

Analiza testa porasta tlaka vertikalne bušotine primjenom programa Saphir

Jukić, Nikola

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:852059>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-06**



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 VERTIKALNE BUŠOTINE
PRIMJENOM PROGRAMA SAPHIR**

Diplomski rad

Nikola Jukić

N328

Zagreb, 2022.

ANALIZA TESTA PORASTA TLAKA VERTIKALNE BUŠOTINE PRIMJENOM
PROGRAMA SAPHIR

NIKOLA JUKIĆ

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

Sažetak

U radu je ukratko opisana teorija s osnovnim jednadžbama za analizu testova porasta tlaka, te je provedena analiza testa porasta tlaka vertikalne naftne bušotine, primjenom programa Saphir. Osnovni cilj je bio određivanje propusnosti stijene i skin faktora, a u svrhu dobivanja što pouzdanijih rezultata, analizirana su tri slučaja, ovisno o PVT svojstvima fluida. U 1. slučaju je pretpostavljeno da je fluid jednofazan, u drugom da je dvofazan i u trećem da je višefazan. Iako iz metode tzv. *log-log* dijagrama u sva tri slučaja nije dosegnut tzv. neograničeno djelujući radijus, jer nije došlo do potpunog preklapanja mjerenih i modeliranih krivulja, rezultati se prema opisima u diskusiji mogu uzeti s dovoljnom pouzdanošću. Najpouzdaniji rezultat dobiven je u 1. analizi, te je propusnost ležišne stijene određena u iznosu od 0,18 mD ($1,78 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$), a pripadajući skin faktor iznosi 3.7.

Ključne riječi: analiza testa porasta tlaka, propusnost stijene, skin faktor

Diplomski rad sadrži: 41 stranicu, 3 tablice, 19 slika, 20 referencu i 1 prilog

Jezik izvornika: hrvatski

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

Mentor: Dr. sc. Sonja Koščak Kolin, docentica RGN fakulteta

Ocjenjivači: : Dr. sc. Sonja Koščak Kolin, docentica RGN fakulteta
Dr. sc. Vladislav Brkić, izvanredni profesor RGN fakulteta
Dr. sc. Borivoje Pašić, izvanredni profesor RGN fakulteta

Datum obrane: 16.9.2022., Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet

PRESSURE BUILD-UP TEST ANALYSIS OF VERTICAL WELL IN PROGRAMME
SAPHIR

NIKOLA JUKIĆ

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

Abstract

The thesis briefly describes the theory with the basic equations for pressure build up test analysis. The analysis of the vertical oil well was performed using the Saphir program. The main objective was to determine the permeability of the rock and the skin factor. In order to obtain the most reliable results, three cases were analysed, depending on the PVT properties of the fluid. In the first case it was assumed that the fluid is single-phase, in the second case it is two-phase and in the third case it is multiphase. Although from the so-called method of log-log diagram in all three cases the so-called transient period was not achieved, because there was no complete overlap of the measured and modelled curves, the results can be taken with sufficient accuracy according to the descriptions in the discussion. The most reliable result was obtained in the first analysis. The permeability of the rock was determined to be 0.18 mD ($1,78 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$), and the corresponding skin factor is 3.7.

Keywords: Pressure build-up test analysis, skin effect, rock permeability

Thesis contains: 41 pages, 3 table, 19 figures, 20 references and 1 appendix

Original in: Croatian

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

Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Assistant Professor Sonja Koščak Kolin, PhD

Reviewers: Assistant Professor Sonja Koščak Kolin, PhD
Associate Professor Vladislav Brkić, PhD
Associate Professor Borivoje Pašić, PhD

Date of defense: September 16., University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA	II
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA	III
POPIS KORIŠTENIH KRATICA	V
1. UVOD	1
2. ANALIZA TLAKA U VERTIKALNOJ BUŠOTINI	3
2.1. Model radijalnog protoka u ležištu	3
2.1.1. Model neograničenog ležišta	4
2.1.2. Model ograničenog ležišta sa zatvorenom vanjskom granicom	8
2.1.3. Model ograničenog ležišta s konstantnim tlakom na vanjskoj granici	10
2.2. Test porasta tlaka u vertikalnoj bušotini	11
2.2.1. Metoda polulogaritamskog prikaza tlaka u funkciji vremena	14
2.2.2. Metoda tipskih krivulja	16
2.2.3. Metoda derivacije tlaka	18
3. OSNOVNI PODACI O LEŽIŠTU I BUŠOTINI	20
3.1. Geološke karakteristike ležišta	20
3.2. Tehničke karakteristike bušotine	21
4. ANALIZA TESTA PORASTA TLAKA NAFTNE BUŠOTINE	23
4.1. Uvod u program Saphir i ulazni podaci	23
4.2. Primjer analize testa porasta tlaka za jednofazni fluid	30
4.3. Primjer analize testa porasta tlaka za dvofazni fluid	31
4.4. Primjer analize testa porasta tlaka za višefazni fluid	33
5. DISKUSIJA REZULTATA	35
6. ZAKLJUČAK	37
7. LITERATURA	38
PRILOG	40

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Neograničeno ležište.....	4
Slika 2-2. Tipske krivulje za ograničeni radijalni sustav sa zatvorenom vanjskom granicom i konstantnim protokom na unutarnjoj granici	10
Slika 2-3. Tipske krivulje za ograničeni radijalni sustav, konstantnog tlaka na vanjskoj granici i konstantnog protoka na unutarnjoj granici	11
Slika 2-4 Osnovna stanja protjecanja.....	12
Slika 2-5. Bezdimezionalni tlak za bušotinu u neograničenom ležištu, s uključenim efektom skladištenja (C_D) i skin faktorom (s)	16
Slika 2-6. Tipske krivulje u ovisnosti o parametru $C_D e^{2s}$, iznosa od 0,1 do 10^{30}	18
Slika 2-7. Tipske krivulje za neograničeno ležište s efektom skladištenja (C_D) i skin efektom (s).....	19
Slika 3-1. Proizvodna oprema bušotine X	22
Slika 4-1. Osnovni podaci o bušotini X i ležištu Y.....	24
Slika 4-2. Osnovna PVT svojstva ležišnih fluida i stijene	25
Slika 4-3. Odabir uvjeta za postavljanje početnog analitičkog modela	26
Slika 4-4. Odnos tlaka i protoka u odnosu na vrijeme mjerenja (engl. 'History plot')	27
Slika 4-5. Glavno sučelje programa Saphir za 1. analizu porasta tlaka	29
Slika 4-6. Log-log dijagram za 1. analizu porasta tlaka.....	30
Slika 4-7. Rezultati 1. analize porasta tlaka	31
Slika 4-8. Log-log dijagram za 2. analizu porasta tlaka.....	32
Slika 4-9. Rezultati 2. analize porasta tlaka	32
Slika 4-10. Log-log dijagram za 3. analizu porasta tlaka.....	34
Slika 4-11. Rezultati 3. analize porasta tlaka	34

POPIS TABLICA

Tablica 3-1. Osnovni geološki podaci ležišta Y i proizvodni historijat bušotine X.....	20
Tablica 3-2. Petrofizikalni parametri ležišta.....	21
Tablica 5-1. Rezultati 1, 2. i 3. analize testa porasta tlaka	36

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA

<u>Oznaka</u>	<u>Jedinica</u>	<u>Opis</u>
A_{wb}	m^2	površina poprečnog presjeka bušotine
B	m^3/m^3	volumni faktor nafte
C	m^3/Pa	konstanta skladištenja bušotine
C_D	-	bezdimenzionalna konstanta skladištenja bušotine
c	Pa^{-1}	stlačivost
c_{wb}	Pa^{-1}	stlačivost plina
c_t	Pa^{-1}	ukupna stlačivost sustava
g	m/s^2	ubrzanje slobodnog pada
h	m	efektivna debljina ležišta
J_0, J_1	-	Besselove funkcije
k	m^2	propusnost ležišne stijene
k_s	m^2	promjena propusnosti
m	Pa	nagib polulogaritamskog pravca
p	Pa, bar	tlak
p_D	-	bezdimenzionalni tlak
p'_D	-	derivacija bezdimenzionalnog tlaka
P_{sc}	Pa	standardni tlak
p_i	Pa, bar	početni ležišni tlak
p_{wf}	Pa, bar	dinamički tlak u bušotini
p_{ws}	Pa, bar	statički tlak u bušotini
q	$m^3/s, m^3/dan$	obujamski protok (trenutačna proizvodnja)
r	m	radijus
r_D	-	bezdimenzionalni radijus
r_e	m	radijus vanjske granice ležišta

r_{eD}	-	bezdimenzionalni radijus crpljenja
r_s	m	Radijus promijene propusnosti
r_w	m	radijus bušotine
r'_w	m	efektivni radijus bušotine
s	-	skin faktor
t	s	vrijeme
T	K°	temperatura
t_D	-	bezdimenzionalno vrijeme
T_{sc}	K°	standardna temperatura
Z	-	Faktor odstupanja realnog plina od idealnog
Δp	Pa, bar	razlika (pad) tlaka
Δt	s	vrijeme testa porasta tlaka
Δt_e	s	Hornerovo vrijeme
μ	Pa s	viskoznost
ρ	kg/m ³	gustoća kapljevine u bušotini
ϕ	-	efektivna šupljikavost ležišne stijene

POPIS KORIŠTENIH KRATICA

<u>Oznaka</u>	<u>Opis</u>
<i>GOR</i>	omjer proizvedenog plina i nafte (engl. <i>Gas Oil Ratio</i>)
<i>PTA</i>	analiza prijelaznog perioda (engl. <i>Pressure Transient Analysis</i>)
<i>TMD</i>	stvarna dubina mjerenja (engl. <i>True Measured Depth</i>), m
<i>WOR</i>	omjer proizvedene vode i nafte (engl. <i>Water Oil Ratio</i>)
<i>X</i>	proizvodni historijat bušotine
<i>Y</i>	osnovni geološki podaci ležišta

1. UVOD

Hidrodinamička mjerenja u bušotini predstavljaju bitan segment u proizvodnom i ležišnom inženjerstvu nafte i plina. Iz njih se dobivaju značajni podatci koji sugeriraju mogućnost ležišne stijene da proizvede ležišne fluide. Samom interpretacijom mjerenih podataka dobivaju se:

- propusnost ležišne stijene,
- ležišni tlak,
- skin efekt,
- radijus stimulacije,
- proizvodne karakteristike ležišta,
- hidrodinamička povezanost dijelova ležišta,
- heterogenost i granice ležišta.

Tokom cijelog životnog vijeka se prikupljaju informacije o ležištu i bušotini kako bi se uz pomoć analiza došlo do što preciznijih opisa promjena proizvodnih stanja u bušotini i ležištu. Najvažnija hidrodinamička mjerenja su test porasta tlaka, test interferencije, test protok za protokom i izokronalni test. Hidrodinamička mjerenja mogu trajati svega par dana, ali isto tako mogu trajati i par godina, ukoliko se radi o nekonvencionalnim ležištima nafte i plina. Prilikom mjerenja u bušotini može doći do odstupanja određenih mjerenih vrijednosti od stvarnih, pa tako naprimjer može doći do odstupanja mjerenog i stvarnog tlaka zbog utjecaja bušotinskih efekata (ulaz ili izlaz kapljevine u bušotinu za vrijeme zatvaranja, spuštanje kapljevine ispod manometra, preraspodijela faza uzduž bušotine, isparavanje i kondenzacija vodenih para i kondenzata unutar bušotine).

Najčešća metoda hidrodinamičkih mjerenja je test porasta tlaka, jer daje neophodne podatke za proizvodne modele bušotina, kojima se kontinuirano prati, opisuje i prognozira rad bušotine. Test porasta tlaka se provodi na način da se bušotina pusti da proizvodi pri konstantnom protoku, a zatim se zatvara na određeno vrijeme. Tokom cijelog procesa se prati i bilježi tlak u bušotini, te se na taj način se dobiju krivulje porasta tlaka u određenom vremenu, koje se zatim softverski analiziraju. Prilikom softverske analize softver najprije preoblikuje bezdimenzionalna rješenja jednadžbe difuzije uz primjenu načela superpozicije. Nakon toga uz pomoć dobivenih rješenja postavlja model koji se programski uspoređuje sa mjerenim vrijednostima te se dobivaju podudarne točke iz kojih se mogu odrediti određena svojstva ležišta. Glavna svrha ovakvih testova je što točnije određivanje propusnosti ležišne stijene (k) i skin faktora (s), kao i ležišnog tlaka.

U ovom diplomskom radu je analiziran test porasta tlaka vertikalne bušotine X koja se nalazi na ležištu Y, uz pomoć programa Saphir koji predstavlja dio softverskog paketa KAPPA Workstation (Sveučilišna licenca #9643). U radu su provedene tri analize testa porasta tlaka uz pretpostavku jednofaznog, dvofaznog i višefaznog fluida, s ciljem usporedbe rezultata i što točnijeg određivanja propusnosti ležišne stijene (k) i skin efekta (s). Nakon unosa ulaznih podataka i opisa analitičkog modela za svaki pojedini slučaj, provedena je diskusija dobivenih rezultata.

2. ANALIZA TLAKA U VERTIKALNOJ BUŠOTINI

Protjecanje fluida u ležištu predstavlja teoretsku osnovu za analizu testa porasta tlaka u vertikalnoj bušotinu, jer se koriste odgovarajuća rješenja jednačbe difuzije za radijalni protok kao i kod proizvodnih testova, ali uz pretpostavku konstantnog protoka, koji iznosi 0, jer je za vrijeme ispitivanja bušotina zatvorena. Iz ovih rješenja prilagođene su jednačbe za određivanje pojedinih svojstava, kao što su propusnost ležišne stijene (k) i skin efekta (s).

