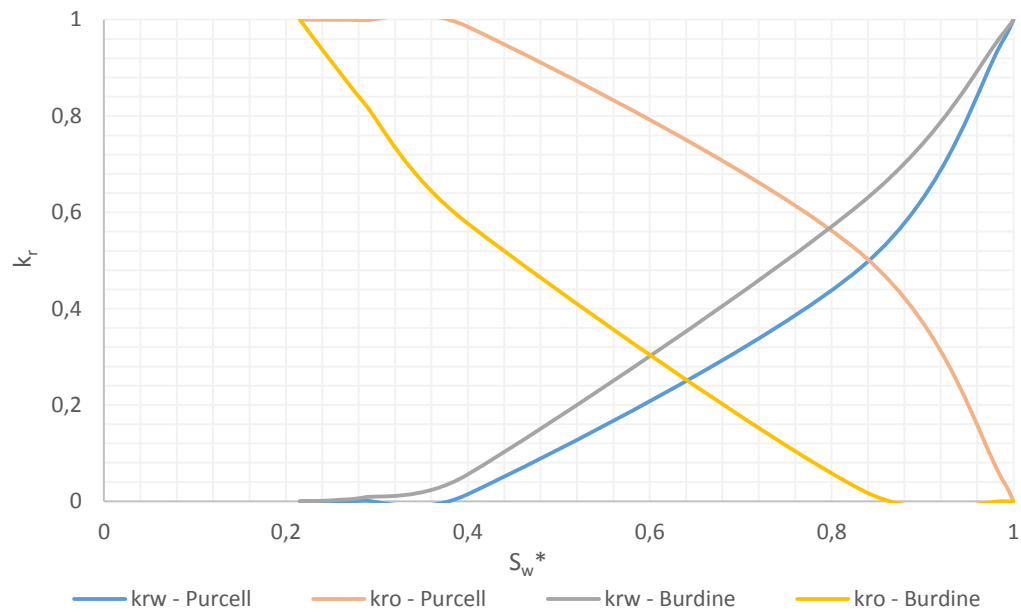
6.3. ODREĐIVANJE RELATIVNIH PROPUSNOSTI IZ KAPILARNOG TLAKA

Konačne vrijednosti kapilarnog tlaka prikazane su u tablici 6-1.

Tablica 6-1. Vrijednosti kapilarnog tlaka uzorka 1215A korigirane Burdineovom korelacijom

S_w , %	P_c , bar
100	0
98,94	0,10
83,33	0,25
39,92	0,50
28,68	1,00
25,76	2,50
24,18	5,00
22,72	9,00
21,53	14,00

Vrijednost parametra λ za ovaj uzorak iznosi 0,957 (slika 6-2), m iznosi 3,089, a b iznosi - 44,7461853. S tim vrijednostima određene su krivulje relativnih propusnosti po Purcellovom i Burdineovom modelu (slika 6-4).



Slika 6-4. Krivulje relativnih propusnosti za vodu (k_{rw}) i za naftu (k_{ro}) dobivene primjenom Purcellovog i Burdineovog modela, Polje-3

Krajnje vrijednosti relativnih propusnosti za vodu (k_{rw}^0) i za naftu (k_{ro}^x) iznose:

$$k_{rw}^0 = 1$$

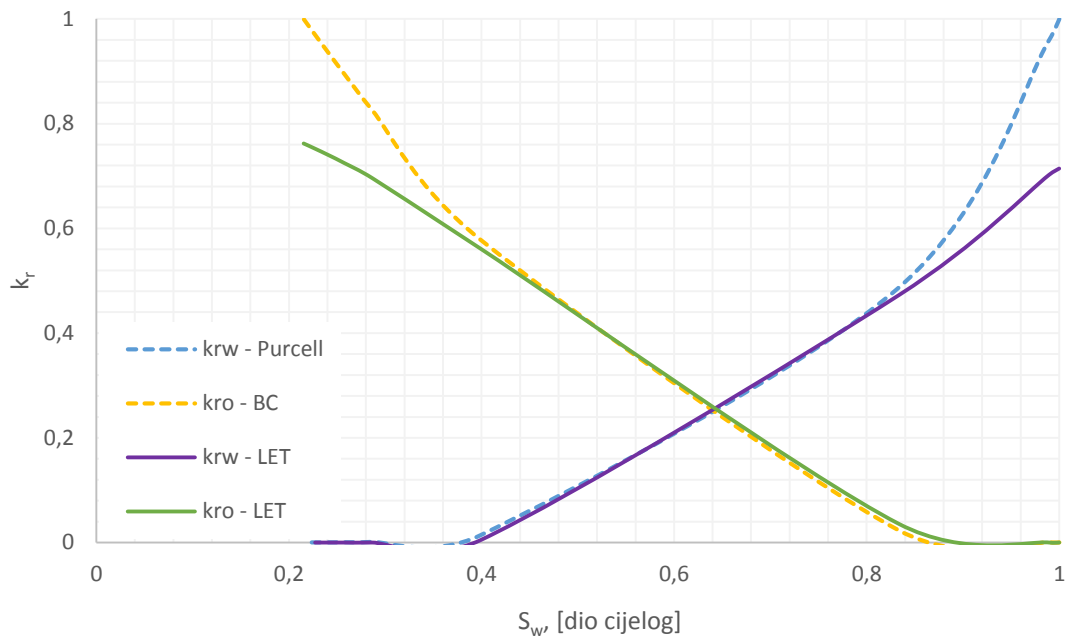
$$k_{ro}^x = 0,762215628$$

Konačne vrijednosti parametara L , E i T prikazane su u tablici 6-2.

