

# Analiza testa porasta tlaka u ležištu s višefaznim protokom fluida

---

**Grebenar, Dominik**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2017**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:615236>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-14**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**ANALIZA TESTA PORASTA TLAKA U LEŽIŠTU S  
VIŠEFAZNYM PROTOKOM FLUIDA**

Diplomski rad

Dominik Grebenar

N160

Zagreb, 2017.

ANALIZA TESTA PORASTA TLAKA U LEŽIŠTU S VIŠEFAZNYM PROTOKOM  
FLUIDA

DOMINIK GREBENAR

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za naftno inženjerstvo  
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

Sažetak

U ovom radu razmatra se problematika testa porasta tlaka za višefazni protok nafte i plina u ležištu. Objašnjena su četiri različita pristupa tom problemu: korištenjem ukupnih svojstava fluida (metoda autora Perrine), pseudotlaka (metoda autora Raghavan), kvadrata tlaka (metoda autora Al-Khalifah) i relativnih propusnosti (metoda autora Kamala i Pana). Za svaki pristup dana je teoretska podloga i postupak dobivanja traženih rezultata. U svrhu vrednovanja navedena četiri pristupa izrađena su dva simulacijska modela ležišta cilindričnog oblika: jedan sadrži skin, a drugi ne. Simuliran je test porasta tlaka u simulatorskom programu Eclipse 100, te su dobiveni podaci koji se koriste za računanje propusnosti i skina analitičkim putem. Podaci iz programa Eclipse također su ulazni podaci za program Saphir (licenca #9643) koji se koristi u analizi rezultata testa porasta tlaka.

Ključne riječi: test porasta tlaka, hidrodinamička mjerenja, višefazni protok fluida

Diplomski rad sadrži: 47 stranica, 4 tablice, 23 slike i 16 referenci

Jezik izvornika: hrvatski

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

Mentor: Dr.sc. Tomislav Kurevija, izvanredni profesor RGNF-a  
Pomoć pri izradi: Mr. sc. Sonja Koščak Kolin, asistentica RGNF-a

Ocjenjivači: Dr. sc. Tomislav Kurevija, izvanredni profesor RGNF-a  
Dr. sc. Vladislav Brkić, docent RGNF-a  
Dr. sc. Luka Perković, docent RGNF-a

Datum obrane: 7. srpnja 2017., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

## PRESSURE BUILD-UP TEST ANALYSIS FOR MULTIPHASE FLUID FLOW

DOMINIK GREBENAR

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Department of Petroleum Engineering  
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

### Abstract

This paper deals with the issues of pressure buildup test for multiphase flow of oil and gas in a reservoir. Four different approaches to this problem are explained: using total properties of fluids (Perrine's method), pseudo-pressures (Raghavan's method), pressure squares (Al-Khalifah's method) and relative permeability (Kamal-Pan's method). The theoretical background and the process of obtaining the required results are given for each approach. For the purpose of the evaluation of the four approaches, two simulation reservoir models of the cylindrical form are made: one contains the skin and the other does not. A pressure buildup test was simulated in the Eclipse 100 simulation program and data obtained and subsequently used to analytically calculate permeability and skin. Data from the Eclipse 100 simulation program is also the input data for the Saphir program (licence #9643) which is used in the analysis of simulated buildup test results.

Keywords: pressure build-up test, well testing, multiphase flow  
Thesis contains: 47 pages, 4 tables, 23 figures and 16 references.

Original in: Croatian

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

Supervisor: Associate Professor Tomislav Kurevija, PhD  
Technical support and assistance: Sonja Koščak Kolin, MSc.

Reviewers: Associate Professor Tomislav Kurevija, PhD  
Assistant Professor Vladislav Brkić, PhD  
Assistant Professor Luka Perković, PhD

Date of defense: July 7<sup>th</sup>, 2017., Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,  
University of Zagreb

## Sadržaj

<b>1. Uvod</b> .....	1
<b>2. Teoretske osnove za analizu hidrodinamičkih mjerenja</b> .....	2
2.1. Jednadžbe radijalnog protoka .....	2
2.2. Jednofazni protok kapljevine .....	4
2.3. Jednofazni protok plina.....	5
2.4. Višefazni protok fluida .....	6
2.5. Rješenje za radijalni protok fluida male i konstantne stlačivosti.....	8
2.6. Neustaljeno, poluustaljeno i ustaljeno protjecanje .....	10
2.7. Bezdimezionalni oblik jednadžbe difuzije.....	10
2.8. Skin faktor.....	11
<b>3. Analiza testa porasta tlaka</b> .....	13
<b>4. Mogućnosti interpretacije testa porasta tlaka za višefazni protok fluida</b> .....	16
4.1 Metoda prema autoru Perrine .....	16
4.2. Metoda prema autoru Raghavan .....	19
4.3. Metoda prema autoru Al-Khalifah.....	24
4.4 Metoda prema autorima Kamal i Pan .....	29
<b>5. Usporedba pojedinih metoda na primjeru ležišnog modela</b> .....	32
5.1. Ležišni simulator Eclipse.....	32
5.2. Program za analizu testa porasta tlaka Saphir .....	32
5.3. Analiza rezultata na primjeru ležišnog modela.....	33
<b>6. Zaključak</b> .....	45
<b>7. Literatura</b> .....	46

## Popis slika

Slika 2-1. Model radijalnog protoka.....	3
Slika 2-2. Prikaz pada tlaka u pribušotinskoj zoni.....	12
Slika 3-1. Grafički prikaz tlaka u ovisnosti o <i>Hornerovom vremenu</i> .....	14
Slika 3-2. Test porasta tlaka (Hornerovo vrijeme u odnosu na mjereni tlak).....	15
Slika 4-1. Pristup je primjenjiv za slučaj uniformnog zasićenja fluidom .....	16
Slika 4-2. Bezdimezionalni pad tlaka $p_{WD}$ u odnosu na bezdimezionalno vrijeme $t_D$ .....	21
Slika 4-3. Bezdimezionalni pad pseudotlaka $m_{WD}$ u odnosu na bezdimezionalno vrijeme $t_D$ .....	22
Slika 4-4. Pseudotlak u funkciji vremena.....	23
Slika 4-5. Prikaz linearnog odnosa $\frac{k_o}{\mu_o B_o}$ s tlakom.....	25
Slika 4-6. Zasićenje na dnu bušotine tijekom testa pada tlaka.....	27
Slika 4-7. Omjer propusnosti nafte i plina u funkciji zasićenja plinom.....	30
Slika 5-1. Grafički prikaz modela ležišta s bušotinom u sredini.....	34
Slika 5-2. Ovisnost pseudotlaka i vremena testa porasta tlaka.....	36
Slika 5-3. Ulazni podaci o bušotini i ležištu (program Saphir).....	37
Slika 5-4. Protok i tlak u odnosu na vrijeme (rezultat simuliranog testa porasta tlaka).....	38
Slika 5-5. Poklapanje krivulje tlaka iz simuliranog testa u programu Eclipse (zeleno) i mečiranog tlaka (crveno).....	39
Slika 5-6. Poklapanje log-log dijagrama stvarnih podataka (zelene i crvene točke) i podataka standardnog modela (crvena i bijela linija).....	39
Slika 5-7. Poklapanje podataka u polulogaritamskom mjerilu.....	40
Slika 5-8. Prikaz rezultata standardnog testa.....	40
Slika 5-9. Ležište cilindričnog oblika polumjera $r=150$ m.....	41
Slika 5-10. Poklapanje tlaka i protoka stvarnih podataka s nelinearnim testom bez skina.....	41
Slika 5-11. Poklapanje ulaznih podataka o tlaku i tlaka iz analize.....	42
Slika 5-12. Podudaranje podataka za nelinearni model sa skinom.....	42

## Popis tablica

Tablica 4-1. Rezultati testova porasta tlaka polja Petronius.....	31
Tablica 5-1. Simulirani test porasta tlaka za ležišni model bez skina.....	35
Tablica 5-2. Rezultati analize testa porasta tlaka za simulacijski model bez skina.....	43
Tablica 5-3. Rezultati analize testa porasta tlaka za simulacijski model sa skinom.....	43

## Popis korištenih oznaka

B - volumni faktor,  $m^3/m^3$

$B_g$  - volumni faktor plina,  $m^3/m^3$

$B_o$  - volumni faktor nafte,  $m^3/m^3$

$B_w$  - volumni faktor vode,  $m^3/m^3$

c – stlačivost,  $Pa^{-1}$

$c_g$  – stlačivost plina,  $Pa^{-1}$

$c_o$  – stlačivost nafte,  $Pa^{-1}$

$c_w$  – stlačivost vode,  $Pa^{-1}$

$c_t$  - ukupna stlačivost ležišta,  $Pa^{-1}$

g – ubrzanje sile teže,  $m/s^2$

GOR – proizvodni plinski faktor,  $m^3/m^3$

h - debljina ležišta, m

k – apsolutna propusnost ležišne stijene,  $m^2$

$k_g$  – efektivna propusnost za plin,  $m^2$

$k_o$  – efektivna propusnost za naftu,  $m^2$

$k_w$  – efektivna propusnost za vodu,  $m^2$

$k_{rg}$  - relativna propusnost za plin, dio cijelog

$k_{ro}$  - relativna propusnost za naftu, dio cijelog

$k_{rw}$  – relativna propusnost za vodu, dio cijelog

$k_s$  - promijenjena propusnost stijene u pribušotinskoj zoni,  $m^2$

m – nagib pravca, Pa

$m(p)$  - funkcija pseudotlaka, Pa/s

p - tlak, Pa

$p_D$  – bezdimenzionalni tlak

$p_i$  - početni ležišni tlak, Pa

$p_{wf}$  – dinamički tlak u bušotini na razini ležišta, Pa

$p_{ws}$  – statički tlak u bušotini na razini ležišta, Pa

$p_{1hr}$  – tlak 1 h nakon zatvaranja bušotine, Pa

$\bar{p}$  – srednji ležišni tlak, Pa

q – protok,  $m^3/s$

$q_D$  – bezdimenzionalna proizvodnja

$q_o$  – obujamski protok nafte,  $m^3/s$



$q_g$  – obujamski protok plina,  $m^3/s$   
 $q_w$  – obujamski protok vode,  $m^3/s$   
 $q_p$  – zadnji protok prije zatvaranja bušotine,  $m^3/dan$   
 $r$  - radijus, m  
 $r_D$  – bezdimenzionalni radijus  
 $r_e$  - drenažni radijus, m  
 $r_s$  - radijus dosega skina, m  
 $r_w$  - radijus bušotine, m  
 $R_s$  – plinski faktor,  $m^3/m^3$   
 $s$  - skin faktor  
 $S$  - zasićenje fluidom u ležištu, dio cijelog  
 $t$  - vrijeme, s  
 $t_D$  – bezdimenzionalno vrijeme  
 $u_r$  - volumetrijski tok (fluks), tj. površinska brzina, m/s  
 $\mu$  - viskoznost, Pa·s,  
 $\varphi$  - šupljikavost, dio cijelog  
 $\rho$  - gustoća fluida,  $kg/m^3$   
 $\rho_{gs}$  – gustoća plina u standardnim uvjetima,  $m^3/m^3$   
 $\rho_{os}$  – gustoća nafte u standardnim uvjetima,  $m^3/m^3$   
 $\rho_{ws}$  – gustoća vode u standardnim uvjetima,  $m^3/m^3$   
 $\lambda_T$  – ukupna mobilnost (eng. *total*),  $m^2/Pa \cdot s$   
 $\lambda_g$  – mobilnost plina,  $m^2/Pa \cdot s$   
 $\lambda_o$  – mobilnost nafte,  $m^2/Pa \cdot s$   
 $\lambda_w$  – mobilnost vode,  $m^2/Pa \cdot s$

## Popis korištenih kratica

BHP – *bottom hole pressure* – tlak na dnu bušotine

ETR - *early time region* – rani period

LTR - *late time region* – kasni period

MTR - *middle time region* - srednji period

## 1. Uvod

Jedan od ključnih procesa u naftnom inženjerstvu je prikupljanje informacija o fizikalnim svojstvima promatranog ležišta ugljikovodika. Značaj sofisticiranih numeričkih ležišnih simulacija ovisi o kvaliteti prikupljenih informacija za određeni ležišni model. Poteškoće u izradi vjerodostojnog modela ležišta proizlaze iz toga što su ležišta velika i često nejednolikih fizikalnih svojstava u cijelom ležištu dok su informacije koje se koriste za opis ležišta dobivene iz ograničenog broja točaka u ležištu (npr. bušotina). Postoji nekoliko načina prikupljanja podataka ležišnih svojstava, a najčešći su:

- a) seizmička istraživanja,
- b) prikupljanje informacija tijekom izrade bušotine i laboratorijske analize (analiza krhotina i jezgri, interpretacija karotažnih mjerenja),
- c) ispitivanje opremom na žici,
- d) hidrodinamička ispitivanja (npr. ispitivanje tlaka tijekom neustaljenog stanja protjecanja, analiza testa porasta tlaka),
- e) postavljanje ležišnog modela (npr. mečiranje pomoću simulatora) (Stewart, 2011).

Korištenjem podataka iz više različitih izvora smanjuje se mogućnost netočnosti podataka koji se koriste u modeliranju ležišta. Za ispitivanja tlaka potrebno je mjeriti tlak na dnu bušotine (eng. *BHP – bottom hole pressure*) i obujamski protok. Promjenom protoka stvara se promjena tlaka u poroznoj propusnoj formaciji. Promjena tlaka se udaljava od bušotine duboko u formaciju i tako donosi povratnu informaciju o svojstvima i karakteristikama ležišta. Analizom dobivenih podataka može se odrediti propusnost, skin, radijus crpljenja bušotine i tlak unutar tog radijusa. Teorija ispitivanja tlaka se bazira na razmatranju neustaljenog stanja protjecanja i radijalnom režimu protjecanja u okolini bušotine. Ispitivanjima neustaljenog stanja protjecanja se dobiju prosječne vrijednosti propusnosti za veliki volumen ležišta, što predstavlja prednost u odnosu na karotažna mjerenja (ograničeni zahvat ispitivanja) i analizu jezgara (ograničen broj bušotina). Najvažnija hidrodinamička mjerenja su test porasta tlaka, protočni test, test za određivanje granice ležišta, test interferencije i puls test.

## 2. Teoretske osnove za analizu hidrodinamičkih mjerenja

### 2.1. Jednadžbe radijalnog protoka

Matematičke jednadžbe koje opisuju protok fluida u poroznom mediju mogu se dobiti iz sljedećih fizikalnih zakona: Zakona o očuvanju mase, Darcyjevog zakona i jednadžbe stanja. Zakon o očuvanju mase za porozni medij glasi: Iznos masenog utoka u element prostora minus maseni istok iz elementa prostora jednak je promjeni mase u elementu prostora. Darcyjev zakon pokazuje da je obujamski protok po jedinici površine poprečnog presjeka u bilo kojoj točki uniformnog poroznog medija proporcionalan gradijentu potencijala u smjeru protoka. Darcyjev zakon vrijedi za laminaran protok a matematički izraz za protoke u smjeru osi  $x$ ,  $y$  i  $z$  je:

$$u_x = -\frac{k_x}{\mu} \frac{\delta p}{\delta x} \quad (2-1)$$

$$u_y = -\frac{k_y}{\mu} \frac{\delta p}{\delta y} \quad (2-2)$$

$$u_z = -\frac{k_z}{\mu} \left( \frac{\delta p}{\delta z} + \rho g \right) \quad (2-3)$$

gdje je:

$u$  - volumetrijski tok (fluks), tj. površinska brzina, m/s

$k$  – apsolutna propusnost,  $m^2$

$p$  - tlak, Pa

$\mu$  - viskoznost, Pa·s

$g$  – ubrzanje sile teže,  $m/s^2$

$\rho$  - gustoća fluida,  $kg/m^3$

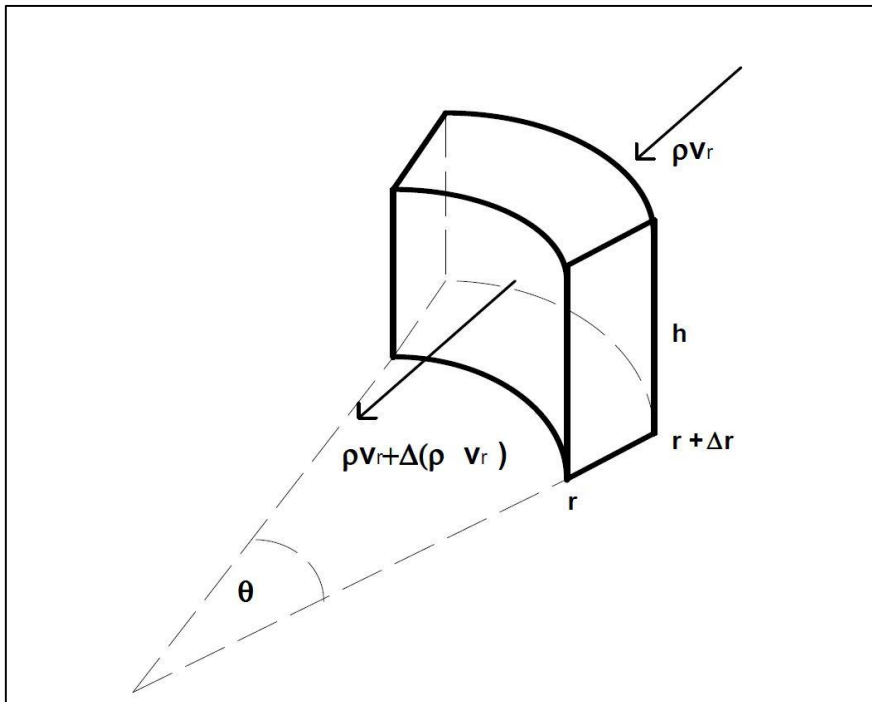
Za radijalni protok, zanemarujući gravitaciju, Darcyjev zakon postaje:

$$u_r = -\frac{k_r}{\mu} \frac{\delta p}{\delta r} \quad (2-4)$$

gdje je:

$r$  - radijus, m

Jednadžba stanja definira ovisnost obujamske mase (gustoće) fluida  $\rho$  o tlaku  $p$  i temperaturi  $T$ . Zato se za različite vrste fluida primjenjuju različite jednadžbe stanja. Protjecanje fluida u ležištu može se smatrati izotermalnim procesom pa će jednadžba stanja biti ovisna samo o tlaku. U svrhu analize hidrodinamičkih mjerenja standardno se primjenjuje radijalni model protoka prikazana na slici 2-1., koji vrijedi za vertikalne bušotine i za konvencionalna ležišta.



