Modeliranje pribušotinske zone za detaljni opis rezultata hidrauličkog frakturiranja

Kesić, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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:169:523113

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 fakultet
Diplomski studij naftnog rudarstva

MODELIRANJE PRIBUŠOTINSKE ZONE ZA DETALJNI OPIS REZULTATA HIDRAULIČKOG FRAKTURIRANJA

Diplomski rad

Ivan Kesić
N 271

Zagreb, 2018.

Sveučilište u Zagrebu Diplomski rad

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

MODELIRANJE PRIBUŠOTINSKE ZONE ZA DETALJNI OPIS REZULTATA HIDRAULIČKOG FRAKTURIRANJA

Ivan Kesić

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Zavod za naftno inženjerstvo

Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

Određivanje svojstava pribušotinske zone tj. proizvodnosti bušotine i istih svojstava nakon hidrauličkog frakturiranja ključan je element u dizajnu parametara za samo frakturiranje, kao i za planiranje tehnoloških uvjeta proizvodnje nakon frakturiranja. Dimenzije i provodljivost frakture mogu se predviđati analitički i numerički, a u radu su uspoređene analize, s naglaskom na hidrodinamički test nakon frakturiranja, interpretacijom krivulje porasta tlaka i njene derivacije (korištenjem software-a Kappa Ecrin) te modeliranjem istog testa i proizvodnih podataka u software-u Schlumberger Eclipse. Numerička simulacija u Eclipseu omogućuje procjenu više podataka poput oblika, položaja i rasprostiranja frakture različitih propusnosti i geometrije što se potvrdilo s proizvodnim podatcima i simuliranjem istih na temelju svakog pretpostavljenog seta parametara.

Ključne riječi: numerička simulacija, hidrauličko frakturiranje, test porasta tlaka, propusnost, geometrija frakture

Diplomski rad sadrži: 40 stranica, 6 tablica, 39 slika i 19 referenca

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta

Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Voditelj: Dr. sc. Domagoj Vulin, izvanredni profesor RGNF-a

Pomoć pri izradi: Mr. sc. Sonja Koščak Kolin, asistent RGNF-a

Ocjenjivači: Dr. sc. Domagoj Vulin, izvanredni profesor RGNF-a

Dr. sc. Borivoje Pašić, docent, RGNF-a

Dr. sc. Vladislav Brkić, docent, RGNF-a

Datum obrane: 16.11.2018., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

University of Zagreb Master's Thesis

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

NEAR-WELLBORE ZONE MODELLING FOR DETAILED DESCRIPTION OF THE RESULTS OF HYDRAULIC FRACTURING

Ivan Kesić

Thesis completed in: University of Zagreb

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Institute of Petroleum Engineering

Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Abstract

Determining near-wellbore zone properties i.e. well productivity and these same properties after performing hydraulic fracturing is the key element in fracturing design. Geometry and conductivity can be predicted both analytically and numerically, and in this work the comparison between analysis, especially for hydrodynamic test after fracturing, interpreting pressure build up curve and its derivative (using Kappa Ecrin software) and modeling the same test and production data in Schlumberger Eclipse software was done. It was concluded that numerical simulation in Eclipse allows prognosis for multiple parameters such as shape, position and fracture distribution of various permeabilities and geometry which has been validated with production data and simulations of this data based on each supposed set of parameters.

Keywords: numerical simulation, hydraulic fracturing, pressure build up test, permeability, fracture geometry

Thesis contains: 40 pages, 6 tables, 39 figures and 19 references

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

Supervisor: Associate Professor Domagoj Vulin, PhD

Assistance in work: Assistant Sonja Koščak Kolin, MSc

Reviewers: Associate Professor Domagoj Vulin, PhD

Assistant Professor Borivoje Pašić, PhD

Assistant Professor Vladislav Brkić, PhD

Date of defense: November 16, 2018., Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

POPIS SLIKA I
POPIS TABLICA III
POPIS OZNAKA IV
1. UVOD 1
2. INTERPRETACIJA FRAKTURIRANOG SLOJA I PREGLED KORIŠTENIH METODA 3
2.1. Test porasta tlaka 5
2.2. Ležišna simulacija 14
3. PODATCI O LEŽIŠTU I LEŽIŠNI MODEL 18
4. REZULTATI SIMULACIJE I INTERPRETIRANI REZULTATI HIDRODINAMIČKOG MJERENJA 23
5. ZAKLJUČAK 38
6. LITERATURA 39

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Razvoj frakture s logaritmom vremena 3
Slika 2-2. Metode određivanja parametara frakture, preuređeno i prevedeno od Bennet. 4
Slika 2-3. Prikaz krivulje porasta tlaka u semilogu 6
Slika 2-4. Odzivi derivacijske krivulje za razne modele ležišta i režime protoka, A-D 8
Slika 2-5. Odzivi derivacijske krivulje za razne modele ležišta i režime protoka, E-H 9
Slika 2-6. Tipovi protoka u frakturiranom sloju 10
Slika 2-7. Utjecaj skin efekta na tlak, preuređeno od Horne 11
Slika 2-8. Set jednadžbi za model bušotine 16
Slika 2-9. Ključne riječi i uloga u simulaciji protoka 17
Slika 3-1. Prikaz veličine ćelija u globalnoj mreži i LGR-u 18
Slika 3-2. Elektrokarotažna mjerenja iz bušotine na polju X 19
Slika 3-3. Vertikalan slijed slojeva s pripadajućim petrofizikalnim svojstvima 19
Slika 3-4. Prikaz šupljikavosti slojeva 20
Slika 3-5. Prikaz propusnosti slojeva 21
Slika 3-6. Prikaz zasićenja naftom 21
Slika 3-7. Prikaz zasićenja vodom 21
Slika 3-8. Prikaz zasićenja plinom 22
Slika 4-1. Pojednostavljeni prikaz modela 23
Slika 4-2. History matching 1.siječnja 2016. - 15.siječnja 2017. 24
Slika 4-3. Dnevna proizvodnja nafte frakturirane bušotine 24
Slika 4-4. Prikaz rezutata interpretacije u log-log plot-u 25
Slika 4-5. Prikaz rezultata interpretacije u semilogu 26
Slika 4-6. Predložak za geometriju i propusnost frakture 27
Slika 4-7. Model frakture xf=3,5m, wf=6,5mm, hf=40m u softweru „Eclipse“ 27
Slika 4-8. Usporedba simuliranih i stvarnih (Frak proizvodnja) rezultata proizvodnje nafte za različite geometrije frakture propusnosti 25 000 mD 28
Slika 4-9. Usporedba simuliranih i stvarnih (Frak proizvodnja) rezultata proizvodnje nafte za različite geometrije frakture propusnosti 50 000 mD 29
Slika 4-10. Usporedba simuliranih i stvarnih (Frak proizvodnja) rezultata proizvodnje nafte za različite geometrije frakture propusnosti 75 000 mD 30
Slika 4-11. Usporedba simuliranih i stvarnih (Frak proizvodnja) rezultata proizvodnje vode za različite geometrije frakture propusnosti 75 000 mD 31

Slika 4-12. Usporedba simuliranih i stvarnih (Frak proizvodnja) rezultata proizvodnje plina za različite geometrije frakture propusnosti 75 000 mD 31
Slika 4-13. Usporedba simuliranih i stvarnih (frak proizvodnja) rezultata proizvodnje nafte za frakture poluduljine 5,5 m, visine 38 m i širine 5,5 mm s različitim propusnostima 32
Slika 4-14. Usporedba simuliranih i stvarnih (frak proizvodnja) rezultata proizvodnje vode za frakture poluduljine 5,5 m, visine 38 m i širine 5,5 mm s različitim propusnostima 32
Slika 4-15. Usporedba simuliranih i stvarnih (frak proizvodnja) rezultata proizvodnje plina za frakture poluduljine 5,5 m, visine 38 m i širine 5,5 mm s različitim propusnostima 33
Slika 4-16. Model frakture poluduljine 89,5 m, širine 0,5 mm, visine 5 m 33
Slika 4-17. Model odabrane frakture poluduljine 5,5 m, visine 38 m i širine 5,5 mm..... 34
Slika 4-18. Usporedba rezultata simulacije u Eclipse-u i stvarnih vrijednosti mjerenog tlaka 34
Slika 4-19. Utjecaj promjene geometrije za odabranu frakturu poluduljine 5,5 m 35
Slika 4-20. Nastavak simulacije s rezultatima proizvodnje nafte..... 36
Slika 4-21. Nastavak simulacije s rezultatima proizvodnje vode..... 36
Slika 4-22. Nastavak simulacije s rezultatima proizvodnje plina..... 37

POPIS TABLICA

Tablica 2-1. Odzivi derivacijske krivulje za razne modele ležišta i režime protoka 7
Tablica 3-1. Svojstva ležišta 1 i 2 20
Tablica 3-2. Svojstva ležišnih fluida 22
Tablica 4-1.Rezultati interpretacije testa porasta tlaka pomoću softvera Ecrin 26
Tablica 4-2. Slučajevi za prikaz utjecaja promjene geometrije frakture na proizvodnju 35
Tablica 4-3. Vrijednosti proizvodnje ležišnih fluida za različite geometrije frakture 35

POPIS OZNAKA

B – obujamski faktor, m^3/m^3

BHP – tlak na dnu bušotine (engl. *Bottom Hole Pressure*), Pa

C – koeficijent skladištenja bušotine, m^3/s

C_d – bezdimenzionalno skladištenje bušotine

c_t - ukupna stlačivost, Pa^{-1}

ETR – rani period (engl. *Early – Time Region*)

GOC – kontakt plin – nafta (engl. *Gas – Oil Contact*), m

h – debljina ležišta, m

H_{wj} – hidrostatski tlak između razine perforacija i referentne dubine *(BHP),* Pa

k – propusnost ležišta, m^2

k_f – propusnost frakture, m^2

k_{fc} – propusnost zagušenog dijela frakture, m^2

k_s – propusnost izmijenjene zone, m^2

LGR – lokalno uređenje ćelija (engl. *Local Grid Refinement*)

LTR – kasni period (engl. *Late – Time Region*)

μ - viskoznost, mPa×s

MTR – srednji period (engl. *Middle – Time Region*)

OWC – kontakt nafta – voda (engl. *Oil – Water Contact), m*

p_d – bezdimenzionalni tlak

p_j – tlak na ulazu u perforacije (engl. *nodal pressure*), Pa

p_w – tlak na referentnoj dubini (*BHP*), Pa

Φ – šupljikavost, (dio cijelog)

Δp_s – dodatan pad tlaka uslijed skina, Pa

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

p^* - ekstrapolirani tlak, Pa

q – protok, m^3/d

r_s– radijus izmijenjene zone, m

Rs_i – početni plinski faktor, m^3/m^3

r_w – radijus bušotine, m

S – skin

S_{fc} – skin zagušenog dijela frakture

S_{ff} – skin na licu frakture

Δt – vrijeme nakon zatvaranja bušotine, s

t_d – bezdimenzionalno vrijeme

t_p – pseudoproizvodno vrijeme, s

w_s – širina oštećenog dijela frakture, m

x_f - poluduljina frakture, m

1. UVOD

Hidrauličko frakturiranje jedna je od metoda stimulacije ležišta kojom se povećava indeks proizvodnosti bušotine te povećavaju bilančne rezerve ugljikovodika. Prvi put primijenjeno je 1947. godine na plinskom ležištu Hugoton u Kansasu (Economides, 2007). Metoda se zasniva na utiskivanju fluida u formaciju pod tlakom iznad tlaka frakturiranja stijene. Širina, visina i duljina nastale frakture uglavnom su definirani tlakom utiskivanja, viskoznošću gela i posljedično protokom što utječe na pad tlaka duž frakture. Padom tlaka, ali ujedno i nedostatkom gela zbog velike kontakte površine gubitka fluida, fraktura prestaje s rastom. Naprezanja u formacijama mogu se podijeliti na 3 glavna naprezanja: vertikalno i 2 horizontalna (minimalno i maksimalno). Fraktura nastaje u smjeru okomitom na najmanje naprezanja, a pošto je vertikalno naprezanje najveće na dubinama većim od 500 m, gotovo sve frakture su vertikalne (Economides et al., 2002). Nakon stvaranja frakture utiskuje se podupirač, i to propant, pijesak ili sintetski materijal kojeg se utiskuje kao kašu. Svrha podupirača je popuniti i držati frakturu otvorenom nakon prestanka utiskivanja i pada tlaka. Fraktura ispunjena podupiračem stvara put visoke vodljivosti prema bušotini i tu je propusnost veća od propusnosti ležišta, često i do 5, 6 redova veličine. Za ležišta niske propusnosti cilja se širina frakture od 0,25 cm s duljinom od nekoliko stotina metara dok je za visoko propusna ležišta ciljana širina i do 5 cm s duljinom koja može biti samo 10 m (Economides et al., 2002). Duljina frakture i bezdimenzionalni faktor vodljivosti dvije su glavne varijable koje određuju indeks proizvodnosti bušotine. U gotovo svim slučajevima, glavnina protoka odvija se kroz frakturu, time se premosti oštećenje u pribušotinskoj zoni te skin ne utječe na stimuliranu bušotinu. Neki od problema vezanih uz proizvodnju mogu biti prijelazni režim protjecanja, utjecaj ležišnih granica, ne-Darcy protok, prodiranje podupirača u sloj i drugi.

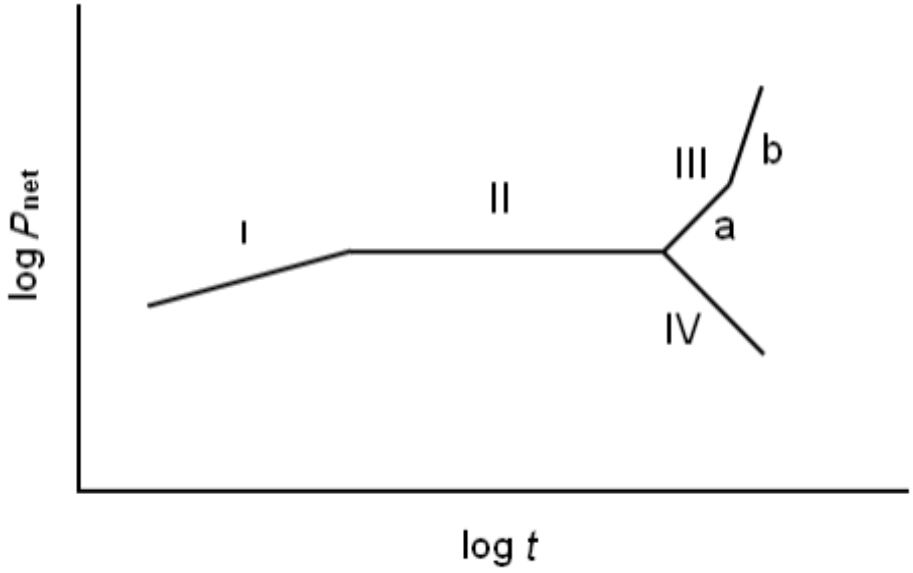
Sve navedeno upućuje kako će proizvodnost bušotine nakon frakturiranja ovisiti o nizu parametara koje je teško odrediti samo analitičkim modelima jer takvi modeli pretpostavljaju homogen i izotropan sustav. Numeričkim modelom mogu se testirati složenije geometrije frakture, a zatim i heterogeno svojstvo tečenja u cjelini, tj. omjer plina i nafte, promjena udjela vode u proizvodnji itd. Dakle, hipoteza rada postavljena je da se numeričkim modelom, na temelju usklađivanja proizvodnih podataka neposredno nakon frakturiranja i usklađivanja testa porasta tlaka može detaljnije opisati svojstva, prije svega geometriju frakture.