Tablica 6-2. Vrijednosti parametara LET modela, Polje-3

	Voda	Nafta
L	8	2,2
E	0,4	0,85
T	3,7	1

Rezultantne krivulje relativnih propusnosti prikazane su na slici 6-5, a pripadajuće vrijednosti nalaze se u tablici 6-3.



Slika 6-5. Usporedba odabranih krivulja relativnih propusnosti Purcellovog i Burdineovog modela s korigiranim krivuljama LET modela, Polje-3

Tablica 6-3. Relativne propusnosti za vodu i naftu uzorka s Polja-3

S_w , %	k_{ro}	k_{rw}
100	0	0,714
98,94138	$6,99 \cdot 10^{-5}$	0,702
83,32672	0,036	0,472
39,92325	0,561	0,005
28,6754	0,696	$8,376 \cdot 10^{-5}$
25,76419	0,725	$8,82 \cdot 10^{-6}$
24,17626	0,739	$1,17 \cdot 10^{-6}$
22,72066	0,752	$3,77 \cdot 10^{-8}$

6.4. USPOREDBA LABORATORIJSKIH I KORELIRANIH PODATAKA

Korelacije nisu namještene prema mjerenim podacima relativnih propusnosti za Polje-3, s obzirom da su podaci već interpretirani tijekom mjerenja relativnih propusnosti, tj. dostupni su podaci izravno mjereni metodama ustaljenog i neustaljenog protoka, te njihove normalizirane vrijednosti. One predstavljaju izgladenu krivulju relativnih propusnosti, na temelju općeg oblika Coreyeve jednadžbe. Samo mjerenje iz tehničkih razloga ne daje pouzdane podatke na rubnim uvjetima, tj. pri rezidualnom zasićenju naftom, S_{or} , i pri kritičnom zasićenju vodom, S_{wc} . Tako na temelju jednog uzorka nije moguće raditi sveobuhvatnu analizu reprezentativnosti, međutim moguće je usporediti kritične parametre u krajnjim točkama (tablica 6-4, tablica 6-5).

Tablica 6-4. Usporedba rubnih uvjeta dobivenih pojedinom metodom

	LET	USS	SS	USS (norm.)	SS (norm.)
S_{wc}	40%	31%	38%	34%	39%
S_{or}	79%	56%	51%	51%	51%

Tablica 6-5. Raspon za odabir relativne propusnosti pri S_{wc} i S_{or}

	min.	max.
k_{rw}	0.005	0.014
k_{ro}	0.01	0.065

Naime, iz samog mjerenja, rubne vrijednosti se može procijeniti tek kada se na izlazu iz jezgre uoči protok dviju faza (vode i nafte) ili na kraju zavodnjavanja, kada se uočava protok samo jedne faze. U tablici 6-5, **podebljane** su vrijednosti iz eksperimenta ustaljenom metodom za koje LET korelacija daje bolje poklapanje. U LET korelaciji je vrijednost kritičnog zasićenja za vodu pokazala bolje poklapanje s eksperimentalnim vrijednostima, dok je rezidualno zasićenje za naftu pokazalo odstupanje od svih razmatranih rubnih vrijednosti koja su potekla iz eksperimentalnih podataka.

7. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu rađena je analiza reprezentativnosti uzoraka temeljem usklađivanja korelacija u laboratoriju. Reprezentativni podaci za relativne propusnosti i kapilarni tlak služe u procesu homogenizacije (engl. *upscalinga*) kao početna točka u usklađivanju analitičkih i simulacijskih modela ležišta, s obzirom da se u takvim modelima najčešće (radi jednostavnosti) koristi jedinstvena krivulja relativne propusnosti i kapilarnog tlaka. Glavni problem predstavlja činjenica da se radi o parametrima koji se zbog heterogenosti ležišta ugljikovodika jako teško osrednjavaju, što je pak dokazano i temeljem prethodno spomenutih analiza, kojima se pokušalo uskladiti kapilarni tlak s krivuljom zasićenja iz karotažnih mjerenja, a i u analizama ovog rada.

Definiran je postupak kojim je moguće izdvojiti mjerenja kapilarnih tlakova koja su perspektivna za daljnje predikcije relativnih propusnosti. Pri tome se za Brooks - Coreyev i Burdineov općeniti tip korelacije pokazalo kako se mogu poklapati s nekim mjerenjima. Izrađene su krivulje relativnih propusnosti, prema općenitim izrazima istih autora, te su prema takvim krivuljama podešeni parametri LET korelacije.

LET korelacija se, prema literaturnim navodima, nedvojbeno može svrstati u najfleksibilniji tip funkcije s kojim se može usklađivati mjerene podatke. Očekivanje da bi se na temelju mjerenja relativne propusnosti na jednom uzorku moglo odrediti da je on i reprezentativan, tj. u skladu s mjerenim kapilarnim tlakom, nije se ostvarilo.

