

# Metode i primjena određivanja kapilarnog tlaka u stijeni

---

**Medić, Stjepan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*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:169:993218>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-30**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**METODE I PRIMJENA ODREĐIVANJA KAPILARNOG TLAKA U STIJENI**

Završni rad

Stjepan Medić

N4432

Zagreb, 2022

## ZAHVALA

*Zahvaljujem svom mentoru prof. dr. sc. Domagoju Vulinu na pomoći i strpljenju pri izradi ovog završnog rada, bez čijih uputa, smjernica i savjeta ne bih uspio.*

*Veliko hvala mojoj obitelji na svim riječima motivacije i podrške. Posebno hvala mom ocu i majci što su me uzdržavali i vjerovali u mene, te mom bratu koji je uvijek tu bio za mene, i kroz dobra i kroz teška vremena.*

*Hvala svim prijateljima i prijateljicama što su moje studiranje ispunili s puno lijepih i zabavnih uspomena.*

METODE I PRIMJENA ODREĐIVANJA KAPILARNOG TLAKA U STIJENI  
STJEPAN MEDIĆ

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Kako bi odredili zasićenje ugljikovodicima u nekoj zoni vrlo bitno je znati podatke o kapilarnom tlaku. Dio ugljikovodika ostat će zarobljen u stijeni zbog kapilarnog tlaka te time uvelike utječu na procjenu pridobivih rezervi ugljikovodika. Od velike je važnosti točnost mjerenja kapilarnog tlaka. Postoji nekoliko metoda određivanja kapilarnog tlaka. U ovome radu su detaljnije opisane metode polupropusne membrane, centrifuge i utiskivanja žive. Navedene metode u kombinaciji sa korelacijama nam koriste za dobivanje podataka o kapilarnom tlaku u ležištu.

Ključne riječi: kapilarni tlak, metoda, facijes, uravnoteženje, rezerve, ležište

Završni rad sadrži: 19 stranica, 10 slika i 8 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentori: dr. sc. Domagoj Vulin, redoviti profesor RGNF-a

Ocjenjivači: dr. sc. Domagoj Vulin, redoviti profesor RGNF-a  
dr. sc. Vladislav Brkić, izvanredni profesor RGNF-a  
dr. sc. Borivoje Pašić, izvanredni profesor RGNF-a

Datum obrane: 21.09.2022., Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

## SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1. Temeljni koncepti kapilarnog tlaka .....	1
<b>2. METODE MJERENJA KAPILARNOG TLAKA.....</b>	<b>3</b>
2.1. Metoda polupropusne membrane .....	3
2.2. Metoda centrifugiranja.....	4
2.3. Metoda utiskivanja žive .....	5
2.4. Ostale metode .....	6
2.4.1. <i>Desorpcija/adsorpcija</i> .....	6
2.4.2. <i>Metode kontinuiranog utiskivanja</i> .....	6
2.4.3. <i>Poludinamički testovi</i> .....	7
<b>3. PRIPREMA UZORKA, METODE MJERENJA I UVJETI ISPITIVANJA.....</b>	<b>8</b>
3.1. Ogledni pribor i rukovanje.....	8
3.2. Ogledno čišćenje.....	8
3.3. Uvjeti odabira i testiranja metode ispitivanja .....	8
3.4. Vrijeme uravnoteženja.....	9
<b>4. TIPOVI FLUIDA I UČINAK MOČIVOSTI NA KAPILARNI TLAK.....</b>	<b>11</b>
4.1. Količina podataka .....	12
<b>5. OBRADA <math>P_c</math> PODATAKA .....</b>	<b>14</b>
5.1. Homogenizacija $P_c$ podataka .....	15
5.1.1. <i>Međupovršinska napetost i kut kontakta</i> .....	15
5.2. Metode ekstrapolacije .....	16
<b>6. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>18</b>
<b>7. POPIS LITERATURE.....</b>	<b>19</b>

## POPIS SLIKA

<b>Slika 2-1.</b> Metoda polupropusne membrane .....	4
<b>Slika 2-2.</b> Metoda centrifuge .....	5
<b>Slika 2-3.</b> Metoda utiskivanja žive .....	6
<b>Slika 3-1.</b> Utjecaj graničnog naprezanja na primarni drenažni kapilarni tlak.....	9
<b>Slika 3-2.</b> Utjecaj vremena uravnoteženja na metodu utiskivanja žive .....	10
<b>Slika 4-1.</b> Kapilarni tlak pri sustavu zrak-nafta te pri sustavu zrak-slojna voda indikativan više za vodomochive karakteristike.....	11
<b>Slika 4-2.</b> Kapilarni tlak pri sustavu zrak-nafta te pri sustavu zrak-slojna voda indikativan više za naftomochive karakteristike .....	12
<b>Slika 4-3.</b> Podaci metode centrifuge i polupropusne membrane o promjeni močivosti tijekom testa polupropusne membrane .....	12
<b>Slika 5-1.</b> Facijes 2 i 3b – prosječne $P_c$ plin-voda krivulje sa devijacijom .....	14
<b>Slika 5-2.</b> Usporedba mjerene i ekstrapolirane zasićenosti vode.....	17

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
$P_c$	kPa	kapilarni tlak
$r$	m	radijus grla pora
$\sigma$	N/m	površinska napetost između fluidnih faza
$\theta$	stupnjevi	kontaktni kut između čvrste površine i sučelja tekućine i tekućine ili plina i tekućine
<i>lab</i>	/	laboratorijski uvjeti
<i>res</i>	/	ležišni uvjeti
<i>o-w</i>	/	sustav nafta-voda (engl. <i>oil-water conditions</i> )
<i>a-w</i>	/	sustav zrak-voda (engl. <i>air-water conditions</i> )
$P_c^{max}$	kPa	maksimalni kapilarni tlak
$k$	mD	propusnost
$\phi$	%	poroznost

## 1. UVOD

U geološkim modelima svaki tip stijene ležišta podsvrstan je u facijese, na temelju taložnog okruženja, litologije, što je sve popraćeno svojevrsnim dnevničkim zapisom. Svaki facijes je zatim evaluiran u smislu petrologije, te su uzorci mjereni rutinskim i posebnim analizama jezgre. Facijesi učinkovito dijele stijene tijela ili ležišta u skupine koje prikazuju značajne trendove u petrofizikalnim svojstvima poroznosti, propusnosti, kapilarnog tlaka, relativne propusnosti i stlačivosti. Oznake ležišta pružaju odnos između litologije ležišta, petrofizikalnih svojstava i žičanog zapisnika formacije (engl. *wire-line signature*) (Honarpour et. al., 2002). Geološki modeli i koji uključuju navedena svojstva (i razdiobe unutar) ležišta koriste se u gotovo svakoj fazi procjene ležišta i razrade ležišta.

