

# Usporedba različitih metoda analiza močivosti i relativnih propusnosti stijena i njihov utjecaj na iscrpak ugljikovodika iz novog naftnog ležišta u Savskoj depresiji

---

Smajla, Ivan

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:414427>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-30**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**USPOREDBA RAZLIČITIH METODA ANALIZA  
MOČIVOSTI I RELATIVNIH PROPUSNOSTI  
STIJENA I NJIHOV UTJECAJ NA ISCRPAK  
UGLJIKOVODIKA IZ NOVOG NAFTNOG LEŽIŠTA  
U SAVSKOJ DEPRESIJI**

Diplomski rad

Ivan Smajla

N-204

Zagreb, 2017.

USPOREDBA RAZLIČITIH METODA ANALIZA MOČIVOSTI I RELATIVNIH  
PROPUSNOSTI STIJENA I NJIHOV UTJECAJ NA ISCRPAK UGLJIKOVODIKA IZ  
NOVOG NAFTNOG LEŽIŠTA U SAVSKOJ DEPRESIJI

IVAN SMAJLA

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

Sažetak

Laboratorijski je (INA d.d., Služba istraživanja stijena i fluida) ispitivan niz uzoraka jezgre stijene kako bi se jednoznačno odredilo močivost i relativnu propusnost i odabralo reprezentativne podatke za analitičke i simulacijske procjene zavodnjavanja ležišta u Savskoj Depresiji. Ispitana je nova metoda ispitivanja močivosti (dizanje u jezgri, engl. Rise in Core), uspoređena s Craigovim kriterijima močivosti te su također ispitivane močivosti Amottovim testom upotrebom laboratorijskog ulja broj 1, čime je ustanovljeno da preporučeno ulje broj 1 nije prikladno za analize močivosti. Na istim uzorcima su zatim analizirane i uspoređene relativne propusnosti metodama ustaljenog i neustaljenog stanja, mjerene odabranim uljem. Detaljno je opisan postupak mjerenja i interpretacije laboratorijskih podataka. Usklađivanjem je postignuto dobro poklapanje sa simulacijskim modelom jezgre, međutim za primjenu u simulaciji na razini ležišta kao reprezentativna izdvojena je krivulja relativnih propusnosti mjerena metodom neustaljenog stanja.

Ključne riječi: močivost, relativna propusnost, jezgra, ulje, voda, simulacija, ležište.

Diplomski rad sadrži: 63 stranice, 6 tablica, 31 sliku, 5 priloga i 27 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

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

Voditelj: Dr. sc. Domagoj Vulin, izvanredni profesor RGNF  
Pomoć pri izradi: Ante Borovina, mag. ing. i Marko Gaćina, mag. ing., INA d.d.

Ocjenjivači: Dr. sc. Domagoj Vulin, izvanredni profesor RGNF  
Dr. sc. Tomislav Kurevija, izvanredni profesor RGNF  
Dr. sc. Lidia Hrnčević, izvanredni profesor RGNF

Datum obrane: 21. rujna 2017., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

COMPARISON OF DIFFERENT METHODS FOR ANALYSIS OF WETTABILITY  
AND RELATIVE PERMEABILITY OF ROCKS AND THEIR INFLUENCE ON THE  
OIL RECOVERY FROM THE NEW OIL RESERVOIR IN THE SAVA DEPRESSION

IVAN SMAJLA

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

Abstract

A number of rock core samples were investigated in the Laboratory (INA d.d., Rock and Fluid Research Service) to determine the wettability and relative permeability as well as selected representative data for analytical and simulation estimations of waterflooding reservoir in the Sava Depression. A new Rise in Core test was studied, compared to Craig's wetness criteria, and the wettability was also determined by Amott Test using laboratory oil No. 1. It was discovered that recommended oil No. 1 was not suitable for wettability analysis. The same samples were then analyzed and relative permeability was measured by using selected oil in steady-state and unsteady-state method. The method of measurement and interpretation of laboratory data is described in detail. Good matching was achieved using the simulation model of the core. However, relative permeability curve, measured using the unsteady-state method was chosen as representative for simulation at the level of the reservoir.

Keywords: wettability, relative permeability, core, oil, water, simulation, reservoir.

Thesis contains: 53 pages, 6 tables, 31 figures, 5 enclosures and 27 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,  
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Associate Professor Domagoj Vulin, PhD

Technical support and assistance: Ante Borovina, mag. ing. and Marko Gaćina, mag. ing.,  
INA d.d.

Reviewers: Associate Professor Domagoj Vulin, PhD  
Associate Professor Tomislav Kurevija, PhD  
Associate Professor Lidia Hrnčević, PhD

Date of defense: September 21<sup>st</sup>, 2017., Faculty of Mining, Geology and Petroleum  
Engineering, University of Zagreb

## ZAHVALA

*Prije svega želio bi se zahvaliti svome mentoru prof. dr. sc. Domagoju Vulinu na pruženoj stručnoj pomoći pri izradi ovoga diplomskog rada. Zatim bi se želio zahvaliti svojim dobrim prijateljima Marku Gaćini i Anti Borovini na pomoći pri mjerenjima u laboratoriju.*

*Beskonačno hvala mojoj obitelji koja mi je pružala pomoć pri studiranju i uvijek bila uz mene. Uz njihovu bezuvjetnu podršku postigao sam sve što sam želio.*

*Kao šećer na kraju najviše hvala mojoj boljoj polovici Nikol koja je uvijek bila uz mene u dobrim i lošim trenucima te me uvijek nasmijavala i pružala podršku.*

## SADRŽAJ:

1. Uvod .....	1
2. Relativna propusnost .....	2
2.1. Ostale metode određivanja relativnih propusnosti.....	4
2.2. Faktori koji utječu na relativnu propusnost .....	4
2.2.1. Utjecaj strukture i sastava stijene .....	4
2.2.2. Utjecaj zasićenja stijene.....	5
2.2.3. Utjecaj povijesti zasićenja .....	5
2.2.4. Utjecaj kapilarnih rubnih efekata .....	6
2.2.5. Utjecaj površinske napetosti i gustoće ležišnih fluida.....	7
2.2.6. Utjecaj poroznosti i propusnosti stijene.....	7
2.2.7. Utjecaj temperature.....	7
2.2.8. Utjecaj viskoznosti ležišnih fluida.....	7
2.2.9. Utjecaj početnog zasićenja stijene vodom.....	7
3. Močivost.....	8
3.1. Modificirana Amottova metoda.....	8
3.1.1. Proračun indeksa močivosti.....	11
3.2. Metoda podizanja u jezgri (engl. <i>Rise in Core</i> metoda) .....	12
3.3. Craigov kriterij za močivost .....	18
4. Metoda određivanja relativnih propusnosti nestacionarnim stanjem (engl. <i>unsteady-state, USS</i> ).....	20
4.1. Opis mjerenja relativnih propusnosti .....	20
4.2. Proračun relativnih propusnosti (Goričnik, 1986) .....	22
4.3. Normalizacija krivulje relativnih propusnosti (Stiles, 2005).....	30
5. Metoda određivanja relativnih propusnosti stacionarnim stanjem (engl. <i>steady-state, SS</i> ) .....	38
5.1. Opis mjerenja.....	38

5.2.	Proračun relativnih propusnosti .....	41
5.2.1.	Proračun relativnih propusnosti:.....	42
5.2.2.	Proračun zasićenja vodom:.....	43
5.3.	Normalizacija krivulje relativnih propusnosti .....	45
6.	Analiza rezultata .....	49
6.1.	Močivost .....	49
6.2.	Relativne propusnosti .....	49
7.	Simulacija.....	51
7.1.	Model jezgre .....	51
7.2.	Model ležišta.....	52
8.	Zaključak .....	55
9.	Literatura: .....	57
10.	Dodaci: .....	59

## POPIS TABLICA:

Tablica 3-1. Kriteriji močivosti prema Craigu (1971).....	19
Tablica 4-1. Izračunate relativne propusnosti koristeći metodu nestacionarnog stanja. ....	29
Tablica 4-2. Izračunate normalizirane relativne propusnosti. ....	36
Tablica 5-1. Izračunate relativne propusnosti koristeći metodu stacionarnog stanja. ....	44
Tablica 5-2. Izračunate normalizirane relativne propusnosti. ....	48
Tablica 6-1. Rezultati močivosti dobivenih različitim metodama.....	49

## POPIS SLIKA:

Slika 2-1. Krivulje imbibicije i dreniranja za vodu (močiva faza) i naftu (nemočiva faza) (modificirano od Honarpour et al., 1986).....	6
Slika 3-1. Utjecaj močivosti na relativne propusnosti (modificirano od Stiles, 2005).....	8
Slika 3-2. Visokotlačna pumpa i triaksijalni držač jezgre. ....	10
Slika 3-3. Akustični separator i računalo.....	10
Slika 3-4. Specijalna staklena posuda za Amottov test i vaga velike preciznosti. ....	11
Slika 3-5. Držač jezgre, laboratorijska čaša, ručna dizalica i vaga velike preciznosti. ....	14
Slika 3-6. Određivanje nagiba pravca koristeći dodekan. ....	15
Slika 3-7. Određivanje nagiba krivulje promjene mase jezgre prislonjene na površinu fluida u vremenu koristeći ulje 1. ....	16
Slika 3-8. Određivanje nagiba koristeći ulje 16. ....	17
Slika 3-9. Određivanje nagiba koristeći naftu. ....	18
Slika 4-1. Shematski prikaz spajanja opreme za mjerenje relativnih propusnosti metodom nestacionarnog stanja.....	21
Slika 4-2. Prikaz opreme za određivanje relativnih propusnosti metodom nestacionarnog stanja. ....	22
Slika 4-3. Prikaz početka dvofaznog protjecanja ....	23
Slika 4-4. Prikaz relativnih propusnosti dobivenih metodom nestacionarnog stanja.....	30
Slika 4-5. Grafičko određivanje stvarnog ireducibilnog zasićenja uljem.....	31
Slika 4-6. Grafičko određivanje stvarne zadnje točke relativne propusnosti za vodu.....	33
Slika 4-7. Grafičko eliminiranje odskočnika kod određivanja Coreyevog eksponenta $N_o$ . ....	34
Slika 4-8. Grafičko eliminiranje odskočnika kod određivanja Coreyevog eksponenta $N_w$ . ....	35



Slika 4-9. Prikaz normaliziranih relativnih propusnosti.....	37
Slika 5-1. Shematski prikaz spajanja opreme.....	40
Slika 5-2. Oprema za mjerenje otpora jezgre.....	41
Slika 5-3. Prikaz relativnih propusnosti dobivenih metodom stacionarnog stanja.....	44
Slika 5-4. Grafičko određivanje stvarnog ireducibilnog zasićenja uljem.....	45
Slika 5-5. Grafičko eliminiranje odskočnika kod određivanja Coreyevog eksponenta $N_o$ .....	46
Slika 5-6. Grafičko eliminiranje odskočnika kod određivanja Coreyevog eksponenta $N_w$ .....	47
Slika 5-7. Prikaz normaliziranih relativnih propusnosti.....	48
Slika 6-1. Usporedba normaliziranih relativnih propusnosti dobivenih SS i USS metodom.....	50
Slika 7-1. Model (zasićenja) jezgre u simulacijskom programu Schlumberger Eclipse.....	51
Slika 7-2. Usporedba proizvodnje dobivene korištenjem simulatora i stvarne proizvodnje.....	52
Slika 7-3. Model (zasićenja) ležišta u simulacijskom programu Schlumberger Eclipse.....	53
Slika 7-4. Usporedba proizvodnje dobivene korištenjem različitih relativnih propusnosti.....	53

## POPIS DODATAKA:

Dodatak 1. Proračun močivosti Amottovom metodom.....	59
Dodatak 2. Proračun močivosti Rise in Core metodom.....	60
Dodatak 3. Proračun relativnih propusnosti USS metodom.....	61
Dodatak 4. Normalizacija relativnih propusnosti dobivenih USS metodom.....	62
Dodatak 5. Normalizacija relativnih propusnosti dobivenih SS metodom.....	63

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA:

$A$  – površina baze jezgre [ $m^2$ ]

$A$  – volumen spontano istisnute vode [ $cm^3$ ]

$B$  – volumen prisilno istisnute vode [ $cm^3$ ]

$C$  – konstanta  $C$

$C$  – volumen spontano istisnutog ulja [ $cm^3$ ]

$D$  – volumen prisilno istisnutog ulja [ $cm^3$ ]

$\frac{d\left(\frac{1}{w_i t r}\right)}{d\left(\frac{1}{w_i}\right)}$  – koeficijent nagiba krivulje

$f_o$  – frakcijski protok ulja

$k$  – apsolutna propusnost [ $m^2$ ]

$k_o$  – efektivna propusnost za ulje [ $m^2$ ]

$k_o @ S_{wi}$  – propusnost za ulje pri  $S_{wi}$  [ $10^{-12} \cdot m^2$ ]

$k_{ro}$  – relativna propusnost za ulje

$k_{ron}$  – normalizirana relativna propusnost za ulje

$k_{rw}$  – relativna propusnost za vodu

$\frac{k_{rw}}{k_{ro}}$  – omjer relativnih propusnosti

$k'_{rw}$  – relativna propusnost za vodu u zadnjoj točki

$k_{rwn}$  – normalizirana relativna propusnost za vodu

$k_w$  – efektivna propusnost za vodu [ $m^2$ ]

$L$  – duljina jezgre [ $m$ ]

$\frac{m_w^2}{t}$  – nagib pravca (promjena mase u vremenu,  $g^2/s$ )

$OWI$  – indeks močivosti za ulje

$n$  – eksponent zasićenja = 2,13

$N_o$  – Coreyev eksponet za ulje

$N'_o$  – Coreyev eksponent za ulje za jednu točku

$N_w$  – Coreyev eksponent za vodu

$N'_w$  – Coreyev eksponent za vodu za jednu točku

$PV$  – porni volumen [ $\text{cm}^3$ ]

$Q_i$  – protok fluida [ $\text{cm}^3/\text{min}$ ]

$Q_o$  – protok ulja [ $\text{cm}^3$ ]

$q_o$  – protok ulja [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$Q_p$  – protok pumpe [ $\text{cm}^3/\text{min}$ ]

$Q_t$  – ukupni protok fluida [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ]

$Q_w$  – protok vode [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$q_w$  – protok vode [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$R_c$  – otpor jezgre pri zasićenju 100 posto vodom [ $\Omega$ ]

$R_t$  – otpor jezgre [ $\Omega$ ]

$S_{on}$  – normalizirano zasićenje jezgre uljem

$S_{on}$  – normalizirano zasićenje uljem

$S_{or}$  – ireducibilno zasićenje uljem

$S_w$  – zasićenje jezgre vodom

$\bar{S}_w$  – prosječno zasićenje jezgre vodom

$S_{w2}$  – zasićenje vodom na izlaznom kraju jezgre

$S_{wi}$  – početno zasićenje vodom

$S_{wn}$  – normalizirano zasićenje jezgre vodom

$S_{wn}$  – normalizirano zasićenje vodom

$S_{wn}'$  – normalizirano zasićenje jezgre vodom pri  $S_{or} = 1$

$t$  – vrijeme [min]

$t_k$  – kumulativno vrijeme [min]

$V$  – volumen fluida [cm<sup>3</sup>]

$WI$  – indeks močivosti

$W_i$  – količina utisnute vode izražena u pornim volumenima

$WWI$  – indeks močivosti za vodu

$\gamma_{ow}$  – površinska napetost [N/m]

$\gamma_{lv}$  – površinska napetost [N/m]

$\Delta p_o$  – razlika tlaka kroz jezgru [Pa]

$\Delta p_w$  – razlika tlaka kroz jezgru [Pa]

$\theta_{ow}$  – kut močivosti [°]

$\mu_D$  – viskoznost dodekana [Pas]

$\mu_o$  – viskoznost ulja [Pas]

$\mu_w$  – viskoznost vode [Pas]

$\rho_D$  – gustoća dodekana [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_o$  – gustoća ulja [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_w$  – gustoća vode [kg/m<sup>3</sup>]

# 1. Uvod

Laboratorijska mjerenja, karotazna ispitivanja, ispitivanja u bušotini te analiza proizvodnih podataka daju setove podataka koji imaju različitu preciznost. Proporcionalno preciznosti (koja je najveća kod laboratorijskih mjerenja), smanjena je reprezentativnost podataka za cijelo ležište. Jedan od najbitnijih kvalitativnih podataka o ležištu je o kakvom se sustavu močivosti stijene i prisutnih fluida radi (vodomočiv, naftomočiv, mješovito močiv). Takav podatak ne ulazi u konačne proračune proizvodnje iz ležišta, ali pomaže u određivanju daljnjeg tijeka ispitivanja u laboratoriju, a također i pri odlukama o vrsti metode održavanja tlaka ili dopunskih metoda iscrpka (engl. *Enhanced Oil Recovery*, EOR).

U laboratorijima kompanije INA d.d., vezano uz izradu ovog diplomskog rada, intenzivirale su se stanovite specijalne analize jezgara stijena. Ispitana je nova metoda (tzv. engl. *Rise in Core*) određivanja močivosti kako bi se mogla izvesti usporedna analiza svih povezivih parametara. Ti parametri su uvjetovani na pornoj razini (močivost, kapilarni tlak), razini jezgre (kapilarni tlak, relativna propusnost) i na kraju, kako bi se mjerene rezultate opravdalo kao primjenjive za predviđanja u ležišnom inženjerstvu, tj. numeričke simulacije ili analitičke proračune zavodnjavanja (ili općenito utiskivanja fluida). Dakle, ispitivani su uzorci jezgara s mladog naftnog polja za močivost i relativnu propusnost kako bi se potvrdilo da je moguće uskladiti simulacijski model i laboratorijske podatke, te kako je moguće izdvojiti nereprezentativna laboratorijska mjerenja od onih koja su perspektivna da će davati kvalitetne ulazne podatke u daljoj razradi ležišta.

## 2. Relativna propusnost

Relativna propusnost jedan je od najvažnijih petrofizikalnih parametara za razradu, projektiranje i predviđanje proizvodnje ugljikovodika (Vulin, 2016). Prije određivanja relativne propusnosti potrebno je odrediti efektivnu propusnost te jednu referentnu propusnost (najčešće je to apsolutna propusnost, ali može se koristiti i efektivna propusnost za ulje pri početnom zasićenju vodom ili efektivna propusnost za vodu) stijene, jer se relativna propusnost izražava kao omjer efektivne propusnosti za pojedini fluid i referentne propusnosti. Efektivna propusnost je iznos propusnosti za određeni fluid kada je u jezgri prisutno više fluida (Vulin, 2016). Apsolutna propusnost se mjeri pomoću plina (najčešće dušik) dok se efektivna propusnost mjeri kada su u jezgri prisutna dva ili više fluida. U ovome diplomskom radu mjerenja su izvođena u sustavu s dva fluida (voda i nafta) i stoga se neće spominjati relativna propusnost za plin.

Efektivna propusnost za vodu i naftu izračunava se pomoću sljedećih formula (Vulin, 2016):

$$k_o = \frac{q_o \mu_o L}{A \Delta p_o} \quad (0-1)$$

$$k_w = \frac{q_w \mu_w L}{A \Delta p_w} \quad (0-2)$$

gdje je:

$k_o$  – efektivna propusnost za ulje [ $\text{m}^2$ ]

$q_o$  – protok ulja [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$\Delta p_o$  – razlika tlaka kroz jezgru [Pa]

$L$  – duljina jezgre [m]

$A$  – površina baze jezgre [ $\text{m}^2$ ]

$\mu_o$  – viskoznost ulja [Pas]

$k_w$  – efektivna propusnost za vodu [ $\text{m}^2$ ]

$q_w$  – protok vode [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$\Delta p_w$  – razlika tlaka kroz jezgru [Pa]

$\mu_w$  – viskoznost vode [Pas]

Nakon što se izračuna efektivna propusnost, kao što je i prije napomenuto, relativna propusnost za naftu se dobije kao omjer efektivne propusnosti za naftu i apsolutne propusnosti:

$$k_{ro} = \frac{k_o}{k} \quad (0-3)$$

gdje je:

$k_{ro}$  – relativna propusnost za ulje

$k$  – apsolutna propusnost [ $m^2$ ]

Analogno tome izračuna se i relativna propusnost za vodu:

$$k_{rw} = \frac{k_w}{k} \quad (0-4)$$

gdje je:

$k_{rw}$  – relativna propusnost za vodu

$k$  – apsolutna propusnost [ $m^2$ ]

Postoji nekoliko metoda za određivanje relativne propusnosti, ali u praksi se najčešće koriste dvije metode:

- **Metoda stacionarnog stanja:**

Istovremeno protiskivanje dvije faze pri konstantnim protocima kroz jezgru sve dok diferencijalni tlak ne postane konstantan.

- **Metoda nestacionarnog stanja:**

Protiskivanje jedne faze kroz jezgru u svrhu istiskivanja druge faze iz jezgre sve dok se ne postigne ireducibilno zasićenje jezgre drugom fazom.

## **2.1. Ostale metode određivanja relativnih propusnosti**

Osim ranije navedene metode stacionarnog i metode nestacionarnog stanja još postoje tri metode za određivanje relativnih propusnosti. To su metoda koja koristi kapilarne tlakove, centrifugalna metoda i računanje relativnih propusnosti iz proizvodnih podataka (Honarpour et al., 1986).