Na temelju opširne analize ipak se može izvesti nekoliko generalnih zaključaka:

1. eksperimentalni podaci u krajnjim točkama (engl. *end-points*) se s korelacijom bolje poklapaju u slučaju eksperimenta metodom ustaljenog protoka,
2. pri tome rezidualno zasićenje naftom ne pokazuje dobro poklapanje, ali kritično zasićenje vodom pokazuje izvrsno poklapanje koreliranih i eksperimentalnih, te obrađenih (normaliziranih) eksperimentalnih podataka, što predstavlja najbitniji podatak za daljnje podešavanje krivulje relativnih propusnosti za poklapanje proizvodnih podataka s onima iz polu-analitičkih i numeričkih procjena zavodnjavanja (engl. *history-matching*),
3. korelacije LET i Burdine se razlikuju utoliko što LET ima tzv. X-oblik krivulje, što upućuje da bi LET bolje funkcionirao kod manje interfacijalne napetosti dva prisutna fluida (uvjeti blizu miješanja). Takav oblik krivulje (dobiven LET korelacijom) može

biti poželjan za simulacije utiskivanja otapala (kao npr. CO₂-EOR), međutim razumljivo je da nije niti kvalitativno sličan krivulji analiziranoj u ovom radu, s obzirom da se radilo o usporedbi s eksperimentom zavodnjavanja (velika međupovršinska napetost i bitno različite viskoznosti korištenog ulja i vode).

Finalno, može se zaključiti kako veći broj dostupnih sustavnih analiza kapilarnog tlaka i relativne propusnosti na većem broju uzoraka može poslužiti za procjenu reprezentativnih setova podataka o dotičnim parametrima. Pri tome je već dokazano da su tri analize kapilarnog tlaka bile dovoljne za pronalaženje korelacijskih parametara, te bi se moglo za buduće analize preporučiti provođenje minimalno tri analize relativnih propusnosti kako bi se uspješno ostvarila cjelokupna usklađenost modela.

8. REFERENCE

1. AYAPPA, K.G., DAVIS, H.T., DAVIS, E.A., GORDON, J., 1989. *Capillary pressure: centrifuge method revisited*. AIChE journal, 35(3), pp.365-372.
2. BENTSEN, R.G., ANLIE, J., 1977. *Using Parameter Estimation Techniques to Convert Centrifuge Data into a Capillary Pressure Curve*, Trans., AIME, 56.
3. BROOKS, R.H., COREY, A.T., 1964. *Hydraulic properties of porous media and their relation to drainage design*. Transactions of the ASAE, 7(1), pp.26-0028.
4. BROOKS, R.H., COREY, A.T., 1966. *Properties of porous media affecting fluid flow*. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 92(2), pp.61-90.
5. BROWN, H.W., 1951. *Capillary pressure investigations*. Journal of Petroleum Technology, 3(03), pp.67-74.
6. BURDINE, N.T., 1953. *Relative Permeability Calculations from Pore Size Distribution*, Trans., AIME, 198, pp. 71-78.
7. FORBES, P., 1997. *Centrifuge data analysis techniques: an SCA survey on the calculation of drainage capillary pressure curves from centrifuge measurements*. SCA paper, 9714, pp.8-10.
8. HASSLER, G.L., BRUNNER, E., 1945. *Measurement of capillary pressures in small core samples*. Transactions of the AIME, 160(01), pp.114-123.
9. HONARPOUR, M.M., KOEDERITZ, F., HERBERT, A., 1986. *Relative permeability of petroleum reservoirs*.
10. LEVERETT, M., 1941. *Capillary behavior in porous solids*. Transactions of the AIME, 142(01), pp.152-169.
11. LI, K., HORNE, R.N., 2003, October. *Fractal characterization of the geysers rock*. In Proceedings of the GRC 2003 annual meeting.
12. LI, K., HORNE, R.N., 2004, January. *Universal capillary pressure and relative permeability model from fractal characterization of rock*. In the Stanford Geothermal Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California.
13. LOMELAND F., EBELTOFT E., HAMMERVOLD T. W., 2005: *A New Versatile Relative Permeability Correlation*. Reviewed Proceedings of the 2005 International Symposium of the SCA, Abu Dhabi, United Arab Emirates, October 31 - November 2, SCA 2005-32.

14. LOMELAND, F., EBELTOFT, E., HAMMERVOLD T. W., 2008, October. *A new versatile capillary pressure correlation*. In Paper SCA 2008-08 presented at the International Symposium of the Society of Core Analysts held in Abu Dhabi, UAE (Vol. 29).
15. PERKOVIĆ, A., 2011. *Mjerenje kapilarnih tlakova metodom polupropusne membrane*, INA d.d., Služba laboratorijskih ispitivanja IPNP, 50000364-011/12.
16. PURCELL, W. R, 1949. *Capillary Pressures – Their Measurement using Mercury and the Calculation of Permeability Therefrom*, Trans. AIME, (1949) 186,39-48.
17. SENDRA, 2004.: *User guide*, Petec Software & Services
18. SKJAEVELAND, S.M, SIQVELAND, L.M., KJOSAVIK, A., HAMMERVOLD THOMAS, W.L., VIRNOVSKY, G.A., 2000. *Capillary Pressure Correlation for Mixed-Wet Reservoirs*, SPE Reservoir Eval. & Eng. 3 (1).
19. SLOBOD, R.L., CHAMBERS, A., PREHN, JR., W.L., 1951. *Use of the centrifuge for determining connate water, residual oil and capillary pressure curves for small core samples*. Trans. AIME, 192:127-134.
20. TIAB, D., DONALDSON, E.C., 2012. *Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties*. Gulf professional publishing.
21. VULIN, D., 2016. *Višefazni protok u poroznoj stijeni*, Interna skripta RGN Fakulteta, Zagreb.
22. VULIN, D., ČOGELJA, Z., BILJANOVIĆ, T., 2016. *Određivanje reprezentativne krivulje kapilarnog tlaka usklađivanjem laboratorijskih i karotažnih podataka*, Nafta i plin, 36/147, 33-41

