Simulacija hidrodinamičkih testova

Resanović, Filip

Master's thesis / Diplomski rad

2015

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:169:628962

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKLUTET

Diplomski studij naftnog rudarstva

SIMULACIJA HIDRODINAMIČKIH TESTOVA

Diplomski rad

Filip Resanović

N124

Zagreb, 2015.

Sveučilište u Zagrebu Diplomski rad

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

SIMULACIJA HIDRODINAMIČKIH TESTOVA

Filip Resanović

Diplomski rad je izrađen na: Sveučilištu u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu

Zavodu za naftno inženjerstvo

Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Izrađen je simulacijski model za interpretaciju hidrodinamičkih testova, tj. protočnog testa i testa porasta tlaka, za nekoliko tipskih slučajeva protjecanja u pribušotinskoj zoni. Modeli su simulirani uz pomoć ležišnog simulatora Eclipse. Na temelju simulacijskih rezultata tlakova i protoka provedena je interpretacija hidrodinamičkih testova u programu Ecrin i analitički pomoću tabličnog kalkulatora (MS Excel). Uspoređivano je poklapanje ulaznih ležišnih parametara modela, prvenstveno propusnosti, s ležišnim parametrima koji se dobiju intepretacijom hidrodinamičkih testova kako bi se uskladilo petrofizikalne podatke pribušotinske zone u modelu. Na ovaj način pokazano je kako je moguće definirati heterogenu pribušotinsku zonu, ali i simulirati hidrodinamičke testove u vremenu duljem nego što se izvode hidrodinamički testovi u stvarnosti, što osobito ima potencijalnu primjenu za slabopropusne formacije.

Ključne riječi: hidrodinamički testovi, simulacije, Eclipse, Ecrin, protočni test, test porasta tlaka

Diplomski rad sadrži: 47 stranica, 6 tablica, 12 slika i 21 referencu

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta

Pirottijeva 6, 10 000 Zagreb

Mentor: Dr.sc. Domagoj Vulin, docent RGNF-a

Ocjenjivači:

1. Dr.sc. Domagoj Vulin, docent RGNF-a
2. Dr. sc. Katarina Simon, redovita profesorica RGNF-a
3. Dr. sc. Tomislav Kurevija, docent RGNF-a

Datum obrane: 10. rujna 2015.

University of Zagreb Master's thesis

Faculty of Mining, Geology

and Petroleum engineering

WELL TESTS SIMULATION

Filip Resanović

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

Abstract

Reservoir simulation model has been made for pressure transient testing interpretation, i.e. flow test and pressure buildup test for a few typical cases of flow in near wellbore zone. Models were simulated with Eclipse reservoir simulator. On the basis of pressure and production simulation results, numerical well test interpretation was made by using software Ecrin and analytically by using spreadsheet calculator (MS Excel). Input model parameters, primarily permeability, were compared with reservoir parameters which were calculated from well tests. This was done in order to adjust petrophysical data of the near wellbore zone in the model. By doing this it was shown that it is possible to define heterogeneous permeability near wellbore zone, but also to simulate well tests for much longer period of time than it is usually done in practice. This especially has potential application for low permeability formations.

Keywords: well testing, reservoir simulation, Eclipse, Ecrin, flow test, pressure buildup test

Thesis contains: 47 pages, 6 tables, 12 figures and 21 references

Original in: Croatian

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

Supervisor: PhD. Domagoj Vulin, Assistant Professor

Reviewers: 1. PhD. Domagoj Vulin, Assistant Professor
2. PhD. Katarina Simon, Full Professor
3. PhD. Tomislav Kurevija, Assistant Professor

Date of defense: September 10, 2015.

Sadržaj

1. Uvod 1

2. Teorija hidrodinamičkih mjerenja 4

2.1. Osnovne jednadžbe radijalnog protoka 4

2.2. Početni i granični uvjeti 6

2.3. Bezdimenzionalni oblik jednadžbe difuzije 8

2.4. Test porasta tlaka 11

2.5. Protočni test 14

3. Teorija ležišnih simulacija 16

3.1. Način rada simulatora 16

3.2. Podjela simulatora s obzirom na vrstu ležišnog fluida 17

3.3. Podjela simulatora s obzirom na način proračuna tlakova i zasićenja 17

3.4. Način primjene 18

3.5. Pregled literature iz područja simulacija radijalnog protoka 18

4. Opis modela ležišta za simulator 20

4.1. Opis bušotine korištene u modelu 21

5. Rezultati 22

5.1. Ležište bez vodonosnika s dvije faze (voda i nafta) 23

5.2. Ležište bez vodonosnika s tri faze (voda, nafta, plin) 25

5.3. Ležište s vodonosnikom i dvije faze (nafta i voda) 28

6. Zaključak 31

7. Literatura 33

8. Dodatak 35

8.1. Primjer ulazne datoteke za simulator ležišta Eclipse za model ležišta s dvije faze 35

8.2. Primjer ulazne datoteke za simulator ležišta Eclipse za model ležišta s dvije faze i vodonosnikom 39

8.3. Primjer ulazne datoteke za simulator ležišta Eclipse za model ležišta s tri faze 43

Popis slika

Slika 2-1. Idealni protočni test (eng. *CRD-Constant rate drawdown*) 11
Slika 2-2. Postupak ucrtavanja tlaka i vremena u testu porasta tlaka 12
Slika 2-3. Stvarni test porasta tlaka 14
Slika 2-4. Tipični grafički prikaz protočnog testa sa konstantnim protokom 15
Slika 4-1. Grafički prikaz modela ležišta, s bušotinom u sredini i vidljivim LGR-om oko bušotine 21
Slika 5-1. Graf ički prikaz testa porasta tlaka za model s dvije faze u programu MS Excel ... 24
Slika 5-2. Grafički prikaz testa porasta tlaka za model s dvije faze iz programa Ecrin 24
Slika 5-3. Grafički prikaz protočnog testa modela s tri faze i 500 ćelija u programu MS Excel 27
Slika 5-4. Grafički prikaz testa porasta tlaka u programu Ecrin za slučaj ležišta s tri faze i 25000 ćelija 27
Slika 5-5. Grafički prikaz modela ležišta s vidljivom ćelijom koja predstavlja vodonosnik .. 28
Slika 5-6. Grafički prikaz porasta tlaka za slučaj ležišta s dvije faze i vodonosnikom u programu Ecrin 29
Slika 5-7. Grafički prikaz porasta tlaka za slučaj ležišta s vodonosnikom u programu MS Excel 30

Popis tablica

Tablica 5-1. Rezultati interpretacije modela s dvije faze i 500 ćelija 23
Tablica 5-2. Rezultati interpretacije modela s dvije faze i 25000 ćelija 23
Tablica 5-3. Rezultati interpretacije modela s tri faze i 500 ćelija..... 26
Tablica 5-4. Rezultati interpretacije modela s tri faze i 25000 ćelija..... 26
Tablica 5-5. Rezultati interpretacije modela s dvije faze i vodonosnikom i 500 ćelija 29
Tablica 5-6. Rezultati interpretacije modela s dvije faze i vodonosnikom i 25000 ćelija 29

Popis korištenih oznaka i kratica

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

c_t - ukupna stlačivost sustava, Pa^{-1},

h - debljina ležišta, m,

k – koeficijent propusnosti, m^2,

k_{rg} - relativna propusnost za plin, dio cij.,

k_{ro} - relativna propusnost za naftu, dio cij.,

m – nagib pravca, bez jedinice

p - tlak, Pa,

p_i - početni tlak u ležištu, Pa,

q - proizvodnja bušotine, m^3/dan,

r - radijus, m,

r_e - vanjski radijus ležišta, m,

r_w - radijus bušotine, m,

S - skin faktor, bez jedinice,

S_g - prosječno zasićenje plinom u ležištu, dio cij.,

S_{wc} - kritično zasićenje vodom u ležištu, dio cij.,

t - vrijeme, s,

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

μ - viskoznost, Pa·s,

ϕ - poroznost, dio cij,

ρ - gustoća fluida, kg/m^3,

ETR - *early time region,*

MTR - *middle time region,*

LTR - *late time region,*

IMPES - *implicit pressure - explicit saturation.*

1. Uvod

Jedan od najvećih problema u ležišnom inženjerstvu je fizikalni opis ležišta. Stoga i rezultati numeričkih simulacija ležišta ovise o kvaliteti petrofizikalnog opisa ležišta na temelju kojega se radi model za simulaciju. Problem točnog opisa ležišta javlja se zbog veličine ležišta, heterogene prirode ležišta i ograničenog broja mjesta tj. bušotina s kojih se mogu vršiti opažanja o ležištu.

Postoji nekoliko načina na koji se mogu dobiti informacije o karakteristikama ležišta:

a) Seizmička mjerenja
b) Informacije dobivene tijekom bušenja (npr. analiza krhotina)
c) Bušotinska karotaža
d) Jezgrovanje uz petrofizikalne analize u laboratoriju
e) Laboratorijske analize sastava fluida i svojstava plinovite i tekuće faze
f) Hidrodinamička mjerenja
g) Analiza perofrmansi ležišta, tj krivulja (pada) proizvodnje

Seizmičkim mjerenjima, podacima iz bušenja te iz bušotinske karotaže mogu se dobiti podaci koji spadaju u tzv. statički model ležišta – dakle podaci o strukturi, litologiji i općenito o geometriji ležišta, zaključno s podacima o poroznosti i početnim zasićenjima, na temelju čega se mogu odrediti zalihe.

Iako se već iz karotažnih mjerenja mogu korelirati propusnost te povezanost kapilarnog tlaka i promjene zasićenja po dubini (Stewart, 2011), protočna svojstva, tj. ponašanje ležišta odredivi su tek nakon prikupljanja pouzdanijih podataka određenih u laboratoriju, a osobito *in situ* tj. hidrodinamičkim mjerenjima.

Laboratorijski, precizno su odrediva svojstva protjecanja jednog (apsolutna propusnost) ili više fluida (relativna propusnost), a specijalnim analizama jezgre, poput mjerenja kapilarnih tlakova, promjene otpornosti po duljini uzorka i sl. precizno se određuju heterogena svojstva na pornoj razini. Također, mjerenjima protočnih svojstava na nizu jezgara dobiva se raspodjela svojstava protjecanja u prostoru, tj. heterogenost propusnosti. Međutim, u prostoru ležišta ovakvi podaci predstavljaju samo „točkaste“ reprezentacije segmenata volumena ležišta, pa najčešće nisu dovoljni za izradu modela ležišta koji će imati niz redova veličina veći volumen od ukupnog volumena mjerenih uzoraka, pa stoga ni statistički ne predstavljaju

reprezentativan uzorak. Takve podatke se najčešće integrira u statički model, korelacijom i usporedbom svojstava iz karotaže, a također ih se koristi i za usporedbe protočnih karakteristika mjerenih hidrodinamičkim testovima.

Hidrodinamički testovi se koriste izvedenicama jednadžbi Darcyevog protjecanja (koje se za infinitezimalne proračune često koristi za određivanje jednadžbe konzervacije mase) te rješenjem parcijalne diferencijalne jednadžbe difuziviteta tlaka. Primjena dotičnih jednadžbi je već odavno detaljno analizirana (Agrawal et al., 1970; Wattenbarger i Ramey, 1970) i popraćena analitičkim rješenjima za niz slučajeva protjecanja, uključujući granice unutar drenažnog radijusa i skin. Takva rješenja su najčešće dobivena Laplaceovom transformacijom analitički, međutim uočeni su slučajevi kad se inverzijom Laplaceove transformacije do rješenja može doći jedino numerički (Agrawal et al. 1970) pošto bi analitički postupak bio previše složen. Za složenije sustave protjecanja tj. one s dvojnom poroznošću i propusnosću također su data numerička rješenja Laplaceove transformacije (Stehfest, 1970). Hidrodinamički testovi zasnovani su na temeljnim jednadžbama protjecanja unutar određenog drenažnog radijusa i obuhvaćaju velik dio volumena protočnog prostora. Problem interpretacije takvih testova nastaje u slučaju velike heterogenosti protočnih svojstava, a također i u slučaju protjecanja više fluida. Podatak propusnosti odnosi se na određeni dubinski interval i drenažni radijus i u tom dijelu je interpretiran ili kao homogen ili kao niz segmenata različite propusnosti osrednjenih nekom statističkom metodom. Također, hidrodinamički testovi se izvode tijekom proizvodnog perioda, čime se radi kompromis između ekonomskih čimbenika (tj. vremena u kojem bušotina ne proizvodi) i kvalitete mjerenih podataka (kvaliteta je proporcionalna duljini mjerenja). Stoga, interpretacija hidrodinamičkih mjerenja postaje složenija za slučaj slabopropusnih ležišta (starih ležišta s oštećenom propusnosti ili formacija zasićenih ugljikovodicima slabe pokretljivosti te nekonvencionalnih ležišta).

U takvim ležištima, kako bi se izmjerilo podatke za cjelovite krivulje (npr. porasta tlaka ili krivulje protoka), potrebno je daleko više vremena nego za ležišta veće propusnosti, često toliko da se mjerenje ne može izvoditi tijekom potrebnog vremenskog intervala. Drugi problem koji se javlja kod takvih ležišta moguće je zorno opisati jednostavnim statističkim razmatranjem svojstava propusnosti. Velika količina podataka za karakterizaciju heterogenosti ležišta (kod Dykstra-Parsonsovog koeficijenta heterogenosti, 1950, u kvantifikaciju heterogenosti se uzima 84.1 % podataka) za slučaj konvencionalnih ležišta kreće se u redu veličina 10^0 do 10^3 mD, dok se u ležištima slabe propusnosti i dalje pojavljuju propusnosti reda veličine 10^3 mD što je teško interpretirati hidrodinamičkim procjenama

prosječnih propusnosti koje se kreću između 10^{-1} i 10^{0} mD. To znači da je, broj redova veličina propusnosti koje se javljaju u protočnim strujnicama u ležištu slabe propusnosti višestruko veći nego u konvencionalnim ležištima. U naftnoj struci se već više od dva desetljeća za provjeru i interpretaciju hidrodinamičkih testova koriste i numerički simulatori (Horne, 1994). U radu su načinjeni modeli koji se odnose na tipske slučajeve protjecanja:

a) volumetrijsko ležište zasićeno s naftom i vodom,
b) volumetrijsko ležište s naftom, vodom i plinom,
c) ležište s naftom, vodom, plinom i vodonosnikom.