### 1.1. Temeljni koncepti kapilarnog tlaka

Kapilarni tlak svojstvo je koje je posljedica kemizma stijene, fluida u porama, geometrije (tj. morfologije) pora, ali i uvjeta tlaka i temperature. Da bi došlo do pojave kapilarnog fenomena, mora postojati međupovršinska napetost između fluida u kapilarama (tj. porama), što znači da se fluidi ne miješaju (npr. voda i plin ili plin i nafta ili voda i nafta), tj. da postoji vidljiva razdjelnica pri takvim kapilarnim zadanim uvjetima. Dva tako odvojena fluida u različitim porama imaju svoju liniju razgraničenja na različitim visinama, ovisno o sili kapilarnog dizanja. Do te različitosti tih sila dolazi zbog različitih odnosa sila adhezije uz stijenke pora (matriks), i gravitacijske sile kojom bi se dva fluida razdijelila uvijek na istoj visini, bez prisustva kapilarnih sila.

Temeljna jednadžba koja povezuje kapilarni tlak s veličinom grla pora poroznog medija i tekućinama u porama:

$$P_c = \frac{2}{r} \cdot \sigma \cdot \cos(\theta) \quad (1-1)$$

gdje su:

$P_c$  = kapilarni tlak, Pa,

$r$  = radijus grla pora, m,

$\sigma$  = površinska napetost između fluidnih faza, N/m,

$\theta$  = kontaktni kut između čvrste površine i sučelja tekućine i tekućine ili plina i tekućine, stupnjevi.



Jednadžba (1-1) označava obrnuti odnos između veličine (radijusa) grla pora i kapilarnog tlaka. Jednadžba također pokazuje da će doći do smanjenja kapilarnog tlaka kako se smanjuje površinska napetost između faza fluida.

Ovo je Laplaceova jednadžba koja pretpostavlja kapilaru-cjevčicu. Kod složenijih oblika, kao što su to pore, Laplaceova jednadžba može poslužiti generalnom određivanju rasporeda veličina pora, međutim, upotreba ove jednadžbe je i u tom slučaju ipak limitirana.

Klasifikacija podataka o kapilarnom tlaku na temelju geoloških facijesa povezana je s varijacijom raspodjele veličine tijela pora grla / pora povezane sa svakim facijesom.

Krivulje kapilarnog tlaka primarnog isušivanja (drenaže, engl. *drainage*) koriste se za procjenu zasićenosti konatne vode u ležištu iznad izvornog kontakta nafte i vode ili plina i vode (Newsham et al., 2003) Iz tih podataka mogu se odrediti i debljina prijelazne zone i ireducibilna zasićenost vodom. Dobiveni granični tlak iz primarne drenažne kapilarne krivulje tlaka koristi se za određivanje pomaka između kontakta vode i nafte ili plina i vode i razine slobodne vode. Te su informacije potrebne kako bi se zasićenost vode u ležištu mogla procijeniti iz laboratorijski izmjerenih podataka o kapilarnom tlaku. Podaci o izlaznom kapilarnom tlaku također se mogu koristiti za procjenu raspodjele veličine tijela pora/ pora uzorka (Newsham et.al., 2003). Karakteristični podaci o kapilarnom tlaku mogu biti najbolji izvor podataka za izračun ireducibilne zasićenosti vode kada osnovni podaci nisu dostupni. Podaci o kapilarnom tlaku također se mogu koristiti za procjenu integriteta ležišta.

Ispitivanja kapilarnog tlaka primarne drenaže simuliraju izvorno punjenje ležišta s nemočivom fazom, plinom ili naftom.

U tipičnom mjerenju primarnog drenažnog kapilarnog tlaka, temeljito očišćen uzorak u početku je potpuno zasićen močivom fazom, obično slanom vodom. Nemočiva faza, bilo plina ili nafte, prisiljena je u stijenu, istiskujući močivu fazu, koristeći niz povećanja tlačnih koraka. Pri svakom primijenjenom tlačnom koraku dopušteno je da se zasićenost uravnoteži i mjeri se količina tekućine koja se istiskuje (i utiskuje).

Krivulja kapilarnog tlaka ovisi o močivosti fluida pomoću kojih mjerimo potrebne vrijednosti. Ako je stijena zasićena nemočivom fazom, a mi jezgru zasićujemo močivom fazom, dolazi do nadomještanja nemočive faze. Taj proces naziva se imbibicija (lat. *imbibitio* = usisavanje, upijanje, vlaženje, namakanje). Isušivanje, tj. dreniranje (engl. *drainage*) je proces utiskivanja nemočivog fluida u stijenu zasićenu močivim fluidom. Potrebno je primijeniti određeni tlak kako bi se svladale kapilarne sile u jezgri. Potrebni tlak za početak procesa isušivanja, tj. da nemočivi fluid uđe u najveće pore, označava se kao ulazni tlak (engl. *threshold pressure*) (Vulin, 2016)

## 2. METODE MJERENJA KAPILARNOG TLAKA

Postoje tri laboratorijske metode koje se obično koriste za mjerenje primarnog drenažnog kapilarnog tlaka u stijeni, metoda polupropusne membrane (obnovljeno stanje), metoda centrifuge i metoda utiskivanja žive. Tri uobičajene metode detaljno će se raspravljati, jer svaka metoda ima svoje prednosti i nedostatke.

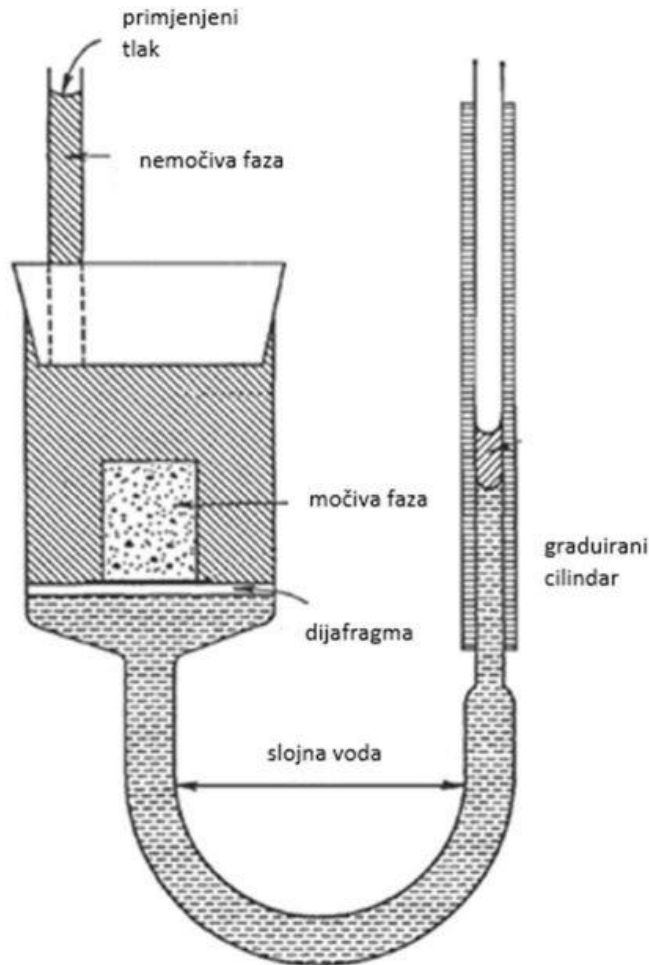
### 2.1. Metoda polupropusne membrane

Metoda polupropusne membrane koristi vodopropusnu polupropusnu membranu, uglavnom izrađenu od porculana, celuloze ili spojenog stakla, koja ima fine pore ujednačene veličine. Kada je zasićena močivom fazom, ploča pokazuje visoki ulazni tlak do ulaska u nemočivu fazu. Polupropusna membrana se koristi kako bi se izolirala komora koja sadrži uzorak jezgre, te je zasićena močivom fazom i u kontaktu sa pločom kao što je prikazano na slici 2-2. (Honarpour et al., 2002). Uzorak jezgre izložen je nemočivoj fazi te primijenjen je diferencijalni tlak između te faze i vanjske strane ploče. Dakle, nemočiva faza je utisnuta u jezgru sa svih strana, jer se močiva faza pomiče u polupropusnu membranu i kroz nju, što postupak čini različit od postupaka određivanja propusnosti gdje postoji razlika tlakova na ulazu i izlazu iz uzorka jezgre.