9. DODACI

Dodatak 1. Opći podaci o uzorcima iz bušotina Polja-1

Poroznost i propusnost na valjčićima Polja-1-113					
Oznaka jezgre		Laboratorijski broj valjčića	Dubina. m	Poroznost. %	Horizontalna propusnost. mD
1526.5-1531.0 m					
I m	0,05	4387	1526,55	21,62	45,53
	0,36	4391	1526,86	22,06	33,95
	0,47	4393	1526,97	21,05	15,21
II m	0,14	4399	1527,64	22,25	34,79
	0,84	4402	1528,34	25,4	71,5
	0,94	4404	1528,44	20,24	14,49
III m	0,05	4405	1528,55	21,89	23,3
	0,15	4407	1528,65	22,29	38,07
	0,4	4411	1528,9	20,13	10,32

Dodatak 2. Opći podaci o uzorcima iz bušotine Polja-2

Oznaka jezgre	2716	2718
Duljina jezgre (L), cm	7,43	7,25
Promjer jezgre (d), cm	3,81	3,81
Poroznost jezgre (Φ), %	15,74	16,24
Propusnost jezgre (k), mD	6,501	6,573
Gustoća vode (ρ_{water}), g/cm ³	1,003464	1,003464
Gustoća zraka (ρ_{air}), g/cm ³	0,0012922	0,0012922
Razlika gustoća ($\Delta\rho$), g/cm ³	1,0021718	1,0021718
Volumen pora (Vp), cm ³	13,33316871	13,42344118
Masa suhog uzorka (m_0), g	195,837	189,745
Masa uzorka 100% zasićenog vodom (m_{100}), g	208,19	202,14

Dodatak 3. Opći podaci o uzorcima iz bušotine Polja-3

Oznaka jezgre	1215A	1215B
Duljina jezgre (L), cm	3,83	3,33
Promjer jezgre (d), cm	3,74	3,74
Poroznost jezgre (Φ), %	20,62	20,59
Propusnost jezgre (k), mD	48,474	50,328
Gustoća vode (ρ_{water}), g/cm ³	1,012642	1,012642
Gustoća zraka (ρ_{air}), g/cm ³	0,001292	0,001292
Razlika gustoća ($\Delta\rho$), g/cm ³	1,01135	1,0021718
Volumen pora (Vp), cm ³	8,68	7,53
Masa suhog uzorka (m ₀), g	91,759	79,38
Masa uzorka 100% zasićenog vodom (m ₁₀₀), g	100,11	-

Dodatak 4. Proračun kapilarnih tlakova uzoraka Polja-1 korištenjem korelacija

Uzorak	4387					
Dubina, m	1526,55					
Poroznost, %	21,62	Lambda= 0,921				
S _w , %	P _c , bar	S _w *	log(S _w *)	Burdine	Bentsen - Anlie	Brooks-Corey
100,00	0,00	1,0000	0,0000	0,1000	0,1000	0,1000
97,28	0,10	0,9649	-0,0155	0,1040	0,1143	0,1033
90,49	0,20	0,8772	-0,0569	0,1153	0,1524	0,1128
62,82	0,30	0,5198	-0,2842	0,2035	0,3617	0,1827
44,65	0,50	0,2851	-0,5451	0,3907	0,6020	0,3177
30,90	1,00	0,1075	-0,9687	1,1267	0,9922	0,7802
26,66	2,00	0,0527	-1,2782	2,4425	1,2772	1,5039
25,30	3,00	0,0351	-1,4543	3,7934	1,4394	2,1847
24,28	5,00	0,0220	-1,6584	6,3191	1,6274	3,3681
22,92	9,00	0,0044	-2,3574	36,2728	2,2711	14,8300
22,58	14,00	0	#NUM!	#DIV/0!	#NUM!	#DIV/0!

Uzorak br,	4391					
Dubina, m	1526,86					
Poroznost, %	22,06	Lambda=		1,099		
S_w, %	P_c, bar	S_w*	log(S_w*)	Burdine	Bentsen - Anlie	Brooks-Corey
100,00	0,00	1,0000	0,0000	0,1000	0,1000	0,1000
97,77	0,10	0,9725	-0,0121	0,1026	0,1133	0,1031
92,27	0,20	0,9047	-0,0435	0,1095	0,1478	0,1116
82,47	0,30	0,7838	-0,1058	0,1248	0,2162	0,1307
49,31	0,50	0,3750	-0,4260	0,2441	0,5682	0,2939
31,10	1,00	0,1504	-0,8227	0,5605	1,0041	0,8019
26,29	2,00	0,0911	-1,0404	0,8844	1,2434	1,3911
24,91	3,00	0,0741	-1,1301	1,0674	1,3420	1,7459
22,51	5,00	0,0445	-1,3515	1,6973	1,5853	3,0571
19,76	9,00	0,0106	-1,9745	6,2611	2,2700	14,7911
18,90	14,00	0	#NUM!	#DIV/0!	#NUM!	#DIV/0!