U tom smjeru je i organiziran diplomski rad:

1. Simulacijsko poklapanje proizvodnji na temelju podataka proizvodnje iz starog naftnog ležišta (podatci osigurani od tvrtke INA d.d.);
2. Interpretacija podataka iz hidrodinamičkog mjerenja nakon frakturiranja (ove podatke se moglo usporediti i s interpretiranim rezultatima iz INE), korištenjem softvera Kappa Ecrin (Kappa, 2018);
3. Izrada modela frakture u softveru Shlumberger Eclipse (Schlumberger, 2018);
4. Poklapanje podataka hidrodinamičkog mjerenja i simuliranih podataka na temelju Eclipse modela porasta tlaka, promjenom parametara frakture.

2. INTERPRETACIJA FRAKTURIRANOG SLOJA I PREGLED KORIŠTENIH METODA

Tijekom stimulacije ležišta tlak frakturiranja je jedan od rijetkih pokazatelja razvoja frakture. Na slici 2-1. log-log plot tlaka na dnu bušotine i vremena (Nolte i Smith, 1981) pokazuje trend razvoja frakture nakon frakturiranja formacije.



Slika 2-1. Razvoj frakture s logaritmom vremena (Nolte i Smith, 1981)

Normalan rast frakture s pozitivnim rastom veličine 0,25 predstavlja slučaj I. Konstantan gradijent, rast visine i duljine frakture i/ili gubitak fluida predstavlja slučaj II. Slučaj IIIa predstavlja dodatan rast širine, npr. kod popunjavanja vrha frakture, a IIIb popunjavanje frakture u području pribušotinske zone sa naglim rastom tlaka. Nagli rast površine frakture kao što je slučaj prodiranja u drugi sloj vidljiv je za slučaj IV.

Nakon stimulacije moguće je koristiti karotažna mjerenja za procjenu stvorene frakture. Najčešće korištene metode su mjerenje gama zračenja, spektralno gama zračenje i orijentirano gama zračenje, temperatura i akustična karotaža. Spektralna gama karotaža omogućuje u području bušotine uočavanje visine frakture ispunjene podupiračem, raspodjelu podupirača, perforacije koje nisu uspješno stimulirane i vodljivost frakture kao funkciju širine i koncentracije podupirača.

Mjerenjem temperature može se odrediti visina frakture, ali ne i popunjenost i raspored podupirača. Utiskivanje hladnih fluida uočljivo je na profilu temperatura bušotine, no za intervale gdje se utiskuje velika količina fluida ili podupirača, potrebno je više vremena za uspostavljanje temperaturne ravnoteže.

Novije metode procjene parametara frakture uključuju korištenje mikroseizmike i tiltmetra (Vinegar et al., 1992). Proces hidrauličkog frakturiranja može se smatrati serijom malih potresa pri čemu je monitoringom i mapiranjem signala i deformacija moguće utvrditi geometriju frakture. Prednost ove metode nad temperaturnim mjerenjem ili radioaktivnim obilježivačima (engl. *Tracers*) je u samoj dubini, uz omogućavanje procjene frakture na udaljenostima od nekoliko stotina metara od stimulirane bušotine. Moderni tiltmetri imaju mogućnost registriranja devijacije i od 0.0000001%

Na slici 2-2. prikazane su različite metode procjene frakture s glavnim ograničenjima.

Može odrediti | Moguće odrediti | Ne može odrediti

			Parametri							
Grupa	**Metoda**	**Glavna ograničenja**	**duljina**	**visina**	**asimetrija**	**širina**	**azimut**	**nagib**	**volumen**	**vodljivost**
Daljinsko, tijekom frakturiranja	Površinski tiltmetar	Ne može procjeniti pojedine i kompleksu geometriju frakture								
		Rezolucija mapiranja smanjuje se sa dubinom								
	Dubinski tiltmetar	Rezolucija duljine i visine frakture smanjuje se s povećanjem udaljenosti od bušotine								
		Ograničeno dostupnim bušotinama za motrenje								
		Nema informacija o raspodjeli propanta i efektivne geometrije frakture								
	Mikroseizmika	Ograničeno dostupnim bušotinama za motrenje								
		Ovisnost o točnosti modela brzina								
		Nema informacija o raspodjeli propanta i efektivne geometrije frakture								
Pribušotinska zona, nakon frakturiranja	Radioaktivni traceri	Mjerenje u pribušotinskoj zoni								
		Daje informacije samo o donjoj granici visine frakture ako fraktura i smjer bušotine nisu poravnati								
	Temperaturno mjerenje	Termička vodljivost formacija se razlikuje, utječe na točnost mjerenja								
		Nužno je više mjerenja unutar 24 sata nakon stimulacije								
		Daje informacije samo o donjoj granici visine frakture ako fraktura i smjer bušotine nisu poravnati								
	Mjerenje proizvodnje	Daje informacije samo o zonama ili perforacijama koje pridonose proizvodnji u zacijevljenom kanalu bušotine								
	Snimanje stijenke bušotine	Samo u nezacijevljenom kanalu								
		Daje informacije o orjentaciji frakturu samo u pribušotinskoj zoni								
	Dubinski videozapis	Najčešće u zacijevljenom kanalu i daje informacije samo o zonama i perforacijama koje pridonose proizvodnji								
		Može imati primjenu u nezacijevljenom kanalu								
Model	Analiza tlaka frakturiranja	Rezultati ovise o pretpostavljenom modelu i opisu ležišta								
		Zahtijeva kalibraciju na osnovi opaženog								
	Ispitivanje bušotine	Rezultati ovise o pretpostavljenom modelu								
		Zahtijeva preciznu procjenu propusnosti i ležišnog tlaka								
	Analiza proizvodnje	Rezultati ovise o pretpostavljenom modelu								
		Zahtijeva preciznu procjenu propusnosti i ležišnog tlaka								

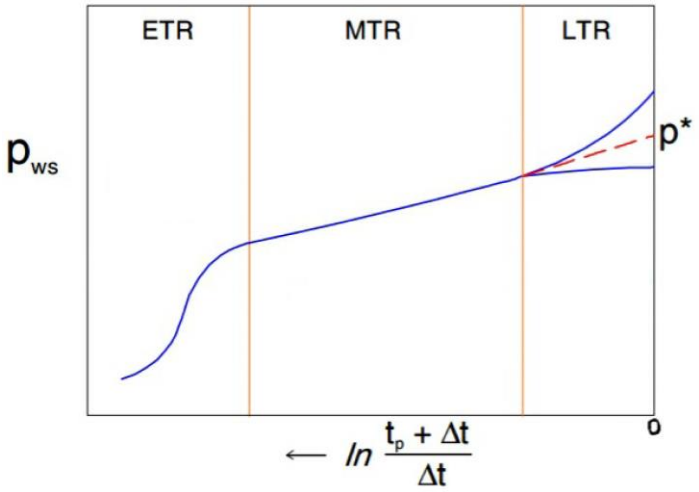
Slika 2-2. Metode određivanja parametara frakture, preuređeno i prevedeno od Bennet. (Bennet et al., 2005)

2.1. Test porasta tlaka

Hidrodinamičkim mjerenjima utvrđuje se proizvodna mogućnost ležišta, tj. preciznije, za svaku bušotinu u kojoj se radi hidrodinamičko mjerenje, mogu se odrediti osrednjena svojstva pribušotinske zone, što se svodi na proizvodnost, injektivnost te tlak na rubu drenažnog radijusa. Ukoliko se radi o ležišnom bloku (ili malom ležištu) unutar kojeg nema hidrodinamičke komunikacije među bušotinama, onda se može zaključiti kako se hidrodinamičkim mjerenjem određuje ležišni tlak i proizvodnost. Postoji niz metoda kojima se kontrolirano postavljaju uvjeti u bušotini, kako bi se moglo primijeniti definirane analitičke metode, npr. pritjecanje u bušotinu uz mjerenje odnosa brzine protoka i ležišnog tlaka, ili zaustavljanje protoka u bušotinu i mjerenje odnosa vremena i porasta tlaka u bušotini itd. Podaci koji se tako mogu dobiti uključuju propusnost ležišta, doseg ili simulaciju oštećenja, ležišni tlak i moguće granice i heterogenost ležišta (Lee, 1982). Poteškoće koje se javljaju kod mjerenja i interpretacije hidrodinamičkih mjerenja posljedica su heterogenosti, prisutnosti više faza, nemogućnosti dostatnog vremena mjerenja (pogotovo za ležišta niske propusnosti gdje je potrebno više vremena za razvijanje cjelovite krivulje).

Test porasta tlaka izvodi se na način da bušotina proizvodi neko vrijeme nakon kojeg se bušotina zatvara te se interpretira brzina porasta tlaka kao funkcija vremena. Na slici 2-3., prikazom krivulje porasta tlaka u semilogu, mogu se uočiti 3 perioda:

1. Rani period (*engl. Early-Time Region, ETR*);
2. Srednji period (engl. *Middle-Time Region, MTR*);
3. Kasni period (engl. *Late-Time Region, LTR*).



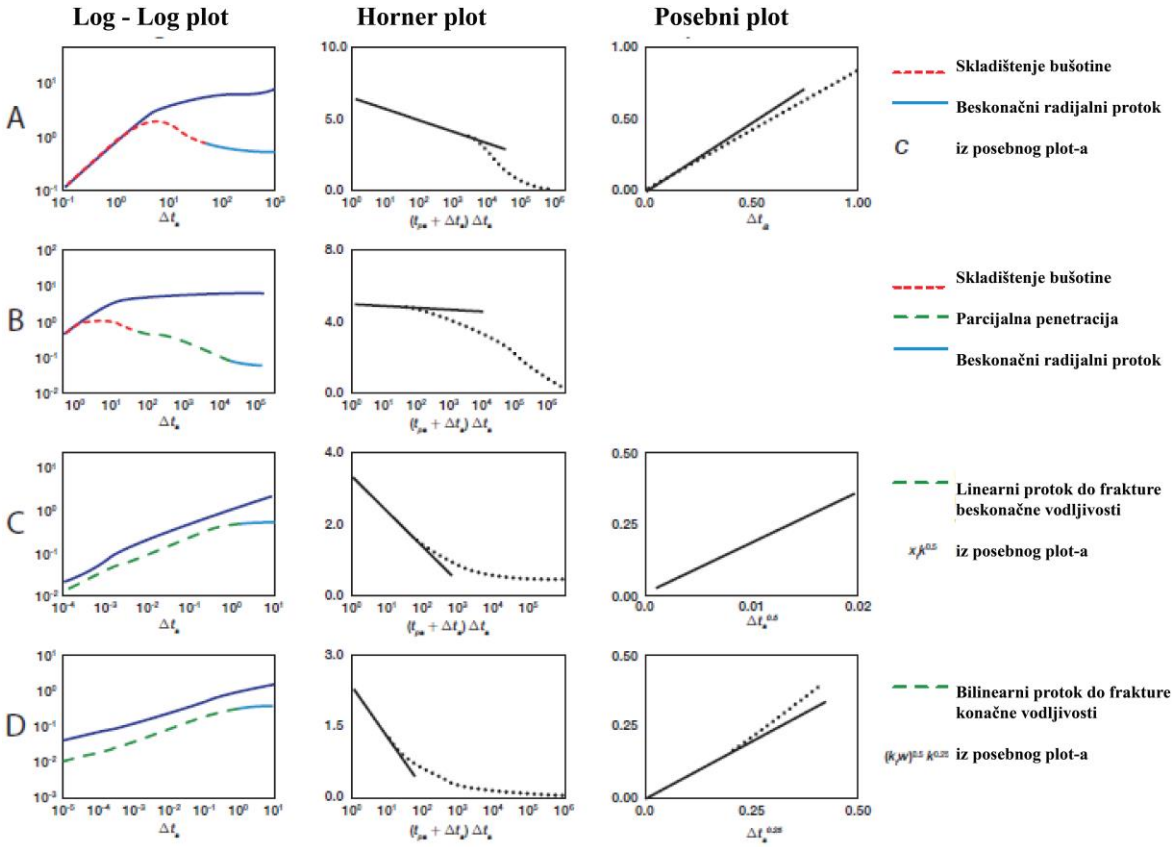
Slika 2-3. Prikaz krivulje porasta tlaka u semilogu (pet-oil.blogspot.com/2016/10/pressure-transient-analysis-in-drawdown.html)

Većina bušotina ima izmijenjenu propusnost u pribušotinskoj zoni zbog čega nije realno očekivati stalan nagib u ranom periodu (ETR). Nadalje, stalan protok fluida, naknadno skladištenje u bušotini nakon zatvaranja uzrokuje stlačivanje fluida. Nagib ravne linije označava početak srednjeg perioda (MTR) i povezan je s propusnošću formacije te se nastavlja sve dok radijus ispitivanja ne dosegne jednu ili više granica ležišta, heterogene dijelove ili kontakt fluida. Kasni period (LTR) počinje kada radijus ispitivanja dosegne drenažni radijus bušotine. U ovom periodu, tlak je pod utjecajem granica, interferencije s drugim bušotinama, heterogenosti i kontakta fluida.

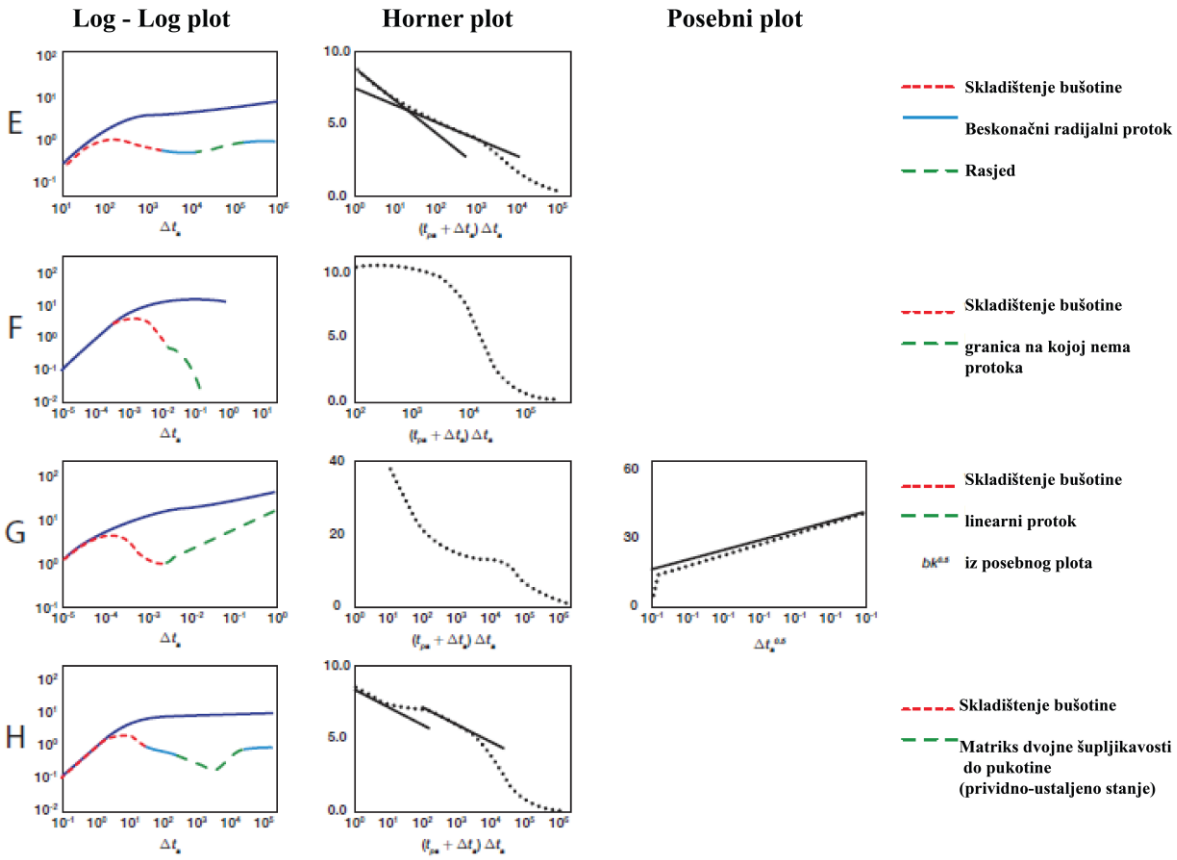
Log-log plot s derivacijskom krivuljom tlaka jedna je od metode interpretacije i analize testa porasta tlaka kojom je omogućeno prepoznavanje svih režima protoka. Na slikama 2-4 i 2-5, te tablici 2-1, prikazani su slučajevi za koje izgledi krivulja poprimaju posebne oblike (Economides, 2007).