Za modeliranje je korišten simulator ECLIPSE tvrtke Schlumberger. Za analizu hidrodnamičkih mjerenja su korišteni izlazni podaci iz simulatora o dinamičkim tlakovima u bušotini i protocima u bušotini. Zatim su uz pomoć programa Ecrin i MS Excel izrađene interpretacije testa porasta tlaka i protočnog testa na temelju izlaznih podataka iz simulatora. Podaci dobiveni o ležištu interpretacijama hidrodinamičkih mjerenja, prvenstveno propusnost, uspoređivani su s ulaznim podacima u modelu. Uspoređivanjem ovih dviju vrijednosti može se doći do zaključaka o vjerodostojnosti ulaznog modela ležišta.

Analize su rađene pod hipotezom da se može uskladiti analitičko i numeričko rješenje, te simulacijskim modelom vremenski „ekstrapolirati“ podatke mjerene hidrodinamičkim testom.

2. Teorija hidrodinamičkih mjerenja

2.1. Osnovne jednadžbe radijalnog protoka

Kako bi se razumjelo teoriju hidrodinamičkih mjerenja potrebno je razumjeti i osnovne jednadžbe protoka u ležištu. Točnije, potrebno je razumjeti jednadžbu nestacionarnog, jednofaznog i jednodimenzionalnog protoka u ležištu. Prije izvođenja ove jednažbe potrebne su sljedeće pretpostavke:

1) Ležište je homogeno i izotropno u smislu poroznosti i propusnosti, a uz to ova dva parametra nisu funkcija tlaka
2) Proizvodna bušotina raskriva proizvodnu formaciju cijelom debljinom čime se osigurava potpuni radijalni protok
3) Ležište je u potpunosti zasićeno jednim fluidom

Osnovna jednadžba radijalnog protoka dobiva se kombinacijom jednadžbe kontinuiteta (2-1) i Darcyevog zakona (2-2).

Jednadžba kontinuiteta glasi:

$$\frac{1}{r}\frac{\delta(r\rho u_r)}{\delta r} = -\phi\frac{\delta\rho}{\delta t} \tag{2-1}$$

gdje je:

r - radijus, m

ρ - gustoća fluida, kg/m^3

u_r - volumetrijski tok (površinska brzina), m/s

ϕ - poroznost, %

t - vrijeme, s

a Darcy-ev zakon:

$$u_r = -\frac{k}{\mu}\frac{\delta p}{\delta r} \tag{2-2}$$

gdje je:

k - koeficijent propusnosti, m^2

μ - viskoznost, Pa·s

p - tlak, Pa

Kombiniranjem jednadžbi (2-1) i (2-2) proizlazi:

$$\frac{1}{r}\frac{\delta\left(\frac{r\rho k}{\mu}\frac{\delta p}{\delta r}\right)}{\delta r} = \phi\frac{\delta\rho}{\delta t} \tag{2-3}$$

Jednadžba (2-3) je temeljna parcijalna diferencijalna jednadžba koja opisuje nestacionarni radijalni protok jednofaznog fluida u poroznom mediju, uz uvjet da je protok laminaran. Bitno je primijetiti da je ova jednadžba nelinearna budući da su i gustoća ρ i propusnost k funkcije ovisne varijable tlaka. Za razliku od linearnih parcijalnih diferencijalnih jednadžbi, nelinearne jednadžbe nemaju analitičko rješenje stoga je poželjno provesti linearizaciju jednadžbe radijalnog protoka.

Nakon uvođenja dodatnih pretpostavki i matematičkim preuređivanjem dobiva se linearna parcijalna diferencijalna jednadžba radijalnog protoka:

$$\frac{\delta^2 p}{\delta r^2} + \frac{1}{r}\frac{\delta p}{\delta r} = \frac{\phi c_t \mu}{k}\cdot\frac{\delta p}{\delta t} \tag{2-4}$$

Gdje je:

c_t - ukupna stlačivost sustava (stijene s fluidom u pornom prostoru), Pa^{-1}

Jednadžba (2-4) dobro opisuje protok kapljevina, međutim ova jednostavna linearizacija daje dobre rezultate tlaka jedino ako vrijedi pretpostavka da su gradijenti tlaka $\delta p / \delta r$ veoma mali i ako je ispunjen slijedeći uvjet: $c_t p << 1$.

2.2. Početni i granični uvjeti

Kako bi se pronašlo jedinstveno rješenje jednadžbe (2-4) potrebno je uvesti početne i granične uvjete. Rješenja koja su najpoželjnija u razvoju analize hidrodinamičkih mjerenja su ona za slučaj utoka fluida konstantnim protokom, q u bušotinu koja se nalazi u središtu ležišta. Pretpostavka je da je ležište cilindričnog oblika.

a) Početni uvjeti

Prije nego što započne bilo kakav protok, pretpostavlja se da u cijelom ležištu vlada početni tlak, p_i.

$$p(r, o\text{-}) = p_i, \ r_w \le r \le r_e \tag{2-5}$$

Gdje o- označava bilo koje vrijeme prije vremena t=0.

Gdje su:

p - tlak na određenom radijusu od kanala bušotine i u određenom vremenu, Pa
p_i - početni tlak u ležištu, Pa
r_w - radijus bušotine, m
r_e - vanjski radijus ležišta, m

b) Unutarnji granični uvjet - konstantan protok na unutarnjoj granici ležišta

Kod vremena t = 0 bušotina počinje proizvoditi protokom koji se održava konstantnim. Protok fluida q_s se mjeri na površini, stoga je protok fluida u bušotini $q=q_sB$, gdje je B volumni faktor, tj. omjer volumena faze pri ležišnim uvjetima i volumena iste te faze pri površinskim uvjetima. Premda je B funkcija tlaka, tretira se kao konstanta izmjerena pri početnom tlaku. Primjenom Darcy-evog zakona dobiva se sljedeća jednadžba za protok fluida na unutarnjoj granici ležišta:

$$\left.\frac{\delta p}{\delta r}\right|_{r=rw} = -\frac{q_s B\mu}{2\pi kh}\cdot\frac{1}{r_w}, t \ge 0 \tag{2-6}$$

Gdje je:

h - debljina ležišta, m

Ovime se nameće ograničenje na gradijent tlaka neposredno uz bušotinu koje je poznato pod nazivom *granični uvjet drugog tipa*.

c) Vanjski granični uvjet

Kod određivanja vanjskog graničnog uvjeta, javljaju se tri specifična slučaja, s tim da svaki odgovara određenoj fizikalnoj situaciji. Radi se o sljedeća tri slučaja:

1) Neograničeno ležište

Pretpostavka je da se bušotina nalazi u šupljikavom mediju koji se proteže u beskonačnost. Ova pretpostavka je valjana za ograničeno ležište kod kojeg poremećaj tlaka prouzročen protokom na bušotini još nije dosegao vanjske granice ležišta.

Ovaj uvjet se može matematički izraziti na sljedeći način:

$$p(r,t) = p_i \quad \text{kada } r \to \infty,\ t > 0 \tag{2-7}$$

2) Ograničeno ležište

Pod pretpostavkom da se bušotina nalazi u središtu cilindričnog ležišta kod kojeg nema protoka na vanjskoj granici, uvjet da nema protoka podrazumijeva i da gradijent tlaka na vanjskoj granici mora biti jednak nuli, tj.:

$$\left.\frac{\delta p}{\delta r}\right|_{r=re} = 0,\ t > 0 \tag{2-8}$$

3) Konstantan tlak na vanjskoj granici

Pretpostavka jest da se bušotina nalazi u središtu cilindričnog ležišta, gdje je tlak na vanjskoj granici konstantan tj. jednak vrijednosti početnog tlaka. U fizikalnom smislu ovo odgovara slučaju ležišta s prisutnim vodonosnikom koji podržava tlak u ležištu.

$p(r_e, t)=p_i,\ t > 0$

2.3. Bezdimenzionalni oblik jednadžbe difuzije

Zbog nekoliko razloga, mnogo je praktičnije izraziti jednadžbu difuzije pomoću bezdimenzionalnih varijabli (Dake, 1978):

1) Bezdimenzionalne varijable omogućuju pojednostavljenje i općenitost jednadžbi. Pod općenitost se misli na to da ako se radijalni protok bilo kojeg fluida može opisati jednadžbom (2-13), onda će rješenje ove jednadžbe biti neovisno o svojstvima tog fluida.
2) Budući da su varijable bezdimenzionalne, jednadžbe koje su izražene pomoću ovakvih varijabli bit će identične bez obzira koji se sustav jedinica primjenjivao.
3) Većina stručnih članaka na ovu temu imaju sve jednadžbe izražene u bezdimenzionalnome obliku.

Bezdimenzionalne varijable se definiraju na slijedeći način:

Bezdimenzionalni radijus: $$r_D = \frac{r}{r_w} \tag{2-10}$$

Bezdimenzionalno vrijeme: $$t_D = \frac{kt}{\varphi \mu c_t r_w^{\ 2}} \tag{2-11}$$

Bezdimenzionalni tlak: $$p_D = \frac{2\pi kh}{q_s B \mu}(p_i - p) \tag{2-12}$$

Na kraju, supstitucijom bezdimenzionalnih varijabli, jednadžba difuzije poprima bezdimenzionalni oblik:

$$\frac{\delta p_D}{\delta t_D} = \frac{1}{r_D} \frac{\delta\left(r_D \frac{\delta p_D}{\delta r_D} \right)}{\delta r_D} \tag{2-13}$$

Hurst i Everdingen (1949) su prezentirali analitičko rješenje jednadžbe difuzije primjenjivo na probleme iz ležišnog inženjerstva. Njihovo rješenje je dobiveno primjenom Laplace-ove transformacije na jednadžbu difuzije. Analitičko rješenje jednadžbe je slijedeće:

$$p_D(r_D, t_D) = -\frac{1}{2} Ei\left(-\frac{r_D{}^2}{4t_D}\right) \tag{2-14}$$

Gdje je *Ei* matematička funkcija nazvana *eksponencijalni integral*, a definirana je na slijedeći način:

$$Ei(-x) = -\int_x^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \tag{2-15}$$

i

$$Ei(x) = \int_x^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \tag{2-16}$$

Stoga Ei(-x) = Ei(x). Kada je x vrlo mali, tj x<0,01, eksponencijalni integral se može približno opisati jednostavnom logaritamskom funkcijom:

$$-Ei(-x) = Ei(x) = -\ln(\gamma x) \tag{2-17}$$

Gdje γ predstavlja bazu prirodnog logaritma (e) na potenciju Eulerove konstante (0,5772), što iznosi 1,781. Stoga se analitičko rješenje jednadžbe difuzije može napisati u jednostavnijem obliku:

$$p_D(r_D, t_D) = \frac{1}{2}\left[\ln(t_D / r_D{}^2) + 0,80907\right] \tag{2-18}$$

Jednadžba (2-18) vrijedi uz slijedeći uvjet:

$$\frac{r_D{}^2}{4t_D} < 0.01 \tag{2-19}$$

Srećom, u praksi je ovaj uvjet gotovo uvijek ispunjen.

Aproksimativno analitičko rješenje jednadžbe izraženo u stvarnim varijablama glasi:

$$p(r,t) = p_i - \frac{q_s B\mu}{2\pi kh} \cdot \frac{1}{2}\left(\ln\frac{kt}{\phi\mu c_t r^2} + 0,80907\right) \tag{2-20}$$