Metoda koja koristi kapilarne tlakove je razvijena za situaciju kada se nemočivom fazom istiskuje močiva faza. Ova metoda je ograničena na sustave plin - nafta i plin - voda gdje se plinom istiskuje nafta ili voda. Iako ova metoda nije prvi odabir kada treba odrediti relativne propusnosti, korisna je u situacijama kada treba odrediti relativnu propusnost za ranije navedene sustave ako je uzorak stijene premalen za klasične testove ili ako stijena ima toliko malu propusnost da je nemoguće provesti metodu nestacionarnog ili stacionarnog stanja (Honarpour et al., 1986).

Centrifugalna metoda temelji se na promatranju fluida koji se proizvode iz jezgre kada se na nju primjeni centrifugalna sila. Fluidi se skupljaju u prozirnim cjevčicama koje su povezane s držačem jezgre. Podaci dobiveni tijekom mjerenja koriste se u složenom matematičkom proračunu kako bi se izračunale relativne propusnosti. Prednosti ove metode su što je mnogo brža od metode stacionarnog stanja i nema problema s pojavom viskoznog probijanja fluida koje se javlja kod metode nestacionarnog stanja. Nedostatak ove metode je to što ima velike probleme s kapilarnim rubnim (engl. *end*) efektima (Slobod et al., 1951; Van Spronsen, 1982).

Relativne propusnosti moguće je izračunati i iz proizvodnih podataka dobivenih s terena. Kod ove metode obavezno je prepoznati udio otopljenog i udio slobodnog plina u ukupnom proizvedenom plinu. Kada se odredi količina slobodnog i otopljenog plina jednostavnim proračunom se odredi omjer relativnih propusnosti. Nedostatak ove metode je što se pokazala nepouzdanom u mnogo slučajeva (Honarpour et al., 1986).

## **2.2. Faktori koji utječu na relativnu propusnost**

### *2.2.1. Utjecaj strukture i sastava stijene*

Relativne propusnosti se ne razlikuju samo ovisno o vrsti stijene, već se mogu razlikovati i unutar iste formacije ukoliko je ista heterogena. Dokazano je da veličina, oblik,



zaobljenost i orijentacija zrna stijene imaju utjecaj na krivulju relativne propusnosti (Botset, 1940; Owens, 1971). Morgan i Gordon (1970) su dokazali kako veličina pora također ima utjecaj na relativne propusnosti. Ukoliko stijena ima velike pore to će rezultirati manjim ireducibilnim zasićenjem vodom te će relativna propusnost za ugljikovodike biti veća. Gorring (1962) je pokazao kako ugljikovodici mogu ostati zarobljeni u pornom prostoru ako se nalaze u velikoj pori koja je okružena malim porama u koje je imbibirala voda zbog kapilarnih sila.

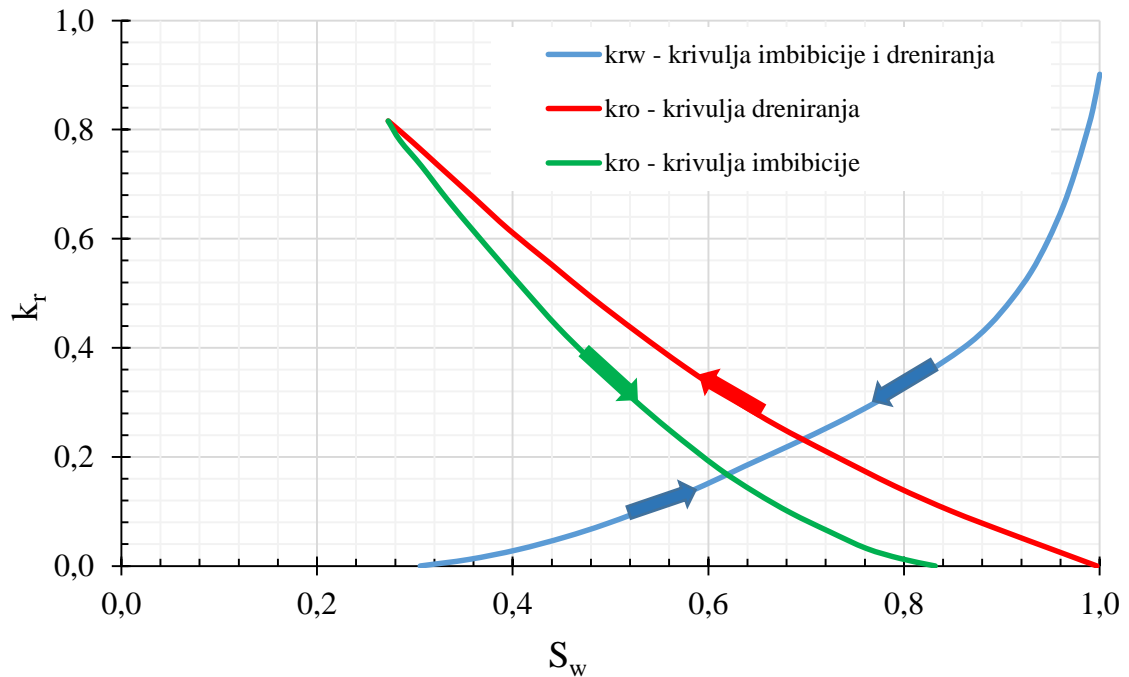
Što se tiče sastava stijene, ukoliko ona sadrži feldspat relativna propusnost će se povećati, jer će doći do otapanja navedenog minerala i povećanja pora (Morgan i Gordon, 1970). S druge strane, ako stijena sadrži minerale glina može doći do bubrenja glina što će rezultirati smanjenjem relativne propusnosti stijene (Land, 1965).

### *2.2.2. Utjecaj zasićenja stijene*

Kod nekonsolidiranih vodomogućih stijena, relativna propusnost stijene za močivu fazu ovisi samo o zasićenju močivom fazom bez obzira koliko se nafte ili plina nalazilo u pornom prostoru stijene (Leverett i Lewis, 1941; Saraf i Fatt, 1967), dok se za konsolidirane stijene u literaturi mogu pronaći tvrdnje koje se slažu s prije navedenom, te također koje se ne slažu s prije navedenom. Relativna propusnost za nemočivu fazu kod vodomogućih stijena ovisi kako o zasićenju nemočivom fazom, tako i o zasićenju močivom fazom (Caudle et al., 1951).

### *2.2.3. Utjecaj povijesti zasićenja*

Kada se želi postići određeno zasićenje stijene vodom, krivulje relativnih propusnosti neće biti jednake u slučaju kada se zasićenje vodom mora smanjiti u odnosu na slučaj kada se zasićenje vodom mora povećati. Smanjenje zasićenja močivom fazom prikazuje se krivuljom dreniranja, a povećanje zasićenja močivom fazom prikazuje se krivuljom imbibicije. Naime, za vodomoguću konsolidiranu stijenu relativna propusnost za vodu je podjednaka u oba slučaja, dok je relativna propusnost za ugljikovodike manja kod krivulje imbibicije nego kod krivulje dreniranja (Geffen et al. 1951; Osoba et al., 1951; Nar et al., 1962).



Slika 2-1. Krivulje imbibicije i dreniranja za vodu (močiva faza) i naftu (nemočiva faza) (modificirano od Honarpour et al., 1986).

Vjeruje se da je pojava histereze u slučaju krivulja dreniranja i imbibicije nafte rezultat rasporeda veličine pora i cementacije stijene. Tijekom procesa imbibicije voda imbibira u pore i istiskuje ugljikovodike van iz stijene. Istiskivanje se odvija sve dok postoji strujnica protjecanja (engl. *escape path, streamline*) kojom ugljikovodici mogu „pobjeći“. Kod procesa imbibicije te strujnice nestaju pri poprilično većim zasićenjima ugljikovodicima nego kod procesa dreniranja (Honarpour et al., 1986).

#### 2.2.4. Utjecaj kapilarnih rubnih efekata

Na izlazu iz jezgre vlada atmosferski tlak i to uzrokuje pojavu kapilarnih sila u smjeru prema jezgri koje zadržavaju močivu fazu (najčešće voda) na kraju jezgre. Tako se tijekom laboratorijskih mjerenja javlja promjena trenda smanjenja zasićenja na kraju jezgre. Na kraju jezgre se zadržava dio vode koja protječe kroz jezgru i na taj način uzrokuje grešku u mjerenjima relativnih propusnosti. Voda će se zadržavati sve dok tlak na kraju jezgre ne nadvlada kapilarne sile ili dok se ne postigne ireducibilno zasićenje naftom. Najjednostavniji način rješavanja ovoga problema je regulacija protoka kroz jezgru, koji mora biti dovoljno velik kako bi se minimizirali kapilarni rubni efekti (engl. *end effects*), ali i dovoljno malen kako ne bi došlo do pojave emulzije (Honarpour et al., 1986).

### *2.2.5. Utjecaj površinske napetosti i gustoće ležišnih fluida*

Za razliku od ranije navedenih faktora koji utječu na relativnu propusnost, mišljenja različitih autora razlikuju se kada je u pitanju površinska napetost. Leverett (1939) je ustvrdio kako površinska napetost ima utjecaja na relativne propusnosti kada se koriste fluidi s površinskom napetošću od 0,027 do 0,072 N/m, dok Owens i Archer (1971) tvrde kako površinska napetost nema utjecaja na relativne propusnosti. Pirson (1958) je utvrdio kako su relativne propusnosti ovisne o površinskoj napetosti kod krivulje imbibicije, a neovisne kod krivulje dreniranja. Što se tiče gustoće ležišnih fluida, različiti autori su složni kako ona nema utjecaja na relativne propusnosti (Geffen et al., 1951).

### *2.2.6. Utjecaj poroznosti i propusnosti stijene*

U literaturi se može naći mnogo radova na ovu temu te svi radovi imaju isti zaključak. Leverett i Lewis (1941) su zaključili da je utjecaj poroznosti i propusnosti na relativne propusnosti zanemariv. Dunlap (1938) je koristio stijene različitih propusnosti i također donio zaključak da propusnost stijene nema utjecaj na relativne propusnosti. Pojedini autori su pokazali mala odstupanja relativnih propusnosti kod različitih propusnosti stijena, no ta odstupanja su svega nekoliko posto (Stewart et al., 1953).

### *2.2.7. Utjecaj temperature*

Većina autora, kao što su Miller i Ramey (1983), Edmondson (1965), itd. su došli su do zaključka da temperatura nema utjecaja na relativne propusnosti.

### *2.2.8. Utjecaj viskoznosti ležišnih fluida*

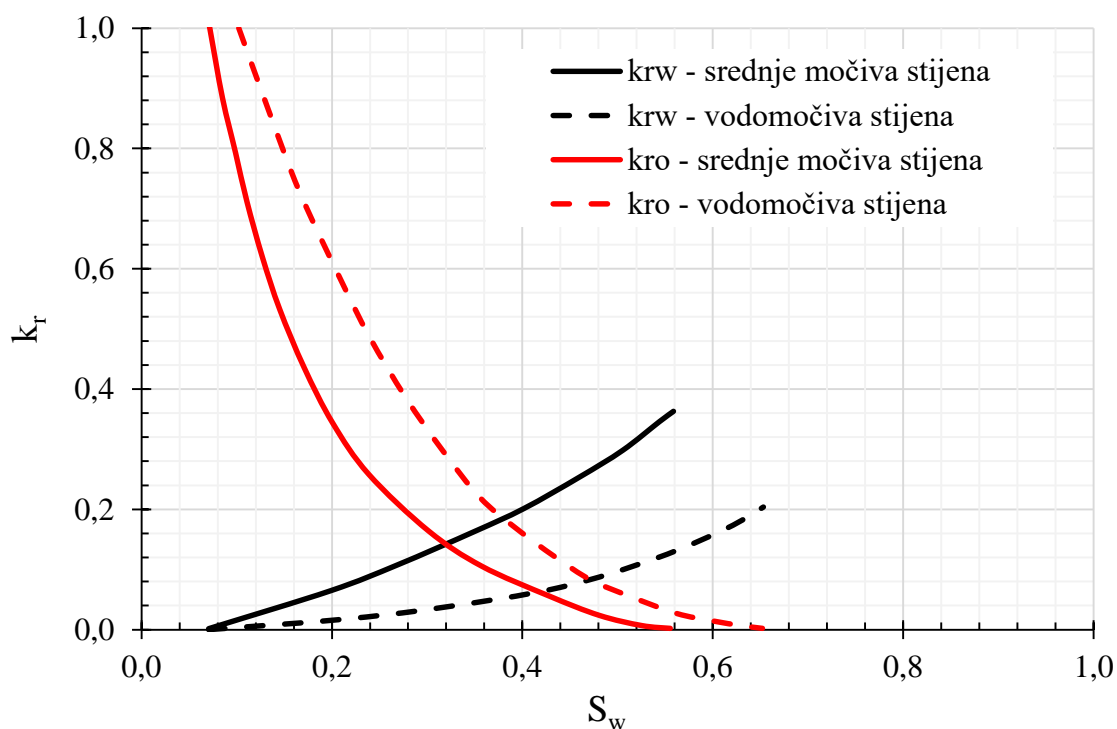
Mnogi su autori ustvrdili kako viskoznost fluida nema utjecaja na relativne propusnosti. Jedan od tih primjera su Leverett et al. (1939, 1941) koji su ispitivali utjecaj viskoznosti fluida na relativne propusnosti s uljima, čija je viskoznost od 0,31 cP. pa sve do 76,5 cP, i vodom, čija je viskoznost varirala od 0,85 do 32,2 cP te su ustvrdili kako viskoznost fluida nema utjecaja na krivulje relativnih propusnosti. Isto je utvrdio i Richardson (1957) koji je koristio ulja čija je viskoznost varirala od 1,8 do 151 cP.

### *2.2.9. Utjecaj početnog zasićenja stijene vodom*

Caudle et al. (1951) su ustvrdili kako promjenom početnog zasićenja stijene vodom dolazi do pomaka krivulja relativnih propusnosti po osi apcise te da može doći i do promjene oblika krivulja relativnih propusnosti.

### 3. Močivost

Močivost je definirana kao tendencija jednoga fluida da moči površinu stijene u prisustvu drugih nemješivih fluida (Anderson, 1986). To je vrlo važna karakteristika ležišnih stijena jer utječe na mnoštvo parametara važnih za ležišno inženjerstvo koji se određuju tijekom laboratorijske analize jezgara. Neki od tih parametara su: kapilarni tlak, ireducibilno zasićenje vodom, relativna propusnost, ireducibilno zasićenje naftom, električna svojstva stijene te ponašanje stijene tijekom zavodnjavanja (engl. *waterflood*, Stiles, 2005). Na slici 3-1 može se jasno vidjeti utjecaj močivosti stijene na relativne propusnosti za vodu i naftu tijekom dinamičke zamjene ulja vodom. Vidi se kako je kod vodomochive stijene manja relativna propusnost za vodu, a veća relativna propusnost za naftu što rezultira većim iscrpkom tijekom zavodnjavanja.



Slika 3-1. Utjecaj močivosti na relativne propusnosti (modificirano od Stiles, 2005).

#### 3.1. Modificirana Amottova metoda

Amottova metoda je najpoznatija metoda za određivanje močivosti. Ovom metodom se mjeri količina spontano istisnute vode i ulja te količina prisilno istisnute vode i ulja. Prije

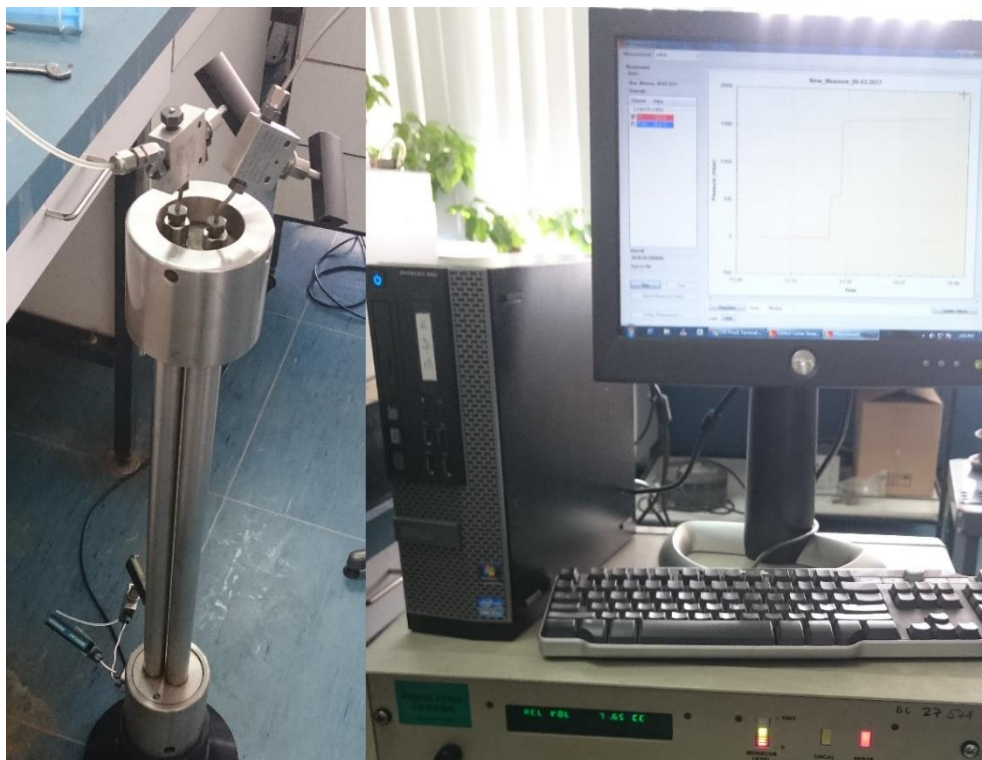
početka mjerenja, jezgra je bila ekstrahirana i osušena koristeći kloroform i metanol. Prije stavljanja u saturator, jezgra je izvagana nakon čega se pomoću saturatora postiglo 100 %-tno zasićenje vodom, nakon čega je jezgra ponovo izvagana prije samoga mjerenja kako bi se odredio porni volumen i stavljena u triaksijalni držač jezgre. Pomoću visokotlačne pumpe kroz jezgru je protiskivano ulje (1cP) sve dok nije postignuto početno zasićenje vodom  $S_{wi}$ . Količina istisnute vode mjerena je pomoću akustičnog separatora nakon čega je jezgra izvađena i ponovo izvagana kako bi se potvrdili rezultati mjerenja. Poznavanjem količine istisnute vode s lakoćom se izračunalo početno zasićenje vodom. Nakon toga je jezgra stavljena u specijalnu staklenu posudu u koje se dodala i voda te se stavio čep kako ne bi došlo do isparavanja vode. Jezgra je ostavljena u toj posudi 14 dana i nakon tog vremenskog perioda očitana količina ulja koja se izdvojila iz jezgre na vrhu posude. Očitana količina ulja odgovara količini vode koja je spontano imbibirala u jezgru. Jezgra je zatim izvađena iz stakla, lagano obrisana te izvagana kako bi se provjerili očitani rezultati. Ovim očitanjem dobila se količina spontano istisnutog ulje te je slijedilo mjerenje prisilno istisnute količine ulja. Jezgra je stavljena u triaksijalni držač te se ovaj put pomoću visokotlačne pumpe kroz jezgru protiskivala voda sve dok se nije postiglo ireducibilno zasićenje uljem. Pri tome je, pomoću akustičnog separatora, mjerena količina ulja koja je „istisnuta“ iz jezgre, a rezultati su provjereni vaganjem jezgre. Ovim postupcima dobivena je spontano i prisilno istisnuta količina ulja. Postupak za dobivanje spontano i prisilno istisnute vode analogan je prethodno navedenom postupku uz male preinake.

Oprema koja je korištena za određivanje močivosti ovom metodom je sljedeća:

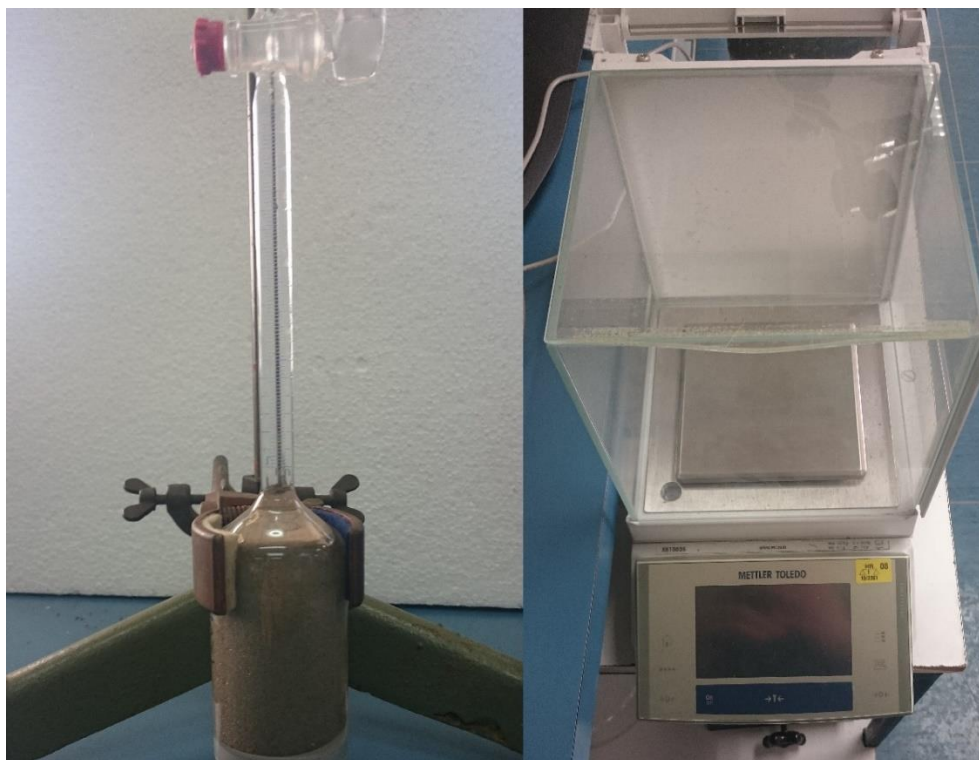
- visokotlačna pumpa (slika 3-2),
- triaksijalni držač jezgre (slika 3-2),
- akustični separator (slika 3-3),
- vaga velike preciznosti (slika 3-4),
- specijalna staklena posuda za Amottov test (slika 3-4),
- računalo (slika 3-3).



