

# Usporedba proračuna zavodnjavanja Craig-Geffen-Morseovom metodom i računalne simulacije

---

**Budja, Ivan**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2017**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:203982>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-04**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**USPOREDBA  
PRORAČUNA ZAVODNJAVANJA CRAIG-GEFFEN-MORSEOVOM  
METODOM I RAČUNALNE SIMULACIJE**

Diplomski rad

Ivan Budja  
N154

Zagreb, 2017.

USPOREDBA  
PRORAČUNA ZAVODNJAVANJA CRAIG-GEFFEN-MORSEOVOM METODOM I  
RAČUNALNE SIMULACIJE

IVAN BUDJA

Diplomski rad je izrađen na: Sveučilištu u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu  
Zavodu za naftno inženjerstvo  
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

Sažetak

U ovom radu bit će prikazane osnove proračuna zavodnjavanja, sam proračun zavodnjavanja Craig-Geffen-Morseovom metodom (CGM) te na kraju usporedba rezultata dobivenih proračunom i rezultata dobivenih računalnom simulacijom. Osim proračuna, bit će prikazani i važni dijelovi računalnog koda ključni za postavu istog slučaja u računalnoj simulaciji, kao i u proračunu. Temeljni proračun dobiven je u Microsoft Excel-u, dok je računalna simulacija dobivena u programu Eclipse. Usporedbom rezultata potvrđuje se ispravnost rješavanja CGM metodom, odnosno njezinu primjenjivost u praksi.

Ključne riječi: zavodnjavanje, CGM metoda, koeficijent površinskog obuhvata, frontalno istiskivanje

Diplomski rad sadrži: 49 stranica, 32 slike, 18 tablica, 73 oznake, 5 referenci  
Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentor: Dr. sc. Domagoj Vulin, izvanredni profesor RGNF-a  
pomoć pri izradi: Lucija Jukić, mag. ing.

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

Datum obrane: 17. veljače 2017., Rudarsko – geološko – naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

## **WATERFLOOD CALCULATION USING THE CRAIG-GEFFEN-MORSE METHOD**

IVAN BUDJA

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

### **Abstract**

This thesis presents theoretical basis for waterflood calculations, provides waterflood calculation using the Craig-Geffen-Morse (CGM) method and matches the results of the calculation and the computer simulation. Except for calculation, parts of code important for establishing the same case in computer simulation as in calculation is given. Calculation is done using the Microsoft Excel program while computer simulation is given in the Eclipse program. After matching the results, it was confirmed that the CGM method can be used in practice.

Keywords: waterflood, CGM method, areal sweep efficiency, frontal drive

Thesis contains: 49 pages, 32 pictures, 18 tables, 73 figures, 5 references

Original in: Croatian

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

Supervisor: Associate Professor Domagoj Vulin, PhD

Reviewers: Associate Professor Domagoj Vulin, PhD  
Associate Professor Tomislav Kurevija, PhD  
Assistant Professor Luka Perković, PhD

Date of defense: February 17, 2017., Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

Sadržaj	
Popis slika	i
Popis tablica	ii
Popis oznaka	iii
1. UVOD	1
2. OSNOVNA PROTOČNA SVOJSTVA STIJENA ZA NAFTU I VODU	3
2.1. Močivost stijena	3
2.2. Raspodjela kapljevina	5
2.3. Kapilarni tlak	6
2.4. Omjer pokretljivosti	9
2.5. Koeficijent površinskog obuhvata	11
2.5.1. Koeficijent površinskog obuhvata u trenutku prodora vode	12
3. CRAIG-GEFFEN-MORSEOVA METODA (CGM)	13
4. PRORAČUN CGM METODOM	15
4.1. Početni proračun za promatrani slučaj	15
4.2. Prvi period- od početka utiskivanja do pojave interferencije	17
4.3. Drugi period – od inerferencije do zapunjenja vodom svog prostora koji je bio zapunjen plinom	18
4.4. Treći period – od zapunjenja do prodora vode	18
4.5. Četvrti period – period nakon prodora vode do ekonomske isplativosti utiskivanja vode	20
5. INICIJALIZACIJA SIMULACIJSKOG MODELA	24
6. USKLAĐIVANJE SIMULACIJSKOG MODELA S ANALITIČKIM PRORAČUNOM	29
7. USPOREDBA REZULTATA PRORAČUNA I SIMULACIJE	38
7.1. Vizualni prikaz promjene zasićenja naftom i vodom	40
8. ZAKLJUČAK	46
9. LITERATURA	47
DODACI	48
Dodatak 1 – Empirijska tablica za određivanje $Q_i / Q_{ibt}$ , za različite $E_{abt}$ i $w_i / w_{ibt}$	48

## Popis slika

Slika 2-1. Močivost sustava nafta-voda.....	4
Slika 2-2. Raspodjela kapljevina tijekom zavodnjavanja vodomochive stijene.....	5
Slika 2-3. Raspodjela kapljevina tijekom zavodnjavanja naftomochive stijene.....	6
Slika 2-4. Shema procesa isušivanja.....	7
Slika 2-5. Shema procesa imbibicije.....	8
Slika 2-6. Koeficijent površinskog obuhvata u trenutku prodora za mrežu pet bušotina11	
Slika 2-7. Utjecaj viskoznosti nafte na omjer pokretljivosti voda-nafta, viskoznost vode = 0,5 cP .....	11
Slika 2-8. Koeficijent površinskog obuhvata u trenutku prodora za mrežu pet bušotina12	
Slika 3-1. Položaj bušotina u redovima naizmjenice postavljenih bušotina .....	14
Slika 6-1. Trenutna proizvodnja nafte (1.slučaj) .....	30
Slika 6-2. Ukupna proizvodnja nafte (1. slučaj – prvi simulacijski model) .....	31
Slika 6-3. Promjena frakcijskog protoka vode (1. slučaj).....	31
Slika 6-4. Pogrešan raspored proizvodnih i utisnih bušotina.....	32
Slika 6-5. Pravilan raspored bušotina .....	33
Slika 6-6. Trenutna proizvodnja nafte (2.slučaj – drugi simulacijski model).....	33
Slika 6-7. Ukupna proizvodnja nafte (2.slučaj) .....	34
Slika 6-8. Promjena frakcijskog protoka vode (2. slučaj).....	34
Slika 6-9. Trenutna proizvodnja nafte (3. slučaj – treći simulacijski model).....	35
Slika 6-10. Ukupna (kumulativna) proizvodnje nafte (3. slučaj) .....	36
Slika 6-11. Promjena frakcijskog protoka vode (3. slučaj).....	36
Slika 7-1. Trenutna proizvodnje nafte (zadnji slučaj- konačni simulacijski model) .....	38
Slika 7-2. Ukupna proizvodnja nafte (zadnji slučaj) .....	39
Slika 7-3. Promjena frakcijskog protoka vode (zadnji slučaj).....	39
Slika 7-4. Zasićenje vodom na početku zavodnjavanja .....	40
Slika 7-5. Zasićenje vodom u trenutku pojave inerferencije .....	41
Slika 7-6. Zasićenje vodom u trenutku pojave inerferencije (funkcija logaritmice) .....	41
Slika 7-7. Zasićenje vodom u trenutku istiskivanja plina iz pornog prostora.....	42
Slika 7-8. Zasićenje vodom na kraju trećeg perioda.....	42
Slika 7-9. Zasićenje naftom na početku zavodnjavanja.....	43
Slika 7-10. Zasićenje naftom u trenutku pojave interferencije .....	44
Slika 7-11. Zasićenje naftom u trenutku istiskivanja plina vodom.....	44
Slika 7-12. Zasićenje naftom na kraju trećeg perioda .....	45

## **Popis tablica**

Tablica 4-1. Tablica formula za početni proračun .....	15
Tablica 4-2. Ulazni podatci.....	16
Tablica 4-3. Tablica formula za prvi period .....	17
Tablica 4-4. Primjer zavodnjavanja do pojave interferencije .....	17
Tablica 4-5. Tablica formula za drugi period .....	18
Tablica 4-6. Primjer proračuna drugog perioda.....	18
Tablica 4-7. Tablica formula za treći period.....	18
Tablica 4-8. Primjer proračuna trećeg perioda .....	19
Tablica 4-9. Tablica formula za četvrti period .....	20
Tablica 4-10. Tablica formula za ostatak četvrtog perioda .....	21
Tablica 4-11. Primjer proračuna četvrtog perioda .....	21
Tablica 5-1. Eclipse 1. Relativne propusnosti nafte i plina ovisno o zasićenju plinom .	26
Tablica 5-2. Eclipse 2 Relativne propusnosti vode i nafte kao funkcija zasićenja vodom .....	26
Tablica 5-3. Eclipse 3 Svojstva suhog plina .....	27
Tablica 5-4. Eclipse 4. Svojstva nafte sa otopljenim plinom (za 1.slučaj).....	27
Tablica 6-1. Eclipse 5. Svojstva nafte s otopljenim plinom (za 1. slučaj).....	29
Tablica 6-2. Eclipse 6. Svojstva nafte sa otopljenim plinom.....	32
Tablica 6-3. Eclipse 7. Svojstva nafte sa otopljenim plinom.....	35

## Popis oznaka

$a$	=	udaljenost dviju bušotina istog tipa
$A$	=	površina ležišta
$b$	=	dužina iscrtkanog područja
$B_g$	=	obujamski koeficijent plina
$B_o$	=	obujamski koeficijent nafte
$c$	=	koeficijent polinoma drugog stupnja
$C$	=	konstanta za proračun granične vrijednosti inicijalnog zasićenja plinom
$d$	=	Polovina udaljenosti između dviju nasuprotno postavljenih proizvodnih bušotina
$e$	=	Eulerov broj
$E_A$	=	koeficijent površinskog obuhvata
$E_{Abt}$	=	koeficijent površinskog obuhvata u trenutku prodora vode
$f_{o2}$	=	frakcijski protok nafte nakon prodora vode
$f_w$	=	frakcijski protok vode
$f_{w2}$	=	frakcijski protok vode nakon prodora vode
$f_{wf}$	=	frakcijski protok vode u trenutku prodora
$h$	=	debljina ležišta
$h_n$	=	debljina jednog proslojka
$i_{base}$	=	osnovna (bazna) injektivnost bušotine
$\bar{i}_w$	=	srednja vrijednost injektivnosti bušotine
$i_w$	=	injektivnost vode
$J$	=	Leverettova funkcija
$k$	=	propusnost
$k_d$	=	propusnost za istikujuću kapljevinu
$k_o$	=	propusnost za naftu
$k_{ro}$	=	relativna propusnost za naftu
$k_{rw}$	=	relativna propusnost za vodu
$M$	=	omjer pokretljivosti
$N_p$	=	količina proizvedene nafte
$p_c$	=	kapilarni tlak
$p_g$	=	tlak plina (nemoćiva faza)
$p_o$	=	tlak nafte (nemoćiva faza)
$p_R$	=	ležišni tlak



$p_w$	=	tlak močive faze (voda)
$p_{wf}$	=	tlak na dnu utisne bušotine
$Q_i$	=	količina utisnute vode izrađena u udjelu volumena šupljina (PV)
$Q_{ibt}$	=	utisnuta količina vode do trenutka prodora izražena u udjelu volumena šupljina
$q_o$	=	protok nafte
$q_w$	=	protok vode
$r_e$	=	vanjski radijus naftnog vala
$r_{ei}$	=	vanjski radijus vodenog vala
$r_w$	=	radijus bušotine
$r_{wi}$	=	radijus utisne bušotine
$r_{wp}$	=	radijus proizvodne bušotine
$S_{gi}$	=	početno zasićenje ležišta plinom
$S_{gi}^*$	=	granična vrijednost početnog zasićenja ležišta plinom
$S_{oi}$	=	početno zasićenje ležišta naftom
$\bar{s}_{wbt}$	=	srednje zasićenje ležišta vodom u trenutku prodora vode
$S_w$	=	zasićenje vodom
$S_{wbt}$	=	zasićenje ležišta vodom u trenutku prodora vode
$S_{wi}$	=	početno zasićenje ležišta vodom
$V_p$	=	volumen pora
$W_i$	=	ukupno utisnuta količina vode
$W_{ibt}$	=	utisnuta količina vode do trenutka prodora
$W_{if}$	=	utisnuta količina vode do zapunjenja inicijalno zasićenog dijela ležišta plinom, vodom
$W_{ii}$	=	utisnuta količina vode do pojave interferencije
$W_p$	=	proizvedena količina vode
$\Delta N_{ps}$	=	dodatno proizvedene količine nafte iz već zahvaćenog dijela ležišta vodom do trenutka njenog prodora
$\Delta N_{pu}$	=	dodatno proizvedene količine nafte iz do sada nezahvaćenog dijela ležišta vodom do trenutka njenog prodora
$\pi$	=	Ludolfov broj pi
$\Delta p$	=	razlika tlaka
$\Delta t$	=	vrijeme potrebno za svaki prirast utisnute količine vode
$\phi$	=	šupljikavost

$\gamma$	=	omjer vodljivosti
$\lambda$	=	koeficijent koji predstavlja odnos prirasta $E_A$ i $W_i/W_{ibt}$
$\mu_d$	=	viskoznost istiskujuće kapljevine
$\mu_o$	=	viskoznost nafte
$\mu_w$	=	viskoznost vode
$\theta_c$	=	kut močivosti između faza
$\sigma_{os}$	=	međupovršinska napetost između nafte i stijene
$\sigma_{ow}$	=	međupovršinska napetost između nafte i vode
$\sigma_{ws}$	=	međupovršinska napetost između vode i stijene
$\Sigma\tau$	=	ukupno proteklo vrijeme

# 1. UVOD

Zavodnjavanje je najraširenija metoda utiskivanja fluida u svijetu. Prepoznato je još 1880. godine da voda iz plićih dijelova ležišta pa kroz bušotinu dolazi u naftonosne stijene i utječe na povećanje iscrpka nafte, što je prvi uvidio John F. Carl. Tek su 1930-ih godina započeli neki od prvih projekata zavodnjavanja, a 1950-ih godina je započela šira primjena zavodnjavanja. Mnoge metode utiskivanja fluida su se razvile i pokazale čak i bolje rezultate nego zavodnjavanje, no primjenjivost zavodnjavanja poprimila je najveći značaj upravo zbog a) dostupnosti vode, b) niže cijene u odnosu na ostale fluide, c) lakoće utiskivanja u formaciju, d) učinkovitosti vode pri istiskivanju nafte.

Faktori koji utječu na povećanje iscrpka nafte zavodnjavanjem su:

- a) Početna količina nafte u ležištu na početku zavodnjavanja (engl. Oil in place) koja je funkcija obujma pora koje se mogu zasititi i zasićenja naftom
- b) Koeficijent površinskog obuhvata – udio površine ležišta zahvaćen vodom
- c) Vertikalni koeficijent površinskog obuhvata – udio ležišta zahvaćen vodom u vertikalnoj ravnini
- d) Učinkovitost istiskivanja – udio nafte koju će voda zamijeniti u dijelu ležišta zahvaćen vodom

Na ponašanje zavodnjavanja utjecaj imaju sljedeće varijable:

- zasićenje naftom na početku zavodnjavanja  $S_o$
- preostalo zasićenje naftom  $S_{or}$
- zasićenje konatnom vodom  $S_{wi}$
- zasićenje slobodnim plinom na početku utiskivanja  $S_g$
- volumen pora  $V_p$
- viskoznost nafte i vode  $\mu_o$  i  $\mu_w$
- relativne propusnosti za naftu i vodu  $k_{ro}$  i  $k_{rw}$
- način zavodnjavanja
- raspodjela tlakova između utisne i proizvodne bušotine
- obroci utiskivanja
- obujamski koeficijent nafte
- ekonomičnost

U najranijim metodama zavodnjavanja voda se utiskivala samo na jednoj bušotini, a kasnije, kako su susjedne bušotine bivale zavodnjene, i one su se koristile kao utisne bušotine kako bi se proširila površina zahvaćena vodom. Ovakav tip zavodnjavanja naziva se kružno zavodnjavanje. Forest Oil Corp. pretvara nekoliko bušotina u utisne,

tvoreći raspored utisnih i proizvodnih bušotina u redovima npr. mreža pet bušotina koja je nastala 1924. godine na polju Bradford.

## 2. OSNOVNA PROTOČNA SVOJSTVA STIJENA ZA NAFTU I VODU

Za shvaćanje ponašanja ležišta tokom zavodnjavanja, potrebno je poznavati osnovna svojstva ležišnih stijena. Svojstva stijene mogu se svesti na dva osnovna tipa: (a) svojstva samog skeleta stijene, kao što su šupljikavost, propusnost, raspored šupljina i površina, te (b) kombinirana svojstava stijene i kapljevine kao što su svojstva kapilarnog tlaka (statička) i svojstva relativnih propusnosti (protočna).

Pri tome se ukratko mogu definirati sljedeći pojmovi:

**Apsolutna propusnost** je definirana kao sposobnost stijene da propušta, provodi kapljevinu kada je u potpunosti zasićena jednom kapljevinom.

**Efektivna propusnost** je definirana kao sposobnost stijene da propušta, provodi kapljevinu kada je stijena samo djelomično zasićena tom kapljevinom.

**Relativna propusnost** je definirana kao omjer efektivne propusnosti i neke osnovne (referentne) vrijednosti (najčešće je to apsolutna propusnost).

**Šupljikavost** je udio pora u ukupnom volumenu stijene.

Statična i protočna višefazna svojstva ležišnih stijena ovise o mikroskopskoj raspodjeli ovih faza unutar šupljina stijene, a sama raspodjela ovisi o močivosti stijene.