U testu, tlak utiskivane faze polako se povećava dok se ne postigne granični tlak uzorka jezgre. U tom momentu prve količine utisnute faze prevladavaju najmanje kapilarne tlakove fluida kojima je zasićena jezgra. Tlak se zatim povećava postupno u koracima, a svaka razina tlaka se održava dok prinos primarne faze (kojom je početno jezgra bila zasićena 100%) iz uzorka ne prestane. Proces postizanja ravnoteže mnogo je sporiji pri niskim kapilarnim tlakovima (Lin et al., 2017).

Općenito, metoda polupropusne membrane smatra se najtočnijom od tri metode, pod uvjetom da je osigurano dovoljno vremena za postizanje ravnoteže. Može se koristiti na heterogenim ili laminiranim uzorcima.

Međutim, eksperiment polupropusnih membrana mnogo je sporiji od ostalih metoda. Ponekad će možda biti potrebno mjesec dana da se postigne ravnoteža na svakom koraku. Kraće vrijeme uravnoteženja može se postići postavljanjem tanke ploče s visokim ulaznim tlakom preko deblje ploče s nižim ulaznim tlakom koji služi za podupiranje krhke ploče. Prazan uzorak može se koristiti u testu polupropusne membrane kako bi se otkrio gubitak vode tijekom ovog dugoročnog eksperimenta (Honarpour et al., 2002).



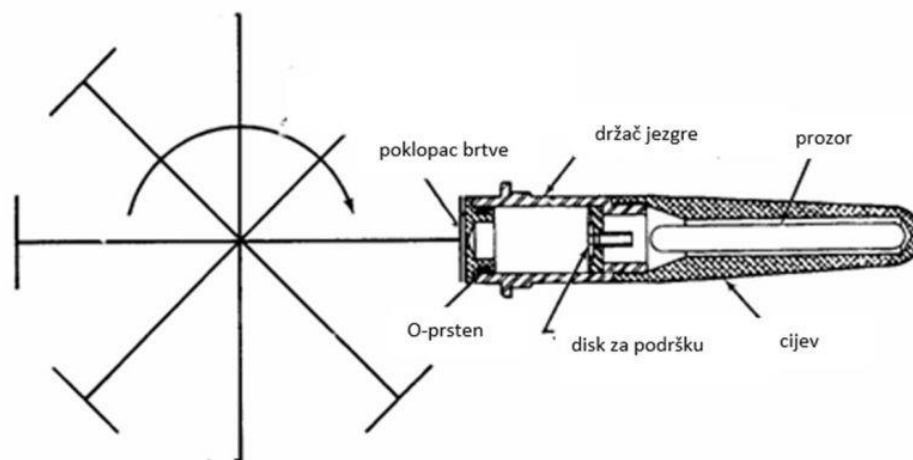
**Slika 2-1.** Metoda polupropusne membrane (Vulin, 2016)

## 2.2. Metoda centrifugiranja

U tehnici centrifuge, pojedinačni čepovi jezgre koji sadrže visoku (tj. 100 %) zasićenost jedne faze montirani su u držače jezgre i smješteni u centrifugu (Honarpour et al., 2002). Čepovi su u kontaktu s drugom (kapljevitom) fazom. Centrifugalna sila, primijenjena rotiranjem uzorka, kao što se vidi na slici 2-2., stvara gradijent tlaka u svakoj tekućoj fazi koji se razlikuje ovisno o gustoći tekućine. Kako se faza *proizvodi* s jednog kraja jezgre, druga faza ulazi sa suprotnog kraja kako bi ju zamijenila. Brzina centrifuge se zatim povećava postupno i održava se konstantnom pri svakom koraku dok proizvodnja ne prestane. Kumulativna proizvodnja proizvedene faze mjeri se pri svakoj brzini vrtnje. Ovisno o konfiguraciji nositelja jezgre, može se proizvesti ili manje gusta ili gušća faza.

Metoda centrifuge je brža od polupropusne membrane, ali ne tako brza kao metoda utiskivanja žive. Tipično vrijeme uravnoteženja za svaki korak je tri do pet dana. No, čvršći uzorci mogu zahtijevati i dulje vrijeme uravnoteženja. Metoda centrifuge ne preporučuje se heterogenim ili laminiranim stijenama jer metoda analize podataka možda neće točno

pristupiti raspodjeli tekućina u heterogenoj stijeni. Također, za visoko propusne stijene mogu se pouzdano prikupljati vrlo ograničeni podaci pri niskim kapilarnim tlakovima.