Tablica 2-1. Odzivi derivacijske krivulje za razne modele ležišta i režime protoka (Economides, 2007)

ETR		
Skladištenje bušotine	nagib 1	**A**
Sferični protok	nagib -1/2	**B**
Beskonačna vodljivost frakture	nagib 1/2	**C**
Konačna vodljivost frakture	nagib 1/4	**D**
MTR		
Radijalni protok	nagib 0	**A**
LTR		
Rasjed	nagib 0 (stabilizacija na dvostrukoj vrijednosti prijašnjeg nagiba 0	**E**
Bušotina s proizvodnjom iz kuta	monotono povećanje derivacijske krivulje	
Composite propusnost	vijugava derivacijska krivulja	
Dvojna šupljikavost	pad pa porast derivacijske krivulje	**H**
Protok u uskim ležištima	nagib 1/2	**G**
Utjecaj granica		
Iscrpak	nagib 1	
Porast	pad derivacijske krivulje	**F**

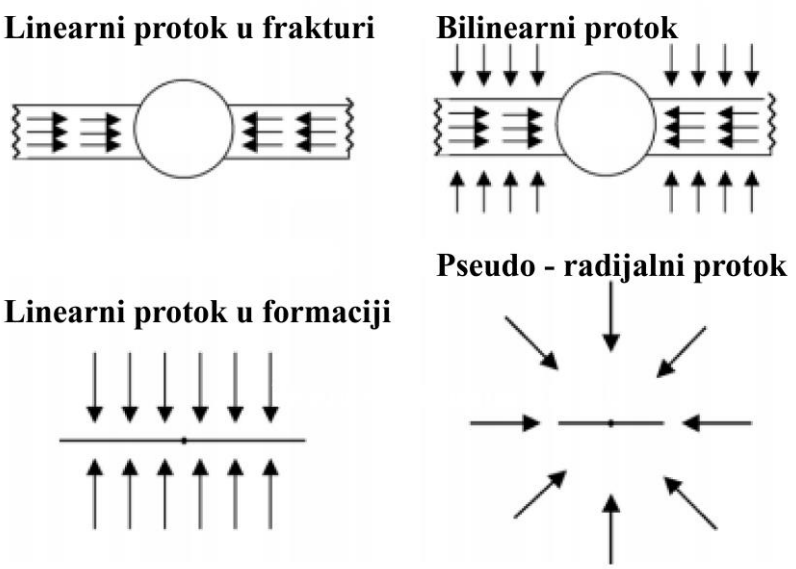


Slika 2-4. Odzivi derivacijske krivulje za razne modele ležišta i režime protoka, A-D (Economides, 2007)



Slika 2-5. Odzivi derivacijske krivulje za razne modele ležišta i režime protoka, E-H (Economides, 2007)

U frakturiranim bušotinama, prije uspostavljanja radijalnog protjecanja, protok je laminaran te nema pada tlaka kroz frakture neograničene vodljivosti. Bilinearni protok pojavljuje se u bušotinama s frakturama niske vodljivosti ili u ležištu s dvojnom šupljikavošću kada se protok iz matriksa u frakturu odvija u neustaljenom režimu protjecanja (slika 2-6).



Slika 2-6. Tipovi protoka u frakturiranom sloju (Nashawi i Malallah, 2007)

Smanjenje propusnosti u blizini bušotine posljedica je skin efekta što uzrokuje dodatni pad tlaka tijekom protoka fluida. U ukupnom skinu sadržan je (Gringarten, 2010):

1. $S_{Mehanički}$ – oštećenje pribušotinske zone isplakom, cementnom kašom i dr;
2. S_{Fluida} – turbulencija, nakupljanje kondenzata, višefazni protok i dr;
3. $S_{Opremanja}$ – parcijalna penetracija (perforiranje), djelomično raskrivanje ležišta i dr;
4. $S_{Geološki}$ – heterogenost, prisutnost pukotina i dr.

Dodatni pad tlaka uslijed skina može se definirati (Hawkins, 1956):

$$\Delta p_s = \frac{q\mu}{2\pi kh} \ln\left(\frac{r_s}{r_w}\right) \left[\frac{k}{k_s} - 1\right] \quad (2\text{-}1)$$

Nadalje, skin se može izraziti preko slijedećih jednadžba (Hawkins, 1956)

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

$$s = \frac{2\pi kh}{q\mu} \Delta p_s \quad (2\text{-}3)$$

gdje su:

S – skin

k – propusnost ležišta, m^2

k_s – propusnost izmijenjene zone, m^2

q – protok, m^3/d

Δp_s – dodatan pad tlaka uslijed skina, Pa

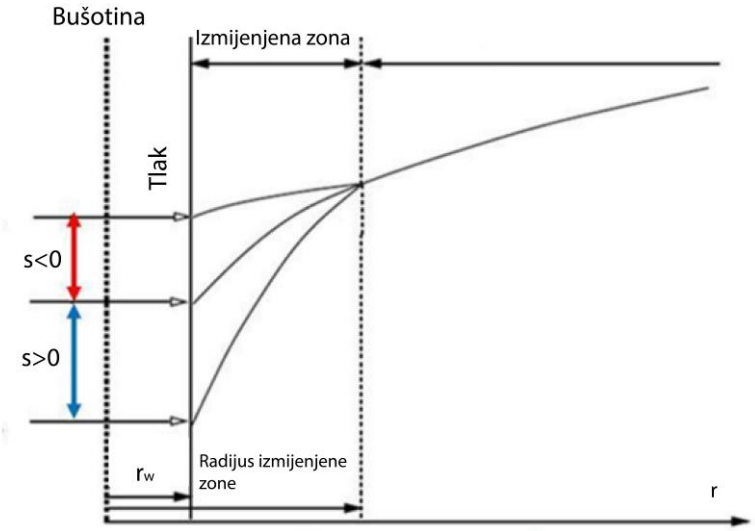
h – debljina ležišta, m

r_w – radijus bušotine, m

r_s– radijus izmijenjene zone, m

μ - viskoznost, mPa×s

Na slici 2-7. prikazan je utjecaj skin efekta pri čemu je za stimuliranu bušotinu vrijednost skina manja od 0 što predstavlja kemijski stimuliranu zonu ili frakturiranu i/ili horizontalnu bušotinu.



Slika 2-7. Utjecaj skin efekta na tlak, preuređeno od Horne (Horne, 1995)

Za frakturirane bušotine moguća su i oštećenja nastala tijekom frakturiranja, a to su skin na licu frakture S_{ff} (engl. *fracture face skin*) i skin zagušenog dijela frakture S_{fc} (engl. *choked fracture*), a definirani su (Cinco-Ley i Samaniego, 1981):

$$S_{ff} = \frac{\pi w_s}{2x_f}\left(\frac{k}{k_s} - 1\right) \tag{2-4}$$

$$S_{fc} = \frac{\pi x_{ck}}{x_f}\left(\frac{k}{k_{fc}} - \frac{k}{k_f}\right) \quad (2\text{-}5)$$

gdje su:

S_{ff} – skin na licu frakture

S_{fc} – skin zagušenog dijela frakture

w_s – širina oštećenog dijela frakture, m

x_f - poluduljina frakture, m

k_{fc} – propusnost zagušenog dijela frakture, m^2

k_f – propusnost frakture, m^2

Oštećenje na licu frakture S_{ff} može biti uzrokovano (Amin, 2012) *leak-off* efektom fluida u visoko propusnim ležištima, prilikom bubrenja glina, migracije finih čestica, promjenama kapilarnih tlakova i začepljenjem grla pora. Oštećenje zagušenog dijela frakture S_{fc} rezultat je drobljenja podupirača, oštećenja polimerima, prekomjerne količine utisnutog podupirača, migracije finih čestica u frakturu, ostataka ili nerazbijenog fluida za frakturiranje unutar frakture i ne-Darcy-evog efekta za plinska ležišta.

Česta praksa prilikom mjerenja u bušotini je koristiti bezdimenzionalne varijable koje su primjenjive za opća rješenja za razne slučajeve.

Bezdimenzionalne vrijednosti tlaka i vremena definirane su sljedećim odnosom:

$$p_d = \frac{kh}{141.2\Delta qB\mu}\Delta p \quad (2\text{-}6)$$

$$t_d = \frac{0.000264k}{\phi\mu c_t r_w^2}\Delta t \quad (2\text{-}7)$$

gdje su

p_d – bezdimenzionalni tlak

t_d – bezdimenzionalno vrijeme

B – obujamski faktor, m^3/m^3

c_t - ukupna stlačivost, Pa^{-1}

Φ – šupljikavost, (dio cijelog)

Za ne-frakturirane bušotine (Gringarten et al., 1975):

$$\frac{t_d}{C_d} = \frac{0.000295kh\Delta t}{\mu C} \tag{2-8}$$

gdje su:

C_d – bezdimenzionalno skladištenje bušotine

C – koeficijent skladištenja bušotine, m^3/bar

U frakturiranim bušotinama primjenjuju se slijedeće varijable:

$$t_d = \frac{0.000264k}{\phi\mu c_t x_f^2}\Delta t \tag{2-9}$$

Za frakturu beskonačne vodljivosti:

$$p_d = \pi\left(t_{Df}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{2-10}$$

Za frakturu konačne vodljivosti:

$$p_d = \frac{2.451}{\left(k_{fD}w_{fD}\right)^{\frac{1}{2}}}\Delta t_D x_f^{\frac{1}{4}} \tag{2-11}$$

gdje je:

$k_{fD}w_{fD}$ – *bezdimenzionalna vodljivost frakture*

Bezdimenzionalna propusnost frakture i širine definirane su:

$$k_{fD} = \frac{k_f}{k} \tag{2-12}$$

$$w_{fD} = \frac{w_f}{x_f} \tag{2-13}$$

Spajanjem navedenih izraza (Cinco-Ley et al.,1978) uvodi bezdimenzionalnu vodljivost frakture (*FcD*):

$$FcD = \frac{k_f w_f}{k x_f} \tag{2-14}$$

gdje su:

k_f – propusnost frakture, m^2
w_f – širina frakture, m
x_f – poluduljina frakture, m

Program za analizu testa porasta tlaka koji se koristio je „Ecrin“ tvrtke Kappa. Modul „Saphir“ omogućuje unos ležišnih i bušotinskih parametara, biranje modela na temelju kojih se radi interpretacija krivulja. Moguće je mijenjati jedan ili više parametara kako bi se bolje poklopile krivulje porasta tlaka ili dobila realnija slika ležišta.

2.2. Ležišna simulacija

Za numeričku simulaciju koristio se software „Eclipse“ (E100) tvrtke Schlumberger za numeričko modeliranje ležišta modelom s tabličnim opisom ležišnih fluida (engl. *Black Oil simulator, BO*). Za BO simulaciju se tablično definiraju svojstva pojedine faze, ali se zanemaruju promjene sastava. Prikladna je za slučajeve normalnih i teških nafti gdje se smanjenjem količine otopljenog plina sastav ne mijenja toliko da bi simulacija bila fizikalno neprihvatljiva. U slučaju utiskivanja plinova u naftu, kondenzatnih ležišta itd. - koristi se komponentni model (engl. *compositional*, Eclipse E300). Za zadano ležište prostor je diskretiziran podjelom u konačan broj ćelija u 3 dimenzije.

Ležišni simulator koristan je za utvrđivanje pridobivih rezervi, najbolje metode perforacije i razmještaja bušotine, broja bušotine, utisnih količina, konusiranja plina i vode i dr. Nadalje, simulacije mogu ukazati na zone koje trebaju detaljnu analizu ili predstavljaju rizik tijekom proizvodnje.

Problemi kod numeričke simulacije (Pettersen, 2006):

a) Nepoznavanje detaljne strukture pornog sustava;
b) Generalizacija detaljna o pornoj strukturi promatranjem na makroskali (seizmika i bušotinska mjerenja);
c) Nesigurnost parametara (prije svega krivulje relativne propusnosti) za primjenu jednadžbi za višefazni protok;
d) Homogenizacije (engl. *upscaling*) podataka.

Jednadžbe koje simulator rješava na svakom koraku su kombinacija Darcy-evog zakona i materijalnog balansa (Schlumberger, 2015):

Darcy-ev zakon (bez gravitacijskog člana):

$$q = -\frac{k}{\mu}\nabla p \tag{2-15}$$

Materijalni balans:

$$-\nabla M = \frac{\partial}{\partial t}(\phi\rho) + \mathrm{Q} \tag{2-16}$$

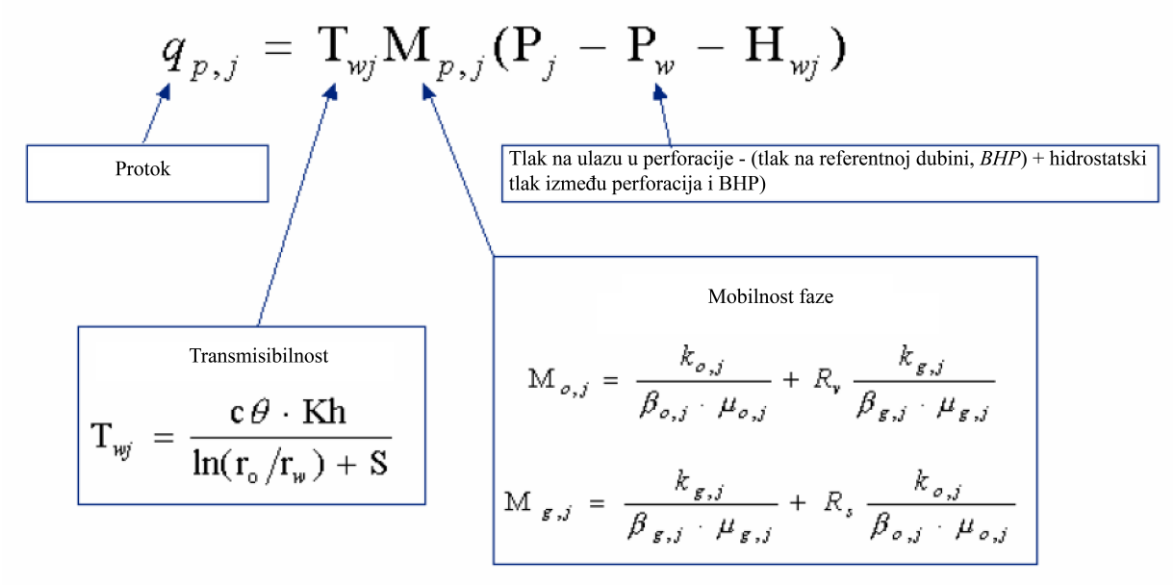
Jednadžba protoka koju simulator koristi (sa gravitacijskim članom)

$$\nabla[\lambda(\nabla p - \gamma\nabla z)] = \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\phi}{\beta}\right) + \frac{\mathrm{Q}}{\rho} \tag{2-17}$$

Gdje je:

$$\lambda = \frac{k}{\mu\beta} \tag{2-18}$$

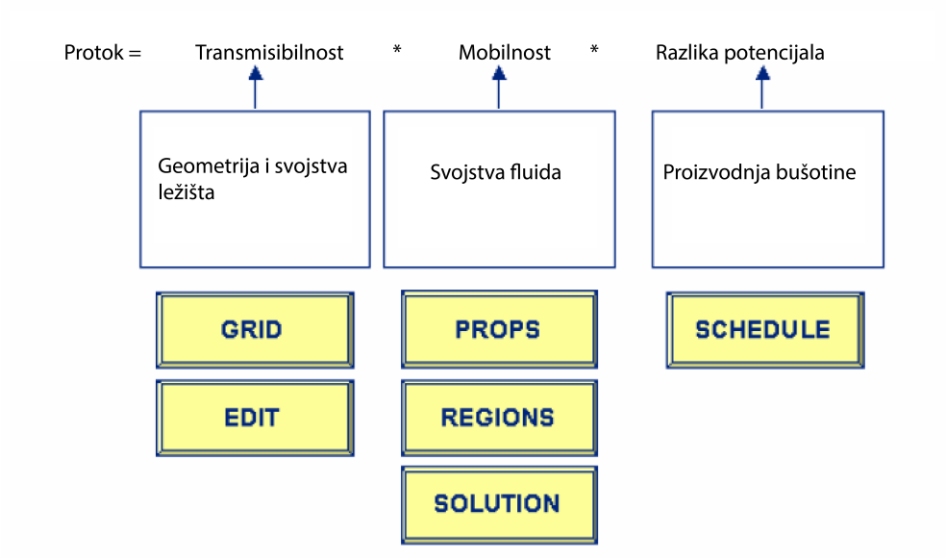
Osim toga, rješava se i set jednadžbi za model bušotine prikazan na slici 2-8.