Kod proizvodnih testova rješenja su definirana za svaki od tri moguća stanja protjecanja (prijelazno ili neustaljeno, polustacionarno i stacionarno), uz pretpostavku da je bušotina potpuno vertikalna i smještena u potpuno vertikalnom, homogenom ležištu, jednolične debljine. U analizama testova porasta tlaka se koriste podaci ispitivanja koji predstavljaju temelj za postavljanje modela bušotine.

2.1. Model radijalnog protoka u ležištu

Jednačba difuzije je parcijalna diferencijalna jednačba, a iz njenog krajnjeg oblika se mogu definirati rješenja ovisna o rubnim i početnim uvjetima za radijalan protok. Ova rješenja se u slučaju konstantnog protoka na unutrašnjoj granici ležišta, koji iznosi nula, rabe i prilikom analize testa porasta tlaka (Houze et al., 2020).

Za vrijeme početne faze proizvodnje, dok pad tlaka još nije obuhvatio rub ležišta, tlak se uvijek ponaša kao u neograničenom ležištu (slika 2-1.). Ta rana faza proizvodnje se naziva neustaljeni period, dok u kasnijoj fazi, kada pad tlaka dosegne granice ležišta, iznosi tlaka odstupaju od slučaja za neograničeno ležište te se taj period naziva polu-ustaljeno ili polu-stacionarno stanje protoka. Nakon toga, u slučaju konstantnog tlaka na vanjskoj granici ležišta, u bušotini dolazi do stacionarnog stanja. U skladu s time postoje tri osnovna modela s konstantnim protokom na unutarnoj granici ležišta, a to su:

1. model neograničenog ležišta,
2. model ograničenog ležišta sa zatvorenom vanjskom granicom,
3. model ograničenog ležišta s konstantnim tlakom na vanjskoj granici.

2.1.1. Model neograničenog ležišta

Jednadžba difuzije, odnosno protjecanje fluida kroz poroznu sredinu može se izraziti uz pomoć sljedećih zakona:

- Darcyjevog zakona,
- Zakona o očuvanju mase,
- Jednadžbe stanja.

iz kojih je izveden konačni oblik jednadžba difuzije u radijalnom sustavu koji se prikazuje jednadžbom 2-1:

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

gdje su:

p – tlak, Pa,

r – radijus, m,

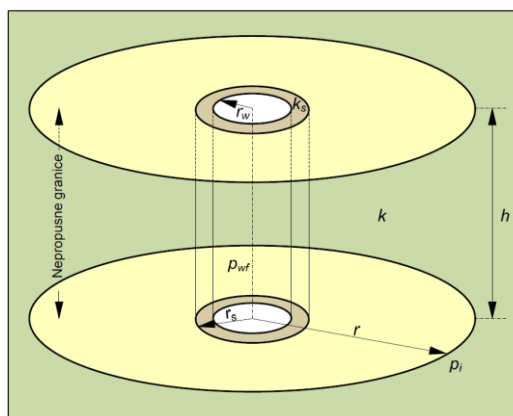
ϕ – poroznost, %,

μ – viskoznost, Pa·s,

c_t – ukupna stlačivost sustava, Pa⁻¹,

k – propusnost ležišne stijene, m²,

t – vrijeme, s.



Slika 2-1. Neograničeno ležište (Čikeš, 2015)

Dok se u slučaju modela neograničenog ležišta rješenje jednačbe difuzije za neustaljeni period može opisati jednačbom:

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

gdje su:

p_i – početni ležišni tlak, Pa,

r_e – vanjski radijus ležišta, m,

r_w – radijus bušotine, m,

q – obujamski protok, m³/s,

h – debljina ležišta, m,

p_{wf} – dinamički tlak u bušotini, Pa,

B – volumni faktor nafte, m³/m³,

s – skin faktor, -.

uz pretpostavljene uvjete:

- 1) $p(r, t) = p_i, t = 0$, za svaki $r, r = r_e$,
- 2) $\left. \frac{\partial p}{\partial r} \right|_{r_w} = -\frac{q\mu}{2\pi kh}$ za $t > 0$,
- 3) $p \rightarrow p_i, r \rightarrow \infty$, za svaki t .

Ako se uzme u obzir da se izvedena jednačba temelji na pretpostavci male stlačivosti spomenuta jednačba vrijedi za analizu tlaka u naftnim bušotinama. Stoga se izvodom iz jednačbe (2-2.) može doći do rješenja jednačbe za stlačive fluide te shodno tome dobiti odgovarajuću jednačbu za analizu tlaka u plinskim bušotinama koja glasi:

$$p_{wf}^2(t) = p_i^2 - \frac{p_{sc}q\mu ZT}{\pi T_{sc}kh} 1,151 \left(\log t + \log \frac{k}{\phi\mu c_t r_w^2} + 0,351 + 0,87s \right) \quad (2-3.)$$

Uvrštavanjem pseudo-tlaka u jednačbu (2-3.) se dobije izraz jednačbe:

$$m(p_{wf}(t)) = m(p_i) - \frac{p_{sc}qT}{\pi T_{sc}kh} 1,151 \left(\log t + \log \frac{k}{\phi\mu c_t r_w^2} + 0,351 + 0,87s \right) \quad (2-4.)$$

gdje su:

p_{sc} - standardni tlak, Pa,

T_{sc} - standardna temperatura, K°,

Z - faktor odstupanja realnog plina od idealnog, Z faktor, -,

T – temperatura, K°.

Dodatni pad tlaka u pribušotinskoj zoni prouzročen promjenom propusnosti (k) se može izračunati iz definicije skin faktora (s) upotrebom jednadžbe:

$$\Delta p_s = s \left(\frac{qB\mu}{2\pi kh} \right) \quad (2-5.)$$

gdje je skin faktor:

$$s = \left(\frac{k}{k_s} - 1 \right) \ln \frac{r_s}{r_w} \quad (2-6.)$$

i gdje su:

Δp_s - pad tlaka prouzročen skin efektom, Pa,

k_s - promijenjena propusnost, m²,

r_s - radijus promijenjene propusnosti, m.

dok se skin faktor (s) može izraziti pomoću efektivnog radijusa bušotine:

$$r'_w = r_w e^{-s} \quad (2-7.)$$

U analizi testa porasta tlaka koristi se i bezdimenzionalni oblik jednadžbe difuzije koji se izražava uz pomoć bezdimenzionalnih varijabli:

- p_D - bezdimenzionalnog tlaka,
- t_D - bezdimenzionalnog vremena,
- r_D - bezdimenzionalnog radijusa.

Pomoću navedenih bezdimenzionalnih varijabli se definiraju tipske krivulje za analizu proizvodnih testova i testova porasta tlaka, a konačan Bourdetov dijagram, koji je ugrađen i u program Saphir, je nakon teoretskog dijela rada, prikazan na slici (2-7.).

Uz navedene početne i rubne uvjete, rješenje bezdimenzionalnog oblika jednadžbe difuzije za neustaljeni protok glasi:

$$p_D(t_D, r_D) = \frac{1}{2} \left(\ln \frac{t_D}{r_D^2} + 0,80907 \right) \quad (2-8.)$$

Jednadžba (2-8) se u slučaju kada je $r = r_w$, $r_D = 1$, reducira na jednadžbu (2-9.) i predstavlja konačno rješenje jednadžbe difuzije za prijelazno stanje protoka. Ona se koristi u analizi testa porasta tlaka, koja se temelji na tzv. *PTA* teoriji pod nazivom Prijelazno stanje protoka (engl. *Pressure transient analysis*), iz razloga što je bušotinu potrebno držati zatvorenom za mjerenje dok se tlak u bušotini ne stabilizira, a stabilizacija se postiže kada je postignut tzv. neograničeno djelujući radijus. Ovo stanje okarakterizirano je ispunjavanjem uvjeta iz navedene jednadžbe, a očituje se periodom kada derivacija mjerenih podataka tlaka padne na asimptotu iznosa 0.5 na dijagnostičkom 'log-log' dijagramu, koji je dan i opisan uz sliku (2-7.).

$$p_D(t_D) = \frac{1}{2} (\ln t_D + 0,80907) \quad (2-9.)$$

gdje su bezdimenzionalno vrijeme (t_D) i bezdimenzionalni radijus (r_D) definirani kao:

$$t_D = \frac{kt}{\phi \mu c_t r^2} \quad (2-10.)$$

$$r_D = \frac{r}{r_w} \quad (2-11.)$$

Prethodno spomenute jednadžbe su također važeće isključivo kada se pretpostavlja, kao na slici (2-1.), da je ležište:

- izotropno,
- homogeno,
- horizontalno,
- vertikalno ograničeno,
- jednake debljine,
- jednakih svojstava fluida i stijene,
- cilindričnog oblika,
- bušotina se nalazi u središtu.

Navedena svojstva ležišta su neovisna o tlaku, gradijent tlaka je mali, gravitacijski efekt zanemariv, dok protok podliježe Darcyjevom zakonu.

Spomenuta svojstva ležišta i ležišnog fluida odstupaju od stvarnih zbog uvjeta u bušotini i ležištu poput promijene propusnosti (k) uslijed zahvata tokom bušenja, opremanja bušotine i slično. Isto tako ležište može biti zacijevljeno i nezacijevljeno ili opremljeno pješćanim zasipom. Do odstupanja može doći i zbog perforiranja, utjecaja više bušotina u ležištu, nesimetričnosti površine crpljenja, turbulentnog umjesto laminarnog protoka koje se dešava najčešće u plinskim bušotinama, pa se ovakva odstupanja od idealnih modela mogu definirati dodatnim jednadžbama.

2.1.2. Model ograničenog ležišta sa zatvorenom vanjskom granicom

U modelu ograničenog ležišta sa zatvorenom vanjskom granicom, koji odgovara polustacionarnom obliku protoka, se radijus (r) mora zamijeniti s radijusom crpljenja (r_e) čiji se bezdimenzionalni oblik definira jednadžbom:

$$r_{eD} = \frac{r_e}{r_w} \quad (2-12.)$$

Početni i rubni uvjeti glase:

- 1) $p(r, t) = p_i, t = 0$, za svaki r ,
- 2) $\left. \frac{\partial p}{\partial r} \right|_{r_w} = -\frac{q\mu}{2\pi kh}$ za $t > 0$,
- 3) $\left. \frac{\partial p}{\partial r} \right|_{r_e} = 0$, za svaki t .

Prvi rubni uvjet definira vanjsku granicu ležišta koja je zatvorena te kroz nju nema protoka, dok drugi rubni uvjet definira unutarnju granicu ležišta kroz koju je protok konstantan.

Kada u jednadžbu difuzije uvrstimo navedene uvjete dobijemo izraz:

$$p_D(t_D) = \frac{2t_D}{r_{eD}^2} + \ln r_{eD} - \frac{3}{4} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\alpha_n^2 t_D} J_1^2(\alpha_n r_{eD})}{\alpha_n^2 [J_1^2(\alpha_n r_{eD}) - J_1^2(\alpha_n)]} \quad (2-13.)$$

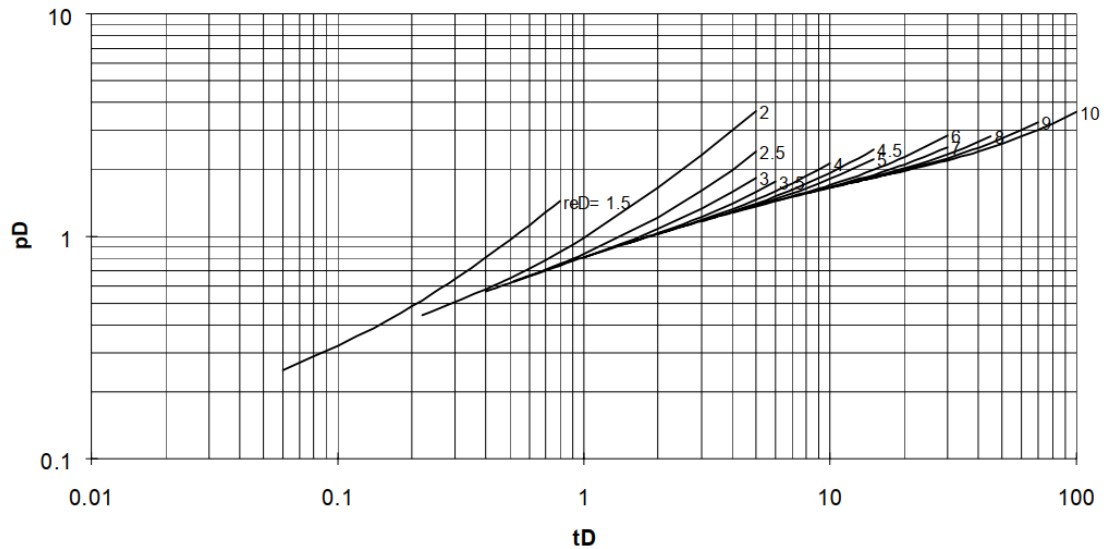
gdje je α_n rješenje jednadžbe:

$$J_1(\alpha_n r_{eD}) Y_1(\alpha_n) - J_1(\alpha_n) Y_1(\alpha_n r_{eD}) = 0, \quad (2-14.)$$

a J_1 i Y_1 su Besselove funkcije.