Slika 2-1. Model radijalnog protoka (Čikeš, 2015.)

Za razmatrani model sa slike može se napisati sljedeća jednakost:

$$-\Delta t \left\{ \theta(r + \Delta r)h(\rho u_r) - \theta r h [\rho u_r + \Delta(\rho u_r)] \right\} = \phi \rho h \theta r \Delta r \Big|_{t+\Delta t} - \phi \rho h \theta r \Delta r \Big|_t \quad (2-5)$$

gdje je:

$\phi$  - šupljikavost, dio cijelog

što se može skratiti u oblik:

$$\frac{1}{r\Delta r} [\rho u_r \Delta r - r\Delta(\rho u_r)] = -\frac{\Delta(\phi\rho)}{\Delta t} \quad (2-6)$$

a pošto  $\Delta(\rho u_r) / \Delta r \rightarrow -\partial(\rho u_r) / \partial r$  slijedi jednačba kontinuiteta za radijalni protok:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho u_r) = -\frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho) \quad (2-7)$$

Kombinacijom jednačbe kontinuiteta i Darcyjevog zakona dobiva se opća diferencijalna jednačba koja opisuje radijalni protok:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{r \rho k_r}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho) \quad (2-8)$$

Konačna diferencijalna jednačba za pojedini fluid, koja proizlazi iz jednačbe 2-8, ovisi o svojstvima fluida i jednačbi stanja tog fluida. (Lee, 1982)

## 2.2. Jednofazni protok kapljevine

Razmatra se izotermalni protok fluida male i konstantne stlačivosti. Stlačivost fluida je definirana kao promjena obujma fluida po jedinici promjene tlaka:

$$c = -\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial p} \quad (2-9)$$

gdje je:

$c$  – stlačivost,  $\text{Pa}^{-1}$

što se može pisati i kao:

$$c = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p} \quad (2-10)$$

Kada je  $c$  konstantna tada se iz gornje jednačbe može integrirati i dobije se:

$$\rho = \rho_0 e^{c(p-p_0)} \quad (2-11)$$

gdje je  $\rho_0$  vrijednost  $\rho$  pri referentnom tlaku  $p_0$ . Za radijalni protok, uz konstantnu viskoznost fluida, kombinacijom jednačbi 2-11 i 2-8 dobije se:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{k_r} \frac{\partial k_r}{\partial r} \frac{\partial p}{\partial r} + c \left( \frac{\partial p}{\partial r} \right)^2 = \frac{\phi \mu c}{k_r} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\mu}{k_r} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2-12)$$

Ako se pretpostavi konstantne propusnost i poroznost, konstantnu i malu stlačivost, i da je član  $\left( \frac{\partial p}{\partial r} \right)^2$  zanemarivo mali gornja jednačba postaje:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\phi \mu c}{k} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2-13)$$

Ta jednačba se naziva još i jednačba difuzivnosti, a konstanta  $\frac{k}{\phi \mu c}$  se naziva hidraulička difuzivnost. (Matthews, Russell, 1967)

### 2.3. Jednofazni protok plina

Jednačbe za protok plina su različite od jednačbi za protok kapljevine iz razloga što se koriste različite jednačbe stanja. Jednačba stanja za idealni plin je:

$$pV = \frac{m}{M} RT \quad (2-14)$$

gdje je  $V$  volumen koji zauzima plin mase  $m$  i molekularne težine  $M$ .  $R$  je opća plinska konstanta a  $T$  je apsolutna temperatura. Pošto vrijedi  $\rho = \frac{m}{V}$ , tada vrijedi:

$$\rho = \frac{M}{RT} p \quad (2-15)$$

te za izotermalne promjene tlaka tada vrijedi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{M}{RT} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2-16)$$

Za radijalni protok, konstantnu viskoznost plina i konstantna svojstva stijene uz zanemarivanje utjecaja gravitacije jednačba 2-16 postaje:

$$\frac{\partial^2 p^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p^2}{\partial r} = \frac{2\phi\mu}{k} \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\phi\mu}{kp} \frac{\partial p^2}{\partial t} \quad (2-17)$$

Za slučaj protoka realnog plina, u jednadžbu stanja se uvodi faktor odstupanja realnog plina  $z$ :

$$\rho = \frac{M}{RT} \frac{p}{z} \quad (2-18)$$

Za slučaj radijalnog protoka realnog plina vrijedi jednadžba:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{p}{\mu z} r \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{\phi}{k} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{p}{z} \right) \quad (2-19)$$

(Lee et. al., 2003)

#### 2.4. Višefazni protok fluida

Ako se promatra jedinični dio volumena ležišta, u tom volumenu se nalazi masa nafte dana izrazom:

$$\frac{\phi S_o}{B_o} \rho_{os} \quad (2-20)$$

gdje je:

$B_o$  - volumni faktor nafte,  $m^3/m^3$

$S_o$  – zasićenje ležišta naftom, dio cijelog

$\rho_{os}$  – gustoća nafte u standardnim uvjetima,  $kg/m^3$

masa vode:

$$\frac{\phi S_w}{B_w} \rho_{ws} \quad (2-21)$$

gdje je:

$B_w$  - volumni faktor vode,  $m^3/m^3$



$S_w$  – zasićenje ležišta vodom, dio cijelog

$\rho_{ws}$  – gustoća vode u standardnim uvjetima,  $\text{kg/m}^3$

U istom jediničnom volumenu nalazi se i slobodni plin:

$$\frac{\phi S_g}{B_g} \rho_{gs} \quad (2-22)$$

gdje je:

$B_g$  - volumni faktor plina,  $\text{m}^3/\text{m}^3$

$S_g$  – zasićenje ležišta plinom, dio cijelog

$\rho_{gs}$  – gustoća plina u standardnim uvjetima,  $\text{kg/m}^3$

i otopljeni plin:

$$\frac{\phi R_s \rho_{gs} S_o}{B_o} + \frac{\phi R_{sw} \rho_{gs} S_w}{B_w} \quad (2-23)$$

gdje je:

$R_s$  – plinski faktor,  $\text{m}^3/\text{m}^3$

Stoga je ukupna masa plina u tom volumenu ležišta:

$$\frac{\phi S_g}{B_g} \rho_{gs} + \frac{\phi R_s \rho_{gs} S_o}{B_o} + \frac{\phi R_{sw} \rho_{gs} S_w}{B_w} \quad (2-24)$$

Korištenjem Darcyjevog zakona može se izraziti radijalni protok nafte,

$$\rho_o u_{ro} = -\frac{k_o}{\mu_o B_o} \rho_{os} \frac{\delta p_o}{\delta r} \quad (2-25)$$

vode:

$$\rho_w u_{rw} = -\frac{k_w}{\mu_w B_w} \rho_{ws} \frac{\delta p_w}{\delta r} \quad (2-26)$$

i plina:

$$\rho_g u_{rg} = -\frac{k_g}{\mu_g B_g} \rho_{gs} \frac{\delta p_g}{\delta r} - \rho_{gs} \frac{R_s}{B_o} \frac{k_o}{\mu_o} \frac{\partial p_o}{\partial r} - \rho_{gs} \frac{R_{sw}}{B_w} \frac{k_w}{\mu_w} \frac{\partial p_w}{\partial r} \quad (2-27)$$

gdje je:

$k_g$  – efektivna propusnost za plin,  $m^2$

$k_o$  – efektivna propusnost za naftu,  $m^2$

$k_w$  – efektivna propusnost za vodu,  $m^2$

Ako se zanemare razlike kapilarnih tlakova i utjecaj gravitacije tada za pojedinu fazu vrijede jednačbe kontinuiteta

$$\text{za naftu: } \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{k_o}{\mu_o B_o} \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left( \phi \frac{S_o}{B_o} \right) \quad (2-28)$$

$$\text{za plin: } \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \left( \frac{R_s k_o}{\mu_o B_o} + \frac{R_{sw} k_w}{\mu_w B_w} + \frac{k_g}{\mu_g B_g} \right) \frac{\partial p}{\partial r} \right] = \frac{\partial}{\partial t} \left[ \phi \left( \frac{R_o S_o}{B_o} + \frac{R_{sw} S_w}{B_w} + \frac{S_g}{B_g} \right) \right] \quad (2-29)$$

$$\text{za vodu: } \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{k_w}{\mu_w B_w} \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left( \phi \frac{S_w}{B_w} \right) \quad (2-30)$$

Pri tome vrijedi  $S_o + S_g + S_w = 1$

(Lee et. al., 2003).

## 2.5. Rješenje za radijalni protok fluida male i konstantne stlačivosti

Model se zasniva na sljedećim pretpostavkama:

- radijalan protok u smjeru bušotine koja raskriva ležište cijelom debljinom
- homogen i izotropan porozni medij
- jednolika debljina proizvodnog sloja
- poroznost i propusnost su konstantne i nisu funkcija tlaka
- fluid je male i konstantne stlačivosti
- konstantna viskoznost fluida
- mali gradijenti tlaka i zanemariv utjecaj gravitacije

$$\text{- diferencijalna jednačba je: } \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\phi \mu c}{k} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2-31)$$

Za rješenje navedene jednačbe potrebno je definirati početne i rubne uvjete. Rješenja koja su od najveće koristi u analizi hidrodinamičkih mjerenja su ona za slučaj utoka fluida konstantnim protokom  $q$  u bušotinu koja se nalazi u središtu ležišta cilindričnog oblika.

- a) Početni uvjeti (za vrijeme  $t=0$ )

Prije pojave bilo kakvog protoka u cijelom ležištu vlada početni tlak  $p_i$

$$p(r, t) = p_i \quad t = 0, \quad 0 < r < \infty \quad (2-32)$$

b) Rubni uvjet za unutarnju granicu ležišta

Pretpostavka je da je protok na unutarnjoj granici ležišta (na radijusu bušotine  $r_w$ ) konstantan za vrijeme  $t > 0$ . Drugi rubni uvjet je definiran kao:

$$\left. \frac{\partial p}{\partial r} \right|_{r_w} = -\frac{qB\mu}{2\pi khr_w}, \quad t > 0 \quad (2-33)$$

c) Rubni uvjet za vanjsku granicu ležišta

Kod rubnih uvjeta za vanjsku granicu ležišta postoje tri specifična slučaja:

1) Neograničeno ležište

Bušotina se nalazi u šupljikavom mediju koji se proteže u beskonačnost. Ovaj uvjet je valjan i za slučajeve ograničenih ležišta kod kojih poremećaj tlaka prouzročen protokom u bušotini nije dosegao vanjske granice ležišta.

$$p(r, t) = p_i, \quad r \rightarrow \infty, \quad t > 0 \quad (2-34)$$

2) Ograničeno ležište

Vanjska granica ležišta je zatvorena, tj. nema protoka na vanjskoj granici.

$$\left. \frac{\partial p}{\partial r} \right|_{r_e} = 0, \quad t > 0 \quad (2-35)$$

3) Konstantan tlak na vanjskoj granici

Tlak na vanjskoj granici je konstantan i jednak vrijednosti početnog tlaka. Ovaj uvjet vrijedi za ležišta s prisutnim vodonosnikom koji podržava tlak u ležištu.

$$p(r_e, t) = p_i, \quad t > 0 \quad (2-36)$$

(Lee et. al., 2003).

## 2.6. Neustaljeno, poluustaljeno i ustaljeno protjecanje

Prema Matthews et. al. (1967) ako se razmotre prethodno opisana tri hipotetska modela ležišta može se zaključiti da će se sva tri modela moći primijeniti u određenom trenutku za istu bušotinu s konstantnom proizvodnjom. U početku će se tlak ponašati kao u slučaju neograničenog ležišta i taj period naziva se neustaljeno protjecanje. Ovo protjecanje opisuje jednadžba:

$$p_{wf}(t) = p_i - \frac{qB\mu}{2\pi kh} \frac{1}{2} \left( \ln \frac{kt}{\phi\mu cr_w^2} + 0,80907 \right) \quad (2-37)$$

gdje je:

$p_i$  - početni ležišni tlak, Pa

$p_{wf}$  – dinamički tlak u bušotini na razini ležišta, Pa

$r_w$  – radijus bušotine, m

Ako je ležište s zatvorenom vanjskom granicom tada će nakon nekog vremena pad tlaka postati linearan s vremenom i takav režim protjecanja se naziva poluustaljeno protjecanje. U periodu u kojem vlada taj režim protjecanja će razlika srednjeg ležišnog tlaka i dinamičkog tlaka na dnu bušotine biti konstantna. Za ovaj slučaj vrijedi jednadžba:

$$\bar{p}(t) - p_{wf}(t) = \frac{qB\mu}{2\pi kh} \left( \ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} \right) \quad (2-38)$$

gdje je:

$\bar{p}$  – srednji ležišni tlak, Pa

Nakon određenog vremena uslijediti će ustaljeno stanje protjecanja u kojemu je tlak ovisan o vremenu, a vrijedi jednadžba:

$$p_{wf} = p_i - \frac{qB\mu}{2\pi kh} \ln \frac{r_e}{r_w} \quad (2-39)$$

## 2.7. Bezdimezionalni oblik jednadžbe difuzije

Bezdimezionalne varijable se koriste kako bi se pojednostavilo jednadžbe i one se koriste u mnogim metodama analize hidrodinamičkih mjerenja.

Bezdimenzionalni radijus:  $r_D = \frac{r}{r_w}$  (2-40)

Bezdimenzionalno vrijeme:  $t_D = \frac{kt}{\phi\mu c_i r_w^2}$  (2-41)

Bezdimenzionalni tlak:  $p_D = \frac{2\pi kh}{qB\mu}(p_i - p)$  (2-42)

Bezdimenzionalni oblik jednadžbe difuzije za radijalan protok i konstantnu proizvodnju:

$$\frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left( r_D \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right) = \frac{\partial p_D}{\partial t_D} \quad (2-43)$$

(Lee, 1982).

## 2.8. Skin faktor

Propusnost stijene u pribušotinskoj zoni može biti promijenjena različitim postupcima u procesu bušenja, opremanja bušotine ili tijekom proizvodnje. Pribušotinska zona, u kojoj postoji promijenjena propusnost  $k_s$ , nalazi se između radijusa bušotine  $r_w$  i radijusa doseg skina  $r_s$ . Utjecaj promijenjene propusnosti (skin efekt) u toj zoni je uzročnik dodatnog pada tlaka, tj. on uzrokuje razliku između idealnog i realnog dinamičkog tlaka na dnu bušotine (slika 2-2.):

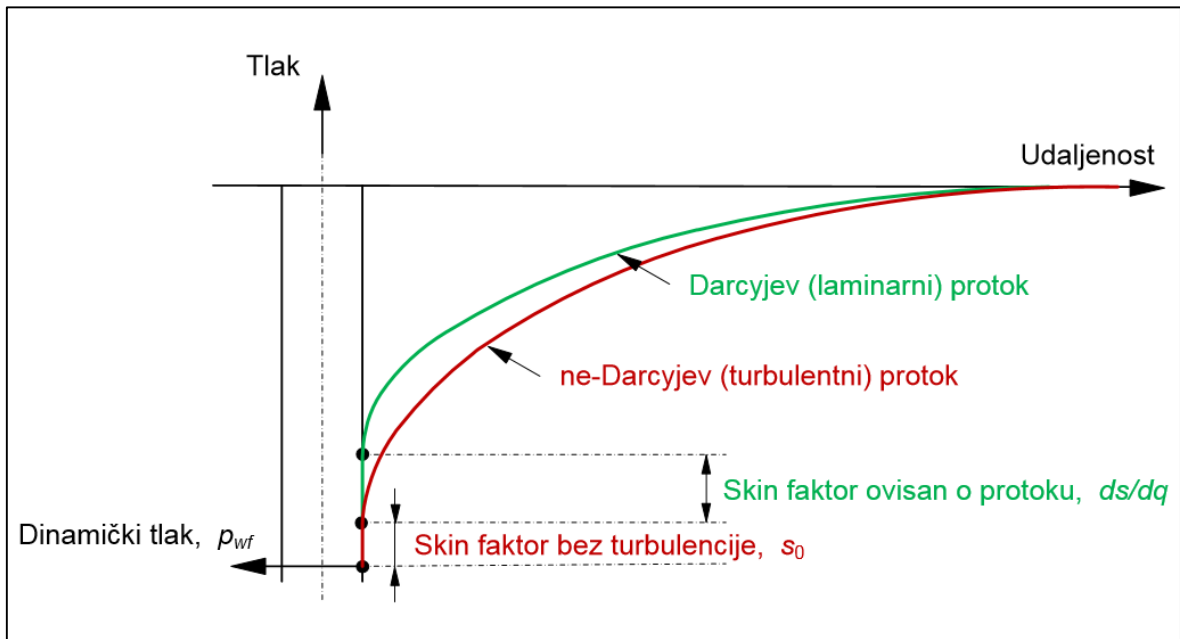
$$\Delta p_s = p_{wf,ideal} - p_{wf,real} = \frac{qB\mu}{2\pi h} \ln \frac{r_s}{r_w} \left( \frac{1}{k_s} - \frac{1}{k} \right) \quad (2-44)$$

Skin faktor se tada može izračunati jednadžbom:

$$s = \left( \frac{k}{k_s} - 1 \right) \ln \frac{r_s}{r_w} \quad (2-45)$$

(Čikeš, 2015).