Uzorak	4393					
Dubina, m	1526,97					
Poroznost, %	21,05	Lambda=		0,949		
S_w, %	P_c, bar	S_w*	log(S_w*)	Burdine	Bentsen - Anlie	Brooks-Corey
100,00	0,00	1,0000	0,0000	0,1000	0,1000	0,1000
98,81	0,10	0,9835	-0,0072	0,1018	0,1068	0,1016
98,61	0,20	0,9808	-0,0084	0,1021	0,1080	0,1019
96,43	0,30	0,9506	-0,0220	0,1055	0,1209	0,1049
64,68	0,50	0,5109	-0,2916	0,2029	0,3768	0,1891
39,09	1,00	0,1566	-0,8052	0,7055	0,8641	0,5809
34,33	2,00	0,0907	-1,0424	1,2544	1,0893	0,9756
31,75	3,00	0,0550	-1,2599	2,1260	1,2956	1,5690
29,96	5,00	0,0302	-1,5202	3,9985	1,5427	2,7712
28,77	9,00	0,0137	-1,8630	9,1863	1,8680	5,8615
27,78	14,00	0	#NUM!	#DIV/0!	#NUM!	#DIV/0!

Uzorak	4399					
Dubina, m	1527,64					
Poroznost, %	22,25	Lambda=		1,109		
S_w, %	P_c, bar	S_w*	log(S_w*)	Burdine	Bentsen - Anlie	Brooks-Corey
100,00	0,00	1,0000	0,0000	0,1000	0,1000	0,1000
98,90	0,10	0,9862	-0,0060	0,1013	0,1067	0,1016
96,86	0,20	0,9605	-0,0175	0,1037	0,1194	0,1046
77,71	0,30	0,7199	-0,1427	0,1345	0,2583	0,1440
48,67	0,50	0,3551	-0,4497	0,2544	0,5987	0,3153
32,50	1,00	0,1519	-0,8184	0,5470	1,0076	0,8084
27,63	2,00	0,0907	-1,0423	0,8707	1,2559	1,4320
26,06	3,00	0,0710	-1,1488	1,0862	1,3740	1,8794
24,18	5,00	0,0474	-1,3245	1,5644	1,5689	2,9437
21,66	9,00	0,0157	-1,8039	4,2330	2,1006	10,0133
20,41	14,00	0	#NUM!	#DIV/0!	#NUM!	#DIV/0!

Uzorak	4402					
Dubina, m	1528,34					
Poroznost, %	25,4	Lambda=		0,905		
S_w, %	P_c, bar	S_w*	log(S_w*)	Burdine	Bentsen - Anlie	Brooks-Corey
100,00	0,00	1,0000	0,0000	0,1000	0,1000	0,1000
98,44	0,10	0,9801	-0,0087	0,1022	0,1079	0,1018
93,38	0,20	0,9156	-0,0383	0,1102	0,1347	0,1083
73,38	0,30	0,6606	-0,1800	0,1581	0,2629	0,1455
52,73	0,50	0,3974	-0,4008	0,2773	0,4627	0,2305
30,91	1,00	0,1192	-0,9237	1,0488	0,9360	0,6854
26,36	2,00	0,0612	-1,2133	2,1911	1,1980	1,2532
24,81	3,00	0,0414	-1,3827	3,3713	1,3513	1,7836
23,25	5,00	0,0215	-1,6667	6,9439	1,6083	3,2234
22,21	9,00	0,0083	-2,0816	19,9589	1,9839	7,6537
21,56	14,00	0	#NUM!	#DIV/0!	#NUM!	#DIV/0!

Uzorak	4404					
Dubina, m	1528,44					
Poroznost, %	20,24	Lambda=		0,858		
S_w, %	P_c, bar	S_w*	log(S_w*)	Burdine	Bentsen - Anlie	Brooks-Corey
100,00	0,00	1,0000	0,0000	0,1000	0,1000	0,1000
98,55	0,10	0,9791	-0,0092	0,1025	0,1079	0,1018
97,47	0,20	0,9636	-0,0161	0,1044	0,1138	0,1032
92,22	0,30	0,8880	-0,0516	0,1149	0,1443	0,1107
67,27	0,50	0,5287	-0,2768	0,2102	0,3375	0,1728
41,23	1,00	0,1537	-0,8134	0,8873	0,7979	0,4988
34,72	2,00	0,0599	-1,2225	2,6598	1,1489	1,1192
33,09	3,00	0,0364	-1,4385	4,7485	1,3342	1,7148
32,19	5,00	0,0235	-1,6294	7,9267	1,4980	2,5006
31,28	9,00	0,0104	-1,9843	20,5436	1,8025	5,0409
30,56	14,00	0	#NUM!	#DIV/0!	#NUM!	#DIV/0!