Slika 2-8. Set jednadžbi za model bušotine (Schlumberger, 2015)

Eclipse simulator u svom algoritmu koristi vrijednost propusnosti izvedenu između središta ćelija i taj se parametar naziva se transmisibilnost. Transmisibilnost se računa harmoničkim osrednjavanjem propusnosti kod prostora definiranog koordinatama (engl. *corner point grid*), dok se kod prostora definiranog nizom paralelopipeda (engl. *block centered grid*) transmisibilnost računa prema dodirnim površinama dvije susjedne ćelije (paralelopipeda, čime može doći do numeričke disipacije u slučaju složenijih struktura ili modela s rasjedom i sl.). Prilikom računanja srednje propusnosti, vrijednosti lokalnih ekstrema propusnosti mogu se izgubiti. Prilikom pretvaranja u transmisibilnost dodatno se gube vrijednosti propusnosti stoga je u nekim slučajevima potrebno ručno unijeti vrijednosti transmisibilnosti.

Ulazna datoteka za Eclipse simulaciju podijeljena je na više sekcija u kojima se ključnim riječima opisuju svojstva ležišta, fluida, bušotine, parametri proizvodnje i dr. Uloga pojedine sekcije prikazana je na slici 2-9.



Slika 2-9. Ključne riječi i uloga u simulaciji protoka (Schlumberger, 2015)

Ravnotežno stanje u ležištu određeno je tlakom i zasićenjem svake ćelije fluidima na početku simulacije stoga je potrebno unijeti podatke o kontaktima fluida i tlaku ovisno o dubini iz čega simulator uz gustoće ležišnih fluida računa ravnotežno stanje.
PVT podatci nužni su za opisivanje ponašanja (količina i viskoznosti) pojedine faze, izračun gustoća što je uvjet početnog ravnotežnog stanja i za izračun materijalnog balansa. Podaci o formaciji služe za određivanje minimalnog i maksimalnog zasićenja, definiranje prijelazne zone i dr.

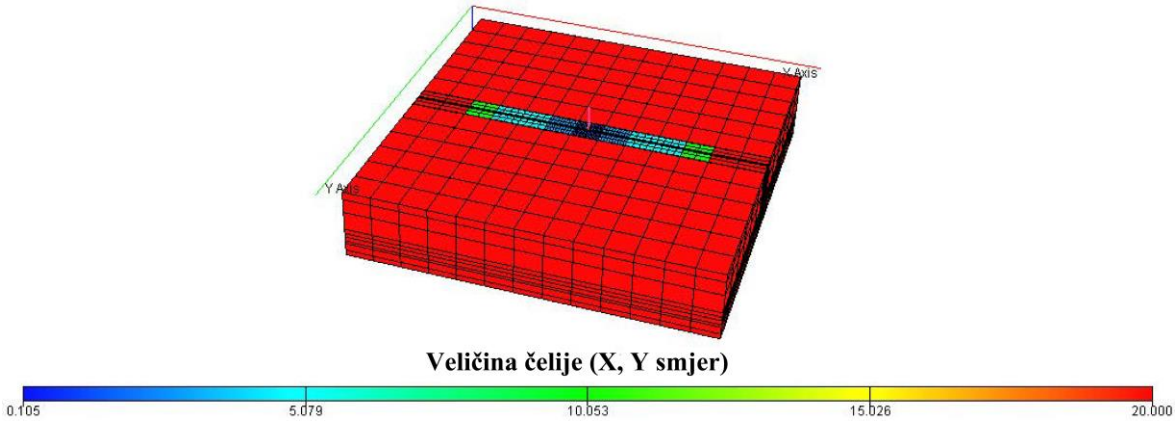
Simulator ima mogućnost lokalnog uređenja ćelija (engl. *Local Grid Refinement*, LGR). Time se globalne ćelije ležišta mogu podijeliti na veći broj ćelija što bolje opisuje:

a) velike promjene tlaka u blizini bušotine,
b) konusiranje,
c) kondenziranje fluida,
d) prikaz horizontalnih bušotina,
e) područja s velikom gustoćom broja bušotina,
f) polja sa zajedničkim akviferom.

Za definiranje frakture u simulacijskom modelu koristi se kartezijev koordinatni sustav jer se u radijalnom modelu širina ćelija povećava s porastom udaljenosti od bušotine. Praktični pristup modeliranju frakturiranih ležišta je koristiti LGR i to uvođenjem ćelija vrlo male širine i visoke propusnosti u globalnu mrežu.

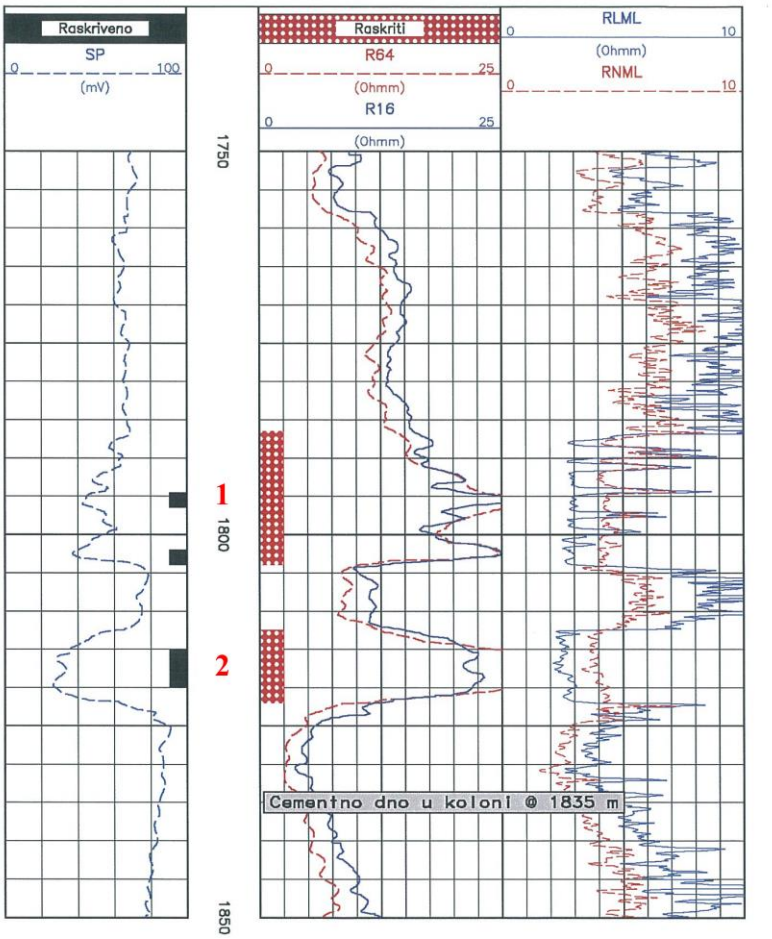
3. PODATCI O LEŽIŠTU I LEŽIŠNI MODEL

Za analizu u Eclipse-u poslužilo je staro naftno ležište (X) iz Dravske depresije. Ležište je frakturirano i nakon frakturiranja izvršeno je hidrodinamičko mjerenje.
Struktura polja X je izdužena antiklinala pružanja sjeverozapad - jugoistok poremećena s 3 normalna rasjeda. Za potrebe simulacije, izrađen je model ležišta volumena koji se može pretpostaviti iz dobivenih podataka, s bušotinom u središtu, ukupnim brojem globalnih ćelija 1521 (13x13x9) te s LGR-om od 114 920 ćelija za detaljni prikaz pribušotinske zone i izgleda frakture (slika 3-1).



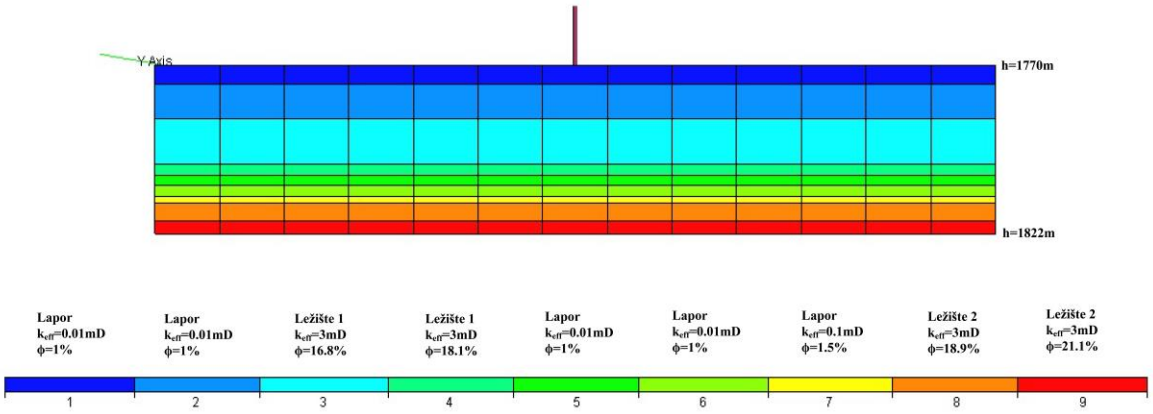
Slika 3-1. Prikaz veličine ćelija u globalnoj mreži i LGR-u

Tijekom dugogodišnje proizvodnje, bušotina je proizvodila eruptivno uz razdoblja zatvaranja uslijed remontnih radova, stimulacijskih obrada sloja i smanjenja prodora plina. Bušotinom raskrivena i obrađena ležišta te dostupna elektrokarotažna mjerenja prikazana su na slici 3-2.



Slika 3-2. Elektrokarotažna mjerenja iz bušotine na polju X

Obrađena ležišta ugljikovodika 1 i 2, kronostratigrafski pripadaju donjepontskim sitnozrnatim do srednjezrnatim kvarc-tinjčastim pješčenjacima koje karakteriziraju velike promjene u debljini i propusnosti u horizontalnom i vertikalnom smjeru s laporima kao izolatorskim stijenama. Vertikalan slijed slojeva definiran u simulacijskom modelu prikazan je na slici 3-3, a svojstva obrađenih ležišta u tablici 3-1.

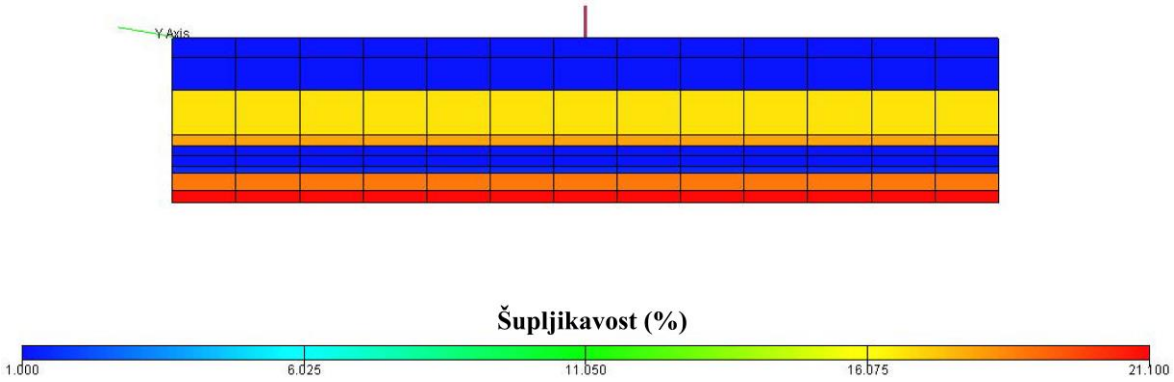


Slika 3-3. Vertikalan slijed slojeva s pripadajućim petrofizikalnim svojstvima

Tablica 3-1. Svojstva ležišta 1 i 2

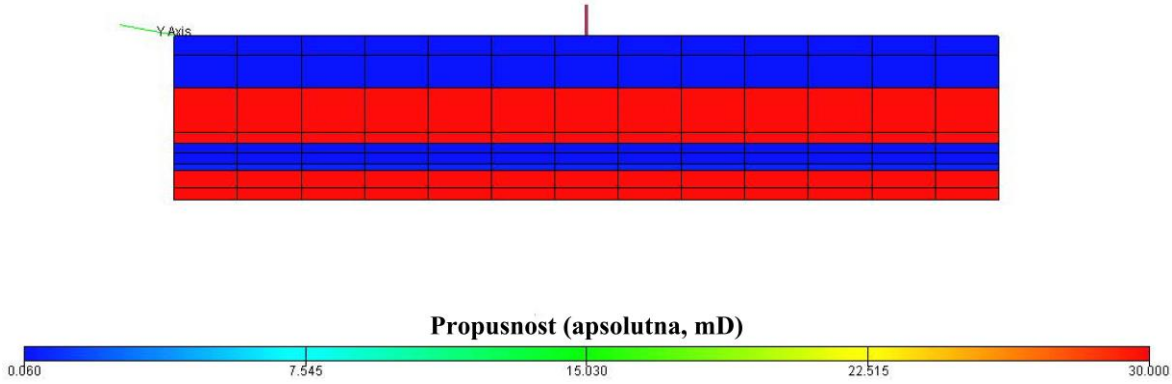
	Svojstva ležišta polja X	
Ležište	**1**	**2**
Formacija	Pješčenjak	Pješčenjak
Starost	Donji pont	Donji pont
Krovina, m	1786,5	1812,5
Podina, m	1804	1822
Debljina ležišta, m	17,5	9,5
Zasićenje fluidom	Nafta	Nafta
OWC početni, m	1808,2	1835
OWC 2016., m	1802	1816
GOC, m	1782,2	1782,2
Početni tlak, bar (cca.)	200	200
Tlak 2016., bar	90	105
Apsolutna propusnost, mD	30	30
Šupljikavost, %	17,1	20
Rsi, m^3/m^3	126,6	126,6

Podatci o šupljikavosti dobiveni su analizom karotažnih dijagrama i uzoraka jezgara stijene, a konačne vrijednosti kao aritmetička sredina srednjih vrijednosti tih analiza (slika 3-4).



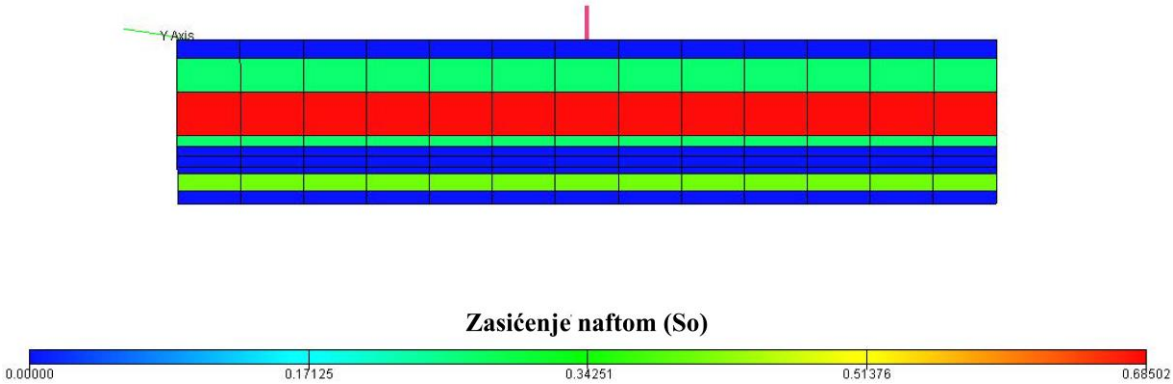
Slika 3-4. Prikaz šupljikavosti slojeva

Podatci o propusnosti dobiveni su analizom jezgara. Raspored propusnosti definiran u simulacijskom modelu prikazan je na slici 3-5.