Jednadžba (2-13.) predstavlja egzaktno rješenje, ali i u tom slučaju postoje aproksimativna rješenja za određena vremena i radijus crpljenja. Kao prvo, ako je $t_D < 0.25r_{eD}^2$ ležište se ponaša kao neograničeno (engl. *transinet*), pa se za $100 < t_D < 0.25r_{eD}^2$ može primijeniti jednadžba (2-8.) te se jednadžba (2-13.) može svesti na pojednostavljeni oblik, koji prestavlja konačno rješenje jednadžbe difuzije za polustacionarno stanje protoka (Čikeš, 2015), a na slici (2-2.) je isto rješenje prikazano grafički:

$$p_D(t_D) = \frac{2t_D}{r_{eD}^2} + \ln r_{eD} - \frac{3}{4} \quad (2-15.)$$



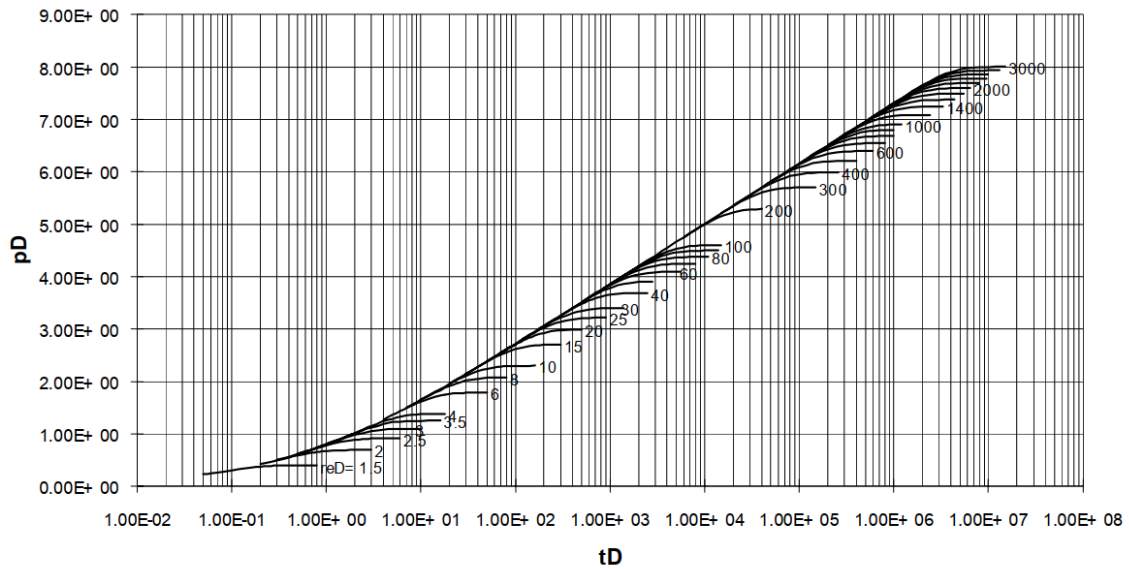
Slika 2-2. Tipске krivulje za ograničeni radijalni sustav sa zatvorenom vanjskom granicom i konstantnim protokom na unutarnjoj granici (Čikeš, 2015)

Uobičajeno je da do ovog modela, odnosno do rješenja za polustacionarni protok ne dolazi prilikom testa porasta tlaka, jer se cijeli test provodi upravo pod uvjetom prijelaznog tj. 'transient' perioda, pa je tomu tako i u ovom radu. No, ukoliko dođe do slučaja da mjerenje traje predugo, tada se počinju osjećati granice ležišta, što se manifestira i na samoj analiziranoj krivulji testa porasta tlaka i to na način da se podaci na kraju mjerenja počinju odvajati od spomenute asimptote 0.5.

2.1.3. Model ograničenog ležišta s konstantnim tlakom na vanjskoj granici

Početni i jedan rubni uvjet kod ovog modela, koji odgovara stacionarnom stanju protoka, su definirani slično kao i za prethodni slučaj, ali s obzirom da se ovaj oblik protoka ne pojavljuje u analizi testa porasta tlaka, ovdje ga se samo spominje u teoretskom smislu. Stoga je izdvojen samo njegov konačni oblik rješenja jednadžbe difuzije, u analitičkoj (jednadžba) i grafičkoj (slika 2-3.) formi:

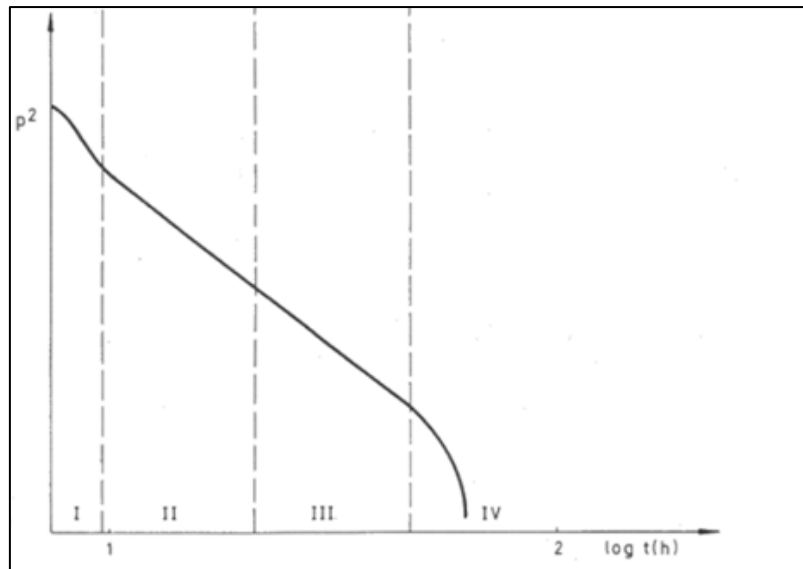
$$p_D \cong \ln r_{eD} \quad (2-16)$$



Slika 2-3. Tipske krivulje za ograničeni radijalni sustav, konstantnog tlaka na vanjskoj granici i konstantnog protoka na unutarnjoj granici (Čikeš, 2015)

2.2. Test porasta tlaka u vertikalnoj bušotini

Postoji nekoliko režima ili stanja protjecanja karakterističnih za prepoznavanje u analizi testa porasta tlaka. Režimi protjecanja su definirani u ovisnosti o trajanju protjecanja i uvjetima na vanjskoj granici ležišta. Podatci dobiveni mjerenjem u određenim režimima protjecanja služe za utvrđivanje protočnih karakteristika bušotine i ležišta, svojstava stijene, granica ležišta i kontinuiranosti dijelova ležišta. Razlikuju se četiri osnovna stanja protjecanja prikazana na slici (2-4.), ukoliko bi se radilo o plinskoj bušotini, dok je za naftna ležišta opis krivulje i pripadajućih stanja isti, samo se na ordinati ne prikazuju kvadratima tlakova, već tlakom (p).



Slika 2-4 Osnovna stanja protjecanja (Lee et al., 2003)

Četiri osnovna perioda protjecanja (slika 2-4.):

1. Prvi period

U prvom se periodu nakon otvaranja ili zatvaranja bušotine osjećaju efekti bušotine, odnosno punjenje bušotine i naknadni dotok zbog porasta tlaka, koji se odnose na tzv. skladištenje fluida. Mjereni podatci dobiveni u tom periodu se ne mogu iskoristiti za utvrđivanje svojstava ležišta, odnosno ležišnog fluida i ležišne stijene.

2. Drugi period

U drugom periodu postoji linearna ovisnost tlaka o vremenu tj. ono obuhvaća neustaljeno stanje protjecanja, te se u njemu ne osjeća utjecaj granice ležišta. U ovom periodu se provode sljedeći hidrodinamički testovi:

- a) test pri stalnom obroku crpljenja ili injektiranja,
- b) test sa dva obroka crpljenja,
- c) test uz porast ili smanjenje tlaka,
- d) test interferencije,
- e) puls test.

3. Treći period

U trećem periodu se pojavljuje prividno ustaljeno stanje protoka kada je drenažno protjecanje nepravilnog oblika. U ovom periodu mjerenja mogu pomoći pri određivanju ležišnih granica.

4. Četvrti period

U četvrtom periodu se osjećaju granice ležišta, postoji linearna ovisnost tlaka o vremenu, ustaljeni protok traje dugo, te se pojavljuje polu-ustaljeno stanje protjecanja. Testovi koji se provode u četvrtom periodu su:

- a. test protok za protokom uz četiri protočna uvjeta,
- b. izokronalni/modificirani izokronalni test uz četiri protočna uvjeta,
- c. test određivanja granica ležišta (*engl. reservoir limit test*).

Za analizu testa porasta tlaka bitno je odrediti period u kojem je trajao efekt skladištenja. Efekt skladištenja (*engl. wellbore storage effect*) se javlja nakon zatvaranja ili otvaranja bušotine. Prilikom početka proizvodnog testa efekt skladištenja prouzrokuje promjenjiv protok što rezultira protokom i nakon što se bušotina zatvori radi provođenja testa porasta tlaka. U trenutku nagle promijene brzine protoka na površini efekt skladištenja uzrokuje zaostatak protoka kroz stijenu i prigušeni odaziv tlaka. U tom trenutku bušotina je poput skladišta određenog volumena fluida te se uz pretpostavljenu površinu poprečnog presjeka bušotine (A_{wb}) izvodi izraz za konstantu skladištenja:

$$C = \frac{A_{wb}}{\rho g} \quad (2-17.)$$

gdje su:

A_{wb} – površina poprečnog presjeka bušotine, m^2 ,

G – ubrzanje slobodnog pada, m/s^2 ,

ρ – gustoća kapljevine u bušotini, kg/m^3 .

U slučaju plinske bušotine konstanta skladištenja fluida je definirana volumenom bušotine koji je u kontaktu s ležištem (V_{wb}):

$$C = c_{wb} V_{wb} \quad (2-18.)$$

Gdje je:

c_{wb} - stlačivost plina, Pa⁻¹

Dok izraz za bezdimenzionalnu konstantu skladištenja (C_D) glasi:

$$C_D = \frac{C}{2\pi h \phi c_t r_w^2} \quad (2-19.)$$

U nastavku je ukratko opisana teorija za tri ključne metode koje se koriste u analizi testova porasta tlaka, a koje se temelje na opisanim rješenjima jednadžbe difuzije za radijalni protok.

2.2.1. Metoda polulogaritamskog prikaza tlaka u funkciji vremena

Iz rješenja jednadžbe difuzije za radijalni protok, odnosno za vertikalnu bušotinu u neograničenom ležištu, u slučaju testa pada tlaka tj. proizvodnog testa, se dobije pravac nagiba (m), ako se dinamički tlak (p_{wf}) u funkciji vremena ($\log t$) prikaže u polulogaritamskom dijagramu. Nagib pravca m se definira izrazom:

$$m = 1,151 \frac{qB\mu}{2\pi kh} \quad (2-20.)$$

a uz pomoć nagiba pravca (m) se može izračunati propusnost ležišta (k):

$$k = 1,151 \frac{qB\mu}{2\pi hm} \quad (2-21.)$$

dok se skin faktor (s) računa uz pomoć jednadžbe:

$$s = 1,151 \left(\frac{p_i - p_{wf}(t)}{m} - \log t - \log \frac{k}{\phi \mu c_t r_w^2} - 0,351 \right) \quad (2-22.)$$

Preciznost interpretacije proizvodnog testa ovisi o broju izmjerenih vrijednosti dinamičkih tlakova koji se preklapaju s pravcem. Razlog tomu je utjecaj efekt skladištenja u bušotini koji uzrokuje određena odstupanja podataka na početku mjerenja. Iz tog razloga se koristi metoda tipskih krivulja kako bi se provjerila točnost dobivenih podataka, a svaka metoda se na sličan način primjenjuje i kod testa porasta tlaka, kao što je opisano u nastavku.