Uzorak	4405					
Dubina, m	1528,55					
Poroznost, %	21,89	Lambda=		1,123		
S_w, %	P_c, bar	S_w*	log(S_w*)	Burdine	Bentsen - Anlie	Brooks-Corey
100,00	0,00	1,0000	0,0000	0,1000	0,1000	0,1000
98,90	0,10	0,9858	-0,0062	0,1013	0,1070	0,1016
96,85	0,20	0,9593	-0,0180	0,1038	0,1202	0,1048
88,35	0,30	0,8496	-0,0708	0,1156	0,1795	0,1201
65,04	0,50	0,5488	-0,2606	0,1706	0,3926	0,1962
35,75	1,00	0,1708	-0,7676	0,4826	0,9620	0,7279
29,92	2,00	0,0955	-1,0200	0,8096	1,2454	1,3977
28,66	3,00	0,0792	-1,1010	0,9559	1,3364	1,7236
27,40	5,00	0,0630	-1,2008	1,1729	1,4485	2,2308
24,09	9,00	0,0203	-1,6933	3,2198	2,0016	7,9720
22,52	14,00	0	#NUM!	#DIV/0!	#NUM!	#DIV/0!

Uzorak	4407					
Dubina, m	1528,65					
Poroznost, %	22,29	Lambda=		1,066		
S_w, %	P_c, bar	S_w*	log(S_w*)	Burdine	Bentsen - Anlie	Brooks-Corey
100,00	0,00	1,0000	0,0000	0,1000	0,1000	0,1000
98,80	0,10	0,9855	-0,0063	0,1014	0,1068	0,1016
97,15	0,20	0,9656	-0,0152	0,1033	0,1162	0,1038
82,61	0,30	0,7899	-0,1024	0,1248	0,2092	0,1286
45,13	0,50	0,3370	-0,4724	0,2774	0,6035	0,3188
28,34	1,00	0,1341	-0,8725	0,6584	1,0301	0,8513
24,44	2,00	0,0870	-1,0605	0,9882	1,2305	1,3505
22,94	3,00	0,0689	-1,1619	1,2303	1,3386	1,7323
20,84	5,00	0,0435	-1,3615	1,8933	1,5514	2,8273
18,74	9,00	0,0181	-1,7417	4,3042	1,9567	7,1892
17,24	14,00	0	#NUM!	#DIV/0!	#NUM!	#DIV/0!

Uzorak	4411					
Dubina, m	1528,9					
Poroznost, %	20,13	Lambda=		1,167		
S_w, %	P_c, bar	S_w*	log(S_w*)	Burdine	Bentsen - Anlie	Brooks-Corey
100,00	0,00	1,0000	0,0000	0,1000	0,1000	0,1000
98,57	0,10	0,9806	-0,0085	0,1017	0,1099	0,1023
96,97	0,20	0,9589	-0,0182	0,1037	0,1212	0,1050
87,34	0,30	0,8285	-0,0817	0,1175	0,1954	0,1246
70,77	0,50	0,6039	-0,2190	0,1541	0,3556	0,1801
42,25	1,00	0,2175	-0,6626	0,3696	0,8732	0,5932
35,65	2,00	0,1280	-0,8926	0,5820	1,1417	1,1008
33,51	3,00	0,0991	-1,0041	0,7252	1,2718	1,4854
30,12	5,00	0,0531	-1,2748	1,2369	1,5877	3,0737
27,09	9,00	0,0121	-1,9187	4,4066	2,3391	17,3414
26,20	14,00	0	#NUM!	#DIV/0!	#NUM!	#DIV/0!

Dodatak 5. Proračun kapilarnih tlakova uzoraka Polja-2 korištenjem korelacija

Centrifuga						
Uzorak 2716		Lambda= 1,03				
S _w , %	P _c , bar	S _w *	log(S _w *)	Burdine	Bentsen - Anlie	Brooks - Corey
1,000	0,000	1,0000	0,0000	0,2624	0,2624	0,2624
0,974	0,262	0,9586	-0,0184	0,2734	0,2813	0,2741
0,926	0,693	0,8820	-0,0545	0,2964	0,3185	0,2986
0,802	1,006	0,6841	-0,1649	0,3793	0,4322	0,3879
0,627	2,075	0,4039	-0,3938	0,6327	0,6680	0,6676
0,518	3,063	0,2288	-0,6406	1,0986	0,9222	1,1987
0,446	5,118	0,1145	-0,9411	2,1510	1,2317	2,4450
0,405	8,928	0,0497	-1,3037	4,8382	1,6052	5,7779
0,374	11,661	0	#NUM!	#DIV/0!	#NUM!	#DIV/0!

Centrifuga						
Uzorak 2718		Lambda= 1,066				
S _w , %	P _c , bar	S _w *	log(S _w *)	Burdine	Bentsen - Anlie	Brooks - Corey
1,000	0,000	1,0000	0,0000	0,2577	0,2577	0,2577
0,977	0,258	0,9651	-0,0154	0,2664	0,2741	0,2676
0,858	0,680	0,7808	-0,1075	0,3250	0,3722	0,3354
0,565	2,038	0,3284	-0,4836	0,7323	0,7731	0,8444
0,397	5,026	0,0677	-1,1694	3,2214	1,5042	4,5459
0,353	8,768	0	#NUM!	#DIV/0!	#NUM!	#DIV/0!