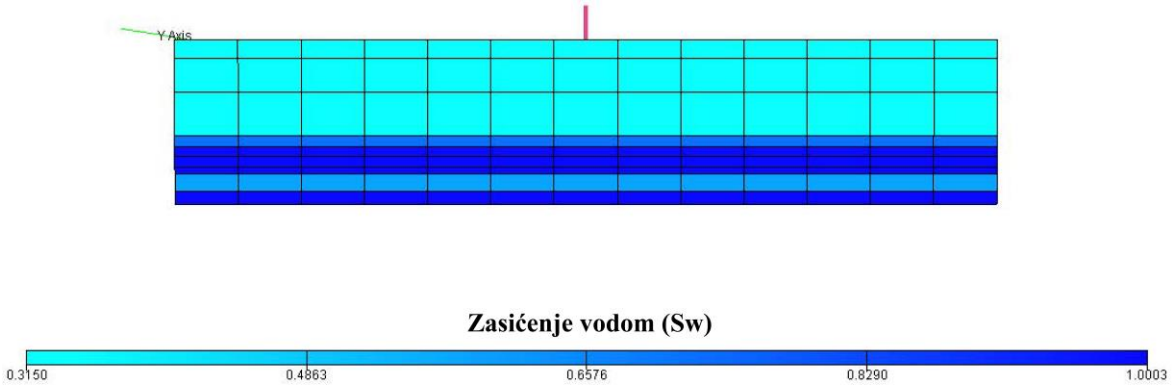


Slika 3-5. Prikaz propusnosti slojeva

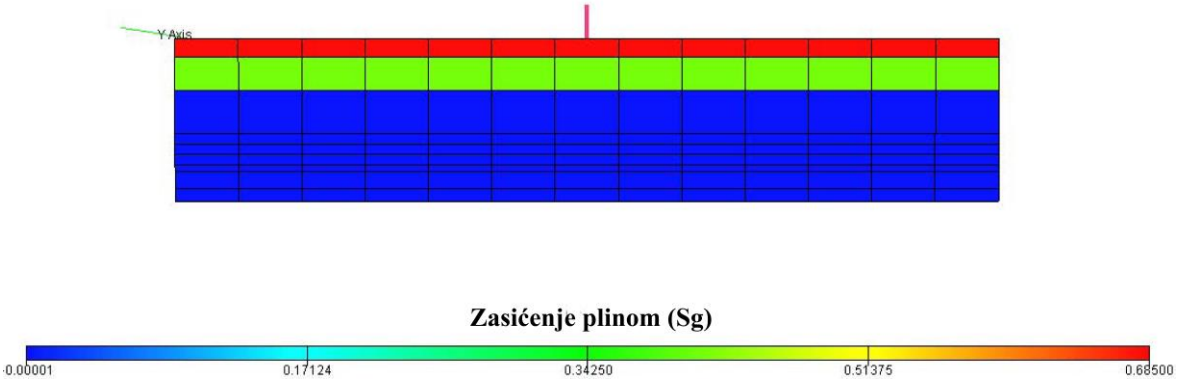
Podaci o zasićenju fluidima izračunati su iz analiza EK dijagrama i iz postojećih laboratorijskih analiza mjerenjem kapilarnih tlakova. Zasićenja su prikazana na slikama 3-6., 3-7. i 3-8.



Slika 3-6. Prikaz zasićenja naftom



Slika 3-7. Prikaz zasićenja vodom



Slika 3-8. Prikaz zasićenja plinom

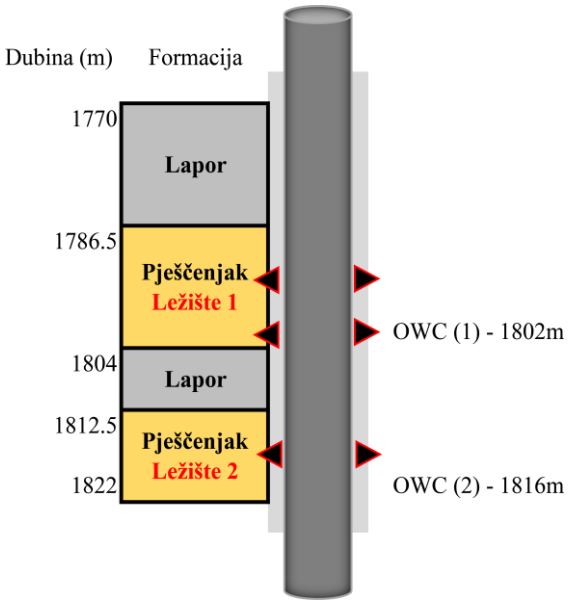
PVT svojstva nafte i otopljenog plina dobivena su metodama diferencijalnog i kontaktnog otplinjavanja uzoraka, korelacijama, analitičkim metodama i drugim dostupnim podatcima te su njihove vrijednosti uvrštene u ulaznu datoteku za Eclipse simulaciju kako bi se detaljno opisalo model. Neki od ostalih dostupnih podataka, ključnih za pokretanje „Eclipse koda“, prikazani su u tablici 3-2.

Tablica 3-2. Svojstva ležišnih fluida

	Svojstva ležišnih fluida polja X		
Fluid	Nafta	Voda	plin
Zasićenje (%)	68,5	31,5	plinska kapa
Volumni faktor	1,4887	1,04	0,00544
Viskoznost (mPas)	0,598	0,2573	0,01978
Gustoća (kg/m^3)	850	1005	0,7 (relativna)

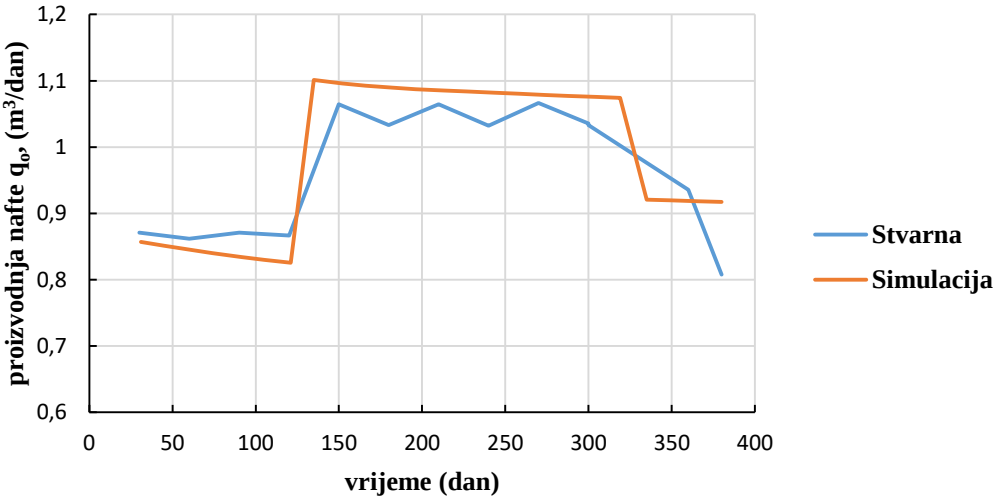
4. REZULTATI SIMULACIJE I INTERPRETIRANI REZULTATI HIDRODINAMIČKOG MJERENJA

Poklapanje zabilježenih podataka proizvodnje i simulacijskih rezultata (engl. *history matching*) u software-u „Eclipse“ započinje s datumom 1. siječnja 2016. godine. i traje do 15. siječnja 2017. godine. Cilj je postići poklapanje sa stvarnim proizvodnim karakteristikama naftne bušotine kako bi se moglo pristupiti zatvaranju bušotine uz mjerenje porasta tlaka te implementaciju fraktura različitih dimenzija uz analizu proizvodnih karakteristika bušotina. Na slici 4-1 prikazan je generalan slijed formacija, raskriveni intervali ležišta te *OWC* na početku simulacije.



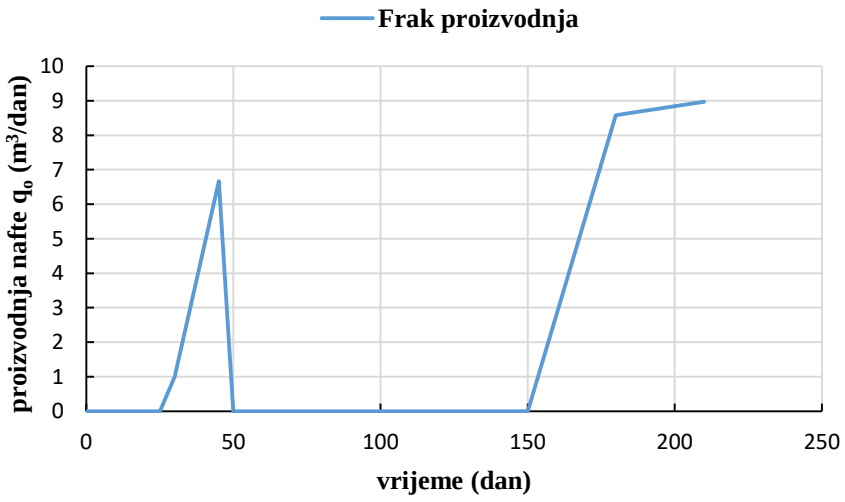
Slika 4-1. Pojednostavljeni prikaz modela

Perforirani intervali su 1795-1797 m (ležište 1), 1801-1804 m (ležište 1) i 1816-1819 m (ležište 2). Simulacijom je ostvareno zadovoljavajuće poklapanje sa točkama proizvodnje nafte i udjela vode u proizvodnji (engl. *Water Cut*, f_w ili *WCT*) od cca. 35% za zadnju točku simulacije. Rezultati poklapanja sa stvarnom proizvodnjom prikazani su na slici 4-2.



Slika 4-2. History matching 1.siječnja 2016. - 15.siječnja 2017.

Nakon toga uslijedilo je zatvaranje bušotine 15. siječnja 2017. uz pripremu za hidrauličko frakturiranje ležišta 1. Hidrauličko frakturiranje izvršeno krajem ožujka 2017. godine rezultiralo je poboljšanjem proizvodnih karakteristika bušotine uz sprječavanje pretjeranog širenja frakture unutar sada već zavodnjenog ležišta 2. Rezultati stvarne proizvodnje nafte nakon stimulacije sloja metodom hidrauličkog frakturiranja prikazani su na slici 4-3.



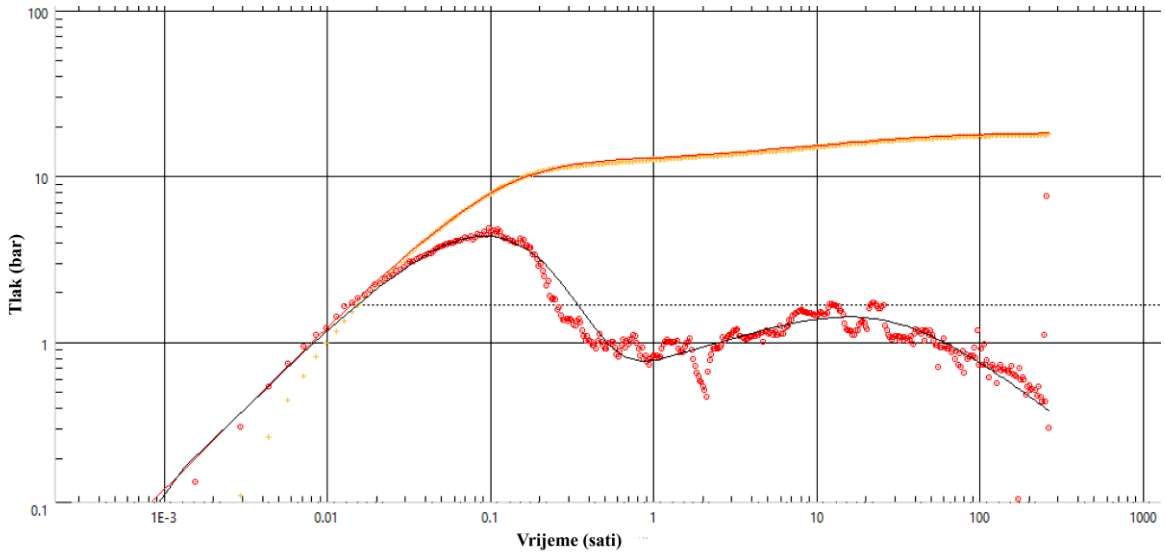
Slika 4-3. Dnevna proizvodnja nafte frakturirane bušotine

Osim podataka o proizvodnji, dostupni su i podaci iz testa porasta tlaka kojima je utvrđeno:

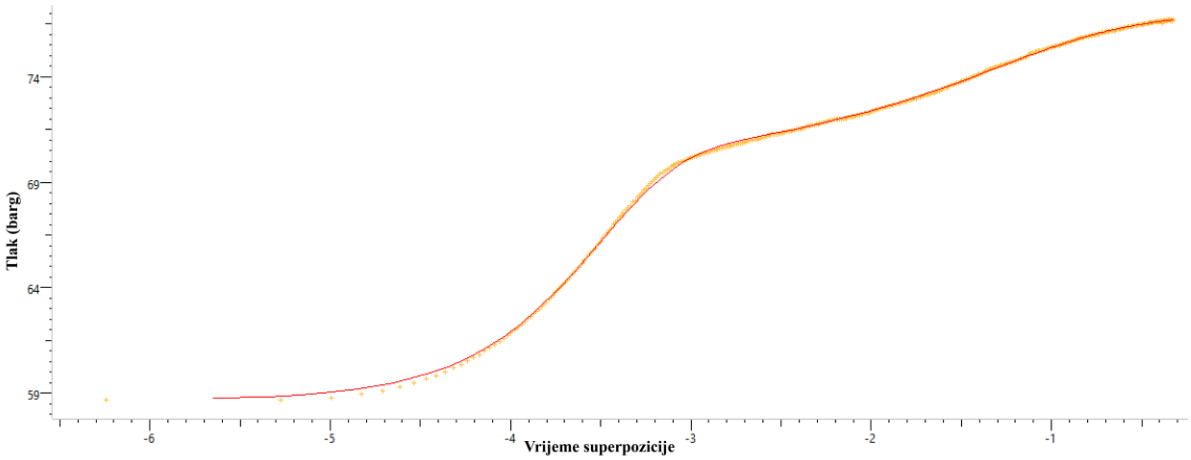
- ležišni tlak,
- dimenzije frakture,
- skin,
- vodljivost frakture i
- granica ležišta.

Mjerenje je trajalo 15 dana nakon kojeg se instrumenti vade, bušotina zatvara, a rezultati analiziraju.

Interpretacija je izvršena u software-u „Saphir“ s odabranim modelom za analizu porasta tlaka s pretpostavkom frakture ograničene vodljivosti (s naknadnim dotokom i skinom), homogenog ležišta i jedne granice s podržavanjem tlaka. Rezultati su prikazani u tablici 4-1 i na slikama 4-4. i 4-5.