S obzirom da je u proizvodnom testu teže održavati konstantan protok, nakon njega se, u pravilu provodi test porasta tlaka, ukoliko se želi doći do točnijeg određivanja traženih parametara. U metodi polulogaritamskog prikaza tlaka u funkciji vremena primjenom načela superpozicije se prilagođava analiza proizvodnog testa testu porasta tlaka. Tada se test porasta tlaka može tretirati kao test s dva protoka. Protok (q) koji traje do (t_p) se uzima kao da traje i nakon (t_p), ali za period nakon stvarnog t_p uzima protok ($-q$), te se dobiva rezultanta jednaka nuli. Protok ($-q$) traje do (t). Budući da je $t = t_p + \Delta t$, gdje je (Δt) vrijeme trajanja testa porasta razlika, onda je razlika tlaka jednaka:

$$\Delta p = p_i - p_{ws} \quad (2-23.)$$

Kod polulogaritamskih metoda poznata je i Hornerova metoda, kada se umjesto stvarnog vremena koristi tzv. modificirano Hornerovo vrijeme:

$$\Delta t_e = \frac{t_p \Delta t}{t_p + \Delta t} \quad (2-24.)$$

a Hornerov oblik jednadžbe je:

$$p_{ws} = p_i - \frac{qB\mu}{2\pi kh} 1,151 \cdot \log \frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} \quad (2-25.)$$

Analogno metodi za proizvodni test, Hornerova jednadžba ukazuje da će dijagram porasta tlaka u polu-logaritamskom mjerilu dati pravac nagiba (Koščak Kolin, 2018):

$$m = 1,151qB\mu/2\pi kh \quad (2-26.)$$

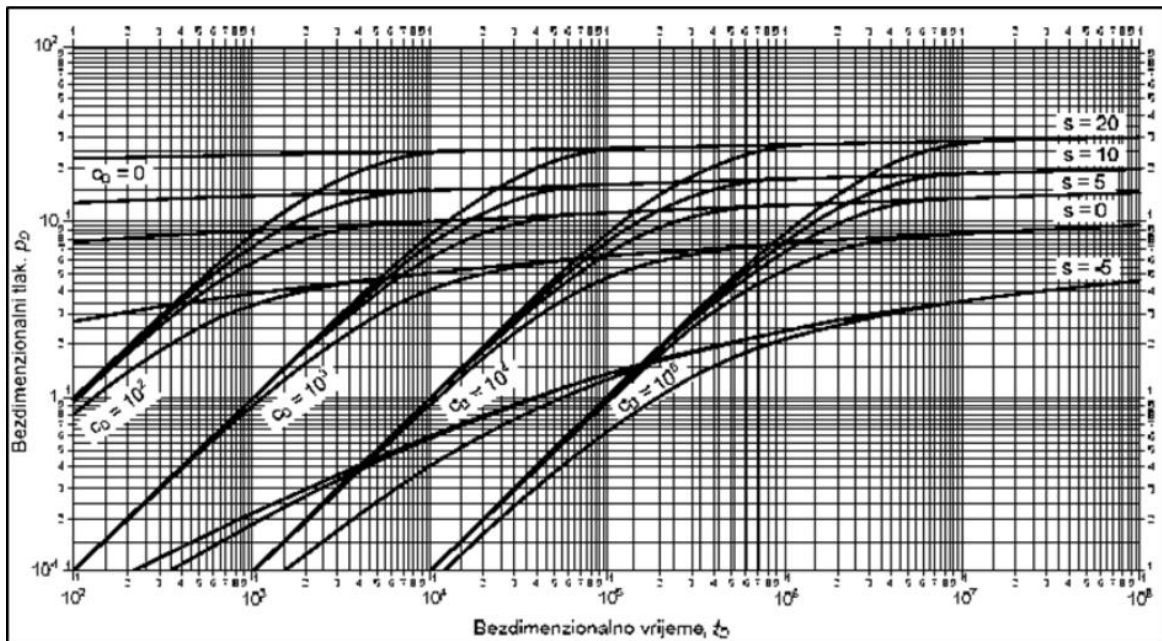
Skin faktor se dobije iz jednadžbe:

$$s = 1,151 \left(\frac{p_{ws}(\Delta t) - p_{wf}(\Delta t = 0)}{m} - \log \frac{\Delta t k}{\phi \mu c_t r_w^2} \right) \quad (2-27.)$$

2.2.2. Metoda tipskih krivulja

Metoda tipskih krivulja predstavlja metodu grafičkog rješenja jednadžbe difuzije. Tipске krivulje se temelje na bezdimenzionalnim varijablama koje se ucrtavaju na *log-log* dijagram. Ovisno o konstanti skladištenja (C_D) i skin efekta (s) na dijagramu je dana krivulja koja predstavlja rješenje jednadžbe difuzije. Preklapanjem krivulja se mogu usporediti stvarne vrijednosti i dobiti karakteristike ležišta i bušotine. Rješenje bezdimenzionalnog oblika jednadžbe difuzije za neograničeno ležište s konstantnim protokom na unutarnjoj granici ležišta uz uvjet $t_D/r_D^2 \geq 25$, gdje je $r_D=1$ uz dodan skin faktor (s), ima izraz sličan jednadžbi (2-9) (Košćak Kolin, 2018):

$$p_D(t_D, r_D) = \frac{1}{2} \left(\ln \frac{t_D}{r_D^2} + 0,80907 \right) + s \quad (2-28.)$$



Slika 2-5. Bezdimezionalni tlak za bušotinu u neograničenom ležištu, s uključenim efektom skladištenja (C_D) i skin faktorom (s) (Agarwal et al., 1970)

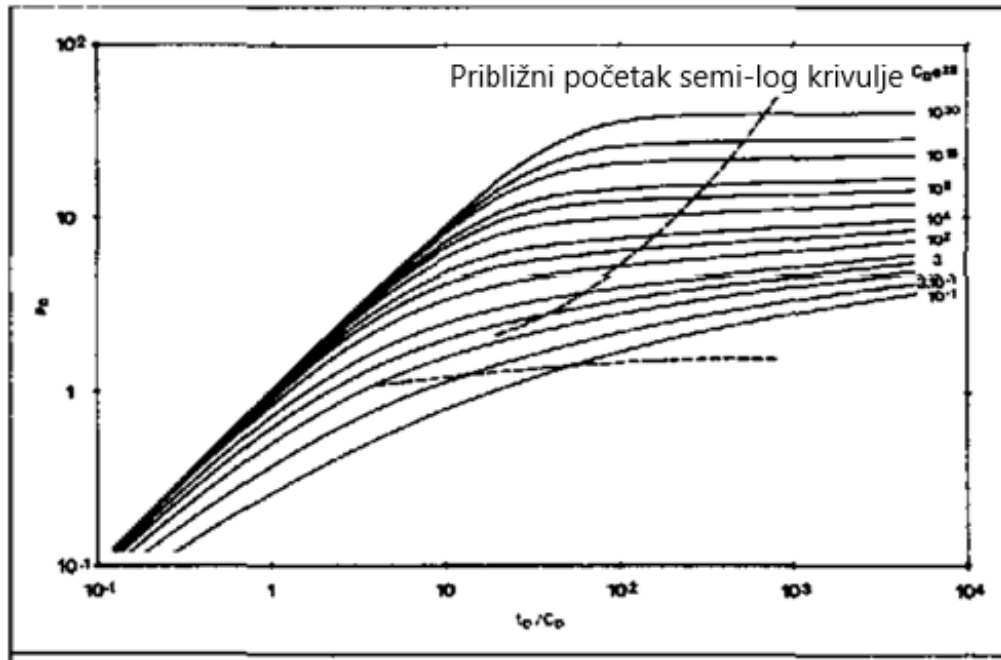
Iz *log-log* dijagrama se može očitati nagib pravca (p_D) u određenom vremenu (t_D). Nagib pravca (p_D) iznosi jedan tokom cijelog efekta skladištenja, a protok iz ležišta je zanemariv te nije moguće odrediti svojstva formacije. Iz toga se da zaključiti da rješenja za određenu konstantu skladištenja ($C_D=0$) postaju jednaka nakon određenog vremena (t_{wbs}). To vrijeme nazivamo i vremenom kraja poremećaja efektom skladištenja (Valjak, 2021). Preklapanje krivulja mjerenih podataka s tipskim krivuljama nastupa u prosijeku jedan i pol logaritamski ciklus nakon kraja pravca jediničnog nagiba (Stewart, 2011):

$$t_D = C_D(60 + 3,5s) \quad (2-29.)$$

Opisan način izračunavanja nije dovoljno precizan jer postoji veliki broj nepoznanica. Taj problem je riješen grupiranjem bezdimenzionalnih varijabli u kojem je bezdimenzionalni tlak (p_D) dodan u funkciji bezdimenzionalne grupe (t_D/C_D) te su dobivene krivulje opisane vrijednošću parametra ($C_D e^{2s}$). Preklapanje krivulja se provodi na isti način kao i kod prethodnih. Na početku se sve krivulje asimptotski približavaju pravcu nagiba vrijednosti jedan, a nakon početnog perioda se primjenjuje rješenje jednadžbe difuzije za neograničeno ležište (2-28), uz uključen koeficijent skladištenja. Primjena metode tipskih krivulja se svodi na preklapanje mjerenih podataka s tipskim krivuljama. Nakon preklapanja se odabiru podudarne točke s pomoću kojih se izračunavaju određeni parametri (propusnost (k) bezdimenzionalna konstanta skladištenja (C_D) i konstanta skladištenja (C)).

Propusnost stijene:

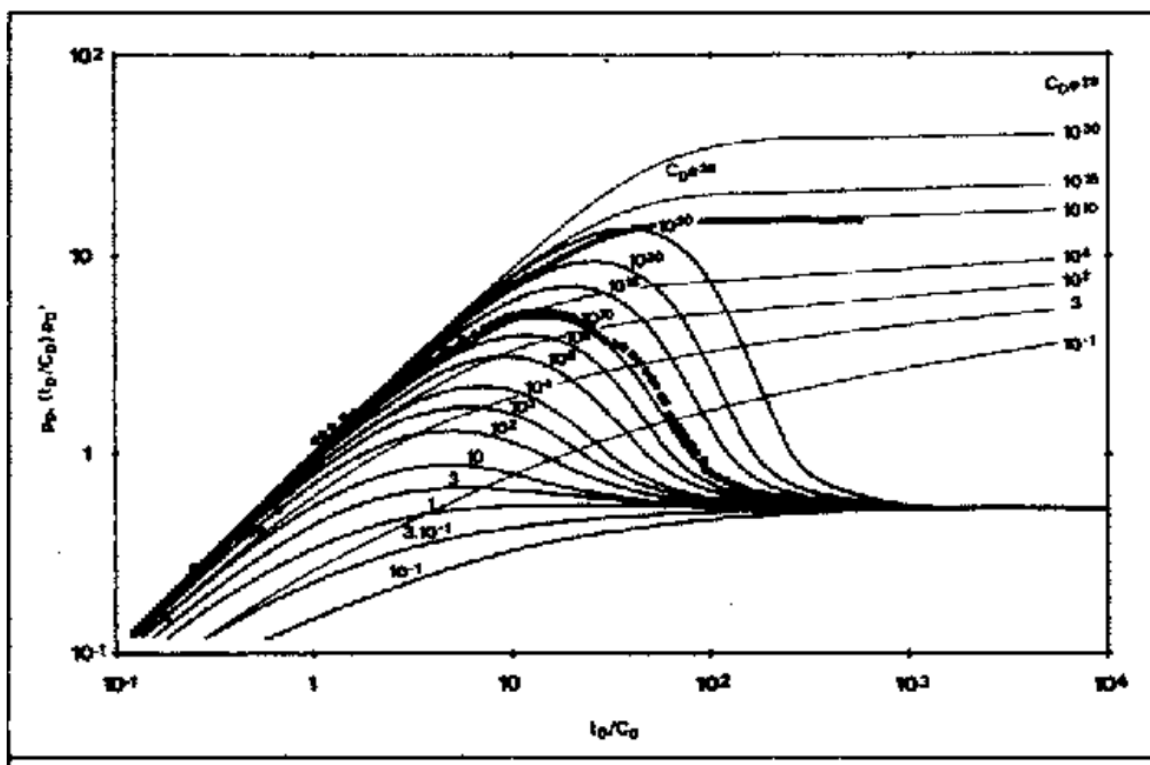
$$k = \frac{qB\mu(p_D)_M}{2\pi h(\Delta p)_M} \quad (2-30.)$$



Slika 2-6. Tipične krivulje u ovisnosti o parametru $C_D e^{2s}$, iznosa od 0,1 do 10^{30} (Bourdet, 1989).

2.2.3. Metoda derivacije tlaka

U daljnjem razvoju tipičnih krivulja došlo je do uvođenja derivacije tlaka (p') u ovisnosti o prirodnom logaritmu ekvivalentnog vremena u trenutku dosezanja neograničeno djelujućeg radijalnog protoka. U početku date krivulje u *log-log* sustavu imaju jedinični nagib, dok u trenutku dosezanja neograničeno djelujućeg radijalnog protoka, krivulje postaju horizontalne i imaju vrijednost jednaku 0,5. Ako se na *log-log* dijagram mjereni podaci poklapaju s ove dvije asimptote na početku i na kraju mjerenja to označava da je tokom došlo i do pojave efekta skladištenja i do neograničeno djelujućeg radijalnog protoka tj, do stabilizacije tlaka. Usporedbom dobivene krivulje s tipičnim krivuljama se traži samo jedna podudarna točka. Između asimptota, oblik pojedine tipične krivulje se razlikuje po vrijednosti bezdimenzionalne grupe $C_D e^{2s}$, čime se lako određuje točna $C_D e^{2s}$ krivulja (Bourdet, 1989).



Slika 2-7. Tipske krivulje za neograničeno ležište s efektom skladištenja (C_D) i skin efektom (s) (Bourdarot, 1998).

Postupak metode derivacije tlaka izvodi se tako što se prvo mjereni podaci preklapaju s tipskim krivuljama. Prvo se poklapa dio mjerenja s konstantnom derivacijom s asimptomom tipske krivulje čija je vrijednost 0,5, te se na taj način odrede (p_D) i (Δp) iz kojih se potom određuje podudarni tlak (Soliman et al., 2003). Zatim se uz pomoć podudarnog tlaka izračuna propusnost stijene (k) uz pomoć jednadžbe (2-30.).

U ovom slučaju se test porasta tlaka mora odvijati dovoljno dugo kako bi došlo do stabilizacije tlaka te da se u tom slučaju dobivene vrijednosti mogu uzeti kao dovoljno pouzdane.

U nastavku rada se teoretske metode za analizu testa porasta tlaka primjenjuju u računalnom program Saphir, na precizniji i softiciraniji način.

3. OSNOVNI PODACI O LEŽIŠTU I BUŠOTINI

U ovom radu se analizira test porasta tlaka vertikalne naftne bušotine uz pomoć programa Saphir. Svi parametri ležišta i bušotine su preuzeti iz tehničke dokumentacije INE te su isti korišteni tokom analize testa porasta tlaka. U radu se ne spominju stvarni naziv bušotine niti naftnog ležišta, već je u svrhu izrade diplomskog rada za naziv ležišta uzeta oznaka Y, a za bušotinu X.