Na slici je prikazan i utjecaj turbulentnog protoka u pribušotinskoj zoni koji uzrokuje pad tlaka i može se izraziti preko skin faktora ovisnog o protoku. Taj skin faktor je dio ukupnog skina.



**Slika 2-2.** Prikaz pada tlaka u pribušotinskoj zoni (Čikeš, 2015)

### 3. Analiza testa porasta tlaka

Test porasta tlaka (eng. *pressure build-up test*) zahtijeva zatvaranje proizvodne bušotine. Najčešće i najjednostavnije metode analize zahtijevaju proizvodnju konstantnim protokom dovoljno dugo kako bi se stabilizirala distribucija tlaka prije zatvaranja bušotine. Tlak se počinje mjeriti neposredno prije zatvaranja bušotine i bilježi se kao funkcija vremena za cijelo vrijeme trajanja testa, tj. dok je bušotina zatvorena. Rezultate testa se može grafički prikazati kao krivulju porasta tlaka. Iz dobivenih podataka se mogu izračunati propusnost, skin i radijus crpljenja bušotine. Postoji više metoda analize dobivenih podataka koje se temelje na interpretaciji pomoću pravca na grafičkom prikazu dobivenih podataka. Najčešće korištena je Hornerova metoda (Horner, 1951.) kojom se dobiva nagib pravca,  $m$ , i nakon toga vrijednosti propusnosti i skina. U Hornerovoj analizi na apscisu se, s lijeva na desno u logaritamskom mjerilu, ucrtava  $(t_p + \Delta t) / \Delta t$  (u satima), pri čemu je  $\Delta t$  vrijeme koje je proteklo od zatvaranja bušotine, a  $t_p$  vrijeme konstantne proizvodnje prije zatvaranja bušotine za mjerenje porasta tlaka. Ukoliko njegova vrijednost nije poznata može se odrediti jednadžbom:

$$t_p = 24 \frac{N_p}{q_p} \quad (3-1)$$

gdje su:

$N_p$  – kumulativna proizvodnja,  $m^3$

$q_p$  – zadnji protok prije zatvaranja bušotine,  $m^3/\text{dan}$

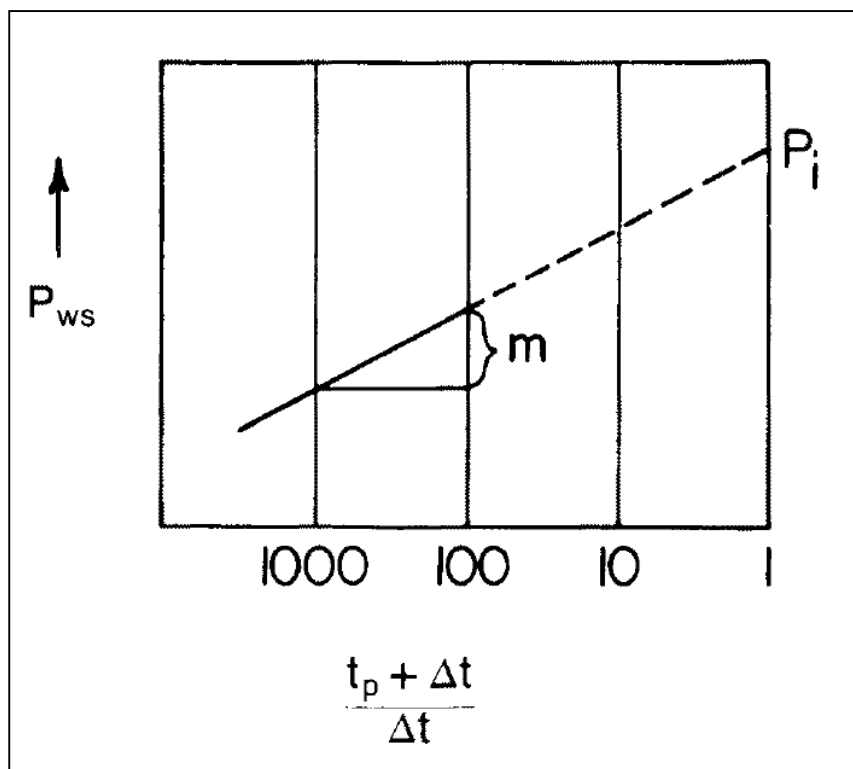
Na ordinatu se ucrtava vrijednosti tlaka na dnu bušotine  $p_{ws}$  te se dobiva pravac, prikazan na slici 3-1, pomoću čijeg nagiba se može izračunati propusnost, a jednadžba pravca glasi:

$$m = 0,183 \frac{qB\mu}{kh} \quad (3-2)$$

u kojoj su:

$q$  – protok,  $m^3/s$

$h$  – debljina ležišta, m



**Slika 3-1.** Grafički prikaz tlaka u ovisnosti o *Hornerovom vremenu* (Lee, 1982)

Nagib pravca se može odrediti grafički na način da se oduzimaju vrijednosti dva tlaka za razliku u vremenu od jednog ciklusa (npr. za vrijeme 100 i 10). Pomoću nagiba pravca može se odrediti i skin faktor (Bourdarot, 1998):

$$s = 1,151 \left[ \frac{(P_{1hr} - P_{wf})}{m} - \log \left( \frac{k}{\phi \mu c_t r_w^2} \right) + 0,35 \right] \quad (3-3)$$

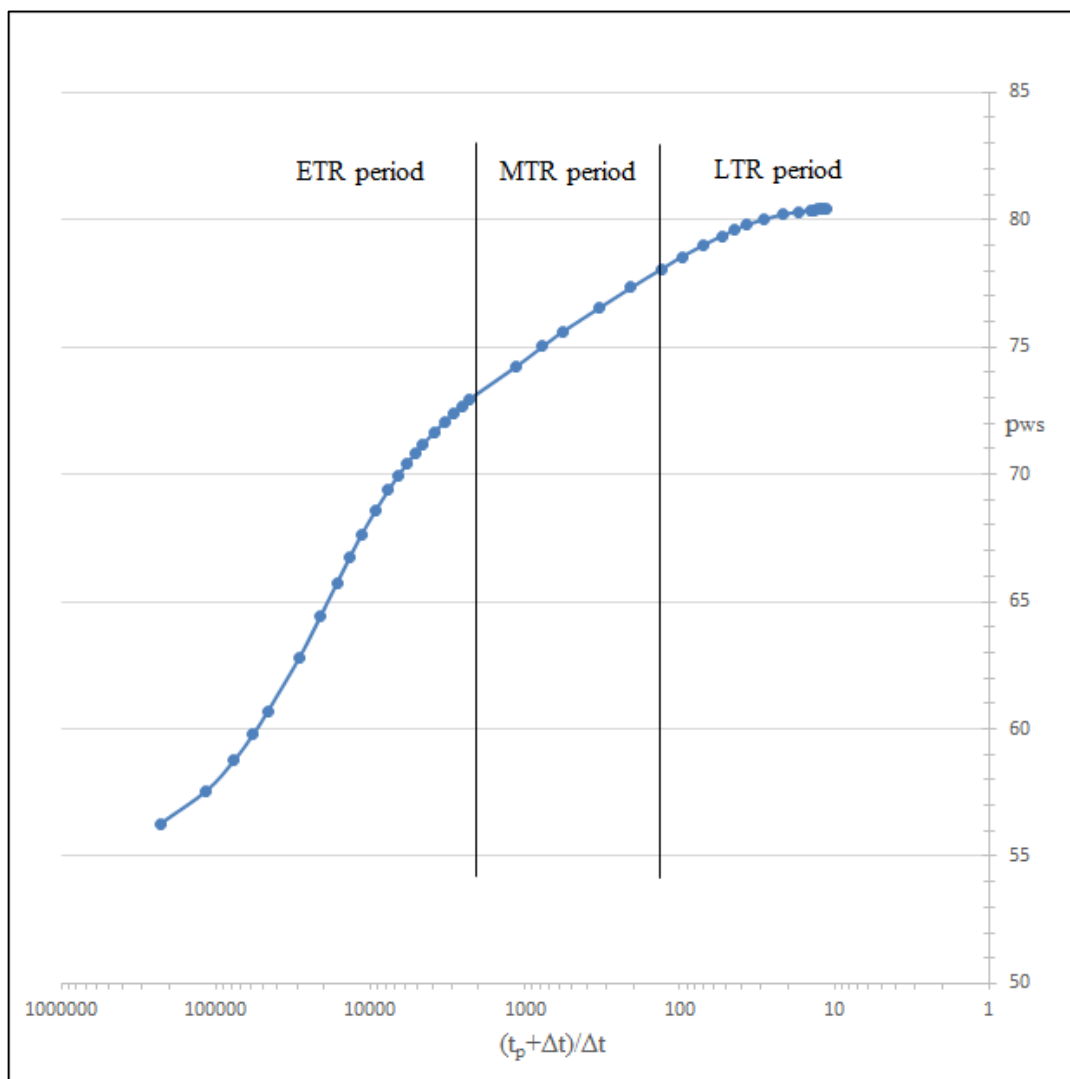
gdje je:

$p_{1hr}$  – tlak 1 h nakon zatvaranja bušotine, Pa

U praksi takav prikaz porasta tlaka nije pravac već krivulja nepravilnog oblika, prikazana na slici 3-2., koju karakteriziraju 3 perioda: ETR (eng. *early time region*), MTR (eng. *middle time region*) i LTR (eng. *late time region*). ETR period se pojavljuje odmah nakon zatvaranja bušotine i u tom periodu na tlak utječu naknadni dotok (eng. *wellbore storage*) i oštećenje pribušotinske zone. U MTR periodu prestaje utjecaj naknadnog utoka fluida u bušotinu te se javlja neustaljeno stanje protjecanja koje se grafički prikazuje pravcem, pomoću čijeg se



nagiba određuje propusnost i skin. U LTR periodu utjecaj na tlak imaju granice ležišta ili crpljenje okolnih bušotina.



**Slika 3-2.** Periodi testa porasta tlaka (Hornerovo vrijeme u odnosu na mjereni tlak)

Pri interpretaciji rezultata testa porasta tlaka mora se uzeti u obzir i odstupanja od idealnog modela, a to su: stlačivi fluid, dvofazni protok, ležište promijenjene propusnosti u pribušotinskoj zoni, turbulentni protok, utjecaj načina opremanja bušotine, više bušotina u ležištu, nesimetrična površina crpljenja i utjecaj obujma bušotine. U ovom radu će se razmatrati interpretacije testa porasta tlaka za slučajeve višefaznog protjecanja u ležištu. Jednadžbe za idealan jednofazni model prestaju važiti u slučaju protjecanja više faza u ležištu, tj. kada tlak u ležištu padne ispod tlaka zasićenja. Zasićenje (i posljedično relativna propusnost), volumni faktor i viskoznost nafte su u funkciji tlaka te je bilo potrebno osmisliti metode koje to implementiraju i daju vjerodostojne podatke. U ovom radu analizirane su četiri metode.

## 4. Mogućnosti interpretacije testa porasta tlaka za višefazni protok fluida

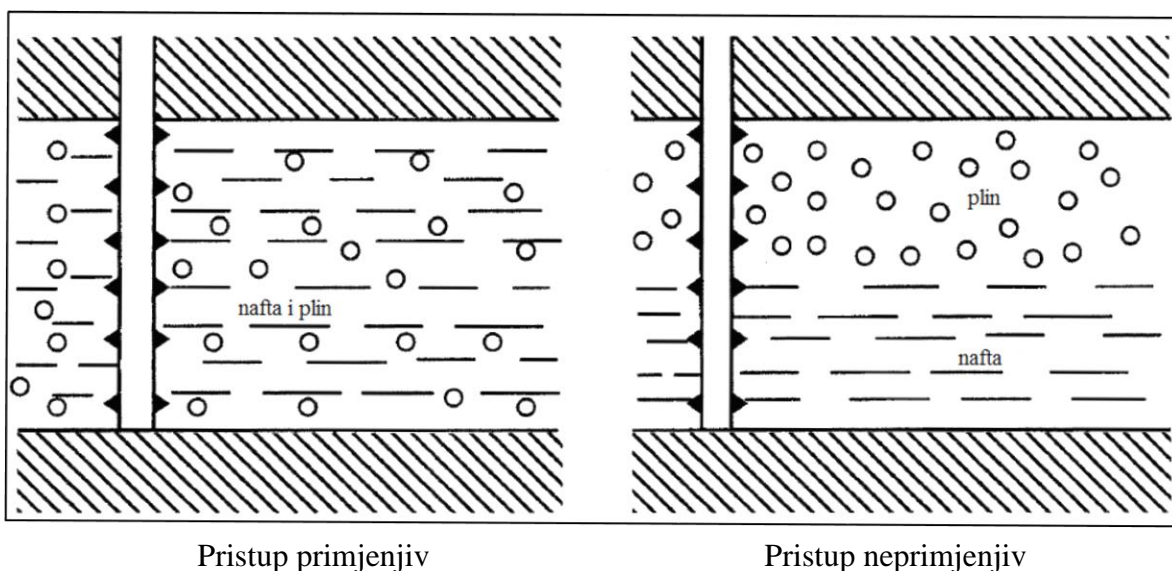
### 4.1 Metoda prema autoru Perrine

Ovaj pristup za rješavanje problema višefaznog protoka dao je Perrine 1959. godine.

Pretpostavke za ovaj model su:

- kapilarni tlakovi su zanemarivi: to znači da je tlak u nekoj točki ležišta u određenom vremenu jednake vrijednosti za sve fluide. Ova je pretpostavka najčešće točna pošto su uobičajeno kapilarni tlakovi mali.
- zasićenja su jednolika: uzimajući u obzir da je zasićenje svakog fluida jednoliko, implicira da je propusnost za svaki fluid u homogenom ležištu jednolika. Ova pretpostavka nije potvrđena za područje blizu bušotine u ležištima gdje je ležišni tlak manji od tlaka zasićenja. Pošto se najveće varijacije tlaka događaju u pribušotinskoj zoni, tu se također događaju i najveće varijacije u vrijednosti zasićenja plinom. S obzirom da su razlike u zasićenju zanemarene za područje u blizini bušotine, ova pretpostavka utječe na iznos skina.

Pretpostavka jednolikog zasićenja je približno valjana na određenoj udaljenosti od bušotine. Ta udaljenost ovisi o svojstvima ležišta, ležišnih fluida i uvjetima proizvodnje (Bourdarot, 1998). Na slici 4-1. prikazan je slučaj u kojem se može primijeniti ovaj pristup.



**Slika 4-1.** Pristup je primjenjiv za slučaj uniformnog zasićenja fluidom (Bourdarot 1998)

Metoda se zasniva na tome da se formule za jednofazni fluid modificira za višefazni fluid uvođenjem ukupnih svojstava kao zamjenu za njima ekvivalentna svojstva jednofaznog fluida. Ta svojstva su mobilnost, stlačivost i obujamski protok. U radu Perrinea (1956) su navedene formule za izračun tih svojstava. Iz toga slijedi formula za ukupnu mobilnost:

$$\lambda_T = \left( \frac{k}{\mu} \right)_T = \left( \frac{0,183}{mh} \right) (Bq)_T \quad (4-1)$$

Nadalje, ukupna mobilnost i proizvodnja su definirani kao suma mobilnosti i suma proizvodnje svake pojedine faze:

$$\lambda_T = \lambda_o + \lambda_g + \lambda_w \quad (4-2)$$

$$q_t = q_o B_o + q_w B_w + q_g B_g \quad (4-3)$$

Mobilnosti se određuju koristeći proizvodne podatke za svaku fazu, nagib pravca iz testa porasta tlaka i PVT svojstva:

$$\lambda_o = \frac{0,183 B_o q_o}{mh} \quad (4-4)$$

$$\lambda_g = \left( \frac{0,183 B_g}{mh} \right) (q_g - q_o R_s) \quad (4-5)$$

$$\lambda_w = \frac{0,183 B_w q_w}{mh} \quad (4-6)$$

Sva svojstva ovisna o tlaku se određuju za prosječni ležišni tlak. Ukupna stlačivost je definirana kao ukupno smanjenje obujma ležišnog fluida po jedinici volumena za  $1 Pa$  porasta tlaka. Ukupna stlačivost može biti prikazana kao suma pojedinačnih stlačivosti fluida i stijene:

$$c_T = S_o c_{of} + S_g c_{gf} + S_w c_{wf} + c_f \quad (4-7)$$

Vrijednosti stlačivosti za pojedinu fazu (naftu, plin i vodu) pri prosječnom ležišnom tlaku su:

$$c_{of} = \frac{S_o}{S_o + S_g + S_w} \left( \frac{B_g}{B_o} \frac{dR_s}{dp} - \frac{1}{B_o} \frac{dB_o}{dp} \right) \quad (4-8)$$

$$c_{gf} = \frac{S_g}{S_o + S_g + S_w} \left( \frac{1}{p} \right) \quad (4-9)$$

$$c_{wf} = \frac{S_w}{S_o + S_g + S_w} (c_w) \quad (4-10)$$

Iz jednadžbi je vidljivo da je potrebno znati vrijednosti zasićenja. Također PVT vrijednosti svojstava moraju biti poznata ili pribavljena iz korelacija. Perrine je također pokazao da se pomoću poznatih podataka proizvodnje, nagiba pravca  $m$  iz testa porasta tlaka i preuređenjem jednadžbi mogu izračunati efektivne propusnosti za svaku fazu:

$$k_o = \frac{0,183 q_o B_o \mu_o}{mh} \quad (4-11)$$

$$k_g = \frac{0,183 (q_g - q_o R_s) B_g \mu_g}{mh} \quad (4-12)$$

$$k_w = \frac{0,183 q_w B_w \mu_w}{mh} \quad (4-13)$$

Skin faktor se računa koristeći slijedeću jednadžbu:

$$s = 1,151 \left[ \frac{P_{1hr} - P_{wf}}{m} - \log \left( \frac{\lambda_i}{\phi c_r r_w^2} \right) + 0,35 \right] \quad (4-14)$$

Vrijednost skina se mora oprezno razmatrati u ležištima u kojima je tlak manji od tlaka zasićenja. Ovaj pristup podrazumijeva da je zasićenje uniformno oko bušotine. U stvarnosti zasićenje plinom oko proizvodne bušotine je veće nego u nekoj točki negdje dalje u ležištu. Veće zasićenje plinom dovodi do veće ukupne mobilnosti u blizini bušotine. To se može vidjeti kao negativni skin. Najveća slabost ovog pristupa je da se skin ne može sasvim točno odrediti (Bourdarot 1998).