Slika 3-2. Visokotlačna pumpa i triaksijalni držač jezgre.



Slika 3-3. Akustični separator i računalo.



Slika 3-4. Specijalna staklena posuda za Amottov test i vaga velike preciznosti.

### 3.1.1. Proračun indeksa močivosti

Proračun indeksa močivosti izvodi se pomoću sljedećih jednažbi (Stiles, 2005):

$$OWI = \frac{A}{A + B} \quad (3-1)$$

$$WWI = \frac{C}{C + D} \quad (3-2)$$

$$WI = WWI - OWI \quad (3-3)$$

gdje su:

$OWI$  – indeks močivosti za ulje

$WWI$  – indeks močivosti za vodu

$WI$  – indeks močivosti

$A$  – volumen spontano istisnute vode [ $\text{cm}^3$ ]

$B$  – volumen prisilno istisnute vode [ $\text{cm}^3$ ]

$C$  – volumen spontano istisnutog ulja [ $\text{cm}^3$ ]

$D$  – volumen prisilno istisnutog ulja [ $\text{cm}^3$ ]

Određivanje močivosti sustava izvodi se pomoću sljedeće klasifikacije (Stiles, 2005):

1. vodomogućiv sustav ( $+0,3 \leq WI \leq 1$ )
2. srednje močiv sustav ( $-0,3 \leq WI \leq +0,3$ )
3. naftomogućiv sustav ( $-1 \leq WI \leq -0,3$ )

Mjerenje na testiranoj jezgri dalo je sljedeće rezultate:

$$OWI = \frac{0,1}{0,1 + 6,88} = 0,0143$$

$$WWI = \frac{0,7}{0,7 + 6,31} = 0,0998$$

$$WI = WWI - OWI = 0,0855$$

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da je jezgra X-3098 srednje močiva, odnosno da voda i nafta podjednako jako moče površinu pornog prostora.

### 3.2. Metoda podizanja u jezgri (engl. *Rise in Core* metoda)

Za razliku od modificirane Amottove metode, ova metoda zahtijeva mnogo manje vremena, međutim nije opće prihvaćena pošto je relativno nova te postoji samo nekoliko publiciranih radova s rezultatima ispitivanja močivosti tom metodom. Kod *Rise in Core* metode koristi se modificirana Washburn-ovu jednadžbu kako bi se odredio kontaktni kut između fluida koji moči jezgru i same jezgre:

$$\cos\theta_{ow} = \frac{(\mu_o\rho_w^2) - (\mu_w\rho_o^2)}{\rho_o^2\rho_w^2C\gamma_{ow}} \cdot \frac{m_w^2}{t} \quad (3-4)$$

gdje je:

$\theta_{ow}$  – kut močivosti [°]

$\rho_w$  – gustoća vode [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_o$  – gustoća ulja [kg/m<sup>3</sup>]



$C$  – konstanta koja ovisi o gustoći, viskoznosti, kontaktnom kutu i međupovršinskoj napetosti fluida

$\gamma_{ow}$  – površinska napetost sustava ulje voda [N/m]

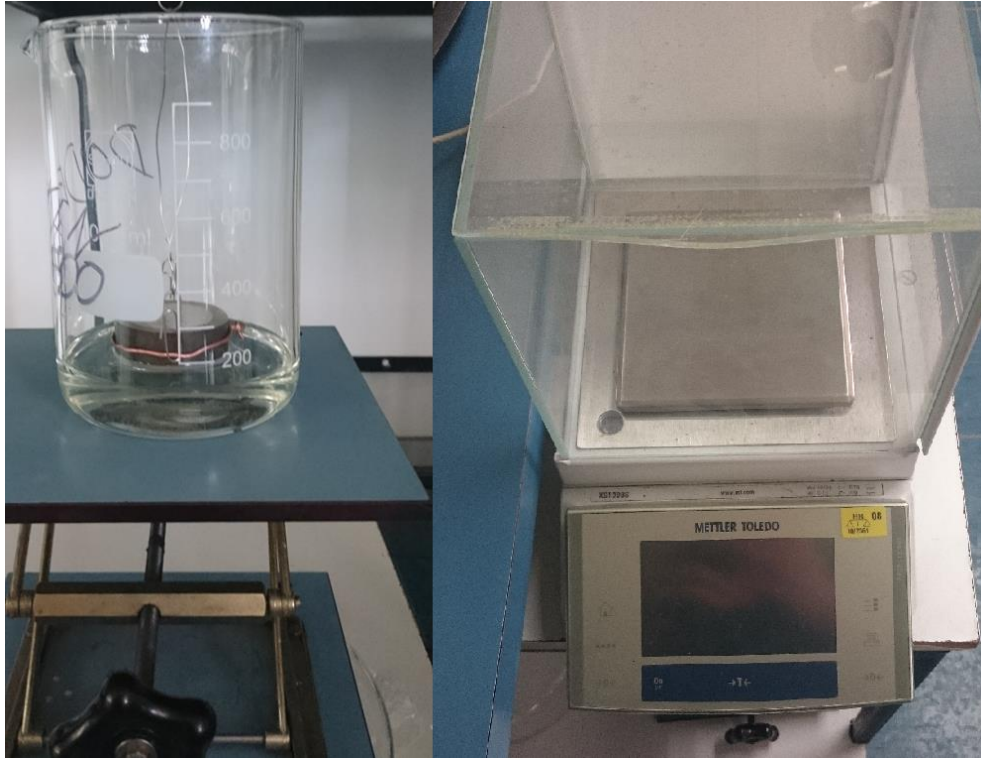
$\frac{m_w^2}{t}$  – nagib pravca (promjena mase u vremenu, g<sup>2</sup>/s)

Određivanjem kontaktnog kuta između horizontalne površine i tangente na površinu kapljice može se odrediti i moćivost jezgre s fluidom. Granice za određivanje moćivosti stijene teško je odrediti, ali generalno gledajući, ako je kut manji od 90° stijena je blago vodomočiva ili vodomočiva (ovisno o odstupanju od 90° - veće odstupanje veća moćivost), ako je kut veći od 90° stijena je blago naftomočiva ili naftomočiva (također ovisno o odstupanju od 90°), a ako je kut u blizini 90° to ukazuje da je stijena srednje moćiva.

Za potrebe istraživanja za ovaj diplomski rad, test moćivosti na odabranoj jezgri (jezgra koja je ranije korištena u Amottovom testu) je proveden s tri različita fluida (ulje 1, ulje 16 i nafta). Navedena jezgra je ekstrahirana i razrezana na 4 jednaka dijela. Prvi dio je ostavljen nezasićen (100% zrak u pornom prostoru), drugi dio je zasićen uljem s oznakom 1, treći uljem s oznakom 16, a četvrti je dio zasićen naftom.

Oprema koja je korištena za određivanje moćivosti ovom metodom je sljedeća:

- digitalna vaga velike preciznosti (slika 3-5),
- računalo
- držač jezgre (slika 3-5),
- laboratorijska čaša (slika 3-5),
- ručna dizalica (slika 3-5).



Slika 3-5. Držač jezgre, laboratorijska čaša, ručna dizalica i vaga velike preciznosti.

Kako bi se mogla koristiti Washburnova jednađba, potrebno je prvo odrediti konstantu  $C$  koja se određuje prema formuli (Ghedan i Canbaz, 2014):

$$C = \frac{\mu_D}{\gamma_{lv} \rho_D^2 \cos \theta} \cdot \frac{m^2}{t} \quad (3-5)$$

gdje je:

$C$  – konstanta

$\rho_D$  – gustoća dodekana [ $\text{kg/m}^3$ ]

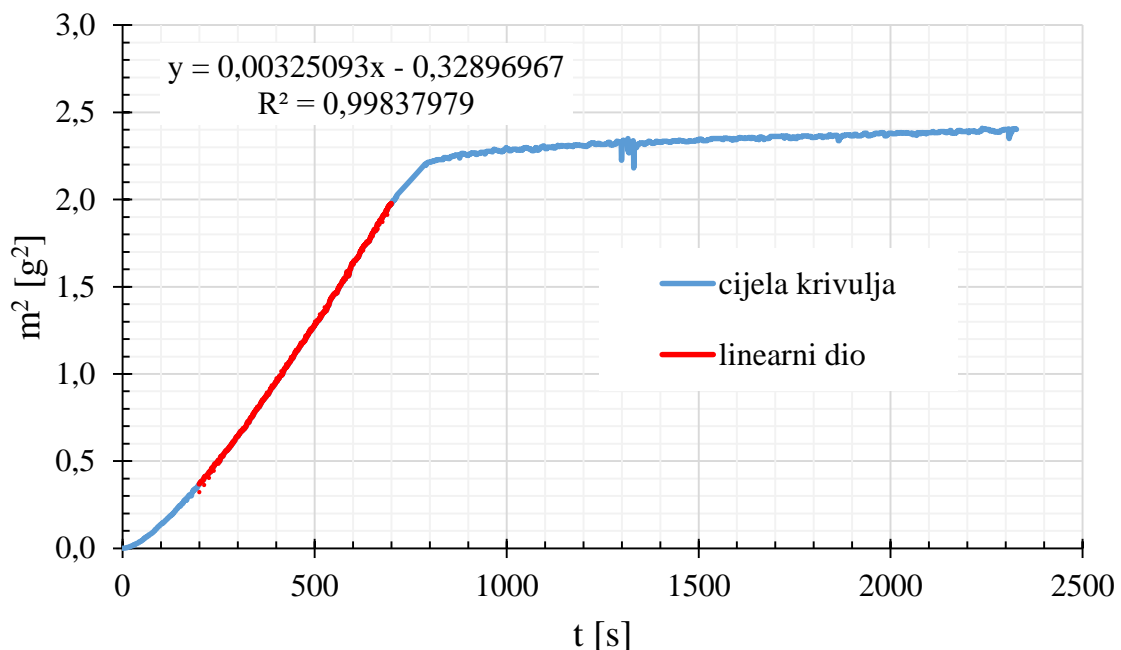
$\mu_D$  – viskoznost dodekana [Pas]

$\gamma_{lv}$  – površinska napetost [N/m]

$\theta$  – kut močivosti [ $^\circ$ ]

$\frac{m_w^2}{t}$  – nagib pravca (promjena mase u vremenu,  $\text{g}^2/\text{s}$ )

Sve varijable u jednadžbi 3-5, osim nagiba pravca, su od prije poznate ili su izmjerene preliminarnim mjerenjima. Nagib pravca ovisi o svojstvima stijene (o njemu ovisi močivost) i potrebno ga je izmjeriti. Za određivanje nagiba pravca potrebna su dva fluida, prvi je zrak, koji se nalazi u pornom prostoru jezgre, a drugi je dodekan koji se nalazi u čaši. Dodekan se koristi jer se smatra kako u potpunosti moči jezgru, odnosno da je kut močivosti  $0^\circ$  (Ghedan i Canbaz, 2014). Konstanta C se određuje tako da se čaša s dodekanom polako podiže sve dok donji dio jezgre ne dodirne površinu dodekana (slika 3-5) te se počinje bilježiti promjena mase jezgre u vremenu. U trenutku kada više nema porasta mase zaključuje se da je test završio te se kreće s obradom dobivenih podataka. Masa jezgre je bilježena pomoću računala svakih 0,5 sekundi. Tako dobivene podatke o masi je potrebno kvadrirati te prikazati na grafu u ovisnosti o vremenu.

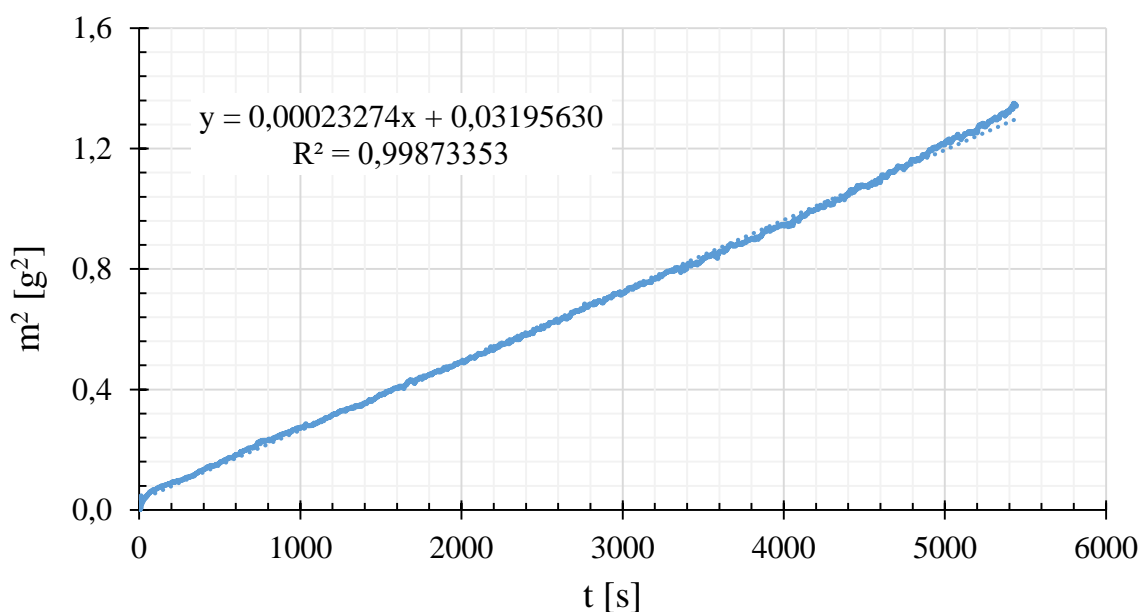


Slika 3-6. Određivanje nagiba pravca koristeći dodekan.

Na prikazanome grafu potrebno je odrediti linearni dio (od 200 do 700 s) krivulje i očitati nagib pravca, koji u ovome slučaju iznosi  $0,003251 \text{ g}^2/\text{s} = 3,251 \cdot 10^{-9} \text{ kg}^2/\text{s}$ . Nagib pravca se koristi u ranije spomenutoj jednadžbi 3-5 kako bi se izračunala konstanta.

$$C = \frac{0,00149}{0,0254 \cdot 748^2 \cdot \cos(0)} \cdot 3,251 \cdot 10^{-9} = 3,407 \cdot 10^{-16} \text{ m}^5$$

Nakon što je određena konstanta C, potrebno je za svaki preostali dio jezgre odrediti nagib pravca (slika 3-7, 3-8 i 3-9). Princip određivanja nagiba pravca analogan je određivanju nagiba pravca koji se koristi kod određivanja konstante C, osim što se u čaši ne nalazi dodekan nego voda. Voda se koristi kada se pretpostavlja da je stijena blago vodomogućiva ili vodomogućiva. Ukoliko se pretpostavlja da je stijena blago naftomogućiva ili naftomogućiva, svaki dio jezgre se zasiti vodom, a u čaši se nalazi ulje ili nafta (Ghedan i Canbaz, 2014).



Slika 3-7. Određivanje nagiba krivulje promjene mase jezgre prislonjene na površinu fluida u vremenu koristeći ulje 1.

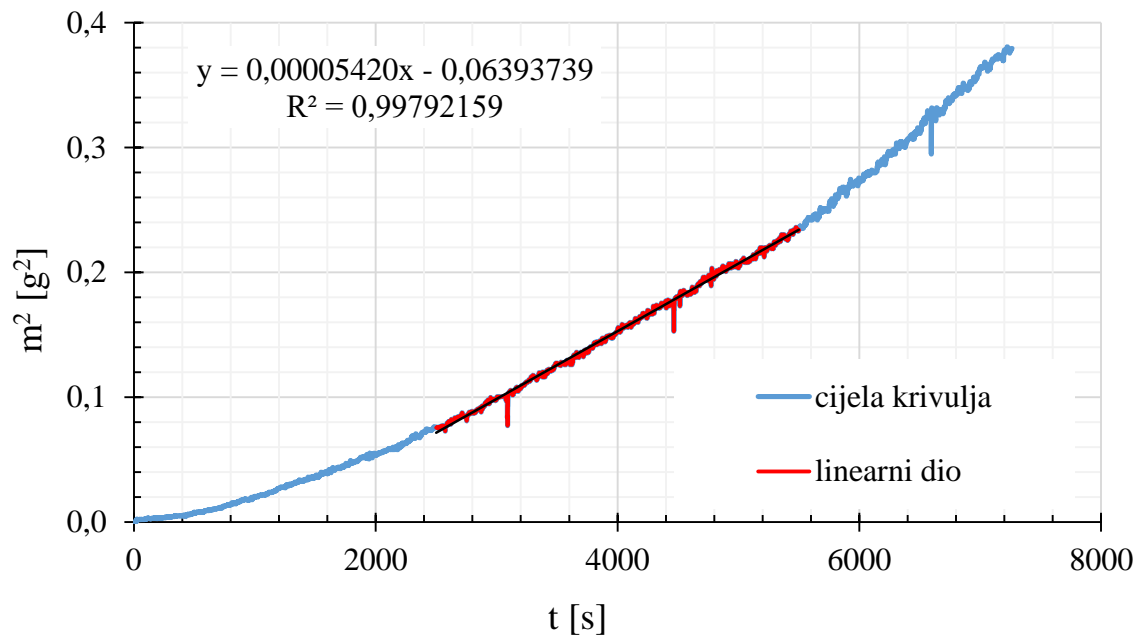
$$\text{Nagib} = 0,0002327 \text{ g}^2/\text{s} = 2,327 \cdot 10^{-10} \text{ kg}^2/\text{s}$$

$$\cos\theta_{ow1cP} = \frac{(0,0014188 \cdot 1010,8^2) - (0,0010057 \cdot 754,5^2)}{754,5^2 \cdot 1010,8^2 \cdot 3,407 \cdot 10^{-16} \cdot 0,0501} \cdot 2,327 \cdot 10^{-10}$$

$$\cos\theta_{ow1cP} = 0,02055$$

$$\theta_{ow1cP} = 88,82^\circ$$

Iz dobivenog kuta može se zaključiti da je stijena srednje močivosti.



Slika 3-8. Određivanje nagiba koristeći ulje 16.

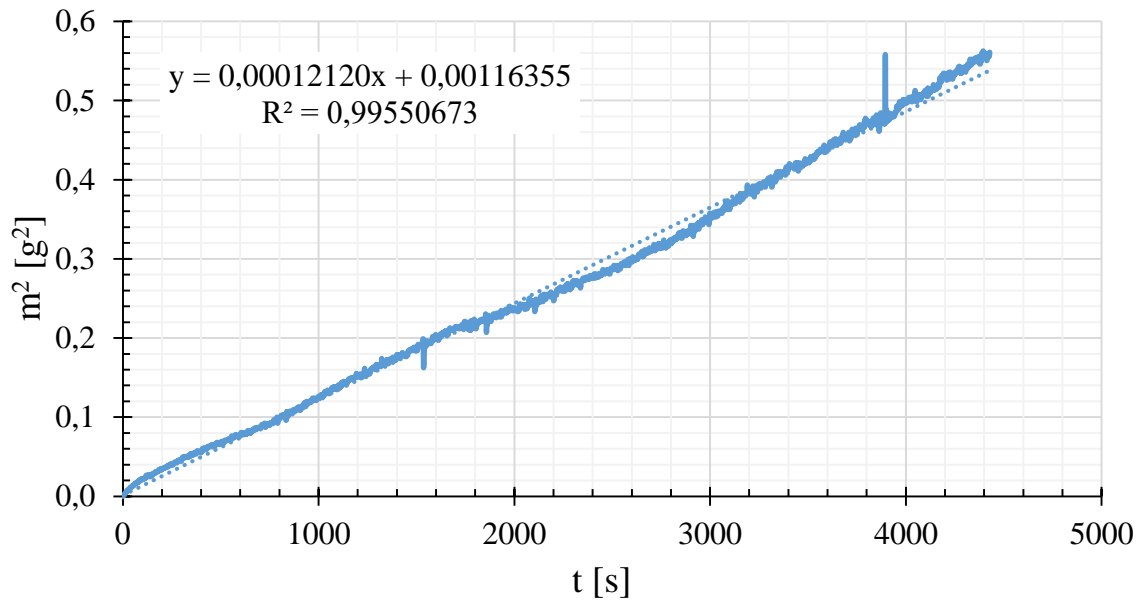
Nagib =  $0,00005420 \text{ g}^2/\text{s} = 5,420 \cdot 10^{-11} \text{ kg}^2/\text{s}$

$$\cos\theta_{ow16cP} = \frac{(0,0211 \cdot 1010,8^2) - (0,0010057 \cdot 844^2)}{844^2 \cdot 1010,8^2 \cdot 3,407 \cdot 10^{-16} \cdot 0,01} \cdot 5,420 \cdot 10^{-11}$$

$$\cos\theta_{ow16cP} = 0,4555$$

$$\theta_{ow16cP} = 62,90^\circ$$

Iz dobivenog kuta može se zaključiti da je stijena vodomoguća.