3.1. Geološke karakteristike ležišta

Analizirano ležište Y se nalazi na području sjeverozapadne Hrvatske. Na tom području je nadmorska visina između 150 m i 250 m. Navedeno područje se nalazi u blago brdovitom terenu. Na području ležišta Y su bušenjem dokazane slijedeće kronostratigrafske jedinice:

- *Mezozoik-Paleozoik,*
- *Miocen,*
- *Pliocen, Kvartar.*

Strukturni oblik ležišta Y predstavljen je rasjednutom antiklinalom generalnog pravca pružanja osi sjeverozapad-jugoistok. Ležišna stijena je sačinjena od tinjčastog kvarcnog pješčenjaka sa prijelazom u grubi silt. Polje Y je podijeljeno u 3 tektonska bloka normalnim i reverznim rasjedima. Ležište je u potpunosti zasićeno naftom te je bušotina X, koja se nalazi u sredini ležišta Y, proizvodna bušotina. Naftno ležište Y crpi se kontinuirano od 1989. godine, izuzev pola godine u 1997. godini kada je bilo privremeno zatvoreno zbog visokih transportnih troškova. U tablici (3-1.) prikazani su geološki podaci za ležište Y.

Tablica 3-1. Osnovni geološki podaci ležišta Y i proizvodni historijat bušotine X

Ležište	Y
Fluidi ležišta	nafta
Kolektorska stijena	kvarcni pješčenjak
Pokrovne stijene	lapor
Utvrđene rezerve nafte	988 641 m ³
Utvrđene rezerve plina otopljenog u nafti	86 915 816 m ³

Srednja dubina zalijeganja	1422 m
Početni ležišni tlak	150,6 * 10 ⁵ Pa
Trenutni ležišni tlak	121,9 * 10 ⁵ Pa
Temperatura ležišta	90°C
Početna proizvodnja nafte i/ili plina	10,97 m ³ /d
Trenutna proizvodnja nafte i/ili plina	0,355 m ³ /d
Trenutna proizvodnja vode	0,13 m ³ /d
WOR-omjer proizvedene vode i nafte (engl. Water Oil Ratio)	26,67 %
GOR-omjer proizvedenog plina i nafte (engl. Gas Oil Ratio)	49,30m ³ /m ³

3.2. Tehničke karakteristike bušotine

Duljina kanala bušotine X iznosi 2283 m (TMD-stvarna dubina mjerenja (engl. True Measured Depth)). Dno kolone je na 1460 m. Bušotina X se nalazi na 177,25 m nadmorske visine. Vrh cementnog čepa se nalazi na 1460 m, a u bušotini se nalaze tri raskrivena intervala. Prvi interval se nalazi na dubini od 1425 m do 1431 m (TMD), drugi interval se nalazi na dubini od 1433 m do 1441 m (TMD), dok se treći interval nalazi na dubini od 1445 m do 1488 m (TMD). Bušotina X ima mehaničko podizanje uz pomoć dubinskih sisaljki. U tablici (3-2.). se nalaze petrofizikalni parametri ležišta, a ugrađena podzemna oprema proizvodne bušotine X je prikazana na slici (3-1).

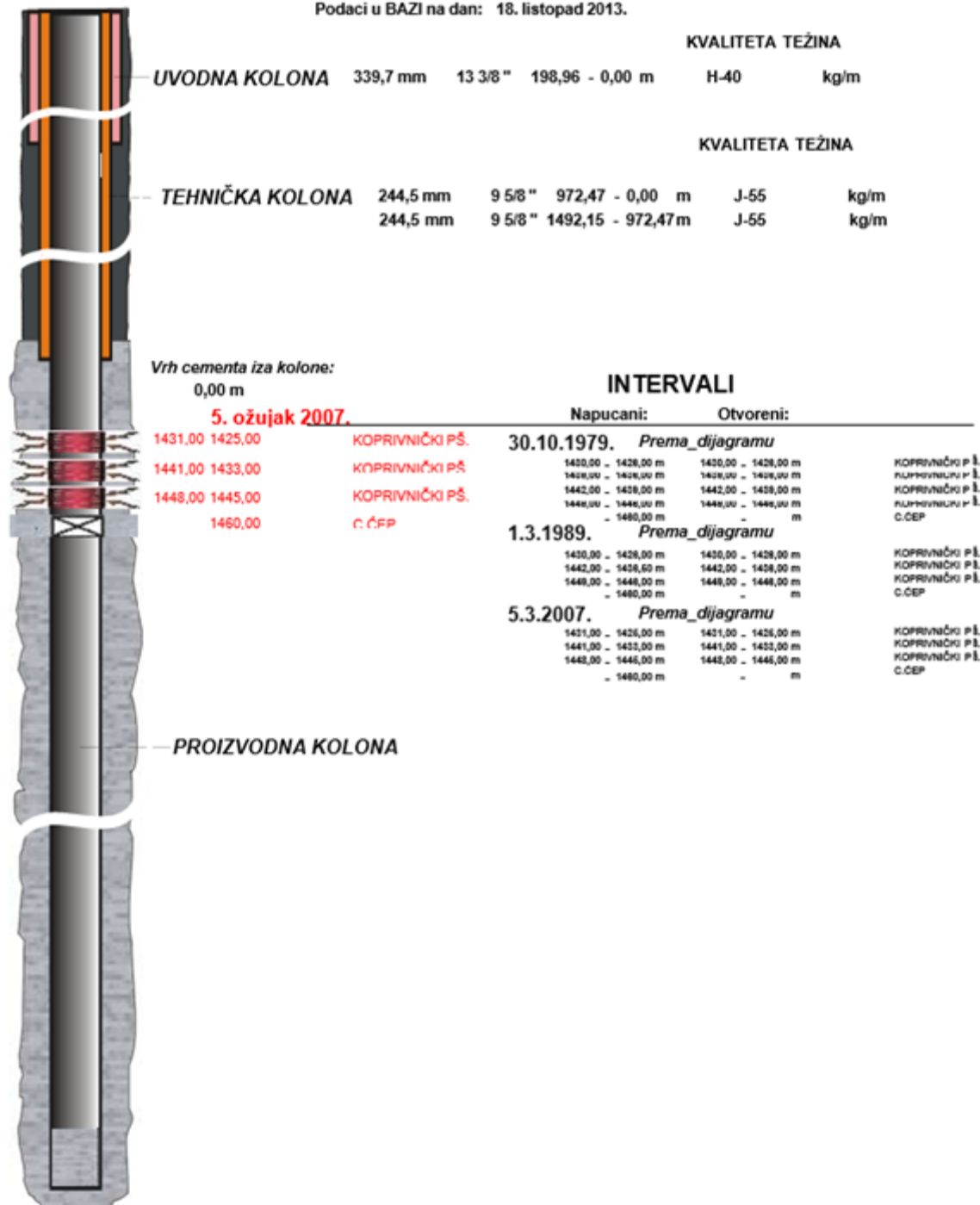
Tablica 3-2. Petrofizikalni parametri ležišta

Šupljikavost	22,3 %
Zasićenje vodom	48,5 %
Ukupna debljina	28 m
Efektivna debljina	6,9 m

POLJE/FIELD:
 Serija(Objekt)/Productive formation(Object):
 Sektor(HDJ)/Area(HDJ):
 Red(Blok)/Row of wells:
 Koordinate 6414039,11
 Coordinates: 5089480,5
 Nadmorska visina/Elevation: 177,25m

Status/Well status: Proizvodna-naftna
 Tehnologija proizvodnje /
 Production technology:
 Dubina bušotine/Well depth TMD: 2283,60 m
 Dno u koloni/Bottom hole 1460,00 m

Podaci u BAZI na dan: 18. listopada 2013.



Slika 3-1. Proizvodna oprema bušotine X (INA, 2013)

4. ANALIZA TESTA PORASTA TLAKA NAFTNE BUŠOTINE

Test porasta tlaka u vertikalnoj, naftnoj bušotini X, koji je analiziran primjenom programa Saphir, trajao je punih 360 sati, a ispis mjerenih podataka dan je u prilogu A. Dinamički tlak na dnu bušotine u trenutku zatvaranja iznosio je 31,8 bar, a nakon stabilizacije tlaka na kraju mjerenja povećao se na 118,5 bara (slika 4-4.).

U nastavku je ukratko najprije opisan uvod u primjenu programa Saphir kroz objašnjenja ulaznih podataka, pri čemu su izrazi na slikama ostavljeni na engleskom jeziku, jer program nije dostupan u hrvatskoj verziji, ali su ključni parametri analize izdvojeno dani i na hrvatskom jeziku. Nakon toga slijede tri različita slučaja analize testa porasta tlaka, koji se odnose na pretpostavku jednofaznog fluida, dvofaznog i višefaznog fluida, a diskusija rezultata nalazi se u sljedećem poglavlju.

Za analize testa porasta tlaka korištena je verzija 5.30.01 programa Saphir, KAPPA Workstation (Sveučilišna licenca #9643).

4.1. Uvod u program Saphir i ulazni podaci

Program Saphir je dio programskog paketa KAPPA Workstation (www.kappaeng.com), a proizvela ga je istoimena tvrtka Kappa, koja slovi kao jedna od vodećih softverskih kompanija u području dinamičke analize podataka naftnih i plinskih ležišta. KAPPA Workstation je integrirani inženjerski paket koji nudi programe za analizu i modeliranje dinamičkih podataka ležišta. Jedan od njih je i Saphir, u kojem je ključni alat i teoretska podloga za analizu testa porasta tlaka tzv. Bourdardov *log-log* dijagram (slika 2-7). Odziv tlaka tijekom perioda zatvaranja bušotine daje podatke o ležištu unutar radijusa ispitivanja kod radijalnog protoka ili za područje ispitivanja kod složenije geometrije ležišta. Softver najprije preoblikuje bezdimenzionalna rješenja jednadžbe difuzije primjenjujući načelo superpozicije. Na osnovi tih rješenja program daje analitički model kojeg se uspoređuje sa mjerenim vrijednostima, te se zatim postupkom regresije postavlja model. Potom se određuju podudarne točke mjerenih i modeliranih vrijednosti, iz kojih se mogu odrediti određena svojstva ležišta, od koji su u ovom radu kao najvažnija analiziraju propusnost ležišta (k) i skin faktor (s).

Na početku analize odabire se vrsta testa, koji je u ovom slučaju standardni (slika 4-1.). Zatim se unose podaci potrebni za interpretaciju i izračun rezultata. To su radijus bušotine od 0.03016 m, debljina proizvodnog sloja, koja u ovom slučaju iznosi 6.9 m efektivno, stlačivost stijene od $4.9 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$, poroznost 22.3% i dubina krovine proizvodnog sloja od 1425 m.

Analysis information

Info Comments

Name: Analysis 1

Type: Standard Interference Minifrac

Reference well: Tested Well

Multi-layer

Test parameters

Well radius: 0.03016 m

Pay zone: 6.90000 m

Rock compressibility: 4.90000E-10 Pa⁻¹

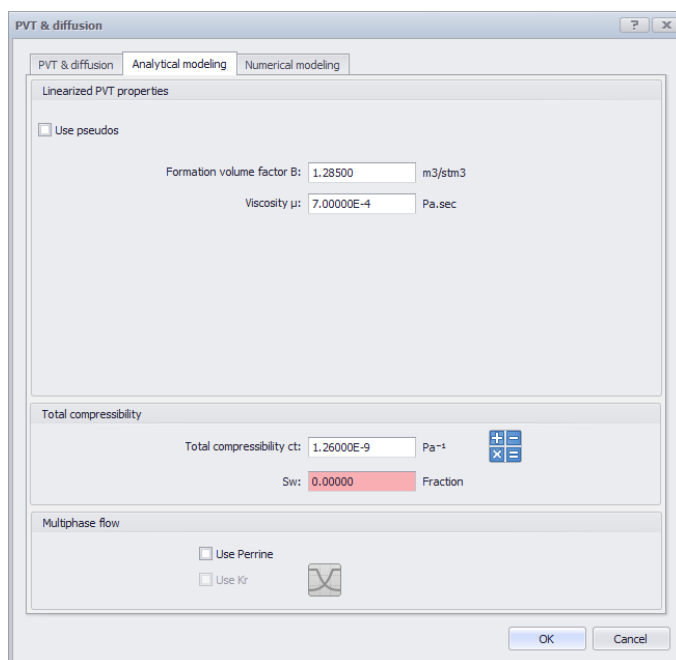
Porosity: 0.223

Top reservoir depth: 1425.00 m

OK Cancel

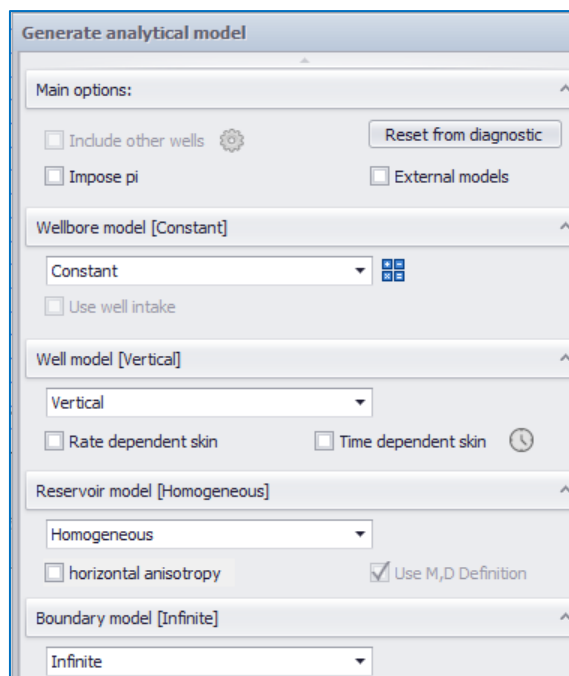
Slika 4-1. Osnovni podaci o bušotini X i ležištu Y

U sljedećem koraku se unose svojstva fluida (slika 4-2.), kao što su obujamski faktor nafte $1,285 \text{ m}^3/\text{m}^3$, viskoznost $7 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, i ukupna stlačivost $1,26 \cdot 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$.