#### 4.2. Metoda prema autoru Raghavan

Ovaj pristup dao je Raghavan 1976. godine, a ideja je slična kao i kod rješenja za plinske bušotine, a to je da se uvodi funkcija pseudotlaka. Prema Evinger i Muskat (1942) za ustaljeno protjecanje, protok je definiran kao:

$$q_o = \frac{kh}{1,57 \ln \frac{r_e}{r}} \int_p^{p_c} \frac{k_{ro}(S_o)}{\mu_o B_o} dp \quad (4-15)$$

Kako je relativna propusnost ovisna o zasićenju, navedeni integral može biti vrednovan samo ako se definira odnos između vrijednosti zasićenja i tlaka. Taj odnos je dobiven iz jednadžbe za plinski faktor (*GOR*) :

$$R = R_s + \frac{k_g \mu_o B_o}{k_o \mu_g B_g} \quad (4-16)$$

Fetkovich (1973) je dao formulu za protok fluida iz ležišta u bušotinu pri režimu otopljenog plina za prijelazno i poluustaljeno, te za ustaljeno protjecanje:

$$q_o = \frac{kh}{1,57(0,5 \ln t_D + 0,404 + s')} [m(p_i) - m(p_{wf})] \quad (4-17)$$

$$q_o = \frac{kh}{1,57 \left( \ln 0,472 \frac{r_e}{r_w} + s' \right)} [m(\bar{p}) - m(p_{wf})] \quad (4-18)$$

gdje je  $m(p)$  funkcija pseudotlaka dana kao:

$$m(p) = \int_{p_b}^p \frac{k_{ro}(S_o)}{\mu_o B_o} dp \quad (4-19)$$

a  $t_D$  bezdimenzionalno vrijeme je:

$$t_D = \frac{kt}{\phi \mu_{oi} c_{ii} r_w^2} \quad (4-20)$$

Fetkovich (1973) nije dao rješenje integrala za računanje pseudotlaka. Rhagavan (1976) je koristio nekoliko pristupa kako bi odredio funkciju pseudotlaka koja bi korelirala sa rješenjima za test pada tlaka. Trebalo je pronaći funkciju pseudotlaka pri kojoj bi semilog graf  $m_{wD}^*$  vs  $t_D$  imao nagib 1,151 za log ciklus pri ranom prijelaznom razdoblju za radijalni protok. Za ovaj pristup potrebno je imati krivulju odnosa relativnih propusnosti i zasićenja.

Pretpostavke su da je ležište horizontalno, homogeno i izotropno, te se zanemaruje utjecaj gravitacije.

Rhagavan (1976) je dao formule:

bezdimenzionalni pad tlaka

$$p_D(r_D, t_D) = \frac{2\pi kh}{q_o B_{oi} \mu_{oi}} [p_i - p(r, t)] \quad (4-21)$$

bezdimenzionalni pad pseudotlaka

$$m_D(r_D, t_D) = \frac{2\pi kh}{q_o} [m(p_i) - m(r, t)] \quad (4-22)$$

bezdimenzionalni radijus

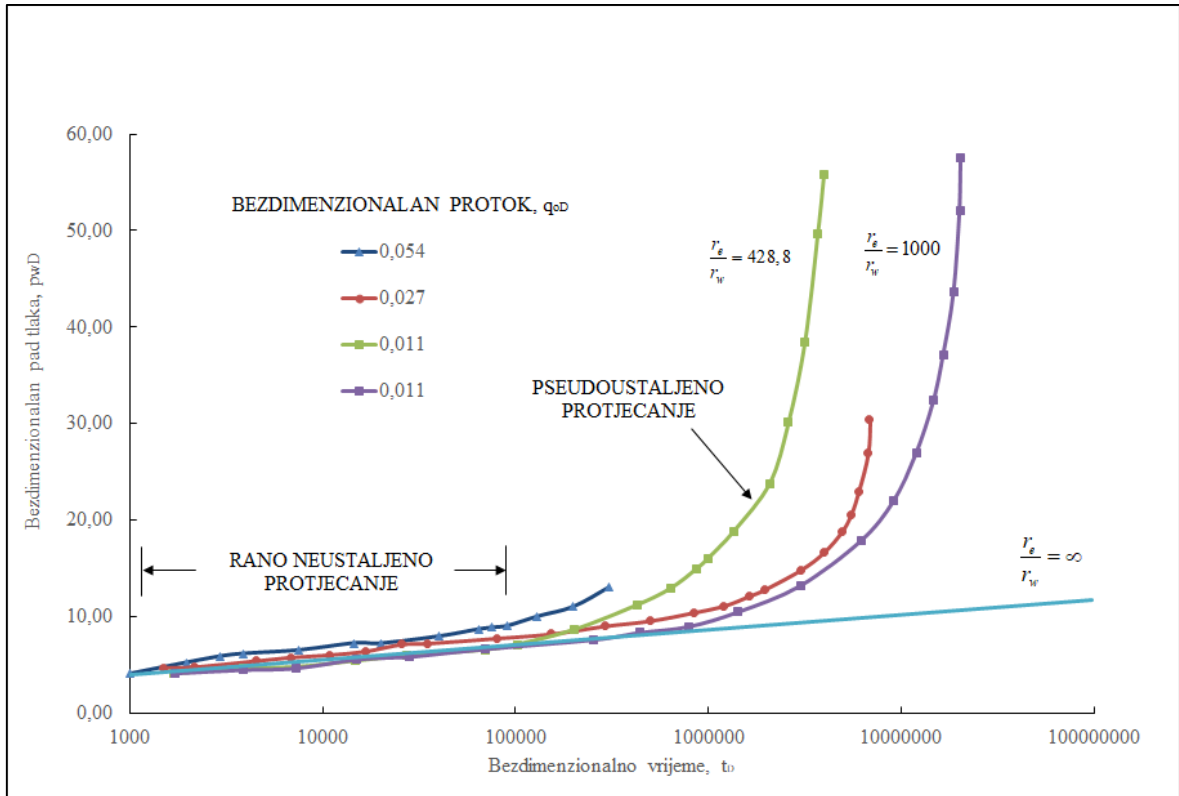
$$r_D = \frac{r}{r_w} \quad (4-23)$$

bezdimenzionalna proizvodnja nafte

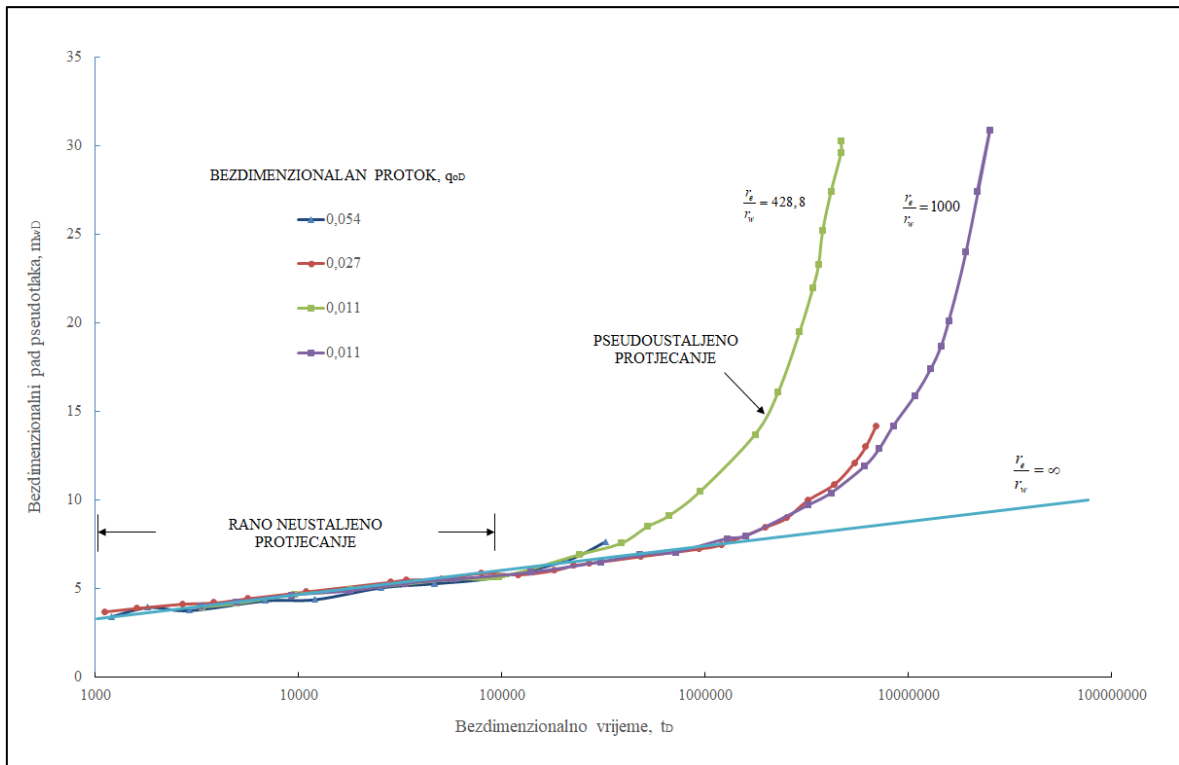
$$q_{oD} = \frac{\mu_{oi} q_o}{2\pi kh p_i} \quad (4-24)$$

Tijekom ranog prijelaznog protoka bezdimenzionalni pad tlaka je linearna funkcija bezdimenzionalnog vremena  $t_D$  s nagibom  $m$  od 1,151/ciklus. Usporedbom prikaza  $p_{wD}$  u

funkciji  $t_D$  i  $m_{wD}$  u funkciji  $t_D$ , tj. usporedbom slika 4-2. i 4-3. može se vidjeti da je nagib oba pravca tijekom cijelog ranog prijelaznog razdoblja identičan. Ovo zapažanje je osnova pristupa metodom u kojoj se koristi pseudotlakove.



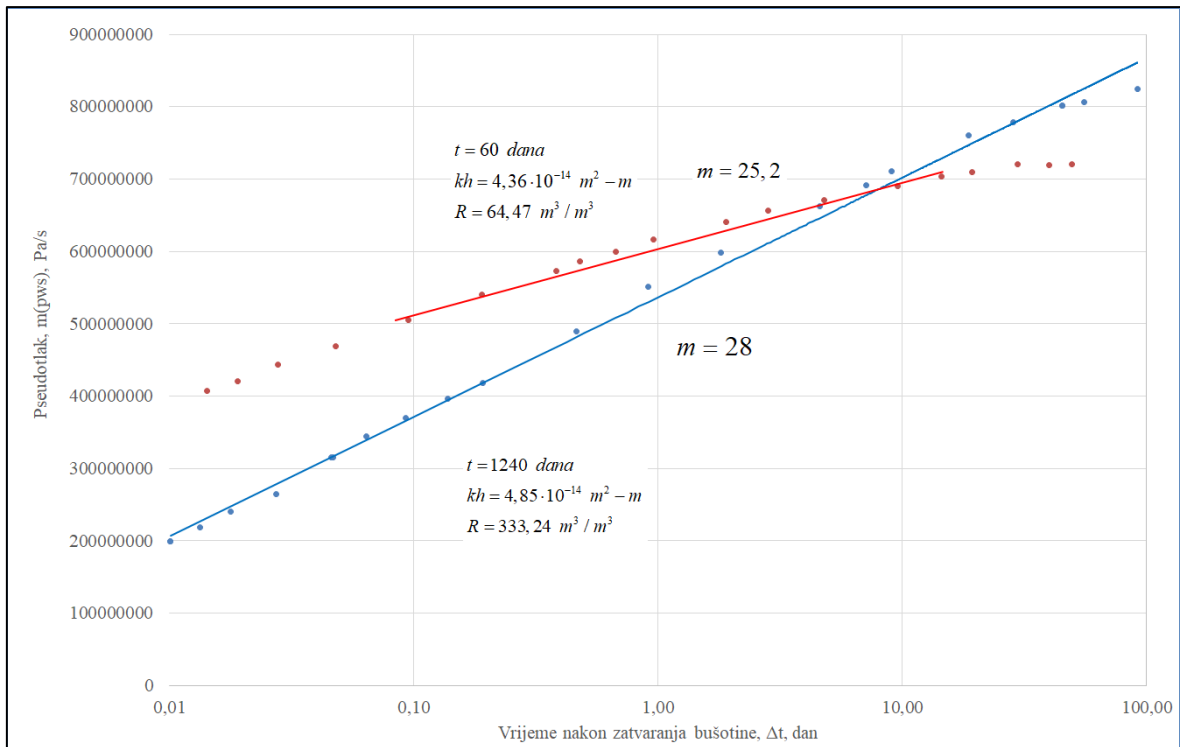
**Slika 4-2.** Bezdimenzionalni pad tlaka  $p_{wD}$  u odnosu na bezdimenzionalno vrijeme  $t_D$



**Slika 4-3.** Bezdimenzionalni pad pseudotlaka  $m_{wD}$  u odnosu na bezdimenzionalno vrijeme  $t_D$

Porast tlaka u bušotini odražava uvjete u području crpljenja bušotine te bi krivulja testa porasta tlaka bušotine trebala davati otprilike isti profil tlaka onom tlaku koji je bio u ležištu u trenutku zatvaranja bušotine. Ponašanje krivulje uvjetovano je distribucijom tlaka, zasićenja, relativnim propusnostima ležišta i svojstvima fluida. Funkcija pseudotlaka koja se koristi za analizu porasta tlaka bi trebala odražavati uvjete koji su postojali u ležištu tijekom provođenja testa porasta tlaka. Parametar  $GOR$  u trenutku zatvaranja bušotine karakterističan je za uvjete koji su prevladavali u području crpljenja bušotine. Pristup računanja pseudotlaka za test porasta tlaka pretpostavlja da je  $GOR$  konstantan tijekom testa porasta tlaka i da je jednak proizvodnom  $GOR-u$  u trenutku zatvaranja bušotine. To implicira da se promjene tlaka događaju u ležištu puno brže nego što je vremenski interval u kojem se događaju velike promjene zasićenja. Rhagavan (1976) je uočio da se treba primjenjivati drugačije računanje pseudotlaka za test pada tlaka i test porasta tlaka, jer je drugačiji nagib pravaca na grafičkom prikazu pseudotlaka u funkciji vremena  $\Delta t$  (slika 4-4). Za riješeni slučaj je Rhagavan dao graf na kojem se vide rješenja za umnožak  $kh$ , koja su istodobno i u granicama simulatora. Odavde proizlazi da se ovim pristupom može izračunati umnožak  $kh$  bez obzira na promjene zasićenja naftom i plinom.





**Slika 4-4.** Pseudotlak u funkciji vremena

Za proračun pseudotlaka u testu porasta tlaka koristi se jedan  $R$ , a procedura je kako slijedi:

1. Pomoću proizvodnog  $GOR$  u trenutku zatvaranja bušotine izračuna se omjer između  $k_g/k_o$  i tlaka koristeći jednadžbu:

$$R = R_s + \frac{k_g \mu_o B_o}{k_o \mu_g B_g} \quad (4-16)$$

2. Iz krivulje relativnih propusnosti izračuna se omjer  $k_g/k_o$  i zasićenja  $S_o$  (ili  $S_g$ ).
3. Iz koraka 1. i 2. izračuna se odnos  $p$  i  $S_o$ .
4. Pomoću poznatog odnosa  $p$  i  $S_o$  izračuna se odnos  $k_{ro}$  i  $p$ , koristeći podatke o relativnim propusnostima.
5. Izračuna se  $m(p)$  koristeći integral i PVT podatke:

$$m(p) = \int_{p_b}^p \frac{k_{ro}(S_o)}{\mu_o B_o} dp \quad (4-19)$$

### 4.3. Metoda prema autoru Al-Khalifah

U radu Al-Khalifaha (1987) je izvedena jednačba difuzije za višefazni protok:

$$\frac{\phi c_t}{\lambda_t} \frac{\partial p}{\partial t} = \nabla^2 p + \nabla p \cdot \nabla \left[ \ln \left( \frac{k_o}{\mu_o B_o} \right) \right] \quad (4-20)$$

Prema Fetkovich (1973) može se smatrati da se član  $\frac{k_o}{\mu_o B_o}$  mijenja linearno s tlakom. Ta linearna funkcija je izražena kao član jednačbe:

$$\frac{k_o}{\mu_o B_o} = a p \quad (4-21)$$

pri čemu je  $a$  konstanta. U radu Al-Khalifaha (1987) dano je teoretsko objašnjenje ovog pristupa: Linearna jednačba se koristi kako bi se jednačba (4-20) svela na sljedeću jednačbu difuzije koja sadrži parametar  $p^2$ :

$$\nabla^2 p^2 = \frac{\phi c_t}{\lambda_t} \frac{\partial p^2}{\partial t} \quad (4-22)$$

Rješenje jednačbe difuzije za višefazni protok koja sadrži parametar  $p^2$  se može svesti na linearni oblik pod pretpostavkom konstantnog omjera ukupne stlačivosti i mobilnosti  $\frac{c_t}{\lambda_t}$ .