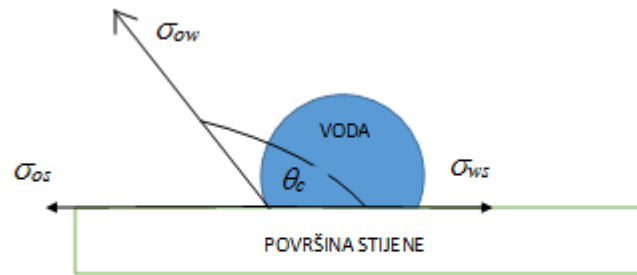
### 2.1. Močivost stijena

Močivost se može definirati kao tendencija fluida da prijanja ili moči površinu stijene u prisutnosti ostalih nemješivih fluida. U slučaju zavodnjavanja, močive faze su nafta i voda, plin može biti prisutan, ali uvjeti pod kojima bi plin u odnosu na tekućinu močio stijenu je izvan raspona koji se može pronaći u zavodnjenim ležišnim stijenama, stoga plin neće močiti stijenu.

Kad je stijena vodomočiva, voda prolazi kroz male pore i vezana je za površinu stijene u velikim porama, dok je nafta zastupljena u sredini velikih pora.

U naftomočivim stijenama, voda i dalje popunjava male pore, ali nafta je u kontaktu sa površinom stijene u velikim porama. Voda je prisutna u sredini velikih pora i prisutna je u malim količinama. Nafta se ne nalazi u malim porama zbog kapilarnih sila i zbog nepromijenjene močivosti malih pora.

Za primjer idealiziranog sustava nafta-voda (slika 2-1.), površinske napetosti nalaze se u odnosu definiranom Young-Dupre-ovom (Adams 1805) jednadžbom (2-1):



Slika 2-1. Močivost sustava nafta-voda

$$\sigma_{os} - \sigma_{ws} = \sigma_{ow} \cdot \cos \theta_c \quad (2-1)$$

gdje su:

$\sigma_{os}$  - međupovršinska napetost između nafte i stijene,

$\sigma_{ws}$  - međupovršinska napetost između vode i stijene,

$\sigma_{ow}$  - međupovršinska napetost između nafte i vode,

$\theta_c$  - kut močivosti na granici nafta-voda-stijena za vodu

Površinsku napetost između nafte i stijene, ili između vode i stijene, nije moguće izravno izmjeriti. Međutim, odgovarajuće vrijednosti, međupovršinska napetost vode i nafte i kut močivosti mogu biti određeni zasebno u laboratoriju.

Kut močivosti  $\theta_c$  je pokazatelj močivosti. Vrijednost kuta močenja može varirati od nule pa do  $180^\circ$ . Kutovi močivosti manji od  $90^\circ$  ukazuju na vodomočive stijene, dok kutovi močivosti veći od  $90^\circ$  ukazuju na naftomočive stijene. Kut močivosti od točno  $90^\circ$  ukazuje na stijenu koja je jednako pogodna za močenje naftom i vodom.

Kutovi močivosti u blizini  $0^\circ$  i  $180^\circ$  smatraju se "jako vodomočivim" odnosno "jako naftomočivim".

Močivost je važan faktor jer utječe na mjesto, protjecanje i distribuciju fluida u ležištu. Kako močivost utječe na raspodjelu, utječe i na protjecanje fluida na način da je močivi fluid vezan za stijene pa nije u mogućnosti za protjecanje, dok nemočivi fluid lako protječe. Tako se na primjer kod vodomočivih ležišta lakše postiže veći iscrpak nafte sa manjim udjelom vode u nafti (WOR, *engl. water oil ratio*) nego kod naftomočivih ležišta.

U početku razrade ležišta smatralo se da su sve formacije vodomočive jer je većina minerala sedimentnih stijena vodomočiva, a i zbog nastanka u vodenom okruženju. Nafta

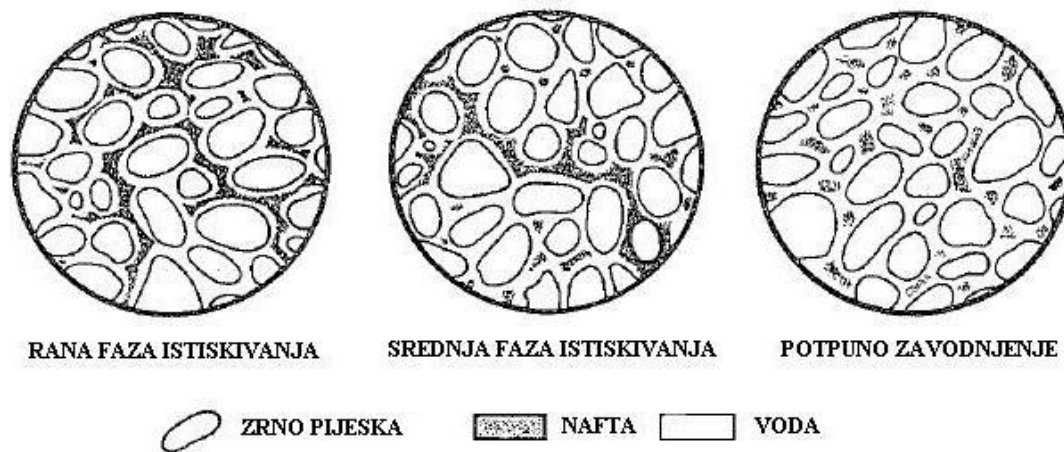
je naknadno migracijom dospijela u pore formacija. Međutim, Nutting je 1934. godine prepoznao da su neke proizvodne formacije naftomočive.

Opsežna laboratorijska iskustva dovela su do zaključka da je priroda močivosti ležišta rezultat prisutnosti ili odsutnosti polarnih sastojaka u malenoj količini nafte (Benner i Bartell 1941, Leach 1957). Ovi polarni sastojci, naizgled asfaltni po prirodi, adsorbiraju se na površini stijene i čine te površine naftomočivim. Utjecaj ovih polarnih sastojaka do neke mjere ovisi o prirodi same površine stijene –površina stijene može biti prvenstveno silikatna, karbonatna ili glinena.

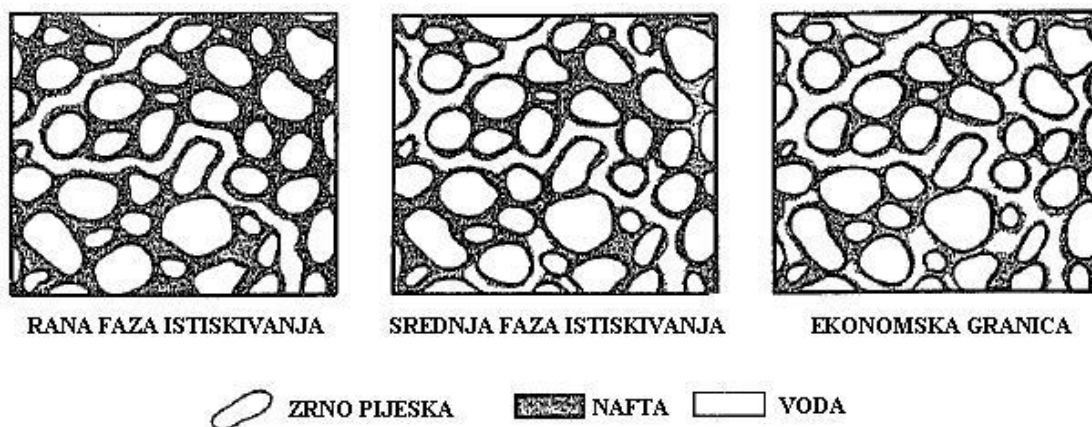
## 2.2. Raspodjela kapljevina

Uz određenu količinu močive kapljevine u šupljinama, svaka se kapljevina kreće unutar svoje mreže šupljina, bila ona močiva ili nemočiva. Uz svako povećanje zasićenja nemočivom fazom, povećava se i broj šupljina popunjen nemočivom kapljevonom.

Na slici 2-2. prikazana je raspodjela prilikom zavodnjavanja prvobitno vodomochive naslage. U dijelu ležišta koji nije zahvaćen vodom, zasićenje vodom je nisko i nalazi se kao tanak sloj oko čestica pijeska. Sav je preostali dio šupljina popunjen naftom. U području gdje protječu obje kapljevine, dio nafte protječe poput dugog kanala koji se grana u tzv. „slijepe ulice“. Preostala nafta se u obliku kuglica nalazi izolirana i zarobljena u vodi. Na kraju zavodnjavanja u stijeni ostaje samo izolirana i zarobljena nafta.



Slika 2-2. Raspodjela kapljevina tijekom zavodnjavanja vodomochive stijene (Stanolind Oil and Gas Co.,1952)



Slika 2-3. Raspodjela kapljevina tijekom zavodnjavanja naftomočive stijene (Stanolind Oil and Gas Co., 1952)

Na slici 2-3. prikazano je zavodnjavanje naftomočive, prvobitno naftom zasićene stijene. Kad voda (kao nemočiva faza) prodre u stijenu, stvara vijugav i dugačak kanal kroz najveće šupljine. Daljnjim utiskivanjem vode prodiranje se proširuje na manje šupljine, a moguće je i stvaranje i dugih kanala. Na slikama je prikazana raspodjela močive i nemočive kapljevine unutar šupljina koja ovisi o smjeru smanjenja promjene zasićenja, a ne samo o zasićenju tom fazom. Dva pojma koji određuju smjer promjene zasićenja su:

a) isušivanje (*engl. drainage*) - odnosi se na protok koji utječe na smanjenje zasićenja močive faze.

b) imbibicija (*imbibition*) – odnosi se na protok koji utječe na povećanje zasićenja močivom fazom.

Kao primjer procesa imbibicije je zavodnjavanje prvobitno vodomčive stijene, a primjer procesa isušivanja je zavodnjavanje naftomočive stijene. Kako na raspodjelu kapljevine utječu močivost i smjer promjene zasićenja, tako isto utječu i na svojstva kapilarnog tlaka i svojstva relativnih propusnosti.

### 2.3. Kapilarni tlak

Kapilarni tlak je razlika tlakova duž razdjelnice koja razdvaja dvije nemješive kapljevine, od kojih jedna ima veći afinitet za močenje stijene od druge. Općenito se definira kao razlika tlaka močive i nemočive faze.

Kapilarni tlak sustava voda-nafta je tada tlak naftne faze minus tlak vodene faze:

$$P_c = P_o - P_w \quad (2-2)$$

Gdje su:  $p_c$  – kapilarni tlak,

$p_o$  – tlak nemočive faze (nafta),

$p_w$  – tlak močive faze (voda).



Za sustav plin-voda, kapilarni tlak može se definirati kao razlika tlaka plinske faze i vodene faze:

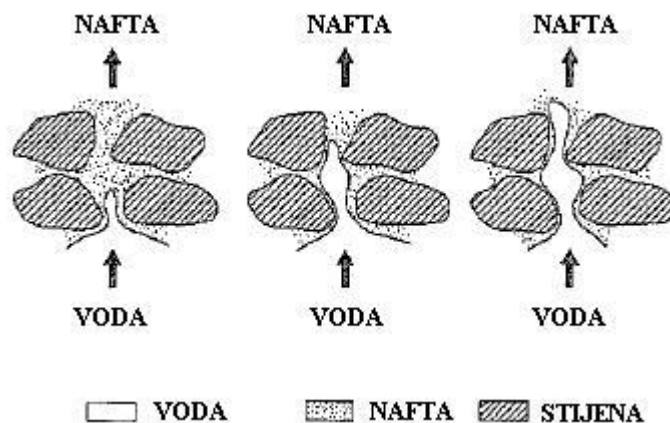
$$p_c = p_g - p_w \quad (2-3)$$

Gdje je:  $p_g$  – tlak nemoćive faze (plin)

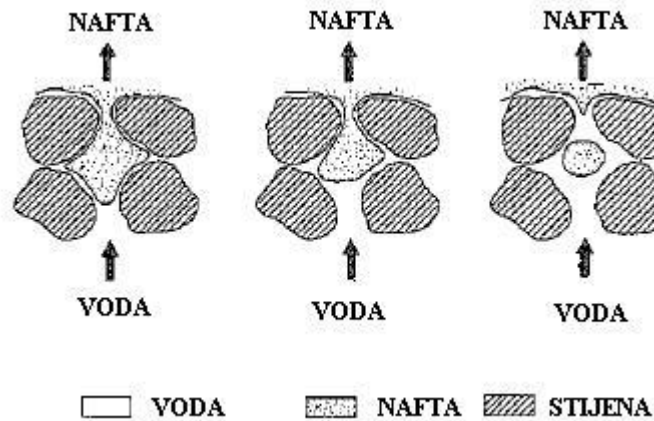
Važnost kapilarnih sila:

- kapilarne sile zajedno s gravitacijom kontroliraju vertikalnu raspodjelu fluida u ležištu pa se podatci kapilarnih tlakova uzimaju kao pokazatelj raspodjele veličine pora u ležištu
- podatci mogu poslužiti za opisivanje ponašanja zavodnjavanja u kompliciranijim modelima kao što su frakturirana ležišta
- sile utječu na kretanje fronte zavodnjavanja i efikasnost istiskivanja
- podatci kapilarnog tlaka se koriste za određivanje ireducibilnog zasićenja (nepokretne) vode

U svom prvom radu Leverett (1942) je predstavio podatke o svojstvima kapilarnog tlaka za slučaj isušivanja i imbibicije nekonsolidiranog pješčenjaka. Ostali istraživači (Purcell 1949, Welge 1948 i Jones-Para 1953) su također ispitivali svojstva kapilarnog tlaka. Promjene raspodjele kapljevine tokom isušivanja i imbibicije prikazana je na slikama 2-4. i 2-5.



Slika 2-4. Shema procesa isušivanja (Raza, 1968)



Slika 2-5. Shema procesa imbibicije (Raza, 1968)

Postoje različite metode mjerenja kapilarnih tlakova, a to su:

- Restored state metoda
- Centrifugiranje
- Utiskivanje žive

Mnoga laboratorijska mjerenja koriste ili zrak – slana voda ili zrak – živa sustav.

Podatke dobivene takvim sustavima potrebno je pretvoriti u prave ležišne uvjete tako da se uzme u obzir razlika međupovršinskih napetosti laboratorijskih i ležišnih fluida i razlika u močivosti fluida.

Konverzija se može napraviti pomoću relacije:

$$p_{cR} = p_{cL} \times \frac{(\sigma \cdot \cos \theta)_R}{(\sigma \cos \theta)_L} \quad (2-4)$$

Pri čemu su :

$p_{cR}$  – kapilarni tlak u ležišnim uvjetima

$p_{cL}$  – kapilarni tak u laboratorijskim uvjetima

$\sigma$  – međupovršinska napetost

$\Theta$  - kontaktni kut

Kapilarni tlak ovisi o zasićenosti stijene fluidom, odnosno raste kako zasićenje močive faze opada, a obrnuto je proporcionalan radijusu pora u kojima se nalazi fluid.

Svaki uzorak stijene iz ležišta daje različite rezultate, odnosno različite krivulje kapilarnih tlakova pa je pitanje kako dobiti krivulju koja daje srednje ponašanje ležišta. Koriste se dvije metode, a to su J- funkcija i korelacija sa propusnošću.

J-funkciju je osmislio Leverett sa svrhom stvaranja univerzalne krivulje kapilarnog tlaka. Ona je bezdimenzionalna i povezuje kapilarni tlak sa svojstvima stijene i fluida.

$$J(S_w) = \frac{P_c}{\sigma_{ow} \cdot \cos \theta_c} \cdot \sqrt{\frac{k}{\phi}} \quad (2-5)$$

J-funkcija bi trebala za jezgre 1 i 2 za neko zasićenje  $S_w$  biti jednaka čak i kada su vrijednosti kapilarnog tlaka drukčije. Brown je ukazao na to da je korisnost funkcije ograničena na određene litološke tipove unutar iste naslage.

Korelacija sa propusnošću je bazirana na empirijskim istraživanjima. Ako je poznata srednja efektivna propusnost ležišta, srednji kapilarni tlak se može očitati kao funkcija zasićenja.

#### 2.4. Omjer pokretljivosti

Jedna od najvažnijih karakteristika zavodnjavanja je omjer pokretljivosti, a definiran je kao omjer efektivne propusnosti stijene za određenu kapljevinu i njene viskoznosti.

Definicija omjera pokretljivosti je usvojena od strane Udruge naftnih inženjera (SPE) 1957. godine:

$$M = \frac{k_d \mu_o}{\mu_d k_o} \quad (2-6)$$

Gdje su:

$M$  – omjer pokretljivosti

$k_d$  – propusnost za istiskivajuću kapljevinu

$\mu_d$  - viskoznost istiskivajuće kapljevine

$\mu_o$  - viskoznost istiskivane kapljevine (nafta)

$k_o$  - propusnost za istiskivanu kapljevinu (nafta)

Indeks  $d$  se odnosi na istiskivajuću kapljevinu. U terminologiji zavodnjavanja, ovaj izraz postaje:

$$M = \frac{k_w \mu_o}{\mu_w k_o} = \frac{k_{rw} \mu_o}{\mu_w k_{ro}} \quad (2-7)$$

Kao što se može vidjeti iz jednadžbe, omjer pokretljivosti je funkcija efektivne propusnosti, koja je funkcija zasićenja.

Važno je napomenuti da su relativne propusnosti za vodu i naftu definirane na dvije različite točke u ležištu, npr.  $k_{rw}$  je relativna propusnost za vodu u zavodnjenom dijelu ležišta, dok je relativna propusnost za naftu definirana u dijelu ležišta u kojem se nalazi nafta, odnosno u dijelu koji nije zahvaćen vodom pa će relativna propusnost za naftu biti maksimalna ( $k_{ro} = 1$ ).