Prethodne jednadžbe daju vrijednost tlaka kao funkciju vremena i radijusa, međutim u praksi najbitniji podatak je tlak u samoj bušotini jer ovo je mjerljiva vrijednost kod hidrodinamičkih testova. U ovom je slučaju bezdimenzionalni radijus r_D=1, stoga:

$$p_D(1,t_D)=\frac{1}{2}\left[\ln t_D+0,80907\right] \tag{2-21}$$

Do sada je analizirano ponašanje dinamičkog tlaka unutar formacije, međutim potrebno je povezati ovaj tlak sa dinamičkim tlakom unutar same bušotine tj. sa mjerenim tlakom. Tlak u neposrednoj okolini bušotine označava se p_w, a tlak u samoj bušotini p_{wf}. U stvarnosti ove dvije vrijednosti nikada neće biti jednake zbog načina opremanja bušotine. Pad tlaka neposredno uz bušotinu naziva se *skin efekt* i pretpostavlja se da se događa u neizmjerno maloj *skin zoni* uz bušotinu gdje je smanjena propusnost formacije. Stoga, dinamički tlak na dnu bušotine se može izraziti kao:

$$p_{wf}(t)=p_w(t)+\Delta p_s \tag{2-22}$$

Bezdimenzionalni pad tlaka radi *skin efekta* se označava sa *S* i definira kao:

$$S=\frac{\Delta p_s}{\frac{q_s B\mu}{2\pi kh}} \tag{2-23}$$

S - skin faktor, bez jedinice

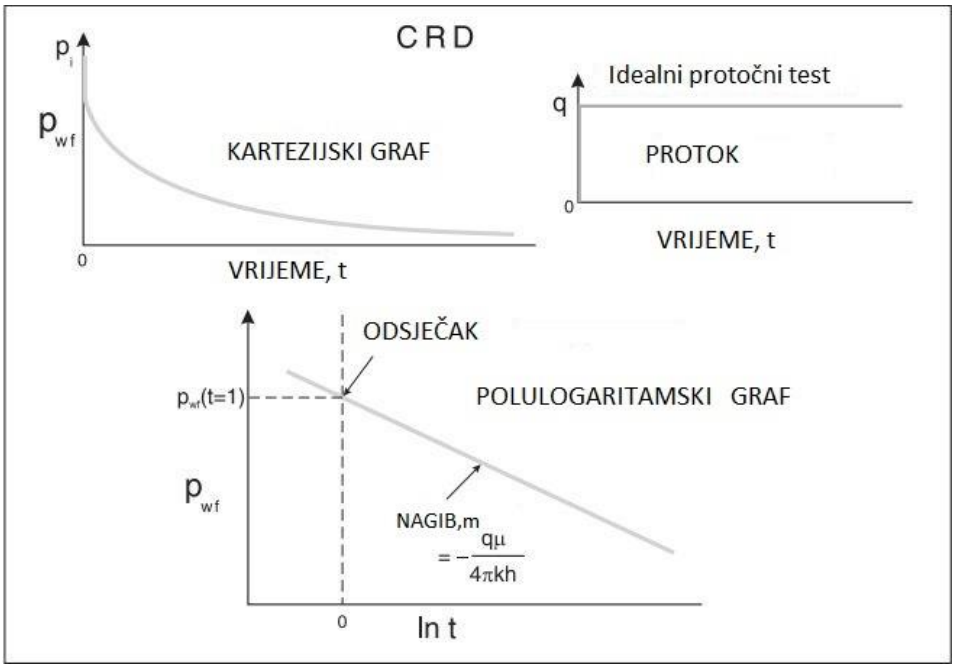
Konačno, jednadžba protoka izražena preko bezdimenzionalnih varijabli s uključenim dodatnim padom tlaka zbog *skin efekta* glasi:

$$p_{wfD}=\frac{1}{2}\left[\ln t_D+0,80908+2S\right] \tag{2-24}$$

Odgovarajuća jednadžba u transformacijom iz bezdimenzionalnih u stvarne varijable postaje:

$$p_{wf}(t)=p_i-\frac{q_s B\mu}{2\pi kh}\cdot\frac{1}{2}\left(\ln\frac{kt}{\phi\mu c_t r_w^2}+0,80907+2S\right) \tag{2-25}$$

Očigledno je kako će grafički prikaz ove funkcije, ukoliko se ucrta u polulogaritamskom mjerilu, dati pravac kao što se vidi na slici 2-1, iz čijeg nagiba je moguće odrediti prosječnu propusnost ležišta *k*, a iz čijeg odsječka je moguće odrediti skin *S*. Na ovome se temelji analiza hidrodinamičkih mjerenja u bušotini. Potrebno je napomenuti kako se u kontekstu hidrodinamičkih mjerenja često miješaju pojmovi ležište i drenažni radijus, tj. korektnije bi bilo reći da se iz nagiba dotičnog pravca određuje prosječna propusnost heterogene pribušotinske zone do drenažnog radijusa.



Slika 2-1. Idealni protočni test (eng. *CRD-Constant rate drawdown*)

2.4. Test porasta tlaka

Test porasta tlaka je najčešće primjenjivani test za određivanje podataka o ležištu. Test se provodi na proizvodnoj bušotini koja je proizvodila neko vrijeme konstantnim protokom, zatim se bušotina zatvori (obično na površini). Zatvaranje bušotine uzrokuje porast tlaka u bušotini koji se mjeri manometrom koji se obično nalazi na dnu bušotine. Mjereni tlak se bilježi u odnosu na vrijeme. Iz ovih podataka moguće je odrediti propusnost formacije, trenutnu površinu crpljenja i odrediti oštećenje ili stimulaciju pribušotinske zone. Najčešća korištena procedura za test porasta tlaka je Hornerova (1951) metoda. Interpretacija je moguća i pomoću tipskih krivulja. Kod Hornerove analize porasta tlaka, mjereni tlak p_{ws} se ucrtava u polulogaritamskom mjerilu u odnosu na $(t_p+\Delta t)/\Delta t$, gdje je Δt vrijeme proteklo od zatvaranja bušotine, a t_p vrijeme proizvodnje definirano kao:

$$t_p(sati) = 24\frac{kumulativna\ proizvodnja\ bušotine, N_p(m^3)}{posljednja\ proizvodnja, q_{zadnja}(m^3/dan)} \tag{2-26}$$

Praktično je vrijeme ucrtavati u satima kao glavnu jediničnu vrijednost mjerenja vremena, a također i proizvodnju u m^3/dan, pošto često ne postoje podaci o proizvodnji po satu, nego samo po danu. Ako se ucrtaju vrijednosti tlaka p_{ws} na ordinati u odnosu na

$(t_p+\Delta t)/\Delta t$ na apscisi, dobiva se pravac (slika 2-2.) iz čijeg nagiba je moguće odrediti propusnost koristeći sljedeću formulu:

$$m = 311{,}81\frac{qB\mu}{kh} \tag{2-27}$$

Gdje su:

m - nagib pravca, bez jedinice,

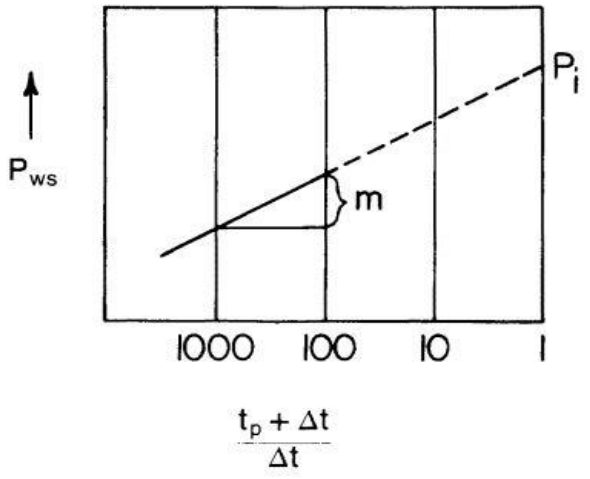
B - volumni faktor nafte, bez jedinice,

h - debljina ležišta, m.

q - proizvodnja bušotine, m^3/dan,

Također ako se ekstrapolira pravac do beskonačnog vremena zatvaranja (tj. $(t_p+\Delta t)/\Delta t = 1$), tlak u toj točci je jednak početnom tlaku u ležištu p_i.

Uobičajena je praksa da se vrijednosti $(t_p+\Delta t)/\Delta t$ ucrtaju tako da se vrijednosti smanjuju s lijeva na desno. Nagib pravca m na takvom grafu je moguće odrediti oduzimanjem tlakova na bilo koje dvije točke koje su odvojene jednim ciklusom (faktor 10) na polulogaritamskom papiru.



Slika 2-2. Postupak ucrtavanja tlaka i vremena u testu porasta tlaka (Lee, 1982)

Kao što je već navedeno, iz podataka testa porasta tlaka moguće je odrediti i skin faktor, odnosno oštećenje ili stimulaciju pribušotinske zone. Uobičajena je praksa u naftnoj industriji

da se odabere fiksno vrijeme zatvaranja Δt od 1 sat i pripadajući tlak p_{1hr}. Zatim se pomoću sljedeće jednadžbe određuje skin faktor:

$$s = 1{,}151\left[\frac{(p_{1hr} - p_{wf})}{m} - \log\left(\frac{k}{\phi\mu c_t r^2_w}\right) + 3{,}23\right] \tag{2-28}$$

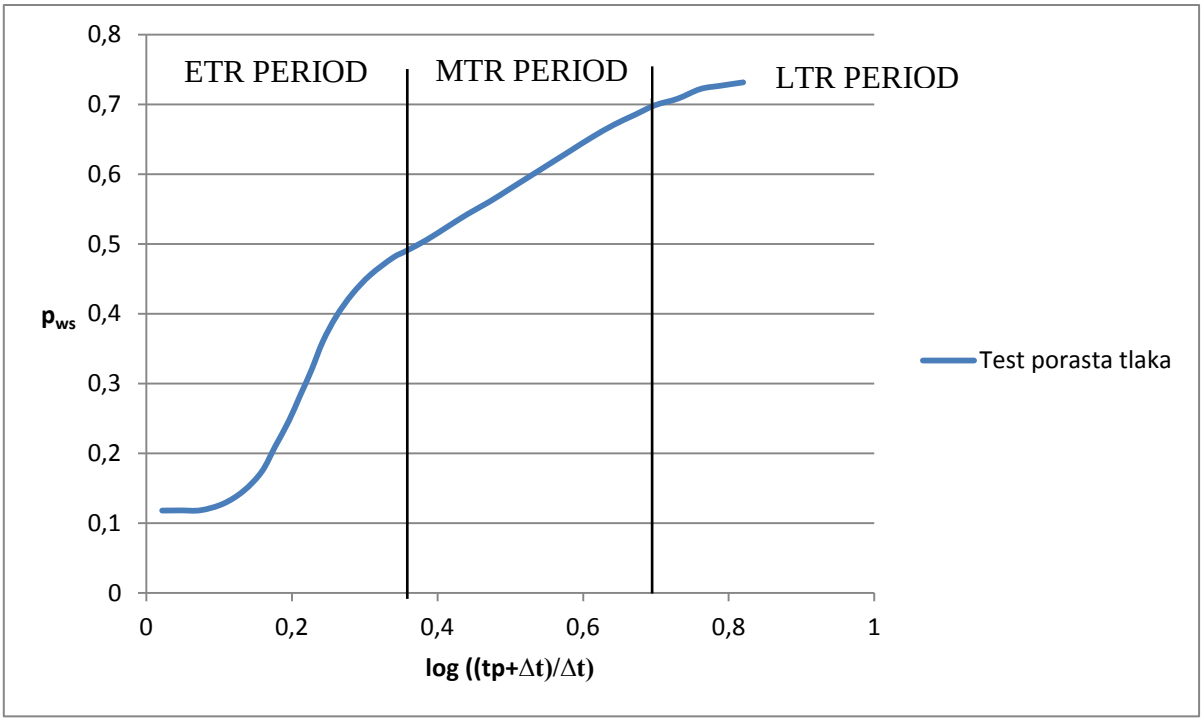
Iako bi u teoriji rezultirajući grafički prikaz testa porasta tlaka trebao biti pravac, u praksi se dobiva krivulja nepravilnog oblika (slika 2-3.). Krivulju stvarnog testa porasta tlaka moguće je podijeliti na 3 perioda:

1) ETR (eng. *early time region*) period tijekom kojeg se poremećaj tlaka prouzrokovan zatvaranjem bušotine kreće kroz dio formacije najbliži bušotini
2) MTR (eng. *middle time region*) period tijekom kojeg se poremećaj tlaka odmaknuo od bušotine dalje u formaciju
3) LTR (eng. *late time region*) period tijekom kojega su dosegnute granice ležišta

ETR period je prouzrokovan promijenjenom propusnošću u pribušotinskoj zoni koja je različita od propusnosti ostatka formacije, stoga nema razloga očekivati u ovom periodu da će grafički prikaz biti pravac. U ETR periodu postoji još jedna komplikacija. Naime, nakon zatvaranja bušotine utok fluida u bušotinu ne prestaje istog trenutka već se on nastavlja neko vrijeme zbog stlačivosti ležišnog fluida.

U MTR periodu poremećaj tlaka se odmaknuo od zone promijenjene propusnosti i prestao je dodatni utok fluida u bušotinu, stoga u ovom periodu grafički prikaz će doista biti pravac. Zbog toga je i cilj interpretacije testa porasta tlaka odrediti MTR period iz kojeg možemo odrediti tražene podatke o ležištu.

U LTR periodu poremećaj tlaka je dosegao granice ležišta. U ovom periodu na ponašanje tlaka utječe oblik granice ležišta, obližnje bušotine, značajne heterogenosti ležišta itd.



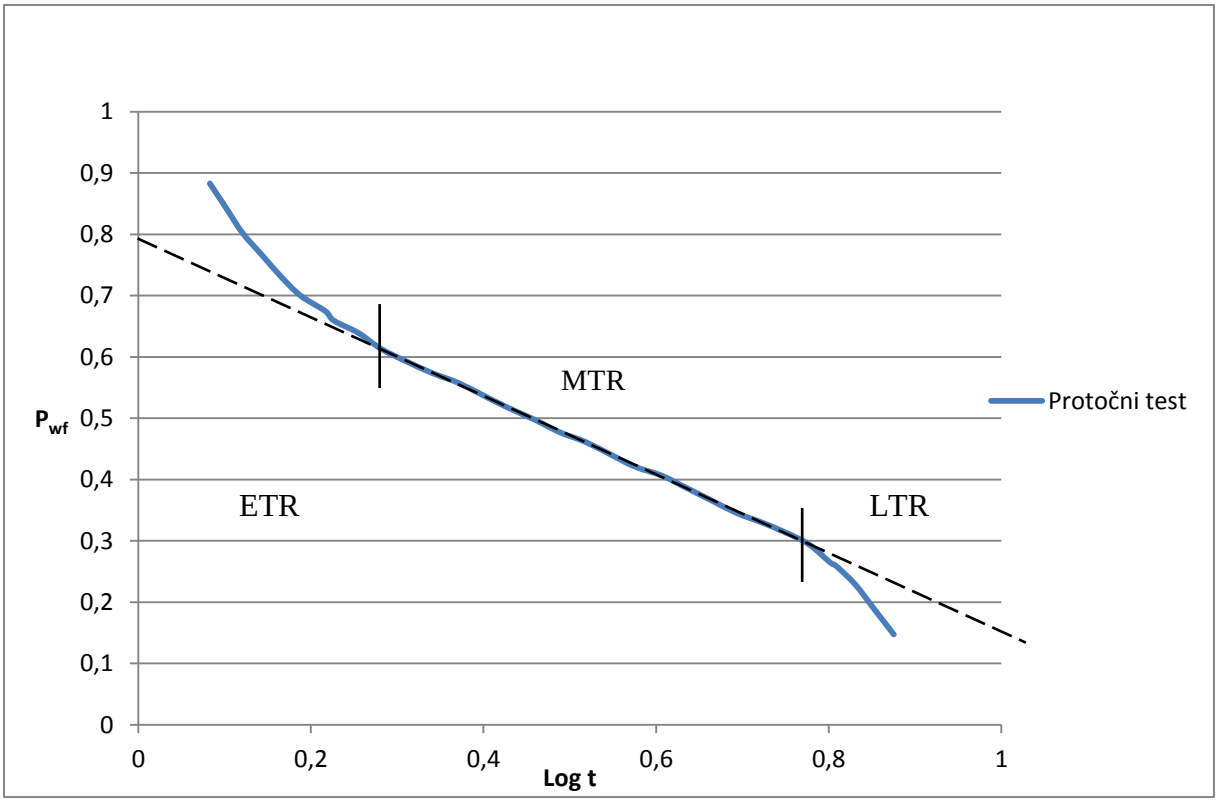
Slika 2-3. Stvarni test porasta tlaka

2.5. Protočni test

Protočni test se provodi tako da se bušotina pusti u proizvodnju, idealno kada je tlak jednolik u ležištu tj. kad je uspostavljen ustaljen protok (eng. *steady state*). Potom se tlak mjeri kao funkcija vremena.