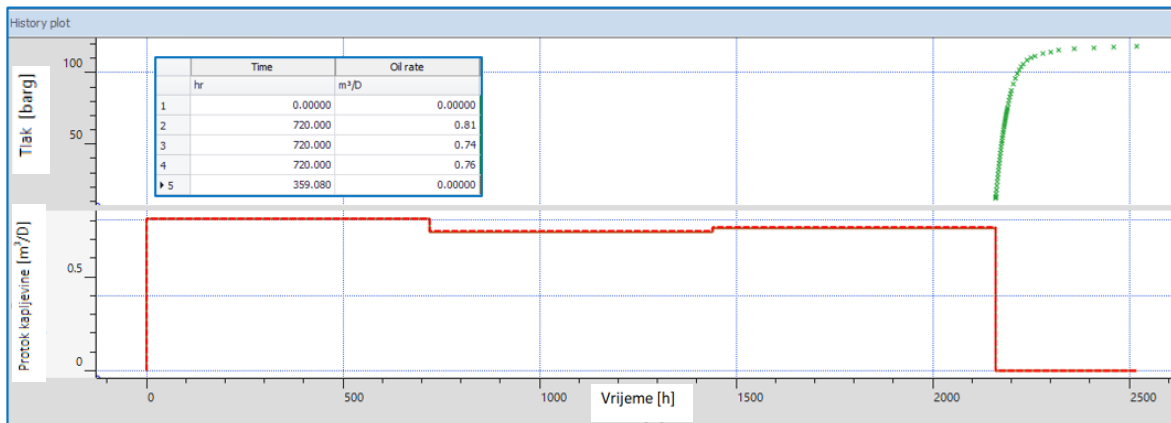
Slika 4-2. Osnovna PVT svojstva ležišnih fluida i stijene

Kod postavljanja parametara za analitički model u posljednjem koraku unosa ulaznih podataka, odabiru se četiri ključna uvjeta za određivanje početnog modela u tzv. 'log-log' analizi testa porasta tlaka (slika 4-3.). To su skladištenje fluida u bušotini (*engl. Wellbore storage*), koje je u ovom slučaju konstantno, model bušotine (*engl. Well model*), odnosno vertikalna bušotina, ležišni model (*engl. Reservoir model*), za koji se pretpostavlja homogenost i model granica ležišta (*engl. Boundary model*), gdje se uzima da je ležište neograničeno.



Slika 4-3. Odabir uvjeta za postavljanje početnog analitičkog modela

U skladu s podacima mjerenja protoka i tlakova prije i nakon zatvaranja bušotine za test porasta, na slici (4-4.) prikazan je cjelokupni test, koji je u nastavku analiziran uz promjenu PVT podataka. To znači da je test najprije analiziran uz pretpostavku jednofaznog fluida, zatim za dvofazni fluid i na kraju za višefazni fluid. Ova analiza slučajeva provedena je u svrhu određivanja što točnijih svojstava ležišta, odnosno rezultata za propusnost stijene (k) i skin faktor (s), jer se nakon dugogodišnjeg rada bušotine od 1989. godine, značajno promijenilo i hidrodinamičko stanje ležišta, što utječe na rezultate ovakvih analiza. Stoga se preklapanje mjerenih podataka s tipskim krivuljama u uobičajenoj metodi '*log-log*' dijagrama teško može ostvariti u potpunosti, što je diskutirano kroz prikaz rezultata pojedinih slučajeva u nastavku.



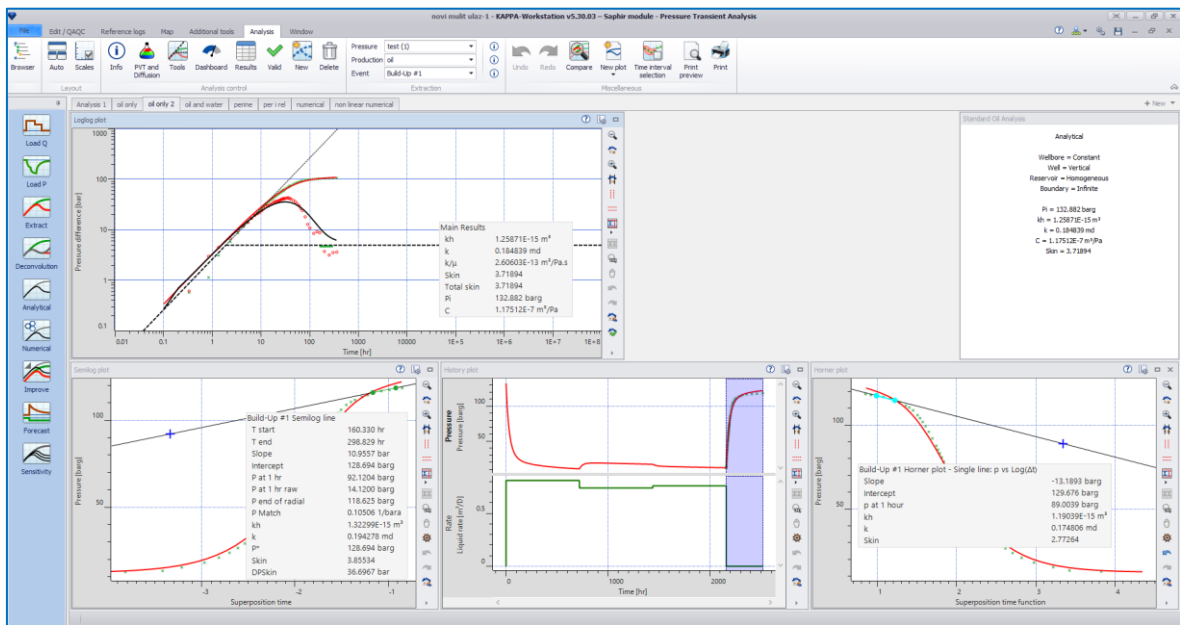
Slika 4-4. Odnos tlaka i protoka u odnosu na vrijeme mjerenja (engl. 'History plot')

Na slici (4-4.) se vidi da je u svrhu dobivanja što točnijih rezultata interpretacije, bušotina bila stabilizirana prije samog zatvaranja kroz duži period, tijekom kojeg se nastojalo održavati konstantan protok, što uvelike utječe upravo na točnost primjene teoretskih rješenja. Na dijagramu su prije samog zatvaranja prikazane tri faze stabilizacije rada bušotine, odnosno stabilizacije protoka, gdje se najprije kroz period od 720 sati proizvodilo uz konstantni protok nafte od 0.81 m³/dan, zatim je kroz sljedećih 720 sati bušotina proizvodila s konstantnim protokom od 0.74 m³/dan i na kraju je protok od 0.76 m³/dan održavan tokom idućih 720 sati. Kao što je već spomenuto, uslijedio je test porasta tlaka u trajanju od 360 sati, gdje se krivulja mjerenja popela s dinamičkog tlaka od 31,8 bar, koliko je iznosio u trenutku zatvaranja bušotine, na 118,5 bara statičkog tlaka, na kraju testa porasta. Na slici (4-4.) su ovi podaci mjerenja tlaka označeni zelenim križićima. Iako je test porasta za konvencionalan tip ležišta u pogledu propusnosti, trajao teoretski dovoljno dugo, rezultati za sva tri slučaja analize pokazuju da se stabilizacija tlaka, unatoč svim poduzetim proizvodnim preduvjetima rada bušotine nije mogla u potpunosti postići. Na to upućuju nedovoljna preklapanja krivulje derivacije mjerenih tlakova s tipskim krivuljama, odnosno s modeliranim krivuljama u *log-log* dijagramu, što je također diskutirano u nastavku. Ovdje treba napomenuti da je provedeni test obavljan tijekom 2007. godine, kada je bušotina dosegla relativno niske protoke, te je bila eventualni kandidat za buduće hidrauličko frakturiranje. Iz tog razloga je bilo nužno provesti ovako detaljno testiranje, jer o traženim rezultatima za propusnost stijene (*k*) i skin faktor (*s*) uvelike ovisi uspješnost dizajna stimulacijskog postupka za povećanje proizvodnosti bušotine, odnosno za uspješnost postupka hidrauličkog frakturiranja.

Dijagram na slici (4-4.) (*History plot*) se ujedno odnosi i na prvi slučaj analize testa porasta tlaka za jednofazni fluid, koji je opisan u sljedećem odlomku, a gdje se pretpostavlja da je bušotina proizvodila samo naftu, čiji protok je prije zatvaranja prikazan crvenom linijom.

Na slici (4-5.) je dano glavno sučelje programa Saphir za 1. analizu testa porasta tlaka tj. za slučaj jednofaznog fluida, koja je opisana u sljedećem odlomku. U gornjem retku i u lijevom stupcu sučelja programa je izbornik s naredbama, a glavni alat za analizu tj. *log-log* dijagram nalazi se u gornjem lijevom dijelu slike. Desno od dijagrama su prikazani njegovi rezultati, u donjem dijelu sučelja se u sredini nalazi tzv. *History plot* sa slike (4-4.), a lijevo i desno od njega nalaze se polulogaritamki dijagram i Hornerov dijagram, kao dodatne metode za analizu testa porasta tlaka. Ove dvije metode su prikazane samo za 1. analizu testa porasta i nisu korištene u daljnjim analizama, jer je *log-log* dijagram s tipskim krivuljama tj. s derivacijom mjerenog tlaka sofisticiranija i točnija metoda. No, već je napomenuto da se niti ovdje nije moglo postići potpuno preklapanje modeliranih i mjerenih krivulja, iako je test trajao dovoljno dugo, jer derivacija tlaka, koja je prikazana crvenim točkama, niti s pomoću modeliranja nije pala na vrijednost od 0.5, označenu zelenim pravcem na *log-log* dijagramu. Da je ovaj teoretski uvjet ispunjen, to bi značilo potpunu stabilizaciju tlaka, koja je garantirana i visoku točnost dobivenih rezultata primjenjene metode. Preostale dvije metode polulogaritamskog dijagrama s povlačenjem pravca kroz period mjerenja nakon završetka procesa skladištenja fluida u bušotini, nemaju mogućnost uvida u postizanje stabilizacije tlaka, pa je time i veća njihova nesigurnost u određivanju rezultata za propusnost stijene (k) i skin faktor (s). Na oba polulogaritamska dijagrama je vidljivo jedino da modelirana crvena linija, koju je aproksimirao program, ne prolazi adekvatno kroz mjerene podatke, prikazane zelenim križićima, što također znači da se dobiveni rezultati uzimaju s manjom točnošću u odnosu na slučaj kada je preklapanje modeliranih i mjerenih podataka potpuno. Međutim, polulogaritamske metode su ipak primjenjene samo za 1. slučaj jednofaznog fluida, te je iz prikazanih rezultata na dijagramima vidljivo da su dobiveni rezultati za ležišni tlak u iznosima od 128 i 129 bara niži nego kod *log-log* metode, gdje je on procjenjen na 132 bara. Ostali rezultati za propusnost (k) i skin (s) kod ove dvije polulogaritamske metode su približni procjeni *log-log* dijagramu, koji daje 0.18 mD ($1,78 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$) za propusnost (k) i 3,7 za skin (s) kod 1. slučaja. Jedan od razloga radi kojeg je ovdje objašnjen i značaj polulogaritamskih metoda je usporedba s rezultatima iz literature (INA, 2013), gdje se interpretacijom radila samo polulogaritamski, te je predviđeni ležišni tlak bio nešto manji, što bi moglo imati utjecaj i na dizajn eventualnog hidrauličkog frakturiranja. Iako ove metode