Tada se može riješiti za sve linearne početne i rubne uvjete. Ležište se smatra neograničenim, homogenim i izotropnim. Također se podrazumijeva da je protok u ležištu izoterman i da bušotina pokriva cijelu debljinu ležišta. Početni i rubni uvjeti definirani su kako slijedi:

- početni uvjeti:  $p^2 = p_i^2$  pri  $t = 0$ , za sve  $r$  (4-23)

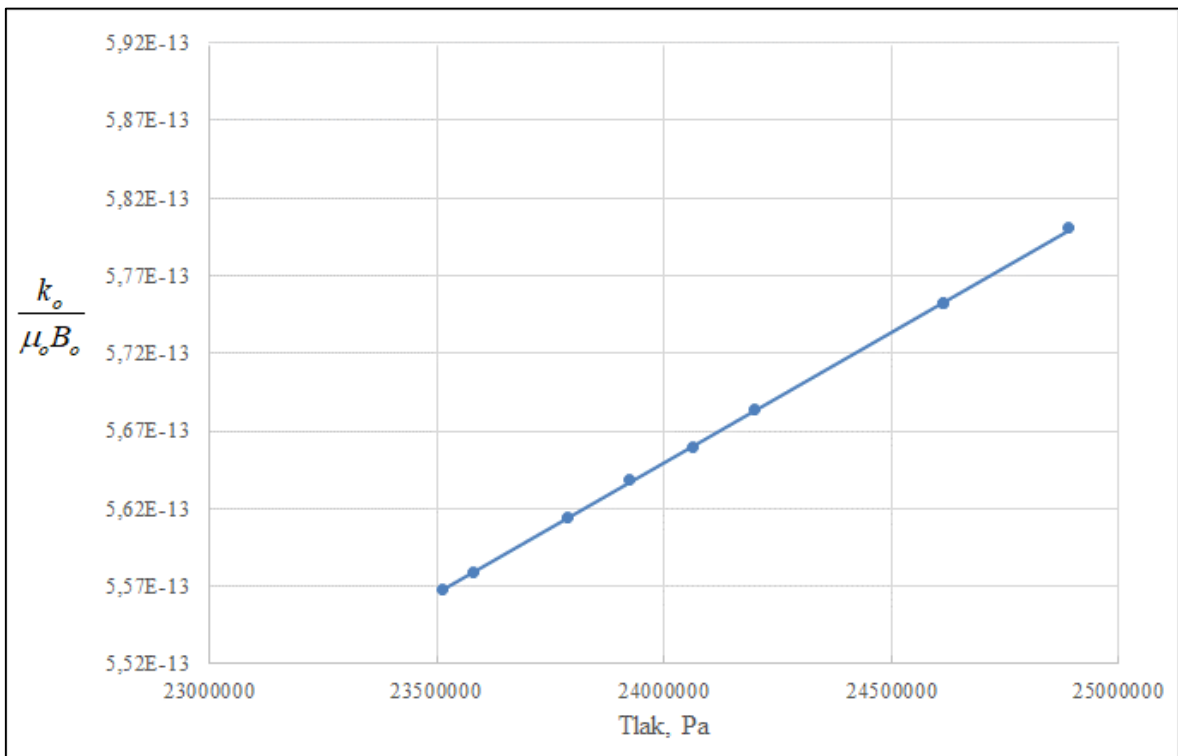
- vanjska granica:  $p^2 = p_i^2$  za  $r \rightarrow \infty$ , za sve  $t$  (4-24)

- unutarnja granica:  $\lim_{r \rightarrow 0} \left( r \left( \frac{k_o}{\mu_o B_o} \right) \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{q_o}{2\pi h}$  (4-25)

(Uvjet vrijedi za konstantan obujamski protok).

Da bi se postigli uvjeti za linearni oblik unutarnje granice, pretpostavlja se da se član  $\frac{k_o}{\mu_o B_o}$  mijenja linearno s  $p(r \rightarrow 0, t)$ . Kako bi se dokazala ova pretpostavka, član  $\frac{k_o}{\mu_o B_o}$  se smatra kao kombinacija efektivne propusnosti za naftu  $k_o$  i PVT uvjeta  $\frac{1}{\mu_o B_o}$ . Prihvaćena je pretpostavka da se PVT uvjet  $\frac{1}{\mu_o B_o}$  mijenja linearno s tlakom. Utvrđeno je da se u bušotini na razini ležišta vrijednost zasićenja stabilizira protekom vremena trajanja testa. Kada se stabilizira zasićenje u bušotini na razini ležišta, također se stabilizira i efektivna propusnost za naftu. Stoga, će se parametar  $k_o$  smanjiti otprilike na konstantu vrijednost i biti takav tijekom većine trajanja testa, pa će promjena člana  $\frac{k_o}{\mu_o B_o}$  biti otprilike linearna s tlakom (slika 4-5.). Za prethodno navedene početne i rubne uvjete jednadžba protoka glasi:

$$p_{wf}^2 - p_i^2(r, t) = \frac{0,366q_o}{a h} \left[ \log t + \log \left( \frac{\lambda_i}{\phi c_i r_w^2} \right) - 3,228 + 0,869 s \right] \quad (4-26)$$



**Slika 4-5.** Prikaz linearnog odnosa  $\frac{k_o}{\mu_o B_o}$  u odnosu na tlak (Al-Khalifah et al. 1987)

Pretpostavka linearnog odnosa  $\frac{k_o}{\mu_o B_o}$  u odnosu na tlak je korištena kako bi se u jednadžbi difuzije postigli uvjeti za linearni oblik na unutarnjoj granici. Ako je ovaj linearni odnos egzaktan, njegov nagib  $a$  se može izračunati pri svakom tlaku. U stvarnosti, ovaj odnos je samo približno linearan pošto je ovisan o vrlo nelinearnim PVT uvjetima i podacima o relativnim propusnostima. Stoga se tlak pri kojemu se analizira nagib pravca određuje na tri različita načina:

1) Empirijski nagib,  $a$ , se određuje za svaki prosječni tlak tijekom polulogaritamskog ciklusa na grafu  $p^2$  prema  $\log t$ . Nagib  $m$  istoga ciklusa se koristi kod računanja efektivne propusnosti za naftu. Odabran je polulogaritamski ciklus ( $t=1hr$  do  $t=10hr$ ) gdje je nagib ciklusa:

$$m = (p_{1hr}^2 - p_{10hr}^2), \quad (4-27)$$

a empirijski nagib  $a$  se određuje pri:

$$p = \frac{p_{1hr} + p_{10hr}}{2} \quad (4-28)$$

Stoga je,

$$a = \left( \frac{k_o}{\mu_o B_o} \right) \cdot \frac{2}{(p_{1hr} + p_{10hr})} \quad (4-29)$$

pa kada se to unese u jednadžbu (4-20), dobiva se sljedeće rješenje:

$$k_o = \frac{0,366q_o \frac{(p_{1hr} + p_{10hr})}{2} (\mu_o B_o) \frac{p_{1hr} + p_{10hr}}{2}}{m h} \quad (4-30)$$

što se može skratiti na:

$$k_o = \frac{0,366q_o (\mu_o B_o) \frac{p_{1hr} + p_{10hr}}{2}}{m^* h} \quad (4-31)$$

gdje je:

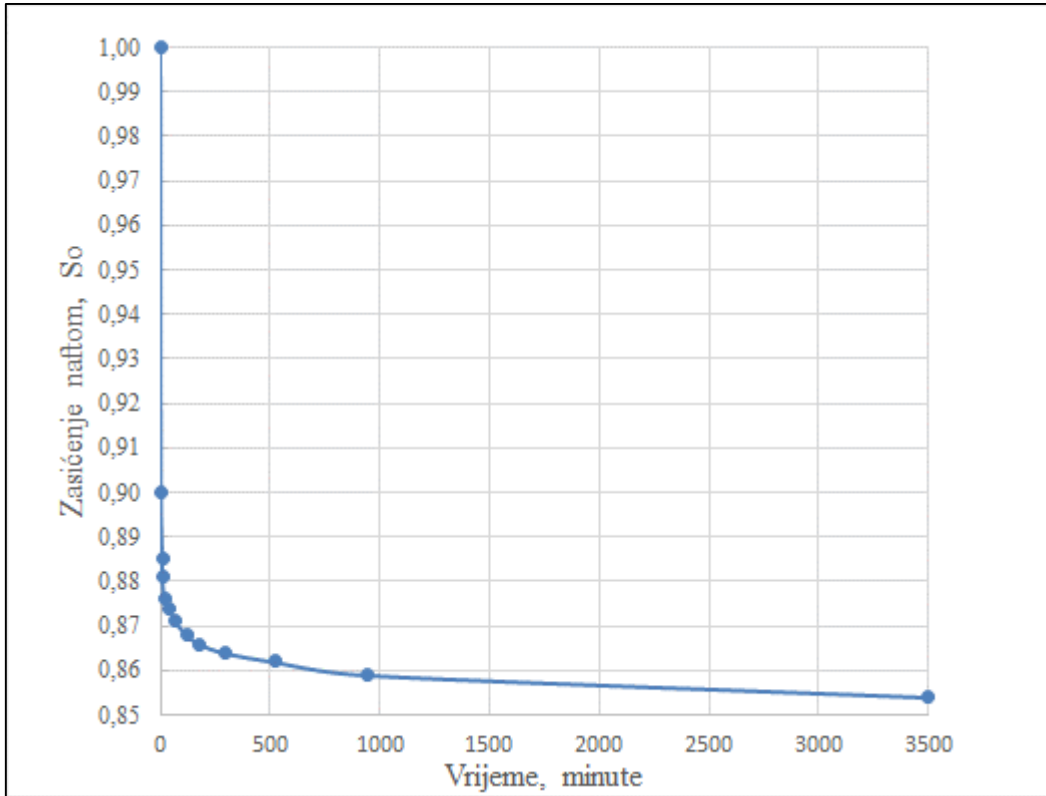
$$m^* = (p_{1hr} - p_{10hr}) \quad (4-32)$$

nagib pravca  $p_{wf}$  u funkciji  $\log t$ . Jednadžba (4-31) jednaka je rješenju koje je dao Perrine osim što je tlak za računanje  $(\mu_o B_o)$  različit. Profil zasićenja na slici 4-6. pokazuje kako je

$k_o$  pri  $\frac{p_{1hr} + p_{10hr}}{2}$  puno manji nego  $k_o$  pri početnom tlaku  $p_i$ . To objašnjava zašto Perrineov

pristup umanjuje efektivnu propusnost za naftu. Kako bi se izbjeglo to umanjenje, član

$\frac{k_o}{\mu_o B_o}$  bi se trebalo razmatrati pri višem tlaku.



**Slika 4-6.** Zasićenje na dnu bušotine tijekom testa pada tlaka (Al-Khalifah et al., 1987)

2) Empirijski nagib  $a$  se procjenjuje pri početnom ležišnom tlaku, pa vrijedi:

$$a = \left( \frac{k_o}{\mu_o B_o} \right)_i \cdot \frac{1}{p_i} \quad (4-33)$$

Ovaj nagib se primjenjuje u rješenju jednadžbe (4-26) te se dobiva:

$$k_o = \frac{0,366 q_o p_i (\mu_o B_o)_i}{m h} \quad (4-34)$$

Za test porasta tlaka  $p_i$  se odnosi na prosječni ležišni tlak, te je pripadajuća jednadžba:

$$k_o = \frac{0,366q_o \bar{p} (\overline{\mu_o B_o})}{m h} \quad (4-35)$$

gdje je:

- $\bar{p}$  – srednji ležišni tlak, Pa
- $(\overline{\mu_o B_o})$  se računa pri  $\bar{p}$ ,
- $m$  je nagib pravca na Hornerovom grafu ili MDH (Miller-Dyes-Hutchinson) grafu u uvjetima  $p^2$ .

Ova rješenja, jednadžbe (4-34) i (4-35) se rabe za nafte visoke i niske hlapivosti. Al-Khalifah je u praktičnim rješenjima ustanovio da su jednadžbe točne za sve raspone testova pada tlaka za visoko hlapive nafte. Za nafte niske hlapivosti, jednadžbe daju točne rezultate za niske tlakove i pripadajuće testove porasta tlaka, ali daju prevelike efektivne fazne propusnosti za visoke tlakove u protočnim testovima i testovima porasta tlaka. Zato je Al-Khalifah predložio 3. rješenje za velike padove tlaka u testu pada i testu porasta tlaka za nafte visoke hlapivosti.

3) Razmatra se empirijski nagib  $a$  za nafte niske hlapivosti. Za protočne testove tlaka s velikim padom tlaka, parametar  $a$  se procjenjuje pri  $p = p_{wf}$  ( $t = 0,1$  hr). Za pripadajuće testove porasta tlaka, parametar  $a$  se procjenjuje pri  $p = p_{ws}$  ( $\Delta t = 10$  hr). Stoga su razvijene sljedeće jednadžbe:

- za protočni test s velikim padom tlaka:

$$k_o = \frac{0,366q_o p_{0,1hr} (\mu_o B_o)_{p_{0,1hr}}}{m h} \quad (4-36)$$

- za test porasta tlaka:

$$k_o = \frac{0,366q_o p_{10hr} (\mu_o B_o)_{p_{10hr}}}{m h} \quad (4-37)$$

Efektivna propusnost za plin se računa koristeći vrijednost proizvodnog  $GOR$ -a, prema sljedećoj formuli:

$$k_g = (GOR - R_s) \frac{\mu_g B_g}{\mu_o B_o} k_o \quad (4-38)$$

Za test pada tlaka *GOR* je veći u bušotini na razini ležišta nego u samom ležištu na većoj udaljenosti od bušotine. Kako bi se smanjilo ovo povećanje, sva PVT svojstva se računaju pri početnom tlaku. Za test porasta tlaka se koristi proizvodni *GOR* prije zatvaranja bušotine, a PVT svojstva računata pri srednjem ležišnom tlaku.

Skin faktor za test porasta tlaka računa se prema sljedećoj formuli:

$$s = 1,1513 \left[ \left( \frac{p_{1hr}^2 - p_{wf}^2(\Delta t = 0, 0)}{m} \right) - \log \left( \frac{\lambda_t}{\phi c_t r_w^2} \right) - 3,91 \right] \quad (4-39)$$

#### 4.4 Metoda prema autorima Kamal i Pan

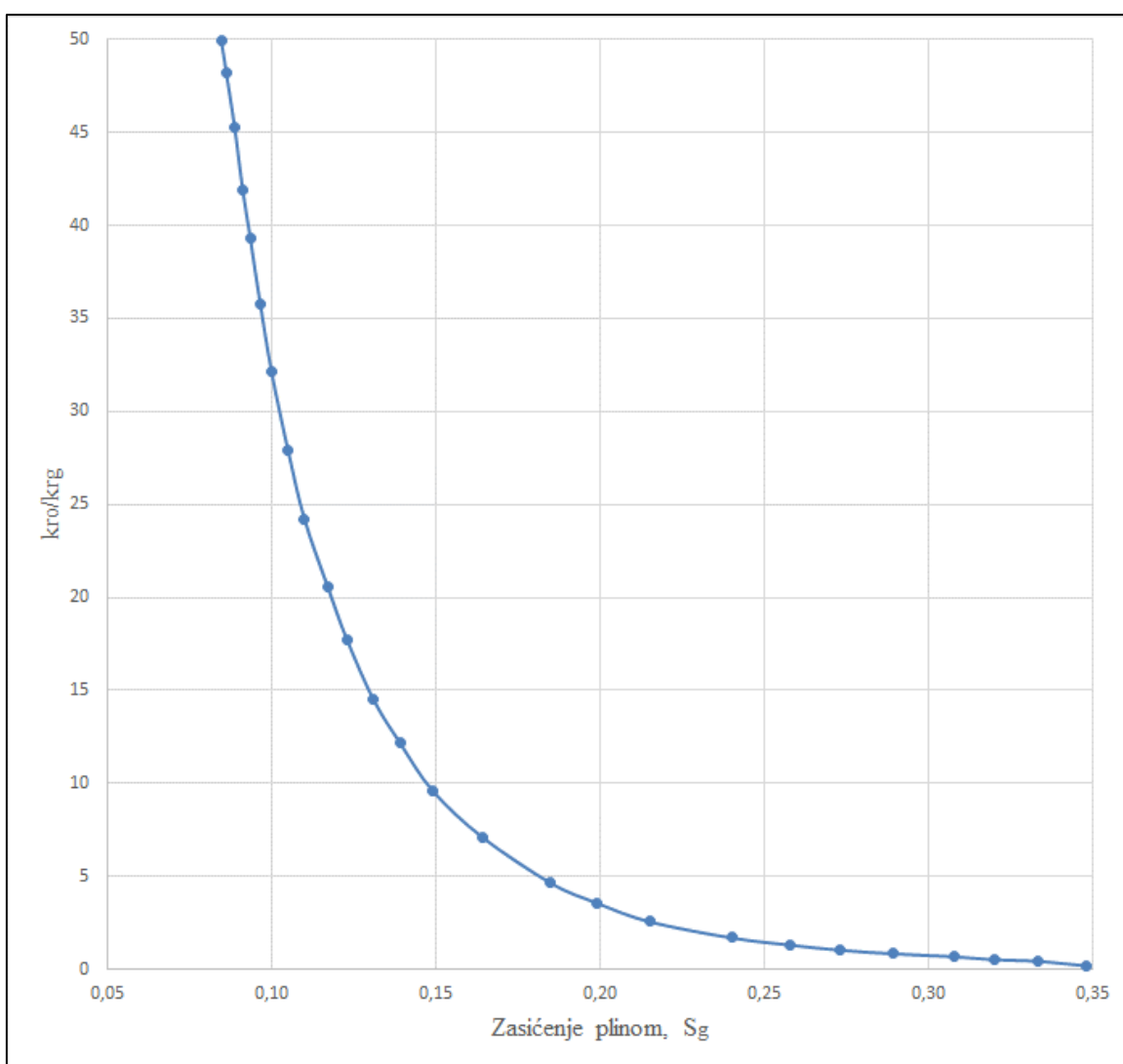
Danas se većina predviđanja promjena u ležištu, kao i prognoziranje proizvodnje bušotine radi numeričkim simulacijskim modelima. Za te modele se koristeći vrijednost apsolutne propusnosti i omjera relativnih propusnosti računaju efektivne propusnosti za pojedinu fazu i njihovi protoci. Iz razloga što ukupna mobilnost ili efektivna propusnost za neku fazu nisu prikladni za unos u numeričke modele, Medhat M. Kamal i Yan Pan su 2011. godine objavili pristup koji za rezultat daje apsolutnu propusnost. Za dobivanje apsolutne propusnosti se koriste isti podaci o relativnim propusnostima kao i u numeričkoj simulaciji. Dan je postupak za dvofazni protok nafte i plina u ležištu. Isto vrijedi i za slučaj nafte i vode, samo u formulama treba plin zamijeniti vodom (Kamal i Pan, 2011):

1. Prikupljanje podataka. Potrebno je dizajnirati i provesti test neustaljenog protjecanja, mjereći pritom obujamske protoke nafte i plina.
2. Izračunati efektivne propusnosti protočnih faza iz testa. Na primjer, ako se razmatra sustav nafta-plin i interpretiran je neograničeni radijalni režim protoka na polulogaritamskom grafu, tada se efektivne propusnosti računaju prema sljedećim jednadžbama:

$$k_o = \frac{0,183q_o B_o \mu_o}{mh} \quad (4-40)$$

$$k_g = \frac{0,183q_g B_g \mu_g}{mh} \quad (4-41)$$

3. Izračunati omjer efektivnih propusnosti dviju faza. Taj omjer se može izračunati koristeći vrijednosti dobivene u 2. koraku, a on ima istu vrijednost kao i omjer relativnih propusnosti za te dvije faze.  $k_{ro}/k_{rg} = k_o/k_g$
4. Izračunati i prikazati grafički omjer relativnih propusnosti i zasićenja. U ovom pristupu podaci o relativnim propusnostima su poznati. Te podatke se može dobiti iz laboratorijskih mjerenja, empirijskih modela ili kao rezultat procesa 'mečiranja' (preklapanja). Ovi podaci bi trebali biti isti kao podaci koji se koriste za numeričko simuliranje. Iz poznatih krivulja relativnih propusnosti, može se grafički prikazati omjer  $k_{ro}/k_{rg}$  kao funkcija zasićenja (slika 4-7.).