Postoji problem jer postoji gradijent zasićenja iza vodenog vala, pa ako je  $k_{rw}$  relativna propusnost za vodu iza fronte, pitanje glasi koje se zasićenje vodom iza fronte uzima za određivanje  $k_{rw}$ . Studije Craig et al. (1955) donijele su opće prihvaćen zaključak da  $k_{rw}$  treba biti određen pri srednjem zasićenju vodom  $S_{WBTag}$ , a  $k_{ro}$  definiran ispred fronte istiskivanja na  $S_{wi}$ .

$$M = \frac{\mu_o}{\mu_w} \times \frac{(k_{rw})_{S_{wbtag}}}{(k_{ro})_{S_{wi}}} \quad (2-8)$$

Srednje zasićenje vodom ostaje konstantno sve do prodora vode pa će tako i omjer pokretljivosti ostati jednak do prodora vode. Omjer pokretljivosti nakon prodora vode raste konstantno jer raste srednje zasićenje vodom u ležištu što uzrokuje rast  $k_{rw}$ .

Pri zavodnjavanju kod kojeg nema gradijenta zasićenja iza vodenog vala, nema dvosmislenosti pri određivanju vrijednosti relativne propusnosti za vodu koja će se koristiti.

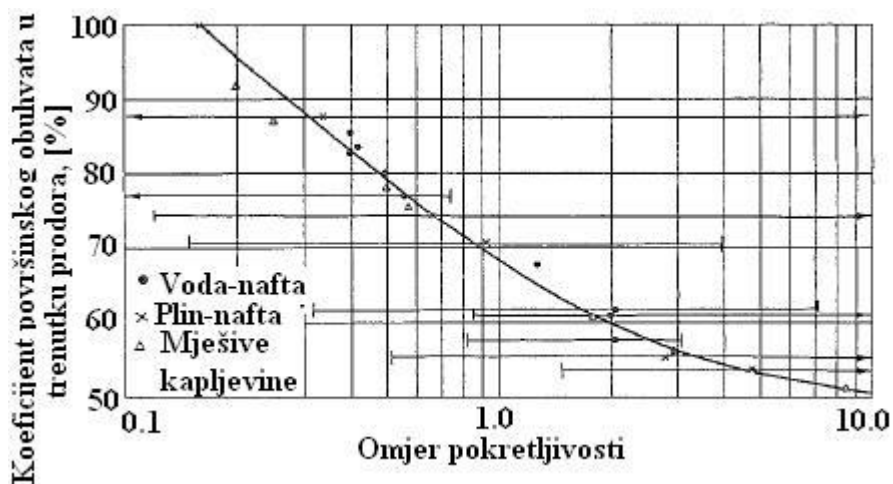
Uglavnom, ukoliko se ne primijeni neka druga oznaka, pod izrazom omjer pokretljivosti smatra se onaj prije prodora vode.

Kada je  $M = 1$ , mobilnost vode i nafte su identični i imaju isti otpor protjecanju u ležištu.

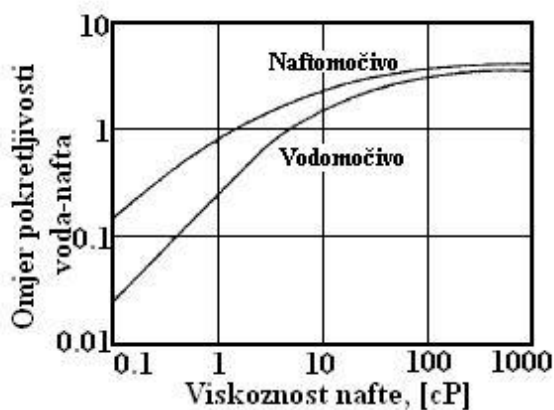
Kada je  $M < 1$ , nafta protječe bolje od vode i lakše je vodi istisnuti naftu, takvi uvjeti doprinose visokom stupnju istiskivanja i povećanom iscrpku nafte, a za  $M > 1$ , voda protječe bolje od nafte i takvi uvjeti nisu učinkoviti za istiskivanje nafte. Površinski obuhvat i iscrpak nafte padaju kako omjer pokretljivosti raste.

Tijekom zavodnjavanja  $M$  može biti u rasponu od 0.02 do 2.0. Važnost omjera pokretljivosti dolazi do izražaja kod određivanje površinskog obuhvata.

Površinski i vertikalni obuhvat ležišta bilo kojom utisnom kapljevinom rastu za manje vrijednosti omjera pokretljivosti, a smanjuju se za veće vrijednosti omjera vodljivosti. U uobičajenoj uporabi, omjeri pokretljivosti manji od jedinice nazvani su "pogodnima", a oni koji su veći od jedinice nazvani su "nepogodnima".



Slika 2-6. Koeficijent površinskog obuhvata u trenutku prodora za mrežu pet bušotina (Craig et al, 1971)



Slika 2-7. Utjecaj viskoznosti nafte na omjer pokretljivosti voda-nafta, viskoznost vode = 0,5 cP (Craig et al, 1971)

### 2.5. Koeficijent površinskog obuhvata

Zavodnjavanjem se voda utiskuje kroz neke bušotine i proizvodi na drugim bušotinama. Između bušotina dolazi do raspodjele tlakova i stvaranja strujnica. Linija koja povezuje utisnu i proizvodnu bušotinu je najkraća strujnica između te dvije bušotine, stoga je gradijent tlaka uzduž ove strujnice najveći. Ovom strujnicom će voda najbrže doseći do proizvodne bušotine. Prema tome, voda je zahvatila dio ležišta koji se nalazi između ove dvije bušotine u trenutku prodora vode. Taj zahvaćeni udio predstavlja koeficijent površinskog obuhvata u trenutku prodora,  $E_{Abt}$ .

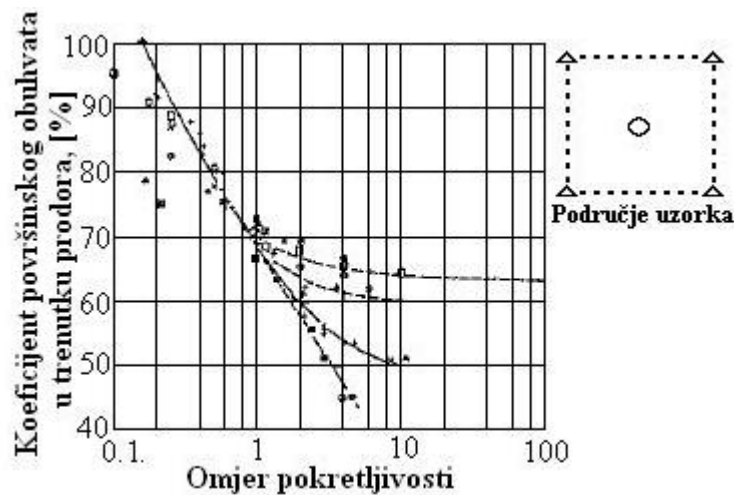
Na koeficijent površinskog obuhvata utjecaj imaju omjer pokretljivosti i raspored bušotina. Koeficijent površinskog obuhvata raste kada omjer pokretljivosti pada. Raspored proizvodnih i utisnih bušotina određuje distribuciju tlakova u ležištu, tj. put kojim se utisnuta voda kreće od utisne do proizvodne bušotine.

### 2.5.1. Koeficijent površinskog obuhvata u trenutku prodora vode

Za raznolike mreže bušotina u trenutku prodora vode zabilježene su vrijednosti koeficijenta površinskog obuhvata, a najčešća je bila mreža od pet bušotina.

Na slici 2-8. prikazani su koeficijenti površinskog obuhvata dobiveni od raznih istraživača za razvijenu mrežu pet bušotina. Primjećuje se da postoji slaganje među mnogim istraživačima kada je omjer pokretljivosti jednak 1 ili manji od 1. Pri vrijednostima omjera pokretljivosti iznad 1 dolazi do velikog neslaganja kod objavljenih vrijednosti.

Na slici 2-8. prikazane su četiri krivulje za omjer pokretljivosti iznad 1. Poblži opis procesa zavodnjavanja ležišta (stalan protok, nemješive kapljevine) daju podatci dobiveni od Craig et al. (1955) i vjerojatno su najbolji predstavnici stvarnih zavodnjavanja. Krivulja koja predstavlja Craigove podatke je ravna linija.



Slika 2-8. Koeficijent površinskog obuhvata u trenutku prodora za mrežu pet bušotina, (Craig et al, 1955)

### 3. CRAIG-GEFFEN-MORSEOVA METODA (CGM)

CGM metoda namijenjena je predviđanju ponašanja višeslojnih heterogenih ležišta za vrijeme zavodnjavanja i to u zavodnjavanju kod modela mreža pet bušotina. Metoda pretpostavlja da je koeficijent vertikalnog obuhvata potpun (100 %), što znači da nema djelovanja gravitacijskih sila i odvajanja tekućina, da nema međusobne komunikacije između proslojaka ležišta i nije primjenjiva za proračun zavodnjavanja ležišta sa aktivnom podinskom vodom.

Koristi se izmijenjena Welgeova jednadžba i dvije eksperimentalno izvedene korelacije. Prva korelacija opisuje odnos koeficijenta površinskog obuhvata u trenutku prodora i omjera vodljivosti. Druga korelacija može se izraziti sljedećom jednadžbom:

$$E_A = E_{Abr} + 0.633 \cdot \log \frac{W_i}{W_{ibt}} \quad (3-1)$$

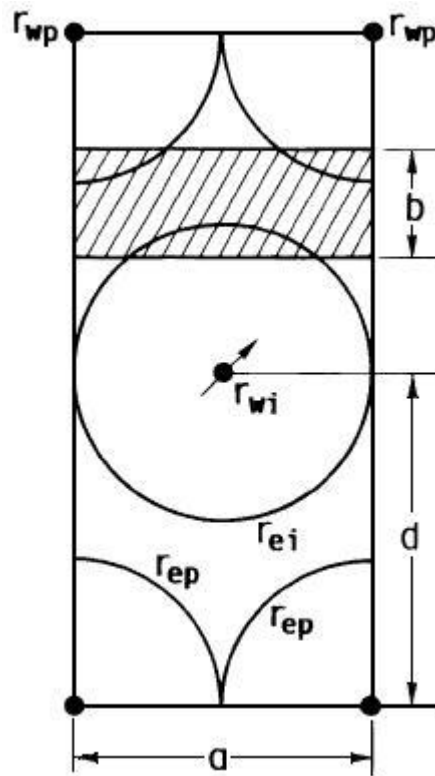
Proračun je podijeljen u četiri perioda:

Prvi period započinje utiskivanjem vode kroz utisnu bušotinu i traje do susreta vodenih fronti utisnih bušotina (interferencije).

Drugi period započinje pojavom interferencije, a traje do trenutka kada je sav porni prostor koji je bio zasićen plinom zapunjen vodom.

Treći period započinje kada sav plin u pornom prostoru zamijeni voda i traje do prodora vode na proizvodnoj bušotini.

Četvrtim periodom obuhvaćeno je razdoblje od prodora vode na proizvodnim bušotinama do trenutka kada nije više isplativo pridobivanje nafte.



Slika 3-1. Položaj bušotina u redovima naizmjenice postavljenih bušotina (Willhite, 1986)

Na slici 3-1. prikazan je tipičan položaj bušotina u redovima naizmjenice postavljenih bušotina, gdje je:

$r_{wp}$  – radijus proizvodne bušotine,

$r_{wi}$  – radijus utisne bušotine,

$r_{ei}$  - vanjski radijus vodenog vala,

$r_{ep}$  – vanjski radijus naftnog vala,

$a$  – udaljenost između proizvodnih bušotina i širina iscrtkanog područja,

$b$  – dužina iscrtkanog područja,

$d$  – polovina udaljenosti između dvaju nasuprotno postavljenih proizvodnih bušotina.



## 4. PRORAČUN CGM METODOM

### 4.1. Početni proračun za promatrani slučaj

U tablici 4-1. su prikazane jednadžbe za uvodni proračun, a u tablici 4-2. su ulazni podatci za proračun.

Tablica 4-1. Tablica formula za početni proračun

frakcijski protok vode	$f_w = \frac{1}{1 + \frac{\mu_w}{\mu_o} \cdot \frac{k_{ro}}{k_{rw}}}$	(4-1)
------------------------	---	-------

omjer pokretljivosti fluida	$M = \frac{k_{rw}}{\mu_w} \cdot \frac{\mu_o}{k_{ro}}$	(4-2)
-----------------------------	---	-------

porni volumen elementa mreže	$V_p = A \cdot h_n \cdot \phi$	(4-3)
------------------------------	--------------------------------	-------

količina nafte u proslojku na početku zavodnjavanja	$N = \frac{V_p \cdot S_{oi}}{B_o}$	(4-4)
---	------------------------------------	-------

koeficijent površinskog obuhvata pri prodoru vode	$E_{Abt} = 0,546 + \frac{0,0317}{M} + \frac{0,3022}{e^M} - 0,0051M$	(4-5)
---	---	-------

utisnute količine vode do pojave interferencije	$W_{ii} = \pi \cdot h \cdot \phi \cdot S_{gi} \cdot d^2$	(4-6)
---	--	-------

do popunjenja pornog prostora zasićenog plinom	$W_{if} = V_p \cdot S_{gi}$	(4-7)
--	-----------------------------	-------

do prodora vode na proizvodnoj bušotini	$W_{ibt} = V_p \cdot E_{Abt} \cdot (\overline{S_{wbt}} - S_{wi})$	(4-8)
---	---	-------

Tablica 4-2. Ulazni podatci

promjer bušotine	$r_w$	0.3048	m
površina područja zavodnjavanja	$A$	161871.1	$m^2$
efektivna debljina	$h$	15.24	m
prosječna propusnost	$k$	50	mD
šupljikavost	$\theta$	20	dij. jed.
zasićenje konatnom vodom	$S_{wi}$	0.1	dij. jed.
prosječno zasićenje plinom (na početku zavodnjavanja)	$S_{gi}$	0.15	dij. jed.
prosječno zasićenje naftom (na početku zavodnjavanja)	$S_{oi}$	0.75	dij. jed.
viskoznost nafte	$\mu_o$	1	cp
viskoznost vode	$\mu_w$	0.5	cp
ležišni tlak	$p_R$	68.95	bar
tlak na dnu utisne bušotine	$p_{wf}$	275.79	bar
volumni faktor nafte	$B_{oi}$	1.2	
volumen šupljina	$V_p$	49 336	$m^3$
količina nafte na početku zavodnjavanja pri standardnim uvjetima	STOIP	30 835.22	$m^3$
koeficijent površinskog obuhvata u trenutku prodora vode	$E_{Abt}$	0.717	
količina utisnute vode u trenutku prodora	$W_{ibt}$	16375.09668	$m^3$
maksimalno zasićenje plinom pri kojem je predikcija precizna	$S_{gi}^*$	0.372	dij. jed.
vrijednost koeficijenta C ( $C=f(M)$ )	$C$	1.1898	
utisnuta voda pri interferenciji bušotina	$W_{ii}$	5817.327	$m^3$
polu-udaljenost između dvije utisne bušotine	$r_{ei}$	201.167	m
količina utisnute vode u trenutku zapunjenja ležišta	$W_{if}$	7400.454	$m^3$
udaljenost između utisne i proizvodne bušotine	$d$	284.493	m
bazna brzina utiskivanja vode	$i_{base}$	42.767	$m^3/dan$
količina vode utisnute do trenutka prodora, izražena u dijelovima pornog volumena	$Q_{ibt}$	0.463	PV

#### 4.2. Prvi period- od početka utiskivanja do pojave interferencije

Tablica 4-3. Tablica formula za prvi period

Vanjski radijus  
naftnog vala

$$r_e = \sqrt{\frac{W_{ii}}{\pi \times h \times \phi \times S_{gi}}} \quad (4-9)$$

Vanjski radijus  
vodenog vala

$$r_{ei} = \sqrt{\frac{W_{ii}}{\pi \times h \times \phi \times (S_w - S_{wi})}} \quad (4-10)$$

Količine utiskivanja  
vode

$$i_w = \frac{53.568 \cdot 10^{-3} \times k \times h \times \Delta p}{\frac{\mu_w}{k_{rw}} \times \ln \frac{r_{ei}}{r_w} + \frac{\mu_o}{k_{ro}} \times \ln \frac{r_e}{r_{ei}}} \quad (4-11)$$

Srednja vrijednost  
utisnute količine vode

$$\bar{i}_w = \frac{((i_w)_n + (i_w)_{n-1})}{2} \quad (4-12)$$

Vrijeme potrebno za  
svako povećanje  
količine utisnute vode

$$(\Delta t)_n = \frac{((W_i)_n - (W_i)_{n-1})}{\bar{i}_w} \quad (4-13)$$

Ukupno proteklo  
vrijeme prvog perioda

$$t_{bt} = \sum \Delta t \quad (4-14)$$

Tablica 4-4. Primjer zavodnjavanja do pojave interferencije

W <sub>ii</sub>	W <sub>ii</sub> (cum)	r <sub>ep</sub>	r <sub>ei</sub>	i <sub>w</sub>	i <sub>w</sub> (avg)	Δt	t=ΣΔt
m <sup>3</sup>		m	m	m <sup>3</sup> /dan	m <sup>3</sup> /dan	dan	dan
<b>79,50</b>	79,50	23,53	13,39	100,52	0	0,791	0,791
<b>794,94</b>	874,43	74,39	42,34	79,03	89,77	7,969	8,760
<b>1589,88</b>	2464,31	105,21	59,88	74,25	76,64	10,373	19,133
<b>2384,82</b>	4849,13	128,85	73,34	71,71	72,98	10,892	30,025
<b>3179,76</b>	8028,88	148,79	84,69	70,02	70,86	11,218	41,243
<b>3974,70</b>	12003,58	166,35	94,68	68,75	69,38	11,457	52,700
<b>4769,64</b>	16773,21	182,23	103,72	67,76	68,25	11,647	64,347
<b>5564,58</b>	22337,79	196,83	112,03	66,93	67,34	11,804	76,151
<b>5812,65</b>	28150,44	201,17	114,50	66,70	66,82	3,713	79,864