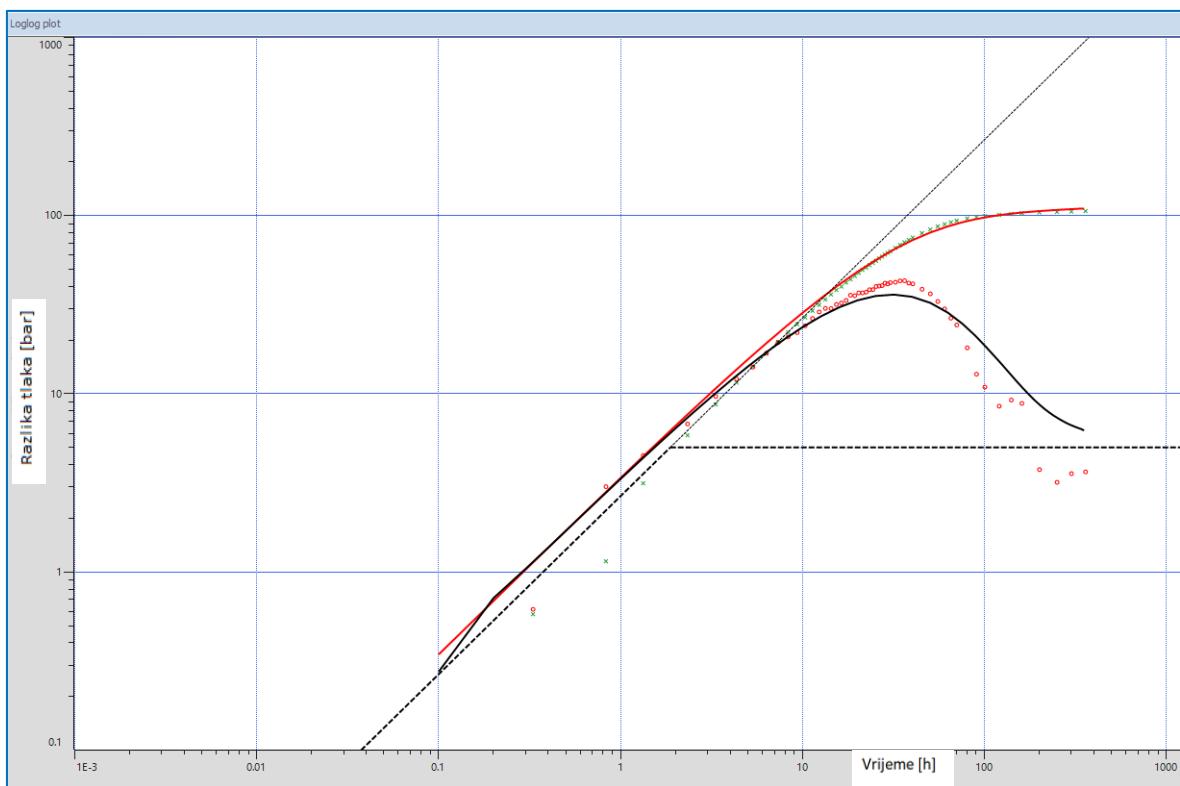
nisu uključene u daljnju diskusiju, već se analiza ovog testa porasta tlaka bazira na usporedbi i diskusiji rezultata za tri slučaja ovisna o fazama fluida, prikazanim *log-log* dijagramima na slici (4-6.), slici (4-8.) i slici (4-10.), za svaku od njih vrijedi da se stabilizacija tlaka nije postigla tj. da derivacija tlaka nije pala na nužnu teoretsku vrijednost od 0.5. Razlog tomu mogla bi biti i eventualna blizina rasjeda, uslijed koje odziv tlaka ne ulazi u stabilizaciju, već se može zaključiti da rasipanje podataka oko asimptote od 0.5 ukazuje na blagu anomaliju, za čiji se utjecaj prije mjerenja nije moglo znati.



Slika 4-5. Glavno sučelje programa Saphir za 1. analizu porasta tlaka

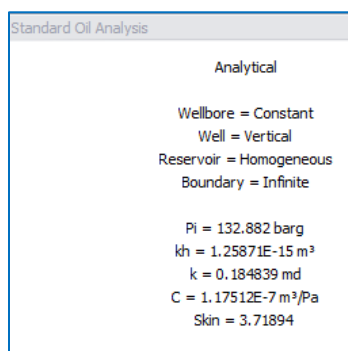
4.2. Primjer analize testa porasta tlaka za jednofazni fluid

Na slici (4-6.) prikazan je *log-log* dijagram za 1. slučaj analize, kada se pretpostavlja da je fluid jednofazan, a na slici (4-7.) su pripadajući rezultati ove analize, od koji se kao ključni za usporedbu s preostala dva slučaja za dvofazni i višefazni fluid uzimaju propusnost stijene (k) i skin faktor (s). Na dijagramu su zelenim križićima označeni podaci mjenenog tlaka, a crvenim kružićima njegova derivacija, dok se puna crvena i crna linija odnose na tipske tj. modelirane vrijednosti tlaka i derivacije, koje program aproksimira uz maksimalno postizanje točnosti kod preklapanja krivulja. Prilikom toga, potrebno je ispuniti teoretske uvjete, da se početak mjerenih i deriviranih podataka poklapa s prvim crtkanim pravcem nagiba 1, koji označava period skladištenja fluida u bušotini, što je ispunjeno, te da se krajnje derivirane vrijednosti tlaka poklapaju s drugim crtkanim pravcem tj. asimptotom od 0.5, što nije sasvim ispunjeno, kao što je objašnjeno ranije.



Slika 4-6. Log-log dijagram za 1. analizu porasta tlaka

Kod prikaza rezultata na slici (4-7.), program navodi odabrane uvjete prilikom postavljanja analitičkog modela, koji su pojašnjeni uz sliku (4-3.). Ključni rezultati za sve tri analize zajednički su prikazani u tablici (5-1.). Osim već spomenutih rezultata za ležišni tlak (p_i), propusnost (k) i skin faktor (s), ovdje se još navodi umnožak propusnosti i efektivne debljine ležišta (kh), kao i konstantna skladištenja (C).

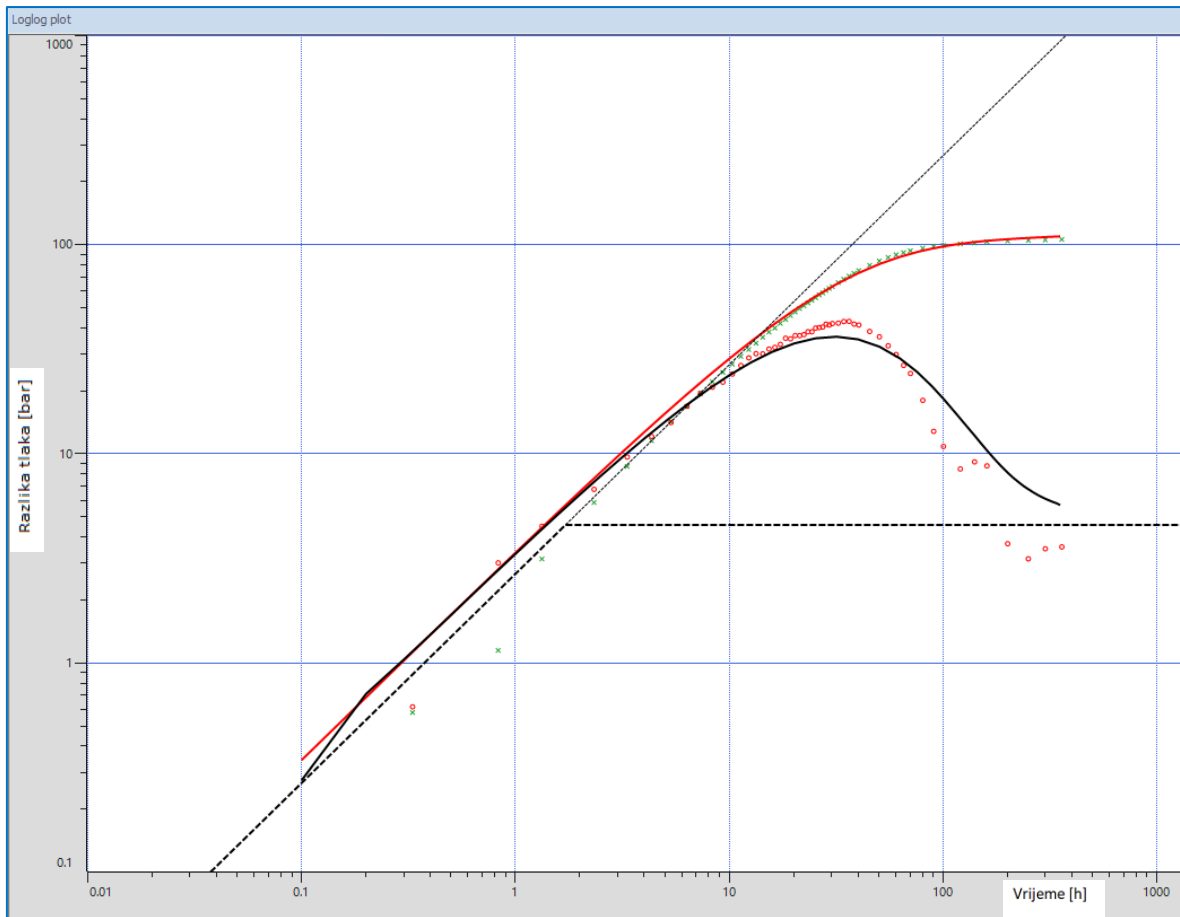


Slika 4-7. Rezultati 1. analize porasta tlaka

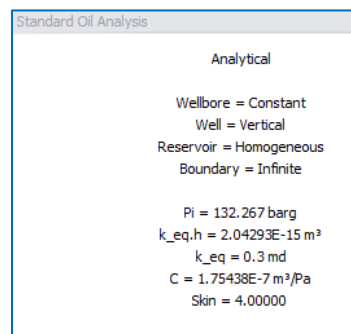
4.3. Primjer analize testa porasta tlaka za dvofazni fluid

Na slici (4-8.) prikazan je *log-log* dijagram za 2. analizu, gdje je u odnosu na 1. analizu, kod ulaznih podataka za PVT svojstva prikazanih na slici (4-2.), podatke trebalo upotpuniti dodatnim laboratorijskim parametrima za dvofazni fluid, od kojih svi nažalost nisu bili poznati, jer je za njihov uvid potrebno provesti i dodatna laboratorijska ispitivanja, pa su neki od njih, radi prvog uvida u procjenu rezultata 2. analize, bili pretpostavljeni. Iz tog razloga se u praksi, najčešće provodi samo analiza za jednofazni fluid, a pregled unosa dodatnih PVT parametara iz Saphira za 2. analizu nije prikazan, jer je opširan, pa bi se njihovim opisivanjem prešli okviri teme ovog rada

Kao što se može vidjeti (slika 4-9.), preklapanje mjerenih i modeliranih podataka se nije poboljšalo u odnosu na 1. analizu, ali je došlo do razlika u rezultatima, što je diskutirano uz tablicu (5-1.).



Slika 4-8. Log-log dijagram za 2. analizu porasta tlaka

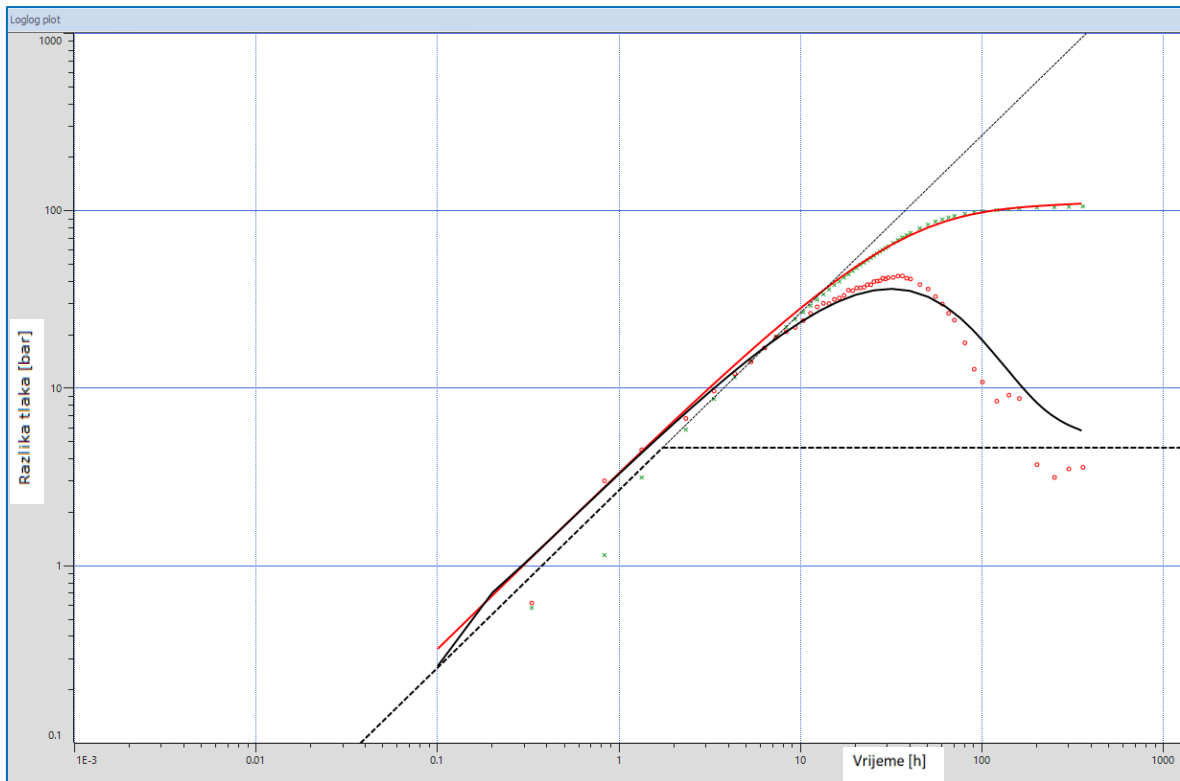


Slika 4-9. Rezultati 2. analize porasta tlaka

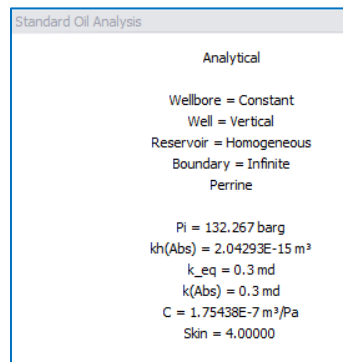
4.4. Primjer analize testa porasta tlaka za višefazni fluid

Analogno 2. analizi, na slici (4-10.) prikazan je *log-log* dijagram za 3. analizu testa porasta tlaka, gdje je, također, ulazne podatke za PVT svojstva trebalo upotpuniti dodatnim laboratorijskim parametrima za višefazni fluid (Perrine, R. L. 1956.), od kojih opet svi nisu bili dostupni s obzirom da je i za njihovo poznavanje potrebno provesti dodatna laboratorijska ispitivanja. Iz tog razloga su i ovdje neki od njih, u svrhu prvog uvida u procjenu rezultata 3. analize (slika 4-11.), bili pretpostavljeni. Kao što se ponovno može vidjeti, preklapanje mjerenih i modeliranih podataka u *log-log* dijagramu se nije poboljšalo u odnosu na 1. niti u odnosu na 2. analizu, tj. ono je ostalo gotovo identično kao za jednofazni fluid. Iz tog razloga daljnja mogućnost programa Saphir za unaprijeđenje analitičkog modela u numerički nije provedena, jer bi ponovno nedostajalo ulaznih parametara. To je čest slučaj u praksi, s obzirom na relativno skupocjen proces njihovog laboratorijskog određivanja, kao dodatan trošak u odnosu na visoku cijenu provedenih mjerenja i na cijenu njihove kvalitetne interpretacije.