**Slika 2-2.** Metoda centrifuge (Vulin, 2016)

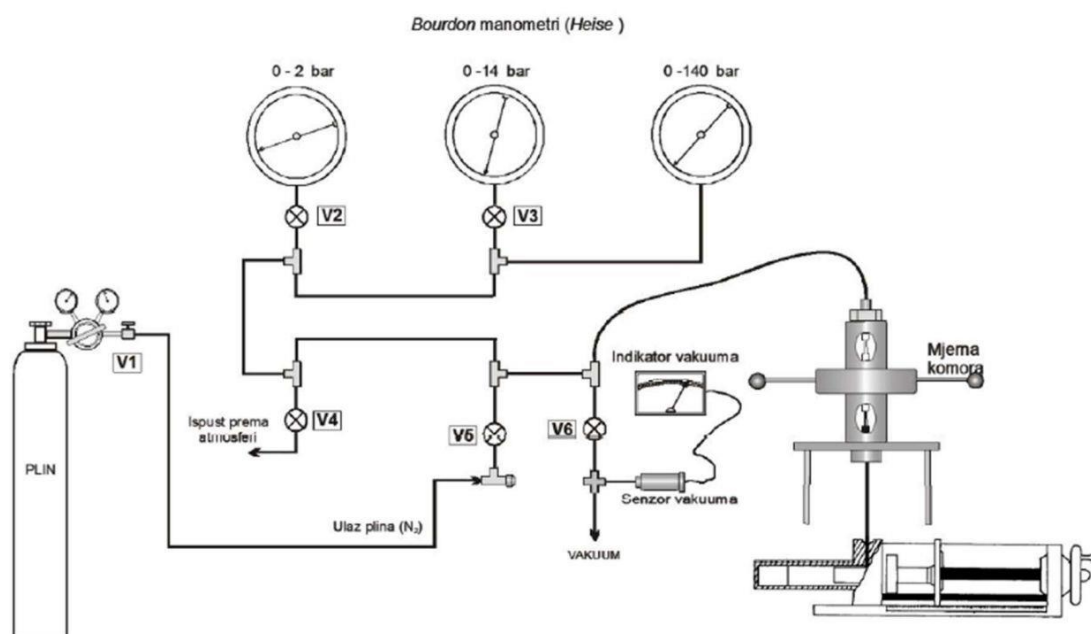
### 2.3. Metoda utiskivanja žive

U metodi utiskivanja žive uzorak koji je ekstrahiran, osušen i evakuiran uronjen je u tekuću živu. Tlak se zatim povećava postepeno, a količina žive koja ulazi u uzorak mjeri se i pretvara u zasićenu nemočivu fazu. Budući da je živa nemočiva faza u osnovnom materijalu, to su mjerenja isušivanja. Kako je tlak plinovite faze (zrak ili dušik) vrlo mali, apsolutni tlak tekuće žive je kapilarni tlak, a zasićenost živom može se izračunati izravno iz upijene žive i volumena pora uzorka. Kapilarni tlak utiskivanjem žive može se koristiti za karakterizaciju najmanjih pora, a metoda se može primijeniti na male i nepravilno oblikovane uzorke stijene (npr. krhotine iznesene prilikom bušenja). S posebnom opremom, testovi utiskivanja žive mogu se provesti s maksimalnim vanjskim tlakom (engl. *maximum confining stress*) od 68950 kPa i maksimalnim tlakom utiskivanja žive od 34500 kPa (ekvivalent  $P_c = 6895$  kPa) (Honarpour et al., 2002).

Jako je jednostavna i za razliku od prve dvije obrađene metode, vrijeme potrebno za izvođenje cijelog postupka je znatno kraće (Herceg, 2009). Metoda utiskivanja žive najbrža je od tri metode, ali je još uvijek podložna pogreškama povezanim s vremenom uravnoteženja. Odgovarajuća ravnoteža može zahtijevati više od jednog dana ili čak tjedan dana za potpuno mjerenje stijena niske kvalitete.

Samo metoda utiskivanja žive omogućuje praktično mjerenje ulaznog tlaka, tlak pri kojem močiva faza nestaje utjecajem nemočive faze.

Metoda utiskivanja žive može pružiti pouzdane podatke o kapilarnom tlaku kao što su rezultati polupropusne membrane i centrifuge, pod uvjetom da su uzorci ujednačeni, visokokvalitetne stijene, a ispitivanja se provode pod ograničenim naprežanjem s dovoljnim vremenom da dođe do uravnoteženja. Zapravo, u takvim rijetkim situacijama očekuje se da će sve tri metode dati slične rezultate. Međutim, budući da živa nije ležišni fluid, metoda možda neće točno replicirati procese migriranja ležišnog fluida kroz ležište, osobito u području niske zasićenosti. Podatke o utiskivanju žive treba potvrditi jednom od druge dvije metode prije nego što se koriste za izračun raspodjele tekućine u ležištu.



**Slika 2-3.** Metoda utiskivanja žive (Vulin, 2016)

## 2.4. Ostale metode

### 2.4.1. Desorpcija/adsorpcija

Među, u geoznanostima manje korištenim, metodama mjerenja kapilarnog tlaka je i desorpcija vodene pare te adsorpcija/desorpcija dušika na niskim temperaturama. Ove metode se obično ne koriste i ograničene su na mjerenje vrlo visokih kapilarnih tlakova u rasponu od približno 6895-68950 kPa.

### 2.4.2. Metode kontinuiranog utiskivanja

Postoji nekoliko varijacija metode polupropusne membrane. Jedna od njih je metoda kontinuiranog utiskivanja, u kojoj se voda istiskuje u uzorak jezgre kontinuiranim sporim utiskivanjem laboratorijske nafte. Metoda u puno kraćem vremenu izmjeri  $P_c$  i električna

svojstva stijene nego metoda polupropusne membrane (Honarpour i Huang, 1995). Međutim, metoda kontinuiranog utiskivanja zahtijeva skupu opremu i možda neće pružiti pouzdane podatke o kapilarnom tlaku, jer nije osigurano dovoljno vremena za postizanje ravnoteže, osim pri vrlo niskim brzinama utiskivanja.

#### 2.4.3. Poludinamički testovi

Poludinamička metoda je još jedna metoda za mjerenje tlaka kapilara u sustavu naftavoda. Ova metoda temelji se na utiskivanju nafte u stabilnom stanju kroz čep jezgre dok voda neprestano "pere" izlaznu stranu jezgre. Ovo "pranje" koristi se za uspostavljanje kontinuiteta vodene faze između vode unutar jezgre i izlaza gdje se mjeri tlak vode, a također omogućuje invaziju vode u uzorak tijekom procesa imbibicije kako se smanjuje tlak utiskivanja nafte.

Poludinamički testovi primarne drenaže počinju utiskivanjem nafte vrlo niskom brzinom u uzorak koji je u početku zasićen slanom vodom. Brzina utiskivanja nafte povećava se postupno dok se brzina protoka vode održava konstantnom pri niskoj vrijednosti s iznimno niskim padom tlaka. U ranijoj verziji ove metode predloženo je praćenje zasićenja *in situ* pomoću ultrazvuka za mjerenje lokalnog zasićenja vode, što je bilo povezano s izmjerenim kapilarnim tlakom. U nastavku, *in situ* nadzor zasićenja zamijenjen je kombinacijom analitičkih i numeričkih simulacija. Konačne  $k_r$  i  $p_c$  krivulje određene su prosječnim zasićenjima koje odgovaraju povijesti i lokalnim tlakovima.

Prednosti poludinamičke metode su u tome što omogućuje mjerenje kapilarnog tlaka u ležištu koje je zapunjeno i pravodobno potpune podatke o imbibiciji i odvodnji (npr. tjedan dana). Nedostaci su da možda nije prikladan za heterogene stijene zbog poteškoća u određivanju lokalnog zasićenja od prosječnog zasićenja simulacijama i može biti prikladan samo za mjerenja niskog kapilarnog tlaka. Nadalje, električna svojstva se ne dobivaju ovom metodom.

Ostale metode izvođenja kapilarnog tlaka i relativne propusnosti iz jednog testa protoka su uspješne, ali nisu široko prihvaćene za mjerenje primarnog drenažnog kapilarnog tlaka.