Ciljevi protočnog testa su određivanje propusnosti, skin faktora i ponekad obujma ležišta. Ovi testovi su posebno pogodni za bušotine koje su tek puštene u proizvodnju, za bušotine koje proizvode dovoljno dugo da je prošlo dovoljno vremena da se tlak ustali i za bušotine na kojima bi financijski gubitci zatvaranjem bušotine za test porasta tlaka bili neprihvatljivi. Istražne bušotine su česti kandidati za protočni test čiji je cilj određivanje minimalnog ili ukupnog obujma ležišta koji bušotina crpi.

Poput testa porasta tlaka, stvarni protočni testovi su kompleksniji od teoretskih. Tipični test također ima ETR, MTR i LTR period (slika 2-4.). U ETR periodu bušotina se „prazni“ tj. protok kojim fluid napušta bušotinu je veći od onoga kojim fluid utječe u bušotinu, ovo je tako sve dok se ne postigne ravnoteža.



Slika 2-4. Tipični grafički prikaz protočnog testa sa konstantnim protokom

Jednadžbe za određivanje propusnosti *k*, iz nagiba pravca *m* i za određivanje skin faktora *S* su iste kao i za test porasta tlaka.

3. Teorija ležišnih simulacija

Pojam ležišnih simulacija podrazumijeva zaključivanje o ponašanju stvarnog ležišta na temelju ponašanja numeričkog modela istog ležišta.

3.1. Način rada simulatora

Upotreba simulatora ležišta kao alata za predviđanje ponašanja ležišta postala je standard u naftnoj industriji. Za to postoje dva glavna razloga

- razvoj digitalnih računala (posebice povećanje brzine procesora i povećanje memorije računala) i
- razvoj novih tehnika u matematici iz područja numeričke analize.

U ležišnoj simulaciji, skup algebarskih jednadžbi, dobiven iz skupa parcijalnih diferencijalnih jednadžbi, aproksimativno opisuje ponašanje ležišta. Ove jednadžbe uključuju većinu fizikalnih procesa koji se događaju u ležištu. Prednost ovog pristupa u odnosu na analitičke metode je da je potreban najmanji broj pojednostavljujućih pretpostavki za heterogenost ležišta, prijenos mase između faza itd. Također, promjene svojstava stijene, svojstva fluida i relativne propusnosti mogu biti točno predstavljeni u simulatoru, što je još bitnije, mogu biti adekvatno smješteni u prostoru. Kada bi se jednadžbe koje opisuju fizikalne procese u ležištu rješavalo analitički, dobile bi se vrijednosti tlakova i zasićenja kao kontinuiranu funkciju vremena i položaja. Međutim, zbog nelinearne prirode jednadžbi, analitičke metode rješavanja jednadžbi se ne mogu primijeniti, već se moraju koristiti numeričke metode rješavanja. Za razliku od analitičkih, numerička rješenja daju vrijednosti tlaka i zasićenja samo u diskretnim točkama u ležištu. Diskretizacija je potrebna zbog konverzije parcijalnih diferencijalnih jednadžbi u algebarske jednadžbe kako bi se mogla koristiti npr. metoda *konačnih razlika*, čime se preko ležišta preklapa mreža (engl. *grid, mesh*, slika 4-1.). Općenito, analitičke metode kao što je analiza hidrodinamičkih mjerenja predstavljaju egzaktna rješenja pojednostavljenih problema, s druge pak strane numeričke metode, kao što je ležišna simulacija, predstavljaju rješenja problema opisanih što egzaktnijim tj. realističnijim modelom. (Ertekin et al, 2001).

3.2. Podjela simulatora s obzirom na vrstu ležišnog fluida

Jedna od klasifikacija softvera za simulaciju ležišta temelji se na vrsti ležišnog fluida. U tom slučaju softveri za simulaciju se dijele na one koji koriste tablične podatke o fluidu (engl. *black oil*) i tzv. komponentne softvere za simulaciju, tj. one koji koriste jednadžbu stanja i sastav fluida (engl. *Compositional*). (Chen, 2007). *Black oil* simulatori se koriste u slučajevima kada dobivene vrijednosti iscrpka nisu osjetljive na promjene u sastavu fluida u samom ležištu, tj. kada su fazne promjene jednostavne. *Compositional* simulatori se koriste kada su dobivene vrijednosti iscrpka osjetljive na promjene u sastavu ležišnog fluida (npr. plinsko-kondenzatna ležišta). *Compositional* simulatori koriste jednadžbu stanja za opis volumetrijskih i faznih promjena fluida te su pogodniji za simulacije mješivog utiskivanja, retrogradnih sustava ili sustava ugljikovodika čiji se p,T uvjeti nalaze blizu kritične točke. *Black oil* simulatori temelje proračun na ulaznim pVT tablicama, koje su sastavni dio pVT izvještaja iz laboratorija.

3.3. Podjela simulatora s obzirom na način proračuna tlakova i zasićenja

Što se tiče načina proračuna zasićenja i tlakova, postoje dvije glavne podjele: *IMPES* (engl. *Implicit pressure – explicit saturation*) proračun i *Fully implicit* proračun (Eclipse manual, 2013). Kod IMPES proračuna se tlakovi u ćelijama računaju implicitno, dok se zasićenja računaju eksplicitno. U drugom načinu proračuna i tlakovi i zasićenja se računaju implicitno. Razlog za uvođenje ovakvih podjela u načinu proračuna leži u fundamentalnoj razlici između eksplicitinog i implicitnog proračuna određenog parametra. Implicitna rješenja su zahtjevnija od eksplicitnih jer je u svakom vremenskom koraku za svaku ćeliju potrebno riješiti sustav linearnih jednadžbi iterativnim postupkom, s druge strane kod eksplicitnog rješenja potrebno je za svaku ćeliju riješiti samo jednu jednadžbu. Međutim, iz numeričke analize poznato je da su implicitna rješenja mnogo stabilnija od eksplicitnih (Pettersen, 2006), tj. kod implicitnih rješenja moguće je uzimati veće vremenske korake dok će kod eksplicitnog rješenja nakon što vremenski korak prijeđe određenu kritičnu vrijednost rješenje divergirati. Stoga iako je implicitno rješenje zahtjevnije, mnogo je prihvatljivije od eksplicitnog zbog svoje stabilnosti.

3.4. Način primjene

Simulacija ležišta se obično provodi u sljedećim koracima (Ertekin et al, 2001):

1) Postaviti ciljeve simulacije. Ciljevi moraju biti kompatibilni s dostupnim podacima o proizvodnji i ležištu
2) Prikupiti podatke o ležištu koji se nakon toga unose u simulator
3) Napraviti preklapanje podataka o proizvodnji (engl. *history matching*). Nakon što je model napravljen, treba ga uskladiti, što se postiže usporedbom rezultata dobivenih simulacijom sa stvarnim podacima o proizvodnji i ležištu te nakon toga eventualnim izmjenama modela u smislu uvođenja heterogenosti zone u drenažnom radijusu i/ili pronalaženjem adekvatne krivulje relativnih propusnosti, podešavanjem pVT svojstava itd. Ovim se potvrđuje vjerodostojnost modela na način da se uvodi više parametara nego što ih je moguće uvesti u standardne metode interpretacije hidrodinamičkih mjerenja koje pretpostavljaju prilično homogen sustav protjecanja.
4) Provesti predviđanja ponašanja ležišta (simulaciju) u budućnosti za različite planove razrade i proizvodnje (ili hidrodinamičkog testa, u slučaju ovog rada).

3.5. Pregled literature iz područja simulacija radijalnog protoka

Sheng (2014) je prezentirao analizu hidrodinamičkih mjerenja na horizontalnoj bušotini koristeći simulacijski pristup. Pokazano je da se u nekim slučajevima kod provođenja hidrodinamičkih mjerenja na horizontalnoj bušotini mjerenja ne mogu interpretirati korištenjem konvencionalnih analitičkih metoda, ali se mogu interpretirati pomoću simulacije ležišta. Prvo je primijenjena metoda „*history matching*“ kako bi se izvršila kalibracija modela, kojim je nakon toga analizirano ponašanje bušotine. Za simulaciju ležišta korišten je Eclipse simulator, a za interpretaciju testova program PanSystem. Na modelu ležišta s jednom bušotinom simulirana su dva testa porasta tlaka i jedan protočni test koji nisu mogli biti analizirani konvencionalnim metodama iz sljedećih razloga:

1) Testovi nisu provedeni pravilno, na primjer: prekratko vrijeme zatvaranja, nedostatak početnih podataka ili nenamjerno zatvaranje bušotine.
2) Analitičkim modelima je bilo teško interpretirati kompleksne testove u konkretnom slučaju usmjerene bušotine u heterogenom ležištu

Utvrđeno je da je proizvodnost horizontalne bušotine lošija od očekivane. Pomoću simulacije hidrodinamičkih testova kalibriran je model. Koristeći kalibrirani model analizirano je ponašanje bušotine. Rezultati analize su pokazali slijedeće razloge loše proizvodnosti bušotine:

1) Efektivna duljina bušotine je bila 60% od ukupne duljine
2) Proizvodnja je bila uglavnom ograničena na intervale visoke propusnosti
3) Slojevi niske propusnosti su sprječavali vertikalni utok u horizontalnu bušotinu

Al-Ismail (2010) je proveo usporedbu tri testa porasta tlaka za bušotinu na plinsko-kondenzatnom ležištu s podacima dobivenim *compositional* simulatorom. Ležišni parametri modela su mijenjani kako bi se dobilo poklapanje sa stvarnim testovima porasta tlaka. Zatim su testovi porasta tlaka dobiveni iz simuliranih podataka analizirani pomoću tri tehnike pseudotlaka: jednofazni pseudotlak, dvofazni pseudotlak za ustaljeno protjecanje i dvofazni pseudotlak za tri zone.

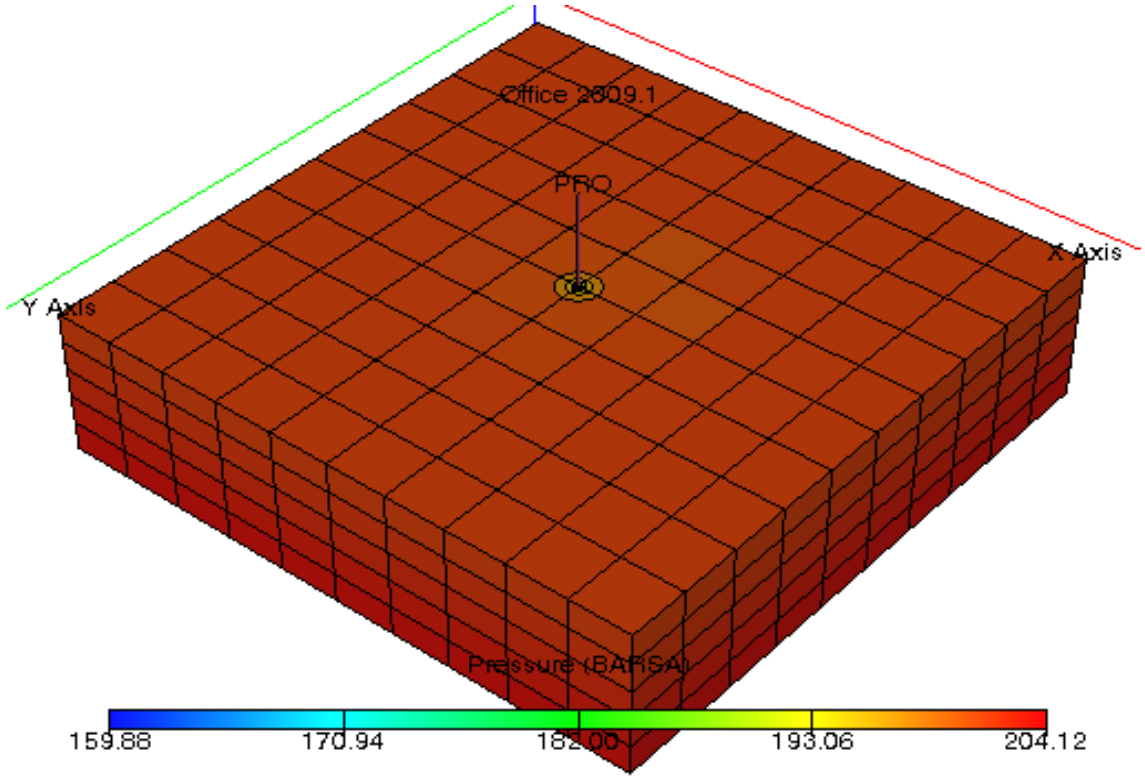
Rezultati su pokazali da se sve tri tehnike mogu koristiti za precizno određivanje propusnosti. Međutim, primijećene su varijacije u određivanju *skin* faktora. Jedino je pomoću tehnike pseudotlaka za tri zone precizno određen *skin* faktor, dok pomoću druge dvije tehnike nije bilo moguće precizno odrediti *skin* faktor.