Membrana						
Uzorak 2716		Lambda= 0,876				
S _w (%)	P _c (bar)	S _w *	log(S _w *)	Burdine	Bentsen - Anlie	Brooks - Corey
100	0,00	1,0000	0,0000	0,1000	0,1000	0,1000
98,02	0,10	0,9648	-0,0156	0,1042	0,1136	0,1032
97,77	0,20	0,9603	-0,0176	0,1047	0,1154	0,1036
97,61	0,30	0,9575	-0,0189	0,1051	0,1165	0,1039
95,06	0,50	0,9121	-0,0400	0,1111	0,1350	0,1084
63,9	1,00	0,3578	-0,4464	0,3233	0,4910	0,2461
56,57	2,00	0,2274	-0,6433	0,5424	0,6635	0,3660
54,01	3,00	0,1818	-0,7404	0,7001	0,7486	0,4452
50,22	5,00	0,1144	-0,9416	1,1882	0,9248	0,6681
45,11	9,00	0,0235	-1,6292	7,2421	1,5272	2,6743
43,79	14,00	0	#NUM!	#DIV/0!	#NUM!	#DIV/0!

Membrana						
Uzorak 2718		Lambda= 0,915				
S _w (%)	P _c (bar)	S _w *	log(S _w *)	Burdine	Bentsen - Anlie	Brooks-Corey
100	0,00	1,0000	0,0000	0,1000	0,1000	0,1000
98,93	0,10	0,9829	-0,0075	0,1019	0,1069	0,1016
98,68	0,20	0,9788	-0,0093	0,1024	0,1085	0,1020
98,27	0,30	0,9723	-0,0122	0,1031	0,1112	0,1026
90,68	0,50	0,8507	-0,0702	0,1193	0,1643	0,1160
54,82	1,00	0,2761	-0,5590	0,4082	0,6115	0,3247
49,3	2,00	0,1876	-0,7267	0,6226	0,7649	0,4623
47,24	3,00	0,1546	-0,8107	0,7692	0,8418	0,5518
43,69	5,00	0,0977	-1,0099	1,2698	1,0241	0,8396
38,58	9,00	0,0159	-1,7996	9,2640	1,7467	4,4325
37,59	14,00	0	#NUM!	#DIV/0!	#NUM!	#DIV/0!

Živa						
Uzorak 2716-1		Lambda= 0,59				
S _w (%)	P _c (bar)	S _w *	log(S _w *)	Burdine	Bentsen - Anlie	Brooks-Corey
100,00	0,576	1,0000	0,0000	0,7681	0,7681	0,7681
84,47	0,768	0,7148	-0,1458	1,3570	0,8541	0,9364
73,58	0,960	0,5148	-0,2884	2,3669	0,9382	1,1365
68,93	1,152	0,4294	-0,3672	3,2189	0,9847	1,2648
59,97	1,728	0,2648	-0,5770	7,3020	1,1085	1,6822
52,12	2,688	0,1207	-0,9184	27,6747	1,3100	2,6748
45,55	3,841	0	#NUM!	#DIV/0!	#NUM!	#DIV/0!

Živa						
Uzorak 2716-2		Lambda= 0,793				
S _w (%)	P _c (bar)	S _w *	log(S _w *)	Burdine	Bentsen - Anlie	Brooks-Corey
100,00	0,576	1,0000	0,0000	0,7681	0,7681	0,7681
83,04	0,768	0,7057	-0,1514	1,1921	0,8881	1,0126
74,31	0,960	0,5542	-0,2563	1,6167	0,9714	1,2265
68,07	1,152	0,4459	-0,3507	2,1266	1,0462	1,4573
66,48	1,344	0,4184	-0,3785	2,3049	1,0682	1,5330
62,83	1,536	0,3550	-0,4497	2,8350	1,1247	1,7461
56,23	2,304	0,2405	-0,6189	4,6329	1,2589	2,3779
50,87	3,072	0,1475	-0,8312	8,5828	1,4273	3,5042
47,79	3,841	0,0940	-1,0266	15,1376	1,5822	5,0067
42,37	5,761	0	#NUM!	#DIV/0!	#NUM!	#DIV/0!

Dodatak 6. Proračun kapilarnih tlakova uzoraka Polja-3 korištenjem korelacija

Centrifuga						
Uzorak 1215A		Lambda= 1,038				
S _w (%)	P _c (bar)	S _w *	log(S _w *)	Burdine	Bentsen - Anlie	Brooks - Corey
98,467	0,112	0,9810	-0,0083	0,1145	0,1211	0,1147
97,904	0,195	0,9741	-0,0114	0,1153	0,1243	0,1155
90,372	0,300	0,8809	-0,0551	0,1270	0,1696	0,1282
68,650	0,506	0,6121	-0,2132	0,1804	0,3337	0,1871
47,419	1,012	0,3494	-0,4567	0,3096	0,5865	0,3349
33,242	2,025	0,1740	-0,7596	0,6062	0,9009	0,6907
26,560	3,120	0,0913	-1,0397	1,1284	1,1916	1,3491
22,979	5,132	0,0470	-1,3282	2,1401	1,4911	2,6886
19,183	9,107	0	#NUM!	#DIV/0!	#NUM!	#DIV/0!