Slika 3-9. Određivanje nagiba koristeći naftu.

$$\text{Nagib} = 0,0001212 \text{ g}^2/\text{s} = 1,212 \cdot 10^{-10} \text{ kg}^2/\text{s}$$

$$\cos\theta_{\text{ownafta}} = \frac{(0,01414 \cdot 1010,8^2) - (0,0010057 \cdot 862,29^2)}{862,29^2 \cdot 1010,8^2 \cdot 3,407 \cdot 10^{-16} \cdot 0,03} \cdot 1,212 \cdot 10^{-10}$$

$$\cos\theta_{\text{ownafta}} = 0,2138$$

$$\theta_{\text{ownafta}} = 77,65^\circ$$

Iz dobivenog kuta može se zaključiti da je stijena blago vodomogućiva.

### 3.3. Craigov kriterij za močivost

Craig je postavio određene kriterije pomoću kojih se iz relativnih propusnosti može odrediti vrsta močivosti stijene (Craig, 1971). Navedeni kriteriji su prikazani u tablici 3-1.

Tablica 3-1. Kriteriji moćivosti prema Craigu (1971)

	<i>vodomoćiva stijena</i>	<i>naftomoćiva stijena</i>
$S_{wi}$	> 20 – 25 %	< 15 %
$S_w @ k_{rw} = k_{ro}$	> 50 %	< 50 %
<i>zadnja točka <math>k_{rw}</math></i>	< 0,3	> 0,5

U nastavku ovog diplomskog rada prikazani su rezultati izmjerenih relativnih propusnosti pomoću metode nestacionarnog stanja i metode stacionarnog stanja. Ako se kod obje metode primjene Craigo kriteriji za određivanje moćivosti dobiju se rezultati prikazani u tablici 3-2.

Tablica 3-2. Početni i rubni rezultati mjerenja relativnih propusnosti pomoću metode nestacionarnog stanja i metode stacionarnog stanja.

*Metoda nestacionarnog stanja:*

$S_{wi}$	27,4 %
$S_w @ k_{rw} = k_{ro}$	48,5 %
<i>zadnja točka <math>k_{rw}</math></i>	0,26

*Metoda stacionarnog stanja:*

$S_{wi}$	25,5 %
$S_w @ k_{rw} = k_{ro}$	51 %
<i>zadnja točka <math>k_{rw}</math></i>	0,265

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da je stijena vodomoćiva.

## 4. Metoda određivanja relativnih propusnosti nestacionarnim stanjem (engl. *unsteady-state, USS*)

Metoda nestacionarnog stanja je najpoznatija i najčešće korištena metoda za određivanje relativnih propusnosti. Kod ove metode voda se protiskuje kroz jezgru sve dok se ne postigne ireducibilno zasićenje uljem. Ova se metoda brže izvodi od metode stacionarnog stanja, ali zahtjeva složeniji matematički proračun. Prilikom izvođenja ove metode moraju biti zadovoljeni sljedeći uvjeti (Honarpout et al., 1986):

- gradijent tlaka mora biti dovoljno visok kako bi se minimalizirao utjecaj kapilarnih sila,
- razlika tlaka kroz jezgru mora biti dovoljno niska u usporedbi s radnim tlakom kako bi se mogla zanemariti kompresibilnost stijene,
- jezgra mora biti homogena,
- protok i svojstva fluida moraju biti konstantni tijekom trajanja testa.

Postoji nekoliko načina tehničke izvedbe ove metode. Za potrebe ovog diplomskog rada odabrana je JBN (Johnson et al., 1959) metoda. Kod navedene metode, kao referentna propusnost odabire se propusnost za ulje pri početnom zasićenju vodom ( $k_o @ S_{wi}$ ).

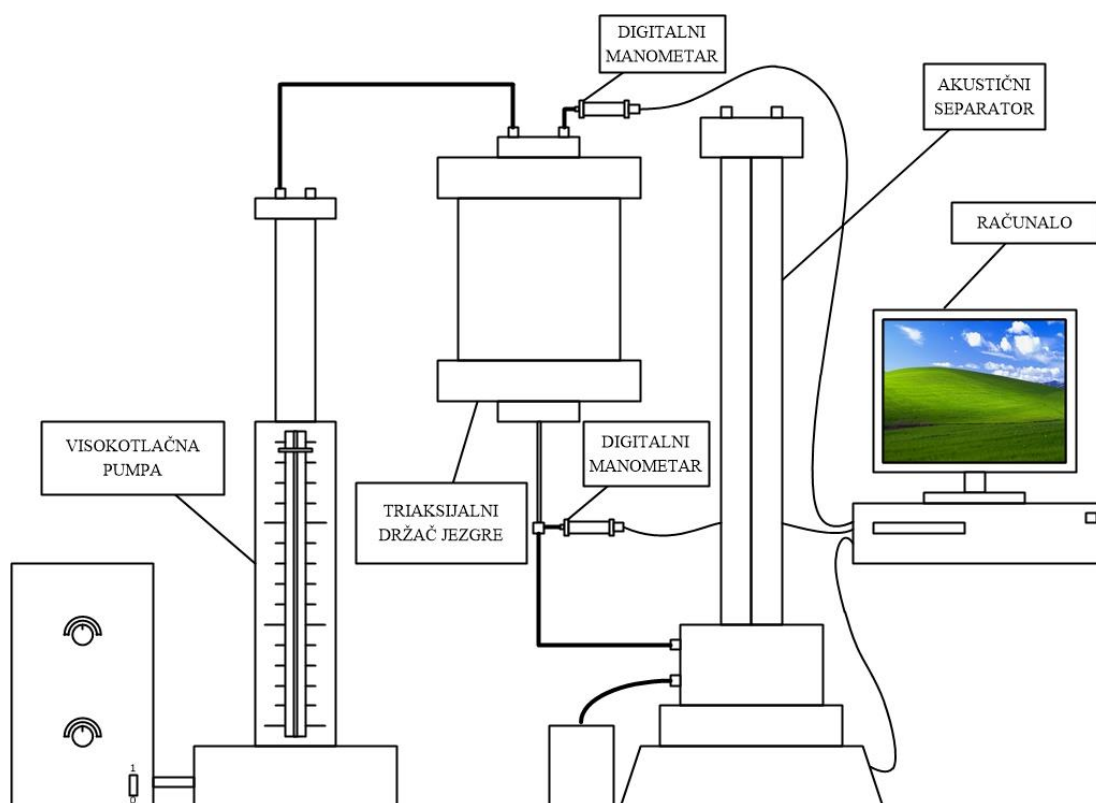
### 4.1. Opis mjerenja relativnih propusnosti

Priprema jezgre prije stavljanja u triaksijalni držač jezgre ista je kao i kod Amottove metode. Zatim je izvršena dinamička zamjena vode uljem sve dok se nije postiglo početno zasićenje jezgre vodom  $S_{wi}$ . Pred sami kraj dinamičke zamjene, kada više nema pojave vode na izlazu iz jezgre, izmjerena je efektivna propusnost za ulje. Treba napomenuti kako je tijekom svake dinamičke zamjene volumen fluida koji je istisnut iz jezgre mjeren pomoću akustičnog separatora, a jezgra je vagana zbog provjere rezultata. Nakon toga se, korištenjem visokotlačne pumpe, voda konstantnim protokom protiskivala kroz jezgru pri čemu je istiskivala ulje sve do postizanja ireducibilnog zasićenja uljem, tj. dok više nije bilo pojave ulja na izlazu iz jezgre. U trenutku kada je postignuto ireducibilno zasićenje uljem, izmjerena je efektivna propusnost za vodu. Zatim je jezgra izvađena iz triaksijalnog držača jezgre te je izvagana i s time je završilo mjerenje.



Dijelovi sastavljene aparature za određivanje relativnih propusnosti ovom metodom su (shema spajanja se može vidjeti na slici 4-1):

- visokotlačna pumpa (slika 4-2),
- akustični separator (slika 4-2),
- računalo,
- dva digitalna manometra (slika 4-2),
- triaksijalni držač jezgre (slika 4-2),
- laboratorijska čaša (slika 4-2),
- vaga velike preciznosti ( $\pm 0,001$  g).



Slika 4-1. Shematski prikaz spajanja opreme za mjerenje relativnih propusnosti metodom nestacionarnog stanja.

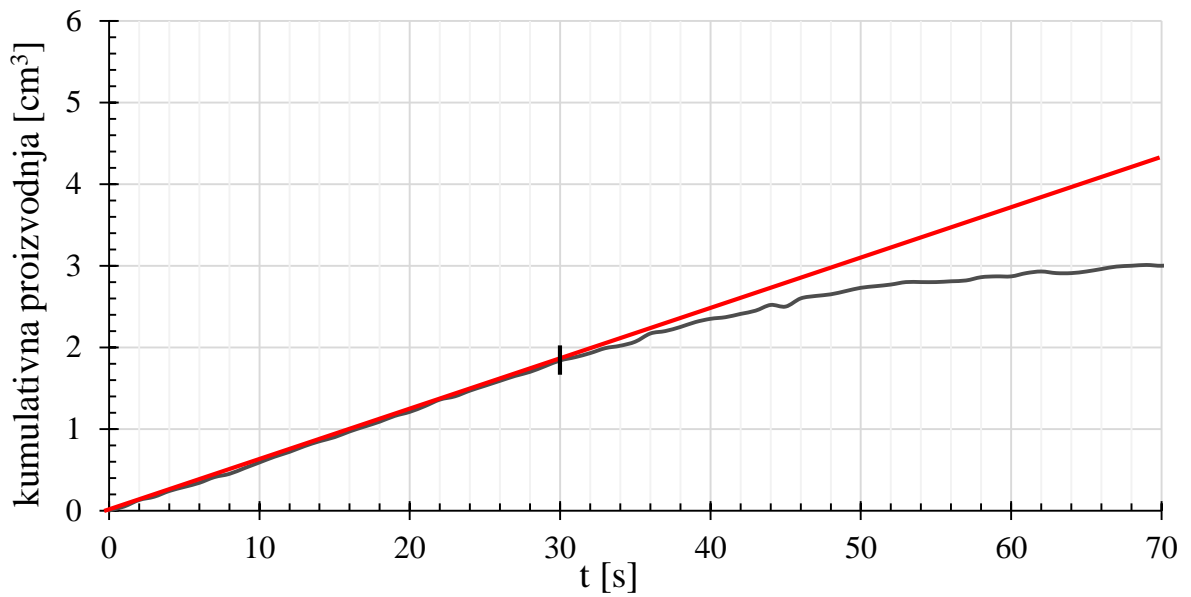


Slika 4-2. Prikaz opreme za određivanje relativnih propusnosti metodom nestacionarnog stanja.

#### **4.2. Proračun relativnih propusnosti (Goričnik, 1986)**

Mjerenje relativnih propusnosti koristeći metodu nestacionarnog stanja trajalo je oko 80 minuta. Kroz navedeno vremensko razdoblje za proračun relativnih propusnosti je odabrano 13 točaka. Treba napomenuti kako je prvu točku potrebno odabrati nakon što započne dvofazno protjecanje vode i ulja na izlazu iz jezgre.

Trenutak kada počne dvofazno protjecanje određuje se na sljedeći način. Na grafu se prikaže kumulativna proizvodnja ulja iz jezgre u vremenu. Sve dok je krivulja proizvodnje linearna to znači da postoji samo jednofazno protjecanje. U trenutku kada krivulja više nije linearna odnosno u točki infleksije započinje dvofazno protjecanje. Dvofazno protjecanje počinje nakon otprilike 30 sekundi (slika 4-3).



Slika 4-3. Prikaz početka dvofaznog protjecanja

Relativne propusnosti izračunate su za svaku točku kroz 9 koraka (za prikaz proračuna odabrana je točka 3) :

Ulazni podaci

- duljina jezgre,  $L = 0,0759 \text{ m}$
- površina baze uzorka,  $A = 0,0011581 \text{ m}^2$
- propusnost,  $k = 38 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
- porni volumen,  $PV = 15,5515 \text{ cm}^3$
- viskoznost ulja,  $\mu_o = 21,1 \text{ mPas}$
- viskoznost vode,  $\mu_w = 1,0057 \text{ mPas}$
- propusnost za ulje pri  $S_{wi}$ ,  $k_o@S_{wi} = 26,02 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
- ireducibilno zasićenje vodom,  $S_{wi} = 0,2736$

#### Korak 1:

Izračunavanje količine utisnute vode  $W_i$  u pojedinoj vremenskoj točki izražene u pornim volumenima :

$$W_i = \frac{Q_p t_k}{PV} \quad (4-1)$$

gdje je:

$W_i$  – količina utisnute vode izražena u pornim volumenima

$Q_p$  – protok pumpe [ $\text{cm}^3/\text{min}$ ]

$t_k$  – kumulativno vrijeme [min]

$$\text{za } i = 3: \quad W_i = \frac{3,38 \cdot 1}{15,5515} = 0,2173$$

$$\text{za } i = 3: \quad \frac{1}{W_i} = \frac{1}{0,2173} = 4,6010$$

(za daljnji proračun potrebna je recipročna vrijednost  $W_i$ )

## Korak 2:

Izračunavanje vrijednosti volumetrijskog protoka  $Q$  pojedinog fluida u svakoj mjernoj točki. U nizu  $i = 1, 2, 3, \dots, N$  eksperimentalnih točaka, izrazi za prvu i zadnju točku se razlikuju od izraza za sve ostale točke:

$$\text{za } i = 1: \quad Q_1 = \frac{V(i) - V(i + 1)}{t(i) - t(i + 1)} \quad (4-2)$$

$$\text{za } i = n: \quad Q_n = \frac{V(n - 1) - V(n)}{t(n - 1) - t(n)} \quad (4-3)$$

$$\text{za } i = 2, 3, 4, \dots, n-1: \quad Q_i = \left[ \frac{V(i - 1) - V(i)}{t(i - 1) - t(i)} + \frac{V(i) - V(i + 1)}{t(i) - t(i + 1)} \right] / 2 \quad (4-4)$$

gdje je:

$Q_i$  – protok fluida [ $\text{cm}^3/\text{min}$ ]

$V$  – volumen fluida [ $\text{cm}^3$ ]

$t$  – vrijeme [min]

Ukupni protok fluida:

$$\text{za } i=1: \quad Q_t = \frac{2,535 - 2,873}{0,75 - 0,85} = 3,38 \text{ ml/min}$$

$$\text{za } i=3: \quad Q_t = \left[ \frac{2,873 - 3,380}{0,85 - 1} + \frac{3,380 - 6,760}{1 - 2} \right] / 2 = 3,38 \text{ ml/min}$$

$$\text{za } i=13: \quad Q_t = \frac{202,800 - 267,020}{60 - 79} = 3,38 \text{ ml/min}$$

Protok ulja:

$$\text{za } i=1: \quad Q_o = \frac{2,50 - 2,75}{0,75 - 0,85} = 2,50 \text{ ml/min}$$

$$\text{za } i=3: \quad Q_o = \left[ \frac{2,75 - 2,87}{0,85 - 1} + \frac{2,87 - 3,41}{1 - 2} \right] / 2 = 0,67 \text{ ml/min}$$

$$\text{za } i=13: \quad Q_o = \frac{4,85 - 4,89}{60 - 79} = 0,00211 \text{ ml/min}$$

Protok vode:

$$\text{za } i=1: \quad Q_w = Q_t - Q_o = 3,38 - 2,50 = 0,88 \text{ ml/min}$$

$$\text{za } i=3: \quad Q_w = Q_t - Q_o = 3,38 - 0,67 = 2,71 \text{ ml/min}$$

$$\text{za } i=11: \quad Q_w = Q_t - Q_o = 3,38 - 0,0021 = 3,3779 \text{ ml/min}$$

### Korak 3:

Izračunavanje produkta recipročnih vrijednosti kumulativne utisnute vode ( $W_i$ ) relativne injektivnosti :

$$Ir = \frac{Q_t \cdot L \cdot \mu_o}{k_o @ S_{wi} \cdot \Delta p \cdot A} \quad (4-5)$$

gdje je:

$Q_t$  – ukupni protok fluida [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ]

$L$  – duljina jezgre [cm]

$\mu_o$  – viskoznost ulja [cP]

$k_o @ S_{wi}$  – propusnost za ulje pri  $S_{wi}$  [D]

$\Delta p$  – razlika tlaka kroz jezgru [bar]

$A$  – površina baze jezgre [cm<sup>2</sup>]

za  $i = 3$ : 
$$I_r = \frac{3,38 \cdot 7,59 \cdot 21,1}{0,02602 \cdot 15,442 \cdot 11,581 \cdot 60} = 1,94$$

Traženi produkt je:

$$\frac{1}{W_i \cdot I_r} = 4,601 \cdot \frac{1}{1,94} = 2,37$$

#### **Korak 4:**

Izračunavanje udjela protoka ulja ( $f_o$ ):

$$f_o = \frac{Q_o}{Q_t} \quad (4-6)$$

gdje je:

$Q_o$  – protok ulja [cm<sup>3</sup>/min]

$Q_t$  – ukupni protok fluida [cm<sup>3</sup>/min]

$f_o$  – frakcijski protok ulja

za  $i = 3$ : 
$$f_o = \frac{0,670}{3,38} = 0,1982$$

#### **Korak 5:**

Izračunavanje omjera relativnih propusnosti ( $k_{rw}/k_{ro}$ ):

$$\frac{k_{rw}}{k_{ro}} = \frac{(1 - f_o) \cdot \mu_w}{f_o \cdot \mu_o} \quad (4-7)$$

gdje je:

$\frac{k_{rw}}{k_{ro}}$  – omjer relativnih propusnosti vode i ulja

$f_o$  – frakcijski protok ulja

$\mu_w$  – viskoznost vode [Pas]

$\mu_o$  – viskoznost ulja [Pas]

$$\text{za } i = 3: \quad \frac{k_{rw}}{k_{ro}} = \frac{(1 - 0,1982)}{0,1982} \cdot \frac{1,0057}{21,1} = 0,193$$

### Korak 6:

Izračunavanje relativne propusnosti za ulje koja je definirana kao:

$$k_{ro} = \frac{f_o}{\frac{d\left(\frac{1}{W_i I_r}\right)}{d\left(\frac{1}{W_i}\right)}} \quad (4-8)$$

gdje je:

$k_{ro}$  – relativna propusnost za ulje

$\frac{d\left(\frac{1}{W_i I_r}\right)}{d\left(\frac{1}{W_i}\right)}$  – koeficijent nagiba krivulje

$f_o$  – frakcijski protok ulja

Prije izračunavanja relativne propusnosti za ulje, prvo je potrebno izračunati vrijednost koeficijenta nagiba krivulje. U nastavku je prikazan opći izraz za izračunavanje nagiba koji se primjenjuje za točke  $i = 2, 3, \dots, n-1$ , dok se za prvu i zadnju točku nagib računa analogno postupku u koraku 2. Zbog jednostavnijeg proračuna vrijednosti  $\frac{1}{W_i I_r}$  i  $\frac{1}{W_i}$  su ranije izračunate:

$$\frac{d\left(\frac{1}{W_i I_r}\right)}{d\left(\frac{1}{W_i}\right)} \approx \frac{\Delta\left(\frac{1}{W_i I_r}\right)}{\Delta\left(\frac{1}{W_i}\right)} = \left[ \frac{\frac{1}{W_{i(i-1)} I_{r(i-1)}} - \frac{1}{W_{i(i)} I_{r(i)}}}{\frac{1}{W_{i(i-1)}} - \frac{1}{W_{i(i)}}} + \frac{\frac{1}{W_{i(i)} I_{r(i)}} - \frac{1}{W_{i(i+1)} I_{r(i+1)}}}{\frac{1}{W_{i(i)}} - \frac{1}{W_{i(i+1)}}} \right] / 2 \quad (4-9)$$

$$\text{za } i = 3: \quad \frac{\Delta\left(\frac{1}{W_i I_r}\right)}{\Delta\left(\frac{1}{W_i}\right)} = \frac{\left[\frac{3,10 - 2,37}{5,41 - 4,60} + \frac{2,37 - 1,03}{4,60 - 2,30}\right]}{2} = 0,74$$

$$\text{za } i = 3: \quad k_{ro} = \frac{0,1982}{0,74} = 0,269$$

### Korak 7:

Izračunavanje relativne propusnosti za vodu:

$$k_{rw} = \frac{k_{rw}}{k_{ro}} \cdot k_{ro} \quad (4-10)$$

gdje je:

$\frac{k_{rw}}{k_{ro}}$  – omjer relativnih propusnosti vode i ulja (ranije izračunat)

$k_{ro}$  – relativna propusnost za ulje

$k_{rw}$  – relativna propusnost za vodu

$$\text{za } i = 3: \quad k_{rw} = 0,193 \cdot 0,269 = 0,05$$

### Korak 8:

Izračunavanje zasićenja vodom na izlaznom kraju jezgre ( $S_{w2}$ ), kojem odgovaraju netom izračunate relativne propusnosti:

$$S_{w2} = \bar{S}_w - f_o W_i \quad (4-11)$$

gdje je:

$S_{w2}$  – zasićenje vodom na izlaznom kraju jezgre

$\bar{S}_w$  – prosječno zasićenje jezgre vodom

$f_o$  – fraksijski protok ulja

$W_i$  – količina utisnute vode [PV]



Prvo je potrebno izračunati  $\bar{S}_w$ :

$$\bar{S}_w = \frac{V_o}{PV} + S_{wi} \quad (4-12)$$

gdje je:

$\bar{S}_w$  – prosječno zasićenje jezgre vodom

$S_{wi}$  – početno zasićenje jezgre vodom

$V_o$  – kumulativno proizvedeno ulje [cm<sup>3</sup>]

$PV$  – porni volumen jezgre [cm<sup>3</sup>]

za  $i = 3$ : 
$$\bar{S}_w = \frac{2,87}{15,5515} + 0,27376 = 0,458$$

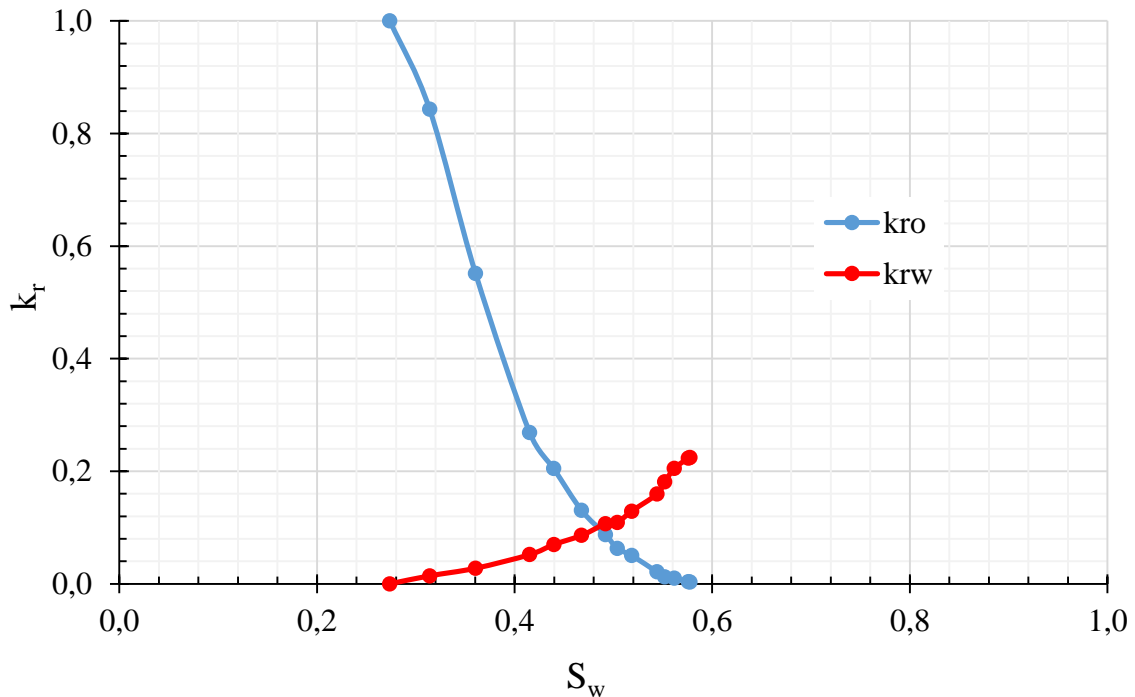
za  $i = 3$ : 
$$S_{w2} = 0,458 - 0,1982 \cdot 0,2173 = 0,415$$

### Korak 9:

Ukupni rezultati se prikazuju tablično (tablica 4-1) i grafički (slika 4-4).

Tablica 4-1. Izračunate relativne propusnosti koristeći metodu nestacionarnog stanja.

$S_w$	$k_{ro}$	$k_{rw}$
0,274	1,000	0,000
0,314	0,843	0,014
0,360	0,552	0,028
0,415	0,269	0,052
0,440	0,205	0,070
0,468	0,130	0,086
0,492	0,088	0,107
0,504	0,063	0,109
0,519	0,050	0,129
0,544	0,021	0,159
0,552	0,012	0,181
0,562	0,010	0,205
0,576	0,004	0,223
0,578	0,003	0,224



Slika 4-4. Prikaz relativnih propusnosti dobivenih metodom nestacionarnog stanja.

### 4.3. Normalizacija krivulje relativnih propusnosti (Stiles, 2005)

Nakon što su izračunate relativne propusnosti dobivene laboratorijskim mjerenjima, uobičajeno je obaviti normalizaciju krivulje relativnih propusnosti kako bi se krivulju „izgladilo“. Naime, u daljim proračunima se često dobivaju nelogični rezultati ukoliko trend krivulje oscilira, a u numeričkoj situaciji takve krivulje dovode do numeričkih pogrešaka i problema s konvergencijom rješenja. Osim toga, normalizacijom se dobiva stvarna vrijednost ireducibilnog zasićenja uljem te stvarna zadnja točka relativne propusnosti za vodu. Za prikaz proračuna relativnih propusnosti odabrana je točka 3:

#### Korak 1:

Određivanje normaliziranog zasićenja uljem:

$$S_{on} = \frac{1 - S_w - S_{or}}{1 - S_{wi} - S_{or}} \quad (4-13)$$

gdje je:

$S_{on}$  – normalizirano zasićenje uljem

$S_w$  – zasićenje jezgre vodom

$S_{or}$  – ireducibilno zasićenje uljem

$S_{wi}$  – početno zasićenje vodom

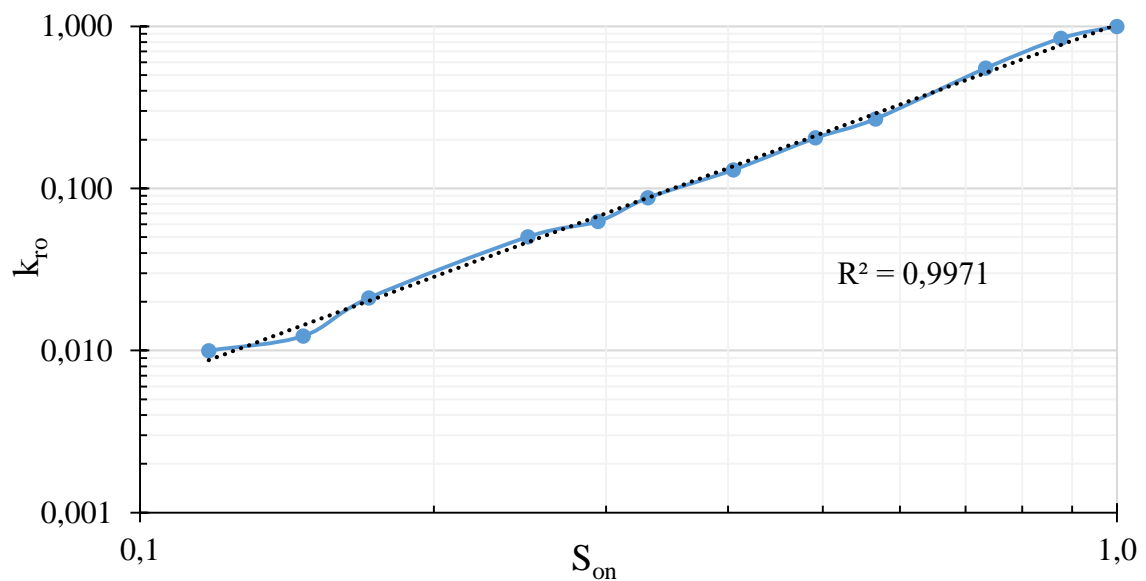
za  $i = 3$ :

$$S_{on} = \frac{1 - 0,360 - 0,4}{1 - 0,274 - 0,4} = 0,734$$

### Korak 2:

Grafičko određivanje stvarnog ireducibilnog zasićenja:

Na log-log dijagramu treba prikazati ranije izračunate relativne propusnosti za ulje i normalizirane vrijednosti zasićenja uljem. U prethodnom se koraku mijenjaju vrijednosti ireducibilnog zasićenja uljem sve dok krivulja ne poprimi što linearniji oblik. Kada je krivulja skoro linearna, može se zaključiti kako je pronađeno stvarno ireducibilno zasićenje uljem.



Slika 4-5. Grafičko određivanje stvarnog ireducibilnog zasićenja uljem.

Očitano iz proračuna:  $S_{or} = 0,4$ .

### Korak 3:

Određivanje normaliziranog zasićenja vodom:

$$S_{wn} = \frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{wi} - S_{or}} \quad (4-14)$$

gdje je:

$S_{wn}$  – normalizirano zasićenje vodom

$S_w$  – zasićenje jezgre vodom

$S_{or}$  – ireducibilno zasićenje uljem

$S_{wi}$  – početno zasićenje vodom

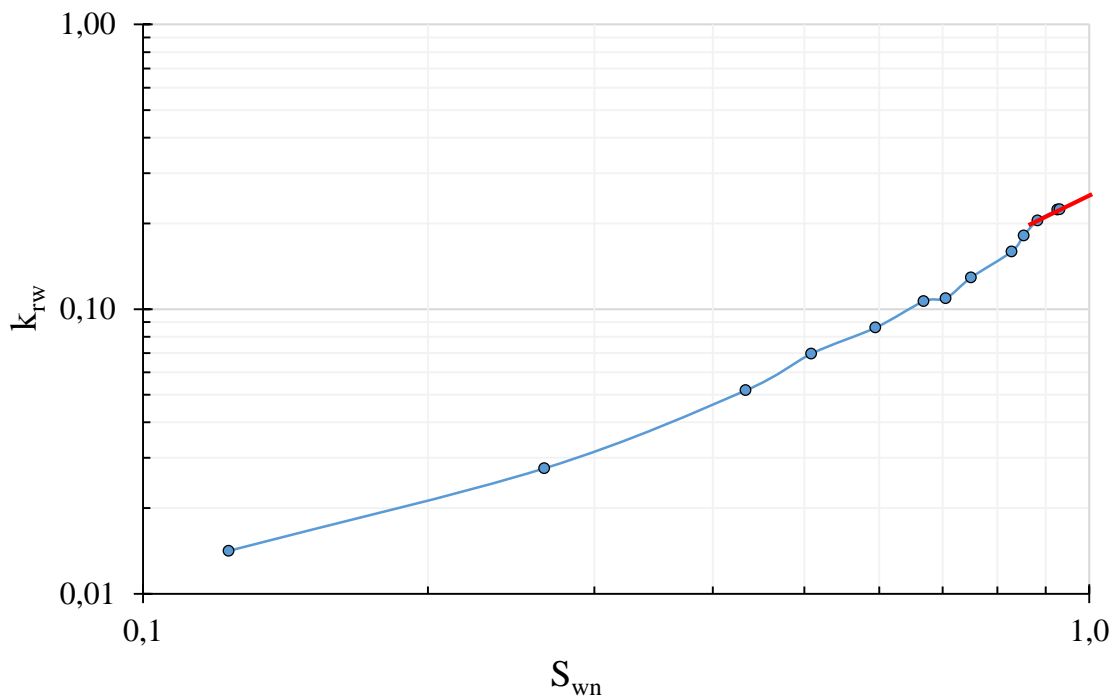
za  $i = 3$

$$S_{wn} = \frac{0,360 - 0,274}{1 - 0,274 - 0,4} = 0,266$$

#### **Korak 4:**

Određivanje stvarne zadnje točke relativne propusnosti za vodu:

Na log-log dijagramu treba prikazati relativne propusnosti za vodu u ovisnosti o normaliziranom zasićenju vodom. Zatim se kroz nekoliko (2 ili 3, Stiles, 2005) zadnjih točaka povlači pravac te na pravcu očitati vrijednost relativne propusnosti za vodu pri  $S_{wn} = 1$ .



Slika 4-6. Grafičko određivanje stvarne zadnje točke relativne propusnosti za vodu.

očitano:  $k_{rw} = 0,26$

### Korak 5:

Određivanje Coreyevih eksponenata:

Za svaku se točku posebno izračunaju Coreyevi eksponenti te se nacrtaju 2 grafa ovisnosti Coreyevog eksponenta o zasićenju vodom (slika 4-7 i 4-8). U idealnom slučaju trebalo bi se dobiti pravac paralelan s apcismom, međutim, najčešće se ne dobije idealna korelacija pravcem te se uzima srednja vrijednost za svaki eksponent (ukoliko neka vrijednost jako odstupa od ostatka, ona je kod računanja srednje vrijednosti zanemarena).

$$N'_o = \frac{\log(k_{ro})}{\log(S_{on})} \quad (4-15)$$

gdje je:

$N'_o$  – Coreyev eksponent za ulje za jednu točku

$S_{on}$  – normalizirano zasićenje jezgre uljem

$k_{ro}$  – relativna propusnost za ulje

$$N'_w = \frac{\log(k'_{rw}) - \log(k_{rw})}{\log(S'_{wn}) - \log(S_{wn})} \quad (4-16)$$

gdje je:

$N'_w$  – Coreyev eksponent za vodu za jednu točku

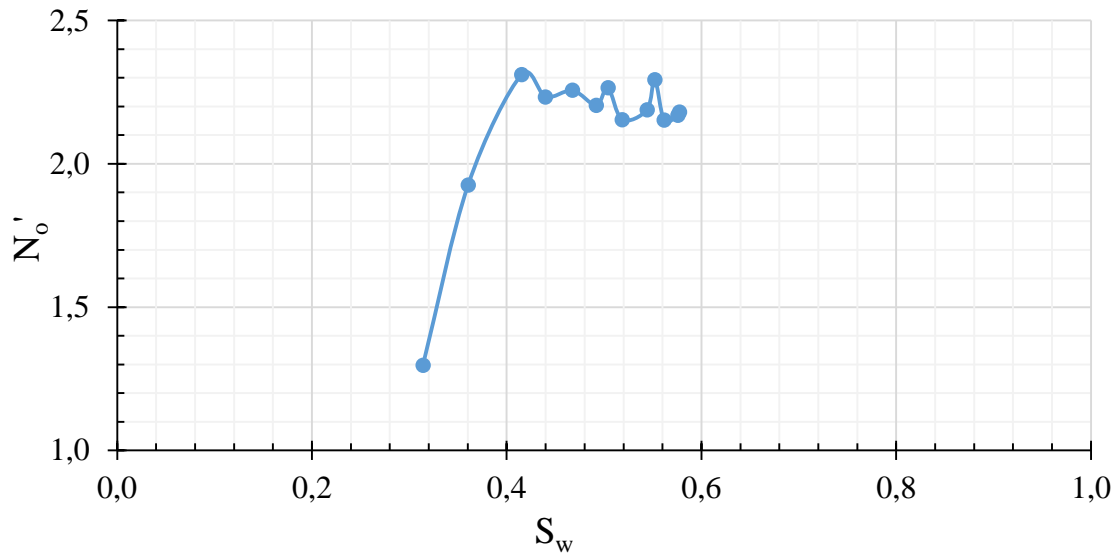
$S_{wn}$  – normalizirano zasićenje jezgre vodom

$k_{rw}$  – relativna propusnost za vodu

$S'_{wn}$  – normalizirano zasićenje jezgre vodom pri  $S_{or} = 1$

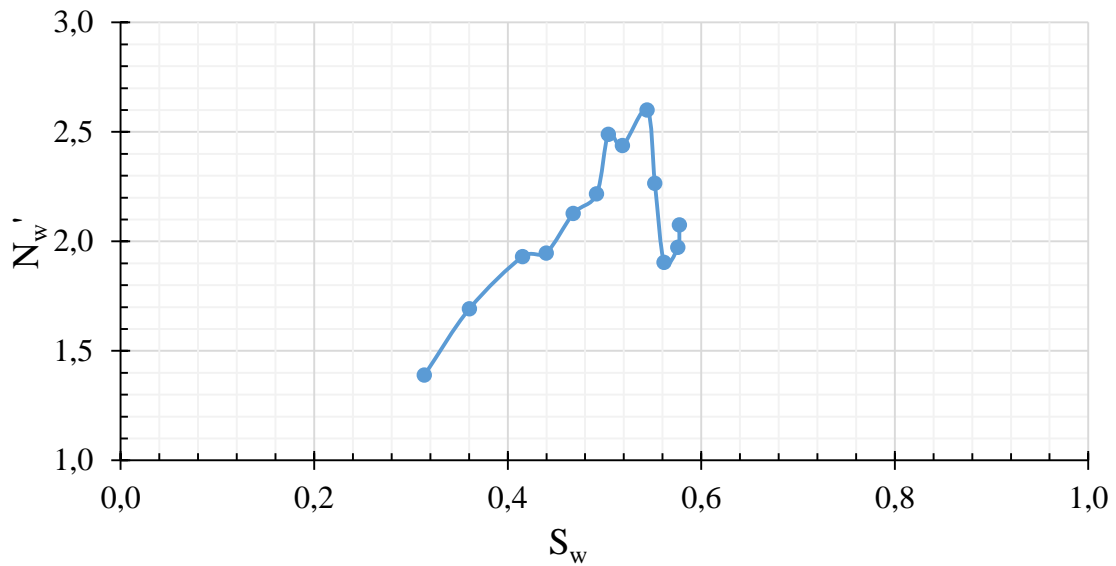
za  $i = 3$  
$$N'_o = \frac{\log(0,552)}{\log(0,734)} = 1,927$$

za  $i = 3$  
$$N'_w = \frac{\log(0,26) - \log(0,028)}{\log(1) - \log(0,266)} = 1,692$$



Slika 4-7. Grafičko eliminiranje odskočnika kod određivanja Coreyevog eksponenta  $N_o$ .

Grafičkim određivanjem moguće je eliminirati odskočnike (engl. *outliere*) od korelacije.



Slika 4-8. Grafičko eliminiranje odskočnika kod određivanja Coreyevog eksponenta  $N_w$ .

$$N_o = 2,219$$

$$N_w = 2,245$$

**Korak 6:**

Određivanje normaliziranih relativnih propusnosti:

$$k_{ron} = S_{on}^{N_o} \tag{4-17}$$

gdje je:

$k_{ron}$  – normalizirana relativna propusnost za ulje

$S_{on}$  – normalizirano zasićenje jezgre uljem

$N_o$  – Coreyev eksponet za ulje

$$k_{rwn} = k'_{rw} S_{wn}^{N_w} \tag{4-18}$$

gdje je:

$k_{rwn}$  – normalizirana relativna propusnost za vodu

$S_{wn}$  – normalizirano zasićenje jezgre vodom

$N_w$  – Coreyev eksponent za vodu

$k'_{rw}$  – relativna propusnost za vodu u zadnjoj točki

$$\text{za } i = 3 \quad k_{ron} = 0,734^{2,219} = 0,504$$

$$\text{za } i = 3 \quad k_{rwn} = 0,26 \cdot 0,266^{2,245} = 0,013$$

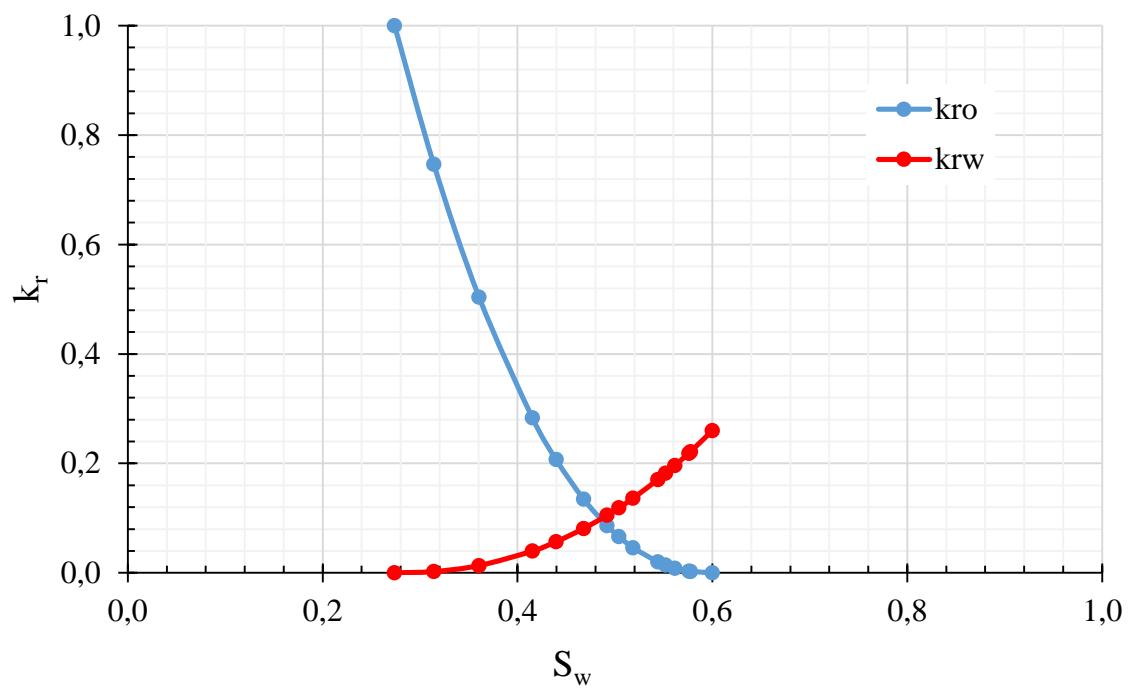
**Korak 6:**

Normalizirane relativne propusnosti se prikazuju grafički i tablično (slika 4-9, tablica 4-2).