### 4.3 .Drugi period – od inerferencije do zapunjenja vodom svog prostora koji je bio zapunjen plinom

Tablica 4-5. Tablica formula za drugi period

Koeficijent površinskog obuhvata do zapunjenja pornog volumena zasićenog plinom

$$E_{Af} = \frac{W_i}{V_p \cdot (S_{wbt} - S_{wi})} \quad (4-15)$$

Omjer vodljivosti

$$\mu = \text{OČITANO IZ GRAFA (Craig et al., 1971.)} \quad (4-16)$$

Za mrežu pet bušotina injektivnost bušotine

$$i_{base} = \frac{0,011635 \cdot k \cdot k_{ro} \cdot h \cdot \Delta p}{\mu_o \cdot (\log \frac{d}{r_w} - 0,2688)} \quad (4-17)$$

Količina utiskivanja vode

$$i_{wf} = i_{base} \cdot \gamma \quad (4-18)$$

Vrijeme drugog perioda

$$\Delta t = \frac{W_{if} - W_{ii}}{0.5 \cdot (i_{wi} + i_{wf})} \quad (4-19)$$

Tablica 4-6. Primjer proračuna drugog perioda

$W_i$	$E_{Af}$	$\gamma$	$i_{wf}$	$i_{wf(avg)}$	$\Delta t$
$m^3$			$m^3/dan$		$dan$
5812,65	0,254	0,98	41,93		
6359,49	0,278	0,97	41,50	41,71	
7154,43	0,313	0,965	41,29	41,39	
7400,89	0,323	0,96	41,07	41,18	29,44

### 4.4 Treći period – od zapunjenja do prodora vode

Tablica 4-7. Tablica formula za treći period

Ukupna proizvedena količina nafte do trenutka prodora vode

$$N_p = \frac{W_i - W_{if}}{B_o} \quad (4-20)$$

Protok nafte za svaki period povećanja utisnute količine vode

$$q_o = \frac{i_w}{B_o} \quad (4-21)$$

Ukupna količina proizvedene nafte

$$N_p = q_o \cdot \Delta t \quad (4-22)$$

Tablica 4-8. Primjer proračuna trećeg perioda

$W_i$	$E_{abt}$	$\gamma$	$i_{wbt}$	$i_{Wavg}$	$q_{ibt}$
<b>m<sup>3</sup>/dan</b>			<b>m<sup>3</sup>/dan</b>		<b>m<sup>3</sup>/dan</b>
7400,89	0,324	0,96	41,07		39,43
7949,37	0,348	0,95	40,64	40,86	38,61
9539,24	0,418	0,94	40,22	40,43	37,80
11129,11	0,487	0,94	40,22	40,22	37,80
12718,98	0,557	0,93	39,79	40,00	37,00
14308,86	0,626	0,92	39,36	39,58	36,21
15898,73	0,696	0,92	39,36	39,36	36,21
16379,21	0,717	0,90	38,51	38,93	34,66

	$\Delta t$	$t_{bt}$	$q_o$	$N_p$	$N_p$
	<b>dan</b>	<b>dan</b>	<b>m<sup>3</sup>/dan</b>	<b>m<sup>3</sup></b>	<b>%</b>
	0	109,31	34,23	0	0
	13,43	122,73	33,87	457,06	1,48
	39,32	162,06	33,51	1781,96	5,78
	39,53	201,59	33,51	3106,85	10,08
	39,74	241,33	33,16	4431,75	14,37
	40,17	281,51	32,80	5756,64	18,67
	40,39	321,90	32,80	7081,53	22,96
	12,34	334,24	32,09	7481,93	24,26

4.5 Četvrti period – period nakon prodora vode do ekonomske isplativosti utiskivanja vode

Tablica 4-9. Tablica formula za četvrti period

Koeficijent

površinskog obuhvata,  $E_a$  nakon prodora vode

$$E_a = 0,2749 \cdot \ln \left( \frac{W_i}{W_{ibt}} \right) + E_{Abt} \quad (4-23)$$

Omjer utisnutih

pornih volumena vode,  $Q_i$  nakon prodora i u trenutku samog prodora,  $Q_{ibt}$

$$\frac{Q_i}{Q_{ibt}} = \text{očitano iz D. 1.} \quad (4-24)$$

Utisnuta količina pornih volumena vode

$$Q_i = \frac{Q_i}{Q_{ibt}} \cdot (\bar{S}_{wbt} - S_{wi}) \quad (4-25)$$

Nagib krivulje frakcionalnog protoka vode

$$\left( \frac{df_w}{dS_w} \right)_{S_{w2}} = \frac{1}{Q_i} \quad (4-26)$$

Zasićenje naftom nakon prodora vode

$$f_{o2} = 1 - f_{w2} \quad (4-27)$$

Srednje zasićenje vodom u ležištu, za bilo koje vrijeme nakon prodora vode

$$\bar{S}_w = S_{w2} + (Q_i \cdot f_{o2}) \quad (4-28)$$

Koeficijent  $\lambda$

$$\lambda = 0,2749 \cdot \left( \frac{1}{\frac{W_i}{W_{ibt}}} \right) \quad (4-29)$$

Dodatne proizvedene količine nafte iz dijela ležišta nezahvaćenog vodom do trenutka njenog prodora

$$\Delta N_{pu} = \lambda \cdot \left( \frac{S_{wf} - S_{wi}}{E_A \cdot (\bar{S}_{wbt} - S_{wi})} \right) \quad (4-30)$$

Dodatne proizvedene količine nafte pridobivene iz dijela ležišta koji je već bio obuhvaćen utisnutom vodom u trenutku njenog prodora

$$\Delta N_{ps} = f_{o2} \cdot (1 - N_{pu}) \quad (4-31)$$

$WOR_p$

$$WOR_p = \frac{1 - \Delta N_{ps} - \Delta N_{pu}}{\Delta N_{ps} + \Delta N_{pu}} \quad (4-32)$$

Tablica 4-10. Tablica formula za ostatak četvrtog perioda

$$WOR = WOR_p \cdot \frac{B_o}{B_w} \quad (4-33)$$

Proizvedenu naftu za svaki period povećanja utiskivane količine vode

$$N_p = \frac{V_p \cdot (E_A \cdot (\bar{S}_w - S_{wc}) - S_g)}{B_o} \quad (4-34)$$

Omjer pokretljivosti

$$M = \frac{(k_{rw})_{\bar{S}_w} \cdot \mu_o}{(k_{ro})_{S_{wi}} \cdot \mu_w} \quad (4-35)$$

Dnevne količine proizvodnje nafte

$$q_o = \frac{i_w \cdot (\Delta N_{pu} + \Delta N_{px})}{B_o} \quad (4-36)$$

Dnevna količina proizvedene vode

$$q_w = \frac{i_w \cdot (1 - (\Delta N_{px} + \Delta N_{pu}))}{B_w} \quad (4-37)$$

Ukupnu količinu proizvedene vode

$$W_p = \frac{(W_i - (N_p \cdot B_o) - (V_p \cdot S_g))}{B_w} \quad (4-38)$$

Ukupna proizvedena količina nafte

$$N_{puk} = \sum_{i=1}^4 N_{pi} \quad (4-39)$$

Tablica 4-11. Primjer proračuna četvrtog perioda

Wi	Wi/Wibt	Ea	Qi/Qibt	Qi	(dfw/dSw)Sw2	Sw2	f_w2
m <sup>3</sup>						dij. jed.	dij. jed.
16378,24	1	0,717	1	0,463	2,16	0,47	0,8
19654,01	1,2	0,767	1,193	0,552	1,81	0,492	0,843
22930,74	1,4	0,81	1,375	0,637	1,571	0,507	0,87
26205,87	1,6	0,847	1,548	0,717	1,395	0,524	0,893
29482,61	1,8	0,879	1,715	0,794	1,259	0,534	0,905
32757,74	2	0,908	1,875	0,868	1,152	0,543	0,92
40947,18	2,5	0,969	2,257	1,045	0,957	0,562	0,937
49136,62	3	1	2,619	1,213	0,825	0,575	0,949
65515,49	4	1	3,336	1,545	0,647	0,597	0,963
81894,36	5	1	4,053	1,877	0,533	0,611	0,973
98273,23	6	1	4,77	2,209	0,453	0,622	0,98
131031	8	1	6,204	2,872	0,348	0,637	0,985
163788,7	10	1	7,638	3,536	0,283	0,65	0,99
245683,1	15	1	11,223	5,196	0,192	0,672	0,995

$f_{o2}$	$S_w$ avg	$\lambda$	$\Delta N_{pu}$	$\Delta N_{ps}$	$\Delta N_{pu+}$ $\Delta N_{ps}$	WORp
dij. jed.						
0,2	0,563	0,275	0,306	0,139	0,445	1,25
0,157	0,579	0,229	0,255	0,117	0,372	1,69
0,13	0,59	0,196	0,219	0,102	0,32	2,12
0,107	0,601	0,172	0,191	0,087	0,278	2,6
0,095	0,609	0,153	0,17	0,079	0,249	3,02
0,08	0,612	0,137	0,153	0,068	0,221	3,53
0,063	0,628	0,11	0,123	0,055	0,178	4,62
0,051	0,637	0	0	0,051	0,051	18,61
0,037	0,654	0	0	0,037	0,037	26,03
0,027	0,662	0	0	0,027	0,027	36,04
0,02	0,666	0	0	0,02	0,02	49
0,015	0,68	0	0	0,015	0,015	65,67
0,01	0,685	0	0	0,01	0,01	99
0,005	0,698	0	0	0,005	0,005	199

WOR	$N_p$	$k_{rw}@S_w$ avg	M	CR	iw	iwavg	Dwi	qi
	$m^3$							$m^3/dan$
1,47	7476,46	0,4	0,8	0,9	38,51			34,65
1,98	8938,43	0,43	0,86	0,94	40,22	39,36	3275,769	37,80
2,50	10140,15	0,45	0,9	0,96	41,07	40,64	3276,728	39,43
3,06	11259,71	0,48	0,96	0,98	41,93	41,50	3275,138	41,09
3,55	12242,28	0,5	1	1	42,78	42,36	3276,728	42,78
4,15	12961,52	0,51	1,02	1,018	43,56	43,17	3275,138	44,35
5,44	14867,07	0,542	1,084	1,081	46,26	44,91	8189,436	50,01
21,89	15905,44	0,56	1,12	1,12	47,92	47,09	8189,436	53,67
30,62	16617,02	0,6	1,2	1,2	51,34	49,63	16378,87	61,61
42,40	16926,11	0,625	1,25	1,25	53,48	52,41	16378,87	66,85
57,65	17111,28	0,635	1,27	1,27	54,34	53,91	16378,87	69,01
77,25	17683,47	0,67	1,34	1,34	57,33	55,83	32757,74	76,82
116,47	17900,45	0,69	1,38	1,38	59,04	58,19	32757,74	81,48
234,12	18419,22	0,72	1,44	1,44	61,61	60,32	81894,36	88,72



$\Delta t$	$t_{uk}$	$q_o$	$q_w$	$W_p$
dan	dan	$m^3/dan$	$m^3/dan$	$m^3$
0	334,24	14,279	20,38	5,49
83,22	417,46	12,472	25,33	1497,06
80,62	498,08	10,963	28,47	3295,75
78,92	577,00	9,711	31,38	5189,55
77,36	654,36	8,877	33,91	7246,06
75,86	730,23	8,018	36,33	9610,81
182,36	912,59	6,853	43,16	15397,84
173,92	1086,51	2,036	51,63	22205,10
330,03	1416,54	1,583	60,03	37425,66
312,52	1729,06	1,203	65,65	53119,74
303,83	2032,89	0,906	68,10	68959,61
586,72	2619,61	0,717	76,11	100401,88
562,99	3182,59	0,492	80,98	132262,04
1357,56	4540,15	0,257	88,46	211940,31

## 5. INICIJALIZACIJA SIMULACIJSKOG MODELA

U računalnom programu Eclipse izrađen je simulacijski model istog slučaja kao i u proračunu. Cilj računalne simulacije je dobiti rezultate što sličnije proračunu te na kraju usporediti u kojoj se mjeri poklapaju ili odstupaju s obzirom na to da se u simulacijskom slučaju radi o diskretiziranom prostoru. Tako poklopljeni model nadalje može biti provjerena podloga za simulacije zavodnjavanja, ali u heterogenom i anizotropnom prostoru po pitanju poroznosti i propusnosti.

Prvenstveno je potrebno definirati model ležišta, broj ćelija te vrste fluida koji se u tom modelu nalaze ili mogu nastati (npr. nakon pada tlaka ispod tlaka zasićenja).

---

DIMENS

-- NX NY NZ  
10 10 1 /

-- Faze za koje se simulira protok (nafta, plin, otopljeni plin)

OIL

GAS

DISGAS

WATER

---

U ovom slučaju model ležišta se sastoji od 100 segmenta podijeljenih u deset stupaca i deset redova. Primjer analitičkog proračuna je rađen za samo jedan proslojak, što je dovoljno za provjeru numeričkog modela. Prva oznaka NX označava broj ćelija u x smjeru, NY broj ćelija u y smjeru i NZ broj proslojaka (ćelija u z smjeru).

Ostatak simulacijskog modela definira fluide koji se nalaze u ležištu, a to su nafta s otopljenim plinom, slobodni plin i slojna voda. Vrlo važan dio simulacijskog modela je mreža ćelija (ključna riječ GRID). Grid je sekcija u kojoj su definirane dimenzije modela ležišta odnosno duljina, širina i debljina svakog pojedinog segmenta te propusnosti i poroznosti modela ležišta. (Komentari su označeni s dvije crtice i njih program preskače.)

---

**GRID**

-- dimenzije u smjerovima X, Y i Z (sve ćelije su istih dimenzija)

**DX**

100\*40.2336/

**DY**

100\*40.2336/

**DZ**

100\*1.524 /

-- definiranje gornje stranice svake ćelije

**TOPS**

121\*740 /

-- propusnosti (mD) za svaku ćeliju u svakom smjeru

**PERMX**

121\*31.5 /

**PERMY**

121\*31.5 /

**PERMZ**

121\*31.5 /

**PORO**

121\*0.2 /

---

Naredbama DX, DY i DZ definiraju se dimenzije ćelija. Tako je u horizontalnom smjeru svakoj od 100 ćelije dodijeljena vrijednost  $DX=DY=40.2336$  m, debljina (jedinog) proslojka iznosi  $DZ=1.524$  m. Duljina i širina svakog segmenta je 40.2336 m iz razloga što analitički slučaj ima površinu ležišta od 161874.26 m<sup>2</sup>, što znači ležište kvadratnog oblika 402.336×402.336 m. Naredba TOPS definira dubinu vrha svake ćelija (u ovom slučaju krovinsku dubinu) na kojoj se nalazi ležište (740 m), a PERM je naredba kojom su definirane propusnost u x, y i z smjeru u ležištu i one iznose 31.5 mD. Nakon što je definirana sekcija grid, potrebno je definirati tablice relativnih propusnosti kapilarnih tlakova i ostalih svojstava koja su ovisna o sastavu u ležištu. Definirane su relativne propusnosti nafte i plina ovisno o zasićenju plinom naredbom SGOF.

Tablica 5-1. Eclipse 1. Relativne propusnosti nafte i plina ovisno o zasićenju plinom SGOF

-- Sg 0	Krg 0	Kro 1	Pcog 0
0.02543425	0.00007	0.87302	0
0.052890942	0.00065	0.74995	0
0.082237182	0.00238	0.63330	0
0.112745764	0.00600	0.52703	0
0.143208861	0.01203	0.43487	0
0.172463929	0.02056	0.35828	0
0.199880856	0.03136	0.29614	0
0.225302512	0.04405	0.24609	0
0.24882534	0.05827	0.20570	0
0.270756555	0.07378	0.17273	0
0.291288795	0.09037	0.14561	0
0.31082086	0.10805	0.12291	0
0.32960767	0.12686	0.10368	0
0.347972286	0.14697	0.08716	0
0.75	1	0	0

Također, potrebno je definirati i relativne propusnosti vode i nafte kao funkcije zasićenja vodom naredbom SWOF.

Tablica 5-2. Eclipse 2 Relativne propusnosti vode i nafte kao funkcija zasićenja vodom SWOF

-- Sw	Krw	Krow	Pcow
0.1	0.0000	1.0000	0
0.3	0.07	0.373	0
0.4	0.169	0.210	0
0.45	0.226	0.148	0
0.5	0.3	0.1	0
0.55	0.376	0.061	0
0.6	0.476	0.033	0
0.65	0.600	0.012	0
0.7	0.74	0.0000	0
1	1	0	0

Zatim se definiraju PVT svojstva. Svojstva suhog plina kao što je obujamski koeficijent i viskoznost plina se dodjeljuju naredbom PVDG.

Tablica 5-3. Eclipse 3 Svojstva suhog plina

PVDG			
-- P, bar	Bg, m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	viscG, mPas	
146.0	0.007901571	0.016843451	
148.0	0.007792135	0.016912664	
150.0	0.007685911	0.016982365	
152.0	0.007582773	0.017052544	
154.0	0.007482600	0.017123191	
156.0	0.007385277	0.017194296	
158.0	0.007290697	0.017265848	
160.0	0.007198756	0.017337837	
162.0	0.007109357	0.017410252	
164.0	0.007022405	0.017483084	
166.0	0.006937811	0.017556321	
168.0	0.006855491	0.017629953	

Svojstva same nafte tj. plinski faktor, tlak zasićenja, volumni faktor i viskoznost nafte se definiraju naredbom PVTO.