**Slika 4-7.** Omjer propusnosti nafte i plina u funkciji zasićenja plinom



5. Koristeći vrijednost  $k_o/k_g$  dobivenu iz analize testa bušotine i slike 5-1., može se procijeniti prosječno zasićenje plinom (ili naftom) u području ležišta koje je ispitivano.
6. Koristeći vrijednost zasićenja dominantne faze iz koraka 5 i grafa relativnih propusnosti može se izračunati relativna propusnost za tu fazu i apsolutna propusnost koristeći formule:

$$k = \frac{k_g}{k_{rg}} \text{ ili } k = \frac{k_o}{k_{ro}} \quad (4-42)$$

Opisanu metodu su Kamal i Pan potvrdili koristeći podatke sa stvarnog proizvodnog naftnog polja Petronius smještenog u Meksičkom zaljevu. Korišteni su podaci sa bušotine A09 koja je opremljena stalnim dubinskim manometrom. Između više testova porasta tlaka sa utvrđenim radijalnim režimom protjecanja, odabrana su dva, i to test br.3 (prije listopada 2006.) za period kada je u ležištu postojao jednofazni protok, te test br.22 (siječanj 2008.), kada su postojali uvjeti dvofaznog protoka. Prethodno pojašnjenim postupkom za analizu testa pri dvofaznom protoku dobiveni su rezultati koji pokazuju da je apsolutna propusnost izračunata iz podataka testa br.22 (kada je tlak u ležištu bio niži od tlaka zasićenja) ista kao i apsolutna propusnost dobivena klasičnom analizom testa porasta tlaka za jednofazni protok. Rezultati su dani u tablici.

**Tablica 4-1.** Rezultati testova porasta tlaka polja Petronius (Kamal i Pan, 2011)

	Test porasta tlaka br.22(Sij. 2008.)			Test porasta tlaka br. 3 (Tra. 2006)
	kef, md	kr	k, md	k, md
Nafta	73,6	0,56	130	130
Plin	2,44			
ko/kg	30,2			
Sg	0,11			0

## 5. Usporedba pojedinih metoda na primjeru ležišnog modela

### 5.1. Ležišni simulator Eclipse

Simulacija ležišta, kao i računanje materijalnog uravnoteženja, je oblik numeričkog modeliranja koji se koristi kako bi se kvantificiralo i interpretiralo fizikalne pojave s mogućnošću predviđanja ponašanja istih u budućnosti. U ležišnoj simulaciji se ležište dijeli na određen broj jediničnih ćelija u tri dimenzije i modelira se promjena svojstava ležišta i ležišnih fluida s obzirom na promjenu prostora i protoka vremena u seriji odvojenih koraka. Kao i u jednadžbi materijalnog uravnoteženja ukupna masa sustava ostaje nepromijenjena. Ležišnu simulaciju se može promatrati kao ekvivalent sustava višestrukih modela materijalnog uravnoteženja (Eclipse 100 User Course, 1999). Eclipse simulator se sastoji od dva zasebna simulatora: Eclipse 100 specijaliziranog za modeliranje s fluidom za koji se koriste tablični podaci (eng. *black oil model*) i Eclipse 300 specijaliziranog za komponentno modeliranje. U ovom radu koristi se Eclipse 100 simulator koji tlakove i zasićenja u svakoj ćeliji računa implicitno, tj. rješava sustav linearnih jednadžbi iterativnim postupkom. Model se sastoji od opisa ležišta i fluida, definiranih početnih uvjeta, opisa bušotine i poznatih podataka proizvodnje. Ti podaci su upisani u ulaznu tekstualnu datoteku koja također sadrži ključne riječi s kojima se određuje način rada simulatora.

### 5.2. Program za analizu testa porasta tlaka Saphir

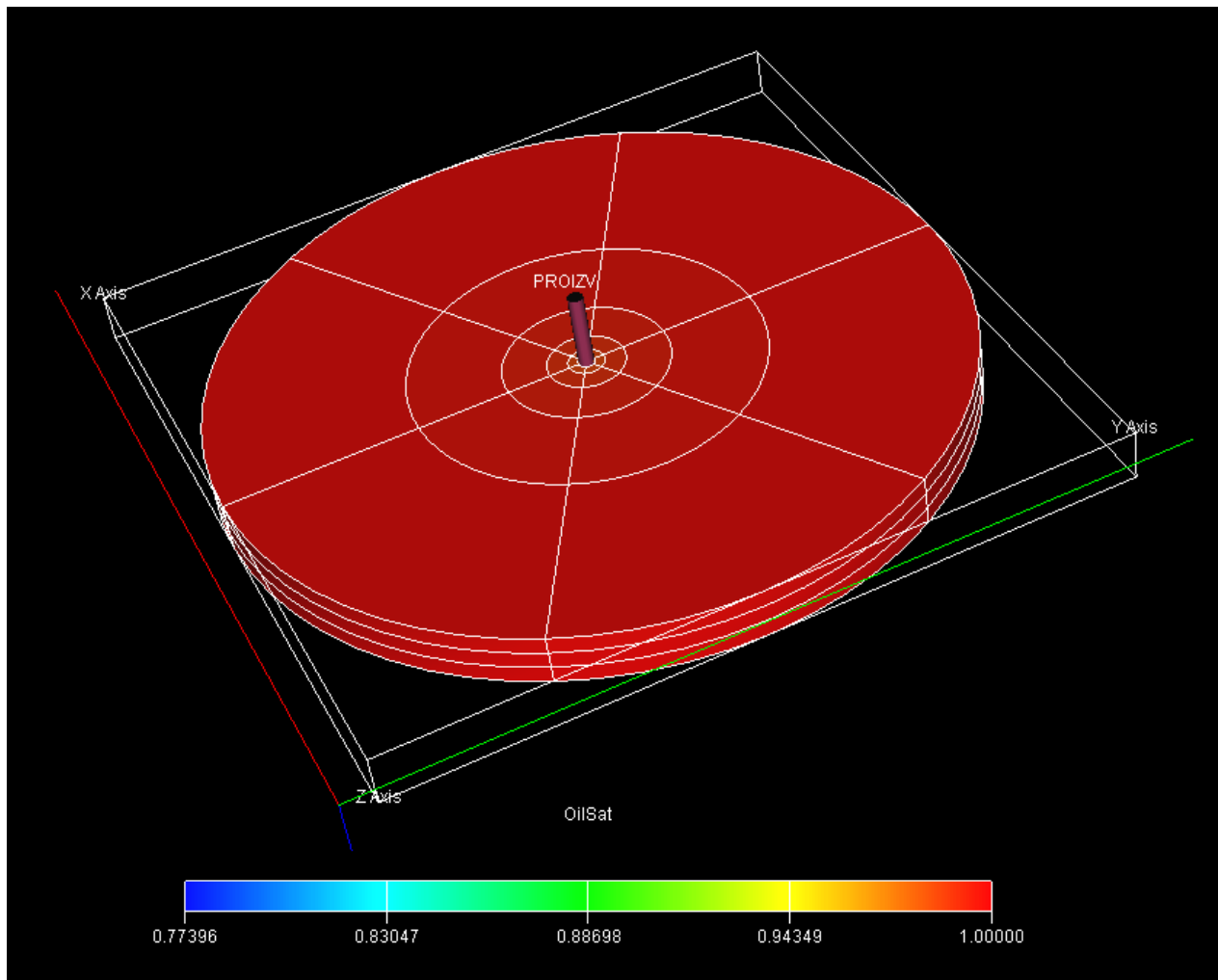
Ecrin Saphir je program tvrtke Kappa koji se koristi za analizu rezultata testa porasta tlaka, a primjenjuju ga mnoge naftne i servisne kompanije u svijetu. Njegovo jednostavno sučelje i korištenje omogućava relativno brzo osposobljavanje korisnika. Program nudi kombinaciju alata za analizu porasta tlaka putem analitičkih i numeričkih modela koje se može koristiti i povezati s drugim Ecrin programima kao što su Topaze ili Rubis. U program se unose poznati podaci, te se različiti primjeri bušotina i ležišta mogu kombinirati kako bi se simuliralo širok spektar ležišnih modela. Osim toga mogu se unositi vrijednosti skina ovisnog o protoku, efekt skladištenja bušotine, utjecaj drugih bušotina i dr. Odabrani modeli se mogu usklađivati sa stvarnim tj. ulaznim podacima korištenjem opcije *Improve* (iterativni postupak usklađivanja mjerenih i modeliranih podataka).

### 5.3. Analiza rezultata na primjeru ležišnog modela

Za usporedbu prethodno objašnjena četiri pristupa za analizu testa porasta tlaka za višefazni protok nafte i plina bilo je potrebno izraditi simulacijski model ležišta. Nakon toga su podaci dobiveni iz ležišnog simulatora ECLIPSE korišteni za pridobivanje propusnosti i skina u programu Ecrin 4.20 Saphir (sveučilišna licenca #9643) i analitičkim putem korištenjem prethodno objašnjenih pristupa. Izrađeno je ležište cilindričnog oblika s unutarnjim polumjerom 0,0762 m i vanjskim polumjerom 150 m. Debljina ležišta je 21 m. Ležište je podijeljeno na 180 ćelija, po 60 ćelija u tri sloja debljine 7 m (slika 5-1.). Krovina ležišta se nalazi na dubini 2000 m a podina na dubini 2021 m. U ležištu se tijekom proizvodnje nalaze nafta i plin. Za proračun PVT podataka se koristio program PVTCalculator ([www.pengtools.com](http://www.pengtools.com)). Na početku proizvodnje ležišni tlak je jednak tlaku zasićenja od 104,93 bar te je zasićenje naftom  $S_o=1$ . Za prvi model, bez skina, propusnost u smjeru radijusa i u smjeru kazaljke na satu (po porastu kuta) je zadana 15 md, a po z osi 3 md. Za drugi model, koji sadrži skin, propusnosti su iste kao i za prvi model osim što je u 18 ćelija koje su najbliže bušotini propusnost izmijenjena u 0,11585 md što predstavlja skin 9,438 između radijusa bušotine (0,0762m) i radijusa skina (0,1627m). Šupljikavost ležišta je 12%. Relativne propusnosti nafte i plina su uzete iz Raghavan (1976). Gustoća nafte je 800 kg/m<sup>3</sup>, vode 999 kg/m<sup>3</sup> i plina 0,86 kg/m<sup>3</sup>. Stlačivost ležišne stijene je izračunata prema formuli iz Ahmed (2010):

$$c_f = \frac{0,258}{\phi^{0,438}} \times 10^{-9} \quad (5-1)$$

Za šupljikavost od 12% stlačivost iznosi 6,53E-5 bar<sup>-1</sup> pri tlaku od 1,0132 bar. Bušotina promjera 0,1524 m smještena je u središtu ležišta i u kontaktu je s ležištem u sva tri sloja. U bušotini se nalazi proizvodni tubing unutarnjeg promjera 0,062 m, a koristi se u računanju volumena za efekt skladištenja bušotine. Bušotina u oba slučaja proizvodi 50 m<sup>3</sup> nafte na dan i zatvara se poslije 231 dana proizvodnje te se statički tlakovi na dnu bušotine koriste za analizu testa porasta tlaka. Prosječno zasićenje ležišta plinom u trenutku zatvaranja bušotine je bilo  $S_g = 10,2 \%$ . U programu FloViz, koji se nalazi u paketu programa uz Eclipse, mogu se grafički prikazati svojstva simuliranog ležišta kao i sam njegov oblik. Na slici 5-1. je prikazano početno zasićenje ležišta naftom s proizvodnom bušotinom 'PROIZV' u centru ležišta.



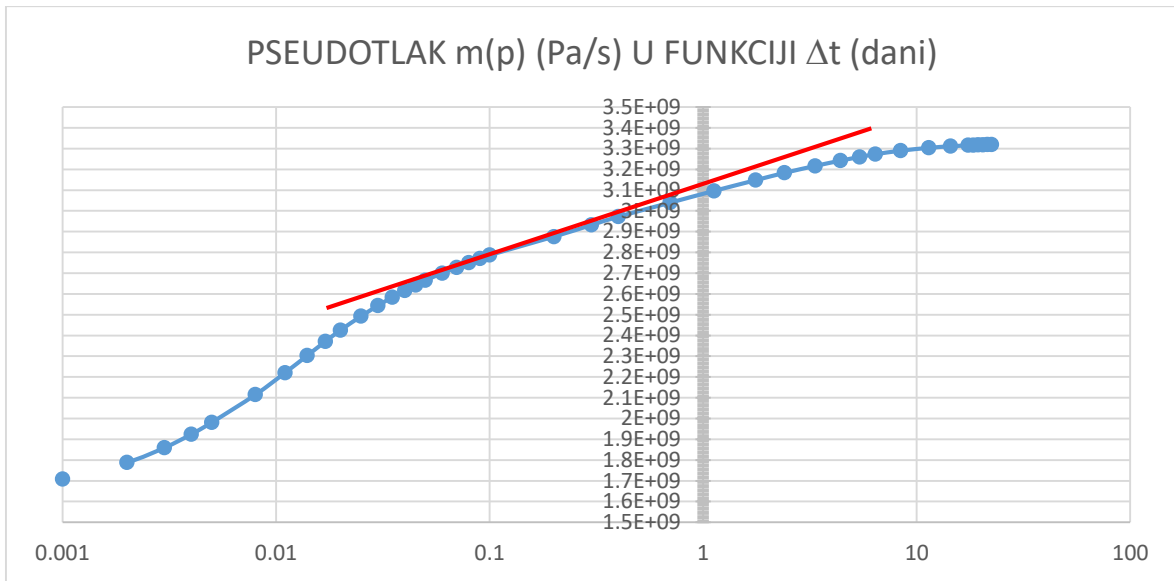
**Slika 5-1.** Grafički prikaz modela ležišta s bušotinom u sredini

S obzirom da su izlazni podaci programa Eclipse100 za navedene ulazne podatke u obliku tablica s više od sto redaka, u radu ih se nije moglo sve prikazati. Stoga su u tablicama za slučaj simuliranog ležišnog modela bez skina i sa skinom (tablice 5-2 i 5-3), dani samo rezultati za sve četiri opisane metode, a koje se temelje na podacima simuliranih testova porasta tlaka. Simulirani podaci testa porasta tlaka za slučaj da bušotina nema skina prebačeni su iz programa Eclipse100 u program Excel i nalaze se u sljedećoj tablici 5-1:

**Tablica 5-1.** Simulirani test porasta tlaka za ležišni model bez skina

$\Delta t$	$\Delta t+t_0$	$P_{ws}$
dani	dani	bar
0	231	54,769140
0,001	231,001	56,26497
0,002	231,002	57,57701
0,003	231,003	58,74215
0,004	231,004	59,77948
0,005	231,005	60,70911
0,008	231,008	62,8197
0,011	231,011	64,45787
0,014	231,014	65,74561
0,017	231,017	66,76987
0,02	231,02	67,59519
0,025	231,025	68,6057
0,03	231,03	69,37173
0,035	231,035	69,96757
0,04	231,04	70,44498
0,045	231,045	70,83784
0,05	231,05	71,1678
0,06	231,06	71,6721
0,07	231,07	72,07427
0,08	231,08	72,40799
0,09	231,09	72,69198
0,1	231,1	72,93848
0,2	231,2	74,21635
0,3	231,3	75,01868
0,4	231,4	75,58177
0,7	231,7	76,53795
1,1224	232,1224	77,33243
1,7612	232,7612	78,05437
2,4	233,4	78,54192
3,3436	234,3436	79,00686
4,4	235,4	79,35975
5,4	236,4	79,60268
6,4	237,4	79,78532
8,4	239,4	80,01849
11,4	242,4	80,20741
14,4	245,4	80,31203
17,4	248,4	80,37018
18,4	249,4	80,38548
19,4	250,4	80,39758
20,4	251,4	80,40714
21,4	252,4	80,4147
22,4	253,4	80,4207

Za primjer proračuna dobivenih rezultata u tablici 5-2, u slučaju ležišnog modela bez skina, ovdje je radi ilustracije odabrana metoda pseudotlakova prema Raghavanu. Na slici 5-2 prikazan je dijagram, gdje je pseudotlak,  $m(p)$ , izračunat prema podacima simuliranog testa porasta tlaka i dan je u ovisnosti o vremenu testa porasta tlaka,  $\Delta t$ .