Tablica 4-2. Izračunate normalizirane relativne propusnosti.

$S_w$	$k_{ro}$	$k_{rw}$
0,274	1,000	0,000
0,314	0,747	0,002
0,360	0,504	0,013
0,415	0,283	0,040
0,440	0,207	0,057
0,468	0,135	0,081
0,492	0,086	0,105
0,504	0,066	0,119
0,519	0,046	0,136
0,544	0,020	0,170
0,552	0,014	0,182
0,562	0,009	0,196
0,576	0,003	0,219
0,578	0,003	0,221
0,600	0,000	0,260





Slika 4-9. Prikaz normaliziranih relativnih propusnosti.

## 5. Metoda određivanja relativnih propusnosti stacionarnim stanjem (engl. *steady-state, SS*)

Metoda određivanja relativnih propusnosti stacionarnim stanjem je druga najčešće korištena metoda za određivanje relativnih propusnosti. Metoda se izvodi u nekoliko točaka, na način da se u svakoj točki protiskuju obje faze u određenom omjeru kroz jezgru sve dok diferencijalni tlak ne postane konstantan. Vrijeme potrebno za izvođenje ove metode je nekoliko puta duže od onoga potrebnoga za provođenje metode nestacionarnog stanja, no u slučaju ove metode nema složenog matematičkog proračuna. Kao i kod metode nestacionarnog stanja i kod ove metode postoji nekoliko različitih načina za izvedbu mjerenja. U ovom diplomskom radu odabrana je metoda slična Penn-State metodi, gdje se mjeri otpor jezgre kako bi se moglo izračunati zasićenje jezgre vodom (Honarpour et al., 1986).

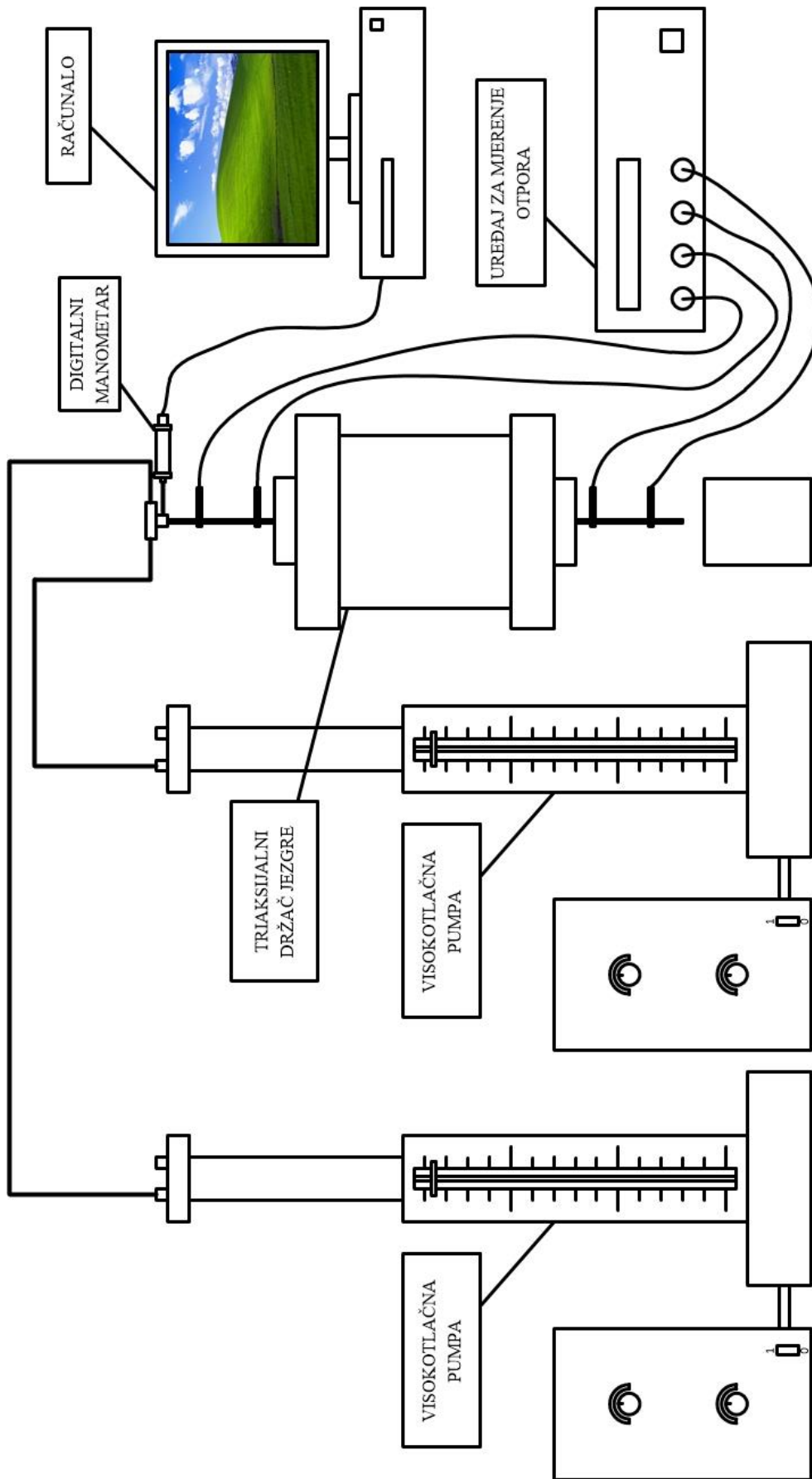
### 5.1. Opis mjerenja

Priprema jezgre prije stavljanja u triaksijalni držač jezgre ista je kao i kod Amottove metode. Kod ove metode se za postizanje vanjskog (engl. *overburden, OB*) tlaka u triaksijanom držaču kao radni fluid koristi ulje, a ne voda kao kod prijašnjih mjerenja. Voda se ne smije koristiti, jer je ona dobar vodič električne struje, a kod ove metode se mjeri otpor jezgre kako bi se izračunalo zasićenje vodom u bilo kojem trenutku. Nakon stavljanja jezgre u držač, napravljena je dinamička zamjena vode uljem te je na samom kraju dinamičke zamjene izmjerena efektivna propusnost za ulje. Zatim se krenulo s izvođenjem testa koristeći metodu stacionarnog stanja. Istovremeno su kroz jezgru protiskivana dva fluida (voda i ulje). Mjerenje se odvijalo u 12 točaka, gdje se u slučaju prvih 8 točaka postepeno povećavao frakcijski protok vode i smanjivao frakcijski protok ulja na ulazu u jezgru. U slučaju zadnje 4 točke, nakon što je jezgra postigla ireducibilno zasićenje uljem, kroz jezgru je protiskivana samo voda s različitim protocima kako bi se anulirali kapilarni rubni efekti. Po završetku testa, jezgra je izvađena i izvagana zbog provjere rezultata.

Oprema koja je korištena za određivanje relativnih propusnosti ovom metodom je sljedeća (shema spajanja opreme prikazana je na slici 5-1):

- dvije visokotlačne pumpe,

- računalo,
- digitalni manometar,
- triksijani držač jezgre (slika 5-2),
- oprema za mjerenje otpora jezgre (slika 5-2).



Slika 5-1. Shematski prikaz spajanja opreme.



Slika 5-2. Oprema za mjerenje otpora jezgre.

## 5.2. Proračun relativnih propusnosti

Proračun relativnih propusnosti koristeći metodu stacionarnog stanja mnogo je jednostavniji od onoga u metodi nestacionarnog stanja. Relativna propusnost u svakoj točki s lakoćom je izračunata pomoću Darcyevog zakona dok je zasićenje vodom u svakoj točki izračunato koristeći Archievu jednadžbu. Za prikaz proračuna odabrana je točka 3:

Ulazni podaci

- duljina jezgre,  $L = 0,0759 \text{ m}$
- površina baze uzorka,  $A = 0,0011581 \text{ m}^2$
- propusnost,  $k = 38 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
- porni volumen,  $PV = 15,5515 \text{ ml}$
- viskoznost ulja,  $\mu_o = 21,1 \text{ mPas}$
- viskoznost vode,  $\mu_w = 1,0057 \text{ mPas}$
- propusnost za ulje pri  $S_{wi}$ ,  $k_o@S_{wi} = 23,11 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
- ireducibilno zasićenje vodom,  $S_{wi} = 0,2551$

5.2.1. Proračun relativnih propusnosti:

$$k_w = \frac{Q_w \mu_w L}{A \Delta p} \cdot 10^{15} \quad (5-1)$$

gdje je:

$k_w$  – efektivna propusnost za vodu [ $10^{-15} \cdot \text{m}^2$ ]

$Q_w$  – protok vode [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$L$  – duljina jezgre [m]

$\mu_w$  – viskoznost vode [Pas]

$\Delta p$  – razlika tlaka kroz jezgru [Pa]

$A$  – površina baze jezgre [ $\text{m}^2$ ]

za  $i = 3$ : 
$$k_w = \frac{4,44 \cdot 10^{-9} \cdot 0,0010057 \cdot 0,0759}{0,001158 \cdot 13,2 \cdot 10^5} = 0,221945 \text{ mD}$$

$$k_o = \frac{Q_o \mu_o L}{A \Delta p} \cdot 10^{15} \quad (5-2)$$

gdje je:

$k_o$  – efektivna propusnost za vodu [ $10^{-15} \cdot \text{m}^2$ ]

$Q_o$  – protok ulja [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$L$  – duljina jezgre [m]

$\mu_o$  – viskoznost ulja [Pas]

$\Delta p$  – razlika tlaka kroz jezgru [Pa]

$A$  – površina baze jezgre [ $\text{m}^2$ ]

za  $i = 3$ : 
$$k_w = \frac{6,66 \cdot 10^{-9} \cdot 0,021101 \cdot 0,0759}{0,001158 \cdot 13,2 \cdot 10^5} = 6,985 \text{ mD}$$

$$k_{rw} = \frac{k_w}{k_o @ S_{wi}} \quad (5-3)$$

gdje je:

$k_{rw}$  – relativna propusnost za vodu

$k_o @ S_{wi}$  – relativna propusnost za ulje pri  $S_{wi}$  [ $10^{-15} \cdot m^2$ ]

$k_w$  – efektivna propusnost za vodu [ $10^{-15} \cdot m^2$ ]

za  $i = 3$ :

$$k_{rw} = \frac{0,221945}{23,11} = 0,009604$$

$$k_{ro} = \frac{k_o}{k_o @ S_{wi}} \quad (5-4)$$

gdje je:

$k_{ro}$  – relativna propusnost za ulje

$k_o @ S_{wi}$  – relativna propusnost za ulje pri  $S_{wi}$  [ $10^{-15} \cdot m^2$ ]

$k_o$  – efektivna propusnost za ulje [ $10^{-15} \cdot m^2$ ]

za  $i = 3$ :

$$k_{ro} = \frac{6,985}{23,11} = 0,3022$$

### 5.2.2. Proračun zasićenja vodom:

$$S_w = 10^{\frac{\log \frac{1}{R_t}}{R_c} \cdot n} \quad (5-5)$$

gdje je:

$S_w$  – zasićenje jezgre vodom

$R_t$  – otpor jezgre [ $\Omega$ ]

$R_c$  – otpor jezgre pri zasićenju 100 posto vodom [ $\Omega$ ]

$n$  – eksponent zasićenja = 2,13

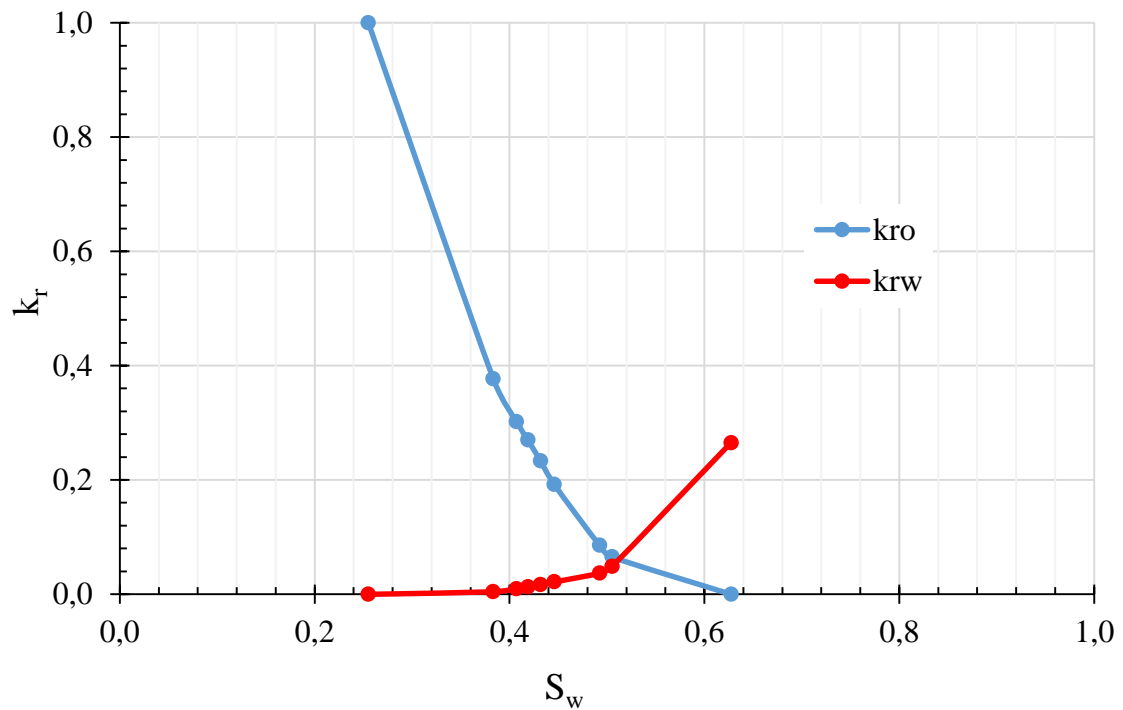
za  $i = 3$ :

$$S_w = 10^{\frac{\log \frac{1}{2550} \cdot 376}{2,13}} = 0,40709$$

**Prikaz relativnih propusnosti:**

Tablica 5-1. Izračunate relativne propusnosti koristeći metodu stacionarnog stanja.

$S_w$	$k_{ro}$	$k_{rw}$
0,255	1,000	0,000
0,383	0,377	0,004
0,407	0,302	0,010
0,419	0,270	0,013
0,432	0,234	0,017
0,446	0,192	0,022
0,492	0,086	0,037
0,505	0,065	0,049
0,627	0,000	0,265



Slika 5-3. Prikaz relativnih propusnosti dobivenih metodom stacionarnog stanja.



### 5.3. Normalizacija krivulje relativnih propusnosti

Normalizacija krivulje relativnih propusnosti kod metode stacionarnog stanja analogna je onoj kod metode nestacionarnoga stanja.

#### Korak 1:

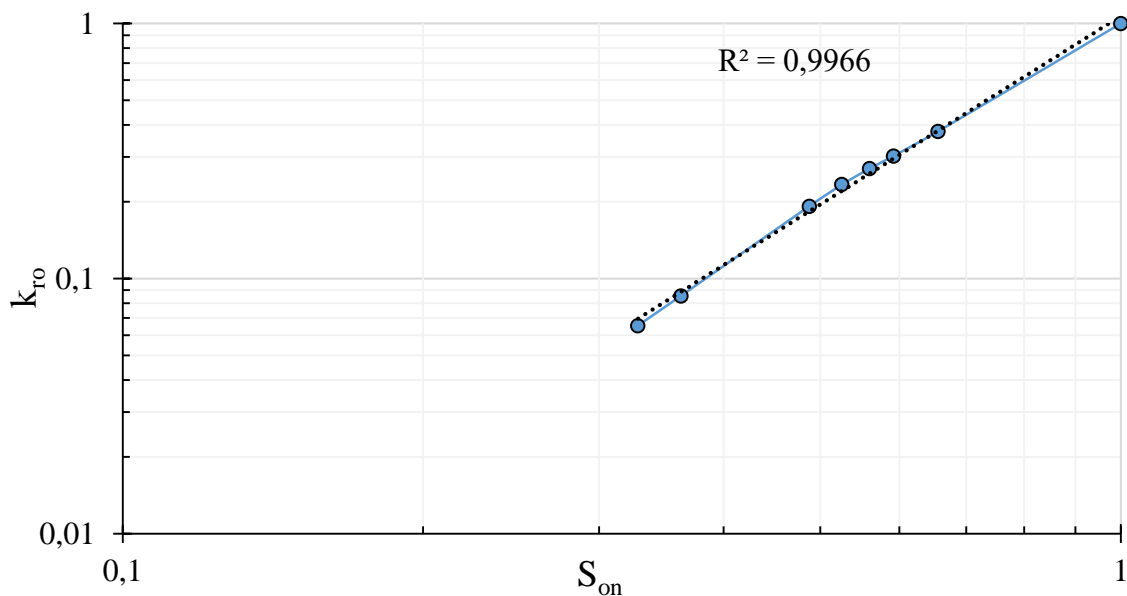
Određivanje normaliziranog zasićenja uljem prema jednadžbi 4-13:

$$\text{za } i = 3: \quad S_{on} = \frac{1 - 0,407 - 0,375}{1 - 0,255 - 0,375} = 0,592$$

#### Korak 2:

Grafičko određivanje stvarnog ireducibilnog zasićenja:

Grafičko određivanje stvarnog ireducibilnog zasićenja analogno je onome kod metode nestacionarnog stanja.



Slika 5-4. Grafičko određivanje stvarnog ireducibilnog zasićenja uljem.

#### Korak 3:

Određivanje normaliziranog zasićenja vodom prema jednadžbi 4-14:

za  $i = 3$ :

$$S_{wn} = \frac{0,407 - 0,255}{1 - 0,255 - 0,375} = 0,408$$

**Korak 4:**

Određivanje stvarne zadnje točke relativne propusnosti za vodu:

U ovome slučaju  $S_{wn}$  je došlo do vrijednosti 1 tako da nije potrebno grafički odrediti stvarnu zadnju točku relativne propusnosti za vodu jer je ona već izračunata.

**Korak 5:**

Određivanje Coreyevih eksponenata:

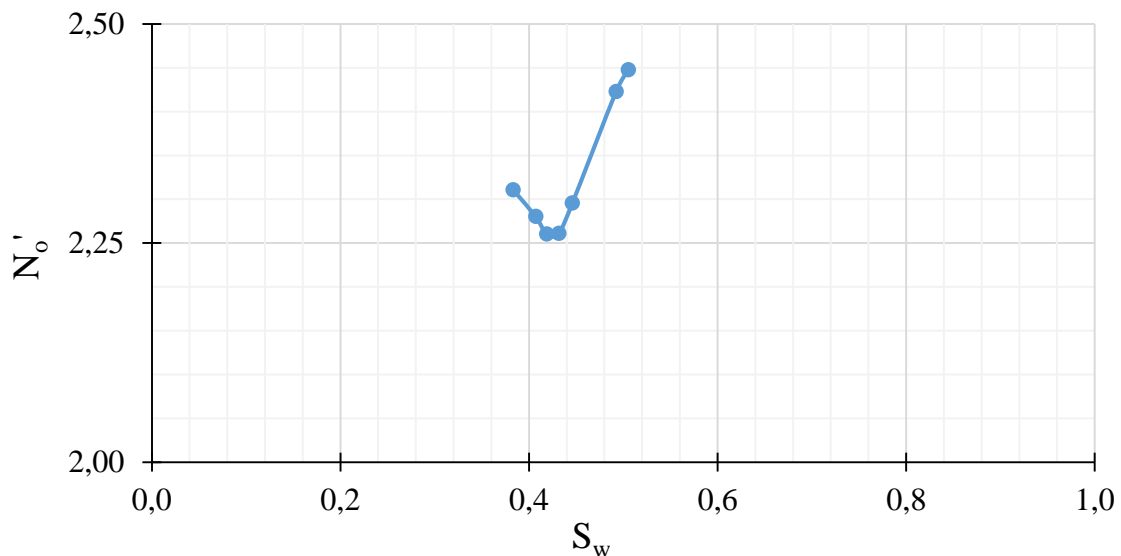
Coreyevi eksponenti se posebno izračunaju za svaku točku (prema jednadžbama 4-15 i 4-16) o te se crtaju dva dijagrama u kojima se Coreyev eksponent prikazuje u ovisnosti o zasićenju vodom. U idealnom slučaju trebao bi se dobiti pravac paralelan s apcisolom. U ovome slučaju nije dobiven pravac te je stoga uzeta srednja vrijednost za svaki eksponent.

za  $i = 3$ :

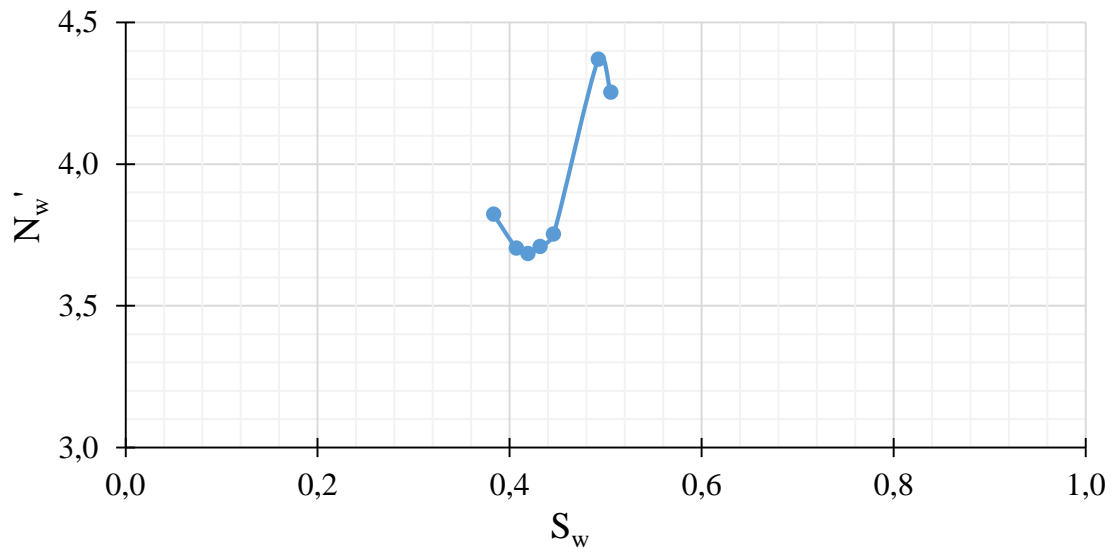
$$N'_o = \frac{\log(0,302)}{\log(0,592)} = 2,280$$

za  $i = 3$ :

$$N'_w = \frac{\log(0,265) - \log(0,0096)}{\log(1) - \log(0,408)} = 3,704$$



Slika 5-5. Grafičko eliminiranje odskočnika kod određivanja Coreyevog eksponenta  $N_o$ .