### 3. PRIPREMA UZORKA, METODE MJERENJA I UVJETI ISPITIVANJA

#### 3.1. Ogledni pribor i rukovanje

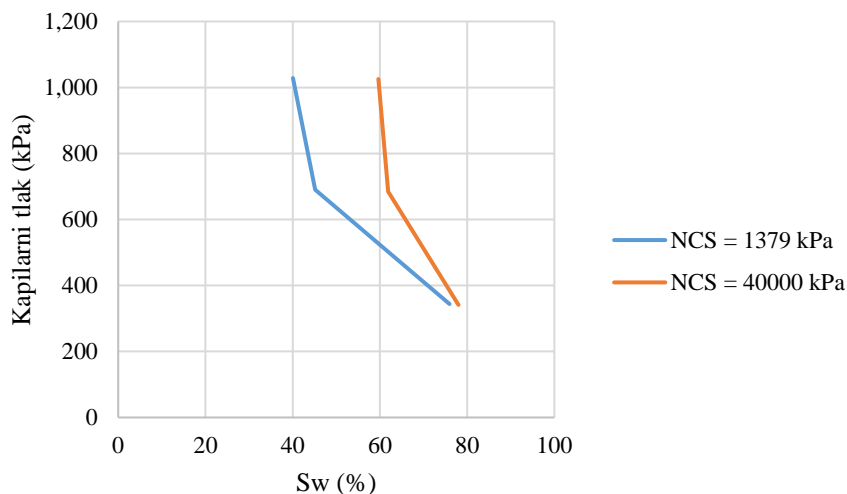
Uzorke treba odabrati kako bi se obuhvatili rasponi poroznosti i propusnosti unutar facijesa. S krhkim ili nekonsolidiranim uzorcima mora se postupati pažljivo kako bi se osiguralo da je njihov mehanički integritet nepromijenjen. Uzorke treba pregledati kako bi se utvrdile heterogenosti, pregrade, barijere i prijelomi pomoću CT skeniranja i petrografske analize.

#### 3.2. Ogledno čišćenje

Potrebno je osigurati vodomogućiv uzorak, ako je izvorno stanje stijene akumulacije većinski vodomogućivo (Honarpour et al., 2002). Jezgrene čepove treba pažljivo očistiti kombinacijom azeotropa i otapala (npr. tetrahidroksifuran, metanol). Miscibilno čišćenje protočnom tehnikom može biti potrebno kako bi se izbjegla promjena strukture pora ili mehaničkog integriteta stijene. Uzorke pješčenjaka niže kvalitete, posebno one s propusnošću manjom od 10 mD, treba pažljivo ispitati kako bi se osiguralo da čišćenje i sušenje omogućuje temeljito uklanjanje organske tvari i soli, ali ne mijenja strukturu i raspodjelu pora stijene.

#### 3.3. Uvjeti odabira i testiranja metode ispitivanja

Mjerenja kapilarnog tlaka uvijek treba provoditi pod ograničenim naprezanjem kako bi se točno duplicirala struktura pora pod početnim neto naprezanjem ležišta. Učinak TGS-a (tlak gornjih stijena) (engl. *net confining stress*, *NCS*) na kapilarni tlak (i propusnost) može biti znatan, posebno za uzorke niske propusnosti, kako je prikazano na slici 3-1. Treba izbjegavati promjene naprezanja, jer može promijeniti strukturu pora slabijih stijena.



**Slika 3-1.** Utjecaj graničnog naprežanja na primarni drenažni kapilarni tlak

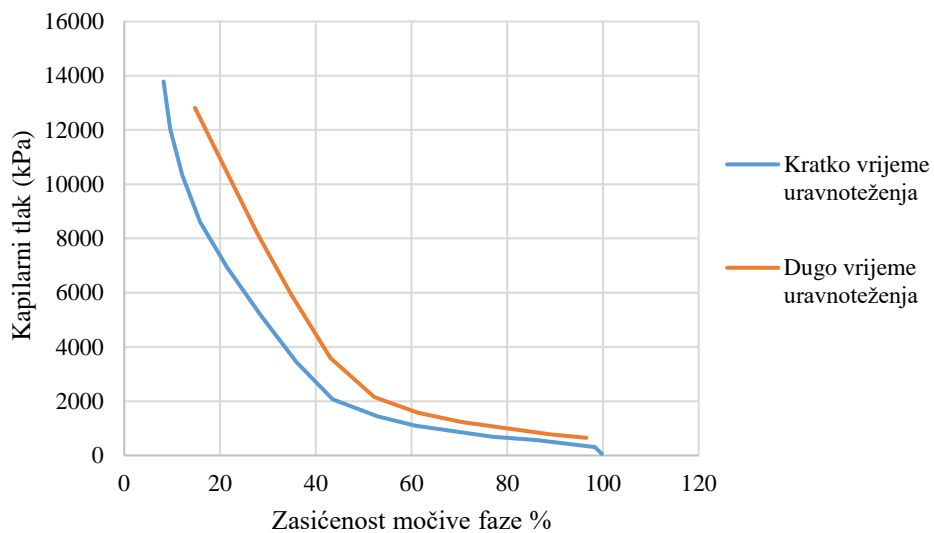
Metoda centrifuge može se odabrati za homogene uzorke jezgre (engl. *homogeneous plug*) ako mjerenja električnih svojstava nisu potrebna. Metodu polupropusne membrane treba odabrati za heterogene uzorke jezgre ili ako su potrebna mjerenja električnih svojstava. Treba izvršiti mjerenja do dovoljno visokog kapilarnog tlaka da pokrije cijelu visinu ležišta.

### 3.4. Vrijeme uravnoteženja

Za sve tri metode važno je da se na svakom koraku tlaka dopusti potrebno vrijeme uravnoteženja. Često se ispitivanja kapilarnog tlaka polupropusnih membrana provode pomoću proizvodne stope kao što je  $<0,5\%$  volumena pora (PV)/dan kao kriterij za određivanje kada prijeći na sljedeći viši kapilarni tlak (Honarpour et al., 2002). Poželjno je koristiti strože kriterije, npr, zaustaviti proizvodnju na tri dana. Iste kriterije trebalo bi primjenjivati i pri metodi centrifuge. Ovi stroži kriteriji posebno su važni kada se ispitivanja provode na uzorcima niske propusnosti.

Često se testovi utiskivanja žive provode s fiksnim vremenom koje se koristi u svakom koraku mjerenja tlaka. Preferira se korištenje strožih kriterija za uzorke niske propusnosti, kao što je bez promjene tlaka utiskivanja 10 minuta po točki. Podaci o kapilarnom tlaku utiskivanja žive prikazani na slici 3-2. prikupljeni su najprije u standardnom, ali neadekvatnom vremenu uravnoteženja. Pružanje dužeg vremena za uravnoteženje proizvelo je reprezentativniju krivulju kapilarnog tlaka, kao što je prikazano na slici.





**Slika 3-2.** Utjecaj vremena uravnoteženja na metodu utiskivanja žive

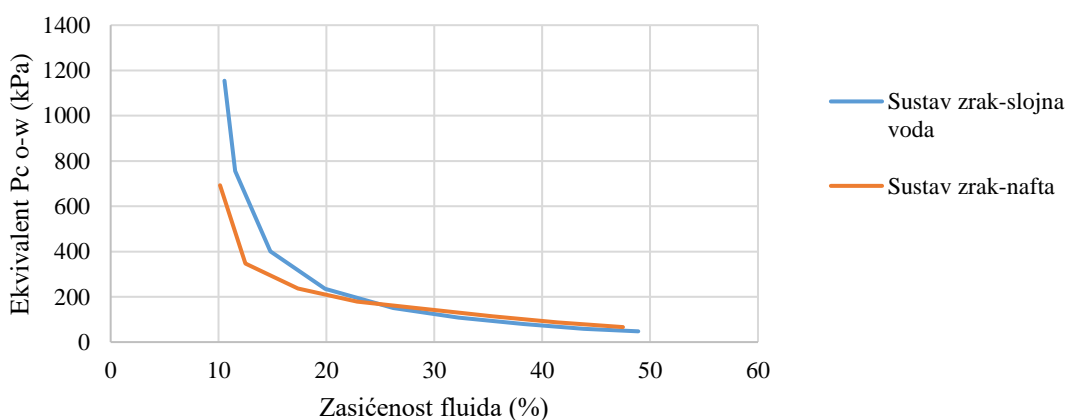
Operativna razmatranja (kao što su trošak ili vrijeme koje je potrebno za testiranje) mogu utjecati na odabir ispitne metode. Ako je tako, može se smanjiti broj mjerenja tlaka po uzorku, ali mora biti dopušteno dovoljno vremena za postizanje ravnoteže na svakom koraku.