Slika 4-4. Prikaz rezutata interpretacije u log-log plot-u



Slika 4-5. Prikaz rezultata interpretacije u semilogu

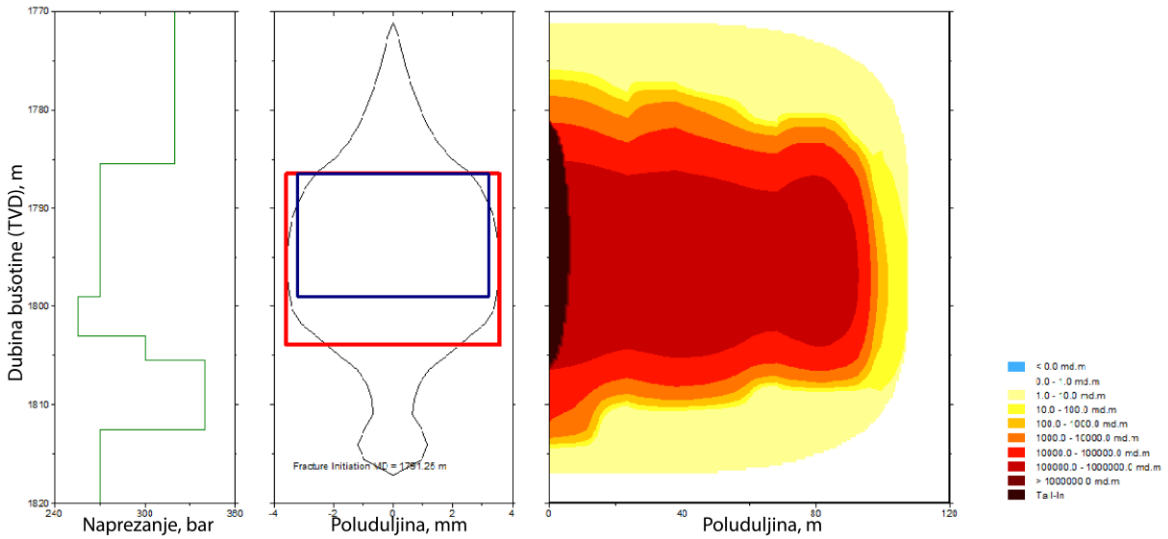
Iako na log – log plotu nije vidljiva fraktura, iz proizvodnih podataka jasno je da je bušotina uspješno stimulirana. Pojedini rezultati interpretacije testa porasta tlaka prikazani su u tablici 4-2.

Tablica 4-1.Rezultati interpretacije testa porasta tlaka pomoću softvera Ecrin

Srednji ležišni tlak, pr	77,84	bar
Moćnost sloja, kh	24,6	mD×m
Propusnost sloja, k (k_o)	3,0	mD
Koefecijent skladištenja bušotine, C	0,0036	m^3/bar
Ukupni skin efekt, S(t)	0.492	
Radijus ispitivanja, r_I	30,8	m
Poluduljina frakture, x_f	3,8	m
Udaljenost granice, d	7,28	m
Pad tlaka uslijed skina, Δp_{skin}	1,65	bar

Analizom testa porasta tlaka dobivena je vrijednost tlaka te je potvrđena efektivna propusnost ležišta za naftu. Nadalje pridobivene su podatci o dimenziji i vodljivosti frakture koje se dalje implementiraju u „Eclipse kod“. Idući korak je postavljanje frakture u postojeći model ležišta manipulacijom dimenzija ćelija i mijenjanjem vrijednosti propusnosti u LGR-u kako bi se postiglo poklapanje sa stvarnom proizvodnjom bušotine.

Za geometriju i raspored apsolutne propusnosti kao podloga koristio se završni izvještaj o frakturiranju polja X tvrtke Schlumberger sa rezultatima prikazanim na slici 4-6.



Slika 4-6. Predložak za geometriju i propusnost frakture

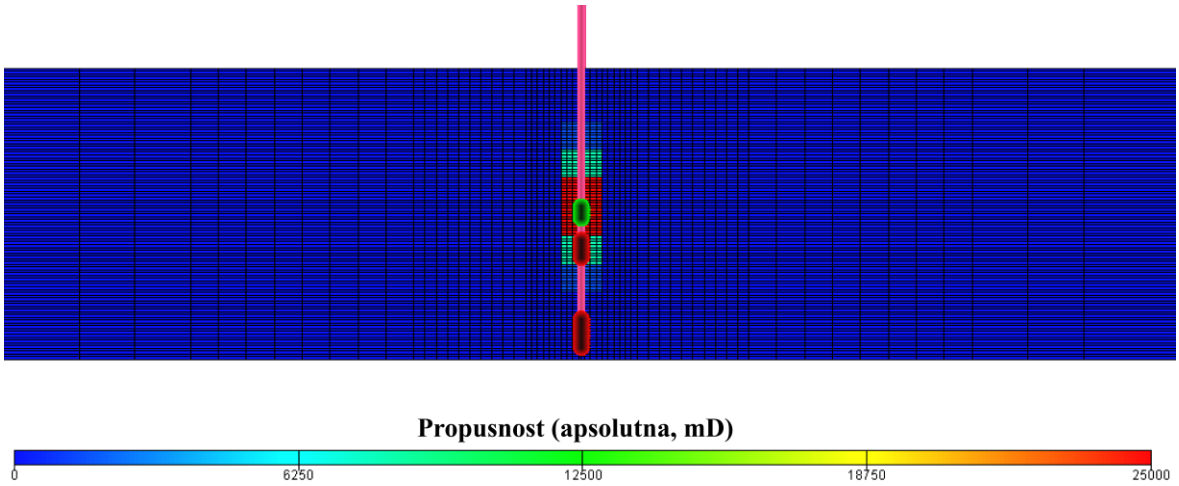
Pri tome je važno naglasiti da se prema izvještaju kreirala fraktura s:

Poluduljinom – 92,5 m;

Efektivnom bezdimenzionalnom vodljivosti – 473,8;

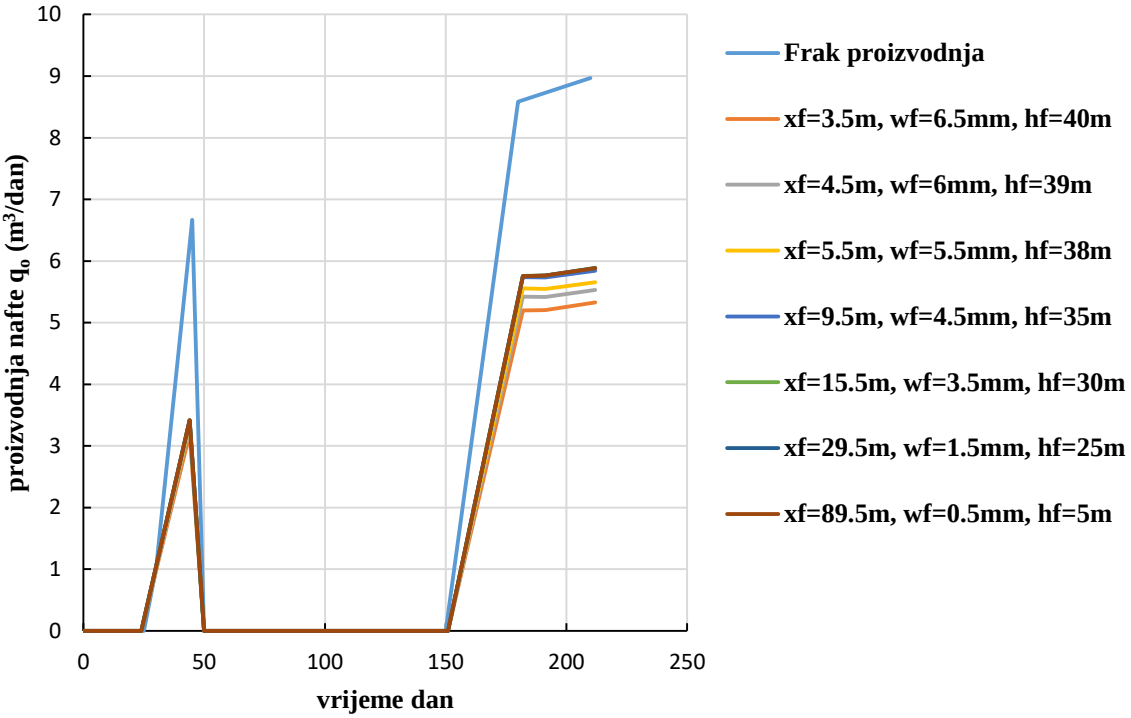
Efektivnom vodljivosti – 6334 mD×m.

Sukladno rezultatima interpretacije porasta tlaka, krenulo se s frakturom prikazanom na slici 4-7., s propusnosti 25 000 mD (F_{cD}=*cca. 14).*



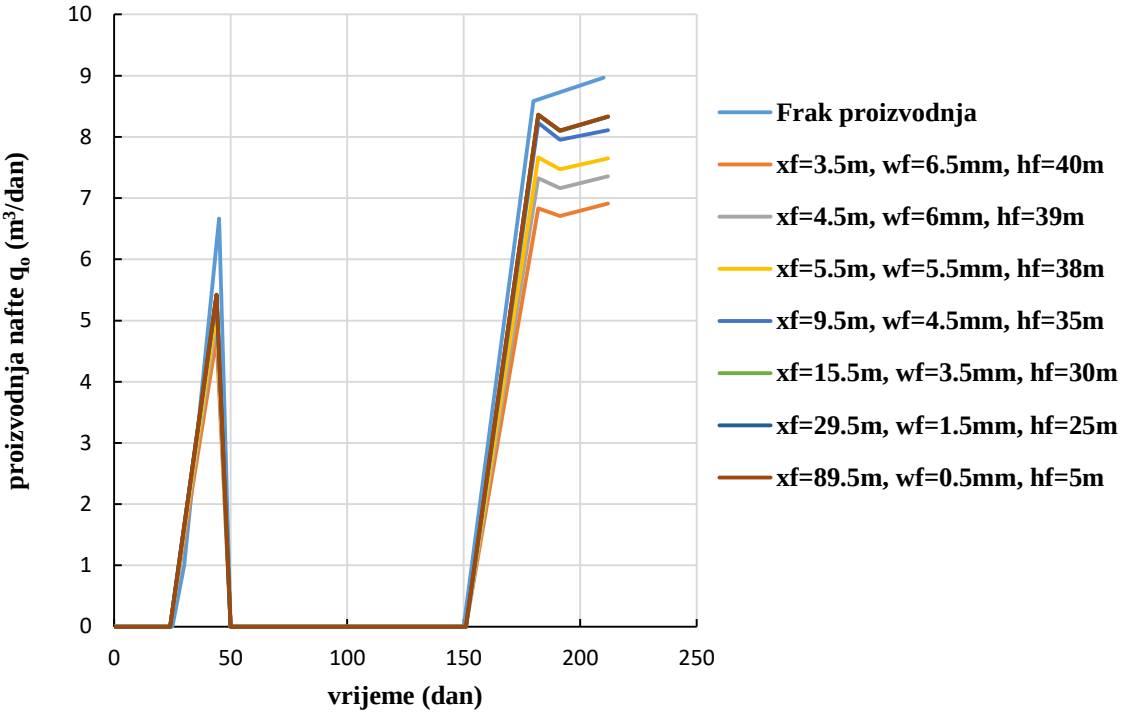
Slika 4-7. Model frakture xf=3,5m, wf=6,5mm, hf=40m u softweru „Eclipse“

Simulacija pokazuje kako model dobro prati trendove proizvodnje, no količina proizvedene nafte ne odgovara stvarnoj proizvodnji. Stoga se pokušava povećati dimenzije frakture, no i dalje ne daje zadovoljavajuće rezultate (slika 4-8.).



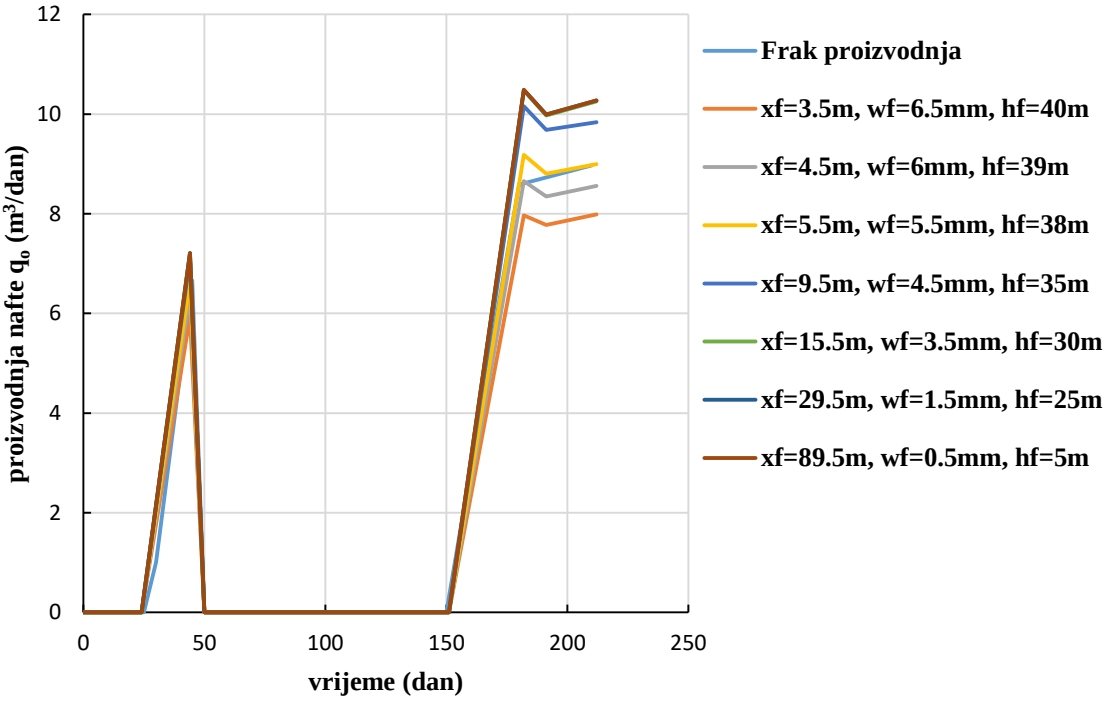
Slika 4-8. Usporedba simuliranih i stvarnih (Frak proizvodnja) rezultata proizvodnje nafte za različite geometrije frakture propusnosti 25 000 mD

Idući model simulira frakturu propusnosti 50 000 mD. Ovaj model pokazuje da mijenjanje propusnosti uvelike sudjeluje u proizvodnim karakteristikama bušotine i približio je vrijednosti simulacije stvarnim vrijednostima. Mijenjanjem dimenzija frakture pokušalo se dobiti poklapanje s stvarnim vrijednostima, no i dalje nisu dobiveni zadovoljavajući rezultati kao što se vidi na slici 4-9.



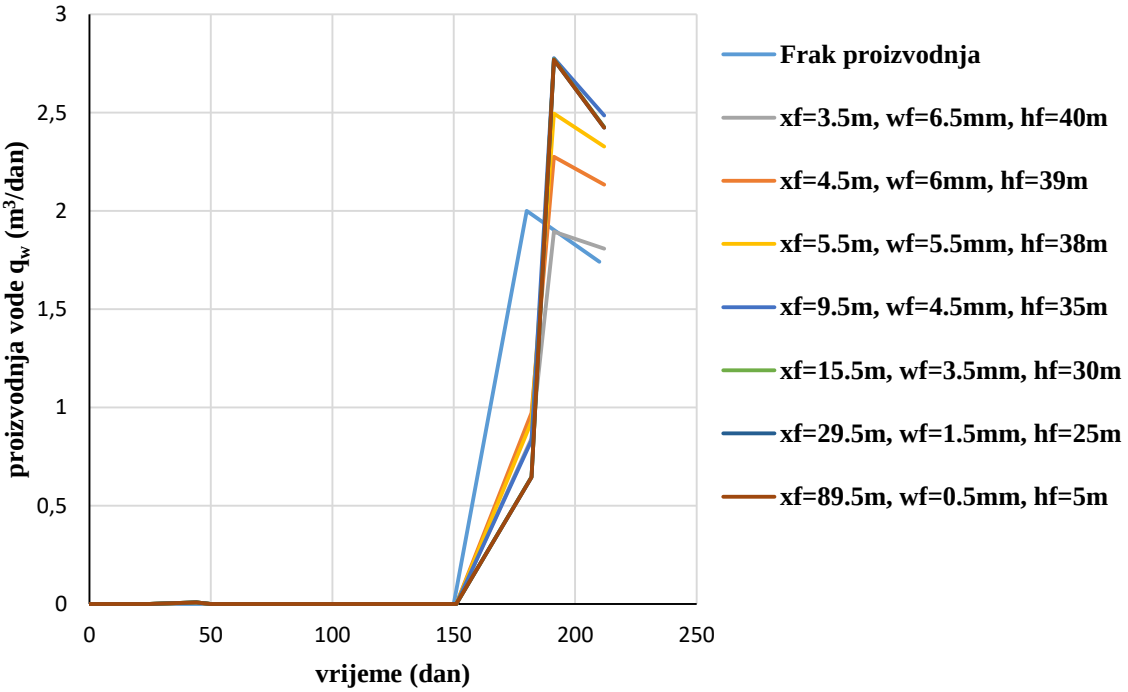
Slika 4-9. Usporedba simuliranih i stvarnih (Frak proizvodnja) rezultata proizvodnje nafte za različite geometrije frakture propusnosti 50 000 mD

Idući model simulira frakturu propusnosti 75 000 mD. Rezultati ove simulacije poklapaju se sa stvarnim vrijednostima proizvodnje, a tijekom mijenjanja dimenzija frakture, pokazalo se da fraktura poluduljine 5,5 m, visine 38 m i širine 5,5 mm daje najbolje poklapanje sa stvarnim vrijednostima (slika 4-10.).