Slika 5-6. Grafičko eliminiranje odskočnika kod određivanja Coreyevog eksponenta  $N_w$ .

$$N_o = 2,325$$

$$N_w = 3,899$$

**Korak 6:**

Određivanje normaliziranih relativnih propusnosti prema jednadžbama 4-17 i 4-18:

$$\text{za } i = 3: \quad k_{ron} = 0,745^{2,325} = 0,504$$

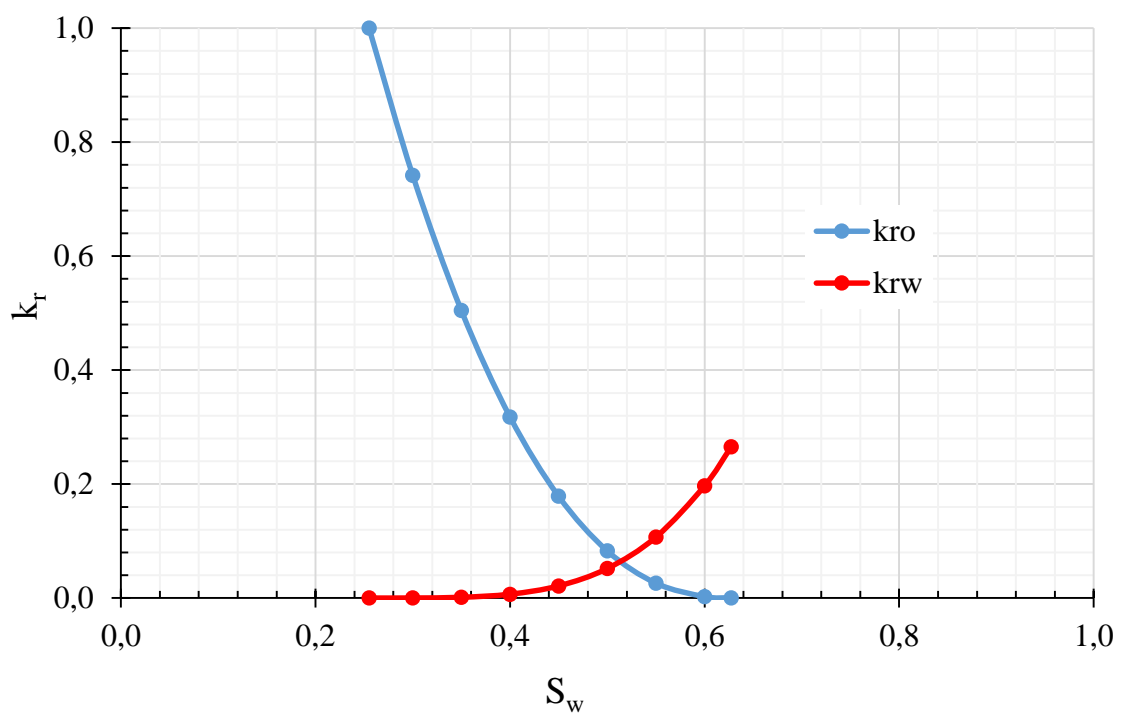
$$\text{za } i = 3: \quad k_{rwn} = 0,265 \cdot 0,255^{3,899} = 0,0013$$

**Korak 6:**

Prikaz normaliziranih relativnih propusnosti:

Tablica 5-2. Izračunate normalizirane relativne propusnosti.

$S_w$	$k_{ro}$	$k_{rw}$
0,255	1,000	0,000
0,300	0,742	0,000
0,350	0,504	0,001
0,400	0,318	0,007
0,450	0,178	0,021
0,500	0,083	0,052
0,550	0,026	0,107
0,600	0,002	0,197
0,627	0,000	0,265



Slika 5-7. Prikaz normaliziranih relativnih propusnosti.

## 6. Analiza rezultata

### 6.1. Močivost

Močivost je mjerena koristeći tri različite metode. U tablici 6-1 su prikazani dobiveni rezultati:

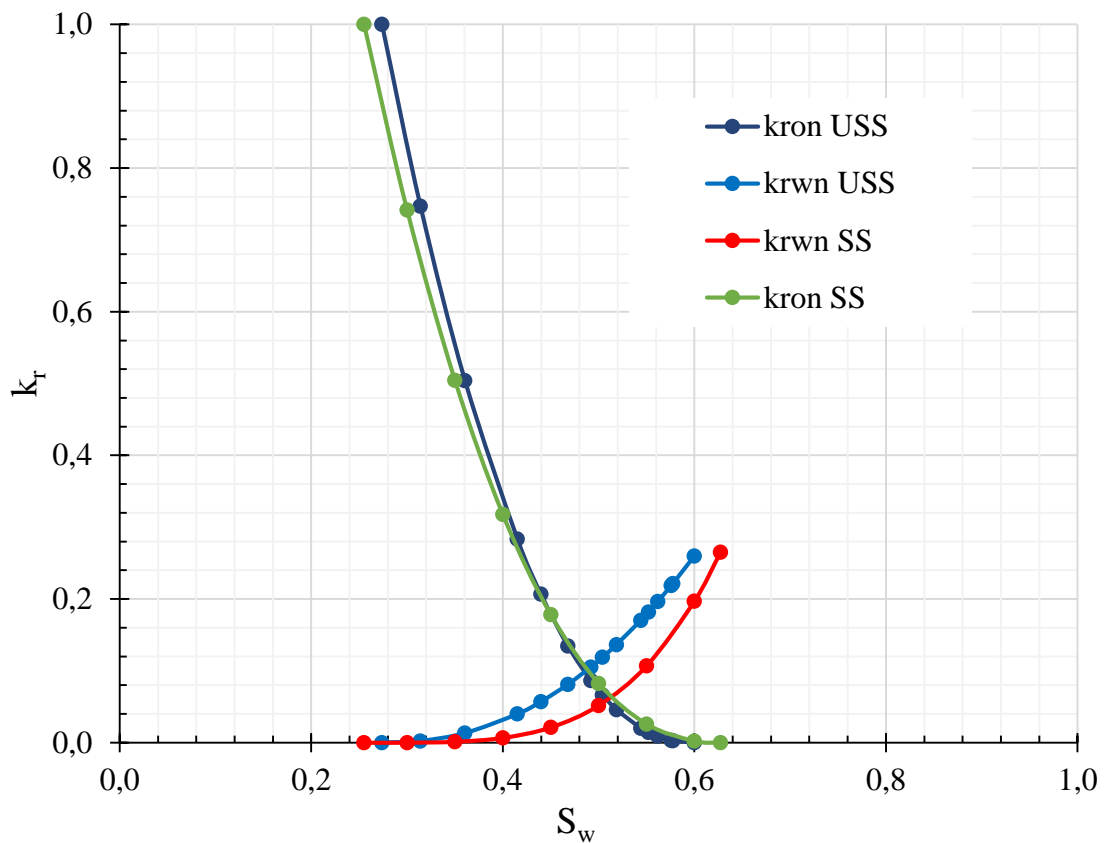
Tablica 6-1. Rezultati močivosti dobivenih različitim metodama.

<b>Amott</b>		srednje močiva stijena
	ulje 1	srednje močiva stijena
<b>Rise In Core</b>	ulje 16	vodomočiva stijena
	nafta	blago vodomočiva stijena
<b>Craigov kriterij</b>		vodomočiva stijena

Analizom dobivenih rezultata zaključeno je da je ulje 1 nepovoljno za mjerenje močivosti stijene. Naime, svi rezultati, osim onih kada je korišteno ulje 1, pokazuju kako je stijena vodomočiva, što je bilo i za očekivati s obzirom na podrijetlo jezgara koje su korištene. Iz nepoznatih razloga ulje 1 moči stijenu u sličnoj razini kao i voda. Zaključak ove analize je da je korištena stijena vodomočiva.

### 6.2. Relativne propusnosti

Kao što je i ranije napomenuto, u ovom diplomskom radu su korištene dvije metode za određivanje relativnih propusnosti - metoda nestacionarnog protjecanja, (engl. *Unsteady State*, USS) i metoda stacionarnog stanja (engl. *Steady State*, SS). Na slici 6-1 prikazana je usporedba dobivenih normaliziranih relativnih propusnosti:



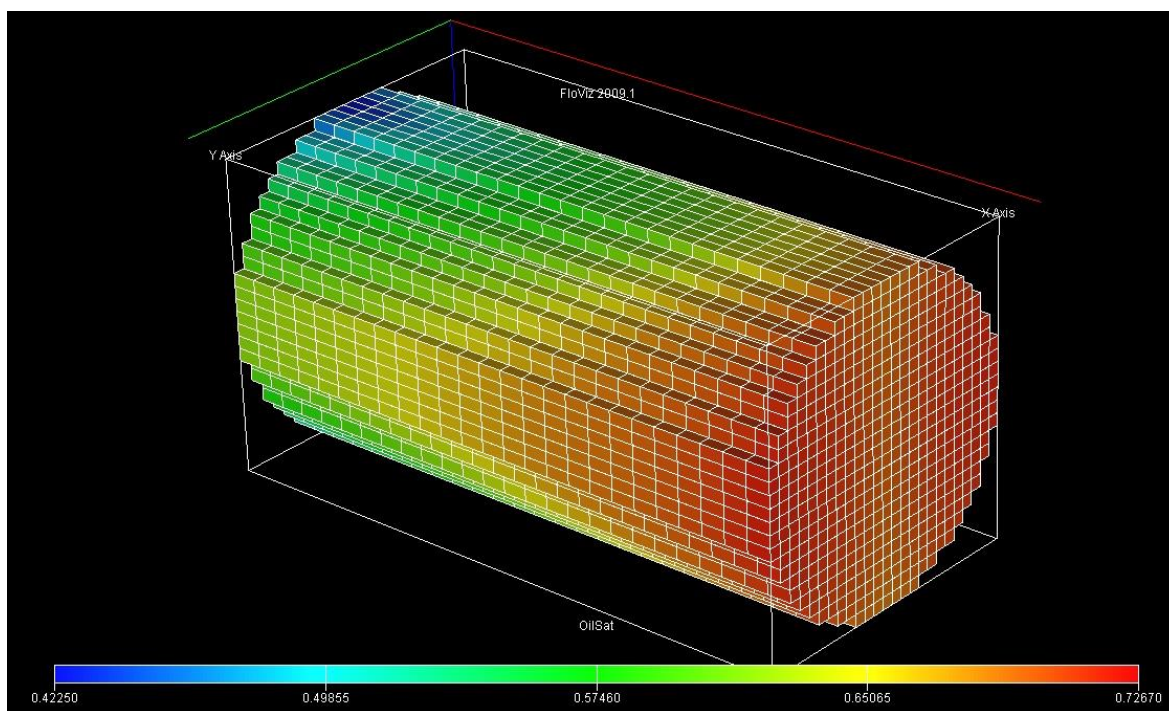
Slika 6-1. Usporedba normaliziranih relativnih propusnosti dobivenih SS i USS metodom.

Vidljivo je kako su relativne propusnosti za ulje veoma slične, dok je kod relativnih propusnosti za vodu vidljivo odstupanje. Naime, relativne propusnosti za vodu dobivene SS metodom su značajno manje od onih dobivenih USS metodom. Razlog tome je djelovanje kapilarnih sila koje na kraju jezgre zadržavaju močivu fazu (vodu) i tako smanjuju relativnu propusnost za vodu. Problem se pokušao riješiti povećanjem protoka kroz jezgru, ali to je rezultiralo pojavom emulzije koja je osjetno smanjila propusnost jezgre. Vidljiv je i mali pomak krivulja po apcisi (različito početno zasićenje vodom) što je rezultat malih promjena svojstava jezgre zbog učestalog korištenja jezgre.

## 7. Simulacija

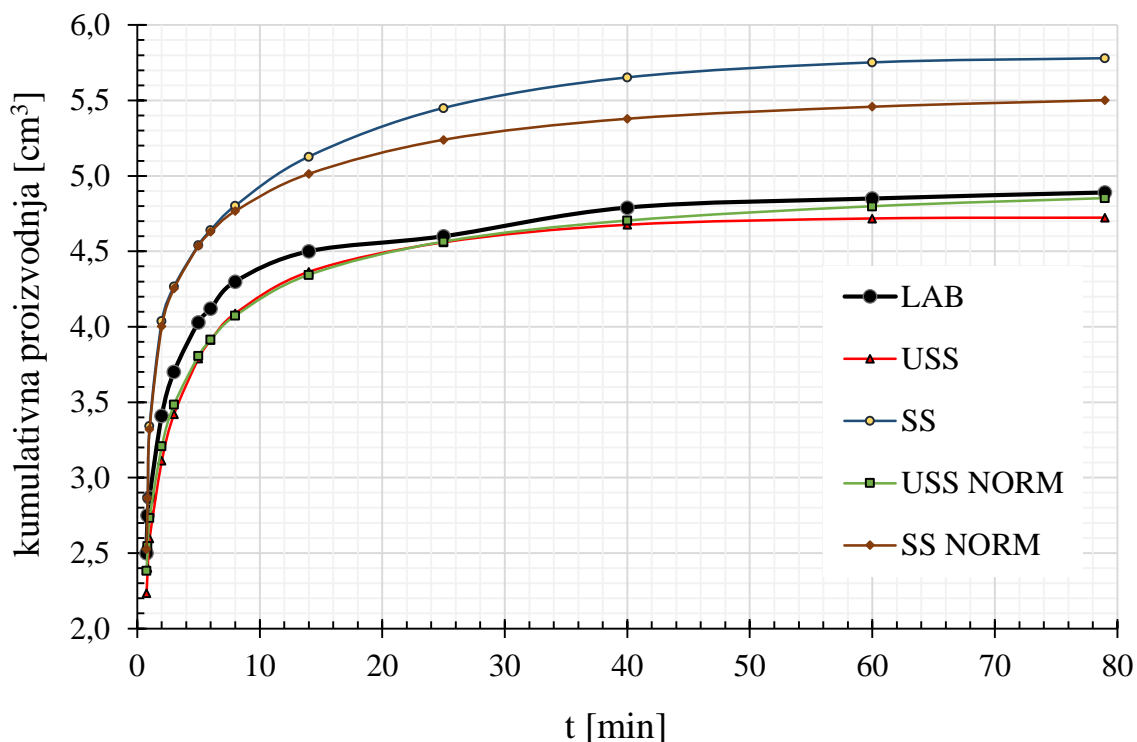
### 7.1. Model jezgre

Kako bi se moglo utvrditi koji su zaključci vezani uz pojedine vrste mjerenja su održivi u daljim proračunima, napravljen je model zavodnjavanja jezgre s podacima u numeričkom modelu što bližim podacima dobivenim laboratorijskim mjerenjima. Na taj se način može potvrditi primjenjivost pojedinog seta podataka u daljim numeričkim simulacijama, što predstavlja sustavan proces homogenizacije (engl. *upscaling*) podataka s porne razine (engl. *pore scale*) na razinu jezgre (engl. *core scale*), a kasnije i na razinu pribušotinske zone (engl. *near-wellbore scale*) te na kraju na razinu cijelog ležišta (engl. *reservoir scale*). U računalnom programu Schlumberger Eclipse definiran je model jezgre ( $NX \times NY \times NZ = 25 \times 25 \times 25$ ) te su napravljene 4 simulacije s različitim relativnim propusnostima. Korištene su relativne propusnosti dobivene USS metodom, relativne propusnosti dobivene SS metodom te obje normalizirane relativne propusnosti. Na slici 7-1 prikazan je model jezgre koji ima 12 225 aktivnih ćelija.



Slika 7-1. Model (zasićenja) jezgre u simulacijskom programu Schlumberger Eclipse.

Numeričkim modelom se pokušalo dobiti rezultate koji su što sličniji onima dobivenim laboratorijskim mjerenjima, tj. rađeno je usklađivanje rezultata (engl. *history matching*) proizvodnje pojedinih fluida u vremenu. Usporedba dobivenih rezultata prikazana je na slici 7-2.



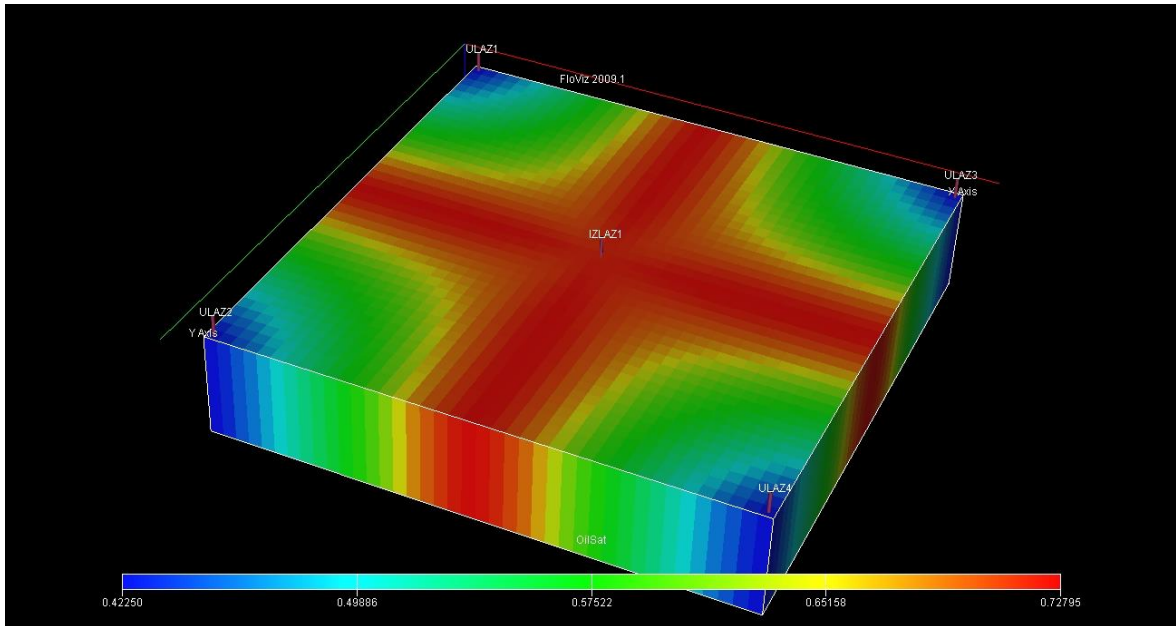
Slika 7-2. Usporedba proizvodnje dobivene korištenjem simulatora i stvarne proizvodnje.

Korištenjem normaliziranih relativnih propusnosti dobivenih USS metodom dobivaju se rezultati najbliži laboratorijskim.

## 7.2. Model ležišta

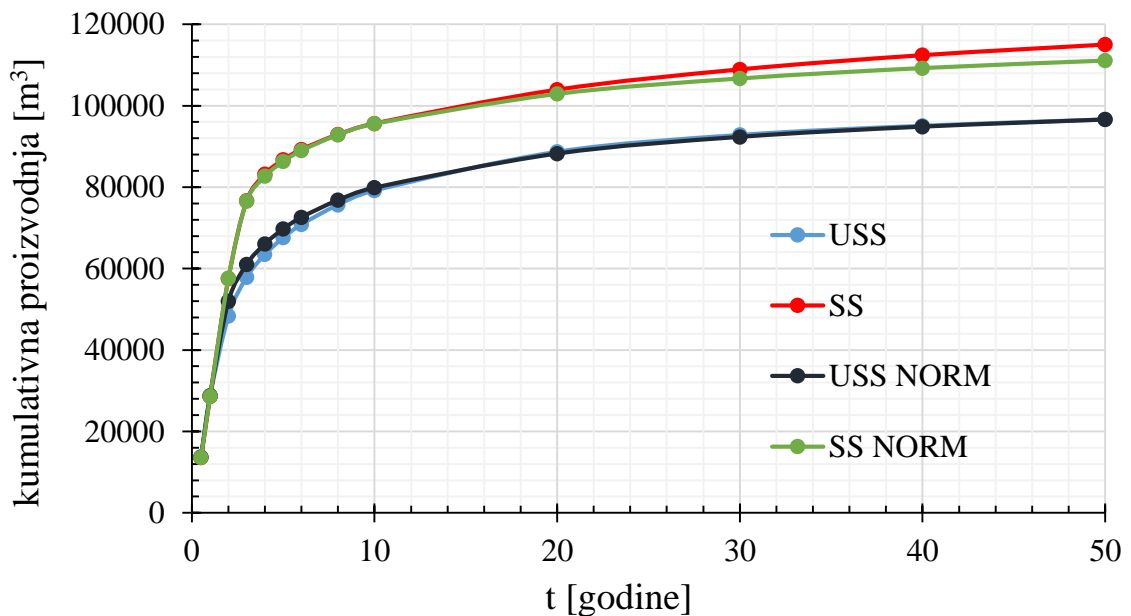
Nakon odabira najboljih relativnih propusnosti napravljen je model ležišta s 12 800 aktivnih ćelija. Ležište je 200 metara duljine, 200 metara širine i 40 metara debljine. Simuliralo se zavodnjavanje s četiri utisne i jednom proizvodnom bušotinom (engl. *five-spot pattern*)(slika 7-3).