#### 4. TIPOVI FLUIDA I UČINAK MOČIVOSTI NA KAPILARNI TLAK

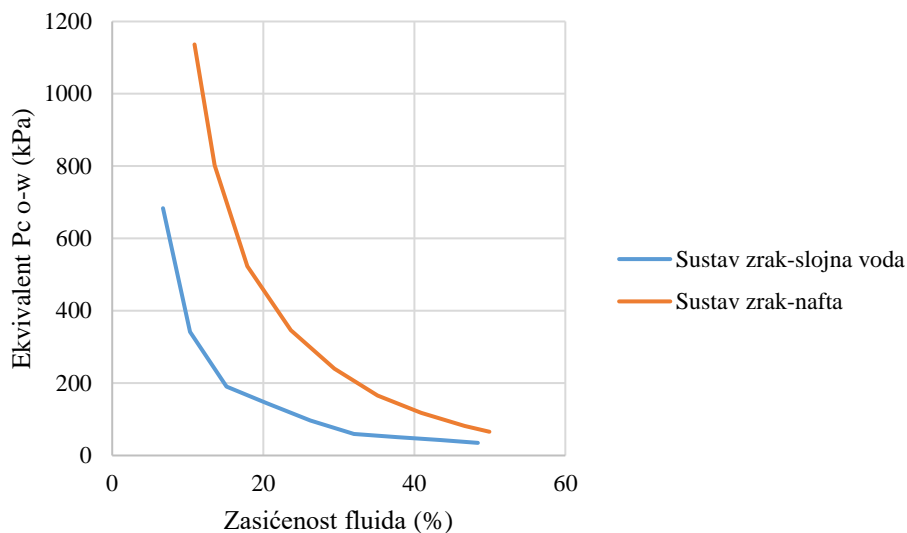
Sintetički uzorak slane otopine vode, na bazi kemijskog (ionskog) sastava slojne vode koristi se umjesto originalnog uzorka slojne vode kako bi se izbjeglo stvaranje oštećenja kao što su bubrenje gline i migracija finih čestica.

Usporedba podataka o tlaku sustava zrak-nafta i sustava nafta-voda može biti pokazatelj komparativne močivosti (Honarpour et al., 2002). Na slici 4-1. sličnost podataka o  $P_c$  iz dvaju fluidnih sustava pokazuje da je uzorak vodomogućiv. Na slici 4-2. divergencija krivulje za  $P_c$  i niža ireducibilna zasićenost vodom postignuta ispitivanjem sustava zrak-voda ukazuju na naftomogućivi karakter drugog uzorka.

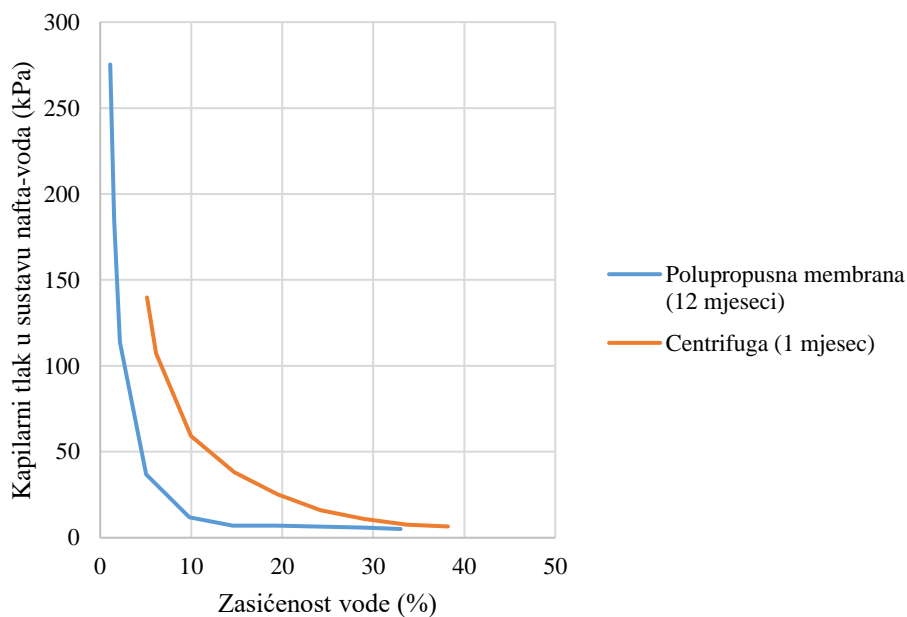
Kada se nafta koristi u testu kapilarnog tlaka (jako rijetko, također zbog niza tehničkih problema koristi se reprezentativno laboratorijsko ulje), moguće je da se močivost uzorka može promijeniti tijekom ispitivanja i tako promijeniti ponašanje kapilarnog tlaka uzorka. Taj je učinak prikazan na slici 4-3., gdje je uzorak postao naftomogućiv tijekom dugotrajnog ispitivanja polupropusne membrane, u usporedbi s relativno brzim testom centrifuge.



**Slika 4-1.** Kapilarni tlak pri sustavu zrak-nafta te pri sustavu zrak-slojna voda indikativan više za vodomogućive karakteristike



**Slika 4-2.** Kapilarni tlak pri sustavu zrak-nafta te pri sustavu zrak-slojna voda indikativan više za naftomočive karakteristike



**Slika 4-3.** Podaci metode centrifuge i polupropusne membrane o promjeni močivosti tijekom testa polupropusne membrane

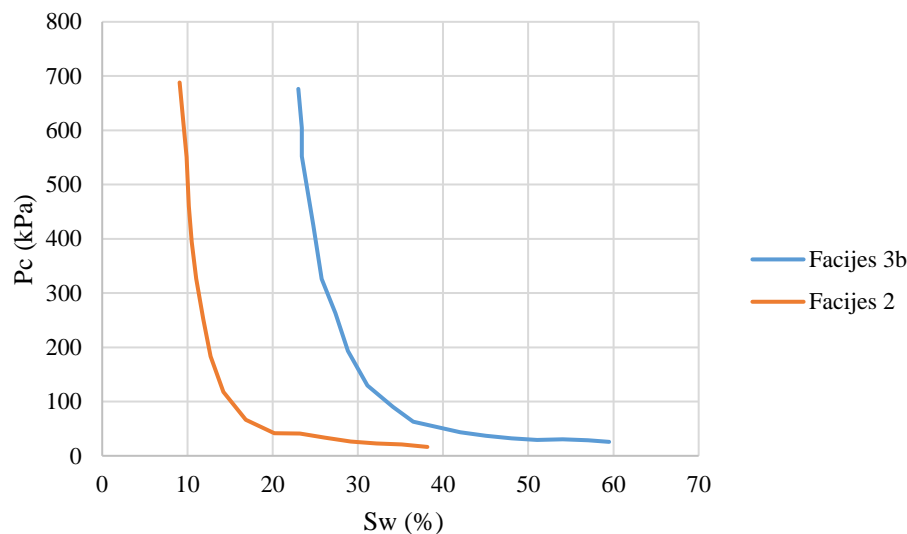
#### 4.1. Količina podataka

Minimalni broj mjerenja  $P_c$  potrebnih za stvaranje rigoroznih modela kapilarnog tlaka ovisi o homogenosti formacije. Za homogenije formacije potrebno oko 3-5 testova po

facijesu ili spremniku za propusnost. Za heterogene formacije može biti potrebno 6-12 testova po facijesu (Honarpour et al., 2002).