**Slika 5-2:** Ovisnost pseudotlaka i vremena testa porasta tlaka

Iz dijagrama je određen nagib pravca  $m$ , koji iznosi  $3,1E8$  Pa/s, odakle je prema formuli 5-2 (Raghavan, 1976), izračunata vrijednost propusnosti,  $k$ , u iznosu od 16,48 md, koja se kao jedan od zajednički prikazanih rezultata svih obrađenih metoda nalazi u tablici 5-2.

$$k = (0,183 \cdot q) / (h \cdot m) = (0,183 \cdot 50) / (86400 \cdot 21 \cdot 3,1E8) = 16,48E-14 \text{ m}^2 = 16,48 \text{ md} \quad (5-2)$$

Za razliku od zadane vrijednosti apsolutne propusnosti ležišne stijene od 15 md, na osnovu koje je izrađen simulacijski model, a zatim dobiveni i podaci simuliranog testa porasta tlaka, vrijednost propusnosti od 16,48 md, određena metodom pseudotlakova iz podataka istog simuliranog testa, daje određeno odstupanje. Kao što će kasnije biti analizirano, u usporedbi s rezultatima ostalih metoda, ovo odstupanje za model ležišta bez skina se može uzeti kao relativno prihvatljiv rezultat, jer se u praksi približno točna vrijednost propusnosti stijene uvijek temelji na provođenju različitih metoda i na usporedbi dobivenih rezultata.

U programu Saphir najprije su uneseni poznati podaci o bušotini i ležištu (polumjer bušotine, debljina ležišta, PVT podaci, krivulje relativnih propusnosti i dr.), što je prikazano na slici 5-3.

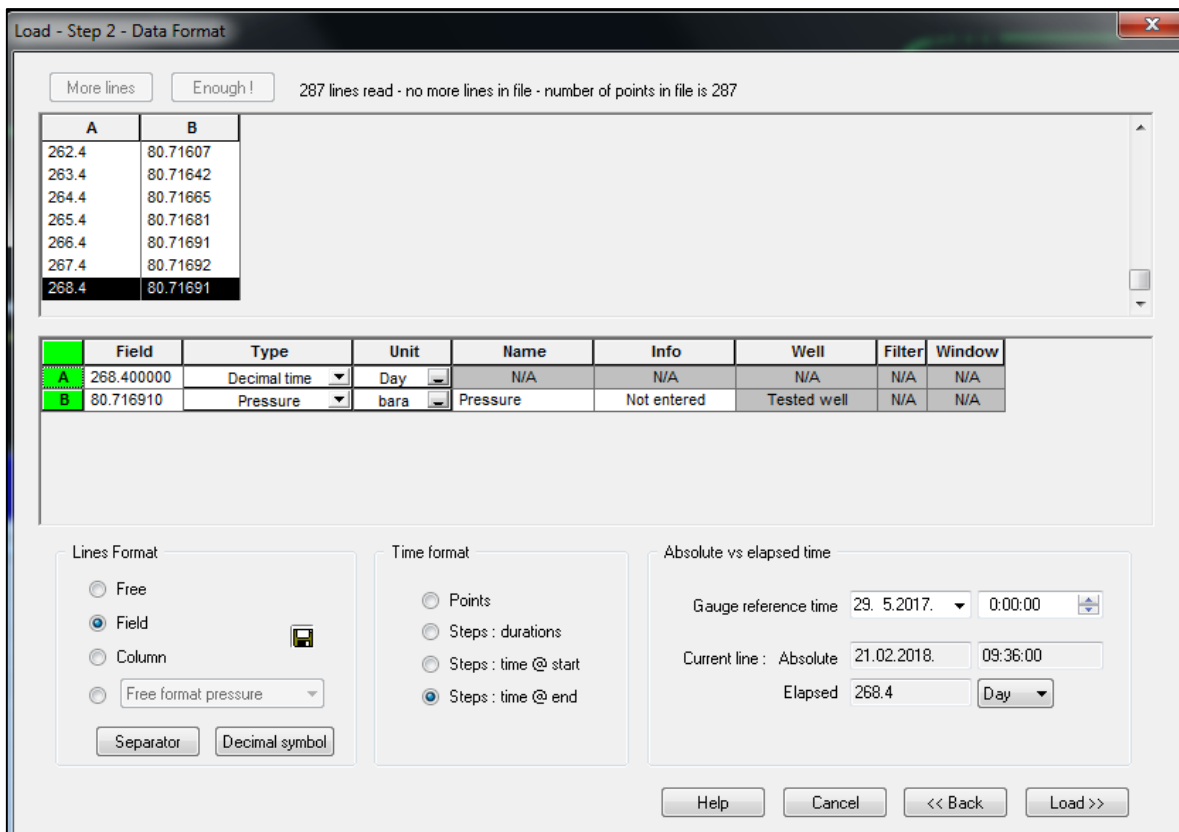
The screenshot shows the 'Main options' dialog box in the Saphir software. The dialog is titled 'New document - page 1/3 - Main options' and has tabs for 'Main options', 'Information', 'Units', and 'Comments'. The 'Main options' tab is active. It is divided into four sections:

- Test type:** Radio buttons for 'Standard' (selected) and 'Interference'.
- Fluid type:** 'Reference phase' dropdown set to 'Oil'. 'Available rates' checkboxes for 'Oil' (checked), 'Gas' (checked), and 'Water' (unchecked).
- Reference time (t=0):** Date field set to '29. 5.2017.' and time field set to '0:00:00'.
- Start with analysis:** Radio buttons for 'Standard' (selected), 'NonLinear' (with sub-options 'shale gas' and 'coalbed methane' unchecked), 'Multi-Layer', 'Formation Test', and 'Slug-Pulse'.

At the bottom are buttons for 'Help', '<< Back', 'Next >>', and 'Cancel'.

**Slika 5-3.** Ulazni podaci o bušotini i ležištu (program Saphir)

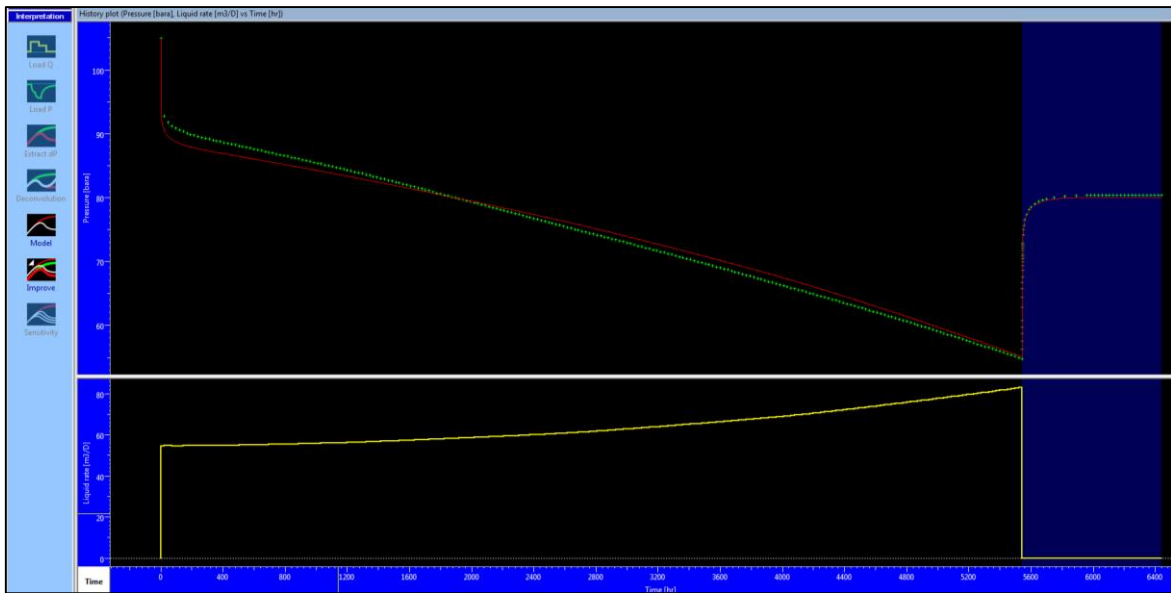
Zatim se unose podaci dobiveni iz ležišnog simulatora: protok nafte i plina, te tlakovi u poznatom vremenu (slika 5-4.).



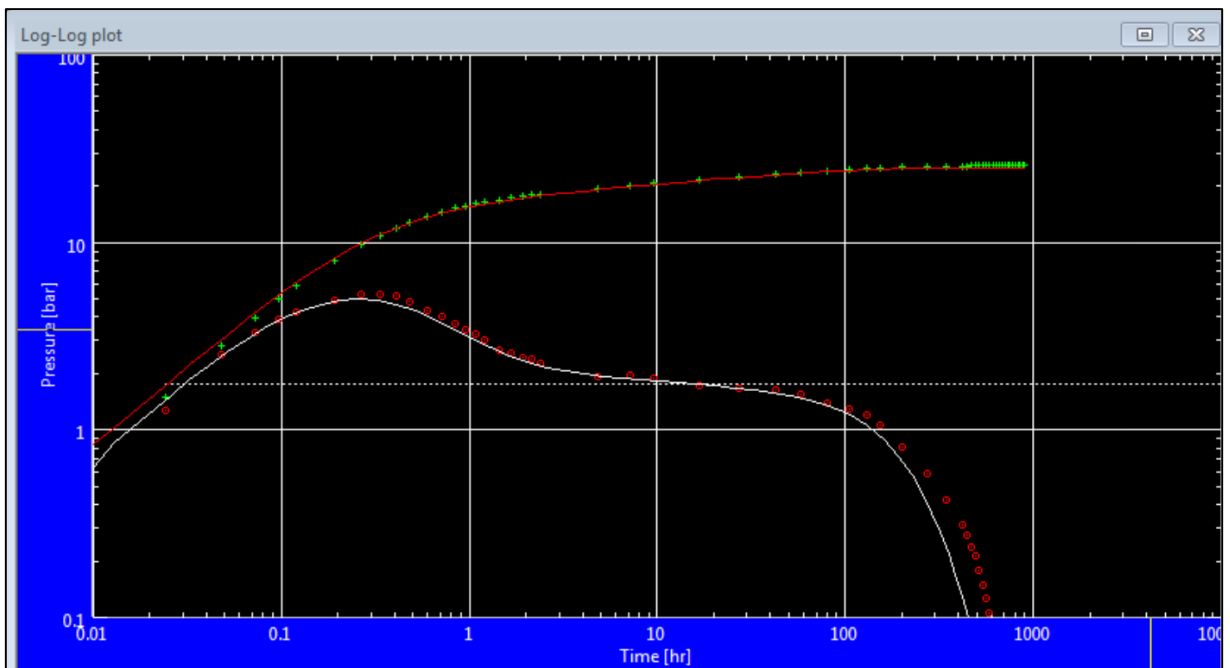
**Slika 5-4.** Protok i tlak u odnosu na vrijeme (rezultat simuliranog testa porasta tlaka)

Nakon toga može se odabrati standardni model (Perrine za slučaj kada su prisutni nafta i plin) ili nelinearna analiza. Za slučaj bez skina prvo je odabran standardni model te je najbolje poklapanje simuliranih i stvarnih podataka dobiveno za model ležišta radijalnog oblika s zatvorenom vanjskom granicom i zadanim skladišnim volumenom bušotine od 0,0585 m<sup>3</sup>/bar. Ulazni podaci za jedan model prikazuju se dijagramima: 'History plot' (slika 5-5.), 'log-log dijagram' (slika 5-6.) i 'polulogaritamski' dijagram (slika 5-7.). Naknadno je moguće prikazati Hornerov dijagram, MDH dijagram i dr.

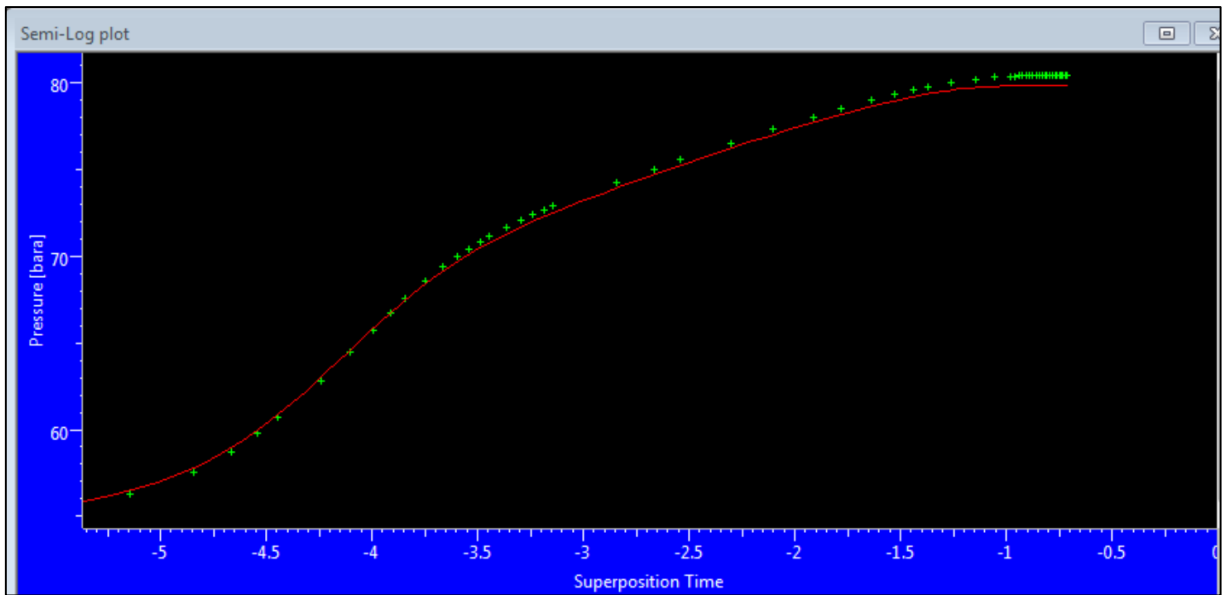




**Slika 5-5.** Poklapanje krivulje tlaka iz simuliranog testa u programu Eclipse (zeleno) i mečiranog tlaka (crveno)

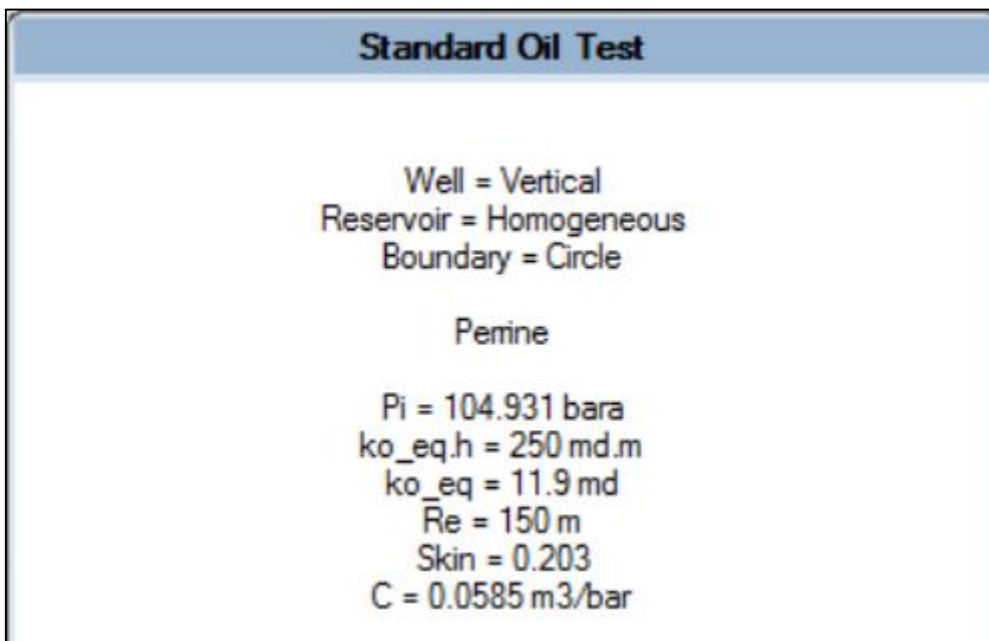


**Slika 5-6.** Poklapanje log-log dijagrama stvarnih podataka (zelene i crvene točke) i podataka standardnog modela (crvena i bijela linija)



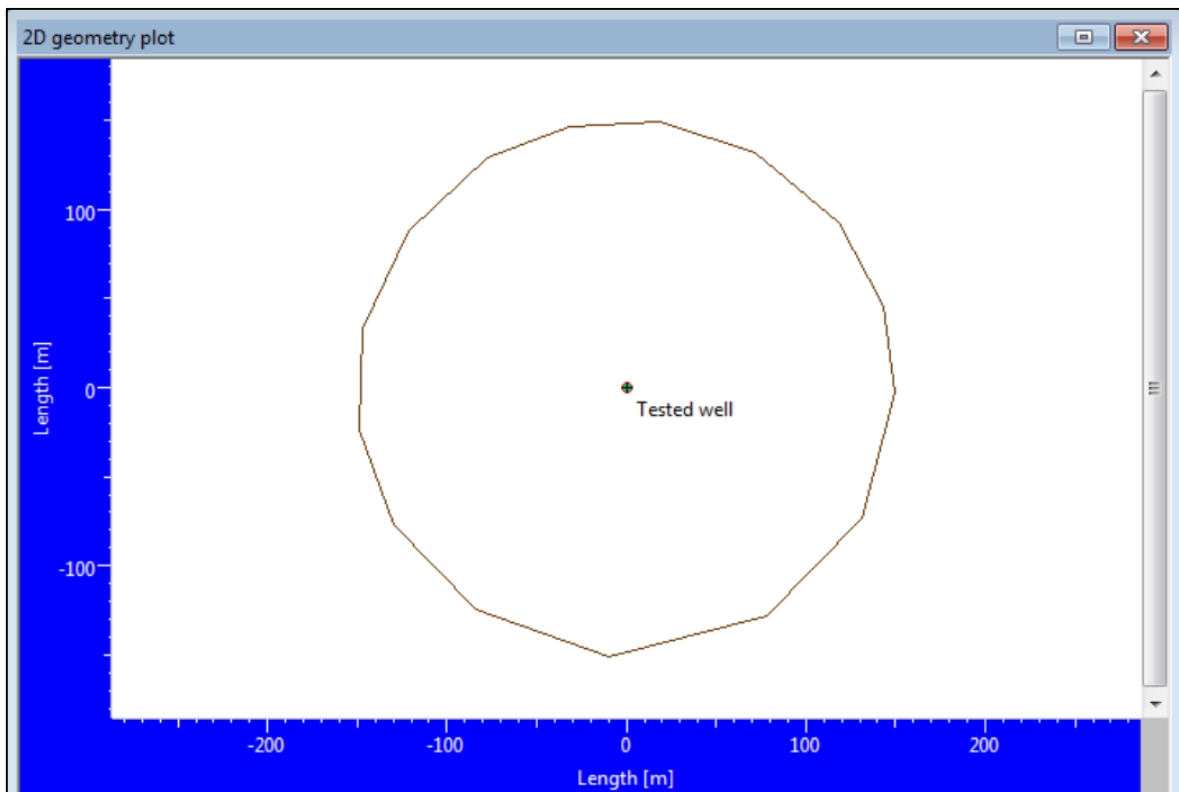
**Slika 5-7.** Poklapanje podataka u polulogaritamskom mjerilu

Niti u jednoj od provedenih analiza nije korištena opcija *Improve* jer takva opcija mijenja poznate parametre (početni tlak i radijus crpljenja bušotine) te su ti parametri imali prevelika odstupanja od podataka ulaznog modela. Iz tog razloga takvi slučajevi nisu vjerodostojan prikaz ulaznog modela i ova opcija se nije koristila već su parametri mijenjani ručno kako bi se dobilo što bolje poklapanje. Program prikazuje rezultate u posebnom prozoru (slika 5-8.).