Slika 7-3. Model (zasićenja) ležišta u simulacijskom programu Schlumberger Eclipse

Kao i kod prijašnjeg modela i ovdje su korištene sve relativne propusnosti u četiri simulacije kako bi se pokazalo koliko odabir različitih krivulja relativnih propusnosti utječe na rezultate na razini ležišta (slika 7-4).



Slika 7-4. Usporedba proizvodnje dobivene korištenjem različitih relativnih propusnosti.

Uočljivo je kako bi se, odabirom pogrešnih relativnih propusnosti (SS i SS NORM), nakon 50 godina ukupna proizvodnja predvidjela za oko 17 % veća od proizvodnje koja se dobije u modelu s pouzdanijim rezultatima mjerenja relativnih propusnosti (USS).

## 8. Zaključak

Mjerenje močivosti *Rise in Core* metodom te koristeći Craigov kriterij pokazalo je da je korištena stijena vodomogućiva. Kod Amottovog testa, ulje 1 (preporučeno u radnoj uputi INA d.d. laboratorija) iz nepoznatih razloga moči stijenu skoro jednako kao i voda za sve ispitivane jezgre te se stoga rezultati dobiveni ovom metodom mogu smatrati nepouzdanima. Naime, ulje 1 služi kako bi se u laboratoriju izbjeglo korištenje nafte zbog jednostavnosti postupka, no da bi se nafta mogla zamijeniti uljem ono se mora „ponašati“ kao nafta u određenim testovima što u ovom slučaju očito nije tako.

Usporedba relativnih propusnosti dobivenih dvjema metodama pokazala je razliku u izračunatim relativnim propusnostima za vodu dok su relativne propusnosti za ulje poprilično jednake. Razlog takvog odstupanja u relativnim propusnostima za vodu je manja mogućnost opisa kapilarnih krajnjih efekata kod testa stacionarnog stanja. Može se zaključiti da tijekom izvođenja testa treba odabrati optimalnu brzinu protjecanja fluida kroz jezgru kako bi se izbjegao navedeni problem.

Računalna simulacija na modelu ležišta je ukazala kako treba biti jako oprezan s mjerenjem i odabirom relativnih propusnosti. Odabir krivih ili loše izmjerenih relativnih propusnosti u razradi ležišta može rezultirati pogrešnim predviđanjima iscrpka ležišta. Mjerenje močivosti može poslužiti odabiru najreprezentativnijeg ulja u mjerenju relativnih propusnosti. Pri tome *Rise in Core* metoda daje dobre referentne podatke za usporedbu s Amottovim testom.

Za potpuni sustavni proces homogenizacije podataka bilo bi potrebno ispitati višestruke procese imbibicije i dreniranja na svakoj jezgri. Pri interpretaciji poboljšanje bi činila integracija mjerenja relativnih propusnosti s podacima kapilarnih tlakova za iste jezgre. Kako su teorijskim jednadžbama i empirijski (korelacijski) povezi močivost, kapilarni tlak i relativna propusnost, usklađenost svih mjerenja za neki sustav fluida i stijene dala bi najpouzdaniji ulazni set podataka za dalja predviđanja procesa pridobivanja fluida iz ležišta.

Pri izradi rada koristio se simulacijski računalni program Eclipse koji pod akademskom licencom RGNf-u ustupa tvrtka Schlumberger.

Laboratorijska ispitivanja rađena su u laboratorijama kompanije INA d.d., Služba istraživanja stijena i fluida.

## 9. Literatura:

- 1) ANDERSON, W.G. 1986., *Wettability Literature Survey - Part 1: Rock/Oil/Brine Interactions and the Effects of Core Handling on Wettability*. Journal of Petroleum Technology, 38(10), str. 1125 – 1144.
- 2) BOTSET, H.G. 1940., *Flow of Gas-liquid Mixtures through Consolidated Sand*. Transactions of the AIME, 136(1), str. 91 – 105.
- 3) CAUDLE, B.H., SLOBOD, R.L., BROWNSCOMBE, E.R. 1951., *Further Developments in the Laboratory Determination of Relative Permeability*. Journal of Petroleum Technology, 3(5), str. 145 – 150.
- 4) CRAIG, F.F. 1971., *The reservoir Engineering Aspects of Waterflooding*. Drugo izdanje. SAD: Society of Petroleum Engineers of AIME.
- 5) DUNLAP, E.N. 1938., *Influence of Connate Water on Permeability of Sands to Oil*. Transactions of the AIME, 127(1), str. 215– 225.
- 6) EDMONDSON, T.A. 1965., *Effect of Temperature on Waterflooding*. Journal of Canadian Petroleum Technology, 4(4), str. 236 – 242.
- 7) GEFFEN, T.M., OWENS, W.W., PARRISH, D.R., MORSE, R.A. 1951., *Experimental Investigation of Factors Affecting Laboratory Relative Permeability Measurements*. Journal of Petroleum Technology, 3(4), str. 99 – 110.
- 8) GHEDAN, S.G., CANBAZ C.H. 2014., *Theory and Experimental Setup of the New Rise In Core Reservoir Wettability Measurement Technique*. International Petroleum Technology Conference, 19-22 January, Doha, Qatar.
- 9) GORIČNIK, B. 1986., *Određivanje relativnih propusnosti unsteady-state metodom*. Zagreb: Ina-Naftaplin.
- 10) GORRING, R.L. 1962., *Multiphase flow of immiscible fluids in porous media*. Doktorska disertacija, University of Michigan, Ann Harbor
- 11) HONARPOUR, M.M., KOEDERITZ, F., HERBERT, A. 1986., *Relative permeability of petroleum reservoirs*. SAD: CRC Press Inc.
- 12) JOHNSON, E.F., BOSSLER, D.P., NAUMANN, V.O. 1959., *Calculation of Relative Permeability from Displacement Experiments*. Society of Petroleum Engineers.
- 13) LAND, C.S. 1965., *Effect of Hydration of Montmorillonite on the Permeability to Gas of Water-Sensitive Reservoir Rocks*. Journal of Petroleum Technology, 17(10), str. 1213 – 1218.

- 14) LEVERETT, M.C. 1939., *Flow of Oil-water Mixtures through Unconsolidated Sands*. Transactions of the AIME, 132(1), str. 149 – 171.
- 15) LEVERETT, M.C., LEWIS, M.B. 1941., *Steady Flow of Gas-oil-water Mixtures through Unconsolidated Sands*. Transactions of the AIME, 142(1), str. 107 – 116.
- 16) MILLER, M.A., RAMEY, H.J., JR. 1985., *Effect of Temperature on Oil/Water Relative Permeabilities of Unconsolidated and Consolidated Sands*. Society of Petroleum Engineers Journal, 25(6), str. 945 – 953.
- 17) MORGAN, J.T., GORDON, D.T. 1970, *Influence of Pore Geometry on Water-Oil Relative Permeability*, Journal of Petroleum Technology, 22(10), str. 1199 – 1208.
- 18) OSOBA, J.S., RICHARDSON, J.G., KERVER, J.K., HAFFORD, J.A. 1951., *Laboratory Measurements of Relative Permeability*. Journal of Petroleum Technology, 3(2), str. 47 – 56.
- 19) OWENS, W.W., ARCHER, D.L. 1971., *The Effect of Rock Wettability on Oil-Water Relative Permeability Relationships*. Journal of Petroleum Technology, 23(7), str. 873 – 878.
- 20) PIRSON, S.J. 1958., *Oil reservoir engineering*. New York: McGraw-Hill.
- 21) RICHARDSON, J.G. 1957., *The Calculation of Waterflood Recovery From Steady-State Relative Permeability Data*. Journal of Petroleum Technology, 9(5), str. 64 – 66.
- 22) SARAF, D.N., FATT, I. 1967., *Three-Phase Relative Permeability Measurement Using a Nuclear Magnetic Resonance Technique for Estimating Fluid Saturation*. Society of Petroleum Engineers Journal, 7(3), str. 235 – 242.
- 23) SLOBOD, R.L., CHAMBERS, A., PREHN, W.L., JR. 1951., *Use of Centrifuge for Determining Connate Water, Residual Oil, and Capillary Pressure Curves of Small Core Samples*. Journal of Petroleum Technology, 3(4), str. 127 – 134.
- 24) STILES, J. 2005., *Using Special Core Analysis in Reservoir Engineering*. London: Imperial College London.
- 25) STEWART, C.R., CRAG, F.F., MORSE, R.A. 1952., *Determination of Limestone Performance Characteristics by Model Flow Tests*. Fall Meeting of the Petroleum Branch of AIME, 1-3 October, Houston, Texas.
- 26) VAN SPRONSEN, E. 1982., *Three-Phase Relative Permeability Measurements Using the Centrifuge Method*. SPE Enhanced Oil Recovery Symposium, 4-7 April, Tulsa, Oklahoma.
- 27) VULIN, D. 2016., *Višefazni protok u poroznoj stijeni*. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, rudarsko geološko naftni fakultet.

## 10. Dodaci:

Dodatak 1. Proračun močivosti Amottovom metodom.

Sample No.	3098@Swi	3098 prije prisilnog istiskivanja ulja vodom	3098 poslie prisilnog istiskivanja ulja vodom
d [cc]	3.84	3.84	3.84
L [cc]	7.59	7.59	7.59
V <sub>sample</sub> [cc]	87.90	87.90	87.90
m <sub>100%</sub> [g]	208.04	208.04	208.04
m <sub>0%</sub> [g]	191.254	191.254	191.254
m <sub>sat. core</sub> [g]	205.181	205.353	206.97
m <sub>squæz</sub> [g]	0.774	0.774	0.774
ρ <sub>brine</sub> [g/cc]	1.0108	1.0108	1.0108
ρ <sub>oil</sub> [g/cc]	0.7545	0.7545	0.7545
V <sub>squæz</sub> [cc]	0.765730115	0.765730115	0.765730115
PV [cc]	16.6066482	16.6066482	16.6066482
V <sub>sep.</sub> [cc]	10.57	10.57	10.57
Φ [%]	18.89243251	18.89243251	18.89243251
V <sub>sep.</sub> + V <sub>squæz</sub> [cc]	11.33573011	11.33573011	11.33573011
Sw <sub>sep.</sub> [%]	<b>31.73980698</b>	<b>31.73980698</b>	<b>31.73980698</b>
So <sub>sep.</sub> [%]	68.26019302	68.26019302	68.26019302
V <sub>brine</sub> [cc]	5.451751594	6.122840162	12.43185304
V <sub>oil</sub> [cc]	11.15489661	10.48380804	4.174795162
Sw <sub>grav</sub> [%]	<b>32.82872936</b>	<b>36.86981315</b>	<b>74.86069969</b>
So <sub>grav</sub> [%]	67.17127064	63.13018685	25.13930031
	<b>C</b>	<b>0.700</b>	<b>ml</b>
	<b>D</b>	<b>6.309</b>	<b>ml</b>
	<b>A</b>	<b>0.100</b>	<b>ml</b>
račun	<b>B</b>	<b>6.880</b>	<b>ml</b>
popuniti			
	<b>OWI</b>	<b>0.01433</b>	
	<b>WWI</b>	<b>0.09987</b>	
	<b>WI</b>	<b>0.08554</b>	

Dodatak 2. Proračun močivosti Rise in Core metodom.

C DETERMINATION			1 cp ANGLE		
$\mu$	1.49	mPas	$\rho_w$	1010.8	kg/m <sup>3</sup>
	0.00149	Pas		$\rho_o$	754.5
$\rho$	748	kg/m <sup>3</sup>	$\mu_w$		1.0057
$\cos \Phi$	1				0.0010057
$\gamma$	25.4	dyn/cm	$\gamma_{w-o}$	50.1	dyn/cm
	0.0254	N/m			0.0501
nagib	0.00325		$\mu_o$	1.4188	mPas
m <sup>2</sup> /t	3.25E-09	kg <sup>2</sup> /s			0.0014188
C	3.407E-16	m <sup>5</sup>	nagib	0.0002327	
			m <sup>2</sup> /t	2.327E-10	kg <sup>2</sup> /s
			$\cos \Theta$	0.0205589	
			$\Theta$	88.821981	°
16 cp ANGLE			OIL ANGLE		
$\rho_w$	1010.8	kg/m <sup>3</sup>	$\rho_w$	1010.8	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_o$	844	kg/m <sup>3</sup>	$\rho_o$	862.29	kg/m <sup>3</sup>
$\mu_w$	1.0057	mPas	$\mu_w$	1.0057	mPas
	0.0010057	Pas			0.0010057
$\gamma_{w-o}$	10	dyn/cm	$\gamma_{w-o}$	30	dyn/cm
	0.01	N/m			0.03
$\mu_o$	21.10075	mPas	$\mu_o$	14.14	mPas
	0.0211008	Pas			0.01414
nagib	0.0000542		nagib	0.0001212	
m <sup>2</sup> /t	5.42E-11	kg <sup>2</sup> /s	m <sup>2</sup> /t	1.212E-10	kg <sup>2</sup> /s
$\cos \Theta$	0.4555152		$\cos \Theta$	0.2138009	
$\Theta$	62.901909	°	$\Theta$	77.65481	°



Dodatak 3. Proračun relativnih propusnosti USS metodom.

Točka br.	Kumulativno vrijeme [min]	$\Delta p$ [bar]	ujje [ml]	voda [ml]	ujje + voda [ml]	Kumulativno vrijeme [min]	Ujje kumulativno [ml]	Voda + ujje kumulativno [ml]	utisnuta voda $W_i$ [PV]	$I/W_i$	
1	0.75	18.208	2.500	0.035	2.535	0.75	2.5	2.535	0.1630	6.13471	
2	0.85	17.134	0.250	0.088	0.338	0.85	2.750	2.873	0.1847	5.41298	
3	1	15.442	0.120	0.387	0.507	1	2.870	3.380	0.2173	4.60104	
4	2	13.442	0.540	2.84	3.380	2	3.410	6.760	0.4347	2.30052	
5	3	10.919	3.700	3.09	3.380	3	3.700	10.140	0.6520	1.53368	
6	5	9.907	4.030	6.43	6.760	5	4.030	16.900	1.0867	0.92021	
7	6	9.219	4.120	3.29	3.380	6	4.120	20.280	1.3041	0.76684	
8	8	8.257	4.300	6.58	6.760	8	4.300	27.040	1.7387	0.57513	
9	14	7.247	4.500	20.08	20.280	14	4.500	47.320	3.0428	0.32865	
10	25	6.503	4.600	37.08	37.180	25	4.600	84.500	5.4336	0.18404	
11	40	5.911	4.790	50.51	50.700	40	4.790	135.200	8.6937	0.11503	
12	60	5.661	4.850	67.54	67.600	60	4.850	202.800	13.0405	0.07668	
13	79	5.439	4.890	64.18	64.220	79	4.890	267.020	17.1700	0.05824	
$Q_t$ [ml/min]	$Q_o$ [ml/min]	$Q_w$ [ml/min]	$I_r$	$I/W_i I_r$	$f_o$	krw/kro	Naqib	kro	krw	Sw srednje	Sw2
3.38	2.500	0.88	1.64	3.73	0.7396	0.02	0.88	0.8433	0.01	0.434516197	0.313949049
3.38	1.650	1.73	1.75	3.10	0.4882	0.05	0.88	0.5517	0.03	0.450591817	0.36040759
3.38	0.670	2.71	1.94	2.37	0.1982	0.19	0.74	0.2688	0.05	0.458308114	0.415225453
3.38	0.415	2.97	2.23	1.03	0.1228	0.34	0.60	0.2046	0.07	0.493031453	0.439660395
3.38	0.228	3.15	2.74	0.56	0.0673	0.66	0.52	0.1303	0.09	0.511679172	0.46779273
3.38	0.128	3.25	3.02	0.30	0.0377	1.22	0.43	0.0876	0.11	0.53289899	0.49190616
3.38	0.090	3.29	3.25	0.24	0.0266	1.74	0.43	0.0626	0.11	0.538686213	0.503962874
3.38	0.062	3.32	3.63	0.16	0.0182	2.56	0.36	0.0503	0.13	0.550260659	0.518538103
3.38	0.021	3.36	4.13	0.08	0.0063	7.55	0.30	0.0211	0.16	0.563121155	0.544025267
3.38	0.011	3.37	4.60	0.04	0.0032	14.76	0.26	0.0123	0.18	0.569551403	0.552063077
3.38	0.008	3.37	5.07	0.02	0.0023	20.52	0.23	0.0100	0.20	0.581768874	0.561620764
3.38	0.003	3.38	5.29	0.01	0.0008	63.06	0.21	0.0035	0.22	0.585627022	0.57577859
3.38	0.002	3.38	5.51	0.01	0.0006	76.48	0.21	0.0029	0.22	0.588199122	0.577504604

Dodatak 4. Normalizacija relativnih propusnosti dobivenih USS metodom.

USS NORMALIZATION						
Sw	Son	Swn	kro	krw	Nw	No
0.274	1.000	0.000	1.000	0.000		
0.314	0.877	0.123	0.843	0.014	1.390	1.297
0.360	0.734	0.266	0.552	0.028	1.692	1.927
0.415	0.566	0.434	0.269	0.052	1.930	2.311
0.440	0.491	0.509	0.205	0.070	1.947	2.234
0.468	0.405	0.595	0.130	0.086	2.127	2.256
0.492	0.331	0.669	0.088	0.107	2.217	2.204
0.504	0.294	0.706	0.063	0.109	2.489	2.265
0.519	0.250	0.750	0.050	0.129	2.437	2.154
0.544	0.172	0.828	0.021	0.159	2.601	2.189
0.552	0.147	0.853	0.012	0.181	2.265	2.294
0.562	0.118	0.882	0.010	0.205	1.905	2.153
0.576	0.074	0.926	0.004	0.223	1.973	2.170
0.578	0.069	0.931	0.003	0.224	2.075	2.181

USS RELATIVNE PROPUSNOSTI NORM.				
Sw	Son	Swn	kron	krwn
0.274	1.000	0.000	1.000	0.000
0.314	0.877	0.123	0.747	0.002
0.360	0.734	0.266	0.504	0.013
0.415	0.566	0.434	0.283	0.040
0.440	0.491	0.509	0.207	0.057
0.468	0.405	0.595	0.135	0.081
0.492	0.331	0.669	0.086	0.105
0.504	0.294	0.706	0.066	0.119
0.519	0.250	0.750	0.046	0.136
0.544	0.172	0.828	0.020	0.170
0.552	0.147	0.853	0.014	0.182
0.562	0.118	0.882	0.009	0.196
0.576	0.074	0.926	0.003	0.219
0.578	0.069	0.931	0.003	0.221
0.600	0.000	1.000	0.000	0.260

Dodatak 5. Normalizacija relativnih propusnosti dobivenih SS metodom.

SS NORMALIZATION						
Sw	Son	Swn	kro	krw	Nw	No
0.255112542	1	0	1	0		
0.383238747	0.655810556	0.344189444	0.377264868	0.004495282	3.823119507	2.310609894
0.407093098	0.591729865	0.408270135	0.302240604	0.009603557	3.704393552	2.280389447
0.418846358	0.560156714	0.439843286	0.269857682	0.012861906	3.68467179	2.260177947
0.431731531	0.525542868	0.474457132	0.233513373	0.016694506	3.70923559	2.260940096
0.445944703	0.48736158	0.51263842	0.192076451	0.0216021	3.753208604	2.295463201
0.492454025	0.362422128	0.637577872	0.085507718	0.03709308	4.370780717	2.422936286
0.505191836	0.328204149	0.671795851	0.065402885	0.048836448	4.253761206	2.447842454
0.627367437	0	1	0	0.265237706	0	#NUM!

SS RELATIVNE PROPUSNOSTI NORM.				
Sw	Son	Swn	kron	krwn
0.255	1.000	0.000	1.000	0.000
0.300	0.879	0.121	0.742	0.000
0.350	0.745	0.255	0.504	0.0013
0.400	0.611	0.389	0.318	0.007
0.450	0.476	0.524	0.178	0.021
0.500	0.342	0.658	0.083	0.052
0.550	0.208	0.792	0.026	0.107
0.600	0.074	0.926	0.002	0.197
0.627	0.000	1.000	0.000	0.265

Izjava:

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

---

Ivan Smajla