Yasin (2012) je proveo analizu hidrodinamičkih mjerenja na bušotinama polja Norne u Sjevernom moru na temelju podataka o tlakovima i proizvodnji dobivenim iz simulacije ležišta. Mjerenja su provedena na način da su bušotine proizvodile 10 dana, a zatim bile zatvorene barem 24 sata. U radu je sat osvrt na važnost odnosa tekuće i plinovite faze (engl. *Liquid to Gas Ratio*, LGR), utvrđivanje komunikacije između bušotina preko rasjeda i kompleksnost analize hidrodinamičkih mjerenja na horizontalnim bušotinama. Provođeni su testovi porasta tlaka i testovi interferencije. Na jednoj horizontalnoj bušotini proveden je test porasta tlaka kako bi se utvrdila vertikalna i horizontalna propusnost.

Testovi su interpretirani ručno pomoću jednadžbi, ali također i pomoću software-a F.A.S.T tvrtke Fekete. Zaključno je utvrđeno da podaci o ležištu dobiveni iz analize hidrodinamičkih mjerenja daju slične rezultate kao i ulazni podaci koji su korišteni za izradu simulacijskog modela ležišta.

4. Opis modela ležišta za simulator

Pretpostavljen je dio ležišta pravokutnog oblika, duljine 3500 m, širine 3500 m i debljine 50 m. Korištena su dva modela s različitim brojem ćelija. Prvi model se sastoji od 500 ćelija, s time da je u okolini bušotine koja se nalazi u sredini tlocrta ležišta definirana veća rezolucija modela (napravljen je *local grid refinement, LGR*) od dodatnih 400 ćelija (slika 4-1.). Drugi model se sastoji od 25000 ćelija, a LGR u okolini bušotine se sastoji od dodatnih 800 ćelija. LGR u okolini bušotine je potreban jer u tom području dolazi do najbržih promjena tlakova i zasićenja, stoga je potreban što veći broj ćelija koji opisuje to područje kako bi se smanjio utjecaj *numeričke disperzije*. U Eclipse-u je moguće modelirati dva tipa LGR-a, kartezijski i radijalni, u ovom slučaju korišten je radijalni LGR kako bi simulacija bila kompatibilnija s anačlitičkim proračunima koji koriste jednadžbu radijalnog protjecanja. Vrh ležišta nalazi se na dubini od 2000 m, a dno na 2050 m. Radi jednostavnije usporedbe s podacima dobivenim interpretacijom drugim (analitičkim) metodama zadane propusnosti su u sva tri smjera iste. Poroznost ležišne stijene je 15 %. Tablice relativnih propusnosti su dobivene pomoću Corey-eve korelacije za relativnu propusnost nafte (Corey, 1954) i plina u odnosu na zasićenje plinom i Pirson-ove korelacije (Pirson, 1958) za relativnu propusnost nafte i vode u odnosu na zasićenje vodom (Ahmed, 2010). Stlačivost ležišne stijene je $5{,}76 \cdot 10^{-5}\,\text{bar}^{-1}$, gustoća nafte 856,8 kg/m^3, vode 990 kg/m^3, a plina 0,8 kg/m^3. Kod modela s vodonosnikom, vodonosnik je predstavljen jednom ćelijom i nalazi se u najdubljem sloju na samom rubu ležišta. Iznos poprečne površine vodonosnika je $5 \cdot 10^4\,\text{m}^2$, zadana duljina vodonosnika je 4000 m, a dubina je na 2200 m. Početni tlak u vodonosniku je 210 bar. Propusnost formacije koja sadrži vodonosnik je mijenjana u skladu s promjenama propusnosti samog ležišta za svaki od 4 slučaja ($10 \cdot 10^{-15}$ m^2 (10 md), $20 \cdot 10^{-15}$ m^2 (20 md), $50 \cdot 10^{-15}$ m^2 (50 md) i $100 \cdot 10^{-15}$ m^2 (100 md)). Također je pretpostavljeno da je vodonosnik u komunikaciji s najdubljim slojem ležišta s donje strane.



Slika 4-1. Grafički prikaz modela ležišta, s bušotinom u sredini i vidljivim LGR-om oko bušotine

4.1. Opis bušotine korištene u modelu

Bušotina je smještena u središtu radijalnog LGR-a koji se nalazi u središtu tlocrta ležišta. Njen radijus iznosi 0,3048 m (12 inč) i u komunikaciji je s ležištem kroz svih 5 slojeva ležišta. *Skin* faktor je zadan kao 0, tj. pretpostavlja se da ne postoji oštećenje pribušotinske zone niti da je bušotina stimulirana. Pretpostavljeno je također da se u bušotini nalazi proizvodni tubing unutarnjeg promjera 0,0889 m (3,5 inč). Ovaj podatak je korišten za proračun volumena bušotine koji simulator potom koristi kako bi modelirao efekte skladištenja i pražnjenja bušotine u hidrodinamičkim mjerenjima.

Za sva mjerenja zadano je da bušotina proizvodi 200 m^3 nafte na dan, a zatim se nakon određenog vremena proizvodnje bušotina zatvara kako bi se dobili podaci za test porasta tlaka.

5. Rezultati

Analizirana su tri slučaja ležišta:

- ležište s prisutne dvije faze (nafta i voda) (dodatak 8.1),
- ležište s prisutne tri faze (nafta, voda i plin) (dodatak 8.2) i
- ležište s dvije faze (nafta i voda) i vodonosnikom (dodatak 8.3).

Korišteni su simlacijski modeli s četiri različite propusnosti 100, 50, 20 i 10 mD i dvije različite geometrije u smislu broja ćelija, te je zatim za svaki od ovih slučajeva napravljena interpretacija testa porasta tlaka i protočnog testa u programu Ecrin i MS Excel. U programu Ecrin su rađena tri načina interpretacije za prvi i treći model ležišta dok je za slučaj ležišta s plinom uveden dodatni način interpretacije. Prvi način je da se unesu protoci i tlakovi u bušotini u odnosu na vrijeme, te se odabere da li da program radi proračun na dijelu grafa na kojem je pad tlaka u vremenu (tj. proizvodnji) ili da radi proračun na dijelu grafa na kojem je porast tlaka u vremenu. Zatim program automatski izvrši proračun i prikaže izračunate ležišne parametre koji uključuju i propusnost. Druga dva načina su proračun propusnosti iz nagiba pravca grafičkog prikaza tlaka u odnosu na vrijeme. Budući da je grafički prikaz tlaka u odnosu na vrijeme zapravo krivulja zbog efekata skladištenja bušotine i utjecaja granica ležišta, pravac se dobije tako da se odrede dvije točke na središnjem dijelu krivulje koja bi približno trebala biti pravac, a program zatim metodom linearne regresije iscrtava pravac kroz te dvije točke iz čijeg nagiba se određuje propusnost. Na ovaj način se analizira Hornerov test porasta tlaka i protočni test. Za slučaj ležišta s plinom uveden je i način interpretacije opcijom „*improve*“ gdje program koristi nelinearnu regresiju kako bi poboljšao poklapanje između modela i stvarnih podataka. U MS Excelu su napravljene interpretacije testa porasta tlaka i protočnog testa određivanjem nagiba pravca iz grafičkih prikaza tlaka u odnosu na vrijeme. Podaci o dinamičkim tlakovima u bušotini za svaki vremenski korak dobiveni su kao izlazni podaci iz Eclipse-a. Iz ovih podataka nacrtan je graf poput onog na slici 5.1, te je određen nagib pravca na području za koje je određeno da predstavlja ETR period. Zatim je propusnost računata korištenjem jednadžbe (2-27). Korišteni su modeli s 500 i 25000 ćelija.

5.1. Ležište bez vodonosnika s dvije faze (voda i nafta)

Prvi slučaj za koji je rađen proračun je model zatvorenog ležišta pravokutnog oblika u kojem su prisutni samo nafta i voda bez plina. Ležište je simulirano s četiri različite propusnosti, 100, 50, 20 i 10 md (tablice 5.1 i 5.2, slike 5.1 i 5.2), a zatim se te propusnosti pokušalo dobiti analitičkom interpretacijom simuliranih hidrodinamičkih testova pomoću aplikacija Ecrin i MS Excel.

Tablica 5-1. Rezultati interpretacije modela s dvije faze i 500 ćelija

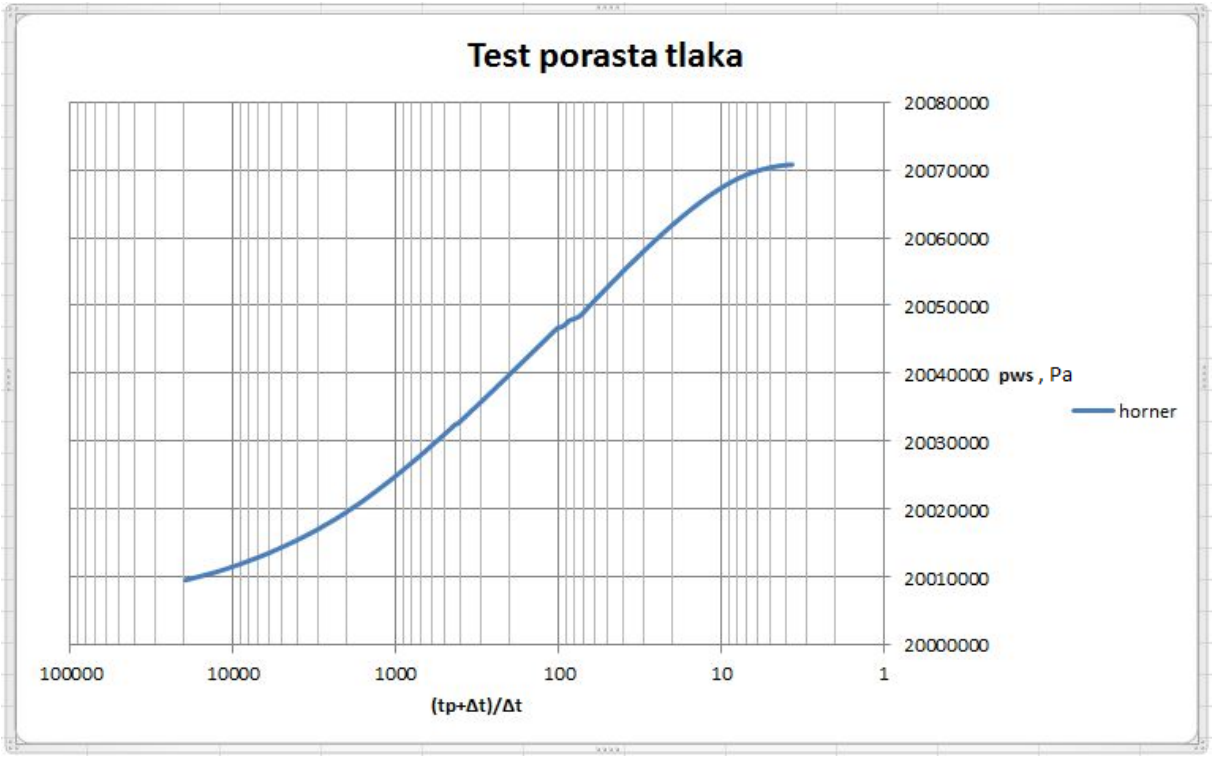
Model s 500 ćelija				
Ulazna propusnost, md	**10**	**20**	**50**	**100**
Ecrin, automatski	12	23	58	109
Ecrin, test porasta tlaka	7	23,8	54,9	104
Ecrin, protočni test	9,98	27,8	56,4	113
Excel, test porasta tlaka	10,6	19,51	48,77	100,32
Excel, protočni test	9,12	18,98	51,64	106,41

Tablica 5-2. Rezultati interpretacije modela s dvije faze i 25000 ćelija

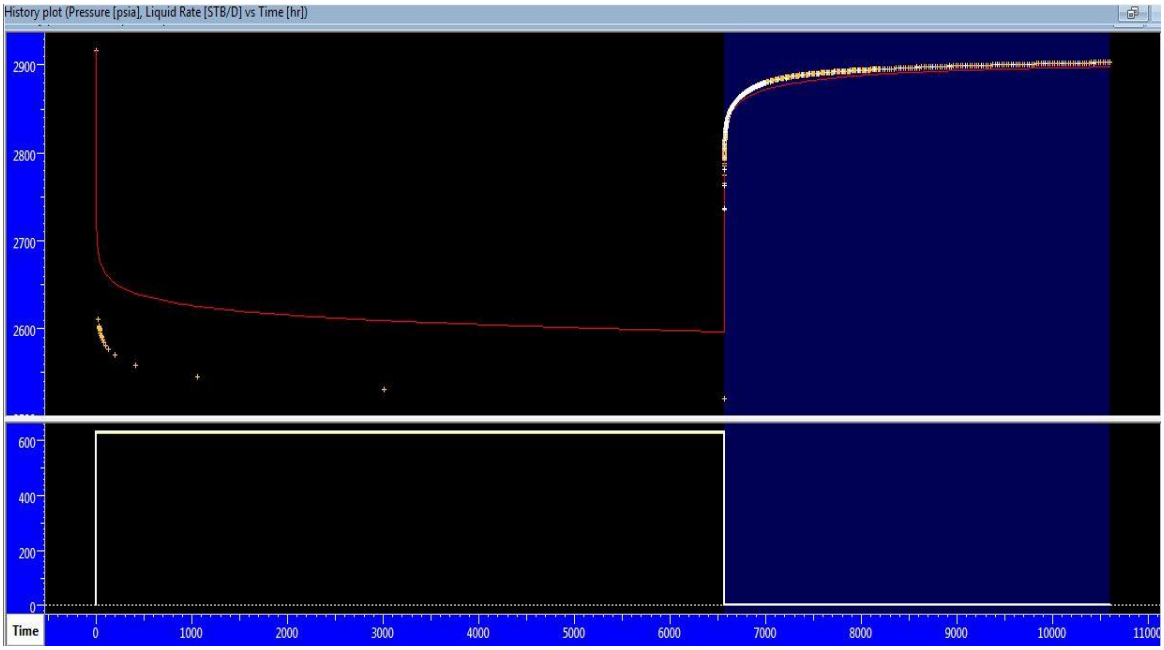
Model s 25000 ćelija				
Ulazna propusnost, md	**10**	**20**	**50**	**100**
Ecrin, automatski	10,4	21,8	47,5	103
Ecrin, test porasta tlaka	9,23	19,3	43,5	101
Ecrin, protočni test	10,1	20,2	48,2	100
Excel, test porasta tlaka	11,70	24,21	55,74	109,74
Excel, protočni test	10,03	19,51	46,82	92,41

Iz ova dva slučaja očito je općenito bolje poklapanje propusnosti dobivene simulacijskim modelom i propusnosti dobivene interpretacijom hidrodinamičkih testova kod simulacijskog modela s većim brojem ćelija. To se može objasniti činjenicom da je kod numeričke simulacije ležište diskretizirano u konačnom broju ćelija unutar kojih su ležišni parametri u određenom trenutku isti u cijeloj ćeliji. U stvarnosti je ležište kontinuum gdje su ležišni parametri definirani u svakoj točki ležišta. Stoga je logično da veći broj ćelija od kojeg

se sastoji model rezultira točnijim opisom stvarnog ležišta i njegovog ponašanja. Protivno takvoj logici, (pre)velik broj ćelija može dovesti do numeričkih problema s konvergencijom rješenja.