Međutim, u slučaju ove bušotine i fluida koje proizvodi, s obzirom na dostupne proizvodne parametre (tablica 3-1.), slijedi da udio vode i udio plina u proizvodnji nisu bili znatni, te je stoga pretpostavka jednofaznosti optimalna i dostatna. Odavde u konačnici proizlazi da 1. analiza ima manje odstupanje rezultata u odnosu na ostale, koje pri postavkama modela imaju više pretpostavljenih parametara.



Slika 4-10. Log-log dijagram za 3. analizu porasta tlaka



Slika 4-11. Rezultati 3. analize porasta tlaka

5. DISKUSIJA REZULTATA

U tablici 5-1 su prikazani rezultati sve tri analize testa porasta tlaka u naftnoj vertikalnoj bušotini, koji je trajao 360 sati. Iz svih interpretiranih log-log dijagrama na slikama 4-6, 4-8 i 4-10, može se zaključiti da nužna stabilizacija tlaka na kraju testa nije u potpunosti zadovoljena, jer 2. asimptota od 0.5 ima nepotpuno preklapanje s derivacijama zadnjih mjerenih tlakova. Prema teoretskim postavkama tzv. PTA analize, opisanim prethodno, to znači da nije dosegnut tzv. neograničeno djelujući radijus, kao uvjet da bi primijenjena rješenja modela dala pouzdane rezultate. Druga mogućnost nepotpunog preklapanja mogla bi biti blizina rasjeda, koja bi mogla imati utjecaj na odziv tlaka, pri kojemu se njegove derivacije niti nakon dužeg perioda mjerenja nisu poklopile s 2. asimptotom, što je vjerojatnije za zaključiti u slučaju ove bušotine i ležišta. Stoga bi se u budućnosti moglo provesti dodatno istraživanje dokumentacije vezano za potpun uvid u geološki model ležišta, odnosno u kompletne podatke o eventualnom postojanju rasjeda u blizini. Na taj način bi se u program mogle unesti njegove udaljenosti od bušotine, te bi se modeliranjem pokušalo kompenzirati utjecaj rasjeda na odziv tlaka tijekom mjerenja. No, ovdje treba napomenuti, da iako modelirana linija ne postiže preklapanje s drugom asimptotom, ona ipak na zadovoljavajući način opisuje derivirane podatke tijekom cijelog testa. Isto vrijedi i za drugu modeliranu liniju koja isto tako vrlo dobro opisuje cjelokupnu krivulju tlaka, što znači da se rezultati ipak mogu uzeti s približnom točnošću.

S tim u vezi navedeno istraživanje utjecaja rasjeda nije provedeno, jer rasipanje rezultata niti u jednoj analizi nije preveliko, posebice u odnosu na dobivene vrijednosti za propusnost. Stoga je glavni zaključak da je najpouzdaniji rezultat dobiven u 1. analizi, tj. da propusnost ležišne stijene trenutno iznosi 0.18 mD ($1,78 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$), bez obzira na činjenicu što se u obje preostale analize dobiva vrijednost od 0.3 mD ($2,96 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$). Iako to nije velika razlika u odnosu na 1. rezultat, u 2. i 3. analizi je bio veći broj pretpostavki ulaznih PVT parametara, čime je povećano i odstupanje njihovih rezultata.

U prilog činjenici da je 1. analiza točnija idu i rezultati dviju metoda polulogaritmских dijagrama opisanih uz sliku 4-5. Iako oni nisu dali procjenu tlaka kao što to daje log-log analiza, primarno je da je propusnost određena i pomoću ovih dviju metoda bila približna iznosu od 0.2 mD ($1,97 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$), tj. kao kod log-log dijagrama u istoj analizi.

S obzirom na navedeno, rezultat za skin faktor odabire se iz 1. analize, jer izravno ovisi o propusnosti i iznosi 3.7. Odavde se dodatno može zaključiti da je bušotina bila dobar kandidat za hidrauličko frakturiranje, jer je njen protok s početne proizvodnje u 1989. godini,

kada je davala oko 10m³/dan, pao na približno 0.8 m³/dan tijekom 2007. godine, kada je napravljen analizirani test porasta, a trenutno prema, Ininoj dokumentaciji (INA 2013), bušotina X proizvodi svega 0.3 m³/dan nafte, te je i udio vode nešto povećan u odnosu na 2007. godinu.

Tablica 5-1. Rezultati 1, 2. i 3. analize testa porasta tlaka

Analizirani slučajevi	PVT uvjeti	REZULTATI	
		propusnost	skin faktor
		mD	-
1. analiza	jednofazni fluid	0.18	3.7
2. analiza	dvofazni fluid	0.3	4.0
3. analiza	višefazni fluid	0.3	4.0

6. ZAKLJUČAK

Nakon teoretskog uvoda u metode za analizu testova porasta tlaka, u radu je provedena analiza testa porasta tlaka vertikalne naftne bušotine, primjenom programa Saphir. Osnovni cilj je bio utvrditi propusnost stijene i skin faktor, nakon što je bušotina proizvodila kroz duži period, pa su se proizvodne mogućnosti ležišta i bušotine promijenile i pale u odnosu na početno stanje. U svrhu određivanja što pouzdanijih rezultata i njihove usporedbe, analizirana su tri slučaja, ovisno o PVT svojstvima fluida. U 1. slučaju je pretpostavljeno da je fluid jednofazan, u drugom da je dvofazan i u trećem da je višefazan.

Sve tri analize testa porasta tlaka prema interpretacijama pripadajućih log-log dijagrama ukazuju da nužna stabilizacija tlaka na kraju testa nije u potpunosti zadovoljena, što prema uvjetu tzv. PTA analize znači da nije dosegnut tzv. neograničeno djelujući radijus, odnosno da bi primijenjena rješenja postavljenog analitičkog modela mogla dati odstupanja u točnosti rezultata. Iz dijagrama se može zaključiti da do potpunog preklapanja mjerenih i modeliranih krivulja najvjerojatnije nije došlo radi blizine rasjeda, no modelirane linije ipak dobro opisuju cjelokupnu krivulju tlaka i njegovu derivaciju, pa se rezultati mogu uzeti s dovoljnom točnošću.

Najpouzdaniji rezultat dobiven je u 1. analizi, te je propusnost ležišne stijene određena u iznosu od 0,18 mD ($1,78 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$), što nije velika razlika u odnosu na rezultate 2. i 3. analize, ali u kojima je bio veći broj pretpostavki ulaznih PVT parametara, čime je povećano i njihovo odstupanje. Rezultati dviju metoda polulogaritamskih dijagrama iz 1. analize također daju propusnost od oko 0,2 mD ($1,97 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$), pa se prvi rezultat može uzeti s dovoljnom pouzdanošću.

Rezultat za skin faktor odabire se iz 1. analize, jer izravno ovisi o propusnosti i iznosi 3,7, što znači da je bušotina bila dobar kandidat za hidrauličko frakturiranje, jer su njene proizvodne mogućnosti s početnog protoka oko 10m³/dan drastično pale na približno 0,8 m³/dan tijekom 2007. godine, kada je napravljen analizirani test porasta.

7. LITERATURA

1. AGARVAL, R. G., AL-HUSSAINY, R., RAMEY JR., H. J., 1970. An Investigation of Wellbore Storage and Skin Effect in Unsteady Liquid Flow. *SPE Journal*, 10, 3, 279-290, Richardson.
2. BOURDET, D., AYOUB, J. A., PIRARD, Y. M., 1989. Use of Pressure Derivative in Well-Test Interpretation. *SPE Journal of Formation Evaluation*, 4, 2, 293-302, Richardson.
3. BOURDAROT, G. 1998. Well Testing: Interpretation Methods. Center for Petroleum Engineering and Project Development, 333 str, Pariz.
4. ČIKEŠ, M., 2015. Proizvodno inženjerstvo nafte i plina. RGN fakultet, 524 str., Zagreb.
5. HORNER, D. R., 1951. Pressure Build-Up in Wells. Third World Petroleum Congress, Sec. II. 503-523., Hag.
6. HOUZE, O., VITURAT, D., FJAERE, O. S., 2020. Dynamic Data Analysis v5.30, KAPPA, 852 str.
7. INA - INDUSTRIJA NAFTE, d. d., 2014. Tehnička dokumentacija.
8. KAMAL, M. M., PAN Y., 2011. Pressure transient testing under multiphase conditions. Proceedings of the SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, Bahrain, 2528 September, Society of Petroleum Engineers, SPE 141752.
9. KOŠČAK KOLIN, S., 2018. Pouzdanost određivanja propusnosti slabo propusnih plinskih ležišta optimiranjem trajanja testa porasta tlaka, Doktorska disertacija, RGN fakultet, 12.11.2018., 244 str., Zagreb.
10. KOŠČAK KOLIN, S., ČIKEŠ M., BABIĆ V., 2013. Analiza testa porasta tlaka horizontalne bušotine, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Hrvatska.
11. KOŠČAK KOLIN, S., KUREVIJA, T., GREBENAR, D., 2018. Pressure build-up test analysis of the hydrocarbon reservoir system with the multiphase flow, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu.
12. LEE, J., 1982. Well testing. Society of petroleum engineers.
13. LEE, J., ROLLINS J.B., SPIVEY J.P., 2003. Pressure Transient Testing. Society of Petroleum Engineers, 376 str, Austin, Texas.
14. MACUALO, F. H. E., 2018. Integrated and Revolutionary Well Test Interpretation and Analysis., Reviewed: August 22nd, 2018. Published: November 5th, 2018.

15. PERRINE, R. L., 1956. Analysis of Pressure Build-up Curves Theoretical Foundation of Multiphase Pressure Buildup Analyses, New York: American Petroleum Institute, API-56-482.
16. SAPHIR, 2016. Ecrin Reference Manual (modules: Diamant, Saphir, Topaze, Rubis, Amethyste). KAPPA Engineering.
17. SOLIMAN, M. Y., ANSAH, J., BURRIS, J., STEPHENSON, S., PROETT, M. (2003.): Well Test Analysis in the New Economy. Journal of Canadian Petroleum Technology, 42, 7, 35-43, Calgary.
18. STEWART, G., 2011. Well test design and analysis. Penwell corporation.
19. VALJAK, A., 2021. Analiza testa porasta tlaka hidraulički frakturirane bušotine primjenom programa saphir. Diplomski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, sveučilište u Zagrebu.

Web izvor:

20. KAPPA Engineering overview.,

URL: <https://www.kappaeng.com/software/saphir/overview> (1.3.2022.) Iz

PRILOG

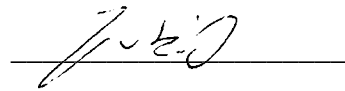
Test porasta tlaka vertikalne bušotine:

Δt	ΔP
0	12,29354
0,333	12,86534
0,833	13,43713
1,333	15,4384
2,333	18,15442
3,333	21,01338
4,333	23,87235
5,333	26,58836
6,333	29,16143
7,333	31,87745
8,333	34,45051
9,333	36,88063
10,333	39,1678
11,333	41,59792
12,333	43,88509
13,333	46,17226
14,333	48,45944
15,333	50,60366
16,333	52,31904
17,333	54,46326
18,333	56,29837
19,333	58,25901
20,333	60,0796
21,333	61,90019
22,333	63,4407
23,333	65,12124
24,333	66,66175
25,333	68,20225
26,333	69,8828

27,333	71,28325
28,333	72,82376
29,333	74,22421
30,333	75,48462
32,333	78,28554
34,333	80,80636
36,333	83,18714
38,333	85,42787
40,333	87,6686
45,333	92,15006
50,333	96,07134
55,333	99,43244
60,333	101,9533
65,333	104,194
70,333	106,0146
80,333	108,8155
90,333	110,4968
100,333	111,6228
120,333	113,4527
140,333	114,438
160,333	115,8456
200,333	116,831
250,333	117,394
300,333	117,9571
359,083	118,5201

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj diplomski rad pod naslovom „Analiza testa porasta tlaka vertikalne bušotine primjenom programa saphir“ izradio samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'N. Jukić', is written over a horizontal line.

Nikola Jukić



KLASA: 602-01/22-01/51
URBROJ: 251-70-12-22-2
U Zagrebu, 09.09.2022.

Nikola Jukić, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/22-01/51, URBROJ: 251-70-12-22-1 od 14.04.2022. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

ANALIZA TESTA PORASTA TLAKA VERTIKALNE BUŠOTINE PRIMJENOM PROGRAMA SAPHIR

Za mentoricu ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada Doc.dr.sc. Sonja Koščak Kolin nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentorica:

(potpis)

Doc.dr.sc. Sonja Koščak Kolin

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)



Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)