## 5. OBRADA $P_c$ PODATAKA

Obrada podataka je potrebna jer tijekom mjerenja se izmjere kapilarni tlakovi za male jezgrice, no iz tih podataka se ne može procijeniti dizanje vode u ležištu, a time i zasićenje vodom. Nakon obrade podataka potrebno je odrediti jednu reprezentativnu krivulju za cijelo ležište. Za svaki facijes postoje rasponi poroznosti i propusnosti povezani s tim facijesom. Stoga se očekuje niz krivulja kapilarnog tlaka, predstavljajući ovu varijaciju u petrofizikalnim svojstvima. Slika 5-1. prikazuje varijaciju prosječnih  $P_c$  za facijes 2 i 3b u skupini ležišta sa sličnim okruženjem taloženja, (Honarpour et al., 2002).



**Slika 5-1.** Facijes 2 i 3b – prosječne  $P_c$  plin-voda krivulje sa devijacijom

Na svakom od važnih facijesa ležišta često se provodi nekoliko testova kapilarnog tlaka, idealno s uzorcima koji obuhvaćaju raspon petrofizikalnih svojstava facijesa. Zatim se pokušavaju dodijeliti prosječni kapilarni tlakovi svakom facijesu ili korelirati krivulje kapilarnog tlaka s petrofizikalnim svojstvima unutar svakog facijesa. Leverett je predstavio ideju bezdimenzionalne korelacije kapilarnog tlaka, definiranu kao Leverett J-funkciju (Leverett, 1941):

$$J = \left[ \frac{P_c}{\sigma \cos(\theta)} \right] \cdot [k/\phi] \quad (5-1)$$

Gdje su:

$J$  - vrijednost pri određenoj zasićenosti, bezdimenzionalna,

$P_c$  – kapilarni tlak pri određenoj zasićenosti, Pa,

$\sigma$  – površinska napetost, N/m,

$\theta$  – kut kontakta, stupnjevi,

$k$  – propusnost, mD,

$\phi$  – poroznost, %.

Leveret J-funkcija povezuje varijacije poroznosti, propusnosti i močivosti, ali ne uzima u obzir varijacije u geometriji pora u facijesu. Međutim, močivost, kao što je predstavljeno  $\cos(\theta)$ , se uglavnom pretpostavi i kut kontakta se rijetko mjeri na stijenama akumulacije (Leverett, 1941).

Uvijek postoje nesigurnosti u mjerenjima kapilarnog tlaka zbog pogreške u mjerenju volumena pora, nedostatka potrebne ravnoteže i potencijalnog gubitka tekućine tijekom eksperimenta. Za homogene uzorke, procjenjuje se da su tipična očekivana odstupanja čak +/-2 posto zasićenja za svaku od tri metode mjerenja. Veća odstupanja (+/-5 postotka zasićenja) mogla bi biti posljedica neprikladne uporabe metode centrifuge za heterogene stijene ili stijene sa složenom geometrijom pora. Veću nesigurnost u mjerenju treba očekivati pri ispitivanju niske poroznosti (<5%) stijena, ali korištenje veće veličine uzorka moglo bi pomoći u smanjenju ove pogreške (Leverett, 1941).

## 5.1. Homogenizacija $P_c$ podataka

### 5.1.1. Međupovršinska napetost i kut kontakta

Laboratorijski izmjereni podaci o kapilarnom tlaku moraju se pretvoriti u ekvivalentne podatke o kapilarnom tlaku ležišta prije nego što se koriste u proračunima u ležišnom inženjerstvu. Pretvorba u uvjete ležišta postiže se sljedećom jednadžbom (Leverett, 1941):

$$\left[ \frac{P_c}{\sigma \cos(\theta)} \right]_{lab} = \left[ \frac{P_c}{\sigma \cos(\theta)} \right]_{res} \quad (5-2)$$

gdje su:

$P_c$  – kapilarni tlak, Pa,

$\sigma$  – površinska napetost, N/m (dyn/cm),

$\theta$  – kut kontakta, stupnjevi,

lab = laboratorijski uvjeti,

res = ležišni uvjeti.

Pretvorba između laboratorijskih fluidnih sustava koristi sličnu jednadžbu. Na primjer, za pretvaranje kapilarnog tlaka iz sustava zrak-voda u sustav nafta-voda koristi se sljedeća jednadžba:

$$\left[ \frac{P_c}{\sigma \cos(\theta)} \right]_{o-w} = \left[ \frac{P_c}{\sigma \cos(\theta)} \right]_{a-w} \quad (5-3)$$

gdje:

$P_c$  – kapilarni tlak, Pa,

$\sigma$  – površinska napetost, N/m,

$\theta$  – kut kontakta, stupnjevi,

- 0 stupnjeva – idealno za sustav zrak-voda,

- 30 stupnjeva – idealno za sustav nafta-voda,

o-w – sustav nafta-voda (engl. *oil-water conditions*),

a-w – sustav zrak-voda (engl. *air-water conditions*).

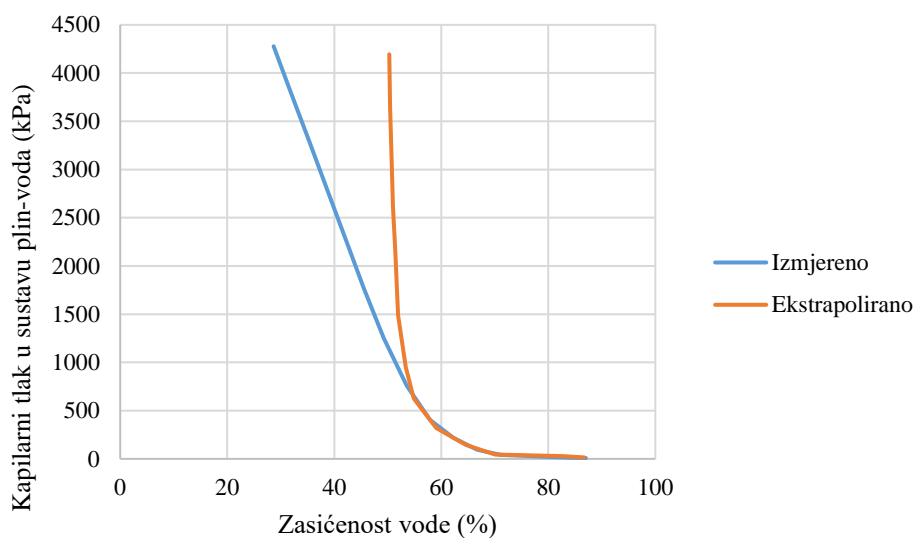
Poželjno je izmjeriti međupovršinsku napetost stvarnih laboratorijskih tekućina korištenih u mjerenjima kapilarnih tlakova, prije i nakon ispitivanja. Međupovršinska napetost sustava plin - voda vrlo je podložna blagim promjenama u kemizmu slane vode, a možda na nju može utjecati tip stijena (pješčjenjak ili karbonat) koja je u kontaktu sa slanom vodom. Kako bi se laboratorijski podaci točno pretvorili u podatke o stanju ležišta, mjerenja međupovršinske napetosti za fluide iz ležišta od interesa treba izvršiti u uvjetima ležišta. Međutim, mjerenja kontaktnog kuta na poliranim površinama nekih minerala možda neće biti reprezentativna za moćivost ležišta (Leverett, 1941).