Slika 5-1. Graf ički prikaz testa porasta tlaka za model s dvije faze u programu MS Excel



Slika 5-2. Grafički prikaz testa porasta tlaka za model s dvije faze iz programa Ecrin

5.2. Ležište bez vodonosnika s tri faze (voda, nafta, plin)

Sljedeći slučaj za koji je rađen proračun je ležište u kojem je uz vodu i naftu prisutan i plin. Početni tlak u ležištu iznosio je 180 bara, a tlak zasićenja je 168 bara. Budući da je u model uključena i plinska faza bilo je potrebno uz tablicu relativnih propusnosti nafte i vode dodati i tablicu relativnih propusnosti nafte i plina u odnosu na zasićenje plinom u ležištu. Ove vrijednosti su dobivene pomoću Corey-eve korelacije. Corey-eva korelacija daje vezu između zasićenja plinom i relativnih propusnosti nafte i plina pomoću sljedećih jednadžbi (Ahmed, 2010):

$$S_g^* = \frac{S_g}{1 - S_{wc}} \tag{5-1}$$

$$k_{ro} = (1 - S_g^*)^4 \tag{5-2}$$

$$k_{rg} = (S_g^*)^3 (2 - S_g^*) \tag{5-3}$$

Gdje su:

S_g - prosječno zasićenje plinom u ležištu, dio cij.,

S_{wc} - kritično zasićenje vodom u ležištu, dio cij.,

k_{ro} - relativna propusnost za naftu, dio cij.,

k_{rg} - relativna propusnost za plin, dio cij.

Ostali parametri modela su isti kao i kod ležišta sa vodom i naftom. Također je rađena interpretacija testa porasta tlaka i protočnog testa pomoću programa MS Excel i Ecrin.

Razlika kod interpretacije u programu Ecrin u odnosu na ležište s dvije faze, je ta što je korištena dodatna *improve* opcija, zbog čijeg odabira program koristi nelineranu regresiju za poboljšanje poklapanja između modela i podataka. Ovo se pokazalo posebno korisnim kod modela sa manjim brojem ćelija (500) i u slučaju visoke propusnosti (50 i 100 md) gdje su odstupanja dobivene propusnosti od modela kod prvog pokušaja interpretacije bila značajna.

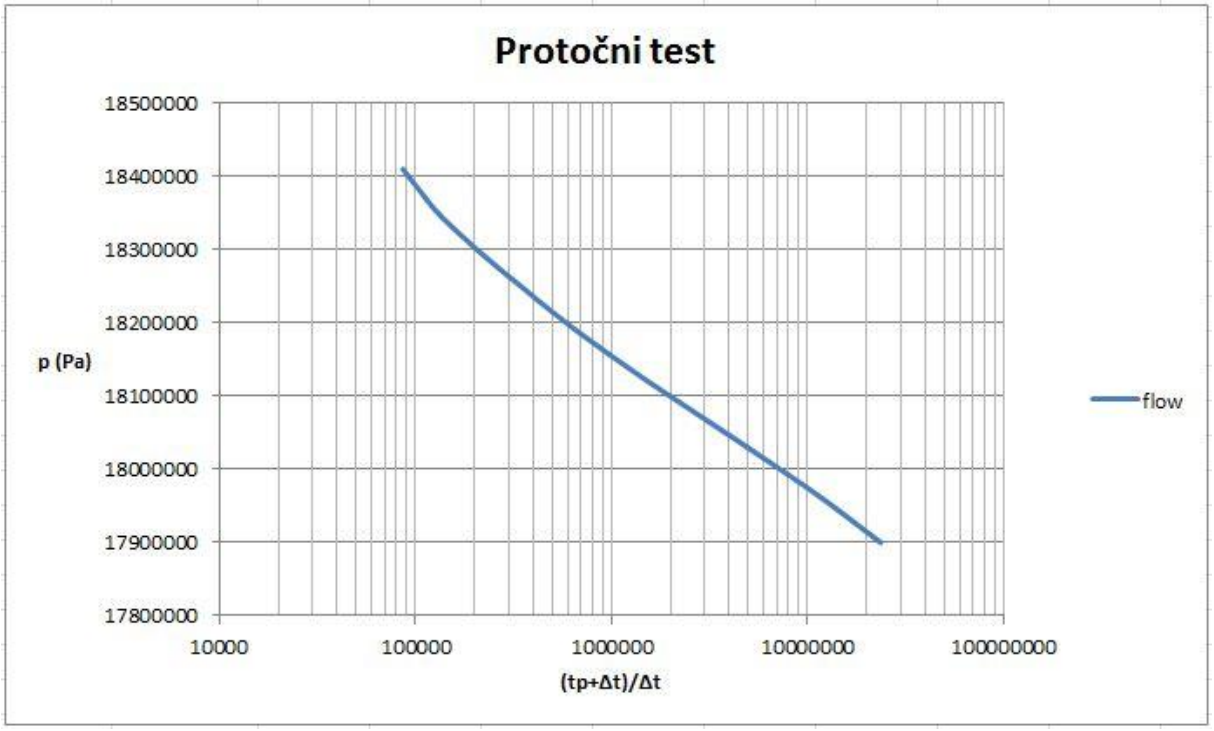
Rezultati su prikazani u tablicama 5-3. i 5-4. i na slikama 5-3. te 5-4.

Tablica 5-3. Rezultati interpretacije modela s tri faze i 500 ćelija

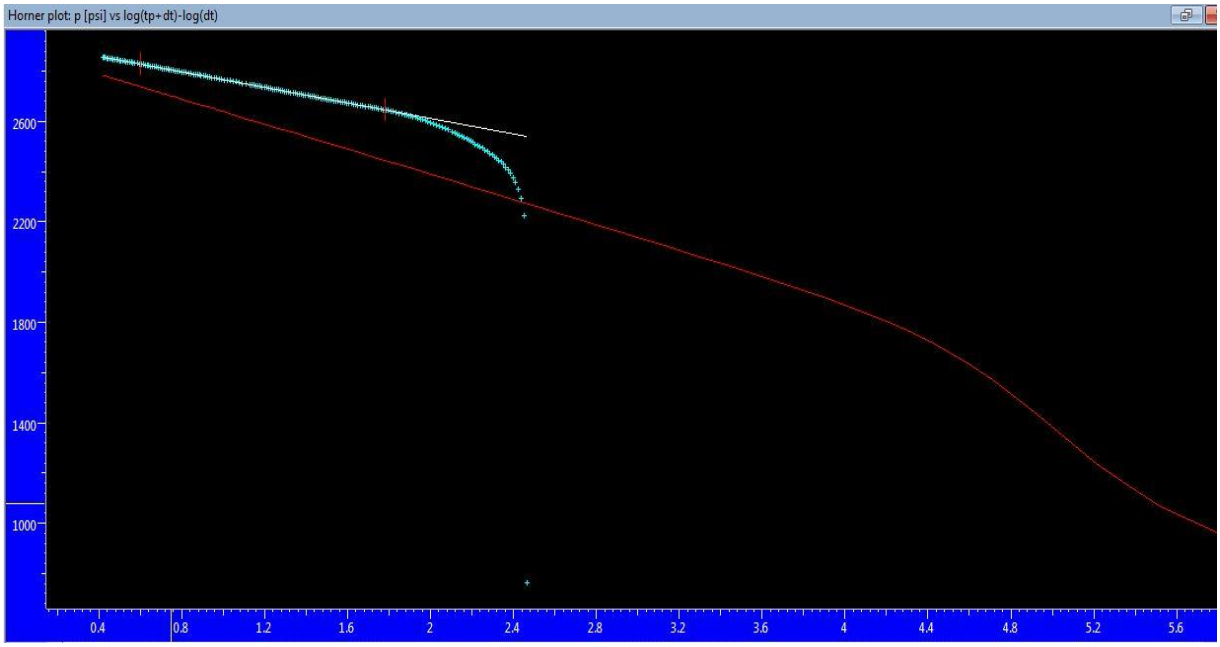
Model s 500 ćelija				
Ulazna propusnost, md	**10**	**20**	**50**	**100**
Ecrin, automatski	8,42	16,3	74	145
Ecrin, test porasta tlaka	8,81	16,8	69,4	136
Ecrin, protočni test	9,06	17,3	43,8	147
Ecrin, improve	49,7	15,9	44,6	96,5
Excel, test porasta tlaka	8,03	17,56	43,89	100,32
Excel, protočni test	4,68	15,6	46,82	117,04

Tablica 5-4. Rezultati interpretacije modela s tri faze i 25000 ćelija

Model s 25000 ćelija				
Ulazna propusnost, md	**10**	**20**	**50**	**100**
Ecrin, automatski	9,17	20,04	46,4	106
Ecrin, test porasta tlaka	9	18,4	42,2	109
Ecrin, protočni test	9,5	18,9	48,1	107
Ecrin, improve	5,63	15,8	48,5	96,1
Excel, test porasta tlaka	7,2	20,06	52,01	108,04
Excel, protočni test	5,85	17,56	52,02	100,32



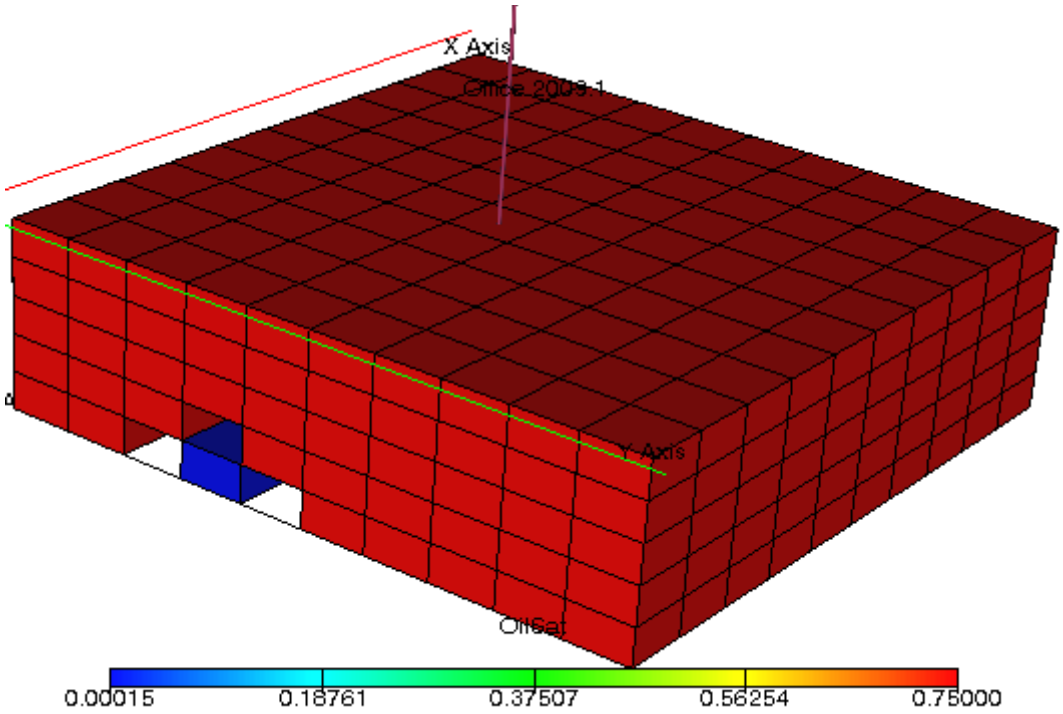
Slika 5-3. Grafički prikaz protočnog testa modela s tri faze i 500 ćelija u programu MS Excel



Slika 5-4. Grafički prikaz testa porasta tlaka u programu Ecrin za slučaj ležišta s tri faze i 25000 ćelija

5.3. Ležište s vodonosnikom i dvije faze (nafta i voda)

Također je rađena analiza za slučaj ležišta s prisutne dvije faze (nafta i voda) i vodonosnikom koji podržava tlak u ležištu. Postoji više načina za uključivanje vodonosnika u model. U programu su dostupni numerički i analitički modeli vodonosnika. Analitičkim modelom vodonosnici su matematički predstavljeni kao „izvori“ vektorskog polja. Analitički modeli vodonosnika dostupni u Eclipse-u su sljedeći: Carter-tracy vodonosnici (Carter, 1960), Fetkovich vodonosnici (Fetkovich, 1971) te vodonosnici konstantnog utoka. U ovom slučaju korišten je numerički model vodonosnika. Numerički vodonosnik se modelira na način tako da se određene ćelije modela (jedna ili više njih) definiraju kao vodonosnici. Sva svojstva ćelije su redefinirana, ali izuzev toga ona je još uvijek dio mreže, tj. komunikacija između ćelija se ne mijenja ako je ćelija definirana kao vodonosnik. Zbog toga je potrebno ćeliju koja predstavlja vodonosnik potpuno izolirati od ostatka ležišta na način da je se okruži neaktivnim ćelijama (slika 5-5.).