Membrana						
Uzorak 1215A		Lambda= 0,957				
S _w (%)	P _c (bar)	S _w *	log(S _w *)	Burdine	Bentsen - Anlie	Brooks - Corey
100	0,00	1,0000	0,0000	0,1000	0,1000	0,1000
98,94	0,10	0,9865	-0,0059	0,1014	0,1056	0,1013
83,33	0,25	0,7875	-0,1037	0,1284	0,1993	0,1257
39,92	0,50	0,2344	-0,6300	0,4554	0,7029	0,4008
28,68	1,00	0,0911	-1,0407	1,2230	1,0959	0,9906
25,76	2,50	0,0540	-1,2679	2,1129	1,3134	1,6345
24,18	5,00	0,0337	-1,4720	3,4528	1,5087	2,5629
22,72	9,00	0,0152	-1,8188	7,9531	1,8406	5,5030
21,53	14,00	0	#NUM!	#DIV/0!	#NUM!	#DIV/0!

Membrana						
Uzorak 1215B		Lambda= 1,034				
S _w (%)	P _c (bar)	S _w *	log(S _w *)	Burdine	Bentsen - Anlie	Brooks - Corey
100	0,00	1,0000	0,0000	0,1000	0,1000	0,1000
97,47	0,10	0,9683	-0,0140	0,1032	0,1145	0,1034
80,31	0,25	0,7531	-0,1232	0,1316	0,2273	0,1341
38,54	0,50	0,2293	-0,6396	0,4155	0,7614	0,4586
27,57	1,00	0,0917	-1,0376	1,0080	1,1729	1,1827
24,61	2,50	0,0547	-1,2622	1,6623	1,4051	2,0190
23,07	5,00	0,0353	-1,4526	2,5397	1,6019	3,1764
20,82	9,00	0,0071	-2,1515	12,0442	2,3247	16,7755
20,25	14,00	0	#NUM!	#DIV/0!	#NUM!	#DIV/0!

Dodatak 7. Proračun relativnih propusnosti uzoraka Polja-1

S_w , %	Purcell		Burdine		LET	
	k_{ro}	k_{rw}	k_{ro}	k_{rw}	k_{ro}	k_{rw}
100	0,000000	1,000000	0,000000	1,000000	0,000000	0,714286
98,8	0,040706	0,959294	0,000009	0,971211	0,000046	0,702215
97,15	0,094890	0,905110	0,000113	0,932312	0,000271	0,684842
82,61	0,488439	0,511561	0,021566	0,623901	0,014813	0,493192
45,13	0,953517	0,046483	0,419138	0,113568	0,419040	0,031237
28,34	0,996255	0,003745	0,746935	0,017989	0,777478	0,000808
24,44	0,998793	0,001207	0,832566	0,007569	0,822232	0,000143
22,94	0,999332	0,000668	0,866417	0,004744	0,833846	0,000056
20,84	0,999780	0,000220	0,914692	0,001892	0,845104	0,000009
18,74	0,999966	0,000034	0,964046	0,000329	0,850936	0,000000
17,24	1,000000	0,000000	1,000000	0,000000	0,852095	#DIV/0!

Dodatak 8. Proračun relativnih propusnosti uzoraka Polja-2

S_w , %	Purcell		Burdine		LET	
	k_{ro}	k_{rw}	k_{ro}	k_{rw}	k_{ro}	k_{rw}
100,00	0,000000	1,000000	0,000000	1,000000	0,000000	0,675676
83,04	0,573425	0,426575	0,049663	0,498025	0,044125	0,409999
74,31	0,751915	0,248085	0,149417	0,307166	0,159432	0,245065
68,07	0,842362	0,157638	0,258583	0,198870	0,273636	0,140660
66,48	0,861194	0,138806	0,291348	0,175024	0,302532	0,118054
62,83	0,898693	0,101307	0,373852	0,126042	0,364137	0,073913
56,23	0,948798	0,051202	0,547305	0,057840	0,451396	0,022868
50,87	0,975759	0,024241	0,709151	0,021754	0,498952	0,004991
47,79	0,986797	0,013203	0,809912	0,008845	0,518710	0,001214
42,37	1,000000	0,000000	1,000000	0,000000	0,544986	#DIV/0!

Dodatak 9. Proračun relativnih propusnosti uzoraka Polja-3

S_w , %	Purcell		Burdine		LET	
	k_{ro}	k_{rw}	k_{ro}	k_{rw}	k_{ro}	k_{rw}
100,00	0,0000000	1,0000000	0,0000000	1,0000000	0,0000000	0,7142857
98,94	0,0402141	0,9597859	0,0000073	0,9732005	0,0000699	0,7022187
83,33	0,5131983	0,4868017	0,0231695	0,6201895	0,0359350	0,4723210
39,92	0,9860177	0,0139823	0,5779457	0,0549440	0,5610417	0,0048602
28,68	0,9988871	0,0011129	0,8252481	0,0082924	0,6957725	0,0000838
25,76	0,9996780	0,0003220	0,8946980	0,0029120	0,7246620	0,0000088
24,18	0,9998803	0,0001197	0,9335721	0,0011375	0,7393581	0,0000012
22,72	0,9999707	0,0000293	0,9698478	0,0002303	0,7521801	0,0000000
21,53	1,0000000	0,0000000	1,0000000	0,0000000	0,7622156	#DIV/0!

Izjava:

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.

Tamara Biljanović