Metoda pada privjeska ne daje pouzdana i točna mjerenja međupovršinske napetosti, posebno pri vrlo niskim vrijednostima međupovršinske napetosti. Te niske vrijednosti su nam potrebne za podatke o sustavu plin-nafta. Kombinacija metoda pada privjeska i raspršivanja svjetlosti poželjnija je za mjerenje međupovršinske napetosti u širokom rasponu vrijednosti međupovršinske napetosti, uključujući sustave nafta-voda i sustave plin-voda. U trofaznoj smjesi (plin-nafta-voda) sve tri faze treba dovesti u ravnotežno stanje prije nego što se međupovršinska napetost izmjeri na svakom tekućem paru.

## 5.2. Metode ekstrapolacije

Mjerenja kapilarnog tlaka treba izvršiti do dovoljno visokog kapilarnog tlaka kako bi se pokrila cijela visina ležišta. Kada se koriste postojeći podaci, s ograničenim  $P_c^{\max}$  za ležišta

s velikom debljinom, eksperimentalni podaci moraju se ekstrapolirati na  $P_c^{\max}$  koji odgovara visini ležišta. To se često radi služeći se algoritmom koji se oslanja na linearnu ekstrapolaciju  $1/P_c$  između posljednjih točaka podataka. Međutim, za uzorke s mrežom dvostruke poroznosti (engl. *dual porosity network*), npr. mnogi karbonati, taj pristup može biti problematičan, kao što je prikazano na slici 5-2 (Honarpour i Huang, 1995). Ekstrapolacija na slici napravljena je na temelju točaka zasićenja na  $P_c = 345$  i  $670$  kPa. Uzorci jezgre s dvostrukom raspodjelom veličine pora često pokazuju uzorak početne desaturacije s povećanjem tlaka, zatim niz tlakova s malo ili nimalo desaturacije, nakon čega slijedi ponovna desaturacija pri višim tlakovima. Ako se mjerenja ne vrše do dovoljno visokog tlaka da uhvate drugu desaturaciju, ekstrapolacija može dati potpuno pogrešne rezultate.



**Slika 5-2.** Usporedba mjerene i ekstrapolirane zasićenosti vode

Zasićenost vode dobivena iz laboratorijskih podataka o odvodnom kapilarnom tlaku mora se integrirati s izračunatom zasićenošću vode iz zapisnika izmjerena u jezgrama (engl. *mud cores*) koje se uzimaju iznad prijelazne zone.



## 6. ZAKLJUČAK

Tijekom mjerenja kapilarnog tlaka uzoraka preuzetih iz ležišta potreban je minimalni broj ispitivanja kako bi se dobio što točniji rezultat. Uzorci se odabiru na način da se obuhvate puni rasponi poroznosti i propusnosti unutar ležišta. Ukoliko dođe do prevelikog naprezanja tijekom mjerenja kapilarnog tlaka stijena će se deformirati, bez obzira na metodu. Tako da će se mjerenja provoditi pri ograničenom naprezanju ležišta. Dobiveni podaci iz metode centrifuge i polupropusne membrane dobro se slažu s homogenim stijenama. Kod heterogenih stijena preporučljivo je koristiti metodu polupropusne membrane za određivanje zasićenja vodom, ali nedostatak je što zahtijeva 6-12 mjeseci vremena testiranja. Podaci dobiveni metodama utiskivanja žive i polupropusne membrane mogu biti suglasni za visokokvalitetnu stijenu, no to nije slučaj kod nekvalitetne stijene. Podaci u sustavu zrak-nafta sukladni su s podacima sustava zrak-voda kod vodomogućih stijena, no ukoliko su naftomogućive stijene ne moraju biti u skladu. Dobra je korelacija ireducibilnog zasićenja vode s petrofizikalnim svojstvima, kao što su poroznost i propusnost. Pouzdano modeliranje kapilarnog tlaka se zasniva na opsežnim i reprezentativnim mjerenjima.

## 7. POPIS LITERATURE

1. HERCEG, H., 2009. Određivanje raspodjele veličina otvora pora iz podataka dobivenih mjerenjem kapilarnih tlakova metodom utiskivanja žive. Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
2. HONARPOUR, M.M., DJABBARAH, N.F., KRALIK, J.G., 2004. Expert-Based Methodology for Primary Drainage Capillary Pressure Measurements and Modeling.
3. HONARPOUR, M.M., SAMPATH, K., DJABBARAH, N. F., WEBER, S. L., ANIS, M. AND DIXON, S. A., 2002. Facies-Based Capillary Pressure Analysis for Offshore Nigerian Reservoirs, SPE 79188.
4. LEVERETT, M.C., 1941. Capillary Behavior in Porous Solids, SPE-941152-G.
5. HONARPOUR, M.M., HUANG, D.D., 1995. Simultaneous Measurements of Relative Permeability, Capillary Pressure, and Electrical Resistivity with Microwave System for Saturation Monitoring, SPE 30540.
6. LIN, Q., BIJELIĆ, B., RIEKE, H., BLUNT, M.J., 2017. Visualization and quantification of capillary drainage in the pore space of laminated sandstone by a porous plate method using differential imaging X-ray microtomography.
7. NEWSHAM, K.E., RUSHING, J.A., LASSWELL, P.M., 2003. Use of Vapor Desorption Data to Characterize High Capillary Pressures in a Basin-Centered Gas Accumulation with Ultra-Low Connate Water Saturations, SPE 84596.
8. VULIN, D., 2016. Višefazni protok u poroznoj stijeni. Skripta za kolegij Višefazni protok u poroznoj stijeni. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

## **IZJAVA**

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

Potpis studenta:

*Stjepan Medić*



KLASA: 602-01/22-01/108  
URBROJ: 251-70-12-22-2  
U Zagrebu, 14.09.2022.

**Stjepan Medić, student**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/22-01/108, URBROJ: 251-70-12-22-1 od 01.05.2022. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

### METODE I PRIMJENA ODREĐIVANJA KAPILARNOG TLAKA U STIJENI

Za mentora ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada Prof.dr.sc. Domagoj Vulin nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentor:

(potpis)

Prof.dr.sc. Domagoj Vulin

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje  
Pašić

(titula, ime i prezime)