Slika 5-5. Grafički prikaz modela ležišta s vidljivom ćelijom koja predstavlja vodonosnik

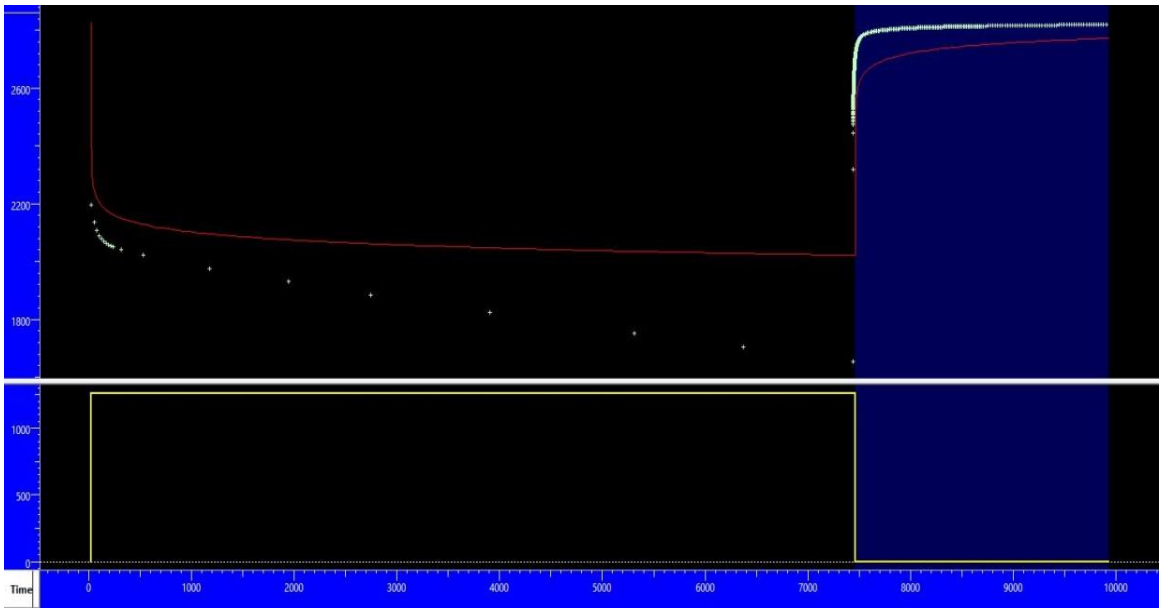
U tablicama 5-5. i 5-6. te na slikama 5-6. i 5-7. prikazani su rezultati interpretacije hidrodinamičkih mjerenja simuliranih korištenjem ovoga modela ležišta. Primijećeno je veće odstupanje od ulaznih podataka propusnosti u odnosu na prethodna dva modela ležišta.

Tablica 5-5. Rezultati interpretacije modela s dvije faze i vodonosnikom i 500 ćelija

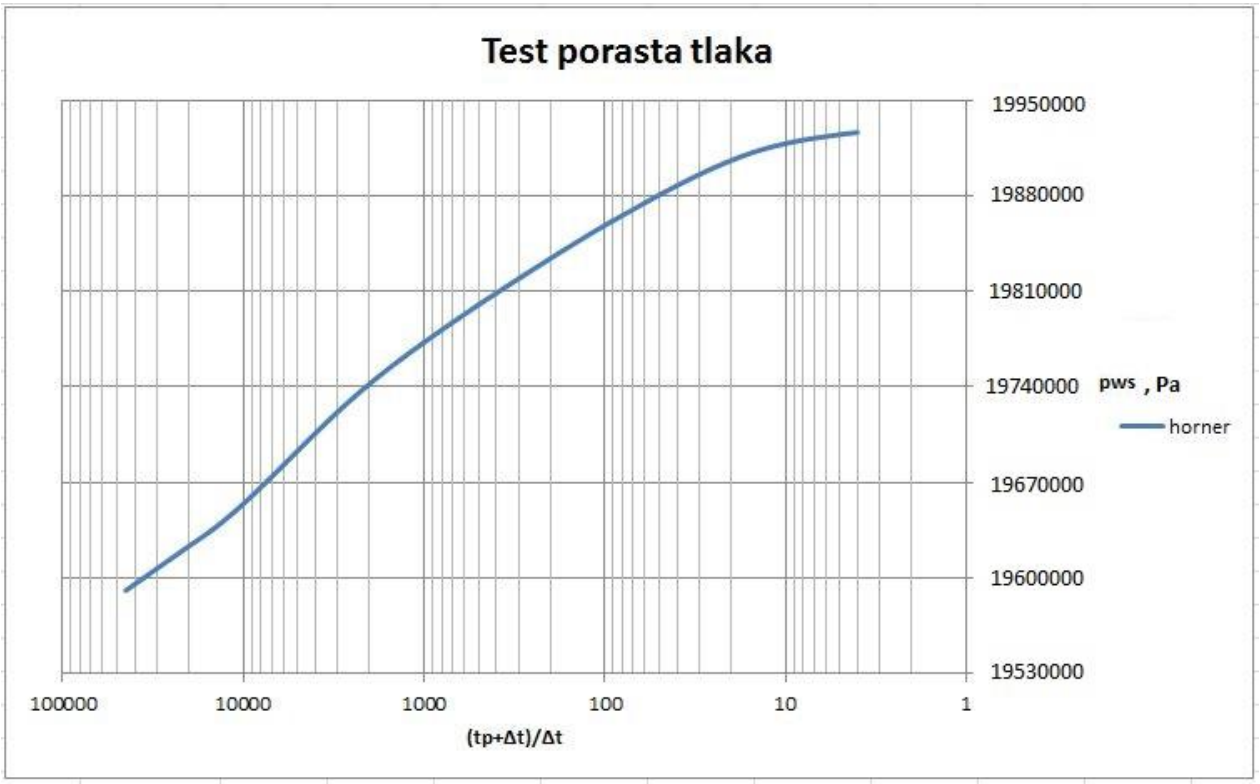
Model s 500 ćelija				
Ulazna propusnost, md	**10**	**20**	**50**	**100**
Ecrin, automatski	18,8	30,7	21,5	83,4
Ecrin, test porasta	15,3	19,2	45,7	88,7
Ecrin, protočni test	12,4	25,9	58,9	135
Excel, test porasta	15,61	24,64	45,31	93,63
Excel, protočni test	18,73	28,66	46,82	73,92

Tablica 5-6. Rezultati interpretacije modela s dvije faze i vodonosnikom i 25000 ćelija

Model s 25000 ćelija				
Ulazna propusnost, md	**10**	**20**	**50**	**100**
Ecrin, automatski	15,4	30,3	59,2	93
Ecrin, test porasta tlaka	18,3	35,7	60,3	96
Ecrin, protočni test	17,7	32,5	56	91,2
Excel, test porasta tlaka	7,8	25,54	63,84	108,03
Excel, protočni test	9,36	17,56	56,18	87,78



Slika 5-6. Grafički prikaz porasta tlaka za slučaj ležišta s dvije faze i vodonosnikom u programu Ecrin



Slika 5-7. Grafički prikaz porasta tlaka za slučaj ležišta s vodonosnikom u programu MS Excel

6. Zaključak

Utvrđeno je kako je moguće dobiti dobro poklapanje propusnosti simuliranog modela i propusnosti dobivene analitičkom i numeričkom interpretacijom podataka o tlakovima i protocima dobivenih simulacijom istog tog modela. Na ovaj način je moguće utvrditi vjerodostojnost ulaznog simulacijskog modela što znači da se model može koristiti za daljnje kompleksnije sustave jednostavnim izmjenama parametara u *GRID* sekciji, tj. geometrije ležišta, heterogenih svojstava poroznosti i propusnosti.

Ovakvim pristupom može se modelom približiti realnim svojstvima ležišta i ležišnih fluida pošto je višefazni protok uvelike determiniran svojstvima relativnih propusnosti koja mogu jako odstupati na više laboratorijski mjerenih uzoraka, a uzetih u istoj bušotini. Radi tih svojstava stijena, problema s ustaljivanjem protoka u svrhu uzimanja uzorka fluida, a također i oštećenja pribušotinske zone tijekom bušenja i opremanja, korisno je koristiti simulacijski model za usklađivanje pVT svojstava (tablica ili jednadžbe stanja ako bi se koristio *compositional* model), a tek onda dalju interpretaciju (tj. validaciju intepretacije) hidrodinamičkih mjerenja. Ovako validirani modeli također mogu poslužiti kao ležišno-simulacijski predložak (*template*) interpretacije jako heterogenih ležišta, što je osobito korisno kod slabopropusnih ležišta gdje je pretpostavka homogenosti neprihvatljiva, a stvarna hidrodinamička mjerenja najčešće se ne izvode dovoljno dugo.

Pored toga, često je za neku bušotinu iz karotaže razvidna varijacija svojstava poroznosti, a usporedbom karotažnih i laboratorijskih mjerenja se određuje i prostorna raspodjela različitih propusnosti u okolini neke bušotine. Međutim, takvi podaci dalje od zone gdje sonde mogu mjeriti (najčešće manje od 1 m), tj. između bušotina se najčešće koreliraju (ili „ručno“ tj. linearno, ili numeričkim prostornim rješenjem prilikom geološkog modeliranja tj. izrade tzv. statičkog modela). Takvi podaci su manje pouzdani, a pouzdani, ali prosječni podaci propusnosti utvrđuju se hidrodinamičkim mjerenjima. Dakle, s jedne strane, postoji dobar izvor podataka o heterogenosti zone u kojoj je moguće jezgrovati i raditi karotažna mjerenja i s druge strane, dobar izvor prosječnih podataka u zoni koju zahvaćaju hidrodinamička mjerenja. U tom smislu, numeričkim modelom se može učiniti poveznica između takvih podataka, za što je načinjen temelj ovim radom.

Od tri vrste interpretiranih modela ležišta najveće odstupanje propusnosti dobivene analitičkom interpretacijom od poznate zadane propusnosti u simulacijskom modelu imao je

model s vodonosnikom. Razlog tome je što vodonosnik svojim širenjem uzrokuje kolebanje tlaka u ležištu i bušotini. Primijećeno je i da netom nakon zatvaranja bušotine tlak u bušotini u određenom trenutku pada, dok je za očekivati da u cijelom periodu dok je zatvorena bušotina tlak u bušotini kontinuirano raste. Za budući rad, potrebno je detaljnije preispitati moguće numeričke pogreške u definiciji akvifera, usporedbom utjecaja različitih modela akvifera na različitim dijelovima ležišta. Model s prisutne samo dvije faze, bez vodonosnika, dao je najbolje rezultate poklapanja propusnosti dobivenih interpretacijom hidrodinamičkih mjerenja i zadanih propusnosti u simulatoru.

7. Literatura

1. Abou-Kassem, J.H., Ertekin, T., King, G.R., 2001. Basic applied reservoir simulation. Society of petroleum engineers.

2. Ahmed, T., 2001. Reservoir engineering handbook. 2. izd. Houston: Gulf publishing company.

3. Al Ismail, M.I., 2010. Field observations of gas-condensate well testing. Diplomski rad. Stanford university.

4. Al-Thawad ,F. M., et al, 2007. Linking Well Test Interpretations to Full Field Simulations. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, 11-14 Ožujak, Manama, Bahrain.

5. Carter, R.D., et al, 1960. An Improved Method for Calculating Water Influx . Petroleum transactions AIME, 219, str. 415-417.

6. Chen, Z., 2007. Reservoir simulation: mathematical techniques in oil recovery. Society for Industrial and Applied Mathematics

7. Corey, A.T. 1954. The interrelation between gas and oil relative permeabilities. Producers Monthly, 19. Studeni, str. 38-41.

8. Crump, K.S., 1976. Numerical inversion of Laplace transforms using a Fourier series approximation. J. ACM 233: 89-96.

9. Dake, L.P., 1978. Fundamentals of reservoir engineering. Elsevier science.

10. Dykstra, H., Parsons, R.L., 1950. The prediction of oil recovery by waterflooding. Secondary recovery of oil in the United States, second edition, 160-174.

11. Fetkovich, M.J. 1971. A Simplified Approach to Water Influx Calculations-Finite Aquifer Systems. Journal of petroleum technology, 23(7), str. 814-828.

12. Horne , R.N., 1994. Advances in Computer-Aided Well Test Interpretation. Journal of Petroleum Technology, 46(7), str. 599-606.

13. Horner, D.R., 1951. Pressure build-up in wells. 3rd world petroleum congress, 28. Svibanj-6. lipanj, Hag, Nizozemska.

14. Lee, J., 1982. Well testing. Society of petroleum engineers of AIME.

15. Peaceman, D.W., 1977. Fundamentals of numerical reservoir simulation. Elsevier scientific publishing company.

16. Pettersen, O., 2006. Basics of reservoir simulation with eclipse reservoir simulator. Dept. of Mathematics, Univ. of Bergen.

17. Pirson, S.J., 1958. A Novel Method of Recovering Heavy Viscous Crude Oils and Tar By Combined In Situ Thermal Treatment and Gravity Drainage.