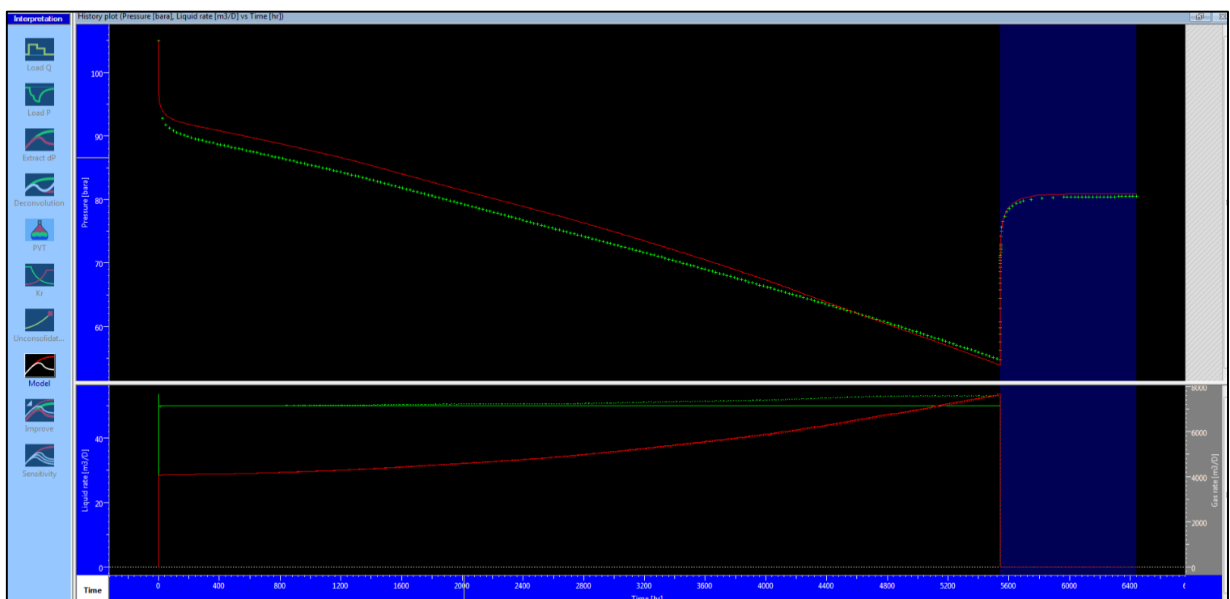
**Slika 5-8.** Prikaz rezultata standardnog testa

Na isti način je za iste podatke napravljena analiza nelinearnog modela. Razlika s obzirom na linearnu je što se ovdje unose i krivulje relativnih propusnosti, te se za model ne može birati oblik ležišta već je oblik trebalo nacrtati (slika 5-9.)



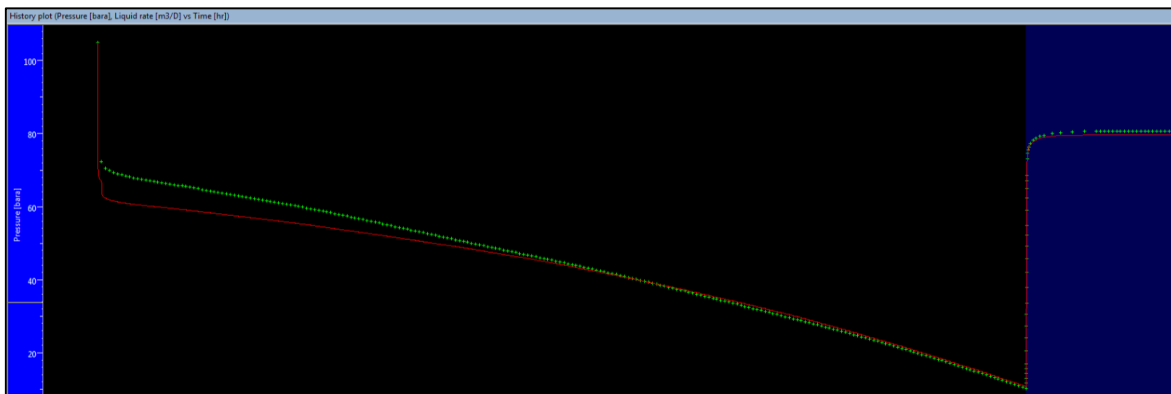
**Slika 5-9.** Ležište cilindričnog oblika polumjera  $r=150$  m

I u ovom slučaju je dobiveno dobro poklapanje na dijagramu *history plot* (slika 5-10.). Rezultati ove i ostalih analiza prikazani su u tablici 5-2 zajedno s ostalim rezultatima.



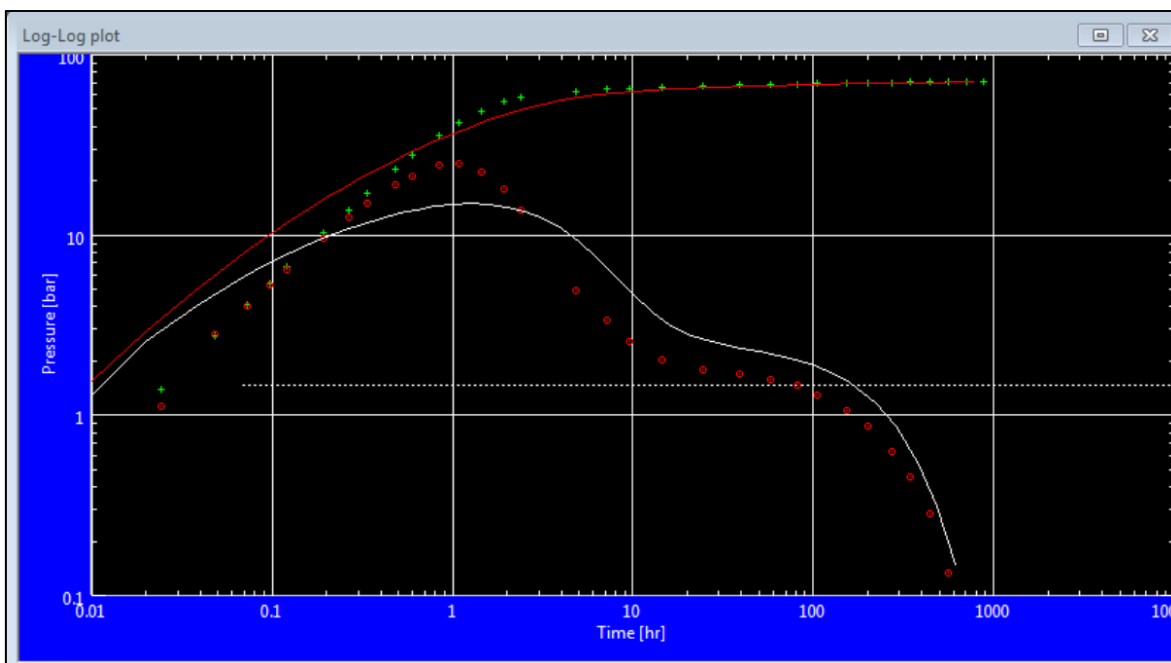
**Slika 5-10.** Poklapanje tlaka i protoka stvarnih podataka s nelinearnim testom bez skina

Kao standardni model je analizirano i ležište sa zadanim skinom ( $s=9,438$ ). Također je odabran model ležišta cilindričnog oblika sa polumjerom 150 m, ali je ovdje nakon dugotrajnog modeliranja parametara skina najbolje poklapanje stvarnih podataka i rezultata iz Saphira dobiveno za skin  $s=12$  i skin koji se mijenja s protokom  $ds/dQ=0,03 \text{ m}^3/d$  (slika 5-11.). Bez uvođenja promjenjivog skina podudaranje rezultata nije bilo zadovoljavajuće.



**Slika 5-11.** Poklapanje ulaznih podataka o tlaku i tlaka iz analize

Zadnja je provedena analiza nelinearnog modela za ležište sa skinom. Za ovaj slučaj je bilo najteže odrediti parametre skina i  $k \cdot h$  te su različite kombinacije parametara (skin između 7,5 i 10) davale slične logaritamske i polulogaritamske dijagrame. Kao najbolji, iako bez visokog stupnja podudarnosti rezultata (slika 5-12.), odabran je model sa skinom  $s=7,5$ .



**Slika 5-12.** Podudaranje podataka za nelinearni model sa skinom

Rezultati svih analiza (četiri pristupa korištenjem programa Excel i rezultati iz programa Ecrin) prikazani su u tablicama 5-2. i 5-3.

**Tablica 5-2.** Rezultati analize testa porasta tlaka za simulacijski model bez skina

MODEL BEZ SKINA				
	k, md	ko, md	kg, md	s
Ulazni podaci:	15			0
Rezultati metoda:				
1. metoda - Perrine (1956)		7,46983	0,22812	8,08296
2. metoda - Raghavan (1976)	16,483254			
3. metoda - Al-Khalifah (1987)		7,77479	0,17424	-1,0942
4. metoda - Kamal i Pan (2011)	16,144004			
Rezultati programa Saphir:				
standardni model (Perrine)	11,9			0,2
nelinearan model	16,7			0

**Tablica 5-3.** Rezultati analize testa porasta tlaka za simulacijski model sa skinom

MODEL SA SKINOM				
	k, md	ko, md	kg, md	s
Ulazni podaci:	15			9,44
Rezultati metoda:				
1. metoda - Perrine (1956)		8,47958	0,26017	9,10351
2. metoda - Raghavan (1976)	19,311447			
3. metoda - Al-Khalifah (1987)		8,35472	0,18821	0,27299
4. metoda - Kamal i Pan (2011)	16,97752			
Rezultati programa Saphir:				
standardni model (Perrine)	13,8			12
nelinearan model	14,3			7,5

Iz priloženih tablica može se zaključiti da najvjerodostojnije podatke daje program Saphir i to za slučaj koji najviše odgovara realnim ležišnim uvjetima, gdje je pribušotinska zona uvijek smanjene propusnosti radi oštećenja tj. skin efekta. Niti u jednom od četiri slučaja računata prema opisanim metodama za ležište sa skinom nisu dobiveni odgovarajući rezultati za propusnost. Upravo zato što se ove metode mogu primijeniti za ležišta s bušotinom bez skina, razvijen je softver za točnije određivanje propusnosti i skina. U

ležišnom modelu bez skina za apsolutne propusnosti najbolje rezultate daje metoda Kamala i Pana, što je i logično jer su dobivene korištenjem efektivnih propusnosti dobivenih drugim metodama i relativnim krivuljama identičnima onima koje koristi ležišni simulator Eclipse. Može se primijetiti da za slučaj standardnog modela (Perrine) program daje niže vrijednosti apsolutne propusnosti. Naime, Perrineov pristup umanjuje efektivne fazne mobilnosti, a precjenjuje skin. S povećanjem zasićenja plinom rezultati Perrineovog pristupa su sve manje pouzdani (Al-Khalifah et. al. 1987). Vidljivo je također da nelinearni model daje bolje rezultate i za slučaj bez skina i za skin, te je stoga preporučljivo koristiti nelinearni model. Modeliranjem je u slučaju oštećene bušotine za najbolju vrijednost postignut skin od 7,5, što bi odgovaralo prosječnoj propusnosti u ležištu od 14,3 md.

## 6. Zaključak

Test porasta tlaka i analiza rezultata mjerenja dobivena opisanim metodama jedan je od najvažnijih izvora podataka za izradu kvalitetnog i vjerodostojnog ležišnog modela za ležišni simulator Eclipse. Za ležišta gdje tlak brzo padne ispod tlaka zasićenja i za druge slučajeve gdje provođenje hidrodinamičkih testova nije moguće u uvjetima jednofaznog protjecanja fluida u ležištu, potrebno je koristiti pristupe za višefazno protjecanje fluida u ležištu. Za takav slučaj gdje je početni tlak  $p_i$  jednak tlaku zasićenja  $p_b$  dana su rješenja dobivena za četiri različita pristupa pomoću programa Excel i za četiri modela u programu Saphir. Pristupi u kojima se računa apsolutna propusnost (Raghavan, Kamal i Pan, i Saphir) daju poprilično dobre rezultate u usporedbi s očekivanim podacima modela, uz pretpostavku da bušotina nema skina.

U odnosu na sve opisane modele pristup iz Al-Khalifah et. al. daje jako loše rezultate za skin, stoga bi trebalo istražiti uzrok tako loših rezultata, te provjeriti isti pristup na još nekoliko različitih modela ležišta i ležišnih fluida.

Ako se koristi program za analizu testa porasta tlaka za višefazni protok fluida u ležištu tada bi prednost trebalo dati nelinearnom modelu. To znači da za nelinearni model i za slučaj sa skinom i bez skina, program Saphir daje točniji izračun apsolutne propusnosti i skina nego što je dobiveno u primjerima standardnog modela.

## 7. Literatura

1. AHMED, T., 2010. Reservoir Engineering Handbook. 4. izdanje. Burlington, Massachusetts: Gulf Professional Publishing/Elsevier.
2. AL-KHALIFAH, A-J.A., AZIZ, K., HORNE, R.N., 1987. A New Approach to Multiphase Well Test Analysis. U: 62. Godišnja tehnička konferencija i izložba SPE, Dallas, 27-30.9.1987. Society of Petroleum Engineers.
3. BOURDAROT, G., 1998. Well testing: interpretation methods. Pariz: Institut Francais Du Petrole Publications.
4. ČIKEŠ, M., 2015. Proizvodno inženjerstvo nafte i plina. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet u Zagrebu.
5. EVINGER, H. H., MUSKAT, M., 1942. Calculation of theoretical Productivity Factor. U: Transactions of the AIME Vol.146. SPE-942126-G. Society of Petroleum Engineers, str. 126–139.
6. FETKOVICH, M, J., 1973. The Isochronal Testing of oil Wells. U: Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME, Las Vegas 30.9.-3.10.1973. Dallas: Society of Petroleum Engineers, 1973.
7. KAMAL, M. M., PAN, Y., 2011. Pressure transient testing under multiphase conditions. U: SPE Konferencija, Manama, Bahrein, 25-28.9.2011. Society of Petroleum Engineers, 2011.
8. LEE, J., 1982. Well Testing. New York: Society of Petroleum Engineers.
9. LEE, J., ROLLINS, J. B., SPIVEY, J.P., 2003. Pressure Transient Testing. Richardson, Texas: Society of Petroleum Engineers.
10. MATTHEWS, C. S., RUSSELL D. G., 1967. Pressure Buildup and Flow Tests in Wells. Dallas: Society of Petroleum Engineers.



11. PERRINE, R. L., 1956. Analysis of Pressure Build-up Curves Theoretical Foundation of Multiphase Pressure Buildup Analyses. U: Drilling and Production Practice, 1.1.1956. New York: American Petroleum Institute, 1956, str. 482–509.
12. RAGHAVAN, R., 1976. Well Test Analysis: Wells Producing by Solution Gas Drive. SPE Journal, 16(4), str. 196-208.
13. STEWART, G., 2011. Well Test Design and Analysis. I. izdanje. Tulsa: PennWell Corporation.
14. Eclipse 100 User Course. 1999. Schlumberger,  
URL:<http://www.fanarco.net/books/Eclipse100.pdf> (20.1.2017.)
15. Kappa engineering overview., URL:  
<https://www.kappaeng.com/software/saphir/overview> (25.4.2017.)
16. PVT Calculator., URL: <https://www.pengtools.com/frontend/web/pvtCalculator>  
(28.3.2017.)

## IZJAVA

Izjavlujem da sam ovaj diplomski rad samostalno izradio.

---

Dominik Grebenar