Tablica 5-4. Eclipse 4. Svojstva nafte sa otopljenim plinom (za 1.slučaj)

PVTO	-- RS, m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	Pb, bar	Bo, m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	VISO, mPas
	14.9361	33.60	1.132569823	0.835557323/
	19.7742	42.56	1.145585272	0.774453161/
	24.8078	51.52	1.159126968	0.722663867/
	30.0087	60.48	1.173118405	0.678304516/
	35.3561	69.44	1.187504208	0.639913074/
	40.8344	78.40	1.202242249	0.606364665/
	46.4314	87.36	1.217299290	0.576790139/
	69.8278	123.20	1.280241075	0.486632836/
	75.8960	132.16	1.296566074	0.469164491/
	82.0418	141.12	1.313099503	0.453183327/
	88.2609	150.08	1.329830525	0.438499776/
	94.5500	159.04	1.346749483	0.424955462/
	100.9056	168	1.363847716	0.412417048
		184	1.363847715	0.420947728/

Kako bi u posebnoj .RSM datoteci bilo moguće pratiti rezultate simulacije, potrebno je imati zadane naredbe koje prikazuju te rezultate, a to se definira u posebnoj sekciji SUMMARY. Vrlo važni pokazatelji potrebni za praćenje ponašanja ležišta su:

---

```

-- Proizvodnja nafte iz cijelog ležišta (Field Oil Production Rate)
FOPR
-- Proizvodnja plina iz cijelog ležišta (Field Gas Production Rate)
FGPR
-- Kumulativna proizvodnja nafte (Field Oil Production Total)
FOPT
-- Kumulativna proizvodnja plina (Field Gas Production Total)
FGPT-
- Omjer otopljenog plina i nafte u ležištu (Field Gas-Oil Ratio)
FGOR
-- Srednji tlak u ležištu (Field Pressure)
FPR
WWCT /
FWCT

```

---

U sekciji SCHEDULE se definiraju bušotine, njihovo ime, grupa, položaj i te primarni fluid koji se očekuje u bušotini i po čijim parametrima se definira režim rada bušotine (npr. brzina proizvodnje nafte, ili udio vode itd.):

---

```

WELSPECS
--ime grupa i j z(bhp) primarna_faza 10*default
'WP1' 'G'      4 4 1*           'OIL' 10* /
'WP2' 'G'      4 6 1*           'OIL' 10* /
'WP3' 'G'      6 4 1*           'OIL' 10* /
'WP4' 'G'      6 6 1*           'OIL' 10* /
'WI1' 'G'      5 5 1*           'WATER' 10* /

```

---

Pokazalo se kako je pravilno pozicioniranje bušotina u modelu jedan od ključnih faktora za dobro poklapanje s analitičkim modelom.

## 6. USKLADIVANJE SIMULACIJSKOG MODELA S ANALITIČKIM PRORAČUNOM

Prethodno spomenuti parametri odnose se na prvi simulacijski model koji je davao pogrešne i nelogične rezultate te se razlikovao od konačnog u mnogo segmenata. Prva razlika je broj ćelija. Model ležišta je prvobitno bio dimenzija 10×10×1 odnosno sastojao se od sveukupno 100 segmenata (kockica) u jednom sloju.

---

-- Broj ćelija (N) u smjeru X, Y, i Z

DIMENS

-- NX NY NZ

10 10 1 /

---

Još jedna od razlika bila je u naredbi PVTO, odnosno u svojstvima nafte je bio definiran tlak zasićenja od 184 bar-a, što znači da će otopljeni plin iz nafte otparavati do ležišnog tlaka od 184 bar-a.

Tablica 6-1. Eclipse 5. Svojstva nafte s otopljenim plinom (za 1. slučaj)

PVTO	-- RS, m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	Pb, bar	Bo, m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	VISO, mPas
	14.9361	33.60	1.132569823	0.835557323/
	19.7742	42.56	1.145585272	0.774453161/
	24.8078	51.52	1.159126968	0.722663867/
	30.0087	60.48	1.173118405	0.678304516/
	35.3561	69.44	1.187504208	0.639913074/
	40.8344	78.40	1.202242249	0.606364665/
	46.4314	87.36	1.217299290	0.576790139/
	52.1369	96.32	1.232648374	0.550511891/
	69.8278	123.20	1.280241075	0.486632836/
	82.0418	141.12	1.313099503	0.453183327/
	88.2609	150.08	1.329830525	0.438499776/
	94.5500	159.04	1.346749483	0.424955462/
	100.9056	168	1.363847716	0.412417048
		184	1.363847715	0.420947728/

Najvažnija razlika bila je u samom rasporedu bušotina, a kasnije će biti objašnjeno zbog čega je prvotno postavljeni raspored pogrešan i na koji način će to biti ispravljeno, kao i prethodne pogreške.

---

**WELSPECS**

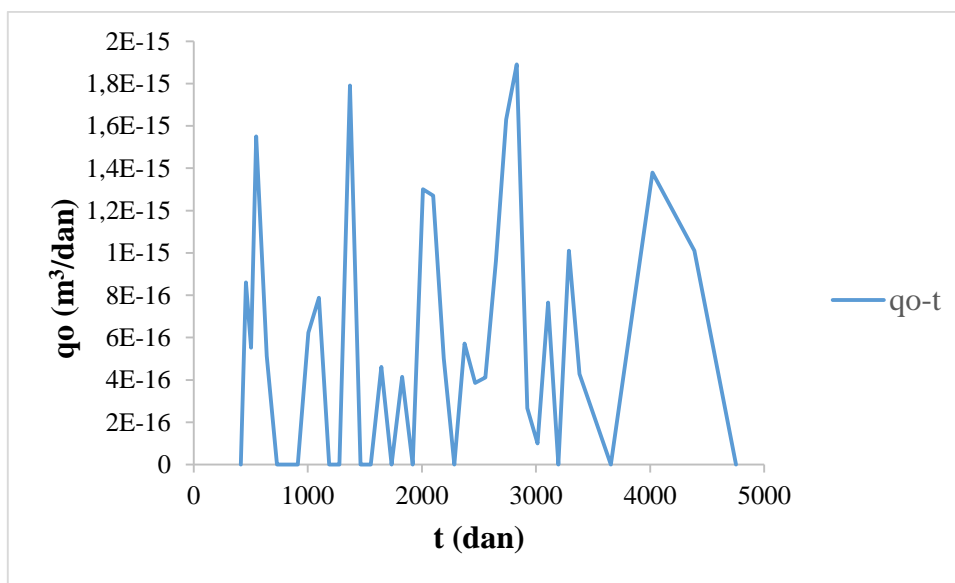
--ime grupa i j Z(bhp) primarna\_faza 10\*default

'WP1' 'G'	4 4 1*	'OIL' 10* /
'WP2' 'G'	6 4 1*	'OIL' 10* /
'WP3' 'G'	4 6 1*	'OIL' 10* /
'WP4' 'G'	6 6 1*	'OIL' 10* /
'WI1' 'G'	5 5 1*	'WATER' 10* /

---

Sada kada su objašnjeni svi dijelovi simulacijskog modela koji su bili problematični, može se objasniti postupak otklanjanja tih problema. U ovom simulacijskom modelu, bez otklonjenog ikakvog problema, nisu dobiveni očekivani rezultati, kod kojih se naizgled može vidjeti da su krivi pa ih nije potrebno uspoređivati sa pravim rezultatima.

Pri izradi simulacijskog modela, referentni rezultati prema kojima su se usporedili rezultati simulacijskog modela bili su rezultati proračuna za isti slučaj, a kasnije kada je napravljen simulacijski model, onda su referentni rezultati postali oni od računalne simulacije.



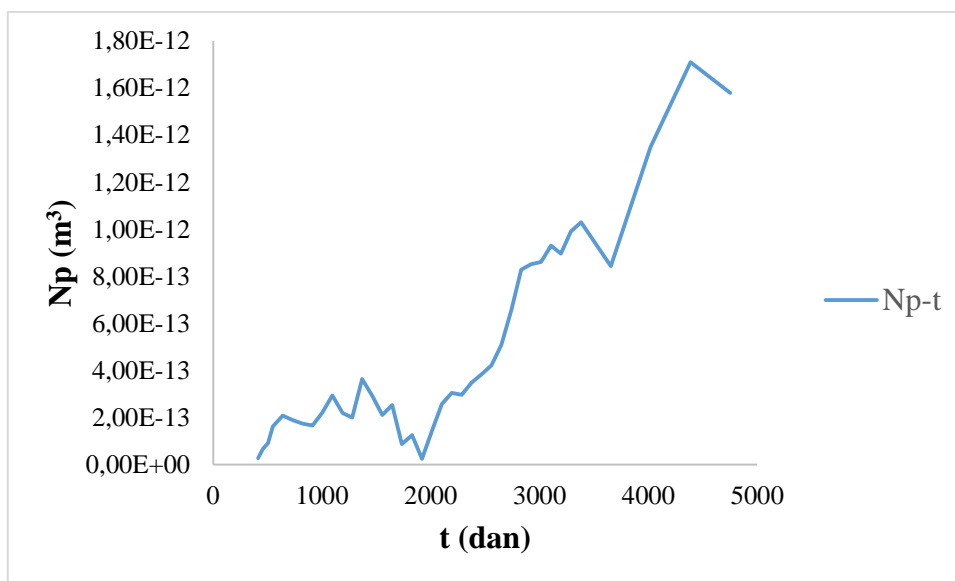
Slika 6-1. Trenutna proizvodnja nafte (1.slučaj)

Na slici 6-1. prikazana je dnevna proizvodnja nafte u funkciji vremena. Rezultati nisu fizikalno smisleni jer bušotine proizvode oko  $1 \times 10^{-15} \text{ m}^3/\text{dan}$ , što znači da skoro uopće ne proizvode naftu, i sve varijacije u proizvodnji su posljedica numeričkih razlika u točnosti rješenja.



Napomena: iz slike se može vidjeti da proizvodnja ne kreće od vremena 0 dana jer se prvo mora preklopiti četvrti period simulacije sa četvrtim periodom proračuna, a budući da se ne poklapa, nema potrebe gledati ranije periode.

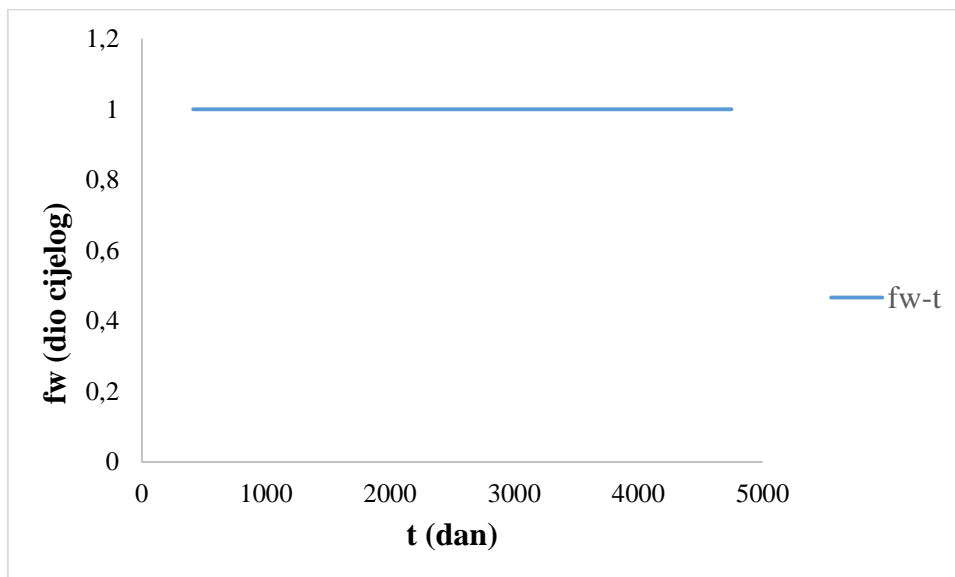
Ako se pogleda graf ukupne proizvodnje i vremena prikazan na slici 6-2.



Slika 6-2. Ukupna proizvodnja nafte (1. slučaj – prvi simulacijski model)

Može se vidjeti da simulacija daje nerealne i nezadovoljavajuće rezultate.

Na sljedećoj slici je prikazan graf frakcijskog protoka i vremena.



Slika 6-3. Promjena frakcijskog protoka vode (1. slučaj)

Slika 6-3. pokazuje promjenu frakcijskog protoka vode, a može se vidjeti da je udio vode po bušotini skoro jednak 1, što znači da bušotine proizvode gotovo čistu vodu.

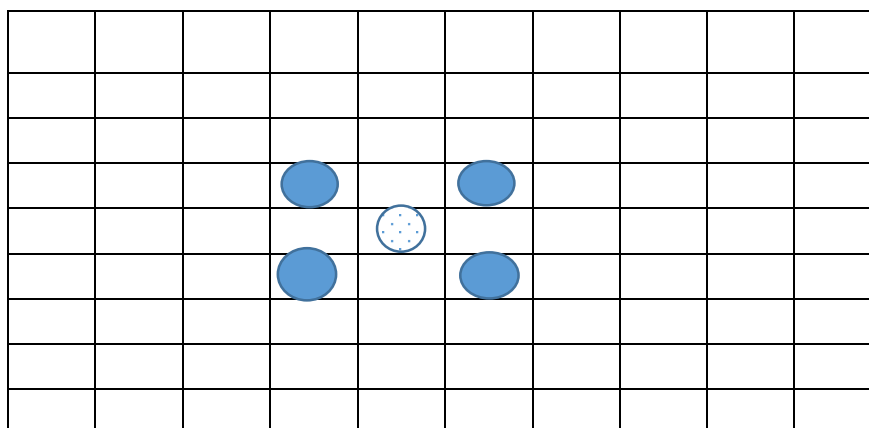
Promijenjene su vrijednosti tlaka zasićenja u naredbi PVTO, i to tako da je tlak zasićenja postavljen što niži kako bi otopljeni plin ostao u nafti, a ne da se proizvodi u ogromnim količinama.

Tablica 6-2. Eclipse 6. Svojstva nafte sa otopljenim plinom

PVTO	RS, m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	Pb, bar	Bo, m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	VISO, mPas
--	14.9361	33.60	1.132569823	0.835557323/
	19.7742	42.56	1.145585272	0.774453161/
	24.8078	51.52	1.159126968	0.722663867/
	100.9056	55	1.363847716	0.412417048
		60	1.363847715	0.420947728/

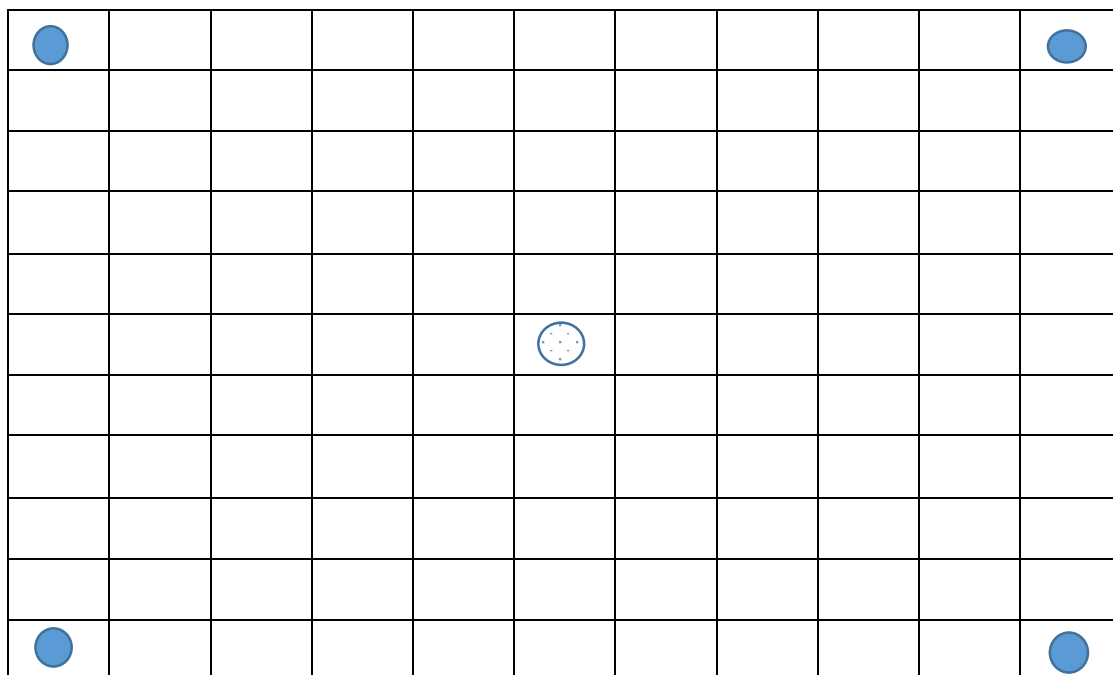
Isto tako su promijenjene vrijednosti relativnih propusnosti nafte i plina, povećana je relativna propusnost za naftu, a smanjena relativna propusnost za plin.

Nakon ispravljenih navedenih naredbi i vrijednosti, nije se postigao značajan pomak pa nije potrebno opet prikazivati i objašnjavati slične rezultate. Kako nije bilo pomaka, ove sitne promjene vraćene su na prethodne vrijednosti. Nakon nekoliko proba ponovne simulacije sa unošenjem sitnih promjena, stanje se nije promijenilo. Budući da nije bilo jasno zbog čega se dobivaju banalni rezultati, bilo je potrebno skicirati ležište kako bi se otkrilo u čemu bi mogla biti pogreška. Nakon pogledane skice ležišta, odnosno rasporeda bušotina na tom polju, bilo je vidljivo da položaji utisnih i proizvodnih bušotina nisu u skladu sa proračunom. Pogrešan raspored bušotina prikazan je na slici 6-4.



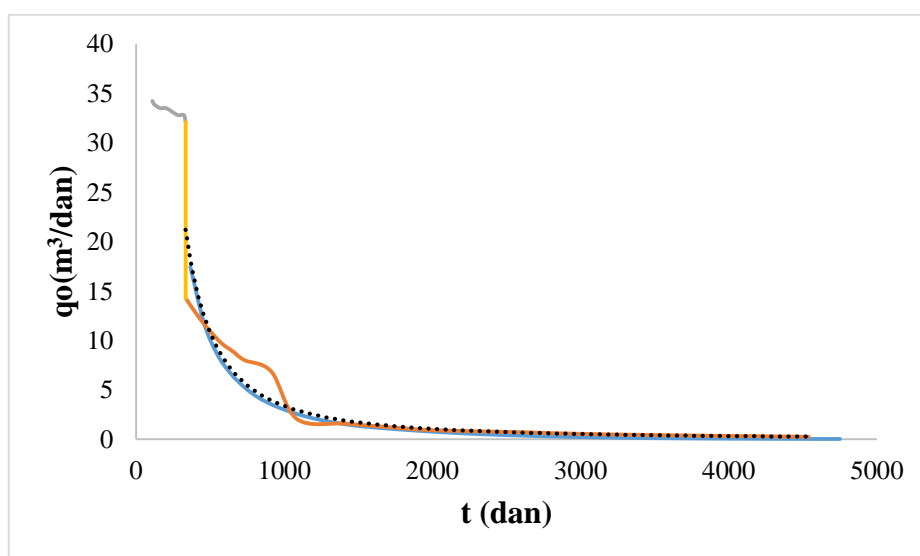
Slika 6-4. Pogrešan raspored proizvodnih i utisnih bušotina

Na slici 6-4. proizvodne bušotine su bile postavljene previše blizu utisne bušotine. Logično se može zaključiti zašto je udio vode bio skoro pa jednak 1 - jer se sva utisnuta voda proizvodila odmah na proizvodnim bušotinama. Raspored bušotina promijenjen je na sljedeći način.



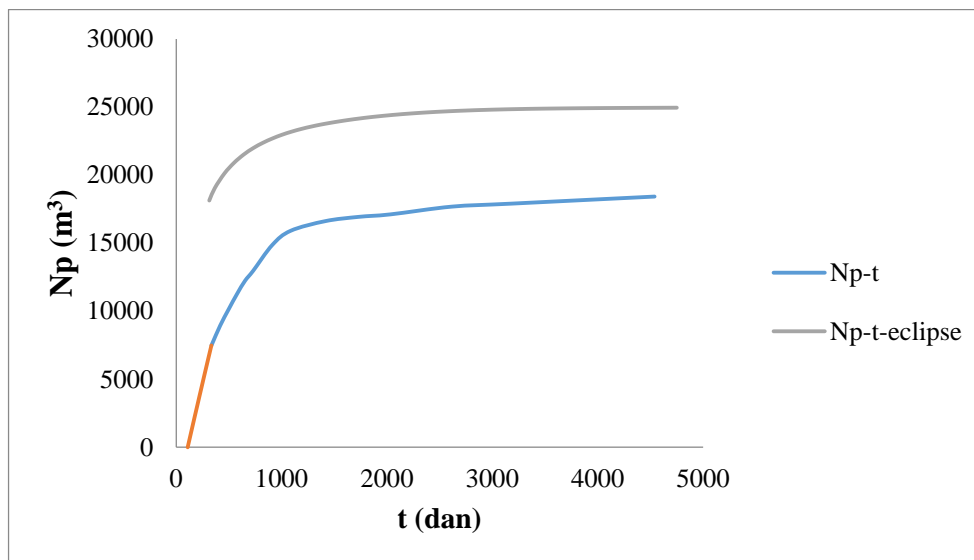
Slika 6-5. Pravilan raspored bušotina

Kako bi bila postavljena pravilna udaljenost bušotina, bilo je potrebno promijeniti model ležišta u model  $11 \times 11 \times 1$ . Razlog promjene je prvenstveno zato jer je utisna bušotina postavljena u centar ležišta, a proizvodne bušotine na pravilne udaljenosti. Nakon toga dobiveni su zadovoljavajući rezultati. Opet će biti prikazani rezultati simulacije pomoću grafova trenutne proizvodnje nafte, ukupne proizvodnje nafte i udjela vode po bušotinama sa vremenom.



Slika 6-6. Trenutna proizvodnja nafte (2.slučaj – drugi simulacijski model)

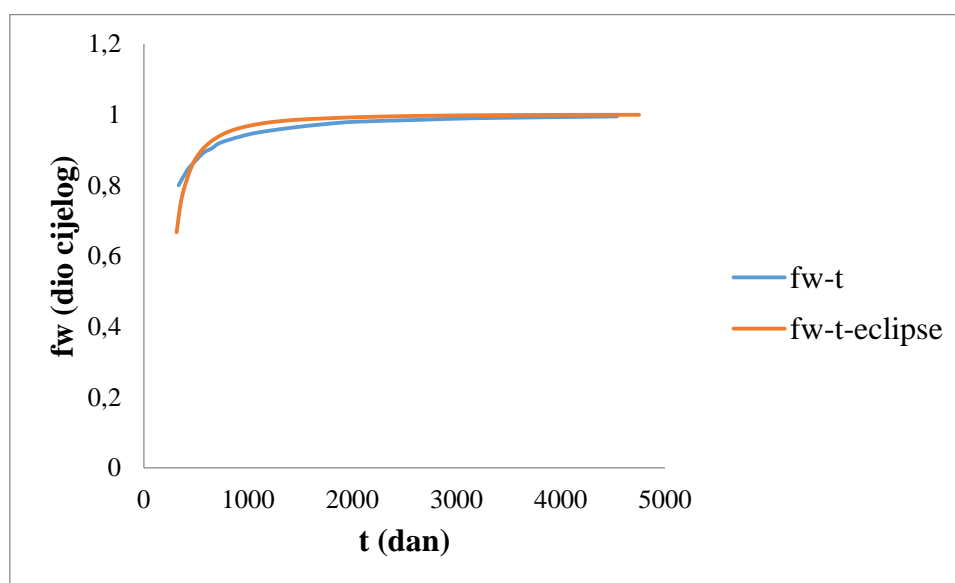
Iz grafa se može uočiti da se krivulje trenutne proizvodnje nafte proračuna i simulacije poklapaju skoro u potpunosti (crna i plava krivulja), ali krivulje ukupne proizvodnje nafte se jako razlikuju, kao što se može vidjeti na slici 6-7.



Slika 6-7. Ukupna proizvodnja nafte (2.slučaj)

Može se vidjeti na slici 6-7. da se simulacijom dobije otprilike 8000 m<sup>3</sup> više nafte, što je 30% ukupne proizvodnje. (Narančasta krivulja označava proizvodnju nafte u trećem periodu).

Iz slike 6-8. se vidi da se krivulja udjela vode proizvedena na bušotinama ne podudara sa krivuljom dobivenom proračunom. Odstupanje postoji, ali ne u toj mjeri da je neprihvatljivo, no ipak je napravljen pokušaj u smislu dobivanja boljih rezultata koji će se više poklapati.



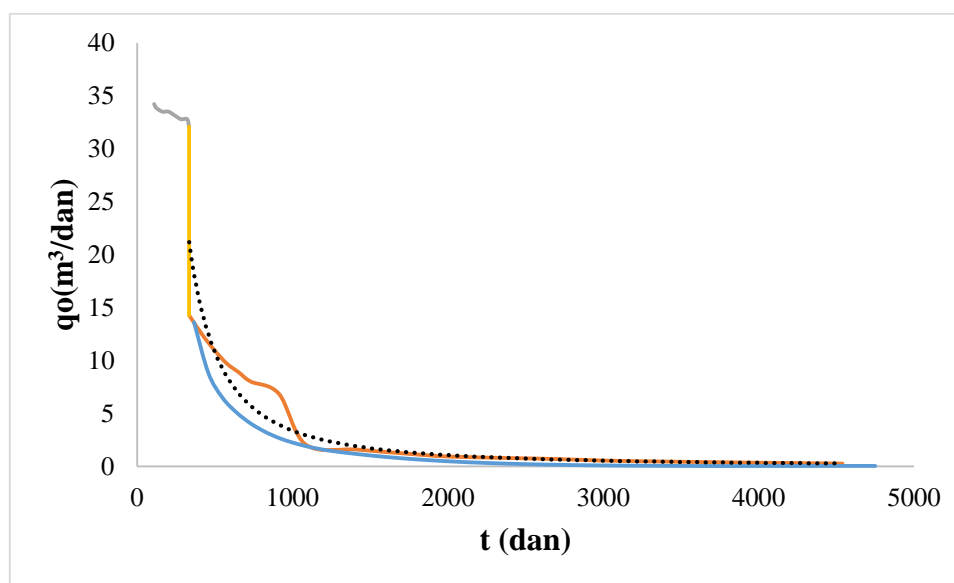
Slika 6-8. Promjena frakcijskog protoka vode (2. slučaj)

Ponovnom promjenom vrijednosti tlaka zasićenja u naredbi PVTO na 60 bar-a dobiveni su bolji rezultati nego od prethodnog simulacijskog modela.

Tablica 6-3. Eclipse 7. Svojstva nafte sa otopljenim plinom PVTO

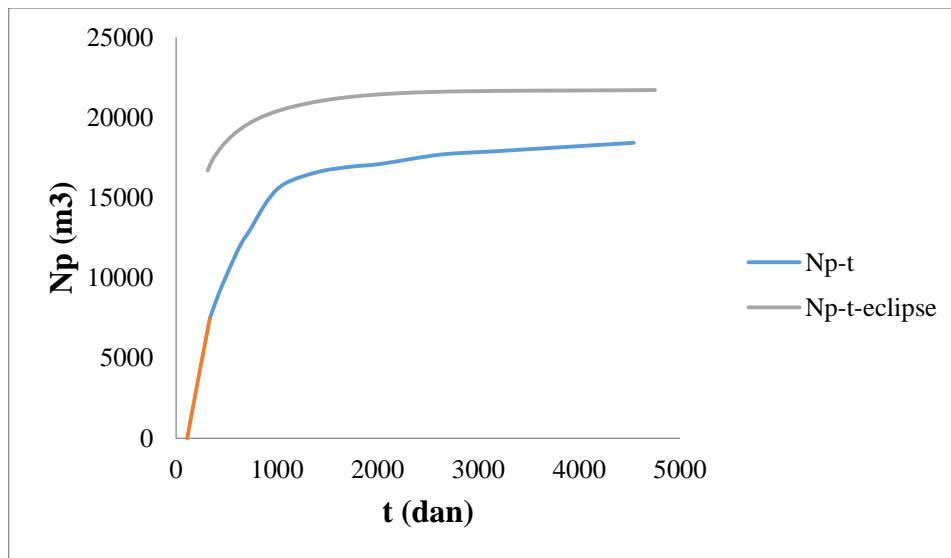
--	RS, m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	Pb, bar	Bo, m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	VISO, mPas
	14.9361	33.60	1.132569823	0.835557323/
	19.7742	42.56	1.145585272	0.774453161/
	24.8078	51.52	1.159126968	0.722663867/
	100.9056	55	1.363847716	0.412417048
		60	1.363847715	0.420947728/

Rezultati proračuna i simulacije dani su ponovno u obliku grafova, a prvi je graf trenutne proizvodnje nafte i vremena.



Slika 6-9. Trenutna proizvodnja nafte (3. slučaj – treći simulacijski model)

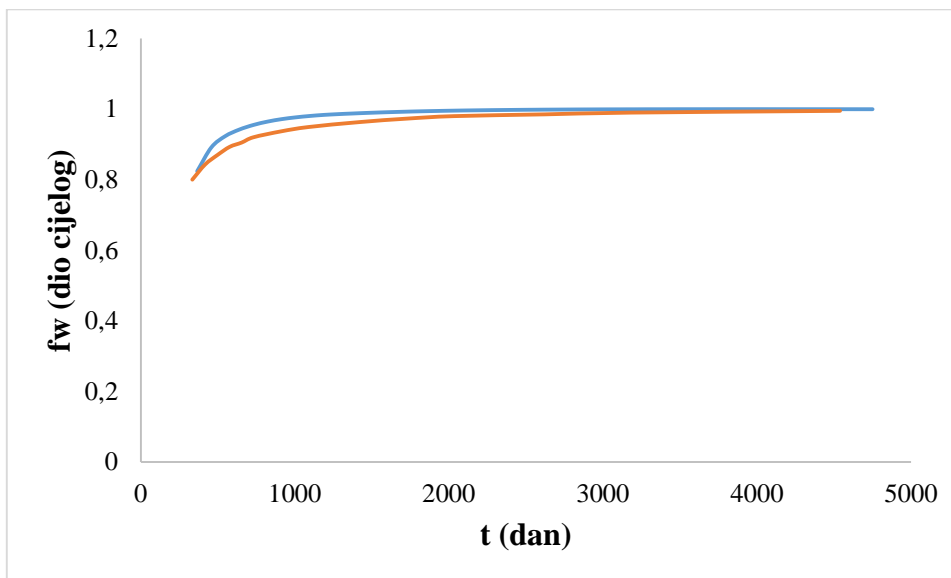
Na slici 6-9. su prikazani rezultati trenutne proizvodnje nafte kroz vremenski period utiskivanja vode u ležište. Krivulja rezultata dobivenih proračunom svedena na srednju vrijednost crne je boje, dok je krivulja rezultata dobivenih simulacijom žute boje. Iz slike se može vidjeti da rezultati odstupaju. Rezultati proračuna i simulacije odstupaju jedno od drugoga u vremenskom razdoblju od 400 do 1000 dana, nadalje se znatno približavaju i poklapaju. Najveća razlika je od 400 do 600 dana. U tom periodu rezultati proračuna su optimističniji nego rezultati simulacije. Drugo po čemu se može usporediti rezultate jest ukupna proizvodnja nafte u vremenu.



Slika 6-10. Ukupna (kumulativna) proizvodnje nafte (3. slučaj)

U ovom slučaju rezultati računalne simulacije prognoziraju veći ukupni iscrpak nafte nego onaj dobiven proračunom. Ako se pogleda kraj proizvodnje, što je i najbitnije, može se vidjeti da se proračunom dobije ukupni iscrpak nafte od otprilike  $2500 \text{ m}^3$ , što je 10% manje od onog što je predvidjela računalna simulacija.

Treće po čemu se mogu usporediti rezultati jest udio vode dobiven na proizvodnim bušotinama.



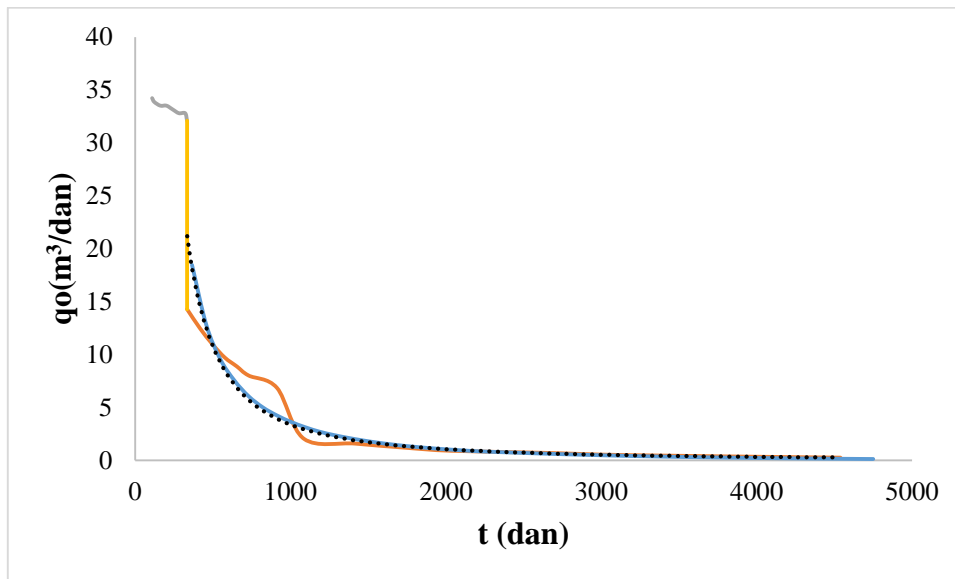
Slika 6-11. Promjena frakcijskog protoka vode (3. slučaj)

Iz slike 6-11. se može vidjeti da rezultati vrlo malo odstupaju jedan od drugoga i to ponovno u razdoblju od 400 do 1000 dana. (Narančasta krivulja je krivulja simulacije.) Budući da postoji mogućnost dobivanja boljih rezultata, ponovno je pogledan simulacijski model. Prijašnji simulacijski modeli uključivali su otopljeni plin u modelu ležišta za razliku od konačnog simulacijskog modela koji nema otopljeni plin i ne proizvodi plin na proizvodnim bušotinama, baš kao što je i u proračunu. Rezultati konačnog simulacijskog modela biti će prikazani u sljedećem poglavlju.

## 7. USPOREDBA REZULTATA PRORAČUNA I SIMULACIJE

Sada kada postoje rezultati dobiveni proračunom CGM metodom i rezultati računalne simulacije za isti slučaj, mogu se usporediti rezultati i vidjeti koliko odstupaju jedno od drugoga i zaključiti na kraju jesu li rezultati proračuna CGM metode korisni i primjenjivi u praksi.

Usporedba rezultata bit će prikazana pomoću grafova trenutne proizvodnje nafte, ukupne proizvodnje nafte i frakcijskog protoka vode po bušotinama u ovisnosti o vremenu. Prvi graf bit će graf trenutne proizvodnje nafte i vremena.



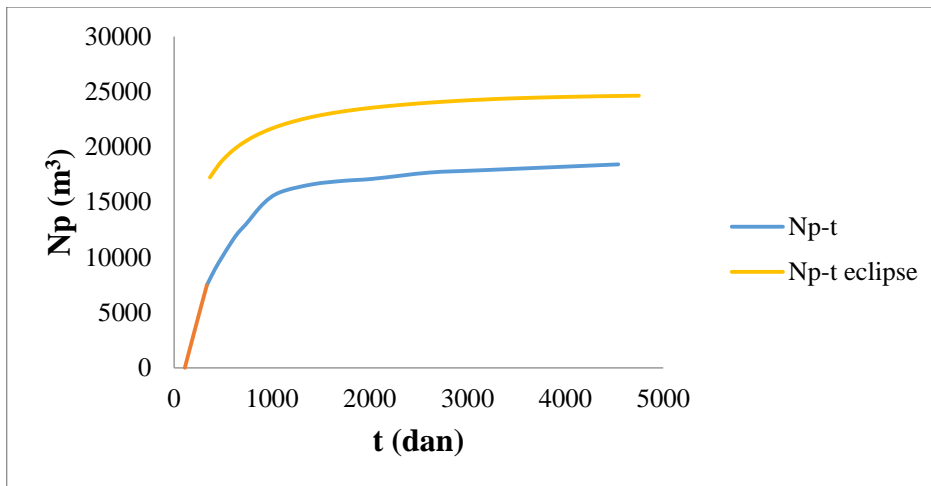
Slika 7-1. Trenutna proizvodnja nafte (zadnji slučaj- konačni simulacijski model)

Na slici 7-1. postoje tri krivulje, a to su krivulja rezultata proračuna CGM metode (plava krivulja) koja je jasno vidljiva, krivulja tih rezultata svedenih na srednje vrijednosti (crna krivulja) i krivulja rezultata simulacije (sive boje). Vidljivo je da se krivulja rezultata proračuna svedena na srednje vrijednosti i krivulja simulacije poklapaju u potpunosti, što znači da će se proračunom CGM metodom predvidjeti ista trenutna proizvodnja nafte kroz vremenski period zavodnjavanja kao što bi ga predvidjeli u računalnom programu Eclipse.

Usporedbom ovih rezultata dalo bi se zaključiti da je simulacijski model u potpunosti pogodan i da je proračun mjerodavan za predviđanje trenutne proizvodnje.



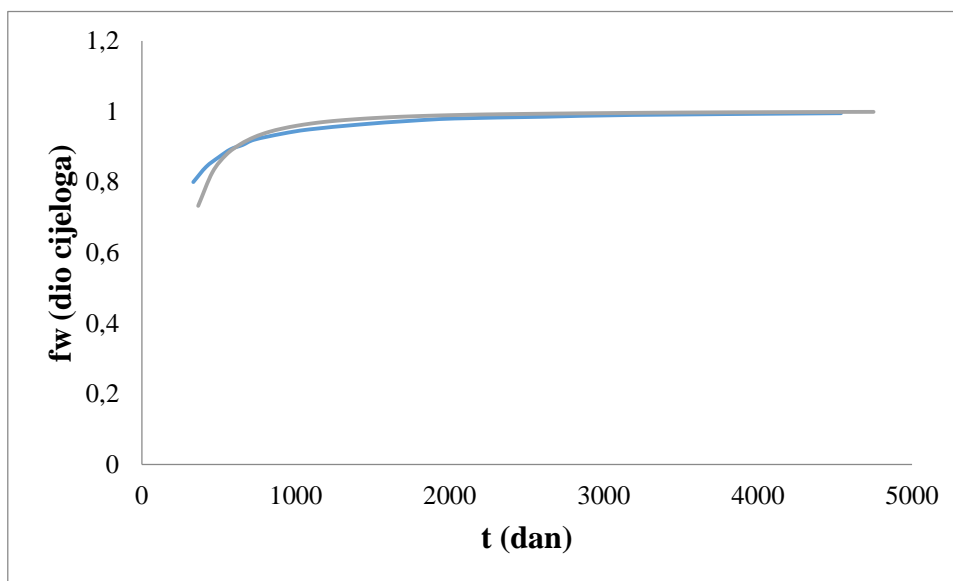
Na slici 7-2. je prikazan graf ukupne proizvodnje nafte i vremena.



Slika 7-2. Ukupna proizvodnja nafte (zadnji slučaj)

Kao što je vidljivo iz slike 7-2., simulacija (žuta krivulja) daje znatno optimističnije rezultate nego proračun (plava krivulja). Razlika je u otprilike  $7500 \text{ m}^3$ , što je približno 30% ukupne proizvodnje. Nažalost, ovom usporedbom bi se dalo zaključiti da ipak simulacijski model nije u potpunosti pogodan i da postoji mogućnost unaprjeđenja simulacijskog modela.

Pokušaji približavanja rezultata su rezultirali većim odstupanjima ostalih rezultata (trenutne proizvodnje i frakcijskog protoka vode), tako da je ostavljen simulacijski model ovakav kakav jest. Vidljivo je kako obje krivulje rastu približno istim intenzitetom, odnosno prate se, što bi značilo da rezultati proračuna imaju smisla iako daju manja predviđanja. Zadnja usporedba biti će prikazana na slici 7-3. na kojoj je prikazan frakcijski protok vode.



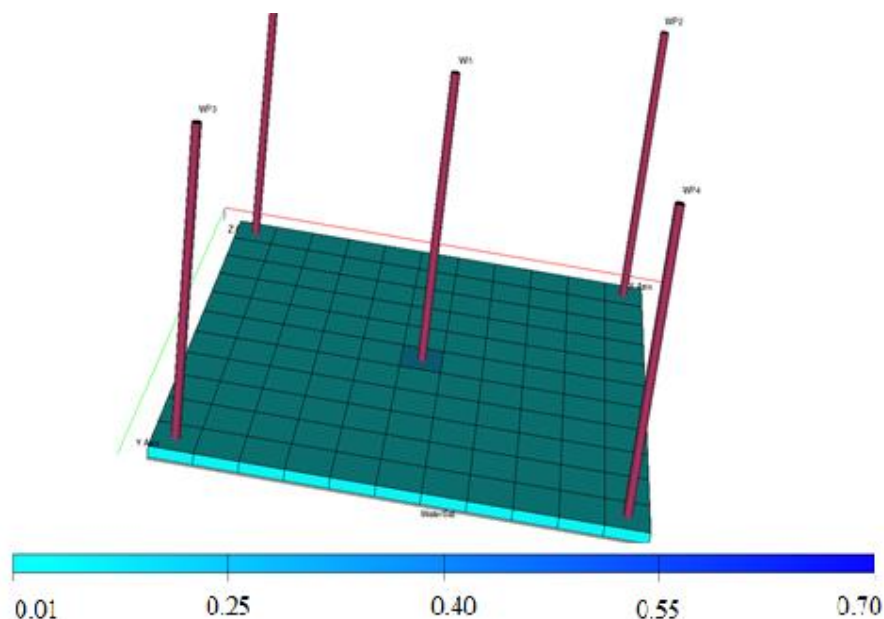
Slika 7-3. Promjena frakcijskog protoka vode (zadnji slučaj)

Na slici 7-3. se može vidjeti da se krivulje podudaraju u velikoj mjeri, odstupanje je vidljivo u periodu od tisućitog do tisućudvjestotog dana, ali to odstupanje je veoma malo, može se reći zanemarivo. Dalo bi se zaključiti da se proračunom može dobro predvidjeti udio vode na proizvodnim bušotinama tijekom zavodnjavanja ležišta i iz njega se lako može izračunati do kada je zavodnjavanje ekonomično. Ovaj konačni simulacijski model razlikuje se od prethodnih u tome što u nafti nema otopljenog plina i on se ne proizvodi na proizvodnim bušotinama, što je bio i cilj dobiti jer u proračunu je otopljeni plin zanemaren. Siva krivulja jest krivulja dobivena računalnom simulacijom.

### **7.1. Vizualni prikaz promjene zasićenja naftom i vodom**

U programu Eclipse je napravljena vizualna simulacija promjene zasićenja naftom i vodom s ciljem jasnog i vidljivog prikaza širenja vodene fronte utisnute kroz bušotinu. Vizualni prikaz napravljen je za konačni simulacijski model i to za svaki period posebno, što znači da će biti prikazano zasićenje naftom i vodom na početku zavodnjavanja (početak 1. perioda), u trenutku pojave interferencije (početak drugog perioda), u trenutku istiskivanja plina (početak trećeg perioda) i trenutak proboja vode na proizvodnim bušotinama (svršetak trećeg perioda).

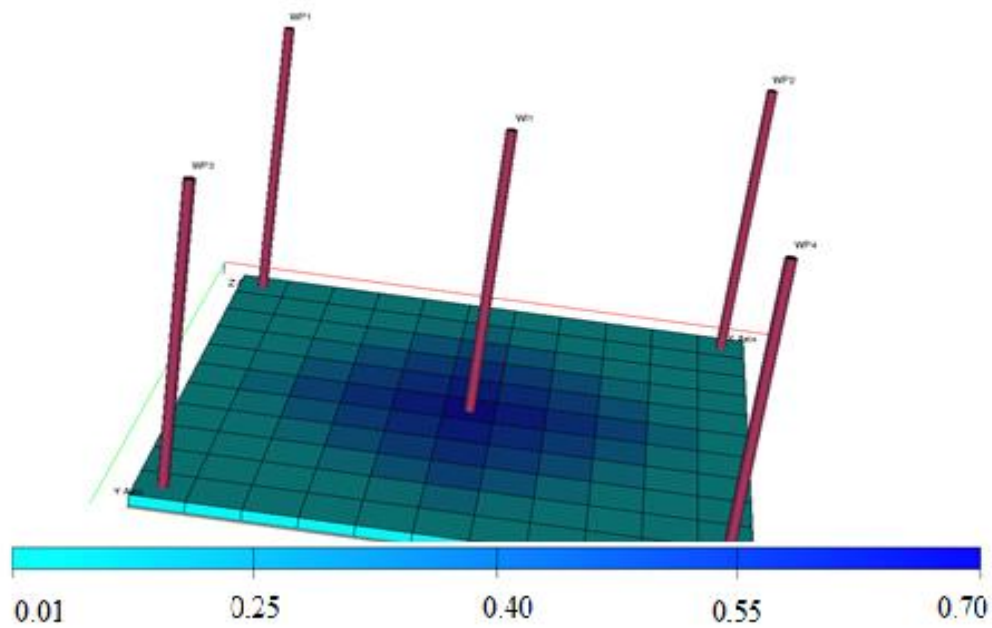
Prvo će biti prikazana promjena zasićenja vodom u spomenutim trenucima.



Slika 7-4. Zasićenje vodom na početku zavodnjavanja

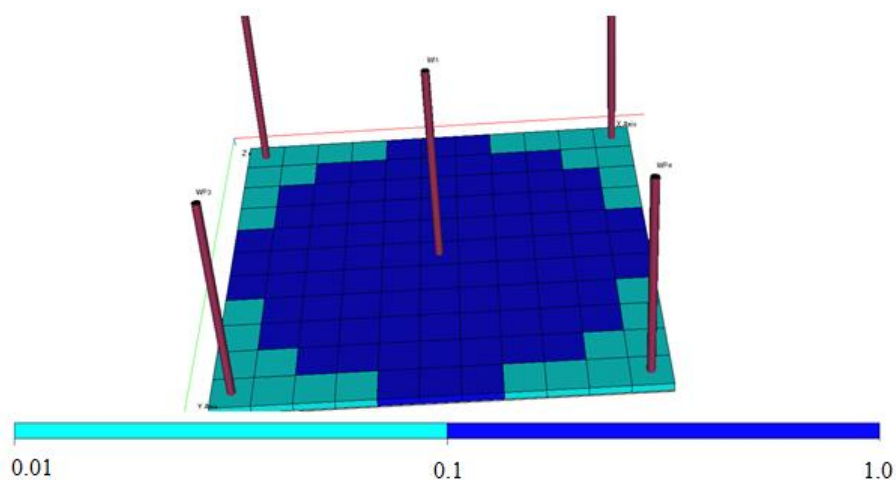
Na slici 7-4. je prikazan simulacijski model ležišta i zasićenje vodom na početku zavodnjavanja. Iz slike je vidljivo da je u cijelom ležišnom modelu osim u okolici utisne

bušotine zasićenje vodom niske vrijednosti odnosno zasićenje vodom jednako je početnom zasićenju vodom koje iznosi 10 %.



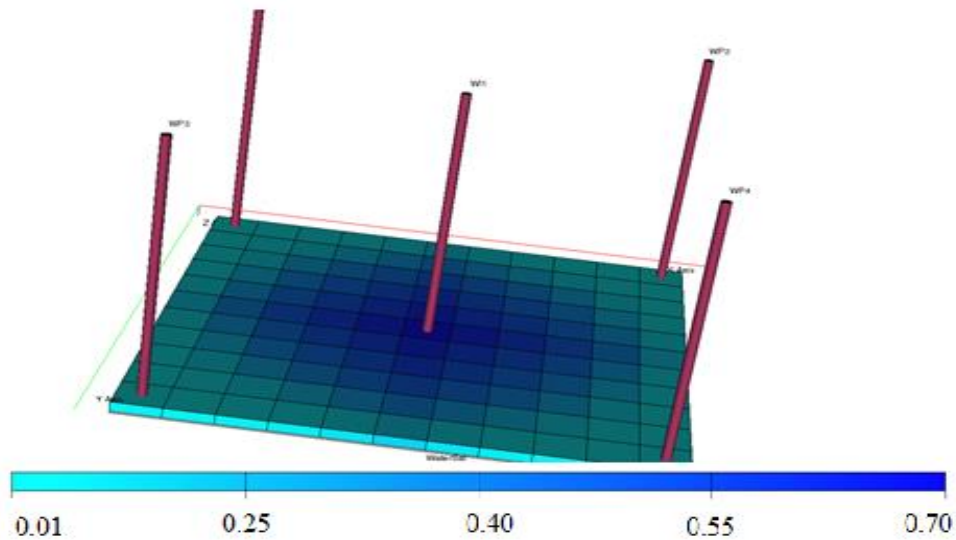
Slika 7-5. Zasićenje vodom u trenutku pojave inerferencije

Na slici 7-5. je prikazano širenje vodene fronte iz utisne bušotine i promjena zasićenja vodom u cijelom ležišnom modelu. S obzirom na skalu zasićenja, vidljivo je da se zasićenje vodom u okolini utisne bušotine značajnije mijenja u odnosu na rubne dijelove ležišta. Iako prema ovoj slici nije vidljivo da se zasićenje vodom promijenilo na rubovima ležišnog modela, na slici 7-6. će biti prikazano zasićenje vodom pomoću funkcije logaritmic kako bi jasnije bilo prikazano do kojeg dijela ležišnog modela se promijenilo zasićenje vodom.



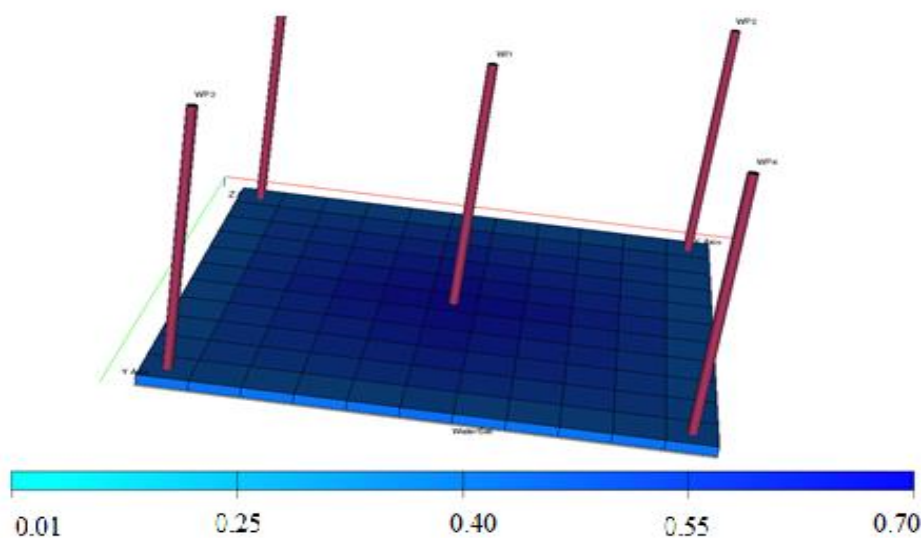
Slika 7-6. Zasićenje vodom u trenutku pojave inerferencije (funkcija logaritmic)

Iz slike 7-6. je vidljivo da je promjena zasićenja vodom zahvatila rubove ležišnog modela te i vizualno potvrdila pojavu interferencije. Trenutak u kojem je došlo do pojave interferencije, prema vizualnoj simulaciji, je otprilike 80 dana što se vrlo dobro poklapa sa računskim dijelom kod kojeg se za isto vrijeme pojavila interferencija.



Slika 7-7. Zasićenje vodom u trenutku istiskivanja plina iz pornog prostora

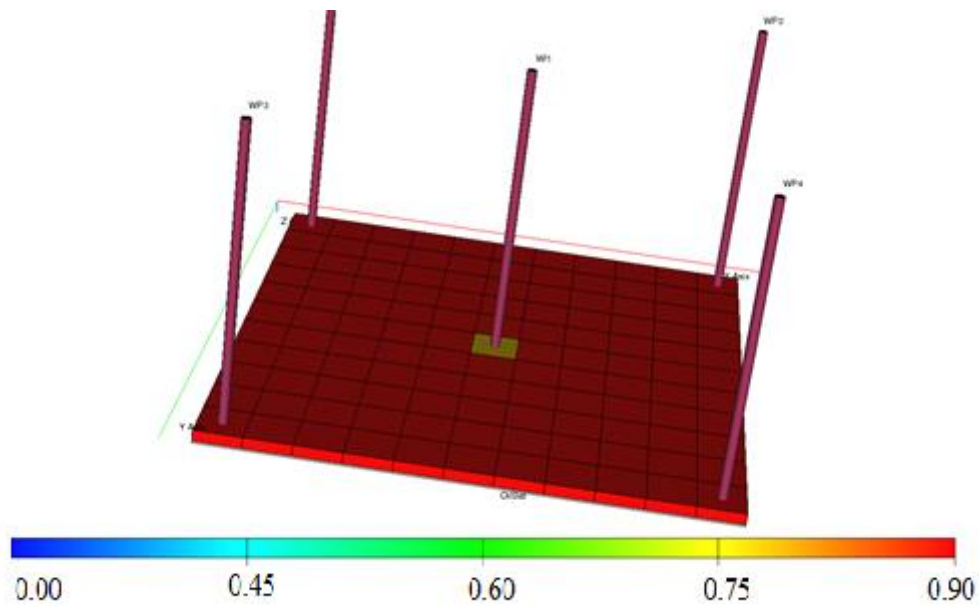
Slika 7-7. prikazuje zasićenje vodom u trenutku kada sav porni prostor u kojem je bio plin zapuni voda. Iz slike se vizualno ne može odrediti da je voda popunila sav porni prostor u kojem se ranije nalazio plin. Prikazana je iz razloga kako bi bila vidljiva promjena zasićenja vodom za trenutak u kojem u računskom dijelu dolazi do istiskivanja plina vodom, odnosno početak trećeg perioda.



Slika 7-8. Zasićenje vodom na kraju trećeg perioda

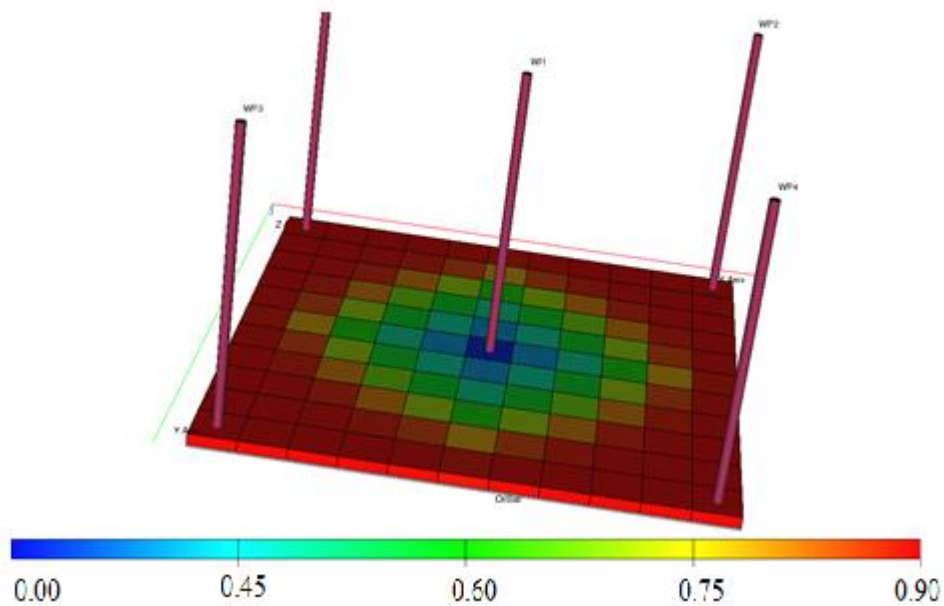
Slika 7-8. prikazuje zasićenje vodom na kraju trećeg perioda. Iz slike je vidljivo da je zasićenje vodom u većoj mjeri zahvatilo i same rubove ležišnog modela na kojima se nalaze proizvodne bušotine. U ovom trenutku proizvodne bušotine proizvode, osim nafte, i vodu te ovime završava treći period. Ova slika prikazuje zasićenje vodom godinu dana nakon početka zavodnjavanja. S vremenom se zasićenje vodom samo povećava tako da ležišni model, s obzirom na skalu boje koja je na slici, postaje sve tamnije plav, odnosno sve dok voda ne zapuni 70 % pornog prostora.

Osim promjene zasićenja vodom, bit će prikazana promjena zasićenja naftom za iste trenutke kao što je prikazano za promjene zasićenja vodom.



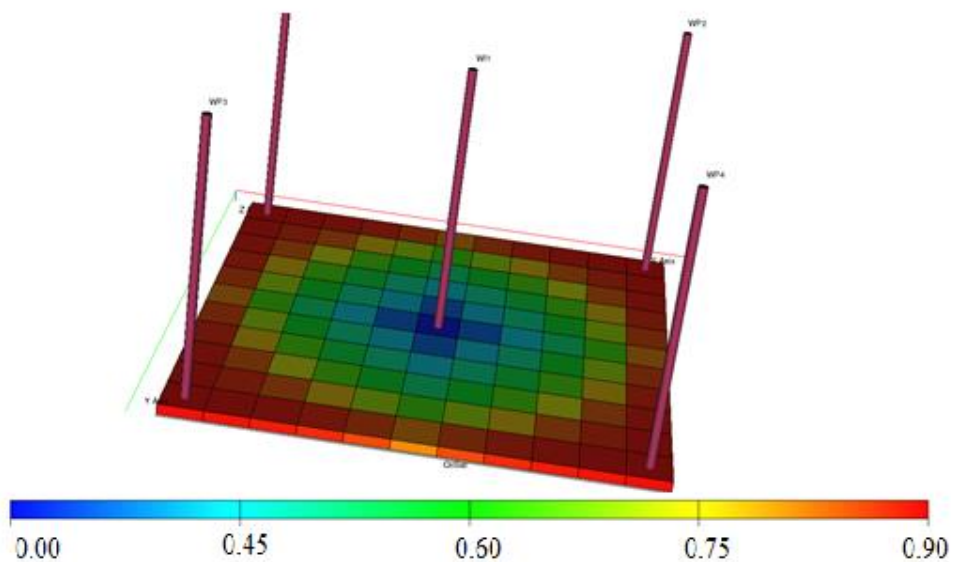
Slika 7-9. Zasićenje naftom na početku zavodnjavanja

Na slici 7-9. je prikazano zasićenje naftom modela ležišta na početku zavodnjavanja. Iz slike je vidljivo da je ležišni model u potpunosti zasićen naftom. Vrijednost zasićenja naftom je 0.9, to jest najveća moguća vrijednost zasićenja naftom (jer je zasićenje konatnom vodom 0.1).



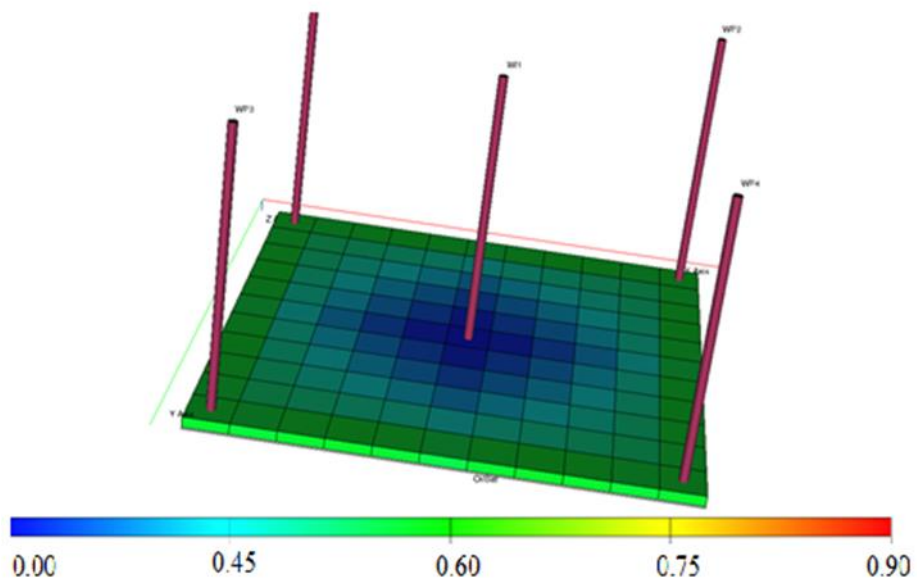
Slika 7-10. Zasićenje naftom u trenutku pojave interferencije

Iz slike 7-10. je vidljivo kako se nafta ravnomjerno potiskuje prema proizvodnim bušotinama te kako se zasićenje naftom smanjuje u okolici utisne bušotine. Slijedi slika 7-11. na kojoj je prikazano zasićenje naftom 100 dana nakon početka zavodnjavanja (početak trećeg perioda).



Slika 7-11. Zasićenje naftom u trenutku istiskivanja plina vodom

Iz slike 7-11. vidljivo je da se zasićenje naftom značajno smanjilo na polovini udaljenosti proizvodne i utisne bušotine (za otprilike 30 %), dok je na rubovima zasićenje naftom još uvijek veliko.



Slika 7-12. Zasićenje naftom na kraju trećeg perioda

Nakon godinu dana od početka zavodnjavanja, kao što je vidljivo na slici 7-12., zasićenje naftom se na rubovima modela ležišta promijenilo za 30 % od početnog zasićenja naftom, a prema utisnoj bušotini to zasićenje naftom se postupno smanjuje sve do utisne bušotine u kojoj je zasićenje naftom minimalno.

## **8. ZAKLJUČAK**

Craig-Geffen-Morseova metoda jedna je od najstarijih metoda zavodnjavanja temeljena na Buckley-Leverettovoj teoriji napretka fronte utiskujućeg fluida. U radu je prikazan detaljan postupak proračuna, primjer proračuna te rezultati i usporedba rezultata proračuna i simulacije. Simulacijski model je postavljen i napravljen na takav način da simulacija i proračun rade na istom slučaju. Nakon što su dobiveni rezultati proračuna i simulacije uspoređeni, može se zaključiti da se rezultati proračuna i simulacije dobro poklapaju osim u ukupnoj proizvodnji nafte, no što se tiče tijeka samog zavodnjavanja može se dobro pratiti njegovo ponašanje. Pretpostavljajući da su rezultati simulacije referentni odnosno oni koji su točni, usporedbom se može zaključiti da CGM metoda daje približno dobre rezultate koje možemo uzeti u obzir i prema njima donositi kvalitetne odluke o ekonomičnosti odnosno profitabilnosti ležišta u koji se utiskuje voda.



## 9. LITERATURA

1. ADAMS, N.K., 1941. *The Physics and Chemistry of Surfaces*: Oxford University Press, London
2. BENNER, F.C. and Bartell, F. E., 1941. *The Effect of Polar Impurities Upon Capillary and Surface Phenomena in Petroleum Production*: Drill. And Prod- Pra., API.
3. CRAIG, F.F., Jr., Geffen, T. M. and Morse, R. A., 1955. *Oil Recovery Performance of Pattern Gas or Water Injection Operations From Model Tests*: Trans, AIME 204, 7-15.
4. CRAIG, F.F., Jr., 1971. *The Reservoir Engineering Aspects of Waterflooding*: Monograph Series, SPE, Richardson, Dallas, Texas.
5. Fluid Distribution in Porous Systems – *A Preview of the Motion Picture*, Stanolind Oil and Gas Co., 1952. Subsequently Printed by Pan American Petroleum Corp. and Amoco Production Co.
6. LEVERETT, M.C., 1941. *Capillary Behaviour in Porous Solids*: Trans., AIME 142, 159-172.
7. NUTTING, P.G., 1934. *Some Physical and Chemical Properties of Reservoir Rocks Bearing on the Accumulation and Discharge of Oil*: Problems in Petroleum Geology, AAPG.
8. PURCELL, W.R., 1949. *Capillary Pressures – Their Measurement Using Mercury and Calculation of Permeability Therefrom*: Trans. AIME 186, 39-48.
9. RAZA, S.H, Treiber, L. E, and Archer, D. L., April, 1968. *Wettability of Reservoir Rocks and Its Evaluation*: Prod. Monthly 33, No. 4, 2-7.
10. WILLHITE, G. P., 1986. *Waterflooding*: Society of Petroleum Engineers, Richardson, Texas.

# DODACI

## Dodatak 1 – Empirijska tablica za određivanje $Q_i / Q_{ibr}$ , za različite $E_{abr}$ i $W_i / W_{ibr}$

Tablica D.1. Vrijednosti  $Q_i / Q_{ibr}$  za različite vrijednosti površinske efikasnosti istiskivanja nakon prodora vode (Craig 1971).

Wi/Wbt	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1.2	1.19	1.191	1.191	1.191	1.191	1.191	1.191	1.191	1.192	1.192
1.4	1.365	1.366	1.366	1.367	1.368	1.368	1.369	1.369	1.37	1.37
1.6	1.529	1.53	1.531	1.532	1.533	1.535	1.536	1.536	1.537	1.538
1.8	1.684	1.686	1.688	1.689	1.691	1.693	1.694	1.696	1.697	1.699
2	1.832	1.834	1.837	1.839	1.842	1.844	1.846	1.849	1.851	1.853
2.2	1.974	1.977	1.981	1.984	1.987	1.99	1.993	1.996	1.999	2.001
2.4	2.111	2.115	2.119	2.124	2.127	2.131	2.135	2.139	2.142	2.146
2.6	2.244	2.249	2.254	2.259	2.264	2.268	2.273	2.277	2.282	2.286
2.8	2.373	2.379	2.385	2.391	2.397	2.402	2.407	2.413	2.418	2.422
3	2.5	2.507	2.513	2.52	2.526	2.533	2.539	2.545	2.551	2.556
3.2	2.623	2.631	2.639	2.646	2.653	2.66	2.667	2.674	2.681	2.687
3.4	2.744	2.752	2.761	2.77	2.778	2.786	2.793	2.801	2.808	2.816
3.6	2.862	2.872	2.881	2.891	2.9	2.909	2.917	2.926	2.934	2.942
3.8	2.978	2.989	3	3.01	3.02	3.03	3.039	3.048	3.057	3.066
4	3.093	3.105	3.116	3.127	3.138	3.149	3.159	3.169	3.179	3.189
4.2	3.205	3.218	3.231	3.243	3.254	3.266	3.277	3.288	3.299	3.309
4.4	3.316	3.33	3.343	3.357	3.369	3.382	3.394	3.406	3.417	3.428
4.6	3.426	3.441	3.455	3.469	3.483	3.496	3.509	3.521	3.534	3.546
4.8	3.534	3.55	3.565	3.58	3.594	3.609	3.622	3.636	3.649	
5	3.641	3.657	3.674	3.689	3.705	3.72	3.735			
5.2	3.746	3.764	3.781	3.798	3.814	3.83				
5.4	3.851	3.869	3.887	3.905	3.922					
5.6	3.954	3.973	3.993	4.011						
5.8	4.056	4.077	4.097							
6	4.157	4.179								
6.2	4.257									
Wi/Wbt	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1.2	1.192	1.192	1.192	1.192	1.192	1.192	1.193	1.193	1.193	1.193
1.4	1.371	1.371	1.371	1.372	1.372	1.373	1.373	1.373	1.374	1.374
1.6	1.539	1.54	1.541	1.542	1.543	1.543	1.544	1.545	1.546	1.546
1.8	1.7	1.702	1.703	1.704	1.706	1.707	1.708	1.709	1.71	1.711
2	1.855	1.857	1.859	1.861	1.862	1.864	1.866	1.868	1.869	1.871
2.2	2.004	2.007	2.009	2.012	2.014	2.016	2.019	2.021	2.023	2.025
2.4	2.149	2.152	2.155	2.158	2.161	2.164	2.167	2.17	2.173	2.175
2.6	2.29	2.294	2.298	2.301	2.305	2.308	2.312	2.315	2.319	2.322
2.8	2.427	2.432	2.436	2.441	2.445	2.449	2.453	2.457	2.461	2.465
3	2.562	2.567	2.572	2.577	2.582	2.587	2.592	2.597	2.601	2.606
3.2	2.693	2.7	2.705	2.711	2.717	2.723	2.728	2.733	2.738	2.744
3.4	2.823	2.83	2.836	2.843	2.849	2.855	2.862	2.867	2.873	
3.6	2.95	2.957	2.965	2.972	2.979	2.986	2.993			
3.8	3.075	3.083	3.091	3.099	3.107					
4	3.198	3.207	3.216	3.225						
4.2	3.319	3.329								
4.4	3.439									
Wi/Wbt	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1.2	1.193	1.193	1.193	1.193	1.193	1.193	1.193	1.194	1.194	1.194
1.4	1.374	1.375	1.375	1.375	1.376	1.376	1.376	1.377	1.377	1.377
1.6	1.547	1.548	1.548	1.549	1.55	1.55	1.551	1.551	1.552	1.552
1.8	1.713	1.714	1.715	1.716	1.717	1.718	1.719	1.72	1.72	1.721
2	1.872	1.874	1.875	1.877	1.878	1.88	1.881	1.882	1.884	1.885
2.2	2.027	2.029	2.031	2.033	2.035	2.037	2.039	2.04	2.042	2.044
2.4	2.178	2.18	2.183	2.185	2.188	2.19	2.192	2.195	2.197	
2.6	2.325	2.328	2.331	2.334	2.337	2.34				
2.8	2.469	2.473	2.476	2.48						
3	2.61	2.614								

Wi/Wbt	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1.2	1.194	1.194	1.194	1.194	1.194	1.194	1.194	1.194	1.194	1.194
1.4	1.377	1.378	1.378	1.378	1.378	1.379	1.379	1.379	1.379	1.379
1.6	1.553	1.553	1.554	1.555	1.555	1.555	1.556	1.556	1.557	1.557
1.8	1.722	1.723	1.724	1.725	1.725	1.726	1.727	1.728		
2	1.886	1.837	1.888	1.89						
2.2	2.045									
Wi/Wbt	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1.2	1.194	1.195	1.195	1.195	1.195	1.195	1.195	1.195	1.195	1.195
1.4	1.38	1.38	1.38	1.38	1.381					
1.6	1.558									

Izjava:

Diplomski rad napravljen je pomoću Schlumberger-ovog programa Eclipse i Microsoft aplikacije Excell

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno.

---