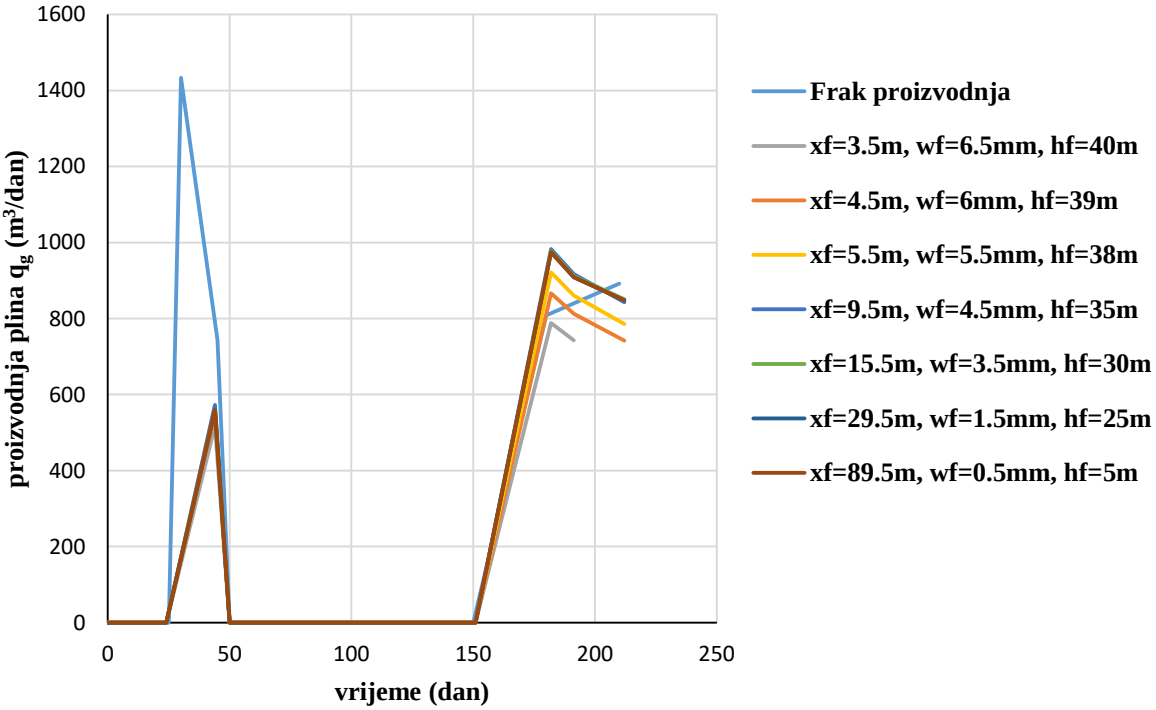


Slika 4-10. Usporedba simuliranih i stvarnih (Frak proizvodnja) rezultata proizvodnje nafte za različite geometrije frakture propusnosti 75 000 mD

Ovaj model pokazuje i poklapanje s trendovima proizvodnje vode i plina, iako uz manju točnost kao što se vidi na slikama 4-11 i 4-12.

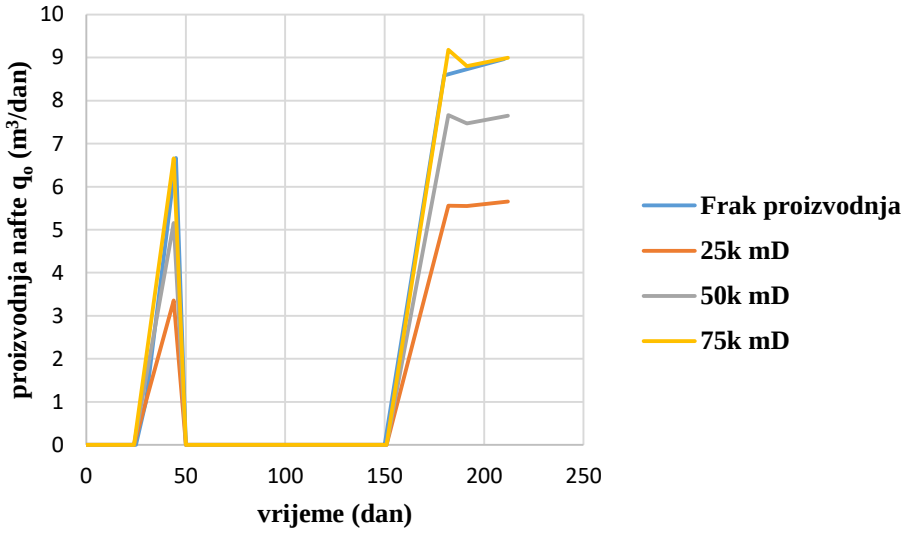


Slika 4-11. Usporedba simuliranih i stvarnih (Frak proizvodnja) rezultata proizvodnje vode za različite geometrije frakture propusnosti 75 000 mD

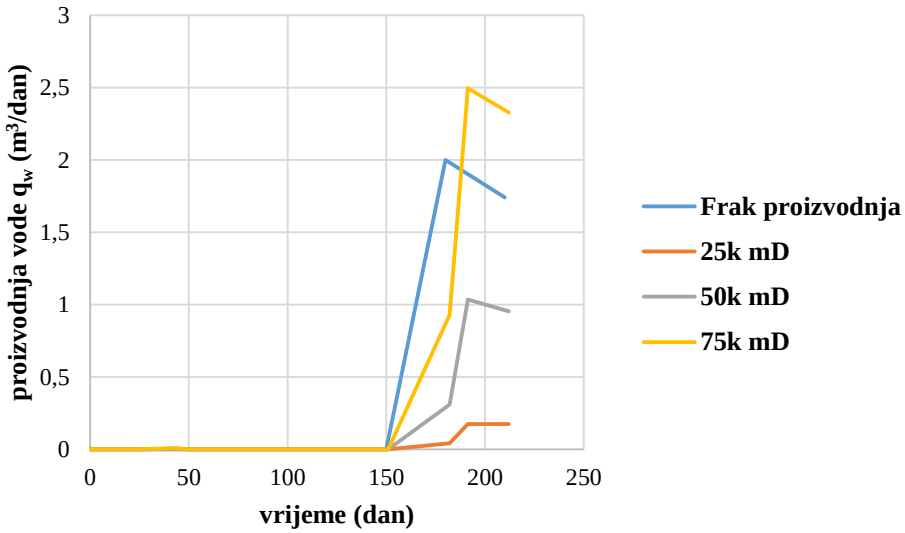


Slika 4-12. Usporedba simuliranih i stvarnih (Frak proizvodnja) rezultata proizvodnje plina za različite geometrije frakture propusnosti 75 000 mD

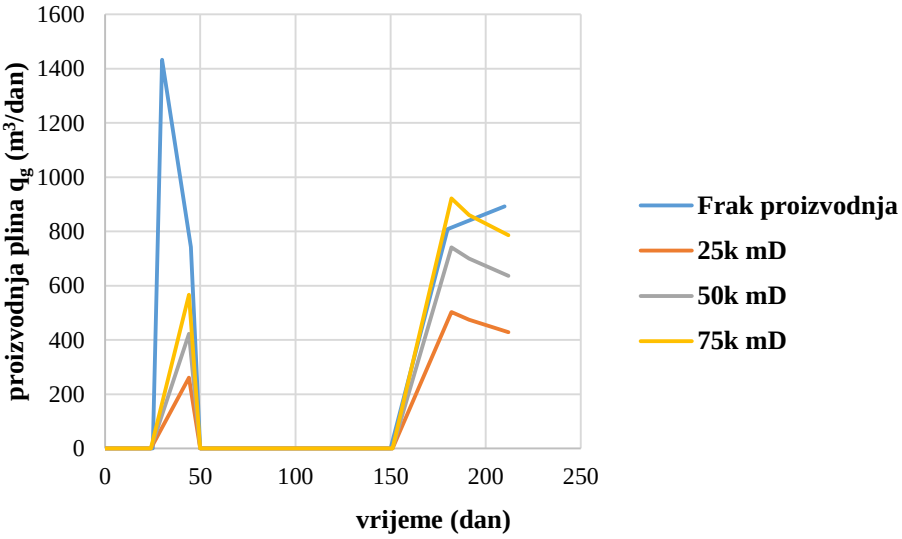
Na slikama 4-13., 4-14. i 4-15 prikazan je utjecaj različitih vrijednosti propusnosti na proizvodne karakteristike frakturirane bušotine za odabranu frakturu poluduljine 5,5 m, visine 38 m i širine 5,5 mm



Slika 4-13. Usporedba simuliranih i stvarnih (frak proizvodnja) rezultata proizvodnje nafte za frakture poluduljine 5,5 m, visine 38 m i širine 5,5 mm s različitim propusnostima

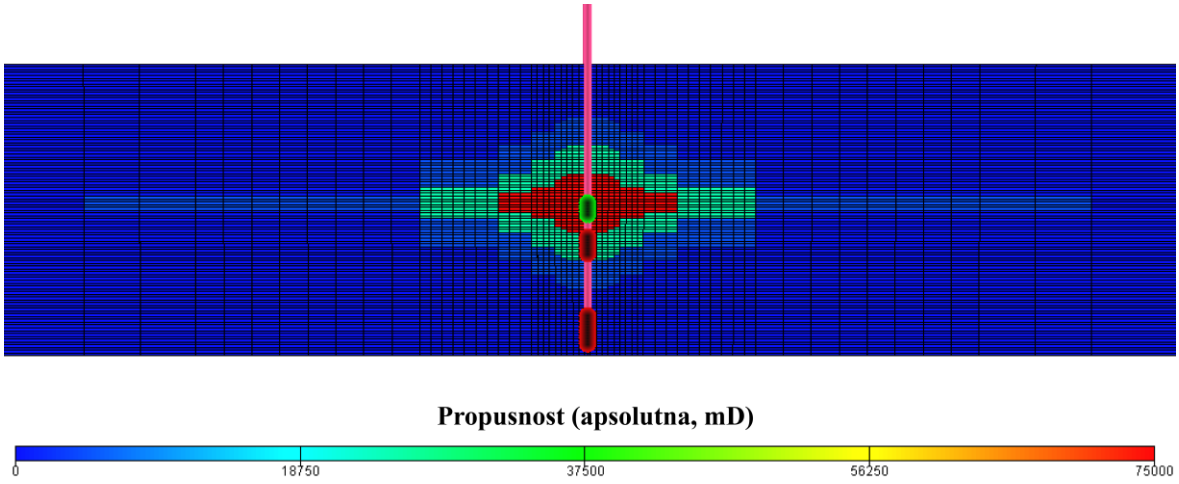


Slika 4-14. Usporedba simuliranih i stvarnih (frak proizvodnja) rezultata proizvodnje vode za frakture poluduljine 5,5 m, visine 38 m i širine 5,5 mm s različitim propusnostima



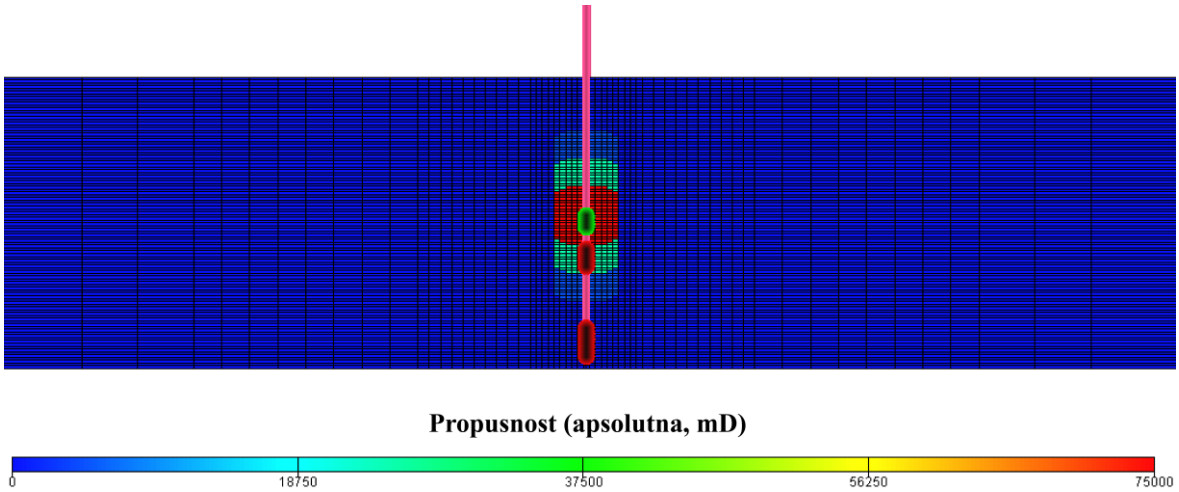
Slika 4-15. Usporedba simuliranih i stvarnih (frak proizvodnja) rezultata proizvodnje plina za frakture poluduljine 5,5 m, visine 38 m i širine 5,5 mm s različitim propusnostima

Prilikom poklapanja (engl. *history matchinga*) razmatrane su različite dimenzije frakture. Pretpostavka je da fraktura svojim rastom u smjeru x osi gubi visinu i širinu, a s tim i vodljivost sve dok tlak frakturiranja ne padne ispod tlaka zatvaranja pukotine što označava kraj širenja frakture. To je vidljivo na slici 4-16 gdje je prikazan slučaj frakture s poluduljinom frakture 89,5 m.



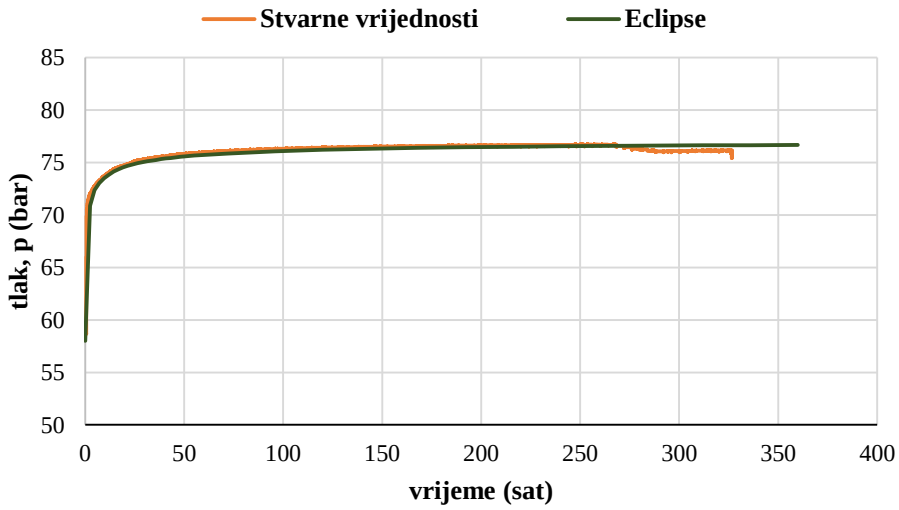
Slika 4-16. Model frakture poluduljine 89,5 m, širine 0,5 mm, visine 5 m

Odabrana fraktura duljine 5,5 m, širine 5,5 mm i visine 38 m najbolje se podudara sa stvarnim proizvodnim vrijednostima. Izgled odabrane frakture prikazan je na slici 4-17.



Slika 4-17. Model odabrane frakture poluduljine 5,5 m, visine 38 m i širine 5,5 mm

Osim podudaranja s proizvodnjom, odabrana fraktura mora zadovoljiti i vrijednosti pridobivene testom porasta tlaka. Stoga se u simulaciji bušotina zatvara i prati porast tlaka. Rezultati usporedbe vrijednosti tlaka za stvarne vrijednosti tlaka i vrijednosti simulacije u software-u „Eclipse“ prikazani su na slici 4-18.



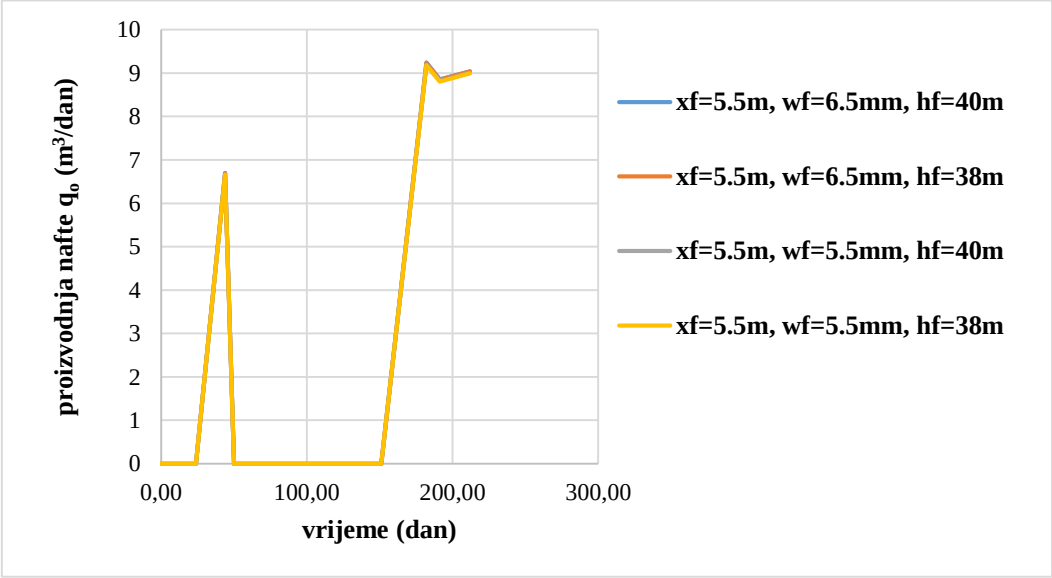
Slika 4-18. Usporedba rezultata simulacije u Eclipse-u i stvarnih vrijednosti mjerenog tlaka

Iz rezultata je vidljivo da se vrijednosti parametara u modelu, a posebno propusnosti, skina i tlaka podudaraju sa stvarnim vrijednostima. Za odabranu frakturu promatra se utjecaj promjene geometrije za utjecaj na proizvodne karakteristike bušotine za slučajeve A, B i C navedene u tablici 4-3.

Tablica 4-2. Slučajevi za prikaz utjecaja promjene geometrije frakture na proizvodnju

Slučaj	Geometrija
A	x_f=5,5 m, w_f=6,5 mm, h_f =40 m
B	x_f =5,5 m, w_f =6,5 mm, h_f =38 m
C	x_f =5,5 m, w_f =5,5 mm, h_f =40 m
Odabrana fraktura	x_f =5,5 m, w_f =5,5 mm, h_f =38 m

Usporedba dotična 3 slučaja odabrane frakture prikazana na slici 4-19.



Slika 4-19. Utjecaj promjene geometrije za odabranu frakturu poluduljine 5,5 m

Iako se rezultati skoro poklapaju, iz vrijednosti u tablici 4-4. vidljiv je utjecaj pojedine geometrije na proizvodnju fluida za zadnju točku simulacije.

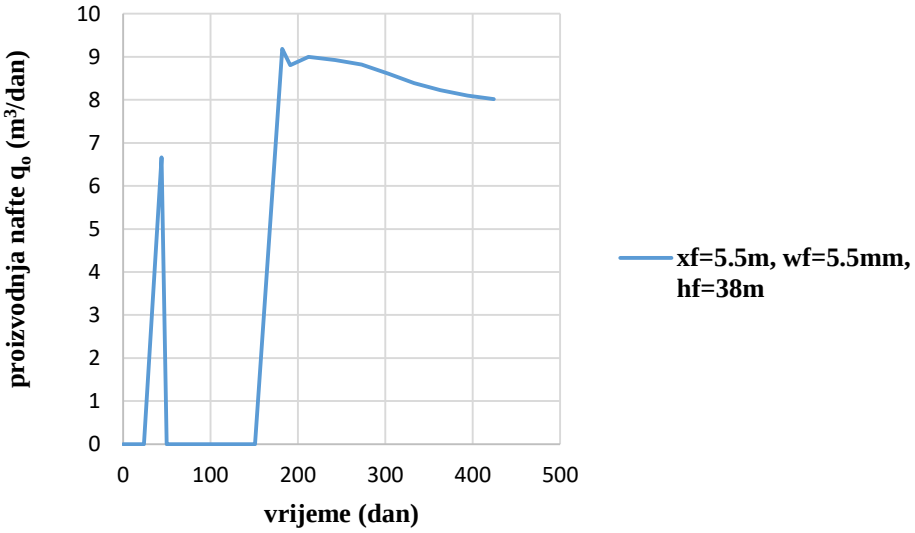
Tablica 4-3. Vrijednosti proizvodnje ležišnih fluida za različite geometrije frakture

	A	B	C	Odabrana fraktura	Stvarni rezultati
q_o (m^3/d)	9,038905	9,040845	9,00325	8,99865	8,97
q_w (m^3/d)	2,619498	2,448813	2,466514	2,327522	1,74
q_g (m^3/d)	784,1338	788,1398	780,7529	785,6884	892.086
Water cut (%)	0,224688	0,213132	0,215045	0,205499	0,16265

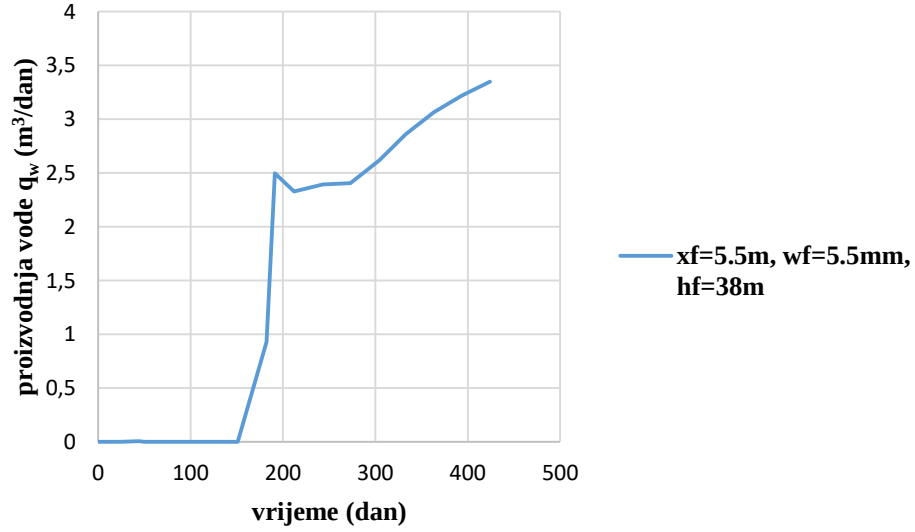
Iz tablice je vidljiv trend pada proizvodnje nafte uz promjene u udjelu proizvodnje vode i plina. Smanjenje širine u slučaju C najviše je utjecalo na pad proizvodnje nafte uz zadržavanje relativno visoke proizvodnje vode te najnižu proizvodnju plina. Manja visina u

slučaju B uzrokovala je manji dotok vode iz zavodnjenih dijelova ležišta uz blago povećanje dotoka nafte i plina.

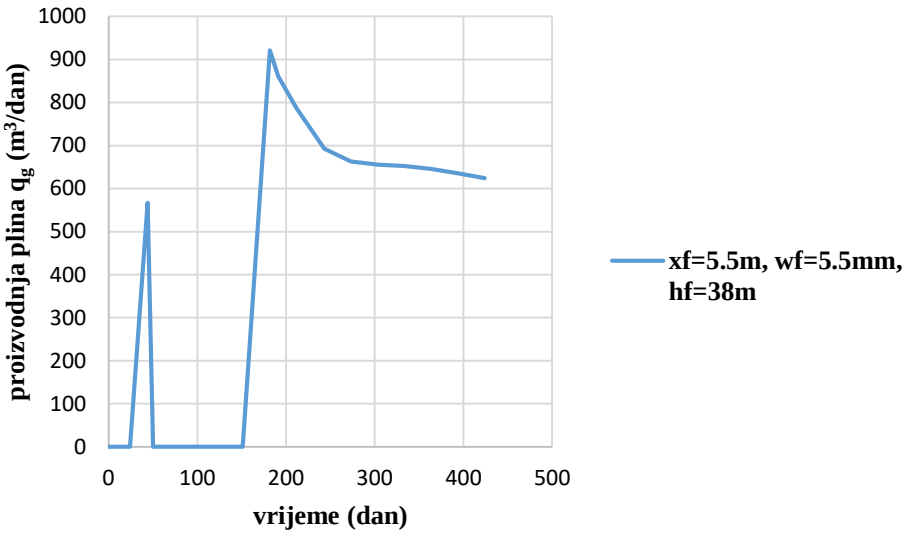
Rezultati nastavka simulacije za odabranu frakturu poluduljine 5,5 m, visine 38 m i širine 5,5 mm do 30.5.2018 prikazani su na slikama 4-20., 4-21 i 4-22. Nastavkom proizvodnje dolazi do pada proizvodnje nafte i plina uz povećanu proizvodnju vode



Slika 4-20. Nastavak simulacije s rezultatima proizvodnje nafte



Slika 4-21. Nastavak simulacije s rezultatima proizvodnje vode



Slika 4-22. Nastavak simulacije s rezultatima proizvodnje plina

5. ZAKLJUČAK

Hidrauličkim frakturiranjem bušotine polja X uspješno je povećana proizvodnja nafte iz pješčenjaka ležišta 1 uz zadržavanje visine frakture i sprječavanje ulaska u zavodnjena ležišta. Iako nije vidljiva fraktura na dijagramima testa porasta tlaka, proizvodni pokazatelji dokaz su uspješnoj stimulaciji. Numeričkim simulacijama u „E100“ postignuto je poklapanje proizvodnih podataka i krivulje porasta tlaka no uz promjene modela. Tako je najbolje poklapanje pokazala fraktura poluduljine 5,5 m, širine 5,5 mm i visine 38 m s najvećom apsolutnom propusnosti u središtu frakture od 75 000 mD. Korištenje propusnosti i poluduljine frakture priložene u izvještaju frakturiranja tvrtke „Schlumberger“ rezultiralo bi nerealnim vrijednostima, no zato su se vrijednosti širine i visine frakture poklopile s modelom. Promjena geometrije za zadanu frakturu pokazala je da širina ima veći utjecaj na proizvodnju nego visina i direktno utječe na vodljivost frakture.

6. LITERATURA

1. AMIN, A., 2012. Well Test Analysis of Infrequent Flow Behavior of Fractured Wells in Oil and Gas Reservoirs, SPE 149887, London
2. BENNETT, L., CALVEZ, J.L., SARVER, D.R., TANNER, K., BIRK, W.S., WATERS, G., DREW, J., MICHAUD, G., PRIMIERO, P., EISNER, L., JONES, R., LESLIE, D., WILLIAMS, M.J., GOVENLOCK, J., KLEM, R.C., TEZUKA, K., 2005. The source for Hydraulic Fracture Characterization, Oilfield Review Winter 2005/2006.
3. CINCO-LEY, H., SAMANIEGO, V., DOMINIGUEZ A., 1978. Transient Pressure Behavior for a Well With a Finite-Conductivity Vertical Fracture. Society of Petroleum Engineers Journal 18, SPE-6014-PA
4. CINCO-LEY, H., SAMANIEGO, V., 1981. Transient Pressure Analysis: Finite Conductivity Fracture Case Versus Damaged Fracture Case. SPE-10179-MS, San Antonio
5. ECONOMIDES, M., OLIGNEY, R., VALKO, P., 2002. Unified Fracture Design. Orsa Press, Texas
6. ECONOMIDES, M., 2007. Modern Fracturing Enhancing Natural Gas Production, 2007. Energy Tribune Publishing Inc, Houston.
7. GRINGARTEN A.C. 2010. Well Test Analysis Course Notes, Imperial College.
8. GRINGARTEN, A.C., RAMEY, H.J., Jr., RAGHAVAN, R. 1975, Applied Pressure Analysis for Fractured Wells, Journal of Petroleum Technology 27, SPE-5496-PA
9. HAWKINS, M.F., 1956. A Note on the Skin Effect, Society of Petroleum Engineers, SPE-732-G
10. HORNE R.N., 1995. Modern Well Test Analysis, a Computer Aided Approach
11. LEE, J. 1982. Well Testing. Society of Petroleum Engineers of AIME, New York
12. NASHAWI, I.S., MALLALAH A.H., 2007. Well Test Analysis of Finite Conductivity Fractured Wells Producing at Constant Bottom Hole Pressure. Journal of Petroleum Science and Engineering 57.
13. NOLTE K.G, SMITH M.B., 1981. Interpretation of Fracturing Pressures. Society of Petroleum Engineers, SPE-8297-PA
14. PETTERSEN O., 2006. Basics of Reservoir Simulation with the Eclipse Reservoir Simulator. University of Bergen

15. SCHLUMBERGER, 2015. ECLIPSE Blackoil Reservoir Simulation - Reference Manual
16. VINEGAR, H.J., WILLS, P.B., DeMARTINI, D.C, SHIYAPOBERSKY, J., DEEG, W.F.J., ADAIR, R.G., WOERPEL, J.C., FIX, J.E., SORRELIS, G.G., 1992. Active and Passive Seismic Imaging of a Hydraulic Fracture in Diatomite. Society of Petroleum Engineers, SPE-22756-PA

Web izvori:

17. KAPPA, 2018.
URL: https://www.kappaeng.com/software/saphir/overview (22.10.2018.)
18. SCHLUMBERGER, 2018.
URL: https://www.software.slb.com/products/eclipse (22.10.2018.)
19. URL: https://pet-oil.blogspot.com/2016/10/pressure-transient-analysis-in-drawdown.html (22.10.2018.)

Pri izradi rada korišteni su programski paket Kappa unutar kojeg se nalazi Ecrin s modulom Saphir, te ležišni simulator Eclipse tvrtke Schlumberger, tj. akademske licence dotičnih softverskih paketa doniranih od kompanija Kappa i Schlumberger Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu

For the purpose of this Master Thesis, the Kappa software package, which includes Ecrin with the Saphir module, and the Schlumberger Eclipse simulator have been used. The academic licenses of the relevant software packages were donated by Kappa and Schlumberger to Faculty of Mining Geology and Petroleum Engineering.

Zahvaljujem inženjerima u INI d.d. na savjetima koji su mi pomogli pri izradi ovog diplomskog rada, a posebno g. Željku Habijanecu i gđi. Marini Kajbi za izdvojeno vrijeme, savjete i materijale koje su pružili.

I would like to thank petroleum engineers in INA d.d. that helped me with my master's thesis, especially Mr Željko Habijanec and Mrs Marina Kajba for their time, advices and materials.

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad samostalno izradio.

_____

Ivan Kesić