18. Puchyr , P.J., 1991. A Numerical Well Test Model. Low Permeability Reservoirs Symposium, 15-17 Travanj, Denver, Colorado.

19. Sheng, J.J., 2014. Analyze Horizontal Well Tests Using Reservoir Simulation Approach: A Case Study. Advances in Petroleum Exploration and Development, 7(2), str 9-20.

20. Stehfest, H., 1970. Numerical Inversion of Laplace Transforms Algorithm 368. Communications of ACM, D-5, 13: 47-49.

21. Stewart, G., 2011. Well test design and analysis. Penwell corporation.

22. Yasin, I.B.E, 2012. Pressure Transient Analysis Using Generated Well Test Data from Simulation of Selected Wells in Norne Field. Diplomski rad. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology.

8. Dodatak

8.1. Primjer ulazne datoteke za simulator ležišta Eclipse za model ležišta s dvije faze

```
RUNSPEC
TITLE
     DIPLOMSKI
DIMENS
--    NX    NY    NZ
     10    10    5
--    Faze
OIL
WATER
--    Koje jedinice koristimo
METRIC
--    Maksimalni broj parametara za busotine
WELLDIMS
--    #busotina      #spojeva
          1                    18                    2
               2  1* /
LGR
-- MAXLGR MAXCLS MCOARS MAMALG MXLALG LSTACK Pressure NCHCOR
     1          400   0     1          2/
NSTACK
50    /
--    Pocetni datum
START
     1 'FEB' 2015    /
GRID
NOECHO
DX
     500*350    /
DY
     500*350    /
DZ
     500*10     /
TOPS
100*2000 100*2010 100*2020 100*2030 100*2040 /
-- Propusnosti u sva 3 smjera
PERMX
     500*50     /
PERMY
     500*50     /
PERMZ
     500*50     /
--    Poroznost
PORO
```

```
     500*0.15   /
RADFIN4
-- NAME    I1 I2 J1 J2  K1 K2 NR NTHETA NZ  NWMAX
'BUSOTINA'  5  6  5  6   1 5  10    4        10  /
INRAD
0.1524 /
ENDFIN
INIT
ECHO
PROPS
SWOF
--    Sw    Krw         Krow        Pcow
      0.25  0           1                0
      0.3    0.006971   0.792885         0
      0.35  0.015656    0.694689         0
      0.4   0.028622    0.607711         0
      0.45  0.047057    0.527767         0
      0.5   0.072169    0.453488         0
      0.55  0.105225    0.384287         0
      0.6   0.147556    0.319903         0
      0.65  0.200558    0.260256         0
      0.7   0.265687    0.205386         0
      0.75  0.344459    0.155441         0
      0.8   0.438451    0.110692         0
      0.85  0.54929     0.071574         0
      0.9   0.678662    0.038794         0
      0.95  0.828303    0.013661         0
      1           1                      0
/
PVTW
--    Pref  Bw          Cw                 ViscW
      200         1.01  4.19663D-6     0.95         0/
PVDO
--    P           Bo                viscO


      168         1.278       0.871
      180         1.275       0.884

      /
RSCONST
86    168   /
ROCK
--    Pref  Cr
      302.5 5.76D-5    /
DENSITY
--    Nafta Voda  Plin
      856.8 990         0.8   /
```

```
SOLUTION
EQUIL
--    Ref.dubina Tlak@ref.dubini Kontakt_voda_nafta
      2025       202.5                2500                0.0
           /
SUMMARY
EXCEL
FOPR
FOPT
FPR
FOIP
WBHP
'PRO'
/
WTHP
'PRO'
/
WOPR
'PRO'
/
SCHEDULE
TUNINGL
           /
           /
2* 100 /
RPTRST
BASIC=2    /
WELSPECL
--    ime        grupa LGR             i     j     z(bhp)     faza
      'PRO' 'G'        'BUSOTINA' 0     0     1*         'OIL' /
/
COMPDATL
--    ime        LGR             i     j     k_hi  k_lo  o/z
      'PRO' 'BUSOTINA' 0     0     1           10          'OPEN'     2*
0.3048 1* 0     /

/
WBOREVOL
      'PRO' 50    /
/
WCONPROD
--    ime
      'PRO' 'OPEN'     'ORAT'     200        4*         /
/
```

```
TSTEP
10*1
1*1000
/
WCONPROD
--    ime
      'PRO' 'STOP'     'ORAT'     0          /
/
TSTEP
100*0.00694
100*0.02083
100*0.5
50*1  /
END
```

8.2. Primjer ulazne datoteke za simulator ležišta Eclipse za model ležišta s dvije faze i vodonosnikom

```
RUNSPEC
TITLE
DIPLOMSKI
DIMENS
--    NX    NY    NZ
      10    10    5     /
--    Faze
OIL
WATER
AQUDIMS
1     1     1     36    1     1     1     1/
--    Koje jedinice koristimo
METRIC
--    Maksimalni broj parametara za busotine
WELLDIMS
--    broj busotina        broj spojeva
           1                           5                     2
                      2  1* /
--    Pocetni datum
START
      1 'FEB' 2015    /
GRID
NOECHO
DX
      500*350    /
DY
      500*350    /
DZ
      500*10     /
TOPS
100*2000 100*2010 100*2020 100*2030 100*2040 /
-- Propusnosti u sva 3 smjera
PERMX
      500*100    /
PERMY
      500*100    /
PERMZ
      500*100    /
--    Poroznost
PORO
      500*0.15   /
ACTNUM
300*1
30*1
```

```
0     9*1
60*1
20*1
0     9*1
1*1   1*0 8*1
0     9*1
50*1  /
AQUNUM
--    IME   I     J     K X-SECT    DULJINA PORO  PERM DUBINA P_INIT
      1     1     4     5     5E4         4000       0.15  50         2200
      210         /
/
AQUCON
      1           1     10    1     10    5     5     'K+'       /
/
INIT
ECHO
PROPS
SWOF
--    Sw    Krw         Krow              Pcow
0.25  0           1                 0
      0.3    0.006971  0.792885         0
0.35  0.015656   0.694689         0
0.4   0.028622   0.607711         0
0.45  0.047057   0.527767         0
0.5   0.072169   0.453488         0
0.55  0.105225   0.384287         0
0.6   0.147556   0.319903         0
0.65  0.200558   0.260256         0
0.7   0.265687   0.205386         0
0.75  0.344459   0.155441         0
0.8   0.438451   0.110692         0
0.85  0.54929    0.071574         0
0.9   0.678662   0.038794         0
0.95  0.828303   0.013661         0
1     1           0                 0
/
PVTW
--    Pref  Bw          Cw                ViscW
      200         1.01  4.19663D-6     0.95         0/
PVDO
--    P           Bo                viscO
      168         1.278       0.871
      180         1.275       0.884
      /
RSCONST
86    168   /
ROCK
```

```
--    Pref  Cr
      302.5 5.76D-5    /
DENSITY
--    Nafta Voda  Plin
      856.8 990        0.8   /
SOLUTION
EQUIL
--    Ref.dubina Tlak@ref.dubini Kontakt_voda_nafta
      2025       204                  2500                 0.0
           /
SUMMARY
EXCEL
FOPR
FOPT
FPR
FOIP
WBHP
'PRO'
/
WTHP
'PRO'
/
WOPR
'PRO'
/
SCHEDULE
RPTRST
BASIC=2    /
WELSPECS
--    ime   grupa      i     j     z(bhp)     faza
      'PRO' 'G'        5     5     1*         'OIL' /
/
COMPDAT
--    ime   i     j     k_hi       k_lo       o/z
      'PRO' 5     5     1          4          'OPEN'     2* 0.3048 1* 0
/
      /
WBOREVOL
      'PRO' 50    /
/
WCONPROD
--    ime
      'PRO' 'OPEN'     'ORAT'     200        4*         /
/
TSTEP
10*1
1*365/
WCONPROD
```

```
--    ime
      'PRO' 'STOP'          'ORAT'     0          /
/
TSTEP
100*0.00694
100*0.02083
100*0.5
50*1  /
END
```

8.3. Primjer ulazne datoteke za simulator ležišta Eclipse za model ležišta s tri faze

```
RUNSPEC
TITLE
     DIPLOMSKI
DIMENS
--    NX    NY    NZ
     10    10    5     /
--    Faze
OIL
WATER
DISGAS
GAS
--    Koje jedinice koristimo
METRIC
--    Maksimalni broj parametara za busotine
WELLDIMS
--    #busotina      #spojeva
          1                    18                    2
               2  1* /
LGR
-- MAXLGR MAXCLS MCOARS MAMALG MXLALG LSTACK Pressure NCHCOR
     1          400   0     1          2/
NSTACK
50    /
--    Pocetni datum
START
     1 'FEB' 2015    /
GRID
NOECHO
DX
     500*350    /
DY
     500*350    /
DZ
     500*10     /
TOPS
100*2000 100*2010 100*2020 100*2030 100*2040 /
-- Propusnosti u sva 3 smjera
PERMX
     500*10     /
PERMY
     500*10     /
PERMZ
     500*10     /
--    Poroznost
PORO
```

```
     500*0.15   /
RADFIN4
-- NAME    I1 I2 J1 J2  K1 K2 NR NTHETA NZ  NWMAX
'BUSOTINA'  5  6  5  6   1 5  10    4        10  /
INRAD
0.1524 /
ENDFIN
ACTNUM
400*1
20*1
0    9*1
2*0 8*1
0    9*1
50*1  /
AQUNUM
--    IME        I    J    K    X-SECT     DULJINA          PORO  PERM
      DUBINA     P_INIT
      VODA 1     4    5    2E6        1000       0.15  50         2500
      1*         /
INIT
ECHO
PROPS
SWOF
--    Sw         Krw              Krow             Pcow
0.25       0               1                0
0.3         0.006971       0.792885         0
0.35       0.015656        0.694689         0
0.4        0.028622        0.607711         0
0.45       0.047057        0.527767         0
0.5        0.072169        0.453488         0
0.55       0.105225        0.384287         0
0.6        0.147556        0.319903         0
0.65       0.200558        0.260256         0
0.7        0.265687        0.205386         0
0.75       0.344459        0.155441         0
0.8        0.438451        0.110692         0
0.85       0.54929         0.071574         0
0.9        0.678662        0.038794         0
0.95       0.828303        0.013661         0
1          1                    0          0
/
SGOF
--    Sg   Krg        Kro              Pc
0.00  0          1               0
0.1   0.004425   0.564168        0
0.15  0.0144          0.4096              0
0.2   0.032869   0.289205        0
0.25  0.061728   0.197531        0
```

```
0.3   0.1024          0.1296               0
0.35  0.155832   0.080909        0
0.4   0.222499   0.047427        0
0.45  0.3024          0.0256               0
0.5   0.395062   0.012346        0
0.55  0.499536   0.005057        0
0.6   0.6144          0.0016               0
0.65  0.737758   0.000316        0
0.7   0.86724    1.98E-05        0
0.75  1          0               0
/
PVTW
-- Pref     Bw       Cw     ViscW
   308.2   1.024   4.64E-5   0.42    /
PVDG
--Pg    Bg    visc_g
  27.6  0.0331   0.013
  55.2  0.0166  0.0135
  82.8  0.0110  0.014
 110.3  0.00825  0.0145
 137.9  0.00663  0.015
 165.5  0.00550  0.0155
 193.1  0.00472  0.016
 220.7  0.00415  0.0165
 248.3  0.00365  0.017
 275.9  0.00331  0.0175
 303.4  0.00303  0.018
 331.0  0.00275  0.0185
 358.6  0.00253  0.019
 386.2  0.00236  0.0195 /
PVTO
-- Rs         Pbp   Bo(Pbp)  visc_o --
--            Po    Bo(Po)   visc_o(Po)
   29.39      27.6   1.012    1.17  /
   59.66      55.2   1.0255   1.14  /
   89.05      82.8   1.038    1.11  /
  118.44     110.3   1.051    1.08  /
  147.47     137.9   1.063    1.06  /
  175.43     165.5   1.075    1.03  /
  201.25     193.1   1.087    1.00  /
  226.19     220.7   1.0985   0.98  /
  247.56     248.3   1.11     0.95  /
  267.15     275.9   1.12     0.94  /
  284.96     303.4   1.13     0.92  /
  298.50     331.0   1.14     0.91  /
  311.68     358.6   1.148    0.9   /
  322.36     386.2   1.155    0.89
             413.8   1.1504   0.89
```

```
             441.4   1.1458   0.89
             469.0   1.1412   0.89
             496.6   1.1367   0.89  /
/
ROCK
--    Pref  Cr
      302.5 5.76D-5    /
DENSITY
--    Nafta Voda  Plin
      856.8 990        0.8   /
SOLUTION

EQUIL
--    Ref.dubina Tlak@ref.dubini Kontakt_voda_nafta
      1900       190                   2100                 0.0
      1900       /
SUMMARY
EXCEL
FOPR
FOPT
FPR
FOIP
WBHP
'PRO'
/
WTHP
'PRO'
/
WOPR
'PRO'
/
SCHEDULE
TUNINGL
           /
           /
2* 100 1* 100 /
RPTRST
BASIC=2    /

WELSPECL
--    ime        grupa LGR             i     j     z(bhp)     faza
      'PRO' 'G'        'BUSOTINA' 0     0     1*         'OIL' /

/
COMPDATL
--    ime        LGR             i     j     k_hi  k_lo  o/z
      'PRO' 'BUSOTINA' 0     0     1          10         'OPEN'     2*
0.3048 1* 0     /
```

```
/
WBOREVOL
     'PRO' 50    /
/
WCONPROD
--    ime
     'PRO' 'OPEN'     'ORAT'     200        4*         /
/
TSTEP
10*1
1*10
/
WCONPROD
--    ime
     'PRO' 'OPEN'     'ORAT'     0          /
/

TSTEP
100*0.00694
100*0.02083
100*0.5
/
END
```

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj diplomski rad samostalno izradio.

Filip